Análisis de la integración de sistemas (SIG, GPS y PDA) para aplicaciones medioambientales "in situ"

I. Quintanilla García, J. L. Berné Valero, A. Gallego Salguero y G. Donaire Salas

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia (España).

RESUMEN

En primer lugar se realiza un estudio sobre la integración de tecnologías SIG y GPS en PDA. Así, se analiza la diferente tipología de software capaz de gestionar la cartografía en una PDA, los distintos formatos raster y vectorial y su operatividad en el entorno de PDAs, así como distintos tipos de posicionamiento. Con este análisis y en función de las características específicas de la aplicación medioambiental en cuestión, se opta por la utilización de la metodología propuesta para llevar a cabo un estudio de impacto ambiental en el termino municipal de Sueca (Valencia), donde se demuestra la operatividad del sistema.

***Palabras clave**: impacto ambiental, usos del suelo, GPS, PDA, SIG.*

ABSTRACT

This article presents an analysis about the integration of Technologies GIS y GPS into PDAs and its later real application in a environmental impact study noticing the advantages that offer the possibility of doing this study "in situ". By this way, it is analyzed the different software typology which can manage the cartography in a PDA, focusing in the different GIS that nowadays are on the market. Likewise, it is studied the different raster and vectorial formats of the cartography analyzing the ratio resolution/size and its operability in the PDA's scene. In the same way, it has been done lots of proves with different receivers and GPS positioning, from GPS browsers to differential positioning in code and phase. Having this analysis and depending on each specific feature of the environmental application, it is decided to make use of the conclusive methodology in order to do an environmental impact

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

study in the municipality of Sueca (Valencia), where it is shown the system operability contrasting with the one that do not use this technologies.

Key Words: *Environmental study, land uses, GIS, GPS, PDA, in situ.*

INTRODUCCIÓN

Se aborda aquí un estudio sobre la integración de nuevas tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) el GPS y las PDAs. A lo largo del trabajo se abordarán los aspectos más interesantes y atractivos de estas tecnologías disponibles hoy en el mercado, y se analizará dicha integración sobre una aplicación medioambiental real.

PDA (*Personal Digital Assistance*)

Dentro de este concepto se diferencian principalmente dos tipos de PDAs: las ***Palm***, más extendidas en Estados Unidos, y que fueron los primeros que desarrollaron un software propio (PalmOS), y las ***Pocket PC***, más extendidas en Europa, donde se distinguen diferentes marcas (Hp, iPAQ, Cassiopeia…) y que trabajan sobre el sistema operativo Windows CE.

Existen ciertas diferencias entre ambas PDAs, tales como la comentada del sistema operativo o que el sistema de baterías de las Palm es más duradero, mientras que Pocket PC necesita alimentarse urgentemente después de 7 horas. No obstante, para la elaboración de esta aplicación se ha optado por las Pocket PC por su mayor disponibilidad de componentes o periféricos en Europa, así como por utilizar un sistema operativo ya conocido. Asimismo, otro aspecto importante es el de la programación en este sistema operativo, ya que se programa en Visual Basic CE, que es un lenguaje de programación orientado a objetos, y más conocido y utilizado que el lenguaje de programación de las Palm.

Dentro de las **Pocket PC**, existe una gran gama de casas comerciales y modelos con diferentes características. En el siguiente cuadro se comparan cinco de las casas más representativas y diferentes modelos.

Cuadro 1. Comparativa Pocket PC.

Modelos Pocket PC	Compaq iPAQ serie H3760	Compaq iPAQ serie H38xx	HP Jornada Serie 56x	Casio E-200	Toshiba Genio e550 Audiovox Maestro	NEC MobilePro P300
Tipo de procesador y velocidad	Intel Strong ARM 5A-1100 RISC de 32 bits a 206 Mhz					

MB de RAM	64	64	565: 32 568: 64	64	Genio e550: 64 Maestro: 32	32
MB de ROM	32 (Flash, es decir, actualizable)					
Número de ranuras de serie (ver siguientes)	1	1	1	2	2	2
Ranura Compact Flash de serie	No	No	Sí, de tipo I	Sí, de tipo II	Sí, de tipo II	Sí, de tipo II
Ranura SD/MMC de serie	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Puertos	Puerto serie, USB (esclavo) e infrarrojos (IrDA)					
Puerto USB maestro	No	No	No	Sí, vía craddle	No	Sí
Bluetooth de serie	No	H3850: No H3870: Sí	No	No	No (posible tarjeta SD)	No
Audio	Stereo (micrófono, altavoz, salida de cascos)					
Tipo de pantalla	TFT LCD reflectiva					
Pantalla en pulgadas (resolución en píxeles)	3,8 (320x240)		3,5 (320x240)			3,8 (320x240)
Número de colores	4.096	65.536				
Tipo de batería (extraíble, duración en horas)	Polímero de litio de 950 mAh (no, 9)	Polímero de litio de 1400 mAh (no,9)	Polímero de litio (sí, hasta 14)	Ión litio de 950 mAh (sí, hasta 10)	Ión litio (no, 8)	Ión Litio (no, hasta 12)
Batería de emergencia (duración descargada la batería)	No	No	Sí	Sí	Sí (30 horas)	No
Expansión mediante chaquetas	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Chaquetas anunciadas	Pendiente	Pendiente	Pendiente	Pendiente	No aplicable	PCMCIA con batería
Tapa	No	No	Sí, extraíble	No	No	Sí, extraíble
Peso (con batería)	179 gr	190 gr	173 gr	190 gr	180 g	200 gr
Medidas (Al x An x Fo) expresadas en mm.	130 x 81 x 16	135 x 81 x 16	132 x 76 x 17	130 x 83 x 17	125 x 77 x 17,5	120 x 78 x 18,5

Precio según el fabricante en Euros	499 €	H3850: 599 € H3870: 649 €	565: 599 € 568: 649 €	599 €	Genio e550: 569 €	599 €
Modelos Pocket PC	Compaq iPAQ serie H3760	Compaq iPAQ serie H38xx	HP Jornada Serie 56x	Casio E-200	Toshiba Genio e550 Audiovox Maestro	NEC MobilePro P300

En función de nuestros objetivos, existen una serie de características que nos indican la elección de la Pocket PC. tales como la memoria, la velocidad del procesador, el precio y la variabilidad de periféricos. De esta forma y en función de estas características se optó por la utilización de la iPAQ 3760 caracterizada principalmente por:

Mb de ROM	32 (flash, actualizable)
Mb de RAM	64
Procesador	Intel Strong ARM 5A-1100 RISC de 32 bits a 206 Mhz
Precio	499 euros
Sistema Operativo	Windows CE

Siendo uno de los aspectos más importantes la posibilidad de conexión a otros periféricos (navegadores GPS, módulos GSM/GPRS, módulo BluePAQ, módem telefónico, cámara de fotos digital,…). Para ello, esta Pocket PC dispone de un acceso SD/MMC de serie con 14 pines que permitirá dichas conexiones.

POSICIONAMIENTO

Existe la posibilidad de integrar distintos receptores y sistemas de posicionamiento GPS en la mayoría de las Pocket PC y evidentemente en la iPAQ 3760. De esta forma, es posible utilizar ***posicionamiento diferencial de fase*** (RTK, Real Time Kinematic) para aplicaciones en las que se requiera alta precisión, o ***posicionamiento absoluto*** a través de navegadores GPS. Para ello se utilizan interfaces específicos que permitan entradas RTCM o NMEA respectivamente. Se han realizado diversas pruebas con RTK analizando la operatividad del sistema integrado RTK-PDA y su amplio campo de aplicación en conjunción con los SIG. No obstante, como consecuencia de las características específicas de nuestra aplicación, la precisión ofrecida por el posicionamiento absoluto era más que suficiente, máxime cuando existía una comprobación *in situ* de la bondad del posicionamiento al disponer en el terreno de la cartografía digital asociada. Además la manejabilidad y tamaño de los navegadores GPS aumentan la operatividad del sistema integrado GPS-SIG-PDA

Existen dos posibilidades operativas de conjunción entre ***navegadores GPS y PDAs***:

- Mediante un cable que tenga las conexiones adecuadas para cada navegador GPS y PDA.
- Mediante el acoplamiento a la PDA del accesorio específico de *Navegador vía satélite*.

En el primer caso, nosotros hemos trabajado con el navegador ***GPS III plus*** de ***Garmin.***

En el segundo caso, y para las iPAQ Pocket PC, el módulo se denomina **GPS3000 NAVMAN** (figura 1) y está compuesto por un sistema GPS-iPAQ compactado, aunque hay que destacar que es algo costoso (667 euros) para ser de uso especifico con la PDA.

No obstante, se realizaron pruebas con los dos sistemas llegando a la conclusión de que cualquiera de los dos era igual de válido para aplicaciones que no requieran de elevadas precisiones.

Para concluir diremos que operando conjuntamente con el sistema integrado GPS-PDA tenemos la posibilidad de introducir nuestra propia cartografía en el sistema, y de esta forma, no depender de la cartografía específica que las casas comerciales ofrecen, con las ventajas que esto conlleva.

Figura 1. Modulo GPS-PDA.

CARTOGRAFÍA DE USO EN PDAs

Distinguimos dos tipos de cartografía aplicables a las PDAs: la vectorial y la raster, cada una con sus aplicaciones específicas. Entendemos por ***cartografía vectorial*** aquélla que representa los objetos espaciales codificando, de modo explícito, sus *fronteras* (el límite o perímetro que separa el objeto del entorno), representando éstas mediante las coordenadas de los puntos o vértices que delimitan los segmentos rectos que los unen; y entendemos por ***cartografía raster***, aquélla que, en vez de codificar las fronteras de los objetos, se registra el interior, de forma que sus límites quedan implícitamente representados; esta codificación se realiza superponiendo el mapa analógico frente a una rejilla de unidades regulares *(píxel)* donde se registra el valor que el mapa analógico adopta.

Conviene analizar estos dos tipos de cartografía digital en función de los recursos propios de un ordenador o PDA. Para un mapa convencional (tipo raster) necesita muchos más recursos (cuadro 2) que cuando usamos el mismo mapa creado vectorialmente. Es importante

destacar que cuando hablamos de un mapa convencional no importa el método que hayamos usado para comprimirlo, pues en la compresión sólo aliviaremos el espacio que usamos en el disco duro para guardar la imagen, pero una vez que usamos el mapa en un programa, éste lo descomprime en la memoria en toda su extensión, ocupando gran parte de los recursos del sistema. En el siguiente cuadro se comparan ambos tipos de cartografía y los recursos necesarios para su uso, siendo evidente la alta dependencia existente entre los distintos campos del cuadro (claro ejemplo entre resolución y tamaño ocupado).

Como ya vimos, es importante destacar que actualmente uno de los problemas de las PDAs es la relativamente baja disposición de los recursos del microprocesador utilizado, motivo por el cual se debe tener en consideración lo anteriormente expuesto.

A continuación se mostrarán las diferentes características de estos dos tipos de cartografía orientada a los Sistemas de Información Geográfica.

Cuadro 2. Comparativa raster/vectorial.

	Mapa Convencional (Ráster)	Mapa vectorial
Espacio en disco duro	Elevado (*1)	Bajo
Espacio en memoria	Elevado	Bajo
Resolución	Elevada	Baja
Procesamiento (*2)	Lento	Rápido
Creación	Dibujo directo, escáner	Proceso digital o manual

(*1) Excepto si se usan algoritmos de compresión incluidos en los formatos TIFF LZW, GIF, JPG, PNG, etc.
(*2) Tiempo de carga en la memoria desde el disco duro, desplazamientos en la pantalla, etc.

Representación raster en los SIG

Ventajas:

- Facilidad de captura de datos con un escáner
- Estructura de datos simple (pixels)
- Sencillez de manejo: técnicas de gestión y algoritmos de tratamientos
- Sencillez en procesos de comparación “pixel a pixel” (operaciones de superposición de mapas)
- Trata eficientemente datos de variación espacial alta
- Formato adecuado para el tratamiento y realce de imágenes digitales
- Representa fenómenos variantes en el espacio
- Simulación y modelaje son más fáciles
- Análisis geográfico rápido

Inconvenientes:

- Los mapas temáticos ocupan mucho espacio en memoria

- La representación en cuadrículas o pixels es poco adecuada para representar entidades lineales
- La técnica raster tiene en general poca precisión en los cálculos de superficie, distancias, etc. a menos que se disminuya la anchura del pixel lo cual compromete el espacio y la ligereza del sistema
- Ciertas relaciones topológicas son más difíciles de representar
- La representación final puede ser menos estética
- Posible pérdida de resolución y difícil asociar atributos

Representación vectorial en los SIG

Ventajas:

- Estructura de datos más compacta (menos espacio de almacenamiento)
- Representación de entidades geográficas muy precisas
- Permite medir distancias, superficies y volúmenes de forma más precisa
- Codificación eficiente de la topología (mejora el análisis de redes, entre otros)
- Gestión individualizada de las entidades geográficas
- Modifica fácilmente la escala y grado de detalle de un mapa gráfico
- Más adecuado para generar salidas gráficas
- Mapa representado en la resolución original

Inconvenientes:

- Captura de datos más compleja y costosa
- Estructura de datos más compleja (puntos, líneas y polígonos)
- Poco eficiente cuando la variación de los datos es alta
- Es imposible el tratamiento de imágenes digitales, o es poco eficaz
- Operaciones de superposición de mapas son difíciles de implementar, así como los análisis y simulaciones en tiempo real.

Es evidente, por tanto, que cada usuario deberá ser conocedor de las ventajas e inconvenientes de cada tipo de cartografía en función de la aplicación objeto de estudio, para conseguir de este modo optimizar el rendimiento de las mismas. Así, marcando unas directrices generales, podemos decir que para aquellas aplicaciones que requieran menor precisión y la información del mapa sea fundamental, es aconsejable utilizar el formato raster, mientras que cuando sea necesaria alta precisión y se requiera cualquier tipo de análisis entre entidades sugerimos la utilización de la cartografía vectorial.

SOFTWARE ASOCIADO A LAS PDAs

Como consecuencia de la evolución constante de estas tecnologías, el distinto tipo de software asociado a las PDAs mantiene un actualización constante de un amplio mercado

de programas para estos dispositivos, motivo por el cual, resulta en extremo difícil realizar un extenso análisis de los mismos. No obstante, siempre existen programas específicos de gran calidad y versatibilidad que perduran como líderes del mercado. De esta forma, y centrándonos en nuestro objetivo, podemos distinguir dos tipos software asociado a nuestras aplicaciones:

- software cuya función principal es la ***navegación***
- software de gestión de ***SIG*** y/o con funciones de ***CAD***.

Dentro de los primeros distinguimos en primer lugar, y sin ningún lugar a duda, el ***Oziexplorer CE*** debido a su amplia gama de opciones disponibles y su facilidad de manejo, y en segundo lugar el ***Fugawi***. Ambos programas operan en formato raster, y nos permiten calibrar mapas, obtener la posición en tiempo real, y crear y obtener rutas y waypoints, además de otras funciones diversas, pero el Oziexplorer es un programa visualmente mejor esquematizado y más fácil de aprender y de manejar que el Fugawi.

En cuanto al software especifico para SIG y/o CAD destacan el *Pocket GIS*, el *ArcPad* y el *ProCad GPS*. Todos ellos tienen la posibilidad de trabajar tanto en formato raster como vectorial, y conectados con GPS también permiten la función de navegación.

Pocket GIS. Utiliza una gran diversidad de formatos y datos (MapInfo, ArcView, AutoCAD, NTF, TIFF, BMP,…) y evidentemente mantiene la función de enlace con las bases de datos asociadas. Este programa posee una amplia variedad de funciones para visionar y corregir geometría y cualidades del mapa. De esta forma, permite identificar características singulares del mapa, medir distancias, modificar la geometría del mapa, capturar datos conjuntamente con el GPS.

ArcPad (ESRI). Permite distintos formatos de datos además del propio de ESRI (Shapefile), tales como MrSID de LizardTech, JPEG, Mapa de bits de Windows,… En cuanto a sus funciones permite crear, corregir, suprimir, y mover las características de los elementos, como puntos, líneas y polígonos. De igual forma, hace posible la captura de puntos y líneas con el GPS.

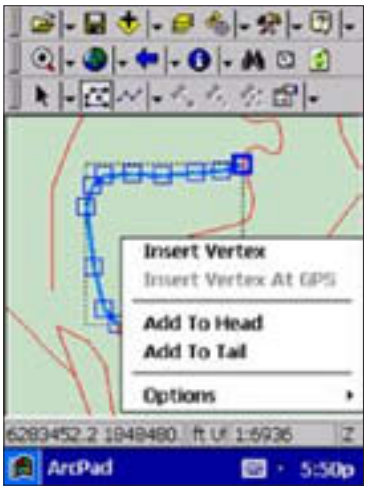


Figura 2: ArcPad

ProCad GPS. La cartografía que utiliza puede ser sobre ficheros vectoriales o raster. Este programa nos permite tener todo en un mismo paquete, es decir, un sistema CAD/SIG, que además ofrece la capacidad de posicionamiento mediante un navegador GPS o RTK en tiempo Real.

La aplicación más inmediata entre un CAD/GIS y un navegador GPS es que cada vez que se vaya a dibujar un punto, una línea, un arco, un bloque, etc., se puede activar la captura por GPS, viéndose en pantalla cómo el cursor se mueve a la posición donde se encuentra la antena. Así, si decidimos dar validez al punto, lo fijamos, y si no, seguiremos viendo cómo se mueve el cursor por la pantalla, según se desplace el usuario. De este modo pues, al unir un CAD/SIG y un navegador de GPS con una visualización y georreferenciación optima se obtendrá una herramienta muy potente.

Figura 3: ProCad GPS

Veamos ahora una descripción pormenorizada de los distintos usos y aplicaciones de este software:

CAD. Podemos observar que el programa está pensado para ser un estándar de CAD, y que dado su fácil manejo y compatibilidad con todas las Pocket PC, tendrá una buena acogida por parte de los usuarios. No obstante, las herramientas de edición necesitarán ser implementadas debida a una cierta carencia de ellas.

SIG. Sólo hay que ver el esfuerzo que se ha realizado en crear una entidad "Punto" diferente a todo lo que entendemos como CAD, para darnos cuenta que su futuro es el GIS. Los campos de datos que contiene nos lo indican claramente.

Gestión de imágenes. Son impresionantes las posibilidades que se brindan con el gestor de imágenes que aquí aparece: digitalización de planos georreferenciados y transporte a Autocad, unión de todo el territorio mediante escalado y georreferenciación, callejeros de cualquier ciudad con inclusión de fotos de monumentos, restaurantes, metros, etc., edición directa de los planos topográficos sobre imágenes de los mismos, etc.

Navegador GPS. Como todos los softwares con posibilidad de conexión con GPS, permite insertar imágenes escaneadas de cualquier plano y georreferenciarlas para realizar navegación.

Registro continuo. Permite configurar opciones de registro de puntos de forma continua, cada ciertos metros o segundos, pero no sólo puntos, sino también líneas o polilíneas en 3D.

Topografía. Debido a la posibilidad de trabajar en posicionamiento absoluto, y fundamentalmente, en diferencial RTK, y todo ello integrado con CAD/SIG, las opciones en cuanto a aplicabilidad en el mundo de la topografía quedan limitadas sólo a la imaginación del usuario.

Analizando estos tres programas, vemos que existe una marcada diferencia positiva a favor del programa ProCad GPS, por su amplia versatilidad y aplicaciones, como consecuencia de la incorporación del CAD al sistema integrado SIG/GPS. La única limitación que hemos observado es una cierta lentitud en el procesamiento de la cartografía 1/10.000 del ICV (Instituto Cartográfico Valenciano) en formato dxf como consecuencia de que una de estas hojas ocupaba aproximadamente cuatro megas; no obstante, el resto de aplicaciones de este software minimiza dicha limitación. Respecto a los otros dos programas, destacamos que el Pocket GIS es más limitado, debido a que compite con la primera marca de Sistemas de Información Geográfica del mercado: ESRI, ya que ArcPad permite introducir un mayor número de formatos así como obtener más salidas que el Pocket GIS.

APLICACIÓN MEDIOAMBIENTAL

Introducción

Se realiza un estudio de impacto ambiental del termino municipal de Sueca (Valencia). Se abordará la integración GPS/PDA y se realizará la toma de datos y navegación en tiempo real, lo que permitirá ahorrar tiempo en la toma de datos y en el posicionamiento sobre la zona que deseamos estudiar aprovechando las utilidades de este sistema integrado.

Con motivo del Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) del termino de Sueca, se realiza un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) sobre las zonas afectadas para el desarrollo correcto del PGOU.

Nuestro objetivo, con la utilización de esta aplicación es obtener un mapa de usos del suelo del termino municipal de Sueca. Para ello se han delimitado los diferentes tipos de suelo y se han seleccionado las zonas de interés medioambiental, para proceder seguidamente a su evaluación. Una vez finalizada esta tarea se obtendrán las diferentes alternativas posibles y las conclusiones, que se reflejarán en el EIA.

Obtención de la información

La información oficial de los diferentes usos del suelo del termino municipal de Sueca se obtuvo de los siguientes medios:

- Plan Rector de Usos y Gestión
- Mapa de cultivos y aprovechamientos
- Mapas de la COPUT.
- Fotografías Aéreas.

Figura 4. Unidades ambientales.

Una vez realizado el análisis de estos mapas y documentos, se obtuvieron una serie de conclusiones y usos del suelo que marcarán la actuación de este estudio. Se definieron una serie de elementos principales de estudio a partir de los cuales se llevó a cabo el análisis posterior. Como unidades ambientales se adoptaron las siguientes:

- *La restinga.* Está unidad está constituida por una amplia franja de arenas de veintiocho kilómetros de longitud que arranca de la desembocadura del río Turia y llega hasta la Montaña del Oro de Cullera.
- *Playas y dunas.* Junto a esta unidad y enfrentada al mar se encuentra la playa, una unidad homogénea desde el punto de vista geológico, perfectamente delimitada y confinada por los usos urbanísticos.
- *Arrozales.* Arrozales incluidos dentro del Parque Natural de la Albufera.
- *Muntanyeta dels Sants.* El único relieve destacado por la presencia en él de dos yacimientos paleontológicos, una cueva y una vía pecuaria que se dirige a la misma.
- *Río Júcar.* Como es de suponer esta unidad no se ve afectada por el proceso urbanizador, si bien se calcula su calidad ambiental como referencia cualitativa.
- *Cultivos citrícolas.* La siguiente unidad la conforman los cultivos de cítricos que rodean la población de Sueca y se extienden hasta el río y los propios límites de la ciudad.

Cartografía base

La cartografía base empleada en la confección del mapa de usos del suelo está formada por varios mapas 1/10000 del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV), mientras que en la aplicación de campo se han utilizado varias hojas 1/10000 del ICV, realizadas a partir del vuelo fotogramétrico entre 1991/1997 y editadas en el 1999/2000.

La georreferenciación de las hojas 1/10000 del ICV se realiza con el programa ***Oziexplorer***. Los puntos de control para la georeferenciación son las intersecciones de la cuadricula UTM de la hoja y para cada hoja se elijen 6 puntos de control con la mejor geometría posible.

Respecto al formato utilizado, si raster o vectorial, tras diversas pruebas realizadas se ha optado en este caso concreto, y para esta cartografía y resolución necesaria, por el formato raster, debido a que en formato vectorial el procesamiento de ésta era muy lento. De igual forma, otro aspecto que nos llevó a la elección de este formato fue una mayor diferenciación de colores entre los polígonos y líneas a simple vista que la ofrecida por la vectorial, siendo esto de suma importancia a la hora de diferenciar los cultivos y caminos, aspecto importante para nuestra aplicación. La resolución utilizada para cada mapa es de 300 pixeles por pulgada, y en cada pixel tiene una resolución espacial de 3 metros, suficiente para las precisiones que obtenemos con el navegador.

Sistema integrado PDA/GPS y software utilizado

La Pocket PC que utilizamos para la aplicación fue la iPAQ 3760, actualmente una de las mejores del mercado por lo expuesto en el apartado correspondiente. Para posicionamiento utilizamos el navegador GPS III plus de Garmin en contra del accesorio GPS3000 NAVMAN, aunque como ya se indicó, cualquiera de los dos era igual de válido. Por último, para posicionamiento y navegación se utilizó el Oziexplorer CE.

Descripción y Metodología

De acuerdo con las consideraciones ya apuntadas se han utilizado los siguientes instrumentos y material informativo:

- PDA: iPAQ 3760
- Navegador: Garmin III plus
- Software: Oziexplorer (gabinete) y Oziexplorer CE (posicionamiento y navegación)
- Cartografía: Raster del ICV, resolución de 300 dpi, georreferenciación con una distancia de pixel de 3 metros.
- Información previa de los usos del suelo obtenida por diferentes organismos.

Dado que el objetivo final de la aplicación es el reconocimiento *in situ* de las diferentes unidades ambientales y su actualización en tiempo real, se ha requerido un proceso previo de gabinete para obtener la cartografía sobre la que basar el posterior trabajo de campo. Así pues, se definieron los límites de los usos del suelo del termino municipal de Sueca, a partir de los mapas y documentos antes comentados, integrando éstos en la cartografía base para su gestión a través del SIG.

Una vez delimitadas las unidades ambientales se importaron éstas a la PDA, con el fin de obtener la cartografía base y los límites de los usos del suelo en el Oziexplorer CE. En la *figura 5* están representados los límites de los usos del suelo, de zonas *Agrícolas y Arrozales* (representadas en color verde) (véase Anexo de figuras), y además aparecen los puntos característicos que definen cada tipo de suelo.

El siguiente paso es comprobar y actualizar *in situ* los límites de los usos del suelo en tiempo real mediante el sistema PDA/GPS, es decir, recorrer los límites de usos del suelo con este sistema, de forma que podamos comprobar la veracidad de las diferentes unidades ambientales y usos del suelo, y tener la capacidad de tomar estos límites por medio del GPS cuando sea necesario.

Figura 5. Límites de usos del suelo agrícola.

Podemos decir que la gran ventaja de esta aplicación radica en que en todo momento estamos posicionados en tiempo real sobre una cartografía específica, definida por nosotros mismos, de forma que podemos apreciar y actualizar en tiempo real los distintos límites marcados.

En cualquier caso se requiere de ciertos conocimientos sobre los distintos sistemas capaces de ser integrados (PDA/GPS/SIG/CAD), pues es obvio que cada aplicación vendrá definida por unas características propias, que determinarán la combinación idónea para una mayor efectividad en dicha aplicación.

REFERENCIAS

Bosque Sendra, J.: *Sistemas de Información Geográfica. Ed. Rialp.*
Plan General de Ordenación Urbana de Sueca.
Página SIG oleicola española: *www. w3.mapya.es/dinatierra_v3/*
Oziexplorer: *www.oziexplorer.com*
Fugawi: *www.fugawi.com*
PocketGis: *www.pocket.co.uk*
Arcpad(Esri): *www.esri.com*
ProCad GPS. *www.aptop.net/html/fprotopo.htm*

La Red de Información Ambiental de Andalucía: La provincia de Granada

M. Menéndez Collantes[1], M. Chirosa Ríos[1] y J. M. Moreira Madueño[2]

(1) Delegación Provincial de Granada de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
(2) Servicio de Información y Evaluación Ambiental. Dirección General de Participación y Evaluación Ambiental. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

RESUMEN

La Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) fue creada por una Orden de la Junta de Andalucía en mayo del año 2000. No obstante, ya desde el año 1984 la Administración Ambiental de Andalucía ha llevado a cabo programas de trabajo orientados a la recolección, coordinación y puesta en coherencia de la información sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales en la Comunidad Autónoma de Andalucía. El propósito fundamental de la REDIAM es constituirse en un Sistema permanente de información ambiental para facilitar a los ciudadanos en general y a los científicos, técnicos y gestores una ayuda que permita progresar en la mejora del medio ambiente y avanzar en la sostenibilidad del mismo

A lo largo de los años la Consejería de Medio Ambiente ha logrado consolidar herramientas, procedimientos y un bagaje de información que, empleado hasta el presente de forma predominante por los propios servicios técnicos de la Consejería, precisa ser puesto a disposición de otros agentes sociales una vez que se han desarrollado instrumentos adecuados para facilitar el acceso a esta información de una forma sencilla, eficiente y con un control de calidad adecuado.

Efectivamente, en los últimos tiempos la Consejería de Medio Ambiente ha interconectado en Red la mayor parte de su organización. En esta comunicación se pretende presentar, por un lado, cómo se organiza la información ambiental para su acceso por parte de los técnicos de la Delegación Provincial de la Consejería de Medio Ambiente en Granada. Por otro lado, el trabajo que se está llevando a cabo en esta Delegación de normalización de la información ambiental que se produce a nivel local, con el objetivo de transmitir ciertos criterios locales de generación de información y de promover que algunos proyectos regionales procedan de la integración de datos locales.

Palabras Clave: *Red de Información Ambiental, SIG, Gestión de la información cartográfica.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

The Environmental Information System of Andalucía was created by an Order of the Junta de Andalucía in May 2000. However, since 1,984 the Environmental Administration of Andalucía has carried out oriented programs of work to the harvesting, coordination and putting in coherence of the information on the natural state of the Environment and resources in Andalucía. The main intention of the REDIAM is to constitute itself in a permanent System of environmental information to facilitate the citizens in general and to the scientists, technicians and managers an aid that allows to progress in the improvement of the Environment and to advance in sustainability

The Consejería has managed to consolidate tools, procedures and a baggage of information that, used until the present in a predominant form by the own technical services of the Consejería, needs to be made available of other social agents once have been developed adapted instruments to facilitate the access to this information of a simple, efficient form and with a suitable control of quality.

Indeed, lately the Consejería has interconnected in Network most of its organization. In this communication it is tried to present/display, on the one hand, how is organized the environmental information for the access of the technicians of the Provincial Delegation of the Consejería in Granada. On the other hand, the work that is being carried out in this Delegation of normalization of the environmental information that it takes place at local level, with the objective to transmit certain local criteria of information generation, and to promote that some regional projects come from the integration of local data.

INTRODUCCIÓN

Esta comunicación pretende describir el trabajo que se está llevando a cabo en la Consejería de Medio Ambiente, de normalización de la información ambiental que se produce a nivel local, con el objetivo de transmitir *criterios locales* de generación de información, y de promover que algunos proyectos regionales de la Consejería de Medio Ambiente se desarrollen a partir de la integración de datos provinciales.

La expansión de la REDIAM a las Delegaciones Provinciales es un objetivo fundamental dentro del esquema de la Red. En efecto, la Consejería de Medio Ambiente pretende, en una primera fase de desarrollo de la REDIAM, una estructuración de todos los componentes de la propia Consejería, que contribuyan a la creación de información ambiental. Un objetivo básico a cumplir es también que la información generada a escala regional sea utilizada a nivel provincial. Se pretende que en este nivel se realice su mantenimiento, actualización y ampliación. En las Delegaciones Provinciales, concretamente en la de Granada, se viene llevando a cabo desde hace tiempo un esfuerzo de organización, difusión y puesta a disposición de los usuarios de la información ambiental disponible, así como actividades formativas, etc., siempre en coordinación con Servicios Centrales. Es por ello que es muy importante la

coordinación entre Delegaciones Provinciales y Servicios Centrales, para que el trasvase de información sea fluido, y se generalicen los procesos de normalización de la información.

LA RED DE INFORMACIÓN AMBIENTAL EN ANDALUCÍA

Antecedentes

En mayo de 2000 fue publicada la Orden de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía que regula la creación de la Red de Información Ambiental (REDIAM), con el propósito fundamental de constituirse en una herramienta permanente de generación de información ambiental de cara a la adecuada gestión de los recursos naturales de Andalucía.

La REDIAM pretende unir los esfuerzos de todos los centros productores y usuarios de información ambiental en la Comunidad Autónoma, aprovechando los desarrollos en levantamientos de información y herramientas de gestión que se han venido consolidando a través del sistema de información ambiental de Andalucía (SinambA), creado en junio de 1984, el cual, a partir de la creación de esta Red, se incorpora a la misma.

Sus objetivos generales son:

- Generar información ambiental de calidad, actualizada y actualizable a una escala de trabajo adecuada a las necesidades de información y gestión de los diferentes usuarios existentes.
- Facilitar el acceso a información adecuada, selectiva, relevante y fiable a gestores públicos en general, para el desarrollo y aplicación de políticas ambientales sólidas.
- Permitir la utilización común de recursos de información cientifico-técnica con calidad contrastada generados sobre el medio ambiente por diferentes centros implicados en la investigación y/o gestión de aspectos ambientales de Andalucía.
- Fomentar el desarrollo de la investigación en medio ambiente haciendo uso de nuevas tecnologías de la información para que las iniciativas y decisiones sobre el medio ambiente se apoyen en una sólida base de conocimientos científicos.
- Desarrollar análisis de la información para la generación y mantenimiento de indicadores ambientales.
- Elaboración de modelos de evaluación de los recursos naturales.
- Difusión de información a los ciudadanos.

Como se aprecia en la figura 1, la Red de Información Ambiental de Andalucía está constituida por organismos e instalaciones relacionadas con el medio ambiente de Andalucía, tanto generadores como usuarios de información ambiental, coordinadas por la Consejería de Medio Ambiente, que cooperan en la tarea de recopilación y evaluación de datos sobre el medio ambiente, evitando duplicación de esfuerzos y recursos, y empleando desde el inicio bases comunes de referencia, así como tecnologías de la información, puestas a disposición de los integrantes de la Red por la Consejería de Medio Ambiente.

Todo ello supone, en consecuencia, la necesidad de aunar los esfuerzos realizados en levantamiento de información por multitud de centros generadores y usuarios de información ambiental, estableciéndose procedimientos de normalización de la misma, para poder reunir

en formatos y modelos de datos compatibles todos los datos medioambientales. Estos procedimientos de normalización son facilitados por instrumentos como el Sistema de Gestión de Proyectos, de Consultas y de Estadísticas.

La información ambiental que se produce en Andalucía y sobre Andalucía es muy importante, cualitativa y cuantitativamente, de tal manera que en la REDIAM es preciso establecer programas de trabajo con carácter anual, que incluyan los proyectos que se consideren relevantes por los centros incluidos en la misma, y fundamentalmente los proyectos de información ambiental a acometer por la propia Consejería.

La información por tanto fluye en varias direcciones, ya que el Sistema de Información Ambiental proporciona las bases de referencia e información y procedimientos comunes de normalización para la elaboración de información ambiental, no sólo en la Consejería de Medio Ambiente y el resto de Consejerías de la Junta de Andalucía, sino también con Centros externos a la Junta, fundamentalmente Centros de Investigación (Universidades y CSIC), Administración Estatal (Ministerios de Medio Ambiente, Fomento, Agricultura, …) y otros centros susceptibles de generar y/o utilizar información ambiental (Administración local, Federaciones, Asociaciones, etc.).

Su puesta en funcionamiento se lleva a cabo en dos fases. La primera abarca a la estructura propia de la Consejería de Medio Ambiente, ya funcionando parcialmente (ver figura 2), y en la que se enmarca el proyecto piloto que se lleva a cabo en la Delegación Provincial de Granada, como Unidad de Información y Estadística dentro de la estructura de la REDIAM; y la segunda que establece el sistema de relaciones con los centros externos a la Consejería.

Esta segunda fase se aborda a través de Acuerdos o Convenios de Colaboración con otros Centros Asociados y Grupos de Investigación, que de esta manera se incorporan a la REDIAM. Estos acceden a las herramientas físicas y lógicas, así como a los contenidos de información normalizada ya integrados en la Red, comprometiéndose a su vez a difundir e incorporar a su metodología de trabajo las bases de referencia y procedimientos de normalización establecidos en la Red, así como a integrar la información ambiental generada en el ámbito de la REDIAM.

Figura 1. Estructura de la Red de Información Ambiental de Andalucía.

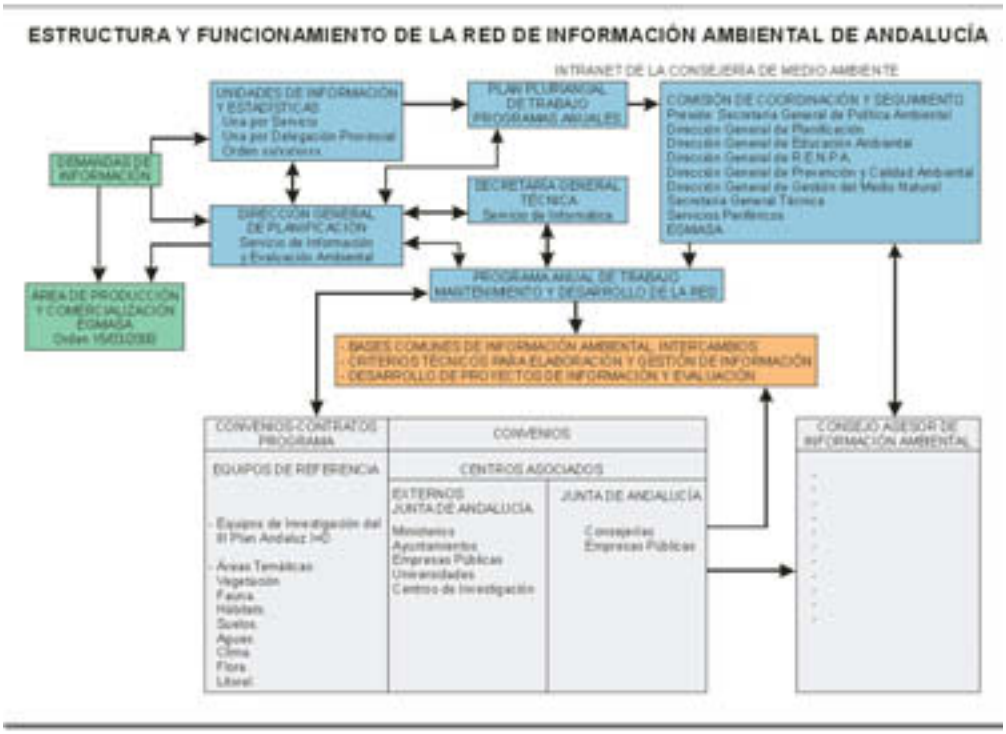


Figura 2. Propuesta de estructura de la Red de Información Ambiental de Andalucía.

En la REDIAM se integran bases de datos alfanuméricas, cartografía digital e imágenes procedentes de sensores remotos, interrelacionadas entre sí tanto espacial como temporalmente. Cuantitativamente, podemos hablar de unos 600 proyectos, 4300 capas vectoriales, 1900 mapas sintéticos, 1400 capas de información raster, 4700 imágenes satélite, además de vuelos y ortofotos. La estructura temática se establece en cuatro grandes grupos: los recursos naturales, calidad ambiental, afecciones de la actividad humana sobre los recursos naturales y actuaciones de la Consejería de Medio Ambiente.

Para que toda esta información ambiental que se elabora pueda ser integrada en el Sistema es preciso regular el proceso de producción de la misma, con los objetivos de evitar esfuerzos redundantes, abaratar los costes, mejorar la calidad del producto final y tratar de que la información sea de utilidad para el mayor espectro posible de usuarios. En efecto, es muy importante hacer comprender las implicaciones que una buena información tiene a los productores de datos de todos los niveles técnicos y de gestión de la Consejería: es fundamental que la nueva información ambiental que se genere cumpla unos requisitos técnicos en cuanto a utilización de diccionarios de codificación y modelos de datos para variables ambientales, de tal manera que sea posible su integración en el Sistema, así como la interrelación con la información ya existente, y con otros Sistemas de Información nacionales y europeos.

Figura 3. Herramientas básicas de gestión de información de la REDIAM.

Además, en la Red de Información Ambiental se incluyen unos rigurosos controles de calidad sobre la información que se introduce, fundamental tanto para asegurar la coherencia y el mantenimiento de la información, como para proporcionar fiabilidad a los procesos técnicos, de planificación o de toma de decisiones que se basen en dicha información.

Se han implementado unas herramientas lógicas que facilitan tanto la gestión de la información como el control de calidad de la misma.

Estas herramientas incorporan igualmente la gestión de las tablas de diccionarios, así como facilitan la consulta de la información alfanumérica, cartográfica y de imágenes que residen en el Sistema.

El proceso de incorporación de la información a la red pasa por tres fases:

La fase de definición de un Proyecto.

La fase de control de calidad de la información contenida en el proyecto.

La fase de incorporación y carga del proyecto en el Sistema.

La fase de definición obliga al establecimiento de una serie de datos que son propios de cada proyecto, como nombre, descripción temática, fuente de la información, fecha de actualización,… Así mismo se incorporan a la definición del proyecto datos relativos a la estructura de la información, como coberturas, tablas asociadas, …y a su modelo de relaciones entre las tablas de datos que en él se integran. En esta fase de definición del proyecto se recurre a la base de datos de diccionarios de codificación para emplear en proyectos similares los mismos códigos que en otros que ya hayan sido acometidos. Si esto no fuese así se incorporaría a la base de datos de diccionarios una nueva tabla de códigos.

En **la fase de control de calidad** de los proyectos, la herramienta de gestión de los proyectos permite realizar un control de calidad orientado a verificar que la información elaborada se corresponde con las especificaciones elaboradas durante la fase de diseño. Este control, que es

semiautomático, afecta tanto a datos de estructura como a datos de contenido temático. Filtros automáticos comprueban que la estructura es adecuada, que no existen códigos erróneos, campos nulos,… Finalmente, un informe sobre el proceso de control de calidad permite conocer los errores máximos localizados, el número de elementos a corregir,…

Por último, en la **fase de carga**, pasada la fase de control de calidad, un proyecto es incorporado al Sistema de forma definitiva, acompañado de un fichero de descripción de sus contenidos y metadatos, realizándose una copia de salvaguardia de la información.

LA RED DE INFORMACIÓN AMBIENTAL EN LA PROVINCIA DE GRANADA

La Red de Información Ambiental se constituye como una estructura con información compartida en la que hay una serie de responsables de generar y mantener la información, y usuarios que consultan la información.

La transición de un sistema de información a una red propiamente dicha requiere la existencia de un centro operativo que sirva de referencia para que otros nodos secundarios vayan asumiendo procedimientos y métodos de trabajo normalizados (figura 2). En la primera fase de su puesta en marcha, el establecimiento de una comunicación fluida entre los servicios centrales y los incipientes nodos provinciales es importante para que la transición a la Red tenga éxito. Con este objetivo, en los últimos dos años se ha llevado a cabo un proyecto piloto en la Delegación Provincial de Granada que supone un paso en la consolidación de la Red de Información Ambiental de Andalucía, teniendo como meta establecer procedimientos de trabajo exportables a otras Delegaciones Provinciales, de tal manera que la Delegación Provincial de Granada se constituya en un nodo "piloto" de la REDIAM.

Introducción

Las Delegaciones Provinciales de la Consejería de Medio Ambiente trabajan con la necesidad de utilizar herramientas y contenidos de información ambiental para la toma de decisiones en la gestión cotidiana de las competencias asignadas. La experiencia hasta ahora confirma que existen diferentes perspectivas a la hora de generar información, y que los usuarios no conocen en su totalidad las posibilidades de la información existente.

Ya hemos comentado anteriormente, que en el esquema de propuesta de funcionamiento de la Red de Información Ambiental de Andalucía, las Delegaciones Provinciales se plantean como nodos o unidades de información, de tal manera que no son meras receptoras de información ambiental, sino también generadoras a su vez de un gran volumen de información. Por tanto, se plantean una serie de necesidades de cara al desarrollo de la REDIAM y a la consecución de su objetivo final: constituirse en Sistema permanente de información ambiental que facilite a los ciudadanos en general y a los científicos, técnicos y gestores una ayuda que permita progresar en la mejora del medio ambiente y avanzar en la sostenibilidad del mismo.

En primer lugar, establecer un diálogo permanente entre los productores de datos y los

usuarios de la información, estableciendo una interfaz cuya función sea hacer de intérprete de los deseos de los responsables de las tomas de decisión de cara a los suministradores de datos y ayudar a los primeros a formular sus necesidades y a utilizar la información existente. Es decir, hacer que la información ambiental fluya con mayor facilidad.

En segundo lugar, hacer comprender a los productores de datos, y en particular a las Delegaciones Provinciales, las implicaciones que tiene la generación de una información integrable en la Red y de calidad, mediante el establecimiento y utilización de métodos y nomenclaturas comunes, para ser integrados en la REDIAM.

La organización de la información ambiental en la Delegación Provincial de Granada

En cuanto a la primera de las necesidades formuladas, que se sintetiza en hacer que la información ambiental fluya con mayor facilidad, en la Delegación Provincial de Granada se ha sido muy consciente de este tema desde hace mucho tiempo, habiéndose establecido un esquema de trabajo a nivel local, integrado en el contexto de la REDIAM, aunque existen diferencias entre la Delegación y los Servicios Centrales, tanto a la hora de generar la información como en su utilización (figura 4).

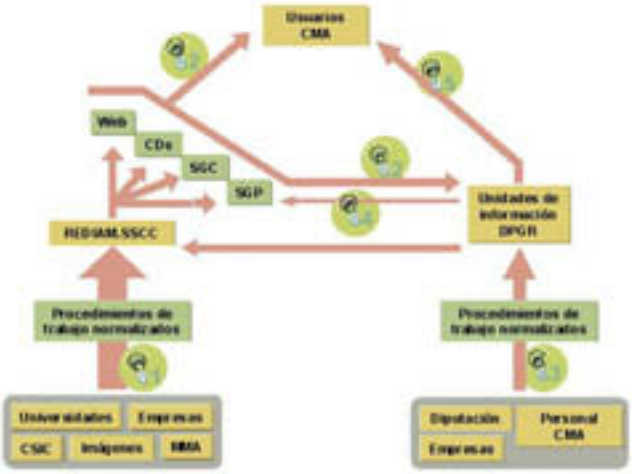


Figura 4. La Delegación Provincial de Granada en el contexto de la REDIAM.

En cuanto a la generación de información ambiental, en la REDIAM a nivel central los procedimientos de trabajo están completamente normalizados. Por otra parte, en la Delegación Provincial no siempre se llevan a cabo procedimientos de normalización, bien

sea porque hay información que se considera necesaria y de interés para la gestión diaria que no está integrada en la REDIAM, bien porque en algunos de los procedimientos de levantamiento de información ambiental a nivel local no se aplican los criterios técnicos de normalización.

Por lo que se refiere a la consulta de información, se realiza a través de las herramientas básicas de gestión de información de la REDIAM (figura 3). Estas herramientas son muy potentes, pero resultan difíciles de asimilar para un usuario medio, como los técnicos y agentes de una Delegación Provincial. De igual manera ocurre con la información depositada, a veces excesivamente compleja y especializada para dicho usuario, que precisa disponer de la misma en una forma más asequible. Es por ello que desde esta Delegación se planteó hace tiempo facilitar a los técnicos y resto de usuarios el acceso a la gran cantidad de información ambiental generada por la Consejería, y que no siempre es bien conocida, optándose por depositar la información procedente de la REDIAM en una red local, y organizada en carpetas temáticas. Esta labor es realizada por unos administradores que efectúan un filtro de la información del Sistema, sin realizar alteraciones en la misma, tan sólo exportando a otros formatos.

Es por ello muy importante en este punto el establecimiento de un diálogo permanente entre las Unidades de Información (Delegaciones Provinciales), que conocen las necesidades y limitaciones de los usuarios de la información, y los productores de la misma, hecho que se está produciendo de manera fructífera en el caso de la relación establecida entre los Servicios Centrales y la Delegación Provincial de Granada.

Procedimientos de normalización de la información ambiental en la Delegación Provincial de Granada

Tal y como se ha comentado en la introducción, desde octubre de 2002 se viene desarrollando en esta Delegación la asistencia técnica denominada "*Explotación global del sistema de información geográfica de la Consejería de Medio Ambiente en la Delegación Provincial de Granada*". En esta asistencia técnica se ha dotado a la Delegación Provincial (a modo de experiencia piloto) con personal dependiente de la Dirección General de Planificación, teniendo como objetivos concretos los siguientes:

Mejorar de manera general la comunicación entre el personal de la Delegación Provincial de Granada y el Servicio de Información y Evaluación Ambiental de la D. G. de Participación e Información Ambiental

Identificar aquellos procedimientos que se desarrollen en la Delegación Provincial de Granada y que impliquen generación de información ambiental de posible interés para la REDIAM.

Normalización de los procedimientos de generación de información que se consideren prioritarios por la dirección técnica del proyecto e inclusión en los dispositivos lógicos de la REDIAM.

Contribuir al uso y difusión de la información generada por la REDIAM dentro de los esquemas de trabajo de la Delegación Provincial de Granada y de la Dirección General de Planificación.

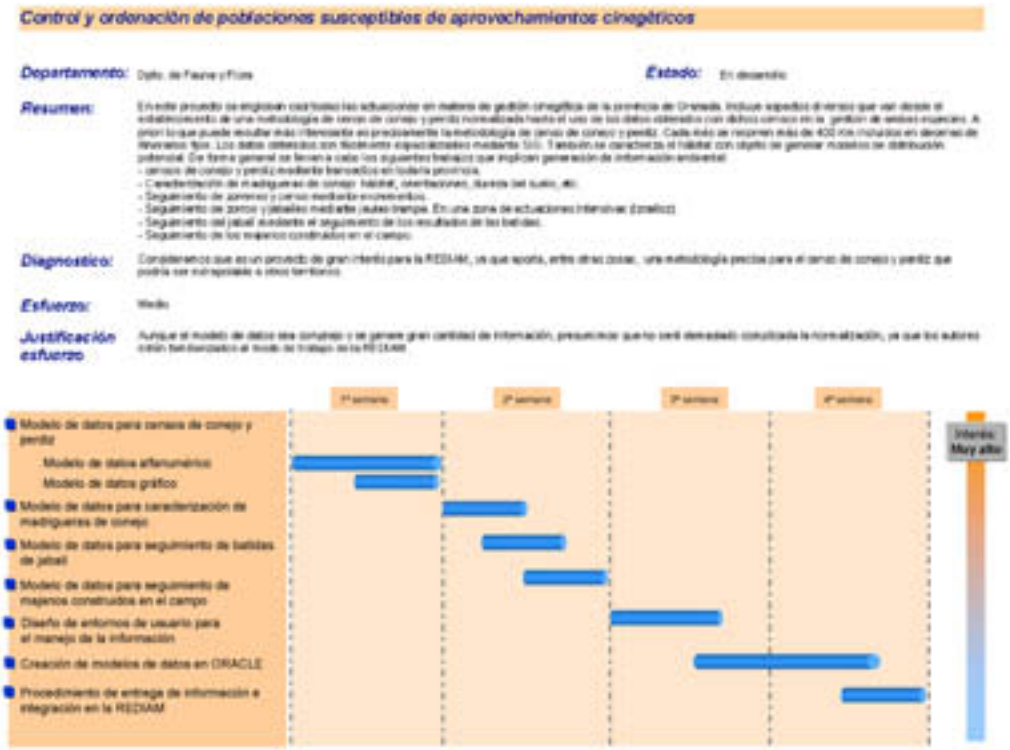


Figura 5. Ficha de priorización de proyectos.

Identificación de procedimientos que impliquen generación de información ambiental

En este sentido, se realizaron encuestas y entrevistas con los distintos departamentos de la Delegación Provincial, con objeto de identificar los proyectos o actividades que pudieran generar información ambiental. A partir de este inventario preliminar se realizó una priorización a la hora de normalizar los distintos procedimientos.

Del inventario se derivaron más de 35 proyectos o actividades llevadas a cabo por los técnicos y agentes de la Delegación Provincial, susceptibles de ser normalizadas e integradas en la Red de Información Ambiental. Se realizó para cada uno de ellos una ficha en la que se clasificaron los proyectos según su interés para ser integrado en la REDIAM, y el esfuerzo para ser abordados, así como una sistematización de tareas a realizar en cada uno de ellos.

La actividad realizada en la Delegación Provincial, y que es susceptible de ser incorporada en la REDIAM, es muy variada, abarcando desde el deslinde y amojonamiento de Vías Pecuarias y Montes Públicos, hasta censos y estudios de reproducción y seguimiento de especies, pasando por proyectos de corrección hidrológico-forestal, de manejo de la vegetación y de mejora y creación de caminos forestales. Los procedimientos de levantamiento de información son, en algunos casos, como los censos de fauna y flora, muy complejos en

cuanto a la generación de modelos de datos, y en otros no suponen una gran dificultad, al ser la metodología de trabajo casi siempre la misma. En estos casos (proyectos forestales) la dificultad se plantea en la organización y manejo de la información. En cualquier caso responden a demandas de gestión perfectamente extrapolables a otras DP y se plantea en este caso como un estudio piloto de la REDIAM con la idea de su desarrollo, prueba y posterior implantación en el resto de DP.

Un caso especial es el de la Unidad Móvil de Agentes de Medio Ambiente. Actúan dando servicio a los distintos departamentos de la Delegación en lo que se refiere a toma de datos en campo y comprobación de los mismos. Por ello se ven afectados directa o indirectamente por buena parte de las actividades desarrolladas por la Delegación Provincial. Esta situación, junto con su especialización en el uso de los SIG, ha ocasionado que se conviertan en referente importante a la hora de recopilar información de interés para la REDIAM. Así, los agentes de esta unidad son los encargados de obtener los perímetros de los incendios, los límites de las canteras, denuncias de vertidos, etc. Es por ello que se consideró como prioritaria la normalización de la información generada por esta Unidad.

Normalización de procedimientos prioritarios

Una vez que se realizó un diagnóstico por parte del grupo de trabajo responsable de la implantación de la REDIAM en la Delegación Provincial, se seleccionaron una serie de proyectos considerados prioritarios, según los criterios establecidos en la fase anterior, para su normalización e inclusión en la REDIAM, de cara a su posterior extensión al resto de DDPP.

Se han llevado a cabo procedimientos de normalización de censos de especies faunísticas de interés para la Consejería de Medio Ambiente. Se ha abordado la normalización del seguimiento de aves rapaces, carnívoros terrestres y, sobre todo, de los censos de conejo y perdiz. Como consecuencia de este trabajo contamos con información normalizada y compatible con la Red de Información Ambiental sobre la distribución, abundancia y tendencias poblacionales de un importante grupo de especies de vertebrados. Esta información es de interés para la gestión de la fauna y está prevista su integración en el subsistema de información sobre biodiversidad. Por otro lado, se ha realizado un seguimiento de proyectos regionales como los censos de aves acuáticas o el de abejarucos, seguimiento del cangrejo autóctono, etc.

También se consideró de importancia la normalización de la información de los procesos de captura de información de la actividades generadas por la Unidad Móvil de agentes de medio ambiente, concretamente la delimitación y seguimiento de las explotaciones mineras de la provincia, así como la investigación de causas de incendios forestales.

En el caso de las explotaciones mineras, la Consejería de Medio Ambiente viene realizando desde el año 1992 un inventario regional de canteras, graveras y minas, con periodicidad cuatrienal. Estos trabajos se realizan tomando información de distintas fuentes: Consejería de Industria y Desarrollo Tecnológico, toma de datos en campo, Ayuntamientos, Delegaciones provinciales de medio ambiente, etc. Estos inventarios constituyen una información muy importante a la hora de elaborar modelos de planificación de los recursos naturales. Sin embargo, no tiene suficiente detalle y, sobre todo, actualización necesaria para ser utilizado de manera

cotidiana en una delegación provincial. Analizamos con detalle y a modo de ejemplo el proceso de normalización de esta información generada en la Delegación Provincial

Delimitación de las canteras de la provincia de Granada

Desde la Delegación de Granada, se lleva abordando desde hace unos 3 años la caracterización a escala de detalle de todas las canteras de la provincia. Esta caracterización incluye el seguimiento preciso de sus límites en el campo (límites de la cantera, infraestructuras, balsas de estériles, etc.) mediante GPS diferencial y se corrigen los datos obtenidos mediante una estación de referencia, así como la recopilación de información administrativa de cada cantera, y la identificación de otras variables similares a las recopiladas en el inventario regional.

La normalización de la generación de la información de canteras en la provincia de Granada es un ejemplo claro de la coordinación y complementariedad entre los trabajos que desarrollan los SSCC y las DDPP; en este caso concreto, implicó la realización de una serie de tareas:

En primer lugar, se analizó el modelo de datos a escala regional y se comparó con el procedimiento de captura de información de la Unidad Móvil. La conclusión fue que, aunque la metodología utilizada para caracterizar las explotaciones mineras de la provincia es similar a la del inventario regional en cuanto a los productos obtenidos, se diferencia básicamente en la forma de ponerla en práctica, ya que el inventario regional genera información cada 4 años, mientras que en este trabajo se lleva a cabo un seguimiento continuo de las distintas explotaciones. Esta característica condiciona en buena medida tanto el modelo de datos gráfico como el alfanumérico, puesto que suponía que ambos debían contemplar el almacenamiento de un histórico de algunos parámetros analizados.

Por tanto, la segunda tarea a realizar fue confeccionar el modelo de datos tanto alfanumérico como gráfico, que fuera además integrable en la REDIAM. En cuanto al alfanumérico, se hizo un análisis exhaustivo del ya existente para el Inventario Regional, añadiendo y suprimiendo algunas tablas con respecto al mismo. Por lo que se refiere al modelo de datos gráfico, existían diferencias significativas, ya que mientras que el Inventario Regional contenía una cobertura de Arc-Info por cada tipo de elemento gráfico, lo cual hacía difícil el seguimiento de una explotación individualizada, e imposible el histórico, el modelo propuesto por la Delegación Provincial se basaba en una cobertura por explotación, en la que se almacenaba la información histórica de cada una de ellas.

Por ello, se planteó un Modelo de datos gráfico en el cual las coberturas de las explotaciones se incluían en una Personal Geodatabase, estableciendo una *featuredataset* por explotación, y dentro de cada una de ellas una *featureclass* por cada tipo de elemento gráfico. En el modelo se definen los campos que deben incluirse en cada elemento de la geodatabase, así como su nomenclatura. La ventaja de la Geodatabase es la versatilidad, ya que permite realizar consultas a la misma y seleccionar las coberturas correspondientes, por ejemplo, a los límites de las explotaciones, de tal manera que se pueda pasar fácilmente de una estructura basada en explotaciones individualizadas a una cobertura provincial integrable en la regional.

Posteriormente se confeccionó una Base de datos normalizada en la que se incluía la información alfanumérica, vinculada a la geodatabase.

Figura 6. Modelo de datos gráfico.

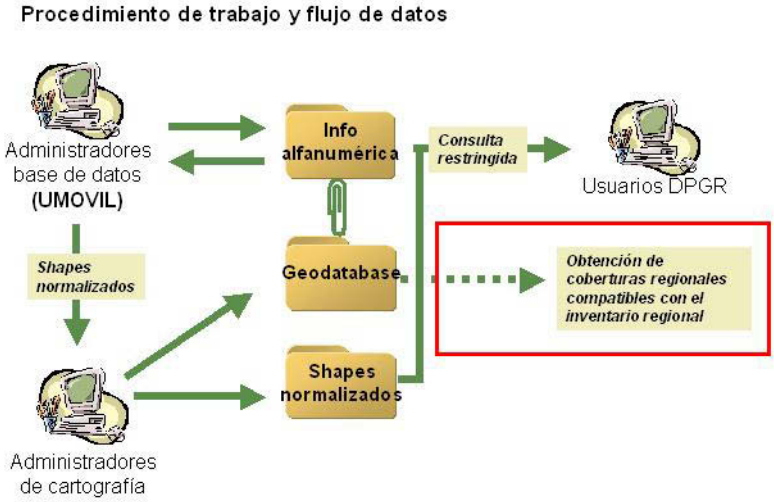


Figura 7. Procedimiento de trabajo y flujo de datos.

La siguiente fase consistió en la adaptación de la información que ya se había recolectado anteriormente al nuevo modelo de datos (corrección de errores topológicos, asignación de atributos temáticos, conversión a coberturas).

Por último, se implantaron los procedimientos para que la información que se generara a partir de ese momento se adaptara al modelo de datos gráfico y alfanumérico. Para ello se

confeccionaron plantillas para la toma de datos con el GPS, se destinó una ubicación física en la Red de la Delegación Provincial para su almacenamiento, y se estableció el procedimiento de flujo de información, tal y como se recoge en la figura 7.

Difusión de usos y contenidos de la REDIAM

- Por último, y con carácter permanente, se ha venido dando asistencia técnica tanto a los usuarios de la Delegación Provincial como a los agentes de medio ambiente. Estos últimos realizan un trabajo cotidiano en el que se genera cierta información, como denuncias o informes, pero además son buenos conocedores del territorio, de tal manera que sería interesante su aportación a la hora de contrastar en el campo cierta información ambiental, por ejemplo, límites de montes públicos.

Actualmente la provincia de Granada se divide para su gestión en 10 Unidades Territoriales de Agentes de Medio Ambiente. Al igual que en la Delegación Provincial, disponen de la información ambiental generada por la Consejería que es de interés para su trabajo. De igual manera, se llevan a cabo periódicamente actividades de formación en Sistemas de Información Geográfica y GPS, así como instalación y mantenimiento de las aplicaciones corporativas y en el conocimiento de la Red de Información Ambiental. En cualquier caso, la actividad formativa es siempre escasa para las necesidades que se plantean continuamente, constituyéndose en un hito fundamental no sólo para el manejo de las herramientas SIG sino para el conocimiento y difusión de los contenidos y objetivos de la REDIAM.

CONCLUSIONES

Durante el periodo transcurrido desde que se han comenzado a implantar estos procedimientos, se han sentado las bases para el cumplimiento de los objetivos que se plantearon. En la Delegación Provincial de Granada se han venido desarrollando unos procedimientos de trabajo que cumplen con los objetivos de un Modelo de funcionamiento de la REDIAM en las Unidades Periféricas (Delegaciones Provinciales), de cara a la consecución de una información ambiental detallada y de calidad, directamente incorporable a la REDIAM.

A la vista de esta experiencia se ha constatado la conveniencia de disponer de un equipo de técnicos que se encarguen de forma exclusiva de asesorar tanto a los técnicos de la DP a la hora de explotar y adaptar la información a sus necesidades como de velar para que la información generada en la DP siga los estándares y criterios establecidos en la REDIAM.

Este Modelo, que aún está en desarrollo y comienza ahora su implementación, consideramos que es exportable a otras Unidades Periféricas, tanto Delegaciones Provinciales como Unidades Territoriales.

REFERENCIAS

González Fernández, A.; Fernández-Palacios Carmona, A.; Moreira Madueño, J. M.; Carranza, J.; Ruíz Casanueva, J. (1995): "El mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía y su integración en un programa de seguimientos de cambios del territorio". *Actas de la 6ª Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*. Valladolid 20-22 de Septiembre de 1995.

Moreira, J.M. y Fernández Lineros, F. (1993): *Sistema de información ambiental de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

Moreira, J.M. (1994): "Nuevas Tecnologías en el análisis y gestión del medio natural. El Sistema de información ambiental de Andalucía. SinambA". *Jornadas Técnicas sobre S.I.G. y Teledetección aplicados a la ordenación del territorio y el medio ambiente*, 21-24 Noviembre 1994,Vitoria-.Gasteiz

Moreira, J. M. 2001. La cartografía hoy: ¿evolución o revolución? Las nuevas tecnologías y los cambios en la representación del territorio. *Actas del Congreso Año mil, año dos mil. Dos milenios en la historia de España*. pp 433-451. Ed. Sociedad estatal España nuevo milenio. Madrid, 2001.

Ley 38/1995, de 12 de diciembre, sobre el derecho de acceso a la información en materia de medio ambiente (*BOE nº 297, de 13/12/1995*).

Orden de 31 de Mayo de 2000 por la que se regula la Red de Información Ambiental y los Programas Anuales de Información Ambiental (*BOJA nº 73, de 27/06/2000*).

Consejería de Medio Ambiente (2001): Criterios Técnicos para la creación de Información Ambiental. Disponible en *http://www.cma.junta-andalucia.es/medioambiente/red_ambiental/normalevantainf-2001c.pdf*

Consejería de Medio Ambiente: Red de Información Ambiental de Andalucía. Disponible en *http://www.cma.junta-andalucia.es/medioambiente/red_ambiental/tema_red_ambiental.html*

Aplicación de las tecnologías SIG para la elaboración de una cartografía de biodiversidad en Andalucía

J. Quijada[1], J. M. Delgado[1] y M. Rodríguez Surián

(1) Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Avda. Manuel Siurot s/n. 41013 - Sevilla.

RESUMEN

Se ha generado un mapa de biodiversidad de Andalucía donde se han utilizado una serie de variables ambientales normalizadas y espacializadas existentes dentro de la Red de Información Ambiental de Andalucía. Las más importantes son variables que hacen referencia a la caracterización de la fauna, flora, vegetación y usos del territorio, destacando la relativa a la tipología y distribución de las asociaciones vegetales, los diferentes usos del suelo, la distribución de los principales taxones de flora y fauna o el grado de amenaza de los hábitats naturales y seminaturales, obtenido a partir de otras variables contenidas en la Red. Todas las variables han sido integradas y analizadas en un sistema de información geográfica dando como resultado el mapa de biodiversidad que se expone. El índice que se presenta –diferenciado para las zonas naturales o seminaturales y las zonas cultivadas– responde básicamente a una medida clásica de biodiversidad: "variación y abundancia relativa de hábitats y especies". Así, se ha considerado que la diversidad de hábitats, entendida como el número máximo de asociaciones vegetales diferentes que pueden reconocerse en un área geográfica concreta, es análoga a la riqueza de especies y que la diversidad estructural, que contempla tanto el número de estratos de vegetación existentes como la abundancia de cada uno de ellos, contribuye de forma decisiva a la generación de un índice de diversidad global. Finalmente, se ha incluido información sobre la presencia y distribución de los principales taxones de flora y fauna de Andalucía.

Palabras Clave: *Biodiversidad, hábitats naturales y seminaturales, SIG, Red de Información, Andalucía*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

A map showing the biodiversity of Andalusia has been created using some of the information existing in the Andalusian Environmental Information Network. The most relevant variables are: number of fauna and flora species, vegetation and landcover characterization. In this sense, we have regarded the plant communities typology and distribution as the main parameter for describing vegetation diversity. We have had into account the distribution of the most threatened taxa present in the region. All these parameters have been analized in a geographical information system, using spatial analyst methods, resulting the showed biodiversity map. The resulting "biodiversity index", which distinguish natural or seminatural habitats from the cultivated areas, describe biodiversity in the "classical" way: "Variation and relativity habitats and species abundance". In this way, it has been considerated that habitats diversity (regarded as the maximum number of plant communities which can be recognized in a given geographical area) is analogous to species richness and structural diversity (which is defined as the number of vegetation strata and the abundance of each of them) contributes importantly to the global biodiversity index. Finally, it has been included the information about the presence and distribution of the main flora and fauna species present in Andalusia.

Key words*: *Biodiversity, natural and seminatural habitats, GIS, Information Network, Andalusia.

INTRODUCCIÓN

La diversidad biológica es uno de los temas centrales en buena parte de los debates medioambientales actuales. Existe una gran discrepancia en cómo ha de medirse, cuáles son los indicadores que permiten establecer un mecanismo de evaluación y seguimiento, y qué factores influyen de forma decisiva en su mantenimiento y conservación.

Son muchas y variadas las formas de medir la biodiversidad, desde las más clásicas y más fácilmente comprensibles –mayor biodiversidad cuanto mayor número de especies– a modelos complejos que implican la utilización de multitud de variables, cuya comprensión y cálculo requiere un mayor grado de análisis.

Por otro lado, el mayor problema que existe actualmente para el cálculo de índices o indicadores de biodiversidad que resulten operativos es la inexistencia de datos básicos normalizados, más aún cuando nos enfrentamos con grandes territorios, cómo es el caso de Andalucía.

En este sentido, para la generación del mapa de biodiversidad se han utilizado una serie de variables normalizadas dentro de la Red de Información Ambiental de Andalucía. Las más importantes son variables que hacen referencia a la caracterización de la fauna, flora, vegetación y usos del territorio, destacando la relativa a la tipología y distribución de las asociaciones vegetales, los diferentes usos del suelo, la distribución de los principales taxones de flora

y fauna o el grado de amenaza de los hábitats naturales y seminaturales, obtenido a partir de otras variables contenidas en la Red. Todas las variables han sido integradas y analizadas en un sistema de información geográfica dando como resultado el mapa de biodiversidad que se presenta.

Finalmente, se añade información sobre la presencia y distribución de los principales taxones de flora y fauna de Andalucía.

MATERIAL Y MÉTODOS

La cartografía que se presenta pretende reflejar la variación y abundancia relativa de hábitats y especies. Para ello, se ha utilizado la combinación de datos de diferentes fuentes y a diferentes escalas. Por un lado, se ha calculado un índice de diversidad vegetal –diversidad fitocenótica–, a partir de la diversidad de hábitats, entendida como el número máximo de asociaciones vegetales diferentes que pueden reconocerse en un área geográfica concreta, y la diversidad estructural, que contempla tanto el número de estratos de vegetación existentes como la abundancia de cada uno de ellos.

Mediante la combinación de estos factores: diversidad de hábitats y diversidad estructural, se ha calculado la diversidad fitocenótica. Si bien en las zonas cultivadas únicamente se utiliza la diversidad estructural, ya que el proceso metodológico seguido excluye en estas zonas el cálculo de la diversidad de hábitats. Ese índice representa tanto la variedad y complejidad de los estratos vegetales cómo las posibilidades de albergar un número determinado de asociaciones vegetales, por lo que se constituiría cómo un indicador relativo de la diversidad vegetal (diversidad fitocenótica) existente. Sin embargo, es necesario hacer una pequeña matización, la información utilizada para el cálculo del índice procede de áreas con alguna figura de protección, por lo que, para poder generalizar el índice a la totalidad de la región, ha sido necesario ponderar el mismo a partir de los datos del grado de amenaza de los hábitats referido a las tipologías de paisajes existentes en Andalucía, variables generadas en la Red de Información Ambiental de Andalucía.

Complementando este índice, se refleja la distribución y abundancia de los principales taxones de flora y fauna presentes en Andalucía.

La relativa complejidad del procedimiento seguido requiere una explicación y definición de los conceptos utilizados que ayude a entender el mapa elaborado.

Cálculo de la diversidad de hábitats

En el nivel más simple, la diversidad de hábitats no es más que el número de tipos de hábitats en un área geográfica definida (*Magurrán*, 1989). Por tanto, para la correcta interpretación de esta característica, se hace necesario adoptar un sistema de clasificación de los tipos de hábitats.

En este sentido, la Consejería de Medio Ambiente está desarrollando un programa de trabajo denominado la Cartografía y Evaluación de la Vegetación y Flora a escala de detalle de los

ecosistemas forestales de Andalucía –cuya finalización está prevista para el año 2006 y que actualmente se ha desarrollado en más de 1.350.000 has–, lo que supone más del 30 % del territorio forestal de la región. Esta cartografía se basa en la metodología fitosociológica propuesta por *Braun-Blanquet* (1979), que clasifica los hábitats vegetales existentes en Andalucía.

Cada una de las teselas identificadas en la cartografía de vegetación a escala de detalle dispone de información sobre los hábitats naturales y seminaturales que contiene, siendo relativamente fácil calcular un índice de diversidad de hábitats, como el número máximo de hábitats diferentes presentes en una tesela. Sin embargo, es necesario extrapolar esta información a aquellos territorios forestales en los que no se disponga de cartografía de vegetación. El proceso de extrapolación se ha realizado mediante la correlación de los datos disponibles para más de 1.300.000 has con las unidades correspondientes del Mapa de Usos y Coberturas Vegetales del suelo de Andalucía de 1999, información a escala 1:50.000 disponible para toda la región y generada igualmente en el contexto de la Red de Información Ambiental de Andalucía por la Consejería de Medio Ambiente.

Por otro lado y, dadas las peculiaridades bioclimáticas y biogeográficas de Andalucía, en el proceso de extrapolación y correlación se ha tenido en cuenta la clasificación biogeográfica propuesta por *Rivas-Martínez et al.* (1997) y la adaptación de la misma al mapa de paisajes de Andalucía elaborado por la Consejería de Medio Ambiente. Para realizar correctamente el proceso de extrapolación en función de la distribución de los datos existentes ha sido necesario realizar una síntesis de la tipificación biogeográfica original según el siguiente esquema:

A) Superprovincia Mediterráneo-Ibero-Atlántica
- I. Provincia Bética → Provincia Bética
- II. Provincia Gaditano-Onubo-Algarviense → Provincia Bética
- III. Provincia Luso-Extremadurense → Provincia Luso-Extremadurense

B) Superprovincia Mediterráneo-Ibero-Levantina
- I. Provincia Murciano-Almeriense → Provincia Murciano-Almeriense
- II. Provincia Castellano-Maestrazgo-Manchega → Provincia Castellano-Maestrazgo-Manchega

Por tanto, una vez realizados los análisis, cruces de información, uniones y reclasificaciones pertinentes, lo que se obtiene es el número máximo de hábitats diferentes en cada región biogeográfica, identificados para cada uno de los tipos de cubiertas vegetales definidas según el mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía.

Cálculo de la diversidad estructural

Para el cálculo de la diversidad estructural se ha utilizado tanto el número de estratos verticales presentes como la abundancia de vegetación en ellos, información, que se encuentra recogida a una escala de semidetalle (1:50.000) en la Cartografía de Usos y Coberturas Vegetales del Suelo integrada dentro de la Red de Información Ambiental de Andalucía.

Para la obtención del valor estructural de la vegetación (Ev), se han considerado dos parámetros: ocupación espacial (Ee) y variedad de estratos (Ke). El primero de ellos, a su vez, se obtiene a partir de otros dos: desarrollo vertical (Dv) y cobertura (Cc).

Aunque existe una notable variabilidad en cada uno de estos estratos (especialmente en el estrato arbustivo, que oscila entre los tomillares de menos de 25-50 cm de altura media, hasta formaciones como los madroñales, que pueden superar los 5 m), se ha considerado que, en promedio, cada estrato superior debe considerarse con el doble de importancia que el inmediatamente inferior. Es decir, se han aplicado los siguientes valores a cada caso de Dv:

Estrato herbáceo = 1 (D1)

Estrato arbustivo = 2 (D2)

Estrato arbóreo = 4 (D3)

Con esta asignación de valores se considera el desarrollo vertical de la vegetación.

Con respecto a la cobertura de los diferentes estratos (Cc). En la base cartográfica utilizada, se explicita la posibilidad de diferenciar varios niveles de cobertura horizontal. A éstos se les han asignado también unos valores de similar rango, con los que se pretende representar, de forma proporcional, la importancia de la cobertura en la diversidad estructural para cada rango considerado en la leyenda del Mapa de Usos y Coberturas:

Ausente = 0

Cobertura 1-25 % = 1

Cobertura 26-50 % = 3

Cobertura > 50 % = 6

Para la asignación de estos valores se ha considerado que en los ecosistemas mediterráneos se puede constatar la existencia de un sotobosque arbustivo asociado a las formaciones arboladas (normalmente más denso y complejo en los bosques de quercíneas, frente a pinares o eucaliptales), a la vez que es habitual la presencia de un estrato herbáceo (más o menos estacional) subordinado a las formaciones leñosas en general.

Ambos parámetros (Dv y Cc) se pueden considerar como argumentos que permiten calcular el "volumen" de la cubierta vegetal (Dv = altura; Cc = superficie). Por ello, para obtener la ocupación espacial de la vegetación en cada caso, se ha de calcular el sumatorio del producto de ambos valores:

$$Ee = \left[\sum \left(Dv_i \times Cc \right) \right]$$

Ecuación 1. "Volumen" de la cubierta vegetal teniendo en cuenta su altura y superficie

Además de la importancia espacial de la cubierta vegetal, el otro parámetro, que se ha tenido en cuenta para asignar un valor estructural a la vegetación que permita relacionar éste con la biodiversidad, es la presencia de un mayor o menor número de estratos en la conformación de cada categoría. Se ha considerado que cuanto mayor sea la variedad de estratos presentes más importante será la diversidad estructural. Este incremento se ha considerado exponencial cúbico (n^3):

Un estrato = 1

Dos estratos = 8

Tres estratos = 27

Este rango se ha elegido para igualar la importancia de la ocupación espacial y la variedad de estratos.

El valor estructural definitivo se obtiene mediante la suma algebraica de los parámetros calculados previamente.

$$Ev = Ee + Ke$$

Ecuación 2. Valor estructural de la vegetación

Integración de la diversidad de hábitats con la diversidad estructural: obtención de la diversidad fitocenótica

La integración de la diversidad estructural y de hábitats dará lugar a un índice que se ha denominado diversidad fitocenótica. Para su elaboración se han seguido los siguientes pasos:

1. Estandarización de las variables a una escala común. Tanto el índice de diversidad de hábitats como el de diversidad estructural presentan escalas de valores diferentes en cada caso. La integración de ambas fuentes de datos requiere su representación en una escala de valores homogénea, que en este caso será de 0 a 100. La aplicación de estas funciones de pertenencia da lugar a la representación espacial de los índices que muestran valores progresivamente más altos conforme mayor es la diversidad en cada mapa original.
2. Integración de los dos índices espacializados anteriores. Desde un punto de vista teórico se ha considerado que la diversidad vegetal de Andalucía depende tanto del número de hábitats por superficie como de la diversidad estructural de la vegetación. Para integrar estos dos conceptos en un único mapa de diversidad vegetal, se recurrió a una evaluación en la que el valor del mapa final en cada unidad depende tanto de los valores iniciales como de los pesos asignados a cada criterio, tal y como muestra la siguiente ecuación:

$$A = \sum W_i \times X_i$$

Ecuación 3. Índice de diversidad vegetal de Andalucía

donde:

A: es el valor final del mapa resultante en una unidad considerada.
W_i: Peso asignado a cada criterio. La suma de todos los pesos debe ser 1.
X_i: Valor del criterio i en la unidad considerada.

Debido a la complejidad de modelizar un concepto como la biodiversidad, se optó por asignar un peso idéntico a cada una de los criterios a evaluar. Es decir, se consideró que el número de comunidades vegetales tiene el mismo valor que la diversidad estructural a la hora de condicionar la diversidad fitocenótica de un lugar determinado. Por ello el peso asignado a cada criterio es de 0,5.

Corrección del índice de diversidad fitocenótica en función del grado de amenaza

Tras el análisis de los resultados derivados del cálculo de la diversidad fitocenótica se observó que había ciertas zonas que albergaban gran diversidad vegetal, según el modelo, pero que se correspondían con islas de vegetación natural rodeadas de cultivos. Para matizar estos resultados y ajustar más el modelo a la realidad se consideró oportuno ponderar el índice de diversidad fitocenótica con otro índice que muestra el grado de amenaza del territorio, en función de las actividad humana, referido a las unidades de paisaje diferenciadas en Andalucía. El procedimiento empleado consiste en ponderar el valor de la diversidad fitocenótica mediante un coeficiente que hace que el resultado obtenido se ajuste más a la realidad de Andalucía, al tener en cuenta la teoría de islas que considera que las zonas de vegetación natural rodeadas de zonas agrícolas cuentan con un menor número de especies y de formaciones vegetales que otras del mismo tamaño situadas en ambientes naturales (*MacArthur y Wilson*, 1967; *Santos y Tellería*, 1998).

Cálculo de diversidad específica de vertebrados

Para la obtención de un valor de diversidad específica se han utilizado los datos del Atlas de Vertebrados, fruto de la culminación del Inventario Nacional de Hábitats y Taxones realizado por el Ministerio de Medio Ambiente. En concreto, se disponen de datos de distribución por cuadrículas de 10 x 10 Km de los principales taxones de vertebrados –aves, peces, anfibios, reptiles y mamíferos– presentes en Andalucía.

Se ha utilizado el índice de Shannon-Weaver (*Krebs*, 1985), como un índice que considera la abundancia proporcional de especies. De esta forma:

$$Diversidad = -\sum_{i=1}^{n} Div_i$$

Ecuación 4. Expresión del índice de diversidad de Shannon-Weaver

$$Div_i = P_i \times Ln(P_i)$$

Ecuación 5. Diversidad de los distintos grupos taxonómicos considerados

$$P_i = \frac{N^o\, especies\ del\ grupo\ I\ en\ el\ píxel\ X}{N^o\, especies\ del\ grupo\ I\ en\ Andalucía}$$

Ecuación 6. Abundancia relativa de especies para cada grupo taxonómico

Lógicamente hay que empezar a obtener información desde la última ecuación hacia la primera. Para ello se han seguido los siguientes pasos:

1. En primer lugar se ha recopilado toda la información sobre especies disponible en la Consejería de Medio Ambiente. Los grupos taxonómicos considerados fueron: Peces continentales (64), Anfibios (34), Reptiles (89), Aves (309) y Mamíferos (105).
2. La aplicación sucesiva, mediante tratamiento informático, primero de la ecuación 6 y

luego de la 5, da lugar a distintos índices que muestran la diversidad intrínseca de cada uno de los grupos considerados.

3. Con los resultados anteriores se puede aplicar la ecuación 4, que da lugar a un índice que muestra la diversidad específica global en Andalucía para los grupos evaluados.
4. La espacialización final del índice de diversidad específica muestra una distribución espacial en cuadrículas 10 x 10 Km –origen de los datos–.
5. Al mapa resultante se le aplica un filtro de medias circular con 10.000 m de radio.
6. El resultado se normaliza de 0 a 1, generando isolíneas para su representación definitiva.

Representación de la diversidad de taxones de flora

Como base para la representación de diversidad de los taxones de flora y la endemicidad de los mismos se ha utilizado la adaptación de la tipología biogeográfica de Andalucía, definida por *Rivas Martínez et al.* (1997), a las unidades de paisaje mencionadas previamente, ya que un análisis preliminar de ambas fuentes de información demuestra una elevada correlación de unidades (Figura 1).

Figura 1. Ajuste de las unidades biogeográficas sobre la imagen de satélite Landsat.

Figura 2. Información sobre taxones.

Sobre esta base, se ha representado tanto la diversidad de taxones como el grado de endemicidad de los mismos (Figura 2), según los datos obtenidos de la revisión de varias fuentes bibliográficas: *Blanca et al.* (1999), *Hernández-Bermejo et al.* (1999), *Hernández-Bermejo et al.* (1994), *Rodríguez et al.* (2002), *Rivas et al.* (1997).

RESULTADOS

Diversidad de hábitats

En la Figura 3 se muestra el resultado de la aplicación del cálculo de diversidad de hábitats asociados a usos del suelo y sectores biogeográficos.

Figura 3. Número de asociaciones vegetales por unidad de uso del territorio.

El mayor número de asociaciones vegetales por uso del territorio se da claramente en la provincia bética, si bien, es en Sierra Morena donde se observa una mayor heterogeneidad. La provincia de Almería, exceptuando la sierra de Gádor, el extremo oriental de Sierra Nevada y la sierra de los Filabres, presenta un menor número de asociaciones vegetales y una mayor uniformidad en los valores, hecho debido a la presencia de un mismo tipo de uso del suelo –matorrales dispersos– en la mayoría del territorio.

Diversidad estructural

La Figura 4 representa el índice de diversidad estructural obtenido a partir del proceso metodológico.

Se observa una clara diferencia entre las zonas cultivadas y las zonas naturales o seminaturales. Dentro de las zonas con un menor grado de diversidad estructural destacan el valle del Guadalquivir y las depresiones intrabéticas, zonas donde predominan claramente los cultivos herbáceos. Por el contrario, las zonas con mayor diversidad estructural se corresponden básicamente con los grandes espacios naturales protegidos de Andalucía, destacando el Parque Natural de los Alcornocales como el que presenta mayores índices. También son destacables

Figura 4. Índice de diversidad estructural.

en este sentido importantes áreas de Sierra Morena y las Sierras de Cazorla, Sergura y las Villas. Dentro de las zonas naturales y seminaturales, es en la zona del Almería donde los índices de diversidad estructural presentan valores más bajos, lo que parece lógico teniendo en cuenta la carencia del estrato arbóreo en buena parte del territorio. Dentro de las zonas cultivadas merecen ser destacadas la provincias de Jaén y Málaga por presentar valores más altos, debido fundamentalmente a la presencia de cultivos leñosos.

Diversidad fitocenótica

La Figura 5 representa el índice de diversidad fitocenótica.

Figura 5. Índice de diversidad fitocenótica.

Este índice representa la combinación de la diversidad de hábitats con la diversidad estructural, por lo que el patrón espacial de distribución responde a la distribución de cada uno de estos índices. La Figura 5 representa este índice en las zonas naturales y seminaturales, ya que en las zonas cultivadas no se ha calculado la diversidad de hábitats, por lo que únicamente se representa la diversidad estructural.

Si se discretiza el índice en tres clases (baja: valores inferiores a 0,239; media: valores entre 0,239 y 0,478 y alta: valores mayores a 0,478), se puede afirmar que más del 90 % del territorio evaluado se encuentra con valores de diversidad media o alta. Destaca la provincia bética

como la que presenta un mayor número de zonas con elevado índice. Dentro de Sierra Morena la provincia de Huelva se caracteriza por tener unos índices menores que los de las provincias de Sevilla, Córdoba y Jaén, debido fundamentalmente al elevado número de cultivos de eucaliptos existentes. En la provincia de Almería predominan los índices medios en las zonas más surorientales y los valores altos en las zonas próximas a los macizos montañosos.

Corrección del índice de diversidad fitocenótica en función del grado de amenaza

La cartografía resultante (Figura 6) muestra el elevado índice de amenaza de los hábitats que se presenta en todo el valle del Guadalquivir así cómo en las depresiones de Guadix y Baza y en el poniente almeriense. Asimismo, puede observase un gradiente entre estas zonas de máxima amenaza y las zonas más interiores de Sierra Morena o de las Béticas.

Figura 6. Grado de amenaza de los hábitats (valores más bajos implica mayor amenaza).

Diversidad específica de vertebrados

Los resultados (Figura 7) muestran cómo se distribuye el número y la proporción de los vertebrados en Andalucía.

Figura 7. Diversidad específica.

En el mapa aparecen tres grandes zonas donde los valores son más bajos: las campiñas de Carmona y Osuna, la campiña occidental de Jaén y buena parte de la provincia de Almería.

Por el contrario, el resto de Andalucía presenta valores bastante altos, destacando especialmente la zona comprendida entre la bahía de Algeciras y Fuengirola, el parque Nacional de Doñana y algunas zonas de Sierra Morena y las Béticas.

Generación del Mapa de Biodiversidad de Andalucía

Como se comentó al inicio de este trabajo, la cartografía aquí expuesta pretende reflejar la variación y abundancia relativa de hábitats y especies. Por tanto, el mapa resultante es la unión de todas las variables, cuyo cálculo se ha ido explicando a lo largo del texto. Así, la base de este mapa la constituye el índice de diversidad fitocenótica en la zonas naturales o seminaturales y el índice de diversidad estructural en las zonas cultivadas. Sobre esta información se ha representado la abundancia proporcional de taxones de vertebrados, mediante el uso de isolíneas calculadas a partir de la aplicación del índice de Shannon-Weaver. Por otro lado, la sectorización biogeográfica de la región constituye la base sobre la que se representa tanto la abundancia como la endemicidad de los principales taxones de flora y fauna presentes en Andalucía (Figura 8).

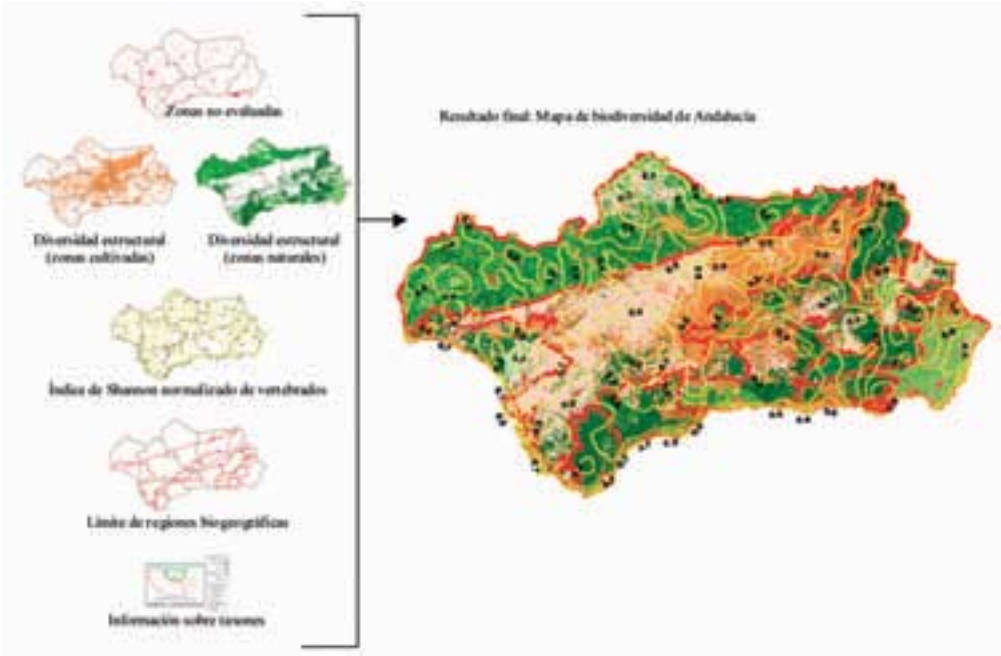


Figura 8. Resumen de los resultados intermedios y procesamiento para obtener el mapa final.

CONCLUSIÓN

La metodología utilizada en la realización de este mapa demuestra las posibilidades de desarrollar procesos de evaluación y seguimiento del estado y conservación de la biodiversidad a partir del uso de las nuevas tecnologías de la información. Los modelos de evaluación desarrollados a partir de las tecnologías de SIG deben de apoyarse en sólidas bases de datos territorializadas y con criterios comunes de generación de información, siendo una de las principales limitaciones existentes actualmente. Según los resultados obtenidos Andalucía presenta unos niveles muy elevados de biodiversidad, existiendo diferencias apreciables entre las diferentes provincias biogeográficas que la componen.

REFERENCIAS

Braun-Blanquet, J. (1979): *Fitosociología: Bases para el estudio de las comunidades vegetales,* H. Blume Ediciones. Madrid. 820 pp.

Blanca, G., Cabezudo, B., Hernández-Bermejo, J.E. Herrera, C.M. Muñoz, J. y Valdés, B. (eds.) (1999): *Libro rojo de la flora silvestre amenazada de Andalucía*. Tomo I, *especies en peligro de extinción*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla. 302 pp.

Hernández-Bermejo, J. E., Clemente Muñoz, M (eds.). (1994): *Protección de la flora en Andalucía*. Consejería de Cultura y Medio Ambiente. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía

Hernández-Bermejo, J. E., Clemente Muñoz, M. y Rodríguez, C. (1999): "Estrategias de conservación de la flora amenazada". *Medio ambiente,* Vol. 30, pp. 52-59.

Krebs, Charles J. (1985): *Ecología, estudio de la distribución y la abundancia*. Editorial Harla. México.753 pp.

MacArthur R. H., and E. O. Wilson. (1967): *The theory of island biogeography*. Princeton University Press, Princeton.

Magurrán A. E. (1989): *Diversidad ecológica y su medición*. Ediciones vedrà. Barcelona. 200 pp.

Rívas-Martínez, S., A. Asensi, B. Díez-Garretas, J. Molero, F. Valle (1997): "Biogeographical sinthesis of Andalusia (southern Spain)". *Journal of Biogeography,* Vol 24, pp. 915-928.

Rodríguez Hiraldo, C., Vilches Arenas, J. y Renau Casla, S. (2002): *Red de jardines botánicos en espacios naturales: espacios para la conservación de la biodiversidad*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

Valdés, B. et al. (1993): *Introducción a la Flora Andaluza*. Junta de Andalucía. AMA.

Diseño de herramientas geográficas para la difusión de información ambiental: una experiencia en Alcalá de Henares

F. Escobar Martínez[1], I. Francés Herrera[1], M. J. Salado García[1] y D. Saraçoðlu[2]

(1) Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Alcalá, C/ Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares.
(2) CIHEAM, Centro Internacional de Altos Estudios Agronómicos Mediterráneos, Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza, Apdo. 202, 50080 Zaragoza.

RESUMEN

Esta comunicación describe y discute la creación del Mapa Ambiental de Alcalá de Henares, concebido como herramienta al servicio de la planificación y la gestión ambiental. Se detalla el proceso seguido para la creación del mismo en un entorno SIG y para el diseño de una herramienta multimedia cuya finalidad última es facilitar la participación ciudadana en los procesos de toma de decisiones.

El artículo arranca con una descripción de los objetivos que guiaron el proyecto. Seguidamente se incluyen los pasos principales que componen la metodología adoptada, destacando (1) el proceso seguido para la recopilación de información, que abarca desde informes y listados alfanuméricos, hasta mapas digitales de formato diverso, pasando por fotografías aéreas y mapas analógicos, (2) la revisión y homogeneización de la información recogida, y (3) la presentación de resultados.

Los temas de que consta el mapa ambiental creado presentan información referente a la estructura urbana (zonas naturales y urbanas, altitud y orientación, manzanas, ejes de calles y callejero de la ciudad), población y demografía (evolución, pirámides, estructura sociolaboral, densidad, crecimiento anual, diversos índices, migración, etc.), climatología y atmósfera (información procedente tanto del Instituto Nacional de Meteorología como de los observatorios de la Comunidad de Madrid), contaminación acústica, geología (geomorfología y litología), suelo (usos y aprovechamiento), agua (recursos, consumo, contaminantes), energía (consumo), residuos (caracterización, flujos, volumen, gestión, recogida etc.), flora (inventarios), vegetación (zonas verdes e inventarios), fauna (distribución de especies

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

de mayor interés), arqueología (interés y estado de las excavaciones), huella ecológica y zonas de interés naturalístico (contenidos, diversidad, paisaje, etc.) y ambiental (problemáticas más relevantes).
El producto final fue completado con un CD-ROM que incluye, de forma interactiva, las diferentes capas de información creada. El propósito de esta herramienta multimedia responde a la necesidad creciente de proporcionar medios, tanto a la administración como a la población, para facilitar la difusión y para crear plataformas en donde el ciudadano en particular y la sociedad civil en general puedan contribuir al establecimiento de prácticas para la buen gobierno de la ciudad.

***Palabras Clave**: Mapa Ambiental, Participación Ciudadana, Cartografía, SIG, Gobernanza.*

ABSTRACT

This paper describes and discusses the environmental map of Alcalá de Henares, conceived as a tool for environmental planning and management. The implementation process followed in a GIS environment and the development of a multimedia-based tool for public participation in decision making processes are detailed.
The paper commences with a description of the objectives that guided the project. It follows with the main phases in the methodology adopted highlighting (1) data gathering, from reports and alphanumeric lists to digital maps and aerial photography and other cartographic products, (2) revision and harmonization of collected data, and (3) results presentation.
The topics included in the environmental map include themes like urban structure (natural, rural and urban zoning, altitude and aspect, blocks, and centre street lines), population and demography (evolution, pyramids, economic structure, density, annual growth, various indexes, migration, etc.), climatology and air quality (information emanating from the Spanish National Bureau of Meteorology and the Regional observatory network in Madrid), acoustic contamination, geology (geomorphology and lithology), soils (uses), water (resources, consumption, pollutants), energy (consumption), wastes (characterization, flows, amount, management, collection, etc.), vegetation (inventories and protected areas), wild life (distribution of high interest species), archaeology (interest and sites), ecological trace and areas of natural interest and environment (contents, diversity, landscape, issues, etc.).
The final product was accompanied by a CD-ROM including, in interactive format, all created layers. The aim of this multimedia tool responds to an increasing need to provide means for both information diffusion and the implementation of forum for public participation. El propósito de esta herramienta multimedia responde a la necesidad creciente de proporcionar medios, tanto a la administración como a la población, para facilitar la difusión y para crear plataformas en donde el ciudadano en particular y la sociedad civil en general puedan contribuir al establecimiento de prácticas para la buen gobierno de la ciudad.

***Key words**: Environmental Map, Civil Participation, Cartography, GIS, Governance.*

INTRODUCCIÓN

Es ya un lugar común que el ritmo actual de consumo de recursos naturales y de contaminación del entorno reduce la herencia del capital ambiental de las generaciones futuras y amenaza el equilibrio de los grandes mecanismos reguladores del planeta (*Jiménez Herrero*, 2001, p. 14). La elaboración gradual del concepto de sostenibilidad ha ido incorporando dimensiones económicas, sociales e institucionales al imperativo de conservación de los ecosistemas, configurando un concepto complejo, discutido y en permanente desarrollo.

Especialmente reseñable ha sido durante los últimos veinte años la reflexión en torno a la sostenibilidad urbana. Y es que esta cuestión se muestra crítica por varias razones. En primer lugar, es conocido el creciente peso de la población urbana a nivel mundial. Hoy algo más de la mitad de la población del Globo vive en ciudades, y la tasa de urbanización crece deprisa, sobre todo en los países menos desarrollados. Por otro lado, las transformaciones recientes de la economía mundial están reforzando el papel de la ciudad en el desarrollo económico y la organización territorial (*Dollfus*, 1999; cit. en *Calderón*, 2000). En ese mismo sentido, el informe intermedio del V Programa de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de la UE (1996) establece que la política ambiental debe comenzar en las ciudades, dado el impacto que generan (industria, transporte), la complejidad de sus problemas (para los que no existen políticas sectoriales eficaces), la aplicabilidad en ese ámbito de la ordenación del territorio y la planificación estratégica (herramientas básicas para alcanzar muchos de sus objetivos) y su posible papel como difusor de modelos de comportamiento compatibles con el desarrollo sostenible).

Por todo ello, la dinámica que desde ella se imponga en cuanto a consumo de recursos, distribución de actividades y de la población incidirá de forma decisiva, no sólo en la calidad ambiental del espacio urbano, sino mucho más allá de los límites del perímetro construido de la ciudad. Las ciudades, por tanto, han de jugar un papel primordial en el cambio de paradigma hacia el desarrollo sostenible (*Comisión de las Comunidades Europeas*, 1990; *Camagni et al.*, 1998; *Diamantini y Zanon*; 2000; *Button*, 2002).

Los epígrafes siguientes pretenden avanzar en la reflexión del papel de la geografía y de las herramientas geográficas en la difusión de información ambiental y, por ende, en la participación ciudadana y en la sostenibilidad urbana. La base de datos recogida sobre Alcalá de Henares, municipio de unos 190.000 habitantes perteneciente al área metropolitana de Madrid, nos sirve como banco de pruebas para el diseño y verificación de una herramienta de visualización de datos territoriales y ambientales que puede difundirse a través de un CD-ROM o de internet.

DESARROLLO URBANO SOSTENIBLE Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

¿En qué consiste esa sostenibilidad? Como es sabido, éste es un término de uso muy común, pero al tiempo, polémico, no dotado aún de un significado unívoco. Sin querer entrar ahora en el análisis detallado de diferentes posturas en torno a la sostenibilidad, mencionaremos, sin

embargo, dos de las características en las que parece haber un mayor acuerdo. En primer lugar, los problemas ambientales requieren un **punto de vista holístico**; los enfoques sectoriales, al olvidar las relaciones entre fenómenos y los ciclos de retroalimentación, han demostrado su ineficiencia. Por otro lado, desde su institucionalización en la Cumbre de Río (1992), el concepto ha estado siempre asociado al fomento de la **participación ciudadana**. En su programa de acción se marca, entre otros muchos, el objetivo de que la mayoría de las autoridades locales de cada país deberían haber llevado a cabo, para 1996, un proceso de consultas con sus respectivas poblaciones y haber logrado un consenso sobre una "Agenda 21 local" para la comunidad (punto 28.2). Intentaremos mostrar la utilidad de herramientas simples como el Mapa Ambiental que aquí presentamos tanto para acercar la información ambiental a ciudadanos y decidores como para conservar ese enfoque integrador que puede aportar el enfoque geográfico.

La necesidad de un punto de vista integrador

De entre los fallos comunes atribuidos a las prácticas convencionales de gestión ambiental destacaremos, en primer lugar, la especialización sectorial de los individuos y organizaciones. Para su propia pervivencia, las distintas organizaciones tendrán interés en que los problemas y las soluciones se planteen de forma sectorial. Así, los planificadores del transporte sólo abordarán el problema de la congestión originada por el aumento del número de automóviles y propondrán entonces la construcción de nuevas carreteras; mientras, los profesionales de la salud urbana se preocuparán por la contaminación atmosférica para la que plantearán ciertas medidas correctoras.

En el mismo sentido, el traslado de hospitales o de centros de trabajo desde el centro de las ciudades hacia la periferia puede ser justificable, sin duda, desde el punto de vista económico. No obstante, parece necesario valorar conjuntamente otras repercusiones: pérdida de accesibilidad en transporte colectivo a esos recursos (y, por tanto, pérdida de accesibilidad de determinados grupos sociales); el descenso de ingresos de ese transporte colectivo y el peligro consiguiente de que, o bien el servicio se deteriore, o bien se haga más dependiente de subvenciones públicas; el tráfico extra generado por ese trasvase de viajeros desde los medios de transporte colectivo al coche propio.

En general, se trata de solucionar problemas complejos encerrándolos en estrechos marcos de referencia. Sin embargo, la sostenibilidad exige planteamientos integrados horizontal y verticalmente; planteamientos que busquen aprovechar las sinergias entre lo económico, lo social y lo ambiental tanto en la interacción entre departamentos de un mismo nivel, como en la cooperación entre distintos niveles administrativos (*Ravetz*, 2000). La ciudad no es únicamente la suma de sus partes: así, el bienestar de toda la ciudad no mejora automáticamente por el buen hacer de un sector determinado (la mejora de la estructura vial puede hacer que una ciudad en su conjunto tenga mayores problemas de circulación); o: la riqueza de una ciudad no se mide simplemente sumando los ingresos de todos sus habitantes; una creciente prosperidad económica general puede empobrecer y restringir la vida de los más desfavorecidos más que aumentar el bienestar de los más favorecidos (*CE*, 1998). En definitiva, en este informe de la Comisión Europea se plantea el siguiente marco estratégico de gestión ambiental:

1. **Determinar los problemas al *nivel conceptual* más adecuado**: cuanto más estrecha sea la delimitación de un problema, mayor es el peligro de que las soluciones, por olvidar los ciclos de retroalimentación, agraven sus causas. Por el contrario, cuanto más amplia y estratégicamente se delimite un problema, más posibilidades hay de que se alcance su solución real. Esto supone, en muchos casos, delimitar los problemas a un nivel más elevado (es decir, más abstracto o genérico) de lo que acostumbran a hacer los especialistas. En particular, exige que se resuelvan los problemas en lugar de desplazarlos de área o campo temático.
2. **Crear instrumentos compuestos para alcanzar objetivos múltiples**. Dadas las características de la problemática ambiental, hay que suponer que la solución de cualquier aspecto particular exige la combinación de varios instrumentos, y que cada uno de estos debe a su vez ayudar a resolver más de un problema.
3. **Aumentar la *capacidad* de lograr la sostenibilidad por parte de las administraciones locales y de otras personas o grupos que colaboran en esta tarea**. La capacidad entendida más que como un asunto de competencia técnica, conocimiento y métodos, como un concepto fuertemente relacionado con la confianza y motivación de los individuos, la flexibilidad y la apertura de las estructuras, el compromiso y el liderazgo de los representantes electos y la credibilidad y buena fe que la administración inspira en la sociedad, es decir, de la cultura organizativa.
4. **Crear instrumentos para la colaboración y la asociación: aprendizaje a través de la práctica.** Insisten en esta necesidad tanto el Programa 21 como el V Programa de medio ambiente de la UE, que se basa en el concepto de *responsabilidad compartida*. Esa colaboración y aprendizaje práctico se llevará a cabo a través de la educación y la formación profesional de *todo* el personal de las administraciones locales (es necesario lograr que los especialistas consideren sus conocimientos técnicos como uno de los diversos instrumentos para resolver los problemas, y no el único). Sólo así nos acercaremos a una real y fecunda interdisciplinariedad.

Desde la geografía, siempre se ha sostenido que el análisis y la comprensión del territorio como compendio de las relaciones pasadas y presentes entre la naturaleza y las sociedades humanas puede, sin duda, aportar un elemento esencial en la reflexión, el desarrollo y la aplicación de ese concepto de sostenibilidad. El entorno/territorio es el cañamazo en el que se entretejen los sistemas económicos, sociales, técnicos, culturales y políticos. Es a la vez *producto social*, en cuanto resultado de la acción del hombre sobre su medio, y *factor limitante/favorecedor* que modela las potencialidades y problemáticas de una región en el presente y en el futuro. "Espacio y sociedad interactúan, coevolucionan de forma continua" (*Gutiérrez Puebla*, 1999, p. 29; *Santos*, 2000; *Albet i Mas*, 2001).

Ese enfoque holístico nos hace conscientes de que actuar, por ejemplo, sobre la configuración y la calidad de los asentamientos o de las infraestructuras tiene efectos colaterales inmediatos en el ámbito de lo económico, de lo ambiental y de lo social. Las administraciones parecen ser cada vez más conscientes de esta ***trasversalidad* del territorio**, dado el nuevo peso adquirido por la planificación territorial y las políticas regionales (*European Commission*, 1999; *Gleeson y Carmichael,* 2001).

Es evidente, pues, que las herramientas que ayudan a mostrar esa realidad geográfica y las complejas relaciones entre sus componentes son de máxima utilidad dentro de este enfoque holístico de acercamiento a los problemas sociales y ambientales.

El principio de subsidiariedad y la participación ciudadana

Por otro lado, el principio de subsidiariedad[1] y la importancia dada a la participación ciudadana, tal como mencionábamos al inicio de este epígrafe, son otros pilares del concepto de sostenibilidad en torno a los que existe un alto grado de acuerdo. Ambos derivan de constataciones difícilmente discutibles:

- En primer lugar, es claro que no pueden aplicarse las mismas medidas o estrategias a todas las ciudades. En cada una encontraremos diferentes problemas y procesos, diferente organización y niveles competenciales. Además, si decidimos considerar el contexto y las interrelaciones entre fenómenos se hace imprescindible tomar el enfoque *bottom-up*.
- En segundo lugar, objetivos como el de reducir el uso de combustible fósiles sólo pueden alcanzarse si la gente los acepta y los adopta. La sostenibilidad exige grandes cambios en las actitudes de la sociedad e implica frecuentemente tomar decisiones entre objetivos en conflicto; por tanto, no puede imponerse desde arriba, sino que tiene que lograrse con la participación de los ciudadanos. Desde el V Programa Ambiental, "la UE reconoce que el 'planteamiento vertical' de la política ambiental basado en la legislación, que se ha venido aplicando durante mucho tiempo en la UE, se caracteriza por un considerable distanciamiento entre quienes toman las decisiones políticas y quienes las aplican, y que no bastará para alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible" (*CE*, 1998, p. 21). Por ello es necesario un cambio hacia planteamientos consensuados, lo que suele significar enfoques más flexibles en los procedimientos de gestión y fijación de objetivos y, desde luego, el derrumbe de las estructuras excesivamente jerarquizadas y de las divisiones sectoriales estrictas.
- Por último, no existe respuesta científica "objetiva" a la pregunta de cuáles son las condiciones y las cualidades importantes para el desarrollo humano; en muchos casos la respuesta a esas cuestiones depende de creencias, valores y aspiraciones de las personas que sólo pueden ser determinadas mediante su participación. Por lo tanto, la consulta y la participación de la sociedad son indispensables para determinar el significado y el contenido del desarrollo sostenible tanto a nivel mundial como local.

Todo ello nos remite a un concepto de ***gobernanza urbana*** que ha de ser, entre otras cosas, participativo, transparente y fiable; los decidores y los agentes urbanos (*stakeholders*), pero

---

[1] Principio de subsidiariedad: lo que puede hacer la Administración más cercana no debería hacerlo la más alejada (*Pindado*, 2000, p. 26). Habría que hacer un apuesta a favor de la ampliación competencial de los ayuntamientos, teniendo en cuenta que tal como dice la Ley Reguladora de las Bases del Régimen Local "los municipios son entidades básicas en la organización territorial del estado y cauces inmediatos de participación ciudadana en los asuntos públicos" (art.1) (cit. en *Pindado*, 2000, p. 26).

también la ciudadanía han de comprometerse activamente por el bien común. La buena gobernanza urbana se definiría además por: la **sostenibilidad** de todas la dimensiones del desarrollo urbano (social, económica y ambiental, lo que supone un compromiso claro de lucha contra la pobreza urbana); la **subsidiariedad** de la autoridad y los recursos hasta el nivel más adecuado (provisión de servicios eficiente); la **equidad** de acceso a los procesos de toma de decisiones y a la satisfacción de las necesidades básicas (nutrición, educación, servicios sanitarios, agua potable, etc.); y la **eficiencia** en la provisión de servicios públicos y en la promoción del desarrollo económico local. El eje de la Campaña para la Buena Gobernabilidad Urbana del PNUD que aglutina la mayor parte de estas características es el concepto de **inclusividad** (*Inclusive City*)[2].

Es claro, por tanto, que en el intento de aproximarnos a ese desarrollo sostenible urbano **se ha abandonado un enfoque meramente tecnocrático** (y lo que ello supone: enfoque predeterminado, frente a enfoques adaptativos; planificación desde arriba; pasividad de la población; diagnóstico sobre indicadores solamente cuantitativos y sectoriales …)[3]. En su lugar, han tomado o están tomando un protagonismo creciente los planteamientos que buscan en el diálogo con la sociedad civil y en el compromiso de ésta el camino hacia una mayor sostenibilidad.

En este contexto, el acceso de la ciudadanía a una información ambiental y territorial amplia, actualizada y fiable es esencial (*digital governance* o "gobierno virtual o electrónico")[4]. Los sistemas de información ambiental (EIS, por sus siglas inglesas) se han beneficiado en los últimos años de la evolución de la tecnología informática y de la posibilidad de disponer de mayor cantidad de datos de manera más sencilla. Los obstáculos a su difusión no son, por tanto, de orden técnico, sino humano y organizativo. Diversos aspectos de comportamiento e interacción humanos están relacionados con la capacidad de los individuos de absorber información y aceptar nueva tecnología. Muy frecuentemente, la tecnología de la información va por delante de la capacidad de los individuos para usarla. Es, por ello, muy necesario el diseño e implementación de herramientas de uso sencillo que acerquen esa información ambiental a ciudadanos y departamentos no habituados a manejar información en formato digital (*Haklay y Tobón*, 2003; *Rakodi*, 2003).

Los Sistemas de Información Geográfica, o los visualizadores basados en su misma filosofía de capas temáticas, permiten la integración en mismo formato y/o en un contexto de análi-

---

[2] Término que debe entenderse por oposición al de exclusión. Exclusión de ciertos grupos sociales como resultado de condiciones físicas, económicas o sociales, o debida a la dificultad para participar de forma efectiva en las decisiones políticas, impiden a esos grupos participar de forma plena de la vida y actividades de la ciudad (*Taylor*, 2000).

[3] "La economía tradicional es incapaz de evaluar correctamente los costes ambientales" (*Espinoza*, 2001, p. 220). Como también se ha abandonado en la explicación de los cambios en la ocupación del suelo (*Mapedza et al*., 2003), o en medidas para analizar las causas de la contaminación de ríos y reducirla (*Bunch*, 2004), para valorar el peso de las distintas variables en un análisis multivariante para determinar la capacidad de acogida de distintas áreas de un territorio (*Bojórquez et al.*, 2001); o para recoger información ambiental más completa espacial y temporalmente (implicación de organizaciones de la sociedad civil, ONG's…: *Gouveia*, 2000).

[4] Durante los años noventa se da una creciente aquiescencia con la necesidad de facilitar el acceso público a la información ambiental; véase, por ejemplo: *Convection on Access to Information, Public Participation in Decisión Making and Access to Justice in Environmental Matters o Aarhus Convention*, firmada por la Comisión Económica para Europa de Naciones Unidas en 1998 (*Haklay*, 2003).

sis común de datos de muy diversa índole (ecológicos, sociales, económicos), la actualización o ampliación de la base de datos de forma flexible y a bajo coste, la recuperación selectiva de información y la combinación flexible de la misma, la generación de cartografía *ad hoc* como instrumento de toma de decisiones y de participación ciudadana.

En definitiva, los SIG suponen una herramienta muy útil en las fases de descripción de la situación de un territorio (o de cualquiera de las variables ambientales, económicas o sociales que concurren en él), orientación del crecimiento o de los cambios territoriales (también sobre criterios de participación ciudadana), seguimiento y control de los programas aprobados. Habida cuenta de la evolución conceptual en torno a la cuestión ambiental y la sostenibilidad (inclusión de problemas de índole ambiental, económica, social interrelacionados), es evidente que estas herramientas pueden resultar útiles en el intento de acercar el concepto de desarrollo sostenible a la planificación y la gestión territorial a todas las escalas, incluyendo la escala municipal y metropolitana. Y de especial significación en la consecución de una participación ciudadana más plena e informada.

Recientemente han cobrado cierta relevancia en literatura especializada los **SIG para la participación pública** (PPGIS, por sus siglas inglesas). Surgen en un contexto interdisciplinar, como una herramienta de desarrollo comunitario (trabajo con grupos de jóvenes, mujeres y marginados; recordemos el concepto de *ciudad inclusiva*) y de gestión ambiental para promover la justicia social, la sostenibilidad ecológica y la mejora de la calidad de vida. Aplicados tanto a la resolución de problemas en sectores específicos de la sociedad como a evaluaciones amplias e integradas del entorno; sobre mapas suministrados tanto en soporte físico como digital; utilizando representaciones en 2D o 3D; participación cara a cara o a través de la web. Aparecen ligados a teorías sociales y a métodos y herramientas cualitativas originadas en campos como el planeamiento, antropología, geografía, trabajo social y otras ciencias sociales. Persiguen, en cualquier caso, acercar a la gente la información económica, cultural y biofísica generada por los gobiernos. Con el optimismo de los pioneros se afirma que ello refuerza el aprendizaje a lo largo de la vida en una forma que supera las divisiones entre culturas, disciplinas académicas, género y clase (*Aberley y Sieber*, 2003).

Hay autores que, dentro de este grupo, segregan una categoría de herramientas especiales: los sistemas de apoyo a la planificación (PSS) (*Geertman y Stillwell*, 2004). Para estos autores, los instrumentos que gestionan la información geográfica habitualmente utilizados son demasiado complejos, genéricos, inflexibles (racionalidad estricta), incompatibles para resolver la mayoría de las tareas de la planificación. Por el contrario, la nueva generación de herramientas (PSS) estaría diseñada para apoyar las diferentes fases del proceso de planificación (diagnóstico del problema, recogida de datos, búsqueda y extracción, análisis espacial y temporal, modelización de los datos, visualización, construcción de escenarios, realización de proyecciones, formulación de planes, evaluación y elaboración de informes, y posibilidades de mejora de la participación pública. Aunque tienen mucho en común con los Sistemas de Apoyo a la Decisión Espacial (o SDSS), los PSS centran su atención en problemas estratégicos o "de largo recorrido" y están explícitamente diseñados para facilitar la interacción y la discusión entre grupos.

Es de suponer que unos y otros irán desarrollándose en los próximos años. En cualquier caso, parece perfectamente defendible que las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG)

pueden ayudar a formular, estructurar o valorar alternativas territoriales con sus consiguientes implicaciones ecológicas, sociales y económicas, así como a la identificación los elementos críticos afectados, el reconocimiento de deficiencias y necesidades, la identificación de objetivos apropiados y la interpretación de impactos generados por las diversas alternativas.

Modestamente, el Mapa Ambiental del Municipio de Alcalá de Henares ha supuesto un primer paso, una primera aproximación a estas cuestiones. Tras la primera fase del proyecto que describimos brevemente a continuación, consistente en el diseño e implementación de una herramienta sencilla de visualización y consulta asociada a una base de datos sobre variables del medio físico y humano, esperamos poder extraer conclusiones técnicas y metodológicas que nos permitan mejorar la herramienta y la difusión de la información ambiental a escala local.

EL MAPA AMBIENTAL DEL MUNICIPIO DE ALCALÁ DE HENARES

Antecedentes

El proyecto que aquí presentamos ha sido desarrollado durante los años 2003/04 por personal de los Departamentos de Ecología y de Geografía de la Universidad de Alcalá y financiado por el Excmo. Ayuntamiento de la localidad.

En el municipio se habían realizado con anterioridad otros dos documentos titulados también "Mapa Ambiental", el último de ellos del año 1986, aunque de contenido netamente diferente del proyecto actual (aquellos con un claro sesgo hacia cuestiones médicas y de higiene pública, éste hacia variables más generales del medio físico, social y económico).

El encargo del proyecto se suscita ante la necesidad del Ayuntamiento de recuperar y homogeneizar información territorial y ambiental dispersa por distintos departamentos y concejalías, y de integrar los resultados de estudios anteriores encargados también por el ayuntamiento a diversos departamentos universitarios (sobre la flora y fauna de la ribera del río, sobre la producción y recogida de residuos urbanos, etc.). Los participantes quisimos, además, ofrecer un valor añadido adicional al producto: la posibilidad de organizar la información de manera que su difusión fuera muy sencilla, barata y abierta a mejoras y ampliaciones posteriores.

Descripción general y objetivos

Este Mapa Ambiental se entiende, por tanto, como herramienta al servicio de la planificación y gestión ambiental. Incluye una base cartográfica relacional con diversas capas temáticas referidas al municipio. Esa base cartográfica permitirá calcular con exactitud y rapidez relaciones entre variables, jerarquizarlas según su importancia en proyectos aplicados, y elaborar en su caso cartografía específica para los mismos.

Para su elaboración es preciso incluir tanto las variables urbanas como referentes al medio natural, para lo cual será necesario tanto recopilar y dotar de homogeneidad y coherencia los datos existentes referidos al municipio, como generar nueva información. Además, de cara al

mantenimiento, actualización y uso futuros del Mapa ambiental, se ha puesto especial atención a la correcta documentación de la base de datos. Es este un requisito básico para que el proyecto pueda utilizarse como punto de partida y enriquecer en el futuro su base de datos a medida que vaya generándose nueva información. De esta forma el mapa podrá ser utilizado y consultado por los distintos organismos municipales como referencia para el seguimiento, control y planificación ambiental.

Metodología

Las diferentes tareas a realizar, así como la secuencia de trabajo es la siguiente:

- Recopilación de la información.
  - Generada en el propio Ayuntamiento y en los organismos municipales relacionados con él sobre los temas a tratar, tanto en formato digital como analógico. Es importante no sólo realizar esta recopilación de información, sino también efectuar un análisis crítico de su calidad.
  - Generada por la Comunidad Autónoma de Madrid referida al municipio.
  - Utilización de las bases de datos de los Departamentos de Geografía y Ecología utilizables en este caso.
- Creación de la Base de Datos y armonización de variables, escalas, etc.
  - Digitalización de mapas analógicos.
  - Georreferenciación y geocodificación de direcciones.
  - Transformación de formatos gráficos y de ficheros temáticos.
  - Edición y verificación de capas temáticas.
  - Documentación de esta Base de Datos.

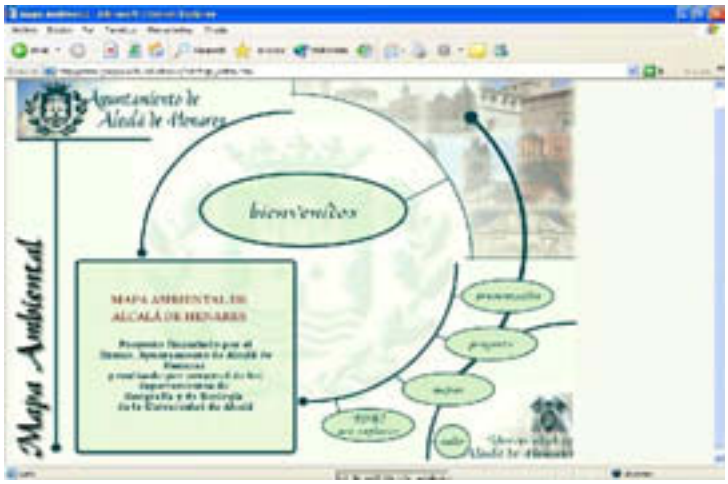


Figura 1. Imagen del portal del Mapa Ambiental de Alcalá de Henares

- Generación de la Cartografía y los resultados gráficos más relevantes.
- Diseño de un sistema de análisis fácilmente utilizable por los gestores de la base de datos.
- Realización de los análisis pertinentes y del informe final.

Para llevar a cabo la mayoría de estas fases se han utilizado distintos programas de Sistemas de Información Geográfica (Pc ArcInfo 3.5, ArcInfo 7.2, ArcView 8.2), así como diversos programas de diseño gráfico (Microstation 7, Autocad 2000, Freehand MX, Adobe Illustrator 10) y de difusión de publicación de contenidos multimedia (Director MX, Flash MX, Dreamweaver MX). El resultado de todo ello se recogió en un CD-ROM que se presentó al Ayuntamiento como parte del informe final del proyecto; posteriormente quedó a disposición pública en la dirección: www.geogra.uah.es/~doruks/catalogo_ultimo.htm.

La figura 1 presenta el portal de acceso al mapa ambiental de Alcalá en la dirección web citada.

CONCLUSIONES Y HORIZONTES DE FUTURO

Las ciudades y la vida urbana son claves en la consecución de un desarrollo más sostenible. Los métodos de gestión urbana actuales se muestran en muchos casos incapaces de reconocer o de reaccionar ante la complejidad de las relaciones entre los procesos físicos, económicos y sociales de las ciudades. Se precisa definir y probar instrumentos adaptados a la nueva manera de entender los problemas y las posibles soluciones de la realidad urbana.

Entre otros cambios, ha de difundirse y ponerse en práctica que la sostenibilidad urbana ha de ser una responsabilidad compartida; la cooperación y asociación entre diferentes niveles administrativos, organizaciones e intereses es, por tanto, de primordial importancia. La gestión sostenible es un proceso de aprendizaje en el que debe alentarse la discusión compartida de experiencias, la educación y la formación profesional, el trabajo interdisciplinario, las asociaciones y las redes, la participación y las consultas públicas, así como mecanismos innovadores de educación y sensibilización.

En ese contexto, nos parece que herramientas como la que aquí presentamos pueden ser muy útiles tanto para los propios técnicos de los ayuntamientos como para facilitar la participación ciudadana a escala local. Estaríamos avanzando, dentro del marco definido por la Unión Europea, hacia la determinación de los problemas al nivel contextual más adecuado, el diseño de instrumentos que permitan alcanzar objetivos múltiples, el incremento de la capacidad de gestión de los problemas de los decisores, agentes urbanos y ciudadanos y la creación de instrumentos y espacios para la colaboración y la asociación (*CE*, 1998).

REFERENCIAS

Aberley, D. y Sieber, R. (2003): *Public Participation GIS (PPGIS). Guiding Principles*. URISA - PPGIS, University of Wisconsin, Madison.

Adomokai, R. y Sheate, W. R. (2004): "Community participation and environmental decision-making in the Niger Delta". *Enviromental Impact Assessment* 24: 495-518.

Albet i Mas, A. (2001): "¿Regiones singulares y regiones sin lugares? Reconsiderando el estudio de lo regional y lo local en el contexto de la geografía postmoderna". *Boletín de la A.G.E.* 32: 35-52.

Almer, H. L. y Koontz, T. M. (2004): "Public hearings for EIAs in post-communist Bulgaria: do that work?" Enviromental Impact Assessment 24: 473-493.

Becker, D. E., Harris, C. C., McLaughin, W. J. y Nielsen, E. A. (2003): "A participatory approach to social impact assessment: the interactive community forum". *Environmental Impact Assessment Review* 23: 367-382.

Berné Valero, J. L. y Heras Bellido, J. de las (2003): "Aplicaciones de los SIGs y cartografía temática en auditorias medioambientales". *Mapping Interactivo*. Consultado el 04/02/2004 en http://www.mappinginteractivo.com/plantilla.asp?id_articulo=285.

Bojórquez-Tapia, L. A., Díaz Mondragón, S. y Ezquerra, E. (2001): "GIS-based approach for participatory decision making and land suitability assessment". *International Journal of Geographical Information Science* 15(2): 129-151.

Briassoulis, H. (2001): "Sustainable Development and its Indicators: Through a (Planner's) Glass Darkly". *Journal of Environmental Planning and Management* 44(3): 409-427.

Brugmann, J. (1997): "Is there a method in our measurement? The use of indicators in local sustainable development planning". *Local Environment* 2/1: 59-72.

Bunch, M. J. y Dudycha, D. J. (2004): "Linking conceptual and simulation models of the Cooum River: collaborative development of a GIS-based DSS for environmental management". *Computers, Environment and Urban Systems* 28: 247-264.

Burton, E. (2002): "Measuring urban compactness in UK towns and cities". *Environment and Planning* B 29(2): 219-250.

Button, K. (2002): "City management and urban environmental indicators". *Ecological Economics* 40: 217-233.

Calderón Calderón, B. (2000): "Utopía vs. mercado en la construcción de la ciudad finisecular: localismos, sostenibilidad y otros paradigmas "post"". *Polígonos* 10: 35-60.

Camagni, R. (1999): "El desarrollo urbano sostenible: razones y fundamentos de un programa de investigación". *Papeles de Economía Española* (80): 266-290.

Camagni, R., Capello, R. y Nijkamp, P. (1998): "Towards sustainable city policy: an economy-environment technology nexus". *Ecological Economics* 24: 103-118.

Comisión de las Comunidades Europeas (1990): *Libro verde sobre el medio ambiente urbano*. Bruselas, Dirección General de Medio Ambiente y Seguridad Nuclear.

Comisión Europea (1998): *Ciudades europeas sostenibles. Grupo de expertos sobre medio ambiente urbano*, Bruselas, Dirección General de Medio Ambiente, Seguridad Nuclear y Protección Civil, 319 p.

Diamantini, C. y Zanon, B. (2000): "Planning the urban sustainable development. The case for the province of Trento, Italy". *Environmental Impact Assessment Review* 20: 299-310.

Dürrenberger, G. y Hartmann, C. (2002): "Regional energy and CO2 scenarios:a decision support tools for policy makers". *Enviromental Impact Assessment* 22: 449-461.

European Commission (1999): *ESDP. European Spatial Development Perspective. Towards Balanced and Sustainable Development of the Territory of the European Union*. Postdam, European Commission*:* 87.

Font, J. (ed.) (2003): *Public participation and local governance*. Barcelona, Institut de Ciències Polítiques i Socials.

Geertman, S. C. M. y Stillwell, J. C. F. (2004): "Planning support systems: an inventory of current practice". *Computers, Environment and Urban Systems* 28: 291-310.

Gleeson, B. y Carmichael, C. (2001): *Responding to regional disadvantage: what can be learned from the overseas experience?*, Australian Housing and Urban Research Institute, University of New South Wales, University of Western Sydney Research Center*:* 17.

Gutiérrez Puebla, J. (1999): "Cambio y persistencia en el espacio geográfico: consideraciones para la reflexión medioambiental". *Observatorio ambiental* 2: 25-39.

Haklay, M. (2003): "Public access to environmental information: past, present and future". *Computers, Environment and Urban Systems* 27: 163-180.

Haklay, M. y Tobón, C. (2003): "Usability evaluation and PPGI: towards a user-centred design approach", *International Journal of Geographical Information Science*17(6): 577-592.

Huang, S.L., Wong, J.H. y Chen, T.C. (1998): "A framework of indicator system for measuring Taipei's urban sustainability". *Landscape and Urban Planning* 42: 15-27.

Jankowski, P. y Nyerges, T. (2001): Geographic Information Systems for Group Decision Making. Towards a participatory information science. London, Taylor & Francis.

Jiménez Herrero, L. (2001): *Desarrollo sostenible y economía ecológica: integración medio ambiente - desarrollo y economía - ecología*. Madrid, Síntesis.

Kingston, R., Carver, S., Evans, A. y Turton, I. (2000): "Web-based public participation geographical information systems: an aid to local environmental decision-making". *Computers, Environment and Urban Systems* 24: 109-125.

Kline, E. (2000): "Planning and creating eco-cities: indicators as a tool for shaping development and measuring progress". *Local Environment* 5(3): 343-350.

MacEachren, A.M. y Brewer, I. (2004): "Developing a conceptual framework for visually-enabled geocollaboration", *International Journal of Geographical Information Science*18(1): 1-34.

Mapedza, E., Wright, J. y Fawcett, R. (2003): "An investigation of land cover change in Mafungautsi Forest Zimbabwe, using GIS and participatory mapping". *Applied Geography* 23: 1-21.

Masser, I. (2001:"Managing our urban future: the role of remote sensing and geographic information systems". *Habitat International* 25: 503-512.

Mebratu, D. (1998): "Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review". *Environmental Impact Assesment Review* 18: 493-520.

Nyerges, T., Jankowski, P. y Drew, C. (2002): "Data-gathering strategies for social-behavioral research about participatory geographical information system use". *International Journal of Geographical Information Science* 16(1): 1-22.

Pindado Sánchez, F. (2000): *La participación ciudadana en la vida de las ciudades*. Barcelona, Ediciones del Serbal.

Rakodi, C. (2003): "Politics and performance: the implications of emerging governance arrangements for urban management approaches and information systems". *Habitat International* 27: 523-547.

Ravetz, J. (2000): "Integrated assessment for sustainability appraisal in cities and regions". *Environmental Impact Assesment Review* 20: 31-64.

Rybaczuk, K. Y. (2001): "GIS as an aid to environmental management and community participation in the Negril Watershed, Jamaica". *Computers, Environment and Urban Systems* 25: 141-135.

Santos, M. (2000): La naturaleza del espacio. Técnica y tiempo. Razón y emoción. Barcelona, Ariel.

Smith, R. L. (1985): "Activism and social status as determinants of neighborhood identity". *Professional Geographer* 37(4): 421-432.

UNCHS Habitat (2001): *Tools to Support Participatory Urban Decision Making*. Nairobi, The United Nations Centre for Human Settlements.

Veltz, P. (1999): Mundialización, ciudades y territorios. La economía de archipiélago. Barcelona, Ariel.
Warner, K. (2002): "Linking local sustainability initiatives with environmental justice". *Local Environment* 7(1): 35-47.
Webster, C. J. (1998): "Sustainability and public choice: a theoretical essay on urban performance indicators". *Environment and Planning* B 25(5): 709-729.

Aplicación de los SIG a la gestión ambiental: modelización de la recuperación potencial de hábitats no forestales en los valles de Hortmoier y Sant Aniol (Alta Garrotxa. Girona)

D. Varga i Linde, A. Crous i Bou y J. Vila i Subirós

Departamento de Geografía, Historia e Historia del Arte, Facultad de Letras, Universidad de Girona, C/ Plaça Ferrater Mora, 1, 17071 Girona.

RESUMEN

Las áreas de montaña presentan un aislamiento físico y unas condiciones climatológicas extremas que crean dificultades y sobrecostos permanentes para las actividades agrarias, dando lugar al despoblamiento rural de dichas zonas. Este despoblamiento conlleva a un cambio en los hábitats no forestales, provocando una clara homogeneización del paisaje, es decir, un predominio de masa boscosa ante espacios abiertos tales como cultivos, pastos y/o dehesas. Esta homogeneización del paisaje puede desembocar en una pérdida de diversidad biológica y en un aumento del riesgo de incendios.

El objetivo de esta comunicación es doble, por un lado identificar y constatar este cambio en los hábitats no forestales a partir de la cuantificación de éstos, en el período 1957-2003 y por otro, evitar este claro proceso de homogeneización mediante la modelización de la recuperación de espacios no forestales con la aplicación del SIG ArcView 8.2 y el módulo 3D Analyst y Spatial Analyst que nos ha permitido realizar los cálculos de pendientes y sombras, SIG ArcView 3.2 para la digitalización y el cálculo de índices de biodiversidad con su módulo Patch Analyst. Así como el módulo de Image Ortobase del programa de procesamiento de imágenes Erdas 8.4 para la ortorectificación de las fotografías aéreas del 1957 y el módulo IsoMDE del SIG MiraMon 5.0 para la creación del modelo digital de elevaciones

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

(MDE). El estudio concluye con una comparativa cuantitativa y cualitativa entre los hábitats no forestales actuales y los obtenidos como resultados derivados de la modelización.

***Palabras Clave**: homogeneización del paisaje, diversidad biológica, riesgo de incendios, sistemas de información geográfica y Alta Garrotxa.*

ABSTRACT

The mountain areas show a physical isolation and some extreme climatologically conditions that suppose difficulties and permanent costs for the agrarian activities, causing the rural depopulation process of these areas. This depopulation process bears to a change in the non forest habitats, origin a clear homogenisation of the landscape. So there will be a prevalence of the forest mass in contrast to open spaces as cultivations, grasses and meadows. This homogenisation of the landscape could cause a loss of biological diversity and an increase of the risk of fires.

The objective of this communication is to identify, verify and quantify this change in the non forest habitats during the 1957-2003. On the other hand we try to avoid this clearing homogenisation process using the modelling of the recovery of non forest spaces with the application of the GIS ArcView 8.2 and the modules 3D Analyst and Spatial Analyst that has allowed us to carry out the calculations of slopes and shades. GIS ArcView 3.2 has been used for the digitalisation and the calculation of biodiversity indexes with module Patch Analyst. As well as we applied the module of Image Ortobase of the program of prosecution of images Erdas 8.4 for the orthorectification of the air images of the 1957 and the module IsoMDE of the GIS MiraMon 5.0 for the creation of the digital pattern of elevations (MDE). The study concludes with a quantitative and qualitative comparative among the current non forest habitats and those obtained from the results of the modelling.

***Key words**: homogeneization of landscapes, biological diversity, risk of fire, geographic information systems and Alta Garrotxa.*

INTRODUCCIÓN

Las áreas rurales ocupan el 80% del territorio de la Unión Europea y en ellas se asientan alrededor del 20% de su población. En Cataluña, uno de los problemas más graves que han sufrido y están sufriendo la mayor parte de los municipios de montaña es el éxodo rural principalmente hacia zonas del litoral, que concentran en un 10% del territorio el 90% de la población total.

El abandono de estos núcleos de la actividad ganadera, forestal y agrícola por falta de rentabilidad económica ha dado lugar a cambios ambientales de gran trascendencia como es el aumento de la superficie y de la biomasa forestal, provocando una homogeneización del paisaje en detrimento de los paisajes agroforestales típicos de las áreas de montaña. A ello hay

que añadir un incremento del riesgo asociado a los incendios forestales, tanto por lo que respecta al potencial de las hectáreas afectadas como la disminución de la capacidad de detección y extinción inmediata de incendios por parte de la población local, los verdaderos gestores de los recursos naturales.

Este proceso ha desencadenado una paulatina pérdida de diversidad biológica y paisajística así como un deterioro y una progresiva desaparición del patrimonio cultural.

OBJETIVOS

El objetivo principal de esta comunicación es presentar una metodología para establecer un modelo de recuperación potencial de pastos y cultivos en el espacio natural protegido de la Alta Garrotxa (Girona), en concreto en los Valles de Hortmoier y Sant Aniol, zona donde la complejidad geomorfológica y biogeográfica inherente a este territorio logra su máximo esplendor (Vila, 2000). Esta modelización se fundamenta en la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) a partir de la aplicación de todo un conjunto de preceptos determinados *a priori*.

De forma complementaria un segundo objetivo es la elaboración de una cartografía de detalle (a partir de los ortofotomapas escala 1:5.000 del 1996 y trabajo de campo) de los hábitats no forestales de la zona de estudio (5.900 ha) y una cartografía de la misma tipología correspondiente al año 1957 (vuelo americano a escala 1:33.000), a partir de fotografía aérea ortorectificada y al año 1997 (a partir de los ortofotomapas 1:25.000), así como aportar información cartográfica y cuantitativa sobre la evolución de los hábitats no forestales.

METODOLOGÍA

A nivel metodológico pueden diferenciarse 8 fases distintas:

a) Escaneo

El primer paso, antes de empezar el proceso de ortorectificación, es la obtención del material cartográfico. En este caso fotografías aéreas del vuelo americano, que se encuentran en formato papel, han de convertirse a formato digital.

Para su disponibilidad en formato digital es necesario un paso previo, el escaneo de las fotografías correspondientes al vuelo americano a escala 1:33.000. Los parámetros más comunes a la hora de escasear un documento son la resolución geométrica, resolución radiométrica y tamaño del fichero. Las fotografías se escanearon en formato TIFF a 600 dpi y 24 bits/píxeles con un tamaño ~ 40 Mb por fotografía.

b) Ortorectificación

Mediante el software Erdas Imagines 8.4 se ha seguido el siguiente proceso:

Calibración de las imágenes

Las fotografías aéreas llevan toda una información complementaria, como la zona, escala aproximada, número de pasada, data, relojes con el nivel indicativo de verticalidad y control de altura, además de algunas características de la cámara. En este primer paso se han introducido las distancias focales de las cámaras fotográficas.

Los fiduciales (marcas que se localizan en el marco de la fotografía para identificar el calibraje de la cámara) de las imágenes no quedaban claros y, además, la mitad de las fotografías de la zona de estudio no disponían de información por ser fotografías colindantes con la frontera francesa (toda la información correspondiente a Francia está pintada de negro), lo que perjudica a la ortorectificación, ya que la mitad de las fotografías no disponen de puntos de control. Por estas causas se decidió utilizar la opción NON METRIC CAMERA en vez de la opción más común FRAME CAMERA.

Entrada de puntos de control

La ejecución de la opción *Point Measurament* permitirá asignar a las imágenes los puntos conocidos que hemos recogido del ortofotomapa. El programa diferencia entre tipos de puntos conocidos a los cuales denomina de diferente manera en función de la utilidad que tendrán a la hora de efectuar el análisis estadístico para rectificar las imágenes. Se distinguen así:

Puntos de control: catalogados como FULL si se conocen los tres valores, X,Y,Z; catalogados como HORITZONTAL si sólo se conocen la X y la Y y catalogados como VERTICAL se nada más se conoce la Z.

TIE POINTS: puntos comunes entre dos o mas imágenes, los cuales servirán para elaborar un mejor encaje entre la imágenes.

CHECK POINTS, puntos que nos permitirán comparar el grado de error en el proceso de rectificación.

Corrección de les imágenes: Triangulación y Ortorectificación

Antes de ejecutar los procesos de ortorectificación se elabora un informe de la triangulación comprobando qué puntos dan el error más elevado, con el propósito de desactivarlos cuando sea preciso.

Por último la opción *Resampling* nos permitirá ortorectificar la imagen a partir de los puntos de control y del modelo digital de elevaciones de la zona, a la vez que creará una nueva imagen resultado.

c) Creación de un modelo digital de elevaciones

Para la ortorectificación de las fotografías aéreas se empleó un MDE raster creado a partir del programa IsoMDE del SIG MiraMon 5.0.

Se escogió este programa porque permite enriquecer la información adicional con líneas de ríos y crestas. Esto implica que, cuando el análisis de los perfiles encuentra una línea de alguno de estos tipos, establece que en aquel punto se ha de ubicar un máximo o un mínimo, determinando así mejor la morfología del terreno.

Otra característica es que el programa, además de trazar los 4 perfiles de cada celda (horizontal, vertical y diagonales 45º y 135º) permite realizar perfiles adicionales a 22.5º y 67.5º.

A partir de la extracción de las curvas de nivel a una equidistancia de 5 metros y de las líneas de ríos y crestas del topográfico 1:5.000 se realizó este proceso obteniendo un raster en formato IMG de 5 metros de celda. Con la herramienta de densificación de rasters del mismo programa, se densificó el MDE hasta tener 1 metro de celda, obteniendo una mejor precisión en el proceso de ortorectificación.

d) Fotointerpretación

La fotointerpretación de las unidades de paisaje se realizó mediante el software ArcView 3.2. La importancia de este proceso recae en la extracción de la información contenida en la fotografía aérea. Interpretar una fotografía es examinar los objetos con el propósito de identificarlos, definir su categoría, su naturaleza, sus límites y sus relaciones con el medio. Siempre es importante una correcta identificación y establecimiento de llaves, referencias y verificaciones directas en el terreno.

Con la fotointerpretación se han individualizado los polígonos correspondientes a:

Cuadro núm. 1: Codificación de cubiertas y usos del suelo de 1957 (1:33.000) y 1997 (1:25.000).

Dígito identificador	Categoría	Cobertura (%)
1	Bosque cerrado	>= 90
2	Bosque denso	(90 – 60)
3	Bosque abierto	(60 – 10)
4	Pastos	<10
5	Cultivos	
6	Denudado	

Fuente: Vila, Varga, Cortijo i Macias, 2003

Cuadro núm. 2: Codificación de las cubiertas y usos del suelo de 1996 (1:5.000).

Dígito identificador	Categoría	Cobertura (%)
901	Bosque cerrado	>= 90
902	Bosque denso	(90 – 60)
1001	Bosque abierto sobre tartera	(60 –10)

1101	Bosque abierto sobre antiguos pastos o cultivos	(60 –10)
1401	Cultivos	
1501	Pastos mantenidos	<10
1502	Pastos abandonados	<10
1601	Balsa	
1602	Hoyo	
1701	Acantilado	
1702	Tartera	
1703	Curso hídrico	
1801	Casa	
1802	Casa derruida	
1901	Ermita	
2001	Pista forestal	

Fuente: *Vila, Varga, Cortijo i Macias,* 2003

La adopción del umbral <10% de recubrimiento como punto de diferenciación entre bosque i pastos nace de la aplicación de los datos diferenciales utilizados por la FAO.

A partir de la aplicación del dato diferencial de la FAO se ha establecido la recta de tipologias de bosque: Bosque abierto (10 - 60% de recubrimiento arbóreo), Bosque denso (60 - 90% de recubrimiento arbóreo) y Bosque cerrado (90 - 100% de recubrimiento arbóreo).

e) Proceso analítico

A continuación se presenta la propuesta de pautas a considerar para delimitar los espacios abiertos potenciales susceptibles a ser recuperados (*Vila et al.,* 2003):

– Localización en antiguos pastos, cultivos o bosques abiertos. Es necesario que los pastos a recuperar se sitúen en espacios que habían sido en el pasado reciente o habían podido desarrollar esta función, tomando como referencia los datos aportados por el vuelo americano de 1957 de pastos, antiguas zonas agrícolas y bosques abiertos.

– Área limitada por un determinado grado de pendiente. En este caso se consideran inadecuados para recuperar pastos los lugares con pendiente superior al 30%. Además se establece un gradiente en función del tipo de recuperación que se lleve a cabo: Hasta un 10% de pendiente se permite la recuperación de cultivos y/o pastos. A partir de un 10% de pendiente hasta un 30% se permite la recuperación exclusivamente de pastos.

Para el establecimiento de este porcentaje se ha tomado como punto de referencia el umbral utilizado por los forestales como límite orientativo de pendiente en la obertura de pistas forestales, un límite fijado en el 10%. Por encima de este porcentaje se considera que los

problemas de erosión, que se pueden derivar, hacen desaconsejable la obertura de la pista. También se han analizado las pendientes de algunas de las zonas más importantes de pastos de l'Alta Garrotxa.

– *Dimensión mínima.* Para que la recuperación de cultivos y pastos tengan un sentido tanto desde un punto de vista ambiental como paisajístico y económico es necesaria una mínima superficie. Con esta finalidad se ha establecido como áreas potencialmente recuperables aquéllas que cumplen los condicionantes anteriores y que tengan una extensión igual o superior a 0,5 ha.
– *Anchura de bancal:* los bancales de anchura inferior a 3 metros tienen poco sentido desde el punto de vista productivo y paisajístico, y, a la vez, el paso del ganado de bancal en bancal puede acabar produciendo graves problemas de erosión. Como referencia para el establecimiento de anchura mínima de bancal se han adoptado condicionantes de tipo técnico como, por ejemplo, la posibilidad de que un tractor pequeño pueda circular y maniobrar para hacer posible el cambio de sentido.

f) Análisis cartográfico

El análisis cartográfico se ha desarrollado con la ayuda del programa ArcGis 8.4 y sus módulos *3D Analyst* y *Spatial Analyst,* que ha permitido realizar los cálculos de pendientes. En concreto la secuencia de análisis que se ha utilizado es la siguiente:

i) Elaboración del cálculo de pendientes con los módulos *3D Analyst* y *Spatial Analyst* a partir del MDE creado en MiraMon 5.0.
ii) Selección de las áreas que cumplen las siguientes condiciones de pendiente (0-10% y de 10-30%) y una superficie igual o superior a 0.5 ha.
iii) Selección de determinadas cubiertas del suelo del año 1957 (cultivos, pastos y bosque abierto) referentes a espacios abiertos.
iv) Cruce de las capas de información referentes a la selección de las condiciones ya mencionadas con la opción *GeoProcessing Wizard* (*Intersect*) de ArcGis 8.4.

A estas últimas áreas seleccionadas es necesario añadir (cuando se disponga de la información) las zonas ocupadas por bancales de una dimensión mínima de 3 metros de anchura, que se obtendrán a partir de la digitalización de las fotografías ampliadas 100 cm x 100 cm y ortorectificadas del año 1957.

g) Cálculo del área en 3D

Con el MDE se deriva un cálculo de pendientes expresado en grados. Para calcular la superficie geométrica de la celda se ha de operar de la siguiente forma, la superficie geométrica es igual a la superficie reducida dividida por el coseno de la pendiente (º). Por último, un análisis zonal sobre la capa creada con las superficies geométricas (raster) y sobre la extensión de la capa de cubiertas y usos del suelo (vectorial) proporciona la superficie en 3D. Estos pasos se realizan con ArcGis 8.4 y el *Spatial Analyst* con la opción *Zonal Statistics*.

h) Cálculo de índices de diversidad paisajística

Para calcular la diversidad paisajística y avaluar el mosaico de hábitats para comprobar su estado de estabilidad o cambio se ha utilizado el módulo *Patch Analyst,* que es una extensión compatible con el software ArcView 3.2. (*Elkie et al.,* 1999) y procede del programa *Fragstat* (estadística de fragmentación), que empezó trabajando en modo de MS-Dos (*McKarigal y Marks,* 1995). Esta extensión permite describir y cuantificar la estructura del paisaje, forma, tamaño y número de hábitat. Para los hábitats de borde (*edge*) es importante medir la longitud total en el área de interés y también la diversidad (Índice de Shannon), con el fin de evaluar si el mosaico de hábitats está en una situación de estabilidad o de cambio.

RESULTADOS

La evolución del paisaje de los valles d'Hortmoier y Sant Aniol se ha caracterizado por una progresiva desaparición de los denominados "espacios abiertos", es decir aquellas áreas no ocupadas por bosques con un alto porcentaje de recubrimiento arbóreo (*Vila y Welch,* 2001). Se trata de una dinámica vinculada a la realidad socioeconómica, que se ha caracterizado por un claro despoblamiento desde mediados del siglo XIX, y muy especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XX, cuando el butano substituye al carbón vegetal.

Tal y como se ha comentado, el cambio en el paisaje de estos dos valles se puede cuantificar a partir del análisis de la evolución de las cubiertas en el período1957-2003 mediante un Sistema de Información Geográfica.

Cuadro 1. Usos y cubiertas 1957 (1:33.000) y 2003 (1:25.000)

	Año 1957			Año 2003		
	Área Ha	**%**	**Edge**	**Área Ha**	**%**	**Edge**
Bosque cerrado	2204.478	37.122	289455.771	5120.139	86.220	221248.259
Bosque denso	446.598	7.520	91537.308	54.059	0.910	26287.713
Bosque abierto	1176.089	19.805	128195.778	317.472	5.346	89382.001
Pastos	1736.540	29.242	218844.957	387.398	6.524	104200.039
Cultivos	159.879	2.692	38029.023	17.722	0.298	4093.674
Denudado	214.862	3.618	68207.512	41.656	0.701	15058.210

Cuadro 2. Comparación usos y cubiertas 1957/2003

	Área Ha	%	Edge	%
Bosque cerrado	2915.661	132,261	-68207.512	-23,564
Bosque denso	-392.539	-87,895	-65249.595	-71,282
Bosque abierto	-858.616	-73,006	-38813.777	-30,277
Pastos	-1349.142	-77,691	-114644.918	-52,386
Cultivos	-142.157	-88,915	-33935.349	-89,235
Denudado	-173.206	-80,613	-53149.302	-77,923

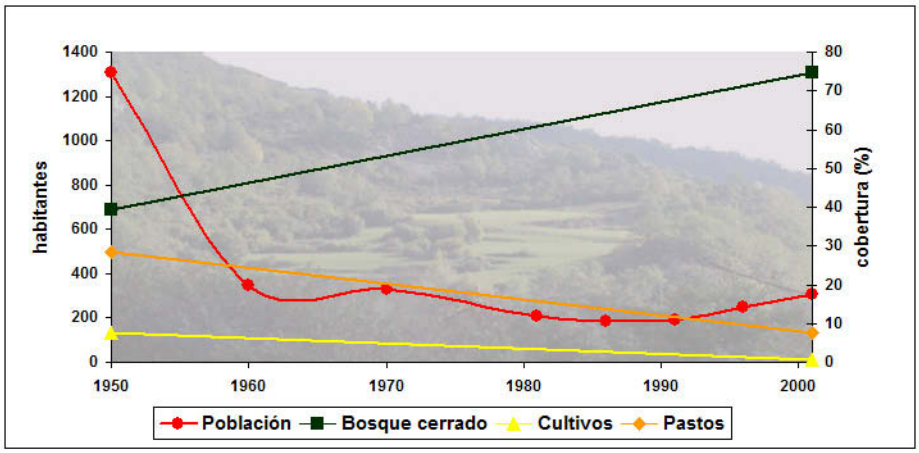


Figura 1. Evolución de la población *versus* evolución de las cubiertas del suelo.

De estos cuadros se deduce el incremento del bosque cerrado en un 130%, la reducción de la presión antrópica sobre el recurso forestal, que ha comportado la rápida recuperación de los bosques, la reducción de la zona de pastos en un 75%, fruto de la disminución de la actividad ganadera, y la disminución de los cultivos en un 90%, debido al proceso de despoblación que ha sufrido durante este período.

Los datos del siguiente cuadro ponen de manifiesto en primer lugar el grado de homogeneización que se ha producido en el área de estudio desde el año 1956 hasta el 1997.

Cuadro 3. Comparación entre los índices de diversidad paisajística 1957/2003

Estructura paisajística	N Fragmentos	Total Edge	Índice de Shannon
Paisaje 1957	284	834270.348	1.594
Paisaje 2003	94	460269.896	0.090

Los datos del cuadro ponen de manifiesto en primer lugar el grado de homogeneización producido en el ámbito de estudio desde el año 1956 hasta el 2003. Una homogeneización que se ha traducido en una reducción muy importante del número total de fragmentos, es decir polígonos, que han pasado de 284 a 94 con una disminución del 70%. Esto ha supuesto así mismo una reducción del "edge", espacio de ecotono entre dos usos o cubiertas del suelo, con la desaparición del 45%.

Evidentemente estos resultados se reflejan a la vez en el índice de Shannon que pasa de 1,594 a 0,090, ni más ni menos que un 95 % inferior. Cabe recordar que el índice de Shannon se calcula a partir de la dimensión y el número de tipologías de cubiertas en un determinado territorio.

Cuadro 4. Usos y cubiertas actuales (2003) a escala 1:5.000

	Año 2003		**Potenciales**	
	Ha	**%**	**Ha**	**%**
Balsa	0.075	0.001	0.075	0.001
Bosque denso	122.377	2.062	104.077	1.761
Bosque abierto sobre tartera	173.655	2.926	152.346	2.578
Bosque abierto sobre pastos	266.948	4.498	292.547	4.951
Cultivos	5.363	0.090	7.874	0.133
Pastos mantenidos	283.171	4.771	511.254	8.652
Pastos abandonados	69.007	1.163	0.000	0.000
Hoyo	0.664	0.011	0.664	0.011
Acantilado	96.683	1.629	96.683	1.636
Tartera	70.285	1.184	70.285	1.189
Curso hídrico	20.407	0.344	20.407	0.345
Casa	0.416	0.007	0.416	0.007
Casa derruida	0.526	0.009	0.526	0.009
Ermita	0.178	0.003	0.178	0.003
Pista forestal	23.471	0.395	23.471	0.397
Bosque cerrado	4845.358	81.645	4687.880	79.334

El cambio de escala ofrece una nueva perspectiva de la estructura del paisaje aunque evidentemente se mantienen las tendencias generales.

De los datos presentados en el cuadro anterior cabe remarcar por su trascendencia territorial el dominio del bosque cerrado, con un 80% de la zona de estudio. Esta cifra es extremadamente elevada en comparación con el 4,5% que ocupan los pastos y el 0,1% de los cultivos. Estos datos no hacen más que ratificar el proceso de homogeneización vivido por este espacio natural protegido.

Hasta este punto se han aportado y analizado los datos de la evolución del paisaje entre 1957-2003. A continuación se presentan los resultados referidos al modelo propuesto de recuperación de pastos y zonas agrícolas.

En concreto el resultado de la modelización dibuja un escenario de futuro con un 17 % de espacios abiertos (véase relación en el cuadro 5).

Cuadro 5. Distribución absoluta y relativa de superficies en función del modelo (proyección de futuro) a escala 1:5.000.

	Superf. fututa Ha	**Superf. fututa %**
Bosque abierto sobre tartera	152.346	2.578
Bosque abierto sobre pastos	292.547	4.951
Cultivos	7.874	0.133
Pastos mantenidos	511.254	8.652
Pastos abandonados	0.000	0.000
Total	964.022	16.314

Además cabe tener en cuenta que si a este 17% se añaden las zonas de bancales de más de tres metros de anchura, fácilmente nos situaríamos alrededor de un 20% total del territorio ocupado por "espacios abiertos" ubicados estratégicamente en las áreas más apropiadas.

Esta realidad potencial contrasta de forma más evidente con la situación presente, donde sólo el 5% se puede considerar espacio agrario efectivo, es decir pastos y cultivos, un cambio de considerable importancia, que queda perfectamente contrastado en el cuadro de índices previstos de diversidad paisajística (véase cuadro 6).

Cuadro 6. Índice de diversidad paisajística en la proyección de futuro a escala 1:5.000

Estructura paisajística	**N Fragmentos**	**Total Edge**	**Índice de Shannon**
Paisaje 2003	3100	1529375.246	1.379
Paisaje potencial	3186	1832942.094	1.530

En este cuadro se puede observar el aumento de la heterogeneidad paisajística que incorporaría la aplicación de este modelo. Evidentemente dicho incremento de la diversidad paisajística supondría a la vez una garantía para mantener e incluso incrementar la actual diversidad de hábitats y de especies, así como reducir el riesgo de incendios forestales.

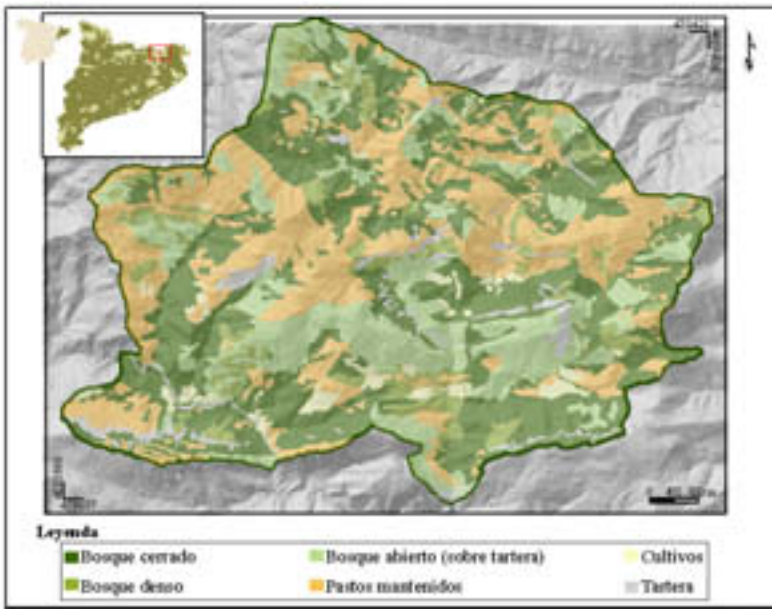


Figura 2. Usos y cubiertas del suelo 1957, escala 1:33.000

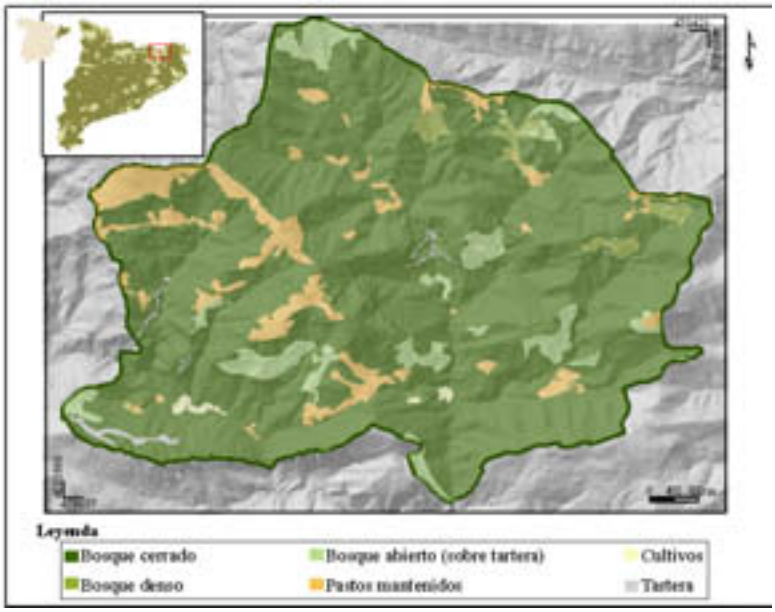


Figura 3. Usos y cubiertas del suelo 2003, escala 1:25.000

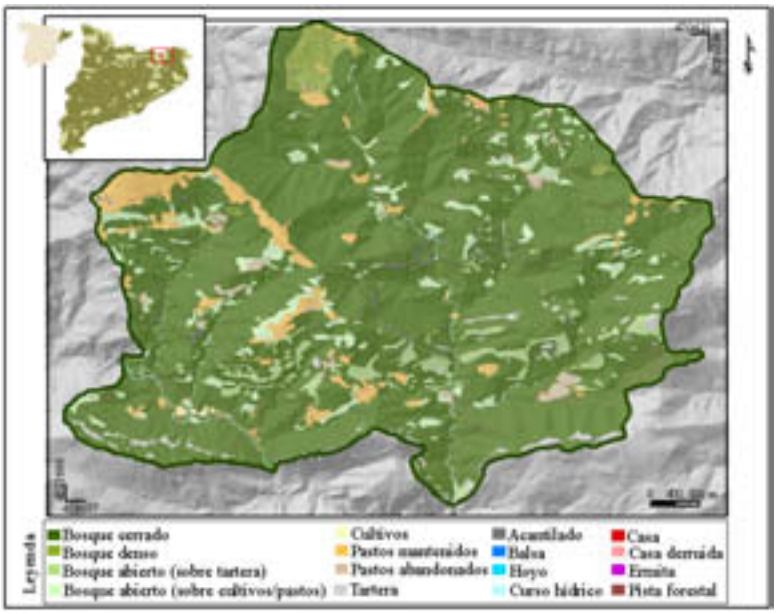


Figura 4. Usos y cubiertas del suelo 2003, escala 1:5.000

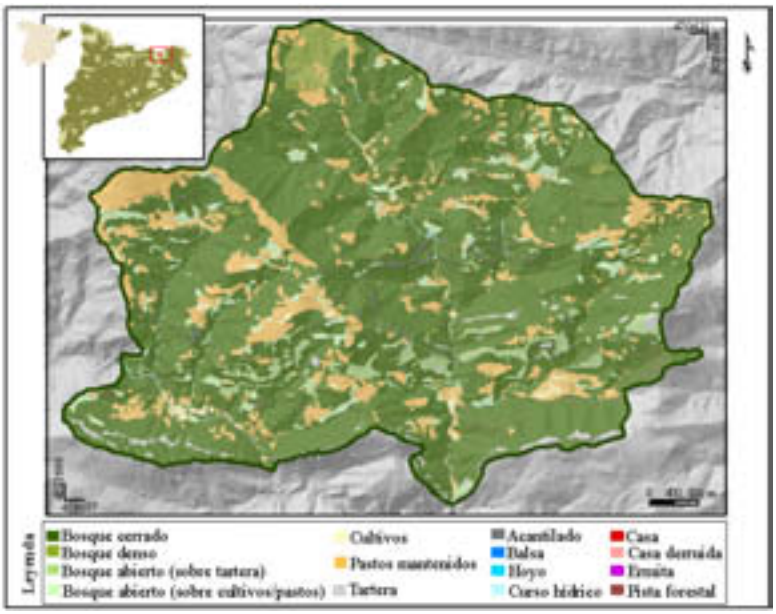


Figura 5. Usos y cubiertas del suelo potenciales, escala 1:5.000

CONCLUSIONES

La primera conclusión de este estudio es que se pone de manifiesto nuevamente la gran capacidad valorativa de los Sistemas de Información Geográfica para la evaluación y concreción de dinámicas territoriales y ambientales.

En segundo lugar se presenta una metodología extrapolable a otras realidades territoriales que vivan un proceso de homogeneización del paisaje, vinculado al despoblamiento e incremento de la superficie forestal, un modelo, en definitiva, que puede permitir de forma racionalizada una recuperación de la heterogeneidad del paisaje y un incremento de la diversidad paisajística que beneficia tanto a la diversidad de comunidades, hábitats y especies como la reducción del riesgo asociado a un potencial incendio forestal.

REFERENCIAS

Bracken, I.; Webster, C. (1990): *Information Technology in Geography and Planning. Including principles of GIS*. London & New York. Routledge, 444 p.

Burrough, P. (1986): *Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment*. Oxford, Oxford University Press, 346 p.

Elkie, P.C.; Rempel, R.S. y Carr, A.P. (1999): *Patch Analyst User's Manual A Tool for Quantifying Landscape Structure*. Thunder Bay. Ontario:Ontario Ministry of Natural Resource Northwest Science and Technology Technical Manual TM-0002, 22 pp.

Goodchild, M.F.; Steyaert, L.T. y Parks B.O. (1996): *GIS and Environmental Modeling: Progress and research Issues*, Fort Collins, GIS World, 488 p.

Heit, M. I. y Shortreid, A. (eds.) (1991): *GIS Apllication in Natural Resources*, Forst Collins, GIS World, 381 p.

Mcarigal, K. y MARKS, B. (1995): *FRAGSTAT:Spatial Pattern Análisis Program for Quantifying Landscape Structure*. Washington, DC:United States Department of Agriculture General Technical Report PNWGTR-351, 42 pp.

Merrian, H.G. (1989): "Ecological processs in the time and space of farmland mosaic". En I.S. Zonneveld y R.T.T. Forman (eds.), *Changing landscapes: an ecological perspective*. Springer-Verlag:121-133.

Redecker, B.; Fink, P.; Hardtle, R.; Riecken, U. y Schroder, E. (2002): *Pasture landscape and nature conservation*. Springer Verlag, 450 p.

Price, M.F. y Heywood, D. I. (eds.) (1994): *Mountain Environments & Geographic Information Systems*, London, Taylor & Francis, 309 p.

Vila, J. (2000): *Análisi i valoració dels boscos de les Valls d'Hortmoier i Sant Aniol (Alta Garrotxas)*, Tesi doctoral, Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional, Universitat de Barcelona, 510 p.

Vila, J. y Welch, J. M. (2001): "La homogeneización paisajística de los valles de Hortmoier y Sant Aniol (Alta Garrotxa): Caracterización y evaluación de los cambios ambientales en el período 1957-1979-1996 con Patch Analyst" en *Actas del XVII Congreso de Geógrafos Españoles*. Oviedo, Universidad de Oviedo, pp. 227-230.

Vila, J.; Varga, D.; Cortijo, S. y Macias, M. (2003): *Cartografia i estudi dels hàbitats no forestals de l'Alta Garrotxa (pastures i conreus) amb especial èmfasi dels hàbitats d'interès comunitari*. Càtedra de Geografia Pensament Territorial de la Universitat de Girona, 129 p.

Uso de un SIG para la elaboración de una propuesta de conservación y restauración hidrológico-forestal de las terrazas aluviales de Zapotitlán de las Salinas en la Reserva de la Biosfera Tehuacán - Cuicatlán, México

R. Montoya Ayala, D. Muñoz Iniestra, F. López Galindo y E. Benavides Garduño

Laboratorio de Edafología, Unidad de Biotecnología y Prototipos (UBIPRO), Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México, C/ Av. de los Barrios núm. 1, C. P. 54090 Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla Edo. de México.

RESUMEN

La conservación y restauración de los ecosistemas y sus recursos naturales son un objetivo ampliamente aceptado en el mundo, porque mantienen los sistemas que soportan la vida; por ejemplo, las ventajas que reporta la vegetación al sistema ecológico son la estabilización y la mayor protección al suelo a través de su sistema radical, aumentando considerablemente la resistencia a la erosión. En Zapotitlán, y específicamente en la zona de las terrazas, el estudio generó información para saber cómo acelerar el proceso de recuperación que realizarían las propias terrazas si cesara la causa de degradación.

El objetivo de este proyecto es aplicar un modelo a nivel local que proporcione información cartográfica sobre la capacidad que tiene el territorio para soportar la erosión, con la finalidad de proponer alternativas correctoras o protectoras por medio de la repoblación para proteger el territorio de la forma más adecuada frente a los agentes que deterioran su calidad ecológica.

Para el análisis de los datos se utilizaron distintos SIG (Idrisi y Arc View) con los cuales se aplicaron los modelos y se realizaron los cálculos de evaluación. Los resultados se han ob-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

tenido superponiendo las necesidades de protección del suelo (mapa de riesgo de erosión) a la capacidad de cada zona de albergar una u otra especie con la que se va a repoblar (mapa de vegetación potencial).
Al aplicar el modelo se ha marcado que la finalidad es proporcionar información acerca de cómo realizar obras correctoras o protectoras. La propuesta de actuación se centra en la modificación y aumento de la cobertura vegetal por repoblación, utilizando especies vegetales locales en los lugares con mayor riesgo de erosión. La información obtenida propone alternativas de actuación que se han considerado óptimas para alcanzar el objetivo prioritario que es la protección. No quedan excluidas otras posibilidades.

***Palabras Clave**: SIG, restauración, repoblación, erosión.*

ABSTRACT

The conservation and restoration of the ecosystems and their natural resources are an objective broadly accepted in the world for that they maintain the systems that support the life. For example, the advantages that it reports the vegetation to the ecological system, are the stabilization; the biggest protection to the soil through their radical system increasing the resistance considerably to the erosion. In Zapotitlan, and specifically in the area of the terraces, the study wants to generate information to know as the recovery process that they would carry out the own terraces, hurrying if the degradation cause ceased.
The objective of this project is to apply a model at local level that provides a cartographic information about the capacity that has the territory to support an activity, the erosion, with the purpose of proposing some alternative proofreaders or performance protectors or repopulation to protect the territory in the most appropriate way in front of the agents that deteriorate its ecological quality.
For the analysis of the data different SIG was used (IDRISI and Arc View) with which the models were applied and they were carried out the evaluation calculations. The results have been obtained superimposing the necessities of soil protection (map of erosion risk) to the capacity of each area to harbor one or another species with which will repopulate (map of potential vegetation).
When applying the pattern it has been marked that the purpose is to provide an information about how to carry out works proofreaders or protectors. The performance proposal is centered in the modification and increase of the vegetable covering by repopulation using local vegetable species in the places with more erosion risk. The obtained information proposes some performance alternatives that we have considered good to reach the high-priority objective that is the protection. Other possibilities are not excluded.

***Key Words**: GIS, restore, repopulation, erosion.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la divulgación de los problemas ambientales ha fomentado en la mayoría de los países la creación de un nuevo estado de opinión que considera que es posible el progreso sin el deterioro de la Naturaleza. En épocas anteriores, también existieron problemas medio-ambientales, pero es en los últimos treinta años, con el espectacular aumento de la capacidad transformadora del territorio por parte del hombre y sus medios, cuando se ha agudizado el desequilibrio entre el deterioro de los diferentes aspectos ambientales y su capacidad natural de recuperación. Entre las causas del deterioro se pueden citar las estrategias de desarrollo que utilizan de una forma poco racional los recursos naturales y la contaminación de diversa índole. Ante esta crisis ambiental, surge una saludable reacción colectiva que se dirige hacia el logro de un objetivo común: el desarrollo sostenible, cuyo propósito es el de alcanzar los fines propios del desarrollo, pero de forma que se mantenga la base de los recursos sobre los que se asientan las sociedades. En las iniciativas encaminadas adquiere especial relevancia la planificación integrada y la restauración de los espacios degradados.

En una primera aproximación, la restauración podría designar al conjunto de las iniciativas encaminadas a revertir o, si esto no es posible, a reducir los daños provocados en el territorio.

Según *W.R. Jordan III (1999)*, los orígenes de una restauración ecológica se remontan al primer tercio de este siglo, hacia 1935, cuando Aldo Leopold, mediante la dirección de dos proyectos de restauración (el Arboretum de la Universidad de Wisconsin y el de un terreno en los depósitos arenosos del río Wisconsin), enmarcados ambos en contextos ambientales diferentes, dio un giro a la concepción del territorio y a la relación del mismo con el hombre, aplicando los conocimientos científicos para lograr una mejora ecológica y paisajística de los territorios degradados.

Es hasta los años 60 - 70 cuando empiezan a estudiarse acciones de restauración desde un punto de vista ecológico apareciendo los primeros tratados básicos de ecología en restauración (*Whitton*, 1975; *Oglesby et al.,* 1972). Posteriormente, el número de investigadores dedicados al estudio de restauración y conservación aumenta espectacularmente así como el número de publicaciones y tratados formulándose teorías ya clásicas de restauración (*Leopold et al.,* 1964; *Vannotte et al.,* 1980; *Cairns,* 1984; *Bradshaw y Chadwick*, 1980; *Bradshaw,* 1986; *Cairney,* 1987; *Buckley,* 1989; *Harper,* 1992; *Avogadro y Ragaini*, 1993; *Harker,* 1993; *Bowles y Christopher,* 1994; *Jordan,* 1999) que contribuyen notablemente a la interpretación integrada de los ecosistemas y a la estimación de los impactos producidos por las actividades humanas, tanto en el plano geomorfológico como en las comunidades biológicas y en ecología fluvial.

Ante el estado de deterioro alarmante en que se encuentran nuestros ecosistemas, surge finalmente una bibliografía especifica de restauración y conservación (*Holland, et al.,* 1991; *Boon et al.,* 1992; *Gardiner,* 1991; *NRC*, 1992; *Calow y Pets,* 1994; *Munshower,* 1994), con la cual hoy se pueden abordar los trabajos necesarios par la recuperación de ecosistemas acuáticos y terrestres con una base científica avalada por estudios y experiencias anteriores.

La conservación de los ecosistemas es hoy día un objetivo ampliamente aceptado en el mundo, al menos teóricamente, y así ha sido recogido por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales.

Son varios los motivos a los que podemos aludir para justificar la restauración y conservación de los sistemas naturales; entre ellos podemos mencionar: el mantenimiento de los sistemas que soportan la vida, su valor práctico (control de la erosión, potencial genético), importancia económica, investigación científica, educación, valor estético, recreativo y consideraciones éticas, entre otros.

Las ventajas o beneficios que reporta la vegetación al sistema ecológico se pueden concretar en la estabilización; la presencia de la vegetación da mayor protección al suelo a través de su sistema radical y aumenta considerablemente la resistencia a la erosión. El éxito de la restauración por medio de la revegetación requiere de la consideración y coordinación de numerosos factores. En el caso de la Reserva de la Biosfera de Tehuacán - Cuicatlán específicamente en la zona de las terrazas de Zapotitlán de las Salinas, su gestión y conservación para el aprovechamiento sostenido de los recursos que ofrece, exige adoptar una estrategia a nivel de cuenca hidrográfica, realizando una planificación de los usos del suelo acorde con la conservación de los mismos, y teniendo en cuenta la interrelaciones que existen entre los componentes y los sistemas que les rodean.

Antes de proceder al diseño de las plantaciones o siembras, es necesario efectuar un reconocimiento de dónde se va a actuar y disponer de la información precisa acerca de: condiciones del clima, la precipitación (su distribución anual y estacional), la temperatura (máxima, mínima y duración) y la longitud del periodo vegetativo. La combinación conjunta de dichos parámetros nos enmarca ya en condiciones donde quedan excluidas determinadas especies y donde son más aconsejables otras.

Los proyectos de restauración tienen como objetivo acelerar el proceso de recuperación que harían las propias terrazas si cesara la causa de degradación.

En relación a la restauración de terrazas aluviales en México, debe mencionarse que este tópico ha sido poco estudiado, siendo muy escasa la bibliografía disponible acerca de su tipología, funcionamiento y principales causas de alteración por actividades humanas.

El objetivo general de este proyecto es una planificación física con base ecológica a nivel local con la finalidad de proponer alternativas de repoblación para proteger el territorio de la forma más adecuada frente a los agentes que deterioran su calidad ecológica aplicando un modelo de conservación y restauración.

Como objetivos particulares se propusieron los siguientes:

- Realizar una zonificación de áreas con mayor prioridad de actuación por ser las que revisten el mayor riesgo de erosión.
- Realizar un listado de las especies con la mayor potencialidad para ser utilizadas en la reforestación en función de características climáticas, orientación, altitud y tipo de suelo.
- Establecer una propuesta de zonas prioritarias de protección y restauración con especies vegetales locales.

DESARROLLO DEL TRABAJO

El objetivo de la planificación física en su primera fase de prospección y sectorización fue la obtención de una serie de aportaciones sobre cada punto del territorio estudiado con

la finalidad de adquirir datos ambientales para cada tema o aspecto del medio. La cartografía básica que se consideró en el área de estudio fue la vegetación y usos del suelo, modelo digital de terreno, altitud, orientación, pendiente, hidrología superficial, geomorfología, edafología, clima y ortofotos. Para la realización del proyecto se trabajó con la información a una escala de 1:20,000.

Para el manejo y tratamiento de la información se utilizaron los SIG IDRISI 32 y ARC VIEW 3.1. Con ellos se realizó la codificación y almacenamiento de la información cartográfica básica creándose una base de datos.

Con la información cartográfica en formato digital, se realizó la aplicación de los modelos y cálculos de evaluación para los objetivos propuestos en este estudio (Figura 1).

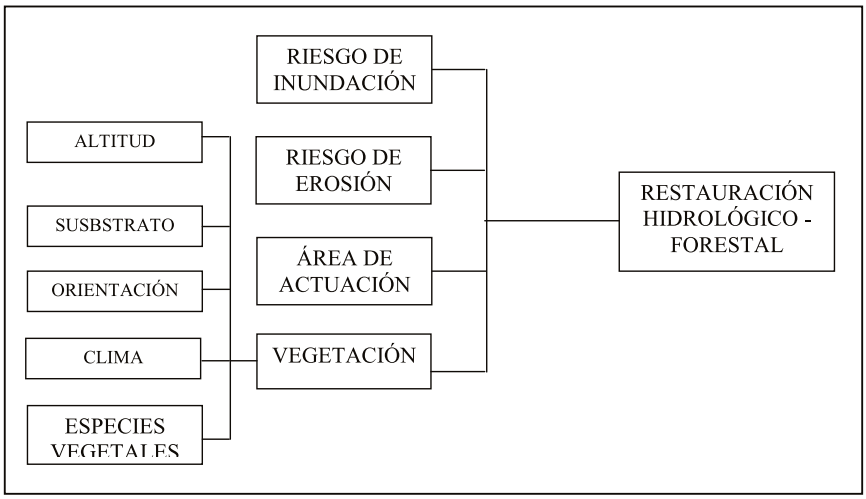


Figura 1. Modelo Aplicado para la Restauración Hidrológico-Forestal.

Para la obtención de los resultados finales se realizaron crostabulaciones cartográficas de las necesidades de protección del suelo y la capacidad de cada zona para albergar una u otra especie con la que se va a repoblar, y de esa manera quedaron definidas las zonas que van a ser repobladas con cada especie.

Posteriormente, se realizó una tarea de verificación con salidas al campo para comprobar lo realmente propuesto en la zonificación de este estudio. Así mismo, fue necesario consultar a los técnicos de los municipios ubicados en la región sobre las previsiones para los próximos diez años en cuanto a la ejecución de los planes y programas que se piensan desarrollar.

Área de Estudio

El ámbito territorial comprende el Valle de Zapotitlán de las Salinas dentro de la Reserva de la Biosfera Tuhuacán-Cuicatlán y comprende las zonas de las terrazas y su zona de influencia en los próximos 200 m que les rodean como áreas de amortiguamiento. Se localiza al Sur del

estado de Puebla, enclavado entre el Valle de Tehuacan al noreste y la zona limítrofe con el estado de Oaxaca. El área queda comprendida entre los 18° 10' y los 18° 27' 30" de Latitud Norte y entre los 97° 22' 30" y los 97° 40' de Longitud Oeste, es la subcuenca baja del Río Salado y comprende una superficie aproximada de 1004 km^2 (100.400 has.), con una diferencia altitudinal que va de los 1.242 a los 2.800 msnm. Los núcleos urbanos más importantes cercanos a la zona de estudio corresponden a Tehuacán, Zapotitlán de las Salinas, Santiago Acatepec y Los Reyes Metzontla (Figura 2).

El Valle de Zapotitlán de las Salinas se caracteriza en general por un fuerte grado de transformación, pese a ello, alberga interesantes valores faunísticos, botánicos, geológicos y paisajísticos, que se encuentran protegidos de acuerdo con la legislación vigente en materia de espacios naturales.

En esta parte de la reserva de la biosfera de Tehuacán - Cuicatlán, sobresalen los espacios con matorral desértico rosetofilo, el matorral crasicaule, y el mezquital asociado a vegetación secundaria arbustiva localizado en los principales relieves de la comarca y en las zonas más altas. En muchos casos representan sistemas en buen estado de conservación, siendo sus principales cualidades de tipo paisajístico. El área de estudio en general manifiesta una riqueza faunística particularmente notable, destacando la gran abundancia en especies endémicas; por ejemplo, se presentan enclaves que se registran a nivel nacional entre los máximos de diversidad de anfibios, reptiles y aves.

Figura 2. Área de Estudio.

RESULTADOS

Para este estudio se ha contado con las características propias del territorio en sus diferentes grados de susceptibilidad frente a los fenómenos erosivos más agresivos de la zona.

Así la vegetación existente, la litología y litofacies de los suelos y la pendiente conforman un mapa de riesgo de erosión en función de la mayor o menor medida en que dichos parámetros permiten o frenan la erosión. De igual forma se han considerado los parámetros de caudal, distancia al cauce y la geomorfología del territorio para obtener el mapa de riesgo de inundación.

a) Erosionabilidad del suelo

Se utilizó un modelo que, a través de su aplicación en el territorio, localizará las zonas susceptibles al desarrollo de un proceso de erosión potencial, ya sea en la situación actual o como resultado de alteraciones a partir de la misma. El modelo contempla la erosión como concepto geológico antes que edáfico. La erosión evaluada es sobre el material disgregado procedente de la alteración in situ de las diferentes litologías o bien sobre las distintas formaciones superficiales y no necesariamente sobre el material edáfico. Tanto la composición de la roca madre como la textura del suelo a que da lugar el grado de alteración, así como la protección por la cubierta vegetal, son los factores que se han tenido en cuenta para dar una clasificación de la erosionabilidad del suelo en cuatro clases.

b) Riesgo de inundación

Se considera riesgo de inundación de una superficie a la probabilidad de ocurrencia de un suceso que suponga la anegación del medio. La zona de estudio no pertenece al conjunto de regiones más frecuentemente afectadas por inundaciones debido principalmente al alto grado de cobertura del suelo y al reparto en el tiempo de las aguas de lluvia. El modelo se ha centrado en obtener una zonación del riesgo de inundación a partir de las características físicas intrínsecas del medio (altitud, pendiente, litología e hidrología). En la aplicación de este modelo se han obtenido tres clases de riesgo de inundación.

c) Vegetación

Se hizo una primera clasificación del territorio en función de la protección ejercida por la vegetación existente y de los usos a que se destinan los suelos. Así podemos decir que ciertos espacios no necesitan actuación correctora o no es posible actuar sobre ellos por ser objeto de algún uso. Los criterios para dar esta clasificación se basan en descartar cualquier actuación en las zonas siguientes:

- Las que tienen una cobertura vegetal suficiente para una adecuada protección. Se ha establecido que la cobertura es suficiente si la vegetación arbórea y arbustiva es mayor del 50 %.
- Las zonas cuyo suelo está siendo utilizado para algún tipo de aprovechamiento agrícola o avícola.
- Las zonas cuya vegetación posee por si misma algún valor ecológico especial o muestra cierto grado de evolución hacia formaciones estables (Figura 3 y Cuadro 1).

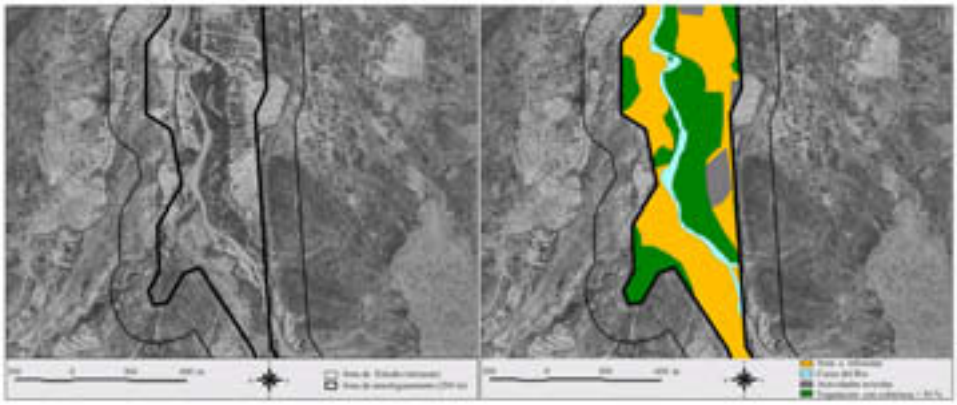


Figura 3. Acercamiento de una parte de las terrazas. Izquierda: Área de Terraza y área de amortiguamiento. Derecha: Área Potencial de la Terraza para ser Reforestada.

A la vista de las características generales de la zona y de la vegetación existente en zonas similares de la Reserva de la Biosfera de Tehuacán - Cuicatlán y además, por tratarse de una repoblación protectora sin intención productora, las especies vegetales se han elegido en función de un análisis de parámetros climáticos realizado con el programa *Bioclim* que proporcionó las áreas de distribución potencial de las distintas especies propuestas para la reforestación (*Rosas*, 2004).

Cuadro 1. Especies con la mayor potencialidad para ser utilizadas en la reforestación. Especie endémica *. Tipos de usos: 1, Forraje; 2, Comestible; 3, Combustible; 4, Medicinal; 5, Madera y construcción; 6, Ornamental; 7, Cerca viva, 8, Fibras; 9, Bebidas alcohólicas; 10, Venenoso; 11, Artesanías; 12, Jabón, 13, Resina y látex; 14, Colorantes (*Casas et. al,* 2000).

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE	USOS
Acanthaceae	Justicia mexicana	Muitle	1
Agavaceae	Yucca periculosa*	Izote	2, 3, 8, 11
Bignoniaceae	Tecoma stans	Quina amarilla	1, 4, 6, 11
Boraginaceae	Cordia curassavica	Barredor	1, 2, 4, 11, 17
Bromeliaceae	Hechtia podantha	Lechuguilla	1, 2, 3
Cactaceae	Cephalocereus columnatrajanti*	Cardón viejo	1, 2, 3, 5
	Coryphanta pallida*		1, 6
	Cylindropuntia rosea		
	Echinocactus platycanthus	Biznaga	1, 2
	Ferocactus flavovirens*	Biznaga	1
	Ferocactus robustus		1

	Myrtillocactus geometrizans	Garanbullo	1, 2, 3, 7
	Neobuxbaumia macrocephala	Teteche	1, 3, 5
	Neobuxbaumia tetetzo*	Teteche	1, 3, 5
	Opuntia depressa		
	Opuntia pilifera	Nopal	1, 2, 3
	Pachycereus hollianus*	Baboso	1, 2, 3, 7
	Pilosocereus chrysacanthus		
	Stenocereus stellatus	Xoconostle	1, 2, 3, 7, 9
	Cercidium praecox	Manteco	1, 2, 4, 12
Convolvulaceae	Ipomoea murocoides	Casahuate prieto	4
Euphorbiaceae	Cnidoscolus tehuacanensis*	Mala mujer	2, 4
	Croton ciliato-glandulifer	Soliman	4
Fuoquieriaceae	Fouqueria fomosa	Tlapacone	1, 3, 6, 7, 12
Krameriaceae	Kramenia cytisoides	Cochinilla	14
Malpighiaceae	Mascagnia parvifolia	Palito blanco	1, 3
Mimosaceae	Acacia constricta	Guajillo	1, 2, 3,
	Acacia subangulata		1, 3
	Leucaena esculenta	Guaje colorado	1, 2, 3, 4, 5, 7
	Mimosa luisana Brandegee	Cumito	1, 3, 5
	Prosopis laevigata	Mezquite	1, 2, 4, 5, 13
Nolinaceae	Beaucarnea gracilis	Pata de Elefante	5, 6
Simaroubaceae	Castela tortuosa	Chaparro amargoso	4
Ulmaceae	Celtis pallida	Acebuche	2
Verbenaceae	Lippia graveolens	Orégano	1, 2, 3, 4

Una vez elegidas estas especies se estudió su aptitud frente a los principales parámetros ecológicos de cada zona (substrato, orientación y altitud) con base en las exigencias de los parámetros físicos. Los mapas elaborados considerando estos parámetros permiten decidir finalmente cuáles son las zonas de vegetación potencial para cada una de las especies.

La obtención de los resultados finales para esta planificación física se obtuvieron superponiendo las necesidades de protección del suelo (mapa de riesgo de erosión), las áreas de exclusión (mapa de riesgo de inundación, lecho del río y actividades productivas) y la capacidad de cada zona de albergar una u otra especie con la que se va a repoblar (mapas de vegetación potencial). De esta manera quedan definidas las zonas que van a ser repobladas con cada especie.

La zona de las terrazas ocupó una superficie total de 1.445,78 has más 1.694,99 has de área de amortiguamiento y para el desarrollo de la planificación se ha establecido una malla de cuadriculas de 10 x 10 m para el manejo de la información, de manera que, con base en

los parámetros de cada cuadricula, es asignado un resultado. Esto permite una discretización del territorio y de su información para facilitar la toma de decisión sobre localizaciones concretas.

El resultado de esta planificación es la propuesta de una alternativa de repoblación con 35 distintas especies vegetales. Como ejemplo, se muestra el área de distribución potencial para *Prosopis leavigata*; el 77,5 % de la superficie de las terrazas (Figura 4); y el 76,9 % de la superficie de las terrazas y área de amortiguamiento (Figura 5) pueden ser reforestadas con esta especie.

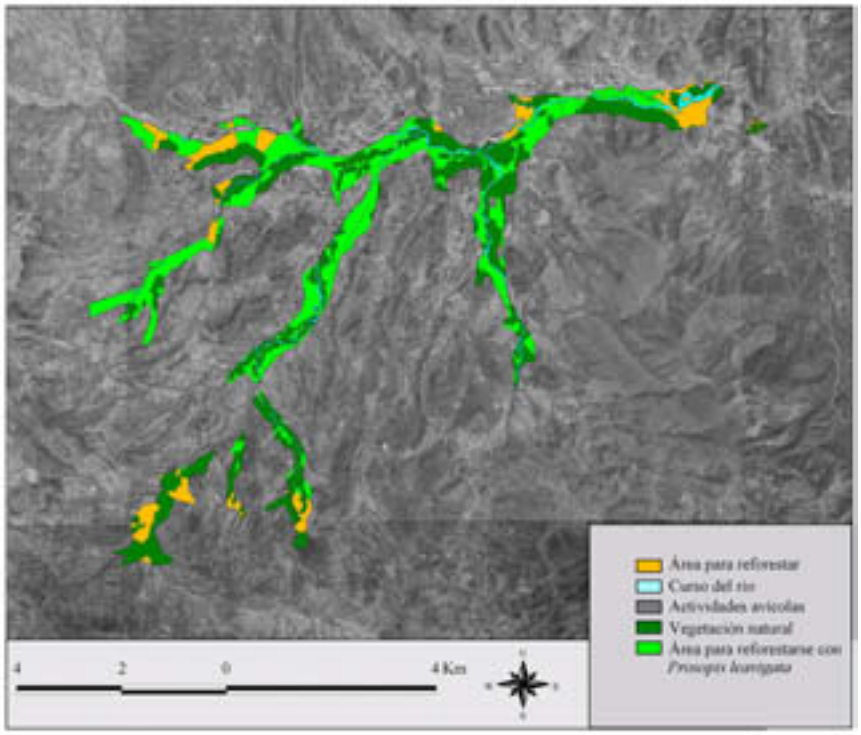


Figura 4. Distribución potencial de *Prosopis laevigata* para reforestar en la zona de las Terrazas.

El resultado obtenido es para cada una de las especies, donde se observa la distribución potencial que tienen en función de las características biológicas, físicas y especialmente los parámetros climáticos, siendo éstas las que más se adaptan a las condiciones del medio. Así mismo, al trabajar con una malla de 100 m^2, y con la finalidad de mantener la diversidad biológica de la Reserva se propone introducir el mayor número de especies posible a cada píxel.

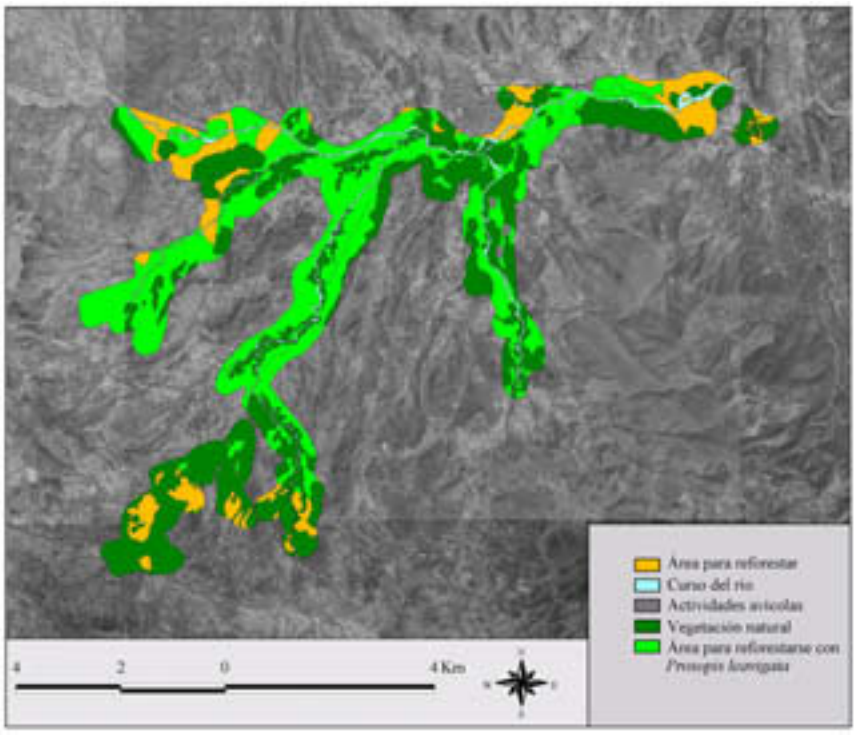


Figura 5. Distribución potencial de *Prosopis laevigata* para reforestar en la zona de las Terrazas y su área de amortiguamiento.

CONCLUSIONES

La propuesta de actuación como medida correctora y protectora se centra en la modificación de la cubierta vegetal existente en los lugares donde se haga necesaria, encaminada a un aumento de la cobertura por la repoblación. Aunque en principio podría pensarse que es posible la actuación sobre cualquier otro elemento, dada la casi ilimitada capacidad tecnológica actual, pero ni la pendiente ni las litofacies son modificables sin entrar en unos costes desorbitados que lo hacen inviable. Por tanto, el parámetro sobre el que es posible la actuación es la cubierta vegetal. No sólo es posible, sino que además es la más adecuada ya que proporciona resultados protectores de primer orden con unos costes relativamente bajos comparados con otras utilidades añadidas a la protección difíciles de cuantificar, pero en ningún caso discutibles.

Así mismo, se elaboró una cartografía donde quedan reflejadas cuáles son las zonas con prioridad de actuación por ser las que revisten mayor riesgo de erosión al encontrarse desprovistas actualmente de vegetación o tener menos del 50 % de cobertura vegetal y en donde potencialmente el territorio puede sufrir erosión si no se interviene en ellas.

Se ha elaborado una síntesis cartográfica que resume, para cada una de las especies, la ap-

titud que tienen para ser utilizadas en la reforestación de los espacios degradados o de urgente intervención.

La información obtenida en este estudio no es nada vinculante, sólo propone alternativas de actuación que se han considerado óptimas para alcanzar el objetivo prioritario que es la protección. No quedan excluidas otras posibilidades, aunque desde el punto de vista de la protección no sean las mejores, sin embargo pueden surgir otras consideraciones distintas de las estrictamente hidrológicas o ecológicas que pueden entrar a formar parte de los criterios de decisión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Dr. Oswaldo Téllez Valdés y al Biol. Irving Rosas Ruíz por facilitar los datos relativos a los modelos bioclimáticos de especies de importancia para la repoblación en la zona de Zapotitlán de las Salinas.

De igual manera, le manifiestan su agradecimiento a la Biol. Laura Olivia Ángeles Dorantes por haber realizado la versión en inglés del resumen y por su invaluable ayuda durante la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Avogadro, A. and Ragaini, R.C. (Eds.): 1993. *Technologies for environmental clean up: soil and groundwater*. Klumer Academic Publishers, London.

Bowles, M.L. and Christopher, J., 1994: Restoration of endangered species: conceptual issues, planning and implementation. *Symposium on the recovery and restoration of endangered plants and animals* (1990). Cambridge University Press, Cambrigde.

Bradshaw, A.D. 1986: *Ecology and design in landscape.* Blackwell Scientific Publications, London.

Boon, P. J., P. Calow and G. E. Petts (Eds). 1992: *Rivers Conservation and Management.* John Wiley and Sons, 470 pp.

Buckley, G.P. (Ed.), 1989: *Biological habitat reconstruction*. Belhaven Press, London.

Cairney, T. (Ed.), 1987: *Reclaiming contamined land*. Blackie, Glasgow.

Cairns, J. JR. (Ed.), 1984: *Rehabilitating Damaged Ecosystems*. University Center for Environmental an Hazardous Materials Studies, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.

Calow, P. and Petts, G.E. (Eds.) 1992-1994: *The rivers handbook: hydrological and ecological principles*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Casas, A, Valiente, B. A., Viveros, J. L., Caballero, J., Certes, L., Dávila, P., Lira, R. and Rodríguez, I. 2000: Plant resourcesof the Tehuacacán Valley, México. *Economic Botany* (55) 1:129-166.

Gardiner, J. L.1991: *River Projects and Conservation. A Manual for Holistic Apraisal*. John Wiley and Sons. Chichester.

Harker, D. 1993: *Landscape restoration handbook*. New York Audubon Society, New York.

Harper, D., 1992: *Eutrophication of freshwaters: principles, problems and restoration*. Chapman & Hall, London.

Holland, M.M., Risser, P.G. and Naiman, R.J. (Eds.), 1991: *Ecotones. The Role of Landscape Bounda-*

ries in the Management and Restoration of Changing Environments. Chapman and Hall, New York -London.

Jordan III, W.R. 1999: *Restoration ecology: a synthetic approach to ecological research*. Cambridge University Press, Cambridge.

Leopold, A. 1933: *Game Management*. C. Scribner`s Sons. New York.

Leopold, L. B., M. G. Wolman and J. P. Miller. 1964: *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman Co. San Francisco. 522 pp.

Munshower, F.F., 1994: *Practical Handbook of Disturbed Land Revegetation*. Lewis Publishers, Boca Raton.

National Research Council. Comitte On Restoration Of Aquatic Ecosystems, 1992: *Restoration of aquatic ecosystems: science, technology, and public policy*. National Academy Press, Washington D.C.

Oglesby , R. T., A. Clarence and J. Carlson. 1972: Rivers Ecology and Man. *Procs. Internacional Symposium on River Ecology and the impact of Man*. Academic Press, Ney York.

Rosas, R. I. 2004: *Modelos Bioclimáticos de Especies Potencialmente Importantes para la Reforestación en el Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México-Facultad de Estudios Superiores Campus Iztacala. México.

Vannotte, R. L., G. W. Minshall, K. W. Cummins, J. R. Sedell and C. E. Cushing. 1980: The River continuum concept. Canad. *J. Fish Aquat. Sci.* 37: 130-137.

Whitton, B. A. 1975: *River Ecology*. Blackwell Sci. Pub. Oxford. 725 pp.

Diseño de un sistema de apoyo a la toma de decisiones aplicado en la gestión forestal del Parque Natural Sierra de Huétor (Granada, España)

F.J. Bonet García y M. Chirosa Ríos

Delegación Provincial de Granada. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. C/ Marqués de la Ensenada 1, 18071. Granada.

RESUMEN

El Parque Natural Sierra de Huétor está en el centro de la provincia de Granada. Tiene 12.200 Has, de las cuales casi un tercio están cubiertas por densos pinares de repoblación. Se trata de formaciones que no han recibido tratamientos selvícolas y que no se adaptan a las características naturales del territorio. Constituyen un freno a la sucesión, impidiendo el desarrollo de la vegetación bajo su dosel. Por ello, tanto el plan forestal andaluz, como el español, los consideran como sustituibles por unidades de vegetación natural.

Según lo anterior, deberían ponerse en marcha procedimientos para aclarar estas formaciones. Pero estos tratamientos son caros e inabordables de forma masiva. Por ello, hemos elaborado un modelo espacial que permite la planificación de dichos tratamientos. Contestaremos a la pregunta: ¿Qué pinares deberían de ser aclarados en primer lugar para favorecer la regeneración de la vegetación natural bajo su dosel? La respuesta requiere la consideración de múltiples variables biofísicas que determinan la capacidad de regeneración de la vegetación en cada zona. Por ejemplo, es menos razonable aclarar un pinar denso rodeado de más pinares densos, que intervenir en otro pinar denso rodeado de un encinar.

El modelo generado es un sistema de apoyo a la toma de decisiones. Metodológicamente, se basa en el concepto de base de conocimiento integrada en un SIG. Ésta almacena todas las reglas, restricciones y relaciones entre variables, permitiendo responder a la pregunta anterior. La integración de la información se realiza basándose en operadores propios de la lógica difusa. Hay 19 variables que alimentan al modelo. Entre éstas destacan: vegeta-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ción subyacente, vegetación adyacente, variables climáticas, edáficas, especies amenazadas, etc. El resultado muestra la aptitud de los distintos pinares según los objetivos. Así, aquellos pinares que tienen mayor aptitud son los que deben ser aclarados en primer lugar, ya que en ellos se regenerará la vegetación natural con más intensidad.

***Palabras Clave**: SIG, modelización, sucesión ecológica, dinámica vegetal, Parque Natural Sierra de Huétor (Granada), pinares de repoblación, naturalización, sistema de apoyo a la toma de decisiones espacial.*

ABSTRACT

"Sierra de Huétor" Natural Park is in the middle of Granada (Andalusia, Spain). It has 12.200 Has in surface, one third of which are covered by pine-tree forests coming for afforestation. These forests are not adapted to the ecological characteristics of the landscape: they are dense, monospecific and coetaneous. They actually can be considered as a brake to the ecological succession, because they does not allow the growth of the natural vegetation below they canopy. That is the reason why these forest have to be replaced by natural vegetation units if we want to follow the present day legislation.

Taking into account the previous paragraph, we should design mechanisms to reduce the density of these forests. But these treatments are very expensive if we want to perform then in the whole studio area. That is one of the reasons why we have developed a spatial model (a Spatial Decision Support System) that allow an effective planning of those treatments. We will answer the following question: Which pine-tree forests should be treated firstly in order to reinforce the regeneration of the natural vegetation bellow then? To answer this question we have considered several biophysical parameters that determine the capacity that each place have to host natural vegetation communities. I.e.: It is less reasonable to reduce the density of a dense pine-tree forest surrounded by more pine-tree forests, than make the same treatment over a dense pine-tree forest surrounded by a holmoak forest.

Under a methodological point of view, our model is based in the concept of "knowledge base" integrated in a GIS. This knowledge base store rules, restrictions and relationships between the environmental variables. The integration of the information stored in the knowledge base requires the use of logical operators coming from fuzzy logic. We have considered 19 environmental variables in the model. Some of the most important are: vegetation bellow the pine-tree forest, vegetation adjacent to the pine-tree forest, climatic parameters, soil variables, presence of threatened species, etc. The final result is a map whose most suitable values correspond to pine-tree forests that should be cleared firstly because in then it is supposed to be expected a higher rate of regeneration of the natural vegetation.

***Key Words**: GIS, modelling, ecological succession, vegetation dynamics, Sierra de Huétor Natural Park, pine-tree afforestations, naturalization, Spatial decision support system.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos tres o cuatro milenios, hemos esquilmado los recursos naturales de nuestros montes hasta extremos considerables: hemos puesto los mejores suelos en cultivo, roturado bosques para la producción de pasto, los hemos talado para obtener carbón y leña, o quemado en mil batallas, e incluso los árboles más notables han surcado los mares a modo de "selvas flotantes". Este secular abuso de los recursos forestales comenzó a tener consecuencias evidentes ya durante la Edad Media en forma de inundaciones, pérdida de producción agraria, erosión, escasez de madera, cambios climáticos locales, extinción de especies, etc. (*Bauer,* 1984) .

Las distintas Administraciones han sido más o menos conscientes de las consecuencias negativas que tiene la deforestación. Por ello fueron poniendo en práctica (o al menos lo intentaron) distintas disposiciones legales que penalizaban la tala de bosques o que exigían su reforestación. Sin embargo, no fue hasta el siglo XIX (con la creación de la Administración Forestal del Estado), cuando comenzó realmente la política forestal española. Su objetivo básico era el de frenar el deterioro de los recursos forestales de nuestro país, incrementando la superficie boscosa en la medida de lo posible. Pero hubo que esperar hasta mediados del siglo XX para que las ideas conservacionistas planteadas por la Administración Forestal, vieran su fruto en un plan de gestión activa de los recursos forestales. Vio la luz de esta forma un ambicioso plan de repoblaciones forestales que tenía como ámbito de actuación a toda España. Dejando a un lado el debate sobre la idoneidad de las repoblaciones practicadas, los datos son reveladores: en todo el país se repoblaron unos 3 millones de hectáreas (*Ortigosa,* 1990). De toda esta superficie casi el 85% fue repoblada con especies del género *Pinus*.

En Andalucía, el plan de repoblaciones nos ha dejado 600.000 Has de pinares de repoblación distribuidos sobre todo por las provincias orientales (*AMA/IARA. Consejería de Agricultura y Pesca,* 1989). En términos generales se puede decir que el objetivo de estas repoblaciones era el de proteger el suelo para facilitar la posterior recolonización de los pinares por parte de la vegetación natural propia del territorio. En este sentido, las repoblaciones forestales de coníferas se pueden interpretar como un intento humano de acelerar la sucesión ecológica introduciendo en el sistema individuos que, como los pinos, se adaptan bien a las condiciones xéricas reinantes en nuestra región. Sin embargo, para lograr que dichas repoblaciones actuaran realmente como "fases potenciadoras" de la sucesión, habría sido necesaria la realización de múltiples tratamientos selvícolas en las mismas. Estos tratamientos, orientados principalmente a la reducción de la densidad de la masa, son fundamentales para integrar la repoblación en el terreno. Desafortunadamente, dichos tratamientos no se llevaron a cabo con la misma diligencia y capacidad planificadora que las repoblaciones anteriores (*AMA/IARA. Consejería de Agricultura y Pesca,* 1989; *Ministerio de Medio Ambiente,* 2002). El resultado de esta situación es que actualmente contamos con una gran superficie de pinares de repoblación tremendamente densos que actúan ralentizando la sucesión ecológica (no permiten la entrada de ninguna otra planta bajo su dosel) y además aumentan el riesgo de incendio forestal (acumulan mucha biomasa con gran combustibilidad). Se trata de pinares de repoblación no integrados en el medio y que, según la legislación forestal vigente (Plan y ley forestal de Andalucía, Plan forestal español), deben de ser sustituidos paulatinamente por unidades de vegetación natural.

Uno de los principales motivos por los cuales no se ha llevado a cabo un tratamiento ordenado de los pinares de repoblación, es el elevado coste de dichos tratamientos selvícolas. Si consideramos que aclarar una hectárea de pinar de repoblación puede costar unos 3000 euros (cifra muy aproximada y variable), resulta que intervenir en todos los pinares no integrados de Andalucía en el medio costaría 1800 millones de euros. Este presupuesto resulta a todas luces inabordable para una Administración que como la Consejería de Medio Ambiente de Andalucía, mueve unos 370 millones de euros al año. Si además tenemos en cuenta el tremendo impacto ambiental que supondría intervenir masivamente en todos los pinares de repoblación de nuestra región, resulta desaconsejable esta posible solución.

En definitiva, los pinares de repoblación han de ser sustituidos por unidades de vegetación natural, pero esto no se puede abordar masivamente. Es necesario establecer prioridades a la hora de aclarar un pinar u otro. Cabe por tanto plantearse las siguientes cuestiones: en un territorio dado, ¿qué pinar de repoblación debe de ser aclarado en primer lugar para maximizar la regeneración de la vegetación natural bajo su dosel? ¿Responderán todos los pinares de repoblación de la misma manera a los tratamientos? En un escenario donde los recursos económicos son limitados, la resolución de la cuestión anterior permite la optimización de dichos recursos.

El objetivo básico del proyecto de investigación cuyos resultados se presentan aquí, es el de generar una herramienta que ayude al gestor del territorio a responder las preguntas anteriores (*Bonet,* 2003). Dicho proyecto de investigación se ha ejecutado gracias a los medios técnicos de la Consejería de Medio Ambiente de Andalucía, el apoyo del Dpto. de Botánica de Universidad de Granada y la financiación (mediante una beca de investigación) de la Consejería de Educación y Cultura. Aunque el método que se ha puesto a punto y las conclusiones obtenidas son extrapolables en buena medida a los pinares de repoblación densos de Andalucía oriental, el trabajo se ha centrado en un espacio natural de la provincia de Granada: el Parque Natural de la Sierra de Huétor. El P. N. Sierra de Huétor tiene una superficie de unas 12.200 Has y se encuentra en el centro de la provincia de Granada, al noreste de su capital. Tiene un marcado carácter forestal, ya que casi las dos terceras partes de su superficie están ocupadas por formaciones arboladas. De dicha superficie arbolada, unas 4000 Has son pinares de repoblación con densidad variable. El objeto de este trabajo son los pinares de repoblación con una cobertura arbórea superior al 50%, ya que son éstos los que actúan frenando la sucesión ecológica en mayor medida. Estas formaciones ocupan 3400 Has en todo el parque.

El resultado final que se obtiene en este trabajo es un "mapa de gestión" (*Bonet,* 2003) que asigna un grado de aptitud a los distintos pinares de repoblación desde el punto de vista de su idoneidad para recibir tratamientos selvícolas de aclarado tendentes a favorecer la regeneración de la vegetación natural. Así, por ejemplo, un pinar situado en una zona llana y rodeado de vegetación natural bien conservada, tendrá mucha más aptitud según los objetivos planteados, que otro situado en una fuerte pendiente, sobre suelos esqueléticos y sin vegetación natural adyacente. Si aclaramos el primer pinar, es probable que la vegetación natural invada el lugar con más rapidez que si aclaramos el segundo (donde probablemente aparecerán procesos erosivos tras el aclareo). De esta manera, la herramienta que presentamos permitirá a los gestores priorizar los tratamientos selvícolas de aclarado en los pinares de repoblación, con objeto de ir sustituyéndolos por vegetación natural.

METODOLOGÍA

Para generar el mapa de gestión anterior, fue necesario poner a punto una metodología de análisis que integrara la capacidad de manejo de información ambiental de los SIG (Sistemas de Información Geográfica) con las herramientas de apoyo a la toma de decisiones. El resultado obtenido puede considerarse como un modelo espacial basado en axiomas (*Reynolds* 2001). En términos más comunes, el método utilizado consiste en repetir el razonamiento del párrafo anterior, incorporando todas las variables biofísicas que puedan determinar la capacidad de regeneración de la vegetación bajo los pinares, mediante la formulación de una serie de axiomas o afirmaciones que relacionan dichas variables. Así, por ejemplo, podríamos decir que un pinar tiene gran aptitud para los objetivos que nos planteamos, cuanto mayor sea la profundidad del suelo sobre el que se asienta y cuanto menor sea la distancia de éste a una mancha de vegetación natural. Cada una de las variables expresadas en negrita se corresponden con una capa de información digital de un SIG. La conjunción "y", actúa como nodo o conector entre las distintas variables a la hora de integrarlas en el SIG. La capa digital resultante asignará una aptitud mayor a aquellos puntos que satisfagan las dos condiciones comentadas en el ejemplo.

El primer paso para poner en práctica la metodología anterior, consiste en "poner en papel" todos los axiomas o razonamientos que se consideran importantes dentro del proceso natural que se está modelizando. Se trata de plasmar en un lenguaje comprensible por un sistema informático, la experiencia y los conocimientos que se tienen sobre la dinámica de la vegetación en el ámbito que nos ocupa. Este proceso da lugar a lo que se denomina "modelo conceptual".

Con objeto de simplificar la exposición y de sistematizar el proceso de elaboración del modelo conceptual, se ha dividido el mismo en varios submodelos conectados jerárquicamente. Así, se puede considerar que un lugar ocupado por un pinar de repoblación denso es apto para que en él se lleve a cabo un clareo con vistas a potenciar la regeneración de la vegetación natural, si cumple las siguientes condiciones:

- Las condiciones ecológicas del lugar deberán favorecer la regeneración de la vegetación. Es decir, será necesario que las condiciones climáticas sean adecuadas y que haya suficientes fuentes de semillas en los alrededores, que los suelos sean profundos, etc.
- Los factores socioeconómicos también condicionan en gran medida la idoneidad de un pinar de repoblación para que se lleven a cabo tareas de clareo. Estos tratamientos deberían ejecutarse en lugares con elevada tasa de paro (para tratar de revitalizar la economía local). Por otro lado es más fácil intervenir en montes públicos propiedad de la administración. También se incluyen aquí los criterios definidos por el PORN (Plan de Ordenación de los Recursos Naturales) del P. N. Sierra de Huétor.
- Por muy interesante que sea sustituir los pinares de repoblación por vegetación natural, esto no debe de ir en contra de la conservación de especies animales o vegetales amenazados. Las zonas aptas para la intervención deben de estar alejadas de las áreas de distribución de estos taxones especialmente sensibles.

Cada uno de estos tres submodelos se desglosa en otros jerárquicamente inferiores. Así, por ejemplo, dentro del submodelo de factores ecológicos, un pinar tendrá gran aptitud si reúne una serie de condiciones **bióticas** y **abióticas**. Dentro de las condiciones bióticas, un pinar ten-

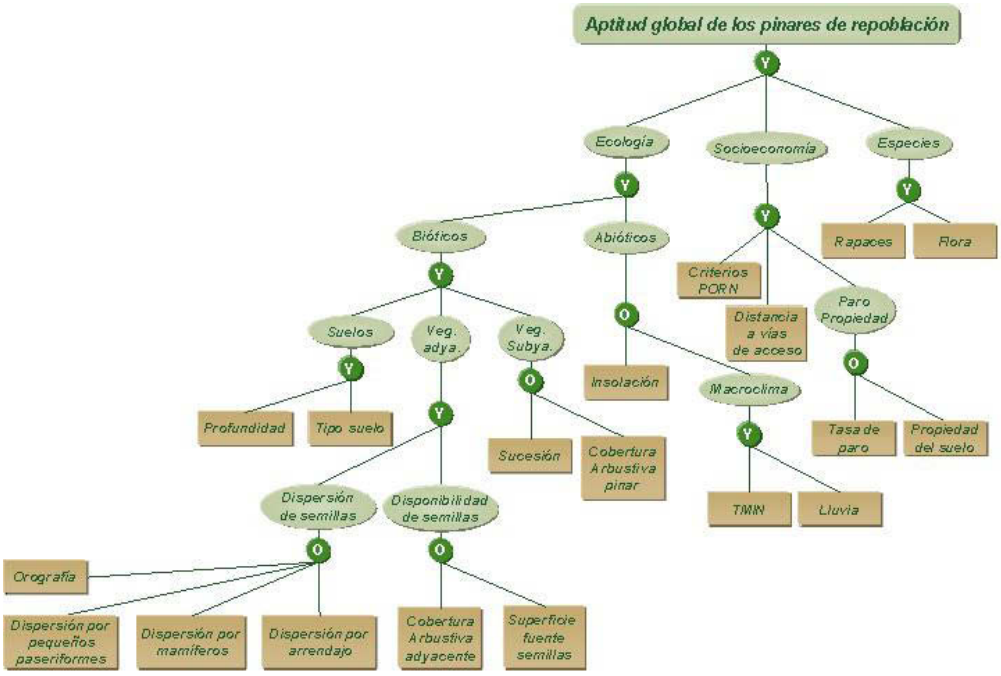


Figura 1. Esquema que muestra el modelo conceptual seguido para contestar a la pregunta: ¿qué pinares debemos aclarar en primer lugar si queremos maximizar la regeneración de la vegetación natural bajo los mismos? Los recuadros marrones representan capas de información digital que se integran en un SIG. Los recuadros verdes muestran redes o resultados parciales que se van obteniendo conforme se ejecuta el modelo desde abajo hasta arriba. Los nodos de color verde oscuro representan los conectores que relacionan las distintas capas de información dentro del SIG.

drá gran aptitud según los objetivos que se plantean si tiene unas condiciones **edáficas** determinadas, la **vegetación natural adyacente** tiene capacidad de colonizar el pinar y la **vegetación subyacente** al pinar tiene capacidad de regenerarse una vez aclarado el estrato arbóreo. De esta manera se puede ir descendiendo en la red hasta llegar a las capas de información digital (Figura 1). Así, en el caso de la vegetación natural subyacente al pinar, consideramos que un pinar es tanto más apto para los objetivos planteados cuanta mayor sea la densidad del estrato arbustivo y cuanto más cerca de la clímax sucesional se encuentre dicha vegetación subyacente. Para implementar este razonamiento en un SIG, es necesario contar (en el caso del ejemplo) con dos capas de información: una que muestre la distribución de las distintas formaciones vegetales de la zona de estudio y otra que indique la densidad del estrato arbustivo.

Una vez definido el modelo conceptual, es fundamental identificar todas las variables implicadas, con objeto de recopilarlas o generarlas si no existieran. Esta segunda fase de la metodología es una de las más complejas, ya que requiere gran esfuerzo. En este caso se ha contado con la información digital recopilada por la Red de Información Ambiental de Andalucía, que ha suministrado tanto ortofotografías aéreas, como mapas de suelos, modelos de elevaciones, mapas de distribución de especies, etc. Sin embargo, fue necesaria la elaboración de un mapa de vegetación a escala

de detalle (1:10.000) del P. N. Sierra de Huétor. Para ello se siguió la metodología utilizada por la Consejería de Medio Ambiente para la elaboración de los mapas de vegetación en terrenos forestales (*Torres et al.,* 2000). El mapa de vegetación resultante aporta información sobre la distribución de las distintas formaciones vegetales, cobertura de los distintos estratos, vegetación subyacente al

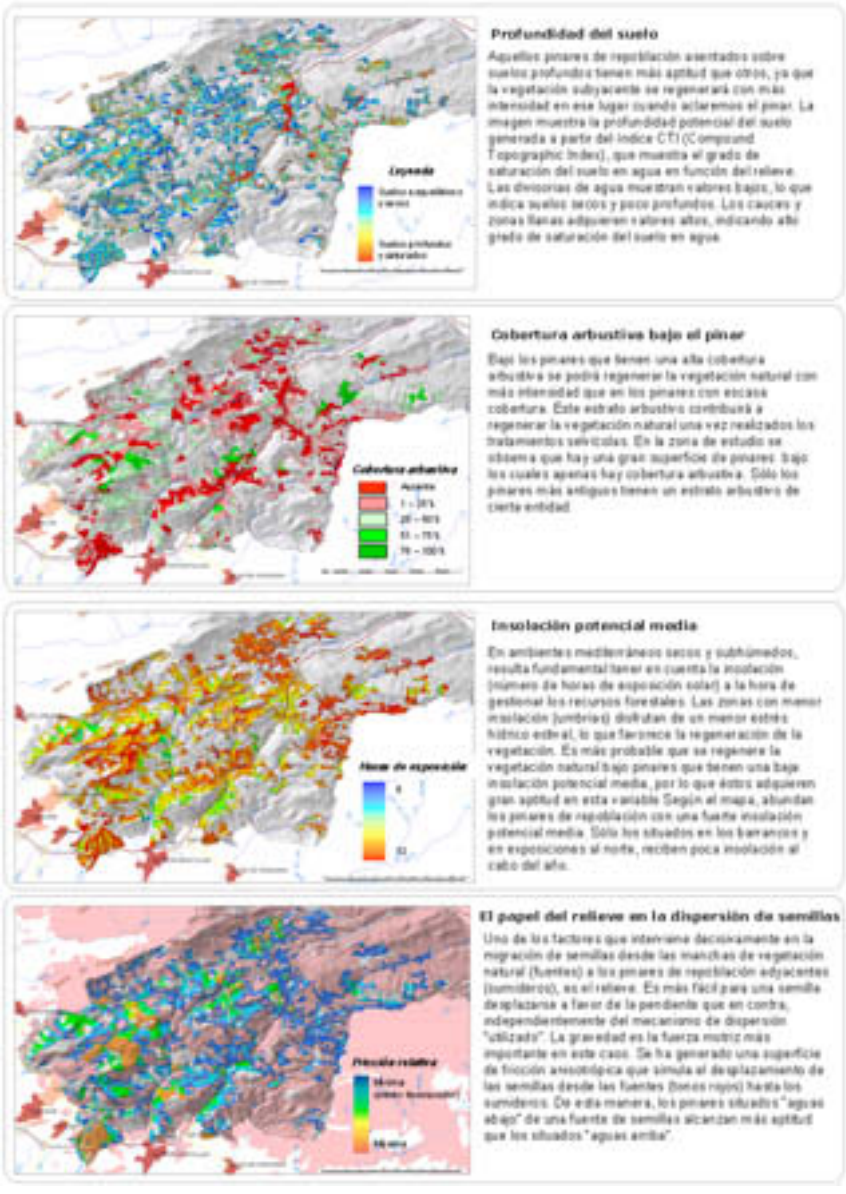


Figura 2. Ilustración a modo de ejemplo de cuatro de las 19 variables utilizadas para "alimentar" el modelo descrito.

pinar, etc. En total, el modelo conceptual elaborado cuenta con 19 variables de diversa naturaleza que se corresponden con otras tantas capas de información digital que se requieren para ejecutar el modelo. La figura 2 muestra cuatro ejemplos de las variables utilizadas.

Tanto el modelo conceptual como la información temática anterior se integraron en la aplicación informática EMDS (*Reynolds,* 1998) que permite la ejecución de modelos espaciales como el que nos ocupa. El resultado es una capa de información en formato ArcInfo (Grid) que muestra para cada píxel el valor global obtenido según los distintos factores considerados en el modelo conceptual. Aquellos pinares que tengan una aptitud mayor deberían ser aclarados en primer lugar, ya que en ellos se producirá una regeneración de la vegetación natural más intensa que en los que tengan menos aptitud.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos pueden analizarse teniendo en cuenta varias aproximaciones diferentes.

Si se analiza de forma genérica la zona de estudio, observamos que, en el P. N. Sierra de Huétor, los pinares objeto de este trabajo tienen en general una aptitud alta para regenerar la vegetación natural bajo su dosel una vez que se aclaren. De hecho, más de la mitad de los pinares (figura 3) tienen una aptitud media o alta. Sólo algunos pinares situados a gran altitud tienen una aptitud baja o muy baja, ya que se encuentran lejos de manchas de vegetación natural que actuaría como fuente de semillas y además carecen de vegetación subyacente para promover la regeneración una vez aclarados. Los pinares que adquieren una aptitud alta se caracterizan por estar rodeados de formaciones de vegetación natural, como encinares o matorrales. Estos pinares se encuentran en el extremo oriental del Parque, donde están englobados en una matriz de encinares bien conservados. Por último, se observa que la distribución de la aptitud por el espacio responde a un patrón heterogéneo, acorde con la topografía y con la distribución horizontal de la vegetación en el Parque. Este análisis genérico de los resultados permite a los gestores de dicho Parque responder a la pregunta que se planteó al principio: ¿qué pinares debemos aclarar en primer lugar si queremos maximizar la regeneración de la vegetación natural bajo los mismos? A la hora de describir los resultados a esta escala, resulta interesante definir una serie de zonas más o menos homogéneas desde el punto de vista de los resultados obtenidos (figura 3):

- Zona 1: Se corresponde con el extremo oriental del Parque. Como se describirá en el apartado correspondiente, la vegetación dominante en esta zona son los encinares meso y supramediterráneos en un aceptable estado de conservación. Aquí los pinares de repoblación son escasos y constituyen masas no demasiado densas ni extensas. En otras palabras, aquí los pinares de repoblación son islas en una matriz de vegetación natural. Esta situación justifica en buena medida la gran puntuación que alcanzan en el modelo final. Según el modelo propuesto, estos pinares son los que mayor aptitud presentan en todo el territorio a la hora de intervenir en ellos para sustituirlos por vegetación natural. Es decir, sería necesario intervenir en esta zona con objeto de maximizar la regeneración de la vegetación

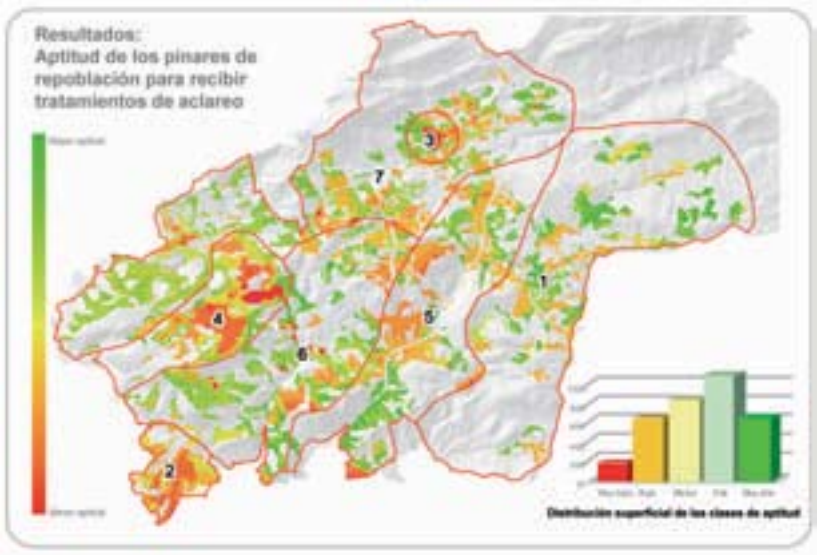


Figura 3. muestra de forma general los resultados obtenidos en el P. N. Sierra de Huétor. El mapa indica la aptitud de los distintos pinares de repoblación según los objetivos planteados inicialmente. El gráfico representa la distribución superficial de las distintas clases de aptitud.

natural. El resto del Parque Natural está formado por masas densas y extensas de pinares de repoblación, donde no se da la misma situación que en la zona 1.

- Zona 2: En el extremo suroccidental del Parque se encuentra el monte de Puerto Lobo, donde los pinares de repoblación muestran una baja idoneidad según los resultados obtenidos. Es decir, el conjunto de los factores ambientales y socioeconómicos considerados para identificar las zonas más adecuadas para aclarar los pinares de repoblación, adquieren valores muy bajos en esta zona. Las razones que justifican este resultado son múltiples: en primer lugar los suelos son esqueléticos y carecen casi totalmente de un horizonte superficial con materia orgánica. Se trata de suelos muy erosionados sobre los que se implantaron los pinares como intento de frenar la pérdida de suelo. Probablemente sean los antiguos usos que se hicieron del territorio los responsables de la escasa cobertura arbustiva y herbácea actual. Esto condiciona enormemente la capacidad intrínseca de regenerar una comunidad vegetal natural una vez aclarados los pinares. Al ser una zona relativamente baja (dentro del contexto de la zona de estudio), las precipitaciones son relativamente escasas, lo que contribuye a reducir la aptitud global del lugar. Las extensas repoblaciones practicadas en la zona hacen que las semillas procedentes de manchas de vegetación natural tengan que recorrer varios cientos de metros para llegar al centro de la repoblación. Esta situación hace que la zona tome unos valores muy bajos en todos los factores relacionados con la migración de semillas. A esta situación se une el hecho de que esta zona actúa de límite del Parque Natural, por lo que está rodeado de cultivos y otros usos que no favorecen la recolonización de la vegetación natural.

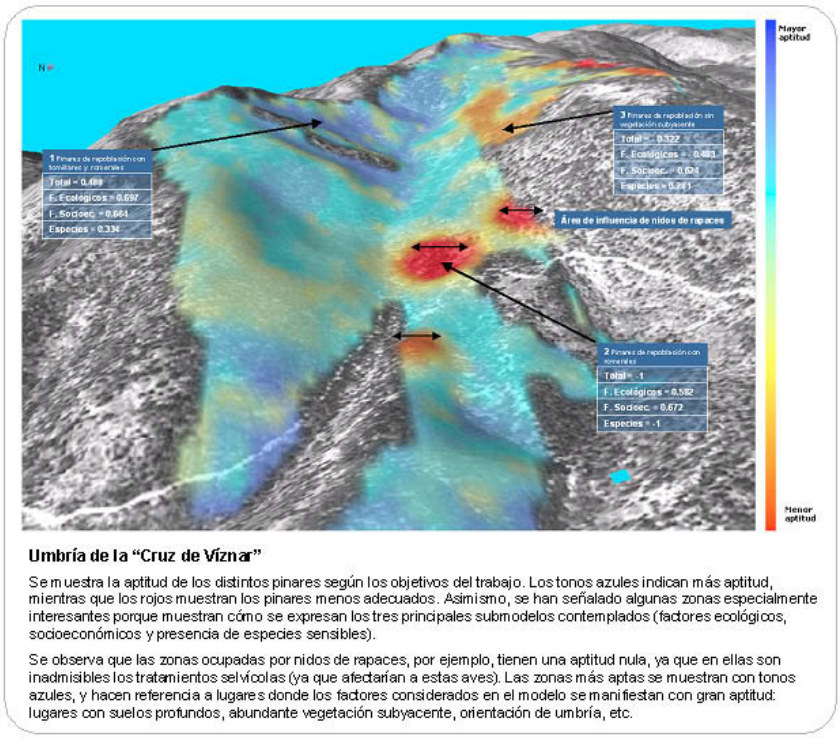
- Zona 3: prácticamente ocupa el paraje denominado "Loma de las Chorreras". Aquí se da la circunstancia de que casi todos los factores considerados en el modelo adquieren un valor medio o alto. Sin embargo, el resultado final es una aptitud muy baja. Esto se debe a que la migración de semillas desde formaciones de vegetación natural adyacentes es muy lenta debido a que los pinares de repoblación están a más altitud que las primeras. Según el modelo de migración de semillas utilizado (que considera el papel del relieve como superficie de fricción para el movimiento de las semillas), esta situación dificulta enormemente la colonización desde el exterior. Por otro lado, los pinares de repoblación que hay en esta zona son muy densos, por lo que la vegetación subyacente a los mismos es escasa y no tendría capacidad para regenerar una formación de vegetación natural una vez aclarados los pinos.
- Zona 4: al igual que en los dos casos anteriores, la zona 4 alberga los lugares con menor capacidad de regenerar la vegetación natural una vez aclarados los pinares de repoblación. Podemos decir que esta zona ocupa el núcleo central de los pinares de todo el Parque, englobando formaciones densas de varias especies de pinos y con una diversa casuística en lo que a vegetación subyacente se refiere. Podemos decir que hay dos grupos de factores que se muestran especialmente desfavorables en esta zona y que justifican las bajas puntuaciones observadas. Por un lado están los factores relacionados con la migración de semillas desde las fuentes adyacentes. Estos pinares se encuentran en el centro de una gran masa de repoblaciones, por lo que las fuentes de semillas no limitan directamente con ellos. Además la zona 4 actúa de divisioria de tres de las más grandes cuencas hidrográficas del Parque (Arroyo del Puerto, Río Bermejo y Río Darro), lo que da idea de la altitud que alcanzan estos pinares. Esta situación dificulta la llegada de semillas desde las formaciones de vegetación natural. Por otro lado tenemos los factores relacionados con la vegetación subyacente al pinar, que tampoco son favorables. Muchos de los pinares de esta zona son muy densos y no dejan crecer en su interior especies arbustivas o herbáceas.
- Zona 5: Esta zona coincide bastante bien con los límites de la cuenca del Arroyo de Carchite a su paso por el P. N. Sierra de Huétor. Los pinares de repoblación se distribuyen de manera más o menos homogénea a ambas laderas del arroyo. En general podemos decir que estos pinares muestran una aptitud media-alta a la hora de ser aclarados para favorecer la recolonización de la vegetación natural. El carácter relativamente recto y homogéneo de la cuenca hace que se puedan extraer algunas generalidades interesantes a la hora de interpretar los resultados del modelo. En primer lugar se observa que las zonas orientadas al noroeste tienen una mayor aptitud que las orientadas al sureste. Las primeras localidades tienen una menor insolación potencial (menos horas de sol al cabo del año), por lo que se comportan como umbrías. Las zonas que tienen gran aptitud final y que están situadas en la solana, adquieren esta puntuación debido a la gran cobertura arbustiva bajo el pinar, lo que favorece la regeneración de la vegetación. Otra situación interesante es que en este caso los pinares de repoblación suelen encontrarse bajo manchas de vegetación natural (acantonadas en las crestas más abruptas), lo que facilita la dispersión de semillas desde las fuentes a los sumideros. Esto, junto con la relativa abundancia de manchas de vegetación natural, hacen que la migración de semillas no sea un factor limitante a la regeneración en esta zona. Sólo en el extremo noroccidental resulta

difícil el acceso de las semillas al centro de un pinar de repoblación de gran superficie (zona de "Santo Vivo"). Los valores de aptitud más bajos encontrados en esta zona se corresponden con pinares incluidos en una zona A según el PORN del P. N. Sierra de Huétor. En estas zonas no se permiten actuaciones forestales debido a la presencia de tomillares dolomitícolas de gran interés y sensibilidad.

- Zona 6: se incluyen aquí los pinares de repoblación existentes en la cuenca del río Darro a su paso por la zona de estudio. En esta zona es difícil establecer patrones homogéneos que expliquen los resultados obtenidos. En general, las zonas más aptas para efectuar claras en el pinar, se corresponden con pinares de repoblación que mantienen una vegetación subyacente en un avanzado sucesional. Es decir, son pinares con romerales o encinas aisladas en el sotobosque. Algo similar ocurre con la cobertura arbustiva, ya que las zonas que presentan más aptitud en el resultado final suelen ser pinares con una alta cobertura arbustiva en el sotobosque. Por el otro extremo, las zonas que tienen menor aptitud final son aquéllas donde las semillas procedentes de las áreas adyacentes no pueden llegar o dispersarse. Se trata de pinares situados más arriba que las manchas de vegetación natural adyacentes o lugares con fuertes pendientes que limitan la llegada de semillas según el modelo utilizado.
- Zona 7: esta última zona es la que más superficie ocupa dentro del Parque, y está formada por los pinares ubicados en la solana del río Bermejo y del arroyo de las Perdices, al norte del Parque Natural. También se incluye la Sierra de la Yedra en el extremo occidental del Parque. Los lugares que alcanzan una mayor aptitud global son los pinares de la Sierra de la Yedra y algunos otros más o menos dispersos por la solana del arroyo de las Perdices. En el primer caso se trata de pinares de repoblación poco densos con un abundante matorral subyacente formado por romerales y tomillares mesomediterráneos. El resto de los pinares que alcanzan gran aptitud dentro de esta zona son formaciones rodeadas de extensas manchas de vegetación natural, lo que facilita, a priori, la migración de semillas. En esta zona es de destacar la existencia de la finca de Cadialfaquil, de propiedad privada e integrada dentro de Parque (extremo occidental de la zona 7). La presencia de esta finca, donde la capacidad de intervención en el medio por parte de la Administración, es menor que en los montes públicos, hace que la aptitud de los pinares contenidos en la misma baje considerablemente.

Por otro lado, se puede llevar a cabo un análisis más detallado de los resultados. Si nos acercamos a una zona concreta, es posible evaluar el modo en el que las distintas variables biofísicas y socioeconómicas inciden para dar lugar al resultado final obtenido. A modo de ejemplo, se describen los resultados obtenidos en la zona denominada "umbría de la Cruz de Víznar" (figura 4). Ésta tiene una superficie de unas 40 Has y está cubierta por pinares de repoblación con un densidad cercana al 100%. La vegetación subyacente a los pinares es poco densa y está constituida por pies más o menos aislados de romero y salvia. Además los suelos no son demasiado profundos debido a la pendiente de la ladera. Por último, cabe destacar la presencia de varios nidos de rapaces que condicionan notablemente los resultados obtenidos. Como se observa en la figura 4, los pinares de esta zona tienen una aptitud media o baja en términos generales. Los pinares más adecuados para que en ellos se practiquen tratamientos

selvícolas (tonos azules en la figura del anexo) se encuentran en las orientaciones menos expuestas. Es allí donde el estrés hídrico estival es menos intenso y podría regenerarse con más intensidad la vegetación. Otros pinares que muestran gran aptitud son los que rodean a una mancha de matorral que recorre transversalmente el barranco (punto 1 en la figura 4). Estos pinares se encuentran cerca de una mancha de vegetación natural, por lo que es más probable que se vean "invadidos" por ésta una vez que se practiquen tratamientos selvícolas en su interior. Por ello alcanzan mayor aptitud. En el otro extremo, se observan aquellos pinares con una aptitud baja o nula. Se trata de lugares donde anidan especies de rapaces forestales. Esto actúa limitando los tratamientos selvícolas, ya que éstos no pueden afectar al desarrollo de dichas especies de aves. Como se puede ver en el punto 2 de la figura 4, el valor del modelo relativo a la presencia de especies sensibles, es –1 (aptitud nula), lo cual condiciona el resultado final en este punto (que también es nulo).



Umbría de la "Cruz de Víznar"

Se muestra la aptitud de los distintos pinares según los objetivos del trabajo. Los tonos azules indican más aptitud, mientras que los rojos muestran los pinares menos adecuados. Asimismo, se han señalado algunas zonas especialmente interesantes porque muestran cómo se expresan los tres principales submodelos contemplados (factores ecológicos, socioeconómicos y presencia de especies sensibles).

Se observa que las zonas ocupadas por nidos de rapaces, por ejemplo, tienen una aptitud nula, ya que en ellas son inadmisibles los tratamientos selvícolas (ya que afectarían a estas aves). Las zonas más aptas se muestran con tonos azules, y hacen referencia a lugares donde los factores considerados en el modelo se manifiestan con gran aptitud: lugares con suelos profundos, abundante vegetación subyacente, orientación de umbría, etc.

Figura 4. Ejemplo de los resultados obtenidos en una zona concreta del Parque Natural Sierra de Huétor.

CONCLUSIONES

- Desde un punto de vista metodológico, consideramos que tanto las herramientas utilizadas (SIG, aplicaciones de modelización, etc.), como las bases teóricas en las que se sus-

tentan (teoría de la decisión, lógica difusa, teoría de sistemas, etc.), constituyen una buena combinación a la hora de plantear modelos de planificación de los recursos naturales.

- De forma más concreta, este trabajo constituye una primera versión de un modelo espacial que pretende integrar la información y conocimientos disponibles sobre la dinámica de la vegetación mediterránea en nuestro entorno, con objeto de diseñar "mapas de gestión" que asistan a la toma de decisiones. El manejo de los pinares de repoblación densos hacia su futura transformación en formaciones de vegetación natural constituye una primera aplicación de este tipo de herramientas.
- En términos generales, hemos observado que los resultados del modelo se ajustan bien a la ley de los factores limitantes. La aptitud final de un pinar de repoblación para los objetivos planteados, depende de la presencia de factores que se expresan de manera muy negativa en dicho pinar. Esto se da especialmente cuando se dan factores con una aptitud extremadamente baja.
- Consideramos que el modelo conceptual elaborado puede ser extrapolable (con ciertas modificaciones) a otros lugares de Andalucía con características ecológicas similares a las de la zona de estudio. Se trataría de lugares donde los pinares de repoblación extremadamente densos pueden constituir un freno a la regeneración de la vegetación natural: P. N. Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas, P. N. de Despeñaperros, P. N. de Castril, P. N. Sierra de Baza, Sierra de los Filabres, P. N. de Sierra Nevada, P. N. Sierra de María-Los Vélez, P. N. Montes de Málaga, etc.

REFERENCIAS

AMA / IARA. Consejería de Agricultura y Pesca. (1989): *Plan Forestal Andaluz.* Junta de Andalucía. Sevilla. 388 p.

Bauer Manderscheid, E. (1984): *Los montes de España en la Historia.* Ministerio de Agricultura. Madrid. 610 p.

Bonet García, F. J. (2003): *Herramientas de apoyo a la toma de decisiones aplicadas a la gestión forestal del Parque Natural Sierra de Huétor y LIC de Sierra Arana*. Universidad de Granada. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Tesis doctoral. 320 p.

Ministerio de Medio Ambiente. (2002): *Plan Forestal Español.* Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 145 p.

Ortigosa Izquierdo, L. (1990):"Las repoblaciones forestales como estrategia pública de intervención en regiones degradadas de montaña". En García-Ruíz, J.M. (Eds.), *Geoecología de las areas de montaña*. Geoforma Ediciones. Logroño. pp. 298-311

Reynolds, K.M. (1998): *Netweaver for EMDS. User Guide (Version 1.1): A Knoweledge Base Development System*. USDA Forest Service. 78 p.

Reynolds, K.M. (2001): *Fuzzy logic knowledge bases in integrated landscape assessment: Examples and Possibilities*. USDA Forest Service. 32 p.

Torres, M.L., Recio, J.M., Gómez, F., Mota, J.F., Peñas, J., Cabello. y Valle, F. (2000): *Reconocimiento biofísico de espacios protegidos. Parque Natural Sierras Subbéticas*. Consejería de Medio Ambiente. Sevilla. 311 p.

Caracterización de la dinámica vegetal en el Parque Natural Sierra de Huétor (Granada, España) mediante el uso de SIG

F.J. Bonet García

Delegación Provincial de Granada. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. C/ Marqués de la Ensenada 1, 18071. Granada.

RESUMEN

La correcta gestión de los recursos naturales requiere un conocimiento exhaustivo de dichos recursos, tanto desde el punto de vista de su estructura como de su dinámica. En este sentido, la vegetación constituye uno de los principales elementos de los ecosistemas terrestres. Contar con un mapa de vegetación detallado de un espacio dado es importante no sólo para mejorar la gestión de este recurso, sino porque esa información puede actuar como punto de partida para el diseño de planes de gestión sectoriales como pueden ser la gestión ganadera, cinegética, apícola, etc.

En tal sentido, se presentan aquí los resultados de la caracterización de la vegetación del Parque Natural de la Sierra de Huétor. Este parque está en el centro de la provincia de Granada, y con sus 12.000 Has constituye una de las principales masas forestales de la provincia. El resultado final es la obtención de un mapa de vegetación a escala 1:10.000 de dicho espacio, mediante técnicas SIG. La metodología consta de tres fases. Primero se realiza una fotointerpretación de la vegetación a partir de fotografías aéreas en falso color infrarrojo. Los polígonos obtenidos se digitalizan en un SIG usando como referencia una ortofotografía digital. En una segunda fase, basada en trabajo de campo, se revisa la geometría anterior y se asignan distintas variables a los polígonos anteriores (cobertura de los estratos, fisionomía, especies, serie de vegetación, etc.). La última fase implica la integración de toda la información en una base de datos.

El uso de un SIG permite la obtención de mapas temáticos de estas variables y generar modelos espaciales que permitan conocer mejor la dinámica vegetal. Así, se ha elaborado un mapa de estados sucesionales de la zona de estudio. Por último, se ha evaluado el grado de

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

regeneración de la vegetación de la zona, comparando mediante fotografías aéreas la situación actual con la existente en el año 1956.

Palabras Clave: *cartografía de la vegetación, SIG, modelización, sucesión ecológica, dinámica vegetal, Parque Natural de la Sierra de Huétor, Granada.*

ABSTRACT

If we want to manage our natural resources as a sustainable way, it is very important to have knowledge about their distribution and dynamics. In this way, vegetation is one of the most important resources in terrestrial ecosystems. That is the reason why is so important to have a digital map showing the distribution and other parameters of vegetation. This map is useful not only to manage vegetation, but as keystone in the development of specific planning programs (hunting, bee-keeping, pasture management.

In this paper we show the results of a digital vegetation map of Sierra de Huétor Natural Park. This Park is in the middle of Granada (Andalusia, Spain). It has a surface of 12.200 Has and is one of the most important forestal places of the province. We have developed a digital map at scale 1:10.000, using GIS techniques and photointerpretation. After the photointerpretation of the vegetation (over infrared photograms), toke place a field phase during which the interpreted information was revised and corrected if necessary. The information obtained was stored in a relational database connected to a GIS.

The information that we have obtained allow the development of spatial models that helps us to understand vegetation dynamics. In this sense, we have created a map showing the sucesional situation of the study area. Lastly, we have evaluated de regeneration rate of vegetation in the last 50 years.

Key Words: *vegetation mapping, GIS, modeling, ecological succession, vegetal dynamics, Sierra de Huétor Natural Park, Granada.*

INTRODUCCIÓN

El Parque Natural de la Sierra de Huétor se encuentra en el centro de la provincia de Granada. Ocupa unas 12.200 Has, de las cuales las tres cuartas partes están cubiertas de vegetación de carácter forestal (matorrales, encinares y pinares de repoblación fundamentalmente). Dadas las características eminentemente forestales de la zona de estudio, resulta fundamental contar con un mapa de vegetación a escala de detalle si se quiere abordar la planificación activa y sostenible de los recursos naturales. La correcta gestión de dichos recursos requiere la existencia de una serie de capas de información útiles para generar herramientas de apoyo a la toma de decisiones. La vegetación constituye sin duda una de estas capas (*Driel y Loveland,* 2001). Por este motivo se consideró imprescindible la obtención de una cobertura que permitiera caracterizar de manera detallada la vegetación del P. N. Sierra de Huétor. Para ello utilizó la me-

todología puesta a punto por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía para caracterizar la vegetación a escala 1:10.000 de los territorios forestales de dicha región (*Torres et al.,* 2000; *Molero Mesa et al.* 2001). En virtud de esta metodología ya se ha cartografiado la vegetación de más de 1 millón de hectáreas de territorio forestal de Andalucía, lo que da idea de su validez y grado de normalización.

La metodología utilizada permite cumplir los siguientes objetivos generales:

- Caracterizar a escala de detalle (1:10.000) la vegetación del P. N. Sierra de Huétor. Disponer de información sobre composición florística y estructural de la vegetación, de forma que permita caracterizar las diferentes zonas del espacio natural protegido a escala de detalle.
- Integrar en la Red de Información Ambiental de Andalucía el catálogo de formaciones vegetales presentes.
- Obtener una cobertura gráfica con una delimitación de polígonos lo suficientemente precisa como para generar en una segunda fase la siguiente información:
  - Distribución detallada de las comunidades vegetales existentes, según la metodología sigmatista de la escuela de Zurich-Montpellier (*Braun-Blanquet* 1979).
  - Localización de los hábitats de interés recogidos en el Anexo I de la Directiva 92/43/CEE, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestre (*Unión Europea,* 1992), según el Documento Técnico de Interpretación realizado para España por *Rivas Martínez et al.* (1993).
- Servir de base a los modelos de evaluación de la capacidad sustentadora animal (cinegética y ganadera).
- Servir de base a los modelos de prevención de riesgos y simulación (incendios forestales, planificación forestal, erosión, etc.).

METODOLOGÍA

El método utilizado para generar el mapa de vegetación a escala 1:10.000 del Parque Natural de la Sierra de Huétor consta de las siguientes etapas (figura 1).

Fotointerpretación

Durante esta etapa se lleva a cabo una interpretación de las distintas unidades homogéneas desde el punto de vista de su cobertura vegetal, teniendo como referencia fotografías aéreas infrarrojas en falso color (escala aproximada 1:12.500 y año de vuelo 1994).

La fotointerpretación se llevó a cabo mediante la delineación en acetatos indeformables situados sobre las fotografías en falso color anteriores. Una vez completada esta primera fase analógica se procedió a digitalizar el resultado directamente en pantalla. Para ello se tomaron como referencia tanto la ortoimagen espacial IRS-PAN como la ortofotografía denominada "SIG oleícola". Tras este proceso se obtuvo una primera cobertura digital que mostraba la delimitación de unidades de vegetación homogéneas en la zona de estudio.

Figura 1. Esquema que resume las distintas fases de la metodología utilizada

Paralelamente se fueron asignando una serie de atributos a los distintos polígonos obtenidos anteriormente. Para ello se realizaron visitas al campo orientadas a mejorar tanto el grado de conocimiento del terreno como a reducir los posibles errores atributivos:

- Grado de cobertura de los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo, así como de suelo desnudo. Este atributo se puede asignar utilizando las fotografías aéreas de infrarrojos, pero es razonable comprobar esta asignación en campo para mejorar los resultados.
- Descripción tentativa de la formación vegetal existente en la unidad. La descripción se realizó teniendo en cuenta las distintas comunidades que pueden existir en una serie de vegetación determinada. Según el modelo de datos original, la descripción de una unidad es un aspecto no jerarquizado ni demasiado sistematizado. Se considera como una descripción relativamente subjetiva. Debido a que en este trabajo no se ha utilizado la metodología fitosociológica en lo que a inventarios y transectos se refiere, se consideró importante dedicar cierto esfuerzo a sistematizar el campo "descripción" para las distintas unidades. Por ello hemos intentado asimilar los contenidos del campo "descripción" a los nombres de las distintas formaciones existentes en el polígono. El cuadro 1 muestra el listado de formaciones vegetales encontradas en la zona de estudio. En la medida de lo posible se ha intentado asimilar a cada formación el nombre de la comunidad vegetal predominante en la misma.

Cuadro 1. Lista de las formaciones vegetales identificadas en la zona de estudio

Nombre de la formación	**Serie de vegetación**
Aulagares	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Aulagares	Rhamno myrtifolii-Junipereto phoeniceae S.
Cultivos de regadío	
Cultivos de secano	
Derrubios dolomíticos	Rhamno myrtifolii-Junipereto phoeniceae S.
Encinares pluriestrato	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Encinares	Berberido hispanicae-Querceto rotundifoliae S.
Encinares abiertos	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Encinares con matorral serial	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Encinares con matorral serial	Berberido hispanicae-Querceto rotundifoliae S.
Encinares-quejigales	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Encinas aisladas	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Encinas aisladas	Berberido hispanicae-Querceto rotundifoliae S.
Escobonales	Berberido hispanicae-Querceto rotundifoliae S.
Espartales	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Espinales	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Espinales	Berberido hispanicae-Querceto rotundifoliae S.
Pastizales	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Pastizales	Berberido hispanicae-Querceto rotundifoliae S.
Pastizales	Rhamno myrtifolii-Junipereto phoeniceae S.
Pastizales húmedos	Series edafohigrófilas
Saucedas	Series edafohigrófilas
Alamedas	Series edafohigrófilas
Pinares de repoblación	
Pinares subespontáneos	
Pinares-sabinares	Rhamno myrtifolii-Junipereto phoeniceae S.
Retamales	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Romerales	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Romerales	Rhamno myrtifolii-Junipereto phoeniceae S.
Salviares-tomillares	Berberido hispanicae-Querceto rotundifoliae S.
Suelo desnudo	
Tomillares	Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S.
Tomillares	Rhamno myrtifolii-Junipereto phoeniceae S.
Vegetación casmofítica	
Zonas urbanizadas	

Como resultado de la fase de fotointerpretación se obtuvo una cobertura que cubre 12.700 Has y que cuenta con 2.444 polígonos. Esto da una "resolución" media de unas 5.2 hectáreas por polígono.

Trabajo de campo

Una vez concluida la fotointerpretación se procedió a elaborar un calendario de trabajos de campo orientado a revisar la geometría de las unidades obtenidas anteriormente y a completar la asignación de atributos temáticos a cada uno de los polígonos. Esta fase de campo consistió en una serie de itinerarios realizados a pie por toda la zona de estudio. El diseño de los itinerarios se realizó teniendo en cuenta las zonas identificadas como más problemáticas en la fase anterior. Estas zonas suelen ser los pinares de repoblación y masas de matorrales. Los primeros son complejos porque pueden albergar bajo su dosel distintas formaciones vegetales naturales de gran interés para los objetivos globales de este trabajo. Los segundos son difícilmente identificables mediante la fotografía aérea, por lo que también se sometieron a un intenso esfuerzo de muestreo. En total se recorrieron unos 200 km lineales, que supone un contacto directo con más del 30% de la superficie fotointerpretada. La fase de campo permitió la corrección de varios errores tanto en la geometría de los polígonos como en la asignación de tipos de vegetación. Parte de estos errores se debían al desfase temporal existente entre el vuelo fotogramétrico en falso color infrarrojo (1994) y la fase de trabajo de campo (2001-2002).

Por otro lado se realizó una nueva asignación de atributos temáticos durante las visitas al campo. Se trata de aspectos difícilmente asignables durante la fotointerpretación como por ejemplo los siguientes:

- Especies dominantes. Contamos con asignación de especies dominantes en más de la mitad de los polígonos digitalizados, lo que supone unas 9.300 Hectáreas del total. Esta asignación se ha realizado tanto en campo como en el proceso de fotointerpretación (aunque en este caso es más difícil distinguir las diferentes especies del género *Pinus*).
- Vegetación subyacente al pinar: En general se trata de identificar las formaciones vegetales que hay bajo los distintos pinares de repoblación existentes, lo cual es importante de cara a diseñar mecanismos para la naturalización de dichos pinares.
- Piso bioclimático y ombrotipo. La determinación de estos factores se realizó mediante la presencia de especies indicadoras de los distintos bioclimas y ombrotipos. El listado de bioindicadores utilizado procede de diversos estudios botánicos realizados en el P. N. Sierra de Huétor y en áreas cercanas (*Valle,* 1979; *Blanca y Morales,* 1991; *Valle* 2003*)*, así como de la experiencia personal.
- Serie de vegetación en la que se incluye la unidad cartografiada. Para asignar esta variable a cada polígono, se utilizaron tanto los bioindicadores propios de cada serie como otros parámetros que determinan su presencia como pueden ser el tipo de suelo, ombrotipo, termotipo, etc. La determinación de estos factores mediante las especies indicadoras, los trabajos de campo y el análisis de otros trabajos previos, nos permitieron asignar a cada polígono su serie de vegetación correspondiente.

Restitución cartográfica y asignación de atributos

Una vez incorporada la información obtenida en el campo tanto a la cobertura poligonal como a la base de datos asociada a la anterior, obtenemos el mapa de vegetación final. En esto consiste esta última fase cuya duración varía en función del esfuerzo de muestreo y de la precisión del poligonado previamente realizado. En este caso, y debido a la calidad de las fotografías en falso color utilizadas, las correcciones geométricas fueron mínimas.

Otro aspecto importante de esta última fase consiste en la extrapolación de los datos observados durante el trabajo de campo al resto del territorio. Esta extrapolación se hizo con objeto de conseguir coberturas homogéneas para parámetros como la serie de vegetación o el ombrotipo, teniendo en cuenta que no se visitaron todos los polígonos. Este proceso se realizó considerando factores como el relieve, la altimetría, pluviometría, etc. Sin embargo, hay factores, como la presencia de ciertas especies, que no son fácilmente extrapolables. Esto explica que no todos los polígonos lleven asociada una especie dominante.

Merece la pena destacar en este apartado que toda la información generada se ha introducido en una base de datos relacional conectada a un SIG. El modelo de datos que define la estructura de dicha base de datos se ajusta a los estándares más habituales y es compatible con la Red de Información Ambiental de Andalucía.

RESULTADOS

La integración de la información tomada durante la realización de este mapa de vegetación en una base de datos relacional unida a un SIG, aumenta notablemente la capacidad de generar resultados o explotaciones parciales de los datos. Por ello, es posible describir los resultados obtenidos desde diversos puntos de vista. Así, es posible realizar una descripción de las distintas formaciones identificadas en la zona de estudio, o llevar a cabo un análisis de la situación sucesional y grado de regeneración en la misma.

Descripción de las formaciones identificadas

La figura 2 muestra la distribución superficial de las distintas formaciones vegetales identificadas en el P. N. Sierra de Huétor.

De manera general podemos decir que las formaciones predominantes en la zona de estudio son los pinares de repoblación (que ocupan más de 4000 Has), seguidos de los encinares meso y supramediterráneos (en sus distintos estado sucesionales) y de los matorrales seriales. Estos tres grupos de formaciones aportan cada uno un tercio aproximadamente a la superficie del Parque. Hay poca superficie de suelo desnudo o cubierto por formaciones herbáceas o urbanizadas. Desde el punto de vista de la distribución espacial de estas formaciones, podemos observar que hay una cierta polarización: las formaciones naturales (encinares y matorrales seriales) abundan en el extremo oriental del Parque, mientras que los pinares de repoblación se localizan en el centro y zona occidental del mismo (figura 3).

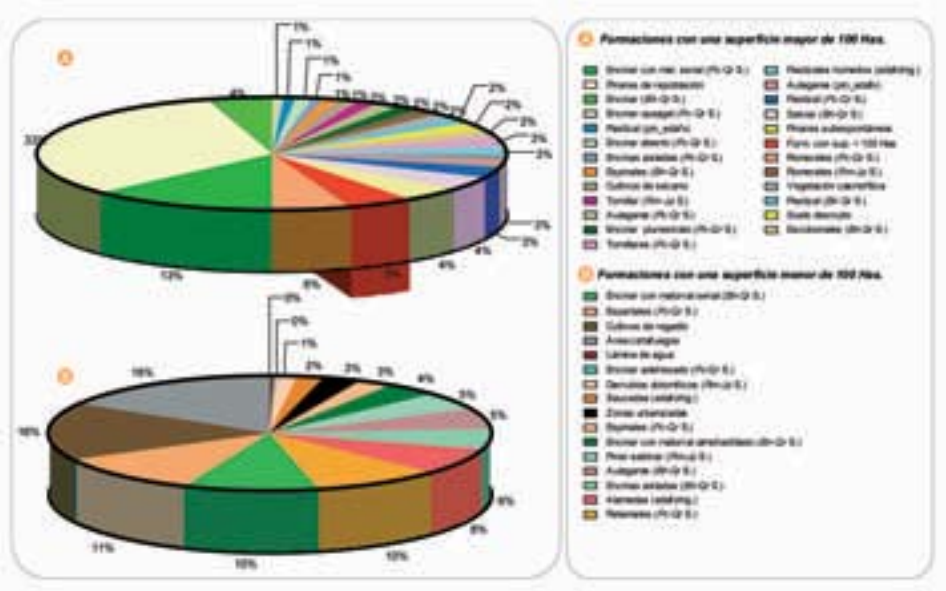


Figura 2. Distribución superficial de las formaciones vegetales identificadas

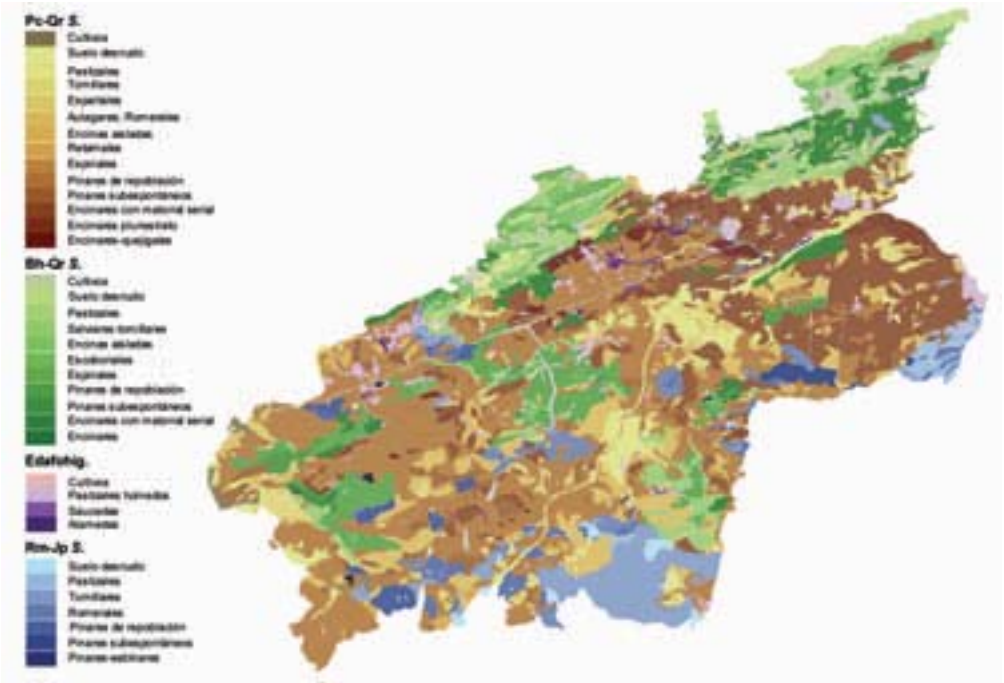


Figura 3. Distribución espacial de las formaciones identificadas. Se agrupan por series de vegetación

Análisis del estado sucesional de la vegetación del P. N. Sierra de Huétor

Teniendo en cuenta tanto la formación vegetal existente en cada polígono de los generados en la cartografía ya descrita, como la serie de vegetación a la que pertenece, se puede generar un indicador que muestra el estado sucesional de cada formación dentro de su serie. De esta manera podemos evaluar, aunque sea de forma estimativa y cualitativa la situación sucesional de la vegetación de la zona de estudio.

Un primer análisis del mapa de estados sucesionales obtenido (Figura 4) nos muestra una situación interesante: está marcadamente polarizado. Es decir, abundan los tonos extremos de la gama de colores utilizada para representar el estado sucesional. Hay una gran superficie de terreno ocupada por formaciones que se encuentran en las etapas iniciales de la sucesión (pinares de repoblación fundamentalmente) y también otra superficie importante ocupada por bosques maduros (encinares meso y supramediterráneos). Esta polarización superficial también se pone de manifiesto espacialmente. Así, los bosques maduros se encuentran en el extremo oriental del Parque, mientras que las zonas más alejadas de la "clímax" ocupan la zona occidental y central. Esto tiene una primera consecuencia evidente y es que las formaciones con un estado sucesional intermedio, ocupan poca superficie dentro de la zona de estudio. En efecto, se observa que los retamales, espinales y otras formaciones preforestales, son poco frecuentes. Además se encuentran formando manchas de reducido tamaño y poco conectadas entre sí.

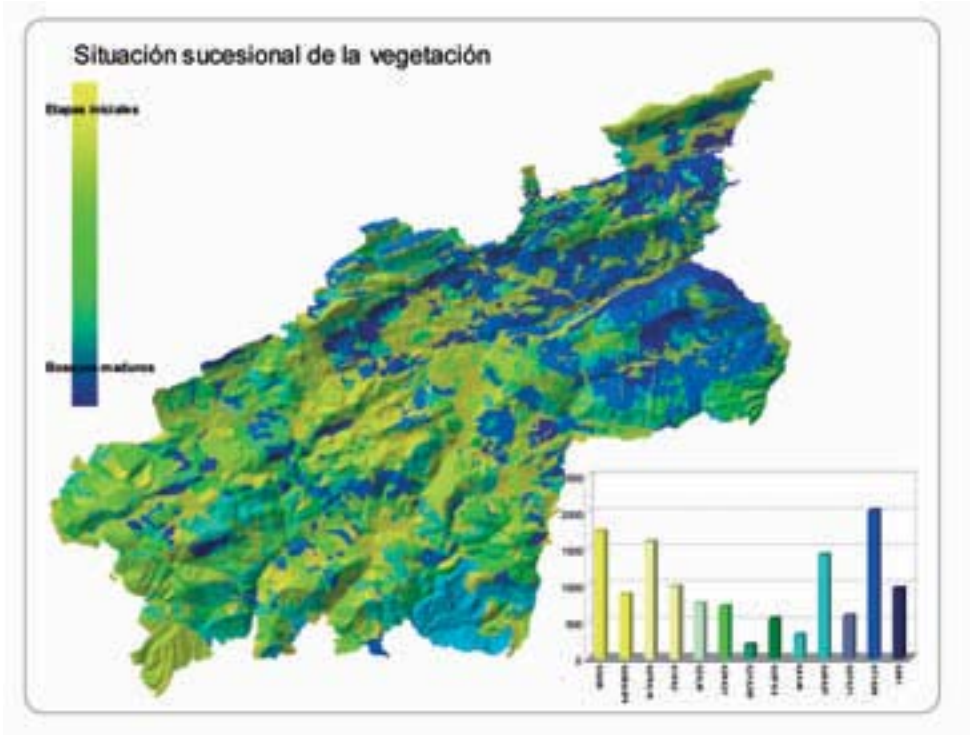


Figura 4. Situación sucesional de la vegetación de la zona de estudio

Es probable que esta situación sea una consecuencia más de los modelos de gestión de los recursos que se han aplicado en el territorio durante la Historia. Según la información con la que contamos (fundamentalmente la fotografía aérea de 1956), antes de las grandes repoblaciones con pináceas, el Parque estaba sometido a una intensa presión ganadera. Esto hizo que las formaciones naturales predominantes fueran tomillares o pastizales con signos evidentes de erosión. Sólo quedaron algunos encinares en el extremo oriental del Parque que no fueron deteriorados de modo irreversible. Cuando se realizaron las repoblaciones, ocuparon casi todo el territorio, excepto los lugares ocupados por encinares maduros. Por ello hoy apenas tenemos formaciones con un estado sucesional intermedio. Podemos suponer que los pinares densos ralentizaron la sucesión allí donde se implantaron (*García* 1998; *Sanz et al.,* 2001). Si se hubieran reducido las presiones ganaderas y madereras pero no se hubieran realizado repoblaciones no protectoras, quizás tendríamos hoy un mosaico más rico de estados sucesionales.

Pero no todas las repoblaciones forestales afectan de la misma manera a la sucesión. En general se observa que los pinares situados en la parte occidental del Parque están más "avanzados" en la sucesión que los situados en el centro.

Grado de regeneración de la vegetación

Resulta difícil evaluar el grado de regeneración de la vegetación sin establecer un marco temporal determinado. En nuestro caso evaluaremos cómo ha cambiado la vegetación desde la década de los 50 del siglo XX. En 1956 se realizó un vuelo aéreo en toda España cuya interpretación y comparación con la vegetación actual nos permite evaluar la dinámica vegetal en este periodo y en esta zona. Podemos empezar describiendo la situación de la vegetación poco antes de la implantación de los pinares de repoblación. Según hemos comprobado al analizar las fotografías de 1956, los paisajes erosivos eran relativamente frecuentes en el Parque. El exceso de ganado por un lado, el carboneo intensivo y las talas descontroladas, fueron los responsables de esta situación. En esta época de posguerra apenas quedaban algunos bosques maduros en el extremo oriental del Parque. El resto estaba ocupado fundamentalmente por formaciones poco maduras que además se encontraban probablemente en proceso de degradación. También abundaban los cultivos de cereales. En la figura 5 se muestra esquemáticamente esta situación (sección A, cilindros azul y amarillo, figura 5, Anexo). De manera muy simplificada tendríamos dos tipos de situaciones en el Parque. Los bosques maduros en la zona oriental estaban sometidos a fuertes presiones, y tenían una tendencia regresiva. Por otro lado estarían las zonas con vegetación en un estado inicial de la sucesión. En estas zonas se daban fuertes procesos erosivos y la degradación de la cubierta vegetal era evidente. En resumen, podemos decir que hasta mediados del siglo XX las presiones ejercidas por la actividad humana eran más intensas que la tendencia natural a la regeneración de la vegetación.

Tras esta etapa comenzó un periodo reforestador que ya hemos analizado anteriormente. Durante esta etapa se implantaron buena parte de los pinares de repoblación que hoy caracterizan al P. N. Sierra de Huétor. Asimismo se suprimió el sobrepastoreo y las talas incontroladas, debido a la prohibición de pastar y cortar leña en zonas reforestadas. Desde este momento hasta nuestros días se ha producido una regeneración diferencial de la vegetación natural. Por un

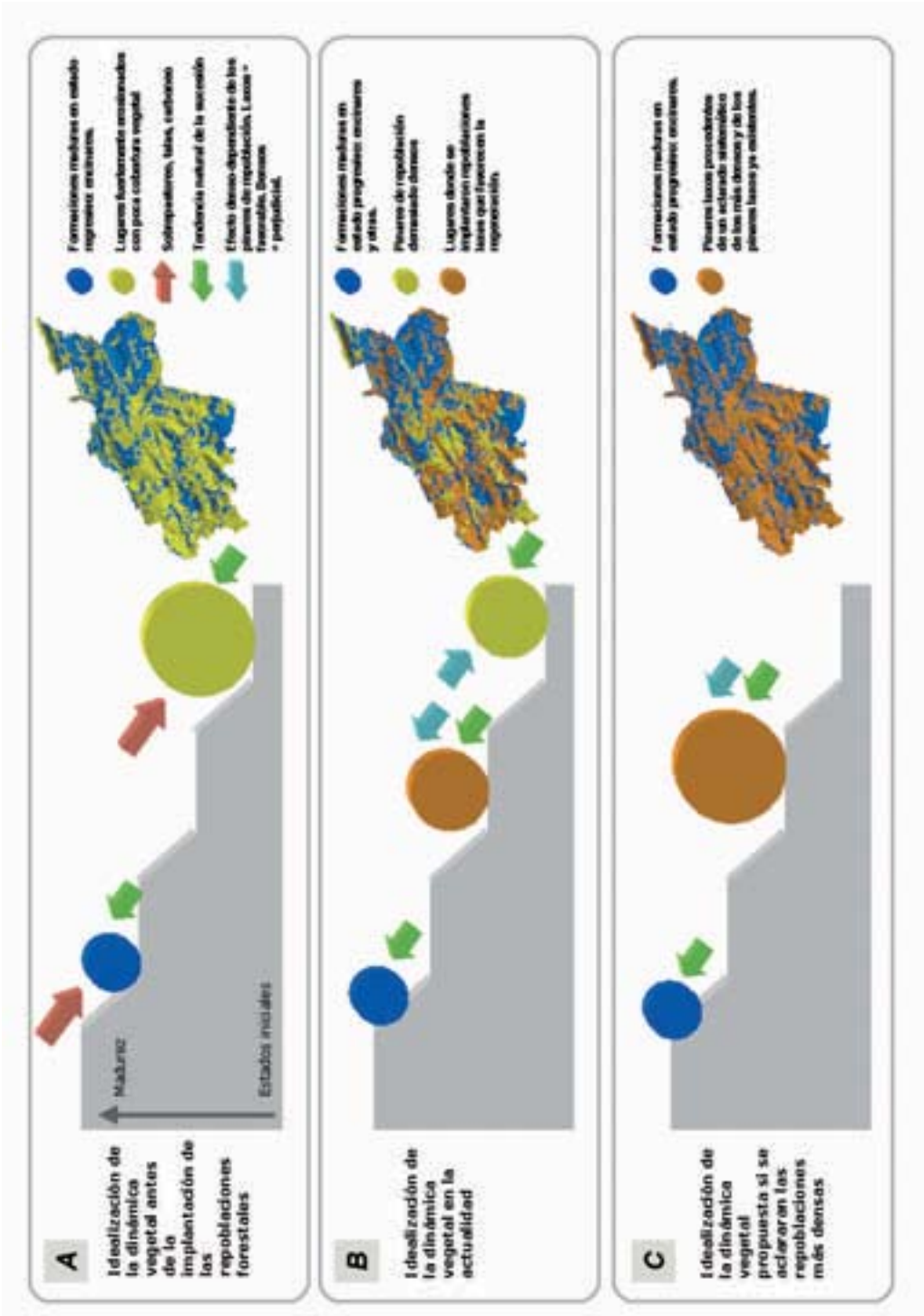


Figura 5. Modelo propuesto para explicar el grado de regeneración de la vegetación en la zona de estudio desde 1956 a la actualidad

lado, casi todas las formaciones no pertenecientes a series edafoxerófilas han experimentado una cierta regeneración. Por otro lado, los lugares donde ha crecido un pinar de repoblación excesivamente denso parecen haberse quedado en estadios sucesionales similares a los que había antes de la repoblación. Es decir, en estos casos la repoblación densa ha actuado frenando la regeneración (cilindro amarillo en la sección B de la figura 5, anexo de figuras). O dicho de otro modo, la capacidad productora de biomasa del suelo ha sido empleada en hacer crecer la repoblación y no en regenerar la vegetación natural. Probablemente ocurrió todo lo contrario en aquellos pinares laxos, bajo los cuales se ha ido regenerando la vegetación con más intensidad (cilindro naranja en la sección B de la figura 5, anexo de figuras).

Según lo anterior parece razonable promover los tratamientos selvícolas conducentes a reducir la densidad de los pinares en aquellos lugares en los que esto no suponga riesgo de erosión. De esta manera se conseguiría aumentar el grado de regeneración de la vegetación en buena parte del territorio. Esto queda mostrado en la sección C de la figura 5.

CONCLUSIONES

- El 55% de la superficie del P. N. Sierra de Huétor está ocupado por formaciones vegetales en las que el estrato arbóreo tiene más del 50% de cobertura. El resto está constituido por formaciones naturales arbustivas o herbáceas, más algunos cultivos semiabandonados.
- Los pinares de repoblación ocupan más de un 30% de toda la superficie del Parque. Más del 80% de estos pinares (unas 3200 Has) tienen una cobertura arbórea superior al 50%. Hemos observado que al aumentar la densidad del estrato arbóreo del pinar de repoblación, se reduce la densidad del estrato arbustivo bajo el mismo.
- Los encinares meso y supramediterráneos sobre suelos básicos son la formación de vegetación natural que más superficie ocupa, con más de un 20% del total. Sin embargo, buena parte de estos encinares se encuentran notablemente simplificados debido al sobrepastoreo y carboneo realizados en el pasado. Sólo 300 Has de las 2.800 cubiertas por encinares, tienen un estrato lianoide que denota su carácter climácico.
- Desde el punto de vista del estado sucesional, la vegetación del P. N. Sierra de Huétor se caracteriza por estar fuertemente polarizada. Son muy abundantes tanto las formaciones situadas en etapas iniciales de la sucesión como otras en estado casi climácico. Esta polarización se da también espacialmente. Las formaciones más “alejadas” de la clímax están en la zona occidental y central del Parque, mientras que los bosques maduros se ubican en la oriental.
- En el P. N. Sierra de Huétor hay unas 2200 Has de pinares de repoblación con un estado sucesional igual o inferior al de un tomillar. De los anteriores, hay más de 1200 Has que carecen en absoluto de vegetación subyacente. El resto de los pinares (unas 2000 Has) tienen un estado sucesional equivalente al de un romeral o retamar, siendo muy escasos los pinares que tienen bajo su dosel formaciones “climácicas”.
- Hemos constatado un avance sucesional en la mayoría de las formaciones del P. N. Sierra

de Huétor, durante el periodo 1956-2003. Las zonas afectadas por procesos erosivos se encuentran actualmente protegidas por los pinares de repoblación, mientras que los matorrales seriales, preforestales y los bosques, parecen estar en proceso de regeneración. No ocurre lo mismo en el interior de los pinares de repoblación excesivamente densos, donde esta densidad dificulta el crecimiento de la vegetación natural.

REFERENCIAS

Blanca López, G. y Morales, C. (1991): *Flora del Parque Natural de la Sierra de Baza*. Unviersidad de Granada. Granada. 382 p.

Braun-Blanquet, J. (1979): *Fitosociología; Bases para el estudio de las comunidades vegetales*. Ed. H. Blume. Madrid. 820 p.

Driel N. V. y Loveland T. (2001): *The U.S. geological survey´s land cover characterization program.* USGS. Estados Unidos. 10 p.

García González, M. E. (1998): *Efectos de las repoblaciones con pinos en la climax de la QUERCETEA ILICIS mediterránea leonesa*. Diputación provincial de León. León. 270 p.

Molero Mesa J., Pérez Raya F., López Nieto J. M., el Aallali A., y Hita Fernández J.A. (2001): *Cartografía y evaluación de la vegetación del Parque Natural de Sierra Nevada*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla. 253 p.

Rivas Martínez, S., Asensi, A., Costa, A., Fernández-González, F., Llorens, L., Masalles, R., Molero Mesa, J., Penas, A. y Pérez de Paz, P.L. (1993): "El proyecto de cartografía e inventariación de los tipos de hábitats de la directiva 92/43/CEE en España". *Colloques phytosociologiques*. Vol 22. pp 18-50.

Sanz, C., López, N. y Molina, P. (2001): "Composición, estructura y evolución de las repoblaciones forestales de la Sierra de Los Filabres (Almería)", *III Congreso Forestal Español*, 2001, Granada.

Torres, M.L., Recio, J.M., Gómez, F., Mota, J.F., Peñas, J., Cabello. y Valle, F. (2000): *Reconocimiento biofísico de espacios protegidos. Parque Natural Sierras Subbéticas*. Consejería de Medio Ambiente. Sevilla. 311 p.

Los SIG como herramienta para la gestión de la vegetación riparia

G. Muñoz Linares [1], E. Cañadas [1], M.C. Montoya Fernández [2] y F. Valle [1]

(1) Dpto. Botánica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. Campus Fuentenueva. 18071 Granada. E-mail: ecanadas@ugr.es.
(2) Dpto. Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Biología. Universidad de Sevilla. Apartado de Correos 1095. 41080 Sevilla.

RESUMEN

La vegetación riparia se ha visto sometida a lo largo de la historia a una fuerte presión antrópica, ya que los núcleos urbanos y los cultivos se han establecido preferentemente entorno a los ríos. Es por ello que se requieren medidas de gestión encaminadas tanto a la conservación de estos ecosistemas de gran interés ecológico como a su mejora, según el caso. En el presente trabajo se resalta la utilidad que pueden tener los Sistemas de Información Geográfica en el diseño de modelos de gestión de la vegetación de estos medios riparios. Los SIG se emplean en diversas fases del estudio de la vegetación de ribera: en el trabajo previo de laboratorio (localización e identificación del área, delimitación de unidades, estudio del medio físico y de la vegetación potencial de la zona, etc.); en el campo (delimitación de tramos de vegetación homogénea), y por último de nuevo en el laboratorio, donde, mediante el programa ArcView GIS 3.2, creamos una capa temática en la cual se representan los tramos, cada uno de ellos es una unidad que lleva asociada la información en diversos campos constituyentes de la tabla final (identificador del tramo, longitud, comunidades de cada banda, comunidades protegidas, especies protegidas, elementos alótonos, objetivos de gestión, tipos de manejo, etc.), que nos permitirá hacer múltiples análisis útiles para el manejo de los medios fluviales.

***Palabras clave**: vegetación riparia, conservación, regeneración, modelos de gestión, SIG.*

ABSTRACT

Riversides have been subject to intensive pressure because throughout history human settlements and agricultural development have been centred on rivers as water sources.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

For this reason adequate management is required both to preserve these vitally important ecosystems and to improve them wherever necessary. In this paper we emphasise how useful the Geographic Information System (GIS) can be in designing models for the management of river vegetation. GIS can be used in several phases of research into river vegetation: in initial laboratory work (the identification and siting of the study area, delimitation of units, study of the physical environment and potential vegetation and so on; in the country (marked-off section of homogeneous vegetation); and finally once again in the laboratory, where, by means of ArcView 3.2, we create a layered scheme in which we can represent this information. Each section of the scheme is a unit which contains information relevant to various fields in the final table, which identifies such factors as section, length, plant communities of each section, protected communities, protected species, alien elements, management objectives, suitable management approaches and so on and allow us to make multiple analyses useful to the management of fluvial environments.

Key Words: *riverside vegetation, conservation, regeneration, management models, GIS.*

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los ecosistemas riparios presentan un elevado nivel de degradación, ya que buena parte de las actividades humanas se han desarrollado históricamente en relación a los ríos. Estos medios constituyen sistemas muy complejos, que ofrecen un recurso de vital importancia, el agua dulce, por lo que, además de los núcleos urbanos, se han establecido zonas de aprovechamiento agrícola, que han motivado la transformación de gran parte de los ecosistemas preexistentes.

Debido a la escasez de áreas fluviales en buen estado se requieren medidas de gestión encaminadas a su conservación, así como alternativas para mejorar la calidad de los espacios riparios más degradados.

Para planificar la gestión de un río se requiere un estudio multidisciplinar que integre criterios propios de diversos campos: Hidrología, Geomorfología, Zoología, Botánica, Ecología, Bioingeniería, Sociología, etc. Este trabajo se centra en la vegetación riparia que, si bien es un aspecto más a tener en cuenta a la hora de planificar esta gestión, tiene una gran importancia, ya que, además del valor ecológico que representa y de su destacada función paisajística, juega un papel fundamental en la retención de márgenes, en la protección contra la erosión (las márgenes desprovistas de vegetación suelen ser las que mayores problemas erosivos presentan), así como en la creación de hábitats para la fauna.

En este sentido puede hacerse referencia al trabajo de *Salazar et al.* (2001), en el que se señala que las comunidades ribereñas se consideran formaciones de un gran interés por su valor ecológico, al comportarse como islas biogeográficas, que acogen a especies vegetales escasas y raras, que necesitan un alto grado de humedad, así como por ofrecer un soporte fí-

sico y alimenticio a numerosas especies animales, que también buscan refugio en estas zonas privilegiadas dentro de un entorno generalmente seco.

Por otro lado, como es conocido, cada vez existe a disposición de los usuarios un mayor número de productos digitales que pueden integrarse en un SIG, tanto en formato vectorial como ráster y a diferentes escalas (mapas topográficos, geológicos, de suelos, de usos del suelo, de vegetación, de pendientes, imágenes de satélite, ortofotos aéreas, etc.), aunque cabe señalar que la proliferación de este tipo de información es diferente según la región y su utilidad para un caso concreto depende de los productos disponibles al nivel de escala en el que se pretenda trabajar. En cualquier caso el trabajo con SIG está en incremento en multitud de campos, ya que suponen instrumentos muy útiles para la planificación de la gestión del territorio.

Se está trabajando en el diseño de una metodología de estudio de vegetación riparia, que permita establecer los objetivos de gestión y tipos de manejo requeridos por determinados ríos o tramos de ríos. Los Sistemas de Información Geográfica pueden constituir una herramienta clave en diversas etapas del proceso que se plantea. En este trabajo se expone una metodología provisional, cuya puesta en práctica puede originar resultados de diversos formatos: memorias, coberturas integrables en un SIG y mapas, que pueden resultar de gran utilidad en la programación de la gestión de los ecosistemas riparios.

A lo largo del documento se resalta la importancia de completar el trabajo de laboratorio con el de campo para la obtención de resultados factibles, así como la utilidad de la Fitosociología para llevar a cabo una correcta planificación de la gestión de la vegetación de ribera.

METODOLOGÍA

Para conseguir una planificación apropiada con medidas de gestión referidas a la vegetación de un río debe realizarse un estudio del área en cuestión. Tanto en las etapas preliminares como a la hora de proponer las alternativas de gestión, los Sistemas de Información Geográfica constituyen una herramienta de gran utilidad.

En primer lugar debe localizarse la zona de estudio, existe una amplia gama de productos digitales georreferenciados que pueden emplearse en esta fase, como mapas topográficos a diversas escalas y ortofotografías digitales, que pueden ser de gran interés en un primer reconocimiento del territorio, para conocer la topografía y realizar una delimitación de tramos potenciales. Para esta sección pueden emplearse los trabajos del *M.A.P.A,* 1997; *Junta de Andalucía* 1999, 2000ª, 200b, 2003; etc.

Además del relieve, antes de poder efectuar una planificación debe conocerse el clima, la naturaleza de sustratos y suelos, la hidrología, etc. Para ello pueden ser útiles las numerosas capas de información digital existentes y que pueden integrarse en un Sistema de Información Geográfica: capas (coberturas) de litología, de suelos, de usos del suelo, de pluviometría, de ríos y arroyos, etc., incluidas en las obras citadas en el párrafo anterior.

Posteriormente hay que estudiar la zona desde el punto de vista de la Biogeografía (*Rivas Martínez et al.,* 1997) y Bioclimatología (*Rivas Martínez*, 1996 y *Rivas Martínez y Loidi*, 1999),

aspectos que, junto a la naturaleza de los sustratos, determinarán en qué series de vegetación se integran las formaciones vegetales del territorio. Este tipo de información también existe ya para muchas regiones en forma de capas cartográficas digitales (*Valle et al*., inédito).

El conocimiento de las series de vegetación climácica del entorno, y principalmente de las geoseries de vegetación riparia características de los sistemas fluviales, es un factor clave para llevar a cabo una correcta planificación. En relación a este aspecto queremos destacar la utilidad de la aplicación de la metodología fitosociológica (*Braun Blanquet,* 1979), tanto para el estudio de la vegetación de un territorio, como para el proceso de planificación de restauración.

Las series de vegetación están integradas por comunidades vegetales unidas por la dinámica, por lo que en la primera fase de gabinete deberá realizarse un estudio de las comunidades que forman parte de la serie o geoserie del entorno de actuación, para posteriormente, en el trabajo de campo, llevar a cabo una correcta identificación de las formaciones que puedan existir en el área.

En la fase de campo se realiza un reconocimiento *in situ* de las comunidades vegetales presentes y del estado en el que se encuentran. En función de las características de la vegetación se pueden delimitar tramos que facilitarán posteriormente la planificación de su gestión, ya que, dependiendo del estado de conservación, requerirán unas alternativas u otras. Tanto las Ortofotos Digitales impresas, como el GPS (*Global Positioning Systems*), resultarán de gran utilidad para una correcta diferenciación de los tramos.

Habrá que prestar especial atención a las comunidades protegidas por la Directiva 92/43/CEE del Consejo, y posteriores modificaciones, relativa a la Conservación de los Hábitats Naturales y de la Fauna y Flora Silvestres. Además habrá que realizar un estudio florístico, en el se especificará si existen especies protegidas por la actual legislación, o si existen elementos destacados por su rareza o gran envergadura; la presencia en el tramo de especies alóctonas invasoras o propias de cultivos también sería interesante anotarla. Podrían registrarse asimismo datos sobre la existencia de elementos artificiales en el tramo (obras de paso, escombreras, encauzamientos, casas adyacentes al cauce, etc.).

Completado el trabajo de campo debe realizarse, en laboratorio, la valoración de los tramos y el estudio de alternativas. Para plantear los objetivos de gestión y los tipos de manejo que requiere el área, se han adoptado los criterios recogidos en el Plan Forestal Andaluz (1989). Como objetivos figuran la protección y mantenimiento de ecosistemas, la restauración de ecosistemas degradados, la lucha contra la erosión, la diversificación del paisaje y la utilización racional de recursos. Y para su consecución habrá que proponer tipos de manejo concretos: protección, regeneración, densificación, transformación de masas, reforestación o gestión sostenible.

Para el diseño de modelos de restauración se sigue la metodología aportada por *Valle et* al. (1990), *Valle* (1991) y *Valle et al.* (en prensa).

Respecto a las medidas que implican la elección de especies de flora para su introducción (mediante plantación, siembra, hitrosiembra, etc.) queremos destacar la importancia de emplear las especies autóctonas que formen parte de las comunidades integrantes de la geoserie, ya que presentan diversas ventajas (integración ecológica, mayor viabilidad y disminución en costes de mantenimiento).

Para concluir, debe elaborarse la información, redactando una memoria en la que se describan detalladamente cada uno de los aspectos anteriormente indicados, así como digitalizar los datos para integrarlos en un SIG. En esta etapa los tramos delimitados en campo deben convertirse en una cobertura que contenga tanto información gráfica como una tabla asociada, que ofrezca información útil para la gestión y planificción de cada tramo definido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras la aplicación de la metodología planteada se obtienen diversos tipos de resultados: memoria, mapas y capas de información integradas en un SIG, con las que se pueden realizar múltiples consultas y análisis útiles en la toma de decisiones sobre planificación fluvial.

La memoria incluye tanto información biofísica del territorio como la descripción de los tramos delimitados y la valoración del estado de conservación en el que se encuentran, definido por un determinado "valor ecológico". Por otra parte merece resaltar qué objetivos se plantean para cada tramo y qué tipos de manejo se proponen para conseguirlos. El hipotético índice de ese informe podría ser el indicado en la figura 1.

Gran parte de la información contenida en la memoria puede además formar parte del Sistema de Información Geográfico creado, como capas cartográficas que contendrán información específica, en forma de mapas y tablas de datos.

El SIG además cuenta con una cobertura creada sobre los tramos delimitados. Esa cobertura o capa cartográfica contiene una representación espacial de la distribución de los tramos definidos, que lleva asociada información útil para la selección de las alternativas de gestión, a través de una tabla con diversos tipos de campos, algunos de ellos expuestos en el cuadro 1. A continuación se describen los campos considerados. Hay que señalar no obstante que, al tratarse de una metodología provisional, podrían añadirse otros campos que completen el estudio del medio ripario, tanto relacionados con vegetación como con otras variables. Algunos ejemplos de campos que podría incluirse serían: naturalidad, técnicas de restauración, fauna, topografía, calidad de las aguas, etc.

Campo 1. Id: Corresponde a la numeración asociada a cada tramo para identificarlos.

Campo 2. Length Meters: Muestra la longitud (en metros) que posee cada tramo delimitado.

Campo 3. Geoserie: Indica qué Geoserie caracteriza a cada tramo, en este caso se representa mediante la abreviatura utilizada en la obra de *Valle et al.* (2003).

Campos 4, 5 y 6. Estos tres campos (primera banda, segunda banda, tercera banda) señalan las principales comunidades presentes en el tramo en cada una de las bandas de vegetación características. Las comunidades cabezas de serie se indicarán siempre que estén presentes; en el caso de que aparezcan de forma puntual se señalará con un *. En el cuadro 1 las comunidades se representan por las iniciales del genero de las especies que dan nombre a la comunidad, basado también en *Valle et al.* (2003).

Campo 7. Comunidades protegidas: Campo destinado a especificar qué comunidades pro-

1. **Introducción**
2. **Estudio del medio físico**
    - Situación y límites
    - Topografía y relieve
    - Climatología
    - Geología
    - Edafología
    - Hidrología superficial
    - Hidrogeología subterránea
3. **Estudio de la vegetación potencial**
    - Biogeografía
    - Bioclimatología
        - *Series de vegetación*
        - *Series climácica*
        - *Series edafoxerófilas*
        - *Geoseries de vegetación riparia*
4. **Vegetación actual**
5. **Flora**
6. **Comunidades protegidas incluidas en la Directiva Hábitats**
7. **Especies protegidas**
8. **Cartografía de la vegetación**
    - Mapa
    - Descripción de tramos
    - Valoración del estado de conservación de los tramos
9. **Propuestas de gestión**
    - Objetivos
    - Tipos de manejo

Figura 1. Índice de la memoria

tegidas por la Directiva 92/43/CEE del Consejo, y posteriores modificaciones, se han identificado en cada tramo. La nomenclatura se ha realizado como en el campo anterior.

Campo 8. Especies protegidas: Se señala si existe en el tramo alguna especie protegida por la actual legislación. En caso afirmativo se indica el nombre de la especie protegida.

Campo 9. Individuos destacados: Se anota si aparecen individuos vegetales de destacada importancia, por sus dimensiones, rareza, etc.

Campo 10. Especies alóctonas: Es frecuente encontrar en los cauces especies alóctonas invasoras, por lo que en este campo se indican las más significativas. Entre las más abundantes destacan: *Arundo donax* (caña), *Ailanthus altissima* (ailanto), *Eucalyptus* sp. (eucalipto), *Catalpa bignonioides* (catalpa), *Nicotania glauca*. También es común encontrar especies de cultivo, como choperas cultivadas para la obtención de madera y frecuentemente frutales*: Ficus carica* (higuera), *Punica granatum* (granado), *Prunus dulcis* (almendro), etc.

Campo 11. Estado: Se refiere al estado de conservación que posee cada tramo, se ha empleado una escala de 1 a 3: 1. Espacio degradado. 2. Estado de conservación intermedio 3. Comunidades autóctonas en buen estado de conservación.

Cuadro 1. Ejemplo de una tabla exportada de ArcView y modificada, con algunos de los campos que podrían incluirse en el tema de tramos.
Geoseries: EH8. Geoserie edafohigrófila mesomediterránea mediterráneo-iberolevantina y bética oriental basófila. EH6. Geoserie edafohigrófila supra-mesomediterránea rondeña y malacitano-almijarense serpentinícola y dolomitícola. **Comunidades presentes:** C-Hv. Juncal churrero (*Cirsio monspessulani-Holoschoenetum vulgaris*); D-Cr. Cardal higronitrófilo (*Dipsaco fulloni-Cirsietum crinitae*); E-Sa. Mimbrera dolomitícola supramediterránea *(Erico terminalis-Salicetum angustifoliae);* Hn. Berreda (*Helosciadietum nodiflori*); H-Um. Olmeda (*Hedero helicis-Ulmetum minoris*); P-Av. Gramal anfibio (*Paspalo distychi-Agrostietum verticillati*); R-Cm. Zarzal (*Rubo ulmifolii-Coriarietum myrtifoliae*); R-Pa. Chopera blanca mesomediterránea basófila (*Rubio tinctori-Populetum albae*); S-Eh. Comunidad megafórbica heliófila (*Scrophulario auriculatae-Epilobietum hirsuti*); Sn. Sauceda (*Salicetum neotrichae*); T-Sg. Espadañal (*Typho angustifoliae-Schoenoplectetum glauci*); Tg. Tayaral (*Tamaricetum gallicae*). **Objetivos:** P. Protección y mantenimiento de ecosistemas; R. Restauración de ecosistemas degradados; LE. Lucha contra la erosión; D. Diversificación del paisaje. **Tipos de Manejo:** P. Protección; R. Regeneración; D. Densificación; T. Transformación de masas; RF. Reforestación.

C1	Campo 2	Campo 3	Campo 4	Campo 5	Campo 6	Campo 7	Campo 8	Campo 9	Campo 10	Campo 11	Campo 12	Campo 13	Campo 14	Campo 15
ID	LENGTH_ MET	GEOSERIE	1ª BANDA	2ª BANDA	3ª BANDA	COM. PROTEGIDAS	SP. PROTEGIDAS	INDV. DESTACADOS	SP. ALÓC.	ESTADO	OBJETIVO PRIORIT.	OBJETIVOS SECUND.	MANEJOS	ESPECIES_R
1	1584,958	EH8	T-Sg, Hn		H-Um, R-Cm	H-Um		Ulmus minor de gran embergadura	*Prunus dulcis*	3	P		P	*Salix neotrichia, S. purpurea, S. atrocinerea, Populus alba, Ulmus minor, Tamarix gallica, T. africana, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Coriaria mirtifolia*
2	222,383	EH8	Sn, R-Cm	R-Pa	H-Um	Sn, R-Pa, H-Um				3	P		P	*Salix neotrichia, S. purpurea, S. atrocinerea, Populus alba, Ulmus minor, Tamarix gallica, T. africana, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Coriaria mirtifolia*
3	273,923	EH8	Sn, R-Cm, T-Sg	R-Pa, Tg		Sn, R-Pa, Tg		*Populus alba* de gran embergadura		3	P		P	*Salix neotrichia, S. purpurea, S. atrocinerea, Populus alba, Ulmus minor, Tamarix gallica, T. africana, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Coriaria mirtifolia*
4	1275,434	EH8	Sn*	R-Pa	H-Um*	Sn, R-Pa, H-Um*		*Populus alba* de gran embergadura		3	P	D*	P, RF*	*Salix neotrichia, S. purpurea, S. atrocinerea, Populus alba, Ulmus minor, Tamarix gallica, T. africana, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Coriaria mirtifolia*
5	334,321	EH8	Sn, P-Av	R-Pa, Tg		Sn, R-Pa, Tg,			Chopos de cultivo	3	P		P, T	*Salix neotrichia, S. purpurea, S. atrocinerea, Populus alba, Ulmus minor, Tamarix gallica, T. africana, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Coriaria mirtifolia*
6	157,929	EH8	R-Cm						*Arundo donax*	1	R	LE, D	D, R	*Salix neotrichia, S. purpurea, S. atrocinerea, Populus alba, Ulmus minor, Tamarix gallica, T. africana, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Coriaria mirtifolia*
7	265,217	EH8	T-Sg, S-Eh		D-Cr				*Prunus dulcis*	2	R	D	T	*Salix neotrichia, S. purpurea, S. atrocinerea, Populus alba, Ulmus minor, Tamarix gallica, T. africana, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Coriaria mirtifolia*
8	780,871	EH8	Sn, Rcm	R-Pa,	C-Hv	Sn, R-Pa				3	P		P	*Salix neotrichia, S. purpurea, S. atrocinerea, Populus alba, Ulmus minor, Tamarix gallica, T. africana, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Coriaria mirtifolia*
9	593,073	EH8	T-Sg, Sn, S-Eh	R-Pa		Sn, R-Pa		*Salix neotrichia* de gran embergadura		3	P		P	*Salix neotrichia, S. purpurea, S. atrocinerea, Populus alba, Ulmus minor, Tamarix gallica, T. africana, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Coriaria mirtifolia*
10	376,369	EH8	Sn, T-Gh	C-Hv	R-Cm	Sn		*Salix atrocinerea* de gran embergadura	*Arundo donax*	3	P		P	*Salix neotrichia, S. purpurea, S. atrocinerea, Populus alba, Ulmus minor, Tamarix gallica, T. africana, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Coriaria mirtifolia*
11	155,048	EH6	E-Sa, T-Sg			E-Sa			Chopos de cultivo	3	P		P	*Salix eleagnos subsp. angustifolia, S. atrocinerea, S. purpurea, Rubus ulmifolius, Rosa corymbifera, Crataegus monogyna, Lonicera periclymenum, Cornus sanguinea*
12	108,124	EH6	E-Sa			E-Sa	*Salix eleagnos* s			3	P		P	*Salix eleagnos subsp. angustifolia, S. atrocinerea, S. purpurea, Rubus ulmifolius, Rosa corymbifera, Crataegus monogyna, Lonicera periclymenum, Cornus sanguinea*
13	477,576	EH6	E-Sa, T-Sg			E-Sa	*Salix eleagnos* s			3	P	LE*	P, RF*	*Salix eleagnos subsp. angustifolia, S. atrocinerea, S. purpurea, Rubus ulmifolius, Rosa corymbifera, Crataegus monogyna, Lonicera periclymenum, Cornus sanguinea*

Campo 12. Objetivo prioritario: En este campo se indica qué objetivo, de los recogidos el Plan Forestal Andaluz, se plantea para la gestión de cada tramo: protección y mantenimiento de ecosistemas (P), restauración de ecosistemas degradados (R), lucha contra la erosión (LE), diversificación del paisaje (D), utilización racional de recursos (UR).

Campo 13. Objetivos secundarios: la siguiente columna del cuadro se destina a señalar otros objetivos secundarios que se pueden fijar para cada tramo, entre los indicados en el campo anterior.

Campo 14. Manejos: En el campo así denominado se señalan qué tipos de manejos podrían efectuarse para conseguir los objetivos anteriormente planteados en los distintos tramos.

Campo 15. Especies para restauración: Se expone un listado de especies apropiadas para la restauración del tramo, seleccionadas de las especies autóctonas propias de las comunidades que integran la geoserie correspondiente al territorio.

Otros campos que aparecen en la figura 2 pero no en el ejemplo del cuadro 1 son:

Shape: Indica el tipo de elemento digitalizado, en el ejemplo del cuadro 1 son polilíneas, podrían ser también puntos o polígonos.

Biogeografía: Señala el distrito biogeográfico en el que se encuadra el tramo (*Rivas-Martínez et al*., 1997).

Termotipo: En este campo aparece el termotipo en el que se encuentra el tramo (*Rivas-Martínez y Loidi,* 1999).

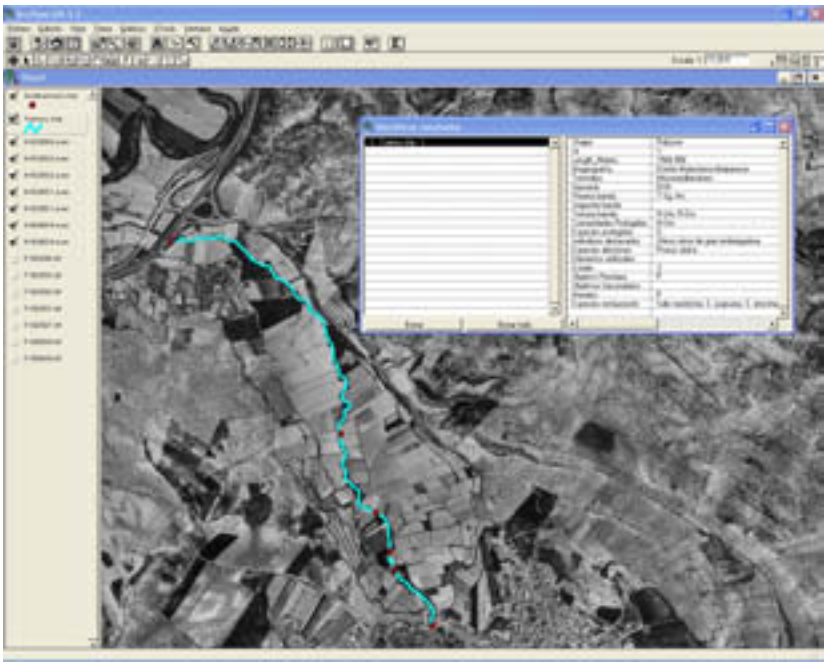


Figura 2. Imagen capturada del programa ArcView GIS 3.2, en la que se puede observar el contenido de la tabla para el tramo 1 sobre una ortofotografía aérea digital.

Elementos artificiales: Se indica si en el tramo existe algún tipo de elemento artificial, tales como escombreras, puentes, casas adyacentes al cauce, encauzamientos, etc.

La información que aporte la cobertura creada resultará de gran utilidad para la planificación y la gestión de un río, aunque deberá ir acompañada de una memoria, como se ha señalado, en la que se especificarían con más detalle el contenido de los campos creados.

El Sistema de Información Geográfica, como ya se ha indicado, se podría completar con otras capas relacionadas con diversas disciplinas, si se pretende crear una planificación integrada del ecosistema.

CONCLUSIONES

Para planificar la gestión de la vegetación de un ecosistema fluvial es necesario apoyarse en la Fitosociología, ya que es de gran utilidad tanto a la hora de evaluar el estado del que se parte como en la toma de decisiones para plantear alternativas.

La información obtenida en la fase de campo es imprescindible para una evaluación real del estado del río y, por lo tanto, para realizar unas propuestas efectivas y viables.

Los Sistemas de Información Geográfica constituyen una herramienta muy útil en la planificación y gestión de sistemas riparios, orientada a la recuperación, protección y mantenimiento de áreas de alto valor ecológico.

Aunque este trabajo se centra en el aspecto botánico de los ríos, para plantear una gestión integrada del medio ripario se debería complementar con un estudio multidisciplinar que englobe materias relacionadas con la geomorfología, hidraúlica, fauna, bioingeniería, etc. Estas disciplinas pueden también apoyarse en el uso de los SIG para integrar sus resultados.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se desarrolla en el marco de los convenios “Identificación y valoración ambiental de la vegetación de ribera presente en la cuenca del Guadalquivir” y “Asesoramiento ambiental en los trabajos a realizar por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir” firmados entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y las Universidades de Granada, Jaén y Sevilla.

REFERENCIAS

Braun-Blanquet, J.(1979): *Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales*. Ed. Blume. Barcelona. 820 p.

Junta de Andalucía (1999): *Mapa topográfico digital de Andalucía 1:1000.000*. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía. Sevilla.

Junta de Andalucía (2000a): *Atlas De Andalucía (multimedia e interactivo),1:100.000.* Junta de Andalucía. Sevilla.

Junta de Andalucía (2000b): *Mapa de Cultivos y Aprovechamientos. Provincias Almería, Cádiz, Córdoba, Granada, Huelva, Málaga, Sevilla. 1:50.000.* Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla.

Junta de Andalucía (2003): *Ortofotografía Digital de Andalucía (Color). Escala 1:10.000. Formato comprimido MrSID. Vuelo fotogramétrico 1:60.0000 color*. Junta de Andalucía. Sevilla.

M.A.P.A.(1997): *Ortofotos digitales. SIG Oleícola Español*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

Rivas-Martínez, S., (1996): "Clasificación bioclimática de la Tierra". *Folia Bot. Matritensis*, Vol. 16, pp. 1-20.

Rivas-Martínez, S.;Asensi, A.; Díez, B. Molero, J. y Valle, F., (1997): "Biogeographical Synthesis of Andalusia (southern Spain)". *Journal of Biogeography*, Vol. 24, pp. 915-928.

Rivas-Martínez, S. y Loidi, J., (1999): "Bioclimatology of the iberian peninsula". *Itinera geobotanica*, 13, pp. 41-47.

Salazar, C; García Fuentes, A. y Valle, F. (2001): "Vegetación y flora de ribera en el área metropolitana de Granada". *Monografías de Flora y Vegetación Béticas*, Vol.12, pp.107-157.

Salazar, C.; Torres, J.A.; Cano, E. & Valle, F. (2004): "La restauración vegetal en medios fluviales como medida de protección frente a la erosión: Cuenca del Guadiana Menor (SE: España)" en Pérez, J.M (coord.), *In Memoriam al Prof. Dr. Isidoro Ruiz Martínez,* pp.117-130.

Valle, F. (1991): "Dinámica y modelos de regeneración de las formaciones de Quercus pyrenaica en el Parque Natural de Cazorla, Segura y las Villas". *Revue Forestiére Française. Horst Série*, Vol.4, pp 301-310.

Valle, F.; Alonso, R. y Salas, R.. (1990): "Modelos de regeneración de la vegetación: su aplicación a un caso concreto". *Actas de la 1ª Reunión sobre el Medio Ambiente de Andalucía*, pp 85-91. Córdoba.

Valle, F. (ed.), (2003): *Mapa de Series de Vegetación de Andalucía*. Ed. Rueda. Madrid. 131 p.

Valle, F. y Lorite, J. (eds), (en prensa). *Datos para la gestión del medio natural: Modelos de restauración Forestal*. Junta de Andalucía.

Valle, F. (coord) (inédito). *Mapa Digital de Series de Vegetación de Andalucía. Escala 1: 200.000*.

Uso de los SIG en el estudio de tierras de cultivo abandonadas en el noreste de la provincia de Granada

E. Cañadas [1], F.B. Navarro [1], M.N. Jiménez [2] y F. Valle [1]

(1) Dpto. Botánica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Campus Fuentenueva, 18071 Granada. E-mail: ecanadas@ugr.es.
(2) Dpto. Forestal, Centro de Investigación y Formación Agraria de Granada, C/ Camino Purchil s/n, 18080 Granada.

RESUMEN

Los cultivos abandonados de secano ocupan una gran extensión en la Depresión semiárida de Baza, en la que se ha realizado un estudio con el objetivo de establecer las bases para la gestión que requieren estas tierras, ya que suponen importantes frentes de avance de la desertificación. Para ello se han delimitado los cultivos abandonados de la Hoya de Baza mediante la fotointerpretación de la zona a partir de las Ortofotos digitales y se ha seleccionado el área en la que son más abundantes, con el fin de realizar una cartografía exhaustiva. Tras esta fase se identifican en campo las comunidades vegetales que se encuentran en cada una de las unidades delimitadas. La tipificación de las comunidades se define mediante criterios fitosociológicos: se han identificado 7 asociaciones de vegetación que se establecen en cultivos abandonados, cada una de las cuales evoluciona bajo unos parámetros edáficos concretos, como se ha podido comprobar con los resultados de los análisis de suelos realizados. Las herramientas propias de los SIG permiten asignar a cada unidad cartográfica el tipo o tipos de comunidades que la caracterizan y elaborar el mapa que representa esta relación, así como realizar múltiples análisis cuantitativos, destacando entre ellos los que pueden realizarse con los datos espaciales, tanto del total ocupado por los antiguos cultivos como del área en la que se ha establecido cada comunidad. Los diversos tipos de cultivos abandonados, como ya se ha indicado, se desarrollan bajo determinadas condiciones edáficas, que implican diferentes limitaciones al cultivo y requieren distintas alternativas, pudiendo ser por tanto el presente estudio de gran utilidad para la gestión de estos territorios.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

***Palabras Clave**: Cultivos abandonados, comunidades vegetales, características edáficas, semiárido, análisis cuantitativo, SIG, Hoya de Baza.*

ABSTRACT

Old fields with no irrigation occupy a great part of the semiarid Baza Basin, where we have carried out a study with the intention of establishing the basis for the management that these lands require to prevent the serious advances of desertification that are taking place at present. These abandoned agricultural fields in the Baza Basin have been delimited by means of digital aerial photography, and an area where they are more frequent has been selected to make a thorough cartographic survey. Subsequently plant communities in each marked-off unit are identified in the field. The typification of plant communities is carried out on the basis of phytosociological criteria. Seven plant associations that settle in old fields have been identified; each develops in soils of particular characteristics, as we have been able to verify by soil analyses. GIS tools allowed us to assign the characteristic kinds of plant community to each cartographic unit and construct a map which represents that relationship, as well as to make multiple quantitative analyses, particularly spatial ones with regard to the entire area occupied by old fields and the area where each plant community has settled. The various kinds of old field, as we have mentioned, develop in particular soil conditions, each of which implies different limitations for agricultural crops. Each requires different approaches to crop management, and thus the interest and importance of this study.

***Key Words:** old field, plant communities, soil characteristics, semiarid, quantitative analysis, GIS, Baza Basin.*

INTRODUCCIÓN

En el norte de la provincia de Granada existen numerosas zonas de cultivos abandonados, que son especialmente abundantes en el área semiárida correspondiente a la Hoya de Baza. Se trata de antiguos cultivos de secano, en la mayoría de los casos de cereales, en los que ha cesado la actividad agrícola debido a muy diversas causas, tanto naturales como socioeconómicas (*Cañadas et al*., 2003).

Un problema propio de estas tierras es que cuando un suelo utilizado para el cultivo se abandona, éste no se encuentra en las mismas condiciones previas a su roturación, se convierte en un suelo mucho más vulnerable a la erosión. Tras el cese de la actividad agraria el suelo no tiene la textura y estructura que poseía antes del inicio de la misma, además pierde el equilibrio proporcionado por su cultivo, aunque se tratase de un equilibrio mantenido artificialmente por el agricultor mientras duraba la fase de aprovechamiento (*Sánchez López*, 1995).

La situación se agrava bajo características climáticas semiáridas (precipitaciones inferiores a 350 mm/año, (*Rivas-Martínez,1996*), lo cual determina una lenta regeneración de la vegetación natural, quedando el suelo desprotegido frente a los agentes erosivos durante amplios periodos. Por otro lado las precipitaciones frecuentemente caen de forma torrencial, por lo que se acentúan dichos procesos. Aparte de un clima desfavorable, la naturaleza de los sustratos presentes en el territorio, margas y margas con yesos principalmente, contribuye a incrementar el riesgo de erosión.

Además del riesgo ecológico, en esta zona existen problemas económicos, ya que se trata de un territorio esencialmente agrícola que no ha conseguido un desarrollo económico significativo en otros sectores, lo cual ha originado la emigración de buena parte de la población, que fue especialmente significativa en décadas anteriores, pero que aún existe debido a la escasez de empleo en la zona.

Los aspectos expuestos evidencian la necesidad de plantear para el área alternativas viables tanto ecológica como económicamente. La cartografía de cultivos abandonados de la Hoya de Baza, que se expone en este trabajo, permite clasificar y cuantificar estas tierras, por lo que los resultados constituyen una útil herramienta para la planificación de su gestión.

En la elaboración de la cartografía nos apoyamos en el empleo de los Sistemas de Información Geográfica. Como es conocido, el término SIG alude a un sistema de información espacial automatizado e internamente referenciado, diseñado para la gestión y análisis de datos espaciales y la elaboración de cartografía (*Berry,* 1990). Así los programas que permiten trabajar con SIG recogen un considerable número de funciones orientadas al análisis espacial, ya que es uno de sus puntos fuertes y distintivos. Entre ellas se incluyen la superposición de mapas, el análisis de proximidad, el cálculo de áreas, perímetros y volúmenes, el análisis de rutas, la elaboración de estadísticas y mapas algebraicos, etc. (*Morad y Triviño*, 2001).

En las unidades delimitadas correspondientes a cultivos abandonados se comprobó qué tipo de comunidad vegetal invasora se presentaba, información que fue incorporada a la cobertura de cartografía creada, y que a través del programa ArcView GIS 3.2 se pudo analizar, con el objetivo de obtener datos cuantitativos sobre el número de unidades y el área ocupada por cada comunidad.

La utilidad de los resultados de estos análisis para la planificación de la gestión del territorio radica en que la comunidad vegetal es indicativa de unas características edáficas concretas, que pueden implicar distintas limitaciones para el desarrollo de la actividad agraria. Cada tipo de comunidad vegetal evoluciona bajo unos parámetros edáficos específicos que han sido estudiados, aunque no es objeto de este trabajo concretar los resultados obtenidos en los análisis de suelos.

Un ejemplo de cómo puede contribuir este trabajo al planteamiento de alternativas de gestión es el relacionado con las formaciones que evolucionan en suelos salinos (abundantes en el territorio). Se trata de comunidades vegetales de gran valor ecológico, ya que las plantas halófilas, que poseen mecanismos de resistencia a la salinidad (*Martínez,* 1996), suelen ser raras, endémicas y/o amenazadas. Por otro lado las plantas cultivadas no suelen ser halófilas, por lo que las alternativas a proponer en suelos salinos deben tenerlo en cuenta.

METODOLOGÍA

El trabajo se inició con la elaboración de un estudio del medio físico y de la vegetación del territorio, que constituye la base para el desarrollo de las etapas posteriores. El estudio incluye aspectos como: topografía y relieve, clima, geología, edafología, hidrogeología, factores antrópicos, biogeografía, bioclimatología, series de vegetación y vegetación actual.

Para llevar a cabo la fase de cartografía, que es en la que se centra este trabajo, se partió de la fotointerpretación de la zona, utilizando como base las ortofotos digitales correspondientes al S.I.G. Oleícola Español *(M.A.P.A, 1997*). Sobre ellas, empleando el programa ArcView GIS 3.2, se delimitaron las unidades que correspondían a cultivos abandonados, ya que presentan una forma y color característicos en la época del año en la que se efectuó el vuelo, octubre.

Posteriormente se realizó el trabajo de campo, con el fin de identificar las distintas comunidades vegetales que colonizan las tierras agrícolas abandonadas en este territorio, y analizar los parámetros que condicionan que aparezcan unas u otras. Para la determinación de las comunidades se empleó la metodología fitosociológica de *Braun-Blanquet (1979),* y para su

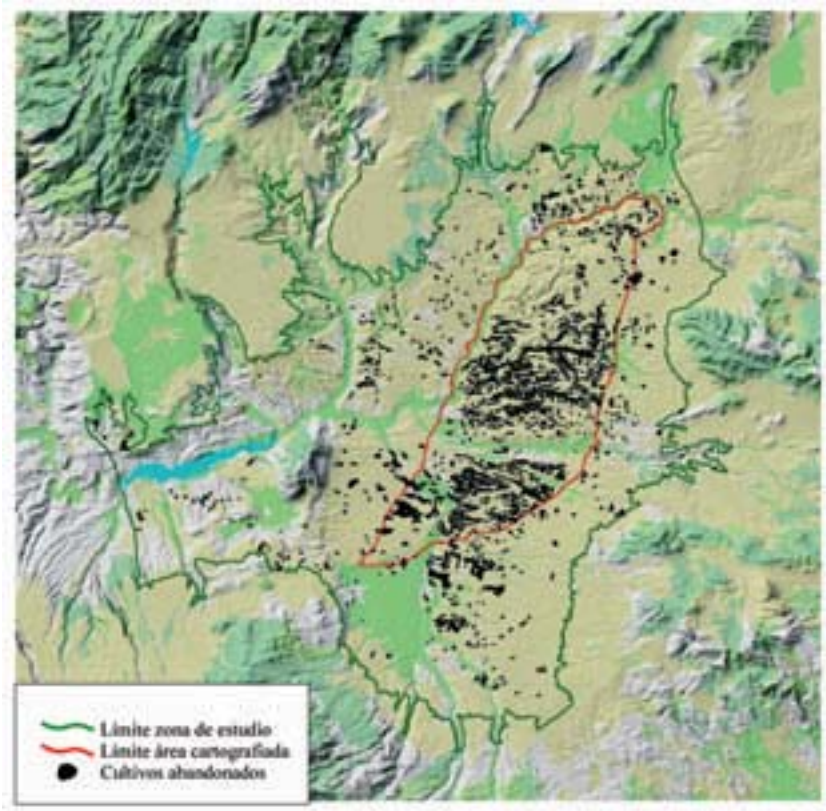


Figura 1. Zona de estudio, área cartografiada y distribución de los cultivos abandonados.

clasificación, nomenclatura y descripción se siguió a *Rivas-Martínez et al. (2002), Alcaraz (1984), Peinado et al. (1986), Salazar (1996) y Cano et al. (1994, 1999).* Nos hemos centrado en las asociaciones dominadas por especies leñosas por ser las que proporcionan mayor cobertura y, por tanto, mejores posibilidades de protección al suelo, y por la clara tendencia que muestran a sustituir a las especies terofíticas, *(Navarro, 2001; Debussche et al., 1996; Sánchez López, 1995)*, y constituir formaciones más o menos estables susceptibles de ser gestionadas, como se ha planteado para otras zonas semiáridas de clima Mediterráneo (*Bonet,* 2004 *y Leishman y Westoby*, 1992).

Con el objetivo de realizar una cartografía exhaustiva, dentro del área de estudio se delimitó una amplia zona en la que los cultivos abandonados eran más abundantes, como puede apreciarse en la imagen 1, y en ella se realizó la comprobación en campo de la comunidad o comunidades que se presentaban en cada una de las unidades.

Para la digitalización de los datos se empleó de nuevo el programa ArcView GIS 3.2. En la tabla del tema creado para cartografiar los cultivos abandonados se añadieron dos nuevos campos: uno, en el que se indicó la comunidad principal que ha invadido el antiguo cultivo, y otro, en el que se señaló si existía otra comunidad en la parcela acompañando a la dominante. El programa permite calcular el área y el perímetro de cada unidad cartografiada, por lo que se incluyeron también dos campos que contienen esta información. Como ya se ha indicado, ArcView permite analizar los resultados para obtener datos cuantitativos espaciales de las tierras de labor hoy abandonadas, clasificaciones de los antiguos cultivos en diversos tipos (en función de la comunidad vegetal dominante), además de mapas en los que se representan los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio del medio físico

Puesto que el estudio del medio físico se ha realizado de forma detallada en este trabajo sólo pueden incluirse algunos de los resultados más significativos obtenidos. En cuanto al relieve cabe destacar que buena parte de la zona de estudio forma parte de un altiplano en torno a los 900 m.s.n.m., que va descendiendo desde el extremo nororiental hacia el interior de la provincia. En su extremo central y occidental los ríos han excavado una profunda depresión en la que se halla inmersa la mayor parte del área estudiada, situada sobre los 700-800 m.s.n.m. y en la que se encuentran las cotas más bajas del territorio, (600 m.s.n.m.). En el "Cerro Jabalcón" se alcanza la máxima altura del territorio, 1492 m. Destacan en el paisaje fuertes abarrancamientos, cárcavas y bad-lands, como consecuencia de los fuertes fenómenos erosivos existentes.

Desde el punto de vista geológico se trata de una depresión constituida por materiales Neógeno-Cuaternarios, en la que la unidad tectosedimentaria principal es la que comprende un periodo que va del Villaniense al Pleistoceno inferior, está constituida por lutitas, carbonatos y yesos de origen lacustre. Las calizas y yesos se intercalan a su vez entre finos lechos de lutitas y margas *(García Martín y Martín, 2000).*

Los suelos más abundantes en el territorio son los regosoles calcáricos y xerosoles cálcicos. Los fluvisoles calcáricos también aparecen frecuentemente, asociados a los cursos de agua. Cabe resaltar además la presencia de xerosoles gípsicos y solonchack órticos *(Pérez Pujalte et al., 1980).*

En cuanto al estudio hidrogeológico (*Beas*, *1990)* puede indicarse que la red hidrográfica de este territorio es de organización centrípeta y constituye básicamente la cuenca media del Guadiana Menor. Por la zona discurren una serie de cursos de agua de caudal permanente, que en ocasiones pueden presentar importantes estiajes, en los que desembocan numerosos cauces de caudal temporal o esporádico (ramblas y cañadas). Los acuíferos más significativos de la depresión son detríticos.

La Hoya de Baza posee un clima Mediterráneo Continental, la escasez pluviométrica estival le da el matiz Mediterráneo, las precipitaciones no suelen superar los 300-350 mm, mientras que lo que determina el carácter continental es la extensa amplitud térmica reinante en el territorio, ya que existen fuertes oscilaciones de temperatura tanto diarias como anuales.

Estudio de la vegetación

Biogeográficamente el territorio se ubica en el distrito Guadiciano-Bastetano (sector Guadiciano-Bacense, provincia Bética) (*Rivas-Martínez et al.* 1997). En cuanto a la bioclimatología, el termotipo presente es el mesomediterráneo y el ombrotipo reinante es el semiárido (*Valle et al., en prensa).*

La zona de estudio se sitúa bajo dominio de la serie mesomediterránea semiárida aragonesa, murciano-manchega, murciano-almeriense, setabense y bética basófila de la coscoja (*Quercus coccifera*): *Rhamno lycioidis-Querceto cocciferae* S. faciación bética con *Ephedra fragilis,* cuyo contacto con la serie *Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae S*. marca el límite de la zona de estudio (*Valle et al*., 2003).

Los restos de vegetación natural mejor representados en el territorio son los espartales. Son dos las comunidades presididas por el esparto (*Stipa tenacissima*) que aparecen en la zona de estudio, por un lado los que se desarrollan sobre calizas duras y margocalizas que pertenecen a la asociación *Thymo gracile-Stipetum tenacissimae*; por otra parte los que evolucionan en margas ricas en yesos correspondientes a la asociación *Helianthemo squamati-Stipetum tenacissimae*, que son los predominantes en la zona estudiada, y que suelen aparecer formando mosaico con los romerales gipsícolas de *Jurineo pinnatae-Gypsophiletum struthii* (*García-Fuentes et al.,* 2002). Acompañando a los espartales del *Thymo gracile-Stipetum tenacissimae* puede encontrarse el matorral fruticoso de *Paronychio-Astragaletum tumidi* (*Navarro et al.* 2001a). Los retamales (*Genisto speciosae-Retametum sphaerocarpae*) pueden desarrollarse junto a cualquiera de estas comunidades. Los pinares-coscojares (*Rhamno lycioidis-Quercetum cocciferae*), que constituyen la comunidad clímax del territorio, se hallan muy degradados, y actualmente sólo se encuentran reductos de la formación en enclaves muy puntuales de la depresión, y elementos aislados de los que integran esta comunidad de forma dispersa por el resto del territorio (*Navarro et al.* 2001b).

La vegetación desarrollada sobre sustratos fuertemente salinos, apenas soporta una vegetación arbustiva, tímidamente representada por tarayales hiperhalófilos. Existen numerosas comunidades permanentes que se encuentran concatenadas en función del grado de salinidad del suelo. De estas la más abundante es la de los llamados sisallares, que se desarrollan en zonas que en verano presentan una gruesa costra de eflorescencias salinas, se trata de unos matorrales halófilos de la asociación *Cistancho phelypaeae-Sarcocornietum fruticosi*. Rodeando los sisallares se pueden encontrar matorrales-albardinales halófilos de la subasociación endémica del guadiciano-bastetano *Limonio-Gypsophiletum tomentosae* subas*. limonietosum maji,* y los albardinares del *Dactylo hispanicae-Lygeetum spartii*, hacia el contacto con los espartales.

Son también muy frecuentes en el territorio las comunidades nitrófilas invasoras de áreas degradadas y cultivos abandonados, a las que se dedica la siguiente sección.

Estudio de la vegetación de cultivos abandonados

Como resultado del estudio fitosociológico de la vegetación invasora de cultivos abandonados en la Hoya de Baza se han identificado 7 asociaciones de caméfitos leñosos y gramíneas vivaces diferentes, que se enumeran y describen brevemente a continuación. La descripción incluye las especies que caracterizan cada asociación y las que suelen aparecer como acompañantes, además de los parámetros ambientales bajo los que se desarrollan según la bibliografía consultada *Alcaraz (*1984), *Cano et al.* (1994, 1999)*, Navarro (2001), Peinado et al. (*1986), *Rivas et al. (2002), Salazar (1996), Valdés et al. (*1993) y *Valle el al*. (1987):

Artemisio herbae-albae-Frankenietum thymifoliae. La especie dominante de esta formación es *Frankenia thymifolia*, aunque también la caracterizan *Artemisia herba-alba, Suaeda vera* y *Atriplex glauca*, además suele ir acompañada de otras como *Gypsophila struthium, Suaeda pruinosa* y *Sedum sediforme*. Coloniza tierras de cultivo abandonadas de suelos yesíferos, enriquecidos en sales y frecuentemente pastoreados.

Salsolo vermiculatae-Artemisietum herbae-albae. Las especies que mayor cobertura ofrecen son *Salsola vermiculata* y *Artemisia herba-alba*, a las que acompañan otras como *Thymus zygis, Teucrium capitatum* subsp. *gracillimun* o *Plantago albicans.* Esta asociación se instala en antiguos cultivos situados sobre suelos con cierto acúmulo de sales y nitrógeno.

Atriplici glaucae-Suaedetum verae. La principal especie de la comunidad es *Suaeda vera,* siendo además características *Atriplex glauca, Suaeda pruinosa* y *Artemisia herba-alba*. Suelen presentarse como especies compañeras *Lygeum spartum, Frankenia thymifolia,* así como diversas especies del género *Limonium.* Las antiguas tierras de labor que invade suelen emplazarse en suelos arcillosos salinos, con cierto grado de humedad y nitrificados.

Atriplicetum glauco-halimi. En esta asociación destaca *Atriplex halimus* por su abundancia y dimensiones, pero también es propia *Atriplex glauca*. Estas especies suelen ir acompañadas de *Suaeda vera, Artemisia herba-alba, Lygeum spartum* y *Limonium* sp., entre otras. Los suelos que invade esta comunidad se caracterizan por ser alterados, arcillosos, removidos, algo salinos y con ligera hidromorfía temporal.

Hammado articulatae-Atriplicetum glaucae. Domina esta asociación *Hammada articulata*, que la caracteriza junto a *Atriplex glauca* y *Artemisia herba-alba*. Entre las compañeras

pueden citarse *Lygeum spartum* o *Dactylis glomerata* subsp. *hispanica.* Se desarrolla en suelos arcillosos no muy alterados y sin hidromorfía.

Andryalo ragusinae-Artemisietum barrelieri. *Artemisia barrelieri, Andryala ragusina* o *Helichrysum italicum* subsp. *serotinum,* pueden señalarse como principales especies características de esta comunidad, a las que acompañan otras como *Retama sphaerocarpa, Eryngium campestre o Teucrium capitatum* subsp. *gracillimum*. Se suelen presentar sobre suelos no salinos y secos en los que se abandonó el cultivo.

Cistancho phelypaeae-Sarcocornietum fruticosi. Las especies características son *Sarcocornia fruticosa, Arthrocnemum macrostachyum* y las acompañantes más destacadas *Suaeda vera, Suaeda spicata, Limonium majus* y *Limonium minus*. Evoluciona en cubetas endorreicas periódicamente inundadas por lluvia durante el invierno y primavera, que se desecan en el verano, durante el que aparecen llamativas eflorescencias salinas blancas. Aunque falte agua superficial, el nivel freático de estos saladares es bastante alto, permaneciendo húmedos prácticamente todo el año. A pesar de que esta comunidad tiene carácter estable en la mayoría de las zonas en las que aparece y pese a las limitaciones edáficas que presentan para el cultivo, se ha identificado en numerosas áreas antes ocupadas por cultivos.

Cartografía

En el área de estudio, cuya superficie es de 103.681,49 ha, se han identificado 2026 unidades correspondientes a cultivos abandonados, que ocupan una extensión de 3767,01 ha. La zona seleccionada para realizar la cartografía exhaustiva, aunque sólo representa un 23,14% (23991,79 ha.,) del área total, contiene el 64,81% (1313) del total de unidades y el 60,00 % de la superficie abandonada (2248,15 ha.,).

En el cuadro 1 se indica el número de unidades en las que se presenta cada una de las comunidades, tanto cuando aparecen como asociación dominante como acompañante, así como el área que ocupan en cada caso. También se incluyen los datos referidos a tierras antes abandonadas y recientemente puestas en cultivo o roturadas, así como en las que está comenzando la colonización de la vegetación, por lo que, en este caso, aún no hay suficientes datos como para saber de qué comunidad concreta se trata. El número que aparece a la izquierda corresponde a los de la leyenda de los gráficos.

La figura 2 representa la proporción de cada tipo de ocupación actual respecto al total de antiguos cultivos evaluados, referentes tanto al total del número de unidades identificadas como al de la superficie ocupada por los diferentes tipos. Se han elaborado a partir de los datos de comunidad dominante del cuadro 1 para las asociaciones, excluyendo las unidades sin evaluar.

La mayor parte de los cultivos abandonados cartografiados en el área seleccionada, un 42% de las unidades (512 de las 1313 identificadas) que ocupan una superficie de 1031,89 ha (el 48% de la superficie total abandonada), corresponden al grupo de las tierras que se han puesto en cultivo o se han roturado recientemente.

Aunque algunas de estas unidades se han vuelto a cultivar, la mayoría han sido parcialmente roturadas, más que con el objetivo de reanudar la actividad agraria, con el de mantener la vocación agrícola y evitar que el uso del suelo cambie de agrícola a forestal. En estos casos al

llegar a las parcelas se observan tanto los surcos de la roturación como los restos de vegetación perenne arrancados total o parcialmente. Este tipo de práctica, muy frecuente en el territorio, supone un importante limitante para la evolución de la vegetación hacia etapas más avanzadas en la dinámica, por otro lado incrementan los riesgos de erosión y de pérdida de suelo.

De las asociaciones de vegetación presentes en antiguos cultivos la más frecuente es *Salsolo vermiculatae-Artemisietum herbae-albae,* ya que de las 1313 unidades identificadas se presenta en 484, pudiendo destacarse además que en 377 ocasiones (el 31% del total) constituye la comunidad dominante. El área en la que aparece esta formación es de 557,90 ha, en 385,02 de las cuales lo hace de forma dominante, que representan un 18 % del área total. Este dato, en relación al del número de unidades indica que las parcelas sobre las que se desarrolla no son de grandes dimensiones.

Las siguientes en número de unidades son *Atriplici glaucae-Suaedetum verae* y *Hammado articulatae-Atriplicetum glaucae,* con 138 y 135 unidades respectivamente, ocupando un área superior la primera con 251,60 ha, 77,23 ha más que el área invadida por *Hammado articulatae-Atriplicetum glaucae.* En este caso hay que destacar que la asociación caracterizada por *Hammada articulata* se instala como formación principal en 148,25 ha distribuidas en 114 unidades (9%), mientras que la comunidad presidida por *Suaeda vera* lo hace en 79 unidades (6%), que se extienden por 140,53 ha.

Cabe resaltar el área en la que la as. *Cistancho phelypaeae-Sarcocornietum fruticosae* constituye la formación dominante, que con 201,54 ha supone el 10% del total, aunque se trata únicamente de un 3% de las unidades (32), lo cual refleja los amplios espacios continuos en los que se localizan los sisallares.

En 38 unidades y en un área de 64,86 ha, se ha identificado la comunidad de *Artemisio herbae-albae-Frankenietum thymifoliae*, aunque únicamente en 10 parcelas aparecía como asociación dominante; en las restantes 28, a las que corresponden 52,71 ha, actúa como acompañante.

Las asociaciones *Andryalo ragusinae-Artemisietum barrelieri* y *Atriplicetum glauco-halimi* son muy puntuales en la zona seleccionada. La primera solamente se ha identificado en 2 unidades que no representan más de 2,68 ha y la segunda en 32,20 ha, aunque como comunidad dominante se presenta tan sólo en 6 unidades, que se extienden en 3,40 ha, apareciendo en las restantes 28,79 ha acompañando a otras formaciones colonizadoras.

La escasa representación de *Atriplicetum glauco-halimi* se debe a que se suele establecer en áreas muy puntuales, de escasas dimensiones, por lo que en muchas ocasiones no son cartografiables. Por otro lado esta comunidad vegetal muestra preferencia por invadir otras zonas alteradas más removidas, como las escombreras, en las que además existen determinados umbrales de humedad y salinidad.

La asociación caracterizada por *Andryala ragusina* y *Artemisia barrilieri* es muy escasa en el área seleccionada, sin embargo se ha podido observar que es la comunidad invasora de cultivos abandonados más abundante hacia el límite de la zona total de estudio, en la que los sustratos margosos no se hayan enriquecidos en yesos. El área en la que se ha comprobado la situación de los antiguos cultivos es rica en yesos, material que favorece la instalación de otras comunidades en lugar de ésta.

Cuadro 1. Número de unidades identificadas y superficie que ocupan las comunidades que colonizan las tierras de cultivo abandonadas muestreadas, y datos referentes a tierras repobladas, recientemente abandonadas y puestas de nuevo en cultivo o periódicamente roturadas. SvAh- *Salsolo vermiculatae-Artemisietum herbae-albae;* AgSv- *Atriplici glaucae-Suaedetum vera;,* Agh- *Atriplicetum glauco-halimi,* HaAg- *Hammado articulatae-Atriplicetum glaucae,* ArAb- *Andryalo ragusinae-Artemisietum barrelieri;* CpSf-*Cistancho phelypaeae-Sarcocornietum fruticosae;* DhLs- *Dactylo hispanicae- Lygeetum sparti.*

		Número Unidades			Área (ha)		
		Dominante	*Acompañante*	*Total*	*Dominante*	*Acompañante*	*Total*
2	**SvAh**	377	107	484	385,0164	172,8877	557,9041
3	**AgSv**	79	59	138	140,5275	111,0746	251,6021
4	**Agh**	6	8	14	3,404	28,7932	32,1972
5	**HaAg**	114	21	135	148,2523	26,1229	174,3752
6	**AhFt**	10	28	38	12,1517	52,707	64,8587
7	**ArAb**	2	0	3	2,678	0	3,9156
8	**CpAm**	32	12	44	201,5399	22,1828	223,7227
10	**Repoblación**	58				143,4996	
9	**Abandonado recientemente**	31				50,3878	
1	**En cultivo o roturado**	512				1031,8892	
11	**Sin evaluar**	92				128,8073	

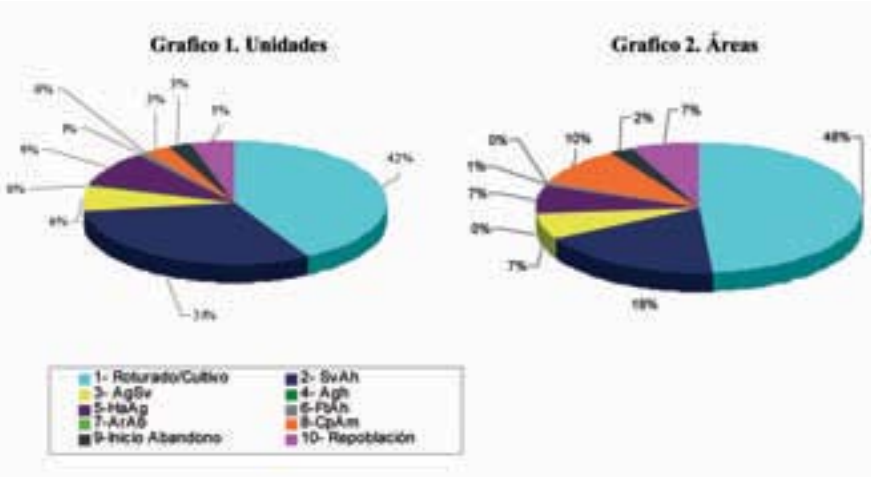


Figura 2. Proporción de cada tipo de ocupación actual respecto al total de antiguos cultivos evaluados, referentes tanto al total del número de unidades identificadas (Gráfico 1), como al de la superficie ocupada por los diferentes tipos (Gráfico 2).

Por otro lado es significativa la superficie de tierras agrícolas abandonadas que se han acogido a las subvencionadas por la P.A.C. para la forestación de tierras agrícolas, 143,50 ha distribuidas en 58 parcelas. La principal especie empleada en las plantaciones ha sido el pino carrasco (*Pinus halepensis*), que se ha introducido de forma prácticamente monoespecífica, en algunas ocasiones se ha acompañado de otras especies como los tarajes. Estas repoblaciones no suelen encontrarse en muy buen estado, algunas de ellas se realizaron antes de la toma de las fotos aéreas (1997) y los pies de árboles poseen aún una escasa talla, apareciendo secos en numerosas coasiones. Entre los surcos de subsolado realizados para la repoblación se distinguen las comunidades colonizadoras de cultivos previas, que se han incluido en el campo correspondiente a comunidades acompañantes. Aunque la mayoría de las repoblaciones se han realizado sobre comunidades de *Salsolo-Artemisietum herbae-albae*, en numerosas ocasiones las repoblaciones se han instalado sobre sisallares, por lo que la Unión Europea ha subvencionado de forma indirecta la destrucción de Hábitas protegidos por ella misma.

En 31 unidades que ocupan un área de 50,39 ha, no se ha podido identificar la asociación que ha invadido el antiguo cultivo, ya que el abandono es reciente y la vegetación es aún insuficiente.

El número de unidades que dentro del área seleccionada permanecen sin evaluar es de 92, hallándose actualmente en estudio.

Otro tipo de análisis y consultas realizadas con ArcView GIS 3.2 permiten obtener datos correspondientes a las relaciones entre comunidades, es decir, qué asociaciones aparecen como acompañantes para cada tipo de comunidad dominante. En el cuadro 2 se muestra la distribución de las asociaciones acompañantes, según el número de unidades. Un cuadro similar podría incluirse en este trabajo con los datos referidos al área que ocupan esas unidades, aunque dada la proporcionalidad respecto a dicho cuadro no se ha considerado necesario.

De los resultados que se muestran en el cuadro 2 puede destacarse que de las 107 ocasiones en las que la asociación *Salsolo vermiculatae-Artemisietum herbae-albae* aparece como acompañante de otras comunidades, con las que convive más frecuentemente es con *Atriplici*

Cuadro 2. Distribución de las comunidades acompañantes, según el número de unidades.

		Comunidad Acompañante						
		SvAh	**AgSv**	**Agh**	**HaAg**	**AhFt**	**ArAb**	**CpAm**
Comunidad Dominante	**SvAh**	0	**31**	1	**21**	**17**	0	0
	AgSv	**29**	0	6	0	**10**	0	**9**
	Agh	0	1	0	0	0	0	0
	HaAg	**35**	**1**	0	0	1	0	0
	AhFt	**5**	**4**	0	0	0	0	0
	ArAb	0	0	0	0	0	0	0
	CpAm	0	**14**	0	0	**1**	0	0
	Repoblación	**38**	**8**	**1**	0	0	0	**3**

glaucae-Suaedetum verae y *Hammado articulatae-Atriplicetum glaucae*. Por otro lado cabe destacar el amplio número de parcelas en las se presenta bajo una repoblación, que es de 38 y que ocupan una superficie de 72.29 ha (más de la mitad del área total ocupada por repoblaciones). Además son estas comunidades las que suelen acompañar a *Salsolo-Artemisietum herbae-albae* cuando ésta aparece como comunidad dominante, también es destacable el número de parcelas en las que evoluciona junto a *Artemisio herbae-albae-Frankenietum thymifoliae*.

Otras formaciones que muestran tendencia a desarrollarse en las mismas parcelas son *Atriplici glaucae-Suaedetum verae* y *Cistancho phelypaeae-Sarcocornietum fruticosae*, debido a que ambas se presentan en suelos salinos y húmedos, aunque la primera requiere menor salinidad y humedad que la segunda.

De la comunidad dominada por *Suaeda vera*, cabe destacar que coexiste en 14 unidades con *Artemisio-Frankenietum thymifoliae* y en 7 con la asociación encabezada por *Atriplex halimus*.

CONCLUSIONES

Un 48% de la superficie total abandonada, identificada en la ortofotografía aérea de 1997, se ha vuelto a poner en cultivo o ha sido roturada con el objetivo de no perder la vocación agrícola del suelo, según las comprobaciones realizadas en campo en el periodo 2003-2004.

De las asociaciones de vegetación presentes en antiguos cultivos del área, en la que se ha realizado la cartografía exhaustiva, la más frecuente es *Salsolo vermiculatae-Artemisietum herbae-albae,* y las más puntuales son *Andryalo ragusinae-Artemisietum barrelieri* y *Atriplicetum glauco-halimi*.

La comunidad dominada por *Artemisia herba-alba* y *Salsola vermiculata* es la que aparece en mayor número de unidades y la que mayor superficie ocupa, debido a que se desarrolla sobre suelos secos que son los más frecuentes en el territorio. Además, aunque no requiere salinidad para su desarrollo, tolera suelos con algún contenido en sales, por lo que soporta cierta variabilidad edáfica, como indica el hecho de que puede convivir con diversos tipos de formaciones.

La escasez de *Andryalo-Artemisietum barrelieri* se debe a que en la zona cartografiada no son frecuentes las condiciones edáficas que requiere, que sí lo son hacia el exterior del territorio, donde constituye la comunidad invasora de cultivos abandonados dominante.

Atriplicetum glauco-halimi más que en cultivos abandonados suele instalarse sobre escombreras que cumplen determinadas características de salinidad y humedad, estas zonas son muy puntuales en el territorio y suelen ocupar unidades de reducida superficie, por lo que no suelen ser cartografiables.

La as. *Cistancho phelypaeae-Sarcocornietum fruticosae* es la que se establece en las unidades más amplias, ya que con el 3% de las unidades ocupa el 10% de la superficie total abandonada en el área evaluada. Respecto a esta asociación cabe destacar que se trata de una de las comunidades protegidas por la Directiva 92/43/CEE del Consejo, y posteriores modificaciones, relativa a la Conservación de los Hábitats Naturales y de la Fauna y Flora Silvestres.

El estudio y la cartografía de cultivos abandonados apoyados en el uso de Sistemas de Información Geográfica, que se expone en este trabajo, permite clasificar y cuantificar las antiguas tierras de labor, por lo que los resultados constituyen una útil herramienta para la planificación de su gestión en la zona de estudio. De esta forma podría evitarse, por ejemplo, poner en cultivo o repoblar áreas de suelos salinos que, además de la escasa productividad que pueden aportar, poseen comunidades y especies de flora legisladas.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a la Asociación Grupo de Desarrollo Rural Altiplano de Granada por la ayuda prestada para la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

Alcaraz, F. J. (1984): *Flora y vegetación del NE de Murcia*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Murcia. Murcia. 406 p.

Beas, J. (coord..), (1990): *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Granada*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Exma. Diputación Provincial de Granada.

Berry, J.K. (1990): "Maps as data: Fundamental concepts and applications in GIS technology for resource management". En *Internal Report, Natural resources*. Colorado University, Fort Collins, Colorado, USA, 50 p.

Bonet, A. (2004): "Secondary succession of semi-arid Mediterranean old-fields in south-eastern Spain: insights for coservation and restoration of degraded lands". *Journal of Arid Environments,* Vol. 56 (2004), pp. 213-233.

Braun-Blanquet, J.(1979). *Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales*. Ed. Blume. Barcelona. 820 p.

Cano, E.; García Fuentes, A.; Torres, J.A.; Nieto, J. & Salazar, C. (1994): "Vegetación de la cuenca del Guadiana Menor (Subsector Guadiciano-Baztetano Andalucía-España)". *Naturalia Baetica*, vol. 6, pp. 7-112.

Cano, E.; Torres, J.A.; García, A.; Salazar, C.; Melendo, M.; Ruiz, L. y Nieto, J. (1999): *La vegetación de la provincia de Jaén: Campiña, Depresión del Guadiana Menor y Sierras Subbéticas.* Universidad de Jaén. 160 p.

Cañadas, E.; Valle, F. y Navarro, F.B. (2003): "Alternativa ganadera en cultivos abandonados del Distrito Guadiciano-Baztetano (SE, España)". En ROBLES, A.B. et al. *Pastos, Desarrollo y Conservación. Consejería de Agricultura y Pesca*. pp. 565-570

Debussche, M.; Escarré, J.; Lepart, J.; Houssard, C.; y Lavorel, S.. (1996): "Changes in Mediterranean plant succession: old-fields revisited". *Journal of Vegetation Science*, Vol. 7, pp.519-526.

García Aguilar, J.M y Martín, J.M. (2000): "Late Neogene to recente continental history and evolution of the Guadix-Baza basin (SE Spain)". *Revista de la Sociedad Geológica de España*, Vol. 13 (1), pp. 65-77.

García-Fuentes, A.; Salazar, C.; Torres, J.A.; Melendo, M.; Nieto,J.; Marchal, F.M. y Cano, E. (2002): Características edáficas de los pastizales de esparto (Stipa tenacissima L.) en los territorios seco-semiáridos béticos (S. España). *Acta Granatense*, Vol. 1 (1-2), pp. 11-29.

Leishman, M.r. y Westoby, M. (1992): "Classifying plants into groups on the basis of associations of individual traits - evidence from Australian semi-arid woodlands". *Journal of Ecology,* Vol.80, pp.417-424.

M.A.P.A.(1997): *Ortofotos digitales. Sig Oleícola Español*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

Martínez Raya, A. (1996): "Evaluación y manejo de suelos salinos y sódicos". En Aguilar et. al. (eds), *Evaluación y Manejo de suelos*. Junta de Andalucía. Universidad de Granada. SECS. Granada. pp. 195-208.

Morad, M.; Triviño Pérez, A.(2001): "Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación". *Boletín de la A.G.E.*,Vol. 31, p. 23 - 46

Navarro, F. B.(2001): *Estudio de la evolución de la vegetación bajo distintos tratamientos del suelo en la forestación de tierras agrarias*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.507 pp.

Navarro, F.B.; Jiménez, M.N.; Lorite, J. y Valle, F. (2001a): "Caracterización biogeográfica de la Provincia Castellano-Maestrazgo-Manchega en Andalucía",*Lazaroa*,Vol. 22, pp.109-120.

Navarro, F.B.; Jiménez, M.N.;Valle, F. y Salazar, C. (2001b): "Estudio de la vegetación potencial de la Depresión de Guadix-Baza mediante análisis multivariante". *Actas del III Congreso Forestal Español*, Vol. 1,194-200. Granada.

Peinado, M.; Martínez-Parras, J.M. y Bartolomé, C. (1986): "Revisión de la Clase Pegano-Salsoletea en España". Multicopias repartidas por intercambio en las *"VI Jornadas de Fitosociología"*. Barcelona.

Pérez Pujalte, A..(1980): *Mapa de suelos y vegetación de la provincia de Granada*. Estación Experimental del Zaidín. Granada.

Rivas Martínez, S. (1996a): "Clasificación bioclimática de la Tierra". *Folia Botánica Matritensis* Vol. 16, pp. 1-20.

Rivas-Martínez, S. Asensi, A., Díez, B., Molero Mesa, J. y Valle, F. (1997): Biogeographical synthesis of Andalusia (southern Spain). *Journal of Biogeography*, Vol. 24, pp. 915-928.

Rivas-Martínez, S.; Díaz, T.E.; Fernández-González, F.; Izco, J.; Loidi., J.; Loussa, M. y Penas, A. (2002): "Vascular plant communities of Spain and Portugal". *Itinera Geobot.*, Vol. 15 (1), pp.5-432.

Salazar, C. (1996): *Estudio Fitosociológico de la vegetación riparia andaluza (Provincia Bética): Cuenca del Guadiana Menor*. Tesis doctoral. Universidad de Jaén. p.723.

Sánchez López, M. D. (1995): *La reconstrucción natural de la vegetación leñosa en zonas agrícolas abandonadas*. Instituto de Estudios Albacetenses, Diputación de Albacete. 207 pp.

Valdés Franzi, A.; González Beserán, J.L. y Molina Cantos, R.. (1993): *Flora y vegetación de los saladares de Cordobilla y Agramon (SE de Albacete)*. Instituto de Estudios Albacetenses de la Excma. Diputación de Albacete. Albacete.

Valle, F. (ed.) (2003): *Mapa de Series de Vegetación de Andalucía*. Ed. Rueda. Madrid. 131 pp.

Valle, F.; Mota, J. F. y Gómez Mercado, F. (1987): Las comunidades del orden Helichryso-Santolinetalia Peinado y Martínez Parras 1984, en la provincia corológica Bética. *Acta Bot. Malacitana* Vol. 12, pp. 213-222.

Valle, F., Navarro, F.B. y Jiménez, M.N. (eds.) (inédito). *Datos para la gestión del medio natural: Bioclimatología y Biogeografía*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

Diseño y desarrollo de un SIG para la protección y recuperación del monte público del municipio de Níjar (Almería)

G. M. Manzano Agugliaro y F. Manzano Agugliaro

Departamento de Ingeniería Rural, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Almería, La Cañada de San Urbano, 04120 Almería.

RESUMEN

El Término Municipal de Níjar, provincia de Almería, comprende una superficie de 60.000 ha, de las cuales 3.000 pertenecen al denominado monte público. El monte público ha caído en desuso desde mediados del siglo XX, debido a que siendo fuente de recursos, éstos han sido modificados o sustituidos por otras fuentes. Estas razones han llevado al progresivo abandono del uso de estas parcelas y su anexión inapropiada a parcelas colindantes, influenciado por un constante incremento del valor de la tierra, así como de nuevos usos de la misma, como son los cotos de caza, la reforestación y, en mayor medida, la implantación de sistemas de producción bajo plástico. El presente trabajo pretende la protección y recuperación, mediante la actualización catastral de forma discreta, de las parcelas de monte público. La protección se lleva cabo mediante el deslinde de las parcelas con técnicas GPS, con lo que sus lindes quedarán perfectamente definidas. La recuperación se lleva a cabo mediante la comparación de lindes entre la cartografía catastral de rústica del término municipal y el deslinde realizado con GPS. Para realizar este trabajo se ha diseñado y desarrollado una aplicación SIG sobre ArcView, destinada a realizar la comparación de parcelas, proporcionando la superficie anexionada, así como las parcelas invasoras y los datos procedentes de la base de datos catastral, de los propietarios de las mismas. Además, la aplicación desarrollada proporciona diferentes herramientas para realizar consultas de superficies y datos de propietarios. Para esto, se han tenido que integrar en el SIG, diferentes fuentes de información como son la cartografía catastral, los levantamientos con GPS, y la base de datos con la información catastral.

Palabras Clave: *SIG, Catastro de Rústica, GPS, Níjar (Almería).*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

Níjar's County, province of Almeria, includes a surface of 60.000 ha, of which 3.000 belong to the called public mount. The public mount has fallen down in disuse from middle of the 20th century, due to the fact that being a source of resources, these have been modified or replaced with other sources. These reasons have led to the progressive abandon of the use of these plots and its inappropriate annexation to adjacent plots, influenced by a constant increase of the land value, as well as new uses of the same one, since they are the estates of hunt, the reforestation and in its major measure, the system introduction of production under plastic. The present work claims the protection and recovery, by means of the property update of discreet form of the plots of public mount. The protection takes end to itself by means of the demarcation of the plots with GPS technologies, with what its boundaries will remain perfectly definite. The recovery is carried out by means of the comparison of boundaries between the cadastre cartography of rustic of county, and the demarcation realized with GPS. To realize this work one has designed and developed a SIG application on ArcView, destined to realize the comparison of plots, providing the annexed surface, as well as the invading plots and the information proceeding from the cadastre database, from the owners of the same ones. In addition, the developed application, its provides different tools to realize surface consultations and information of owners. For this, they have had to join the SIG, different sources of information like they are the cadastre cartography, the raisings with GPS, and the database with the cadastre information.

Key Words: *SIG, Cadaster of Rustic, GPS, Níjar (Almeria).*

INTRODUCCIÓN

El Término Municipal de Níjar (Almería) es uno de los más extensos de España, con una superficie de 60.114 ha. De esta superficie unas 3.000 ha pertenecen al denominado Monte Público o Comunal.

El Monte Público se define como el terreno baldío e inculto de aprovechamiento común. Estos terrenos eran aprovechados como pastizales para el ganado, zonas donde proveerse de combustible, alimentos o fibra textil. Estas necesidades han sido suplidas en la actualidad por otras fuentes o bien han sido sustituidas.

Estas razones han llevado al progresivo abandono del uso de estas parcelas y su anexión inapropiada a parcelas de propiedades colindantes, influenciado por un constante incremento del valor de la tierra, así como de nuevos usos de la misma, como son los cotos de caza, la reforestación y, en su mayor medida, la implantación de sistemas de producción bajo plástico.

En un análisis de las estadísticas catastrales desde el año 1990 hasta el 2001, se puede apreciar un claro aumento de la parcelación del término municipal, pasando en los primeros años 90 de 8.081 parcelas a 21.008 parcelas en el año 2001, indicando un claro fraccionamiento del territorio, con un aumento de propietarios de tierras (figura 6.1). Esta figura muestra a su vez cómo a lo largo de este mismo periodo el valor catastral la tierra aumenta enormemente, pasando de un valor de 1,2 millones de euros a 55 millones de euros en once años.

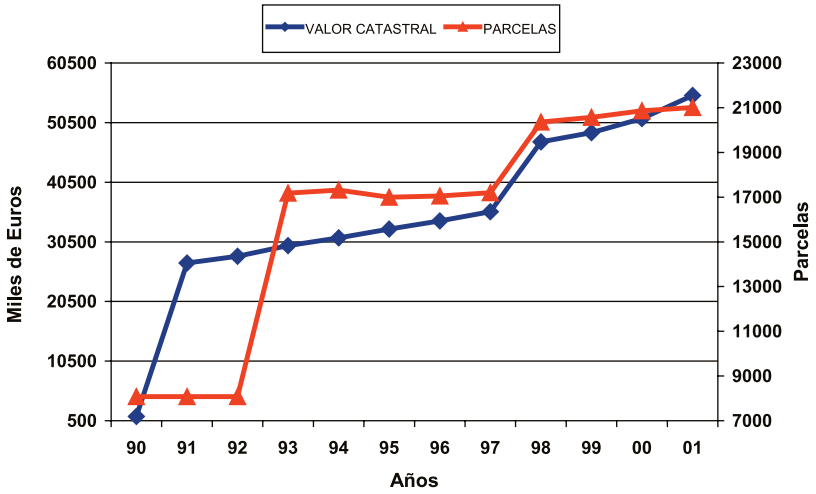


Figura 1. Evolución parcelaria y del valor catastral del T.M. de Níjar (Almería).

En este trabajo se ha desarrollado una metodología para la protección del monte público, entendiendo por protección la catalogación, inventariado y registro de estos terrenos.

El primer paso es el inventariado, mediante técnicas GPS, del terreno público registrado por el Ayuntamiento, poniendo de manifiesto el monte público que todavía queda en un intento de protección y comprobando a su vez cuánto del mismo ha sido apropiado por los vecinos colindantes a las parcelas correspondientes.

Las mayores ventajas del uso del sistema GPS radican en la rapidez de los levantamientos, menor necesidad de operarios, la obtención posterior de datos georreferenciados, capaces de integrarse en la cartografía base y, sobre todo, que es un método pie a tierra, que permite a un práctico conocedor del terreno ir marcando las lindes sobre el mismo. De hecho hay parcelas de monte que sólo pueden ser identificadas sobre el terreno, puesto que en una ortofoto no se aprecia ningún cambio ni de cultivo ni de linde alguna.

Normalmente una actualización catastral masiva, basada en ortofoto, tiene el inconveniente de partir de la cartografía catastral anterior, y, si no ha habido ningún cambio apreciable en la ortofoto, ni ninguna reclamación al efecto, la Administración se ve obligada a mantener la distribución parcelaria anterior, de modo que hay zonas de monte cuya propiedad nunca se aclararía en el catastro.

Tras el inventriado del monte público, si alguna parcela ha sido enajenada por alguien, se debe comprobar cuánto de este terreno ha sido utilizado agrícolamente durante los últimos treinta años, ya que de ser así se dará por perdido ese terreno para el Ayuntamiento.

Una forma de proteger el monte público es delimitarlo en coordenadas absolutas (UTM), de forma que se pueda comprobar en el futuro sobre la cartografía oficial, con nuevos levantamientos, si ha habido algún tipo de enajenación.

Por otro lado al cartografiar se realiza un inventariado de las parcelas que, siendo de propiedad municipal, no están incluidas en el inventario municipal, pero sí citadas en los bienes catastrales del Ayuntamiento. Actualmente existen parcelas de propiedad municipal que figuran en el catastro pero que no están en el inventario municipal y por tanto tampoco en el registro de la propiedad. Para incluir una parcela del Ayuntamiento de Níjar en el registro de la propiedad como bien público, es necesario que esté incluida primero en el inventario municipal y ello requiere realizar un levantamiento topográfico.

Para realizar una correcta gestión y generar una nueva cartografía catastral, se ha diseñado un SIG que tendrá como fuentes de datos los planos catastrales y los levantamientos topográficos, y como resultados la nueva cartografía y la información derivada.

LOCALIZACIÓN

El trabajo se ha realizado para su aplicación al monte público perteneciente al Término Municipal de Níjar en la provincia de Almería (figura 2). Este término municipal está dividido en 261 polígonos catastrales siendo éstos de gran heterogeneidad, tanto en su superficie (figura 3), como en el tipo de terrenos comprendidos en ellos (figura 4).

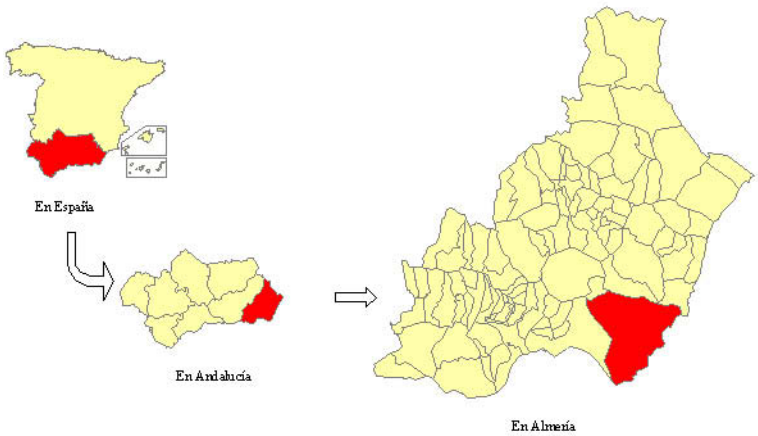


Figura 2. Situación del Término Municipal de Níjar.

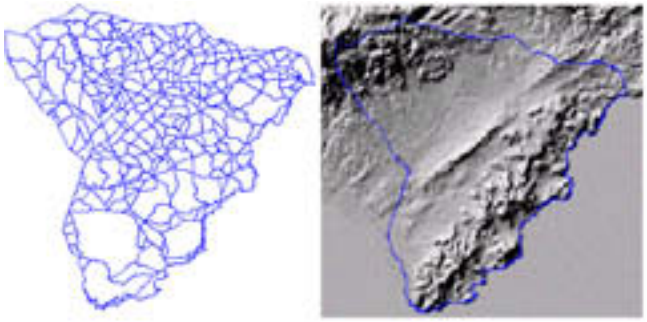


Figura 3. A la izquierda los Polígonos Catastrales y a la derecha un MDT del T.M. de Níjar.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Para realizar la protección y recuperación de algún tipo de superficie, como es el caso del monte público, primeramente se debe conocer la cuantía de esa superficie que se ha mantenido en el tiempo, es decir que aún existe y tiene los usos que *a priori* debería tener. En nuestro caso será pues necesario determinar con algún método topográfico o fotogramétrico, las áreas de monte público que aún perduran en el municipio.

Los métodos fotogramétricos se descartaron debido al carácter discreto de la distribución de parcelas de monte público, además del elevado coste para este tipo de trabajos. Se optó por realizar levantamientos topográficos con GPS, utilizando la técnica de posicionamiento con medida de código en área local, la cual proporciona precisiones teóricas de 0,4 metros (*Manzano et al.,*1996; *Manzano et al*., 2001; *Manzano et al.,* 2003), suficientes para nuestros fines, siempre y cuando el alejamiento base-móvil no supere los 100 km, como es nuestro caso (se tomaron 10 medidas por punto levantando). Además, los levantamientos realizados con GPS presentan la particularidad de ser realizados en coordenadas UTM, lo cual permite que se puedan superponer directamente a la cartografía oficial, es decir están georreferenciados. Otra ventaja que presenta esta opción es el reconocimiento directo sobre el terreno del límite entre monte y cultivo.

Figura 4. Levantamientos realizados con GPS.

Para la recuperación del área de monte público anexionado a parcelas colindantes es necesario conocer las lindes que presentaban estas parcelas antes de ser invadidas. Para ello se utilizó la cartografía catastral, proporcionada por el Ayuntamiento de Níjar. Esta cartografía se encuentra en formato CAD, estructurada en un fichero por cada polígono catastral, sumando 261 polígonos. Cada polígono se encuentra dividido en parcelas y subparcelas, perfectamente identificadas con sus números y letras. A su vez cada subparcela está delimitada por polilíneas abiertas en número variable.

Figura 5. Plano de la cartografía catastral de rústica.

Por último, también se utilizó la información de la base de datos catastral proporcionada por el Ayuntamiento de Níjar. Esta base de datos presenta formato MDB, de Microsoft Access y está formada por un total de 45.130 registros, correspondientes a cada una de las subparcelas catastrales del término municipal. Cada registro a su vez está formado por 10 campos (cuadro 1).

Cuadro 1. Estructura de la bases de datos.

Nombre del campo	Tipo de datos
poligonos	Numérico
parcela	Numérico
codcultivo	Texto
cultivo	Texto
superficie	Numérico
referencia	Numérico
paraje	Texto
dni	Texto
nombre	Texto
domicilio	Texto

METODOLOGÍA

La metodología general del proceso se esquematiza en la figura 6. Como paso previo se

debe seleccionar el software SIG con el que se va a trabajar, ya que la información se integrará en el mismo de forma diferente en cada caso.

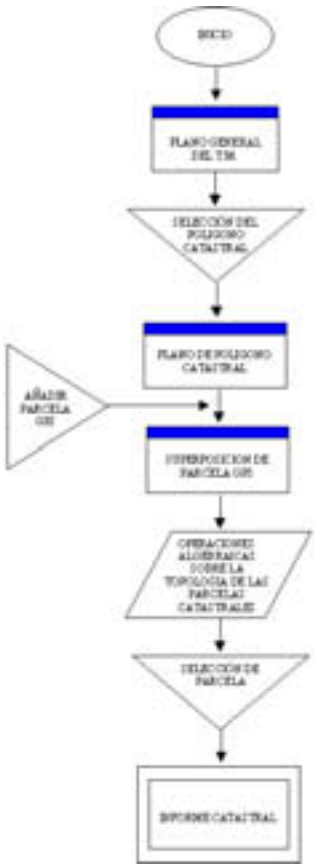


Figura 6. Metodología general del proceso.

Selección del software SIG

Existen en el mercado gran cantidad de software SIG que se pueden utilizar para realizar una misma labor. Sin embargo a la hora de seleccionar uno determinado se debe tener en cuenta una serie de funcionalidades que faciliten el trabajo. Además, el software empleado debe tener la capacidad de programar sus propias aplicaciones, de forma que el usuario final no tenga por qué ser un experto conocedor del SIG elegido.

Con estas dos pautas se optó por un SIG de amplia difusión como es ArcView 3.1 de la casa ESRI, el cual presenta la posibilidad de crear aplicaciones mediante *scripts* desarrollados en su propio lenguaje de programación: *Avenue*.

Integración de la información

Los tres tipos de información deben ser integrados en el SIG elegido. Para ello se deben seguir unos procesos, de los cuales dependerá en gran medida la bondad del trabajo realizado. Ante todo, y como preámbulo a esta integración será necesario conocer qué tipo de formato es el adecuado para trabajar. En nuestro caso ArcView 3.1 utiliza el formato SHP, el cual, aun no siendo topológico, presenta la ventaja de su velocidad de procesamiento. Además se debe optar por la opción de utilizar polígonos, en vez de líneas, ya que el análisis se realizará a partir de superficies.

El proceso más complejo, y que mayores esfuerzos requiere, es la transformación de la cartografía catastral de rústica, de formato CAD, a formato SHP. Para ello se siguió el esquema de la figura 7.

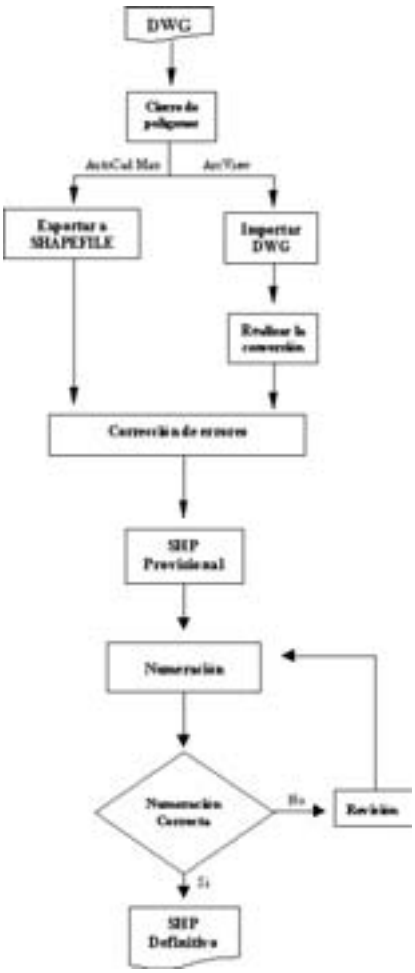


Figura 7. Transformación de formatos para su integración en el SIG.

La transformación a formato SHP mediante cualquiera de las formas posibles conlleva la generación de errores en la nueva cartografía. La corrección de estos errores es fundamental para la calidad del trabajo, siendo uno de los procesos más laboriosos de toda la metodología. Los principales errores que se generan son la creación de polígonos inexistentes, la multiplicidad de polígonos y la no intersección de polígonos incluidos en otros superiores.

La integración de los datos GPS se realiza de igual forma que en el caso de la cartografía catastral, pero con la salvedad de ser un proceso mucho más sencillo, al tratarse ya de recintos cerrados y de mucha menos complejidad. Sin embargo el paso previo, antes de la transformación de formato CAD a SHP, es la obtención de éste. Dicho proceso se resume en la figura 8, donde se aprecia cómo obtener el formato DXF para los levantamientos y cómo poder aplicar el proceso descrito anteriormente al catastro de rústica.

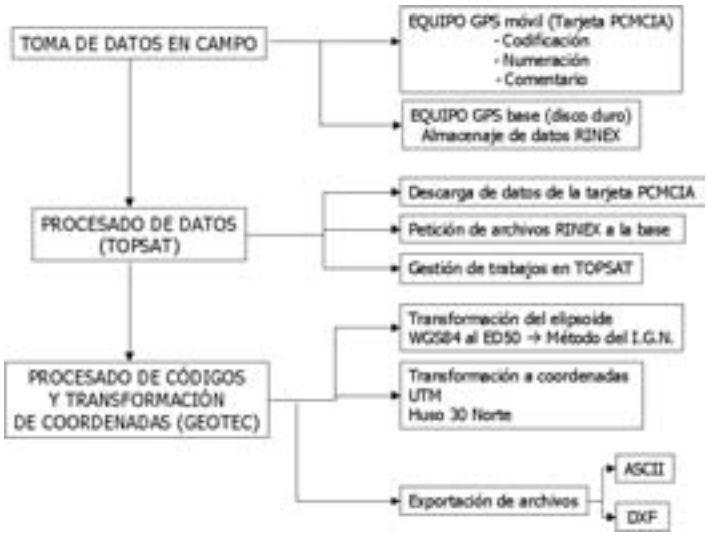


Figura 8. Proceso de obtención de las parcelas con GPS.

Por último, se debe realizar la transformación de la base de datos alfanumérica catastral de formato MDB a formato DBF (Access a dBase). Esta transformación se hace de forma rápida mediante las propias herramientas de exportación de Microsoft Access.

Desarrollo del SIG

El fundamento del trabajo a realizar por el SIG es la comparación entre las parcelas de monte público que existe en la cartografía catastral y esas mismas parcelas medidas y georreferenciadas con GPS.

Para realizar este trabajo se podría haber utilizado directamente las herramientas que presenta el ArcView, sin embargo no resultan de tan fácil manejo. Por ello se optó por el desarrollo de una aplicación bajo el entorno de programación que propone este mismo software. Dicha

aplicación deberá cumplir los criterios de diseño utilizados para desarrollar aplicaciones citados por *Aguilera* (2001): simplicidad, consistencia y amigabilidad de manejo. A su vez, estos criterios se cumplen mejor al desarrollar una aplicación donde el control del flujo de la misma esté limitado a determinadas opciones, impidiendo que un usuario no experto se pierda por el programa principal.

Así pues se ha desarrollado una aplicación basada en una base de datos, dos vistas y 36 *scripts* que controlan tanto el trabajo como el interface, permitiendo realizar las diferentes tareas de manera muy intuitiva.

La aplicación desarrollada se ha denominado CAT.MONTE PÚBLICO. A continuación se expondrán las principales funciones; iniciándose con una carátula de presentación (figura 9), la cual, tras unos segundos, da paso a la vista principal de la aplicación (figura 10). Ésta contiene el plano 1:300.000 del Término Municipal de Níjar, dividido en sus 261 polígonos catastrales, diferenciándose en magenta aquéllos que incluyen monte público (figura 10, anexo de figuras). Sobre este plano se puede seleccionar el polígono sobre el que se quiere trabajar, bien numéricamente, bien gráficamente. Se abre entonces la segunda vista con el polígono seleccionado, dividido en sus correspondientes subparcelas catastrales. El interface varía, apareciendo nuevos botones, y desapareciendo los que no son necesarios (figura 10).

Figura 9. Carátula de inicio de la aplicación CAT.MP.

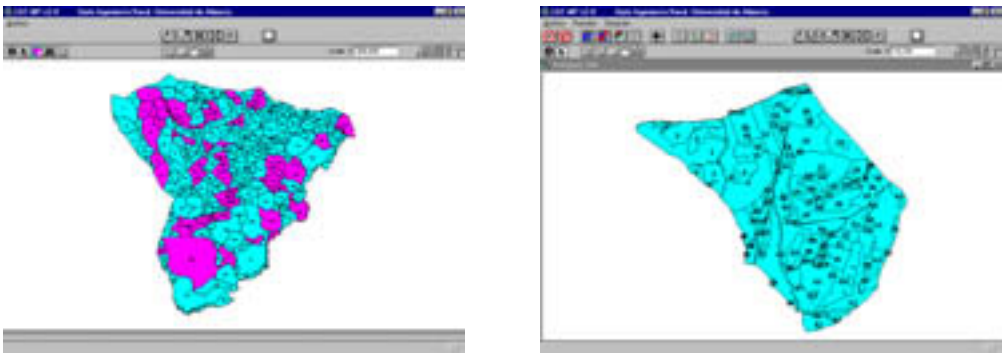


Figura 10. A la derecha, vista principal de la aplicación. A la izquierda, vista de un polígono catastral.

En esta nueva vista es donde se realizará el análisis de parcelas. A partir de ella se pueden obtener diferentes tipos de información, como por ejemplo las parcelas pertenecientes al dominio público, las cuales se colorearían en magenta, u obtener un informe catastral de una parcela seleccionada, en el que se visualizaría la información de las parcelas colindantes y su situación geográfica. Una vez identificada la parcela mediante su número, se puede proceder a la superposición del levantamiento con GPS de la misma. La organización de estas parcelas, denominadas parcelas GPS, se ha realizado en ficheros identificados con el número de polígono, y en ellos en documentos identificados por el número de parcela. La figura 11 muestra la superposición de la parcela GPS número 53, en rojo, sobre la cartografía catastral, donde se ha pedido que se resalten las parcelas de dominio público, en magenta (figura 11, anexo de figuras). En este punto se puede pedir un informe de discrepancia entre las distintas superficies de la cartografía catastral, de la parcela GPS y de la que figura en la base de datos alfanumérica de catastro (figura 11, derecha).

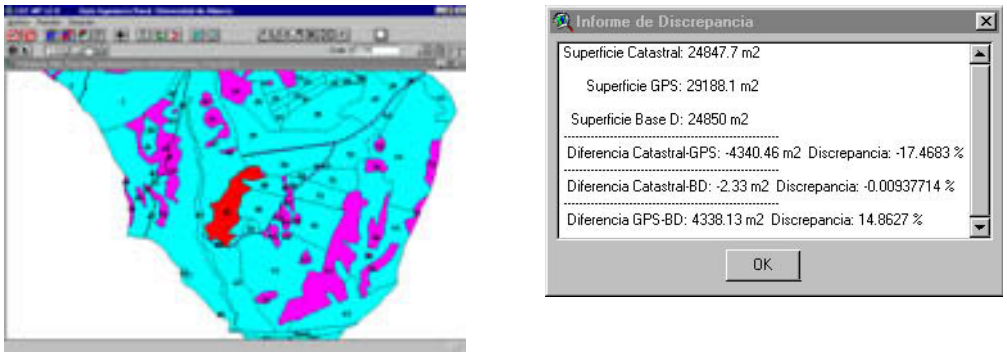


Figura 11. Izquierda, superposición de la parcela GPS a la cartografía catastral. Derecha, informe de discrepancia.

En el ejemplo de la figura 11 se muestra el informe de discrepancia para la parcela 53 del polígono 184, donde se aprecian diferencias entre los valores de la superficie. En este momento el operario decide si sigue adelante con el proceso, según los valores establecidos por el correspondiente organismo, o bien inicia el trabajo con otra parcela.

Si se sigue adelante, al estimar que la superficie invadida es superior a lo tolerado, se producirá la intersección de parcelas, obteniendo para nuestro ejemplo la figura 12, que muestra en cián las zonas invadidas, y en magenta las que aún permanecen inalteradas (anexo de figuras). Asimismo, aparece el número de la parcela invasora. Se puede obtener entonces el correspondiente informe de invasión (figuras 13 y 14), donde, junto con una información gráfica de la situación, se recoje la información alfanumérica de las parcelas invasoras, previa consulta de la base de datos catastral. En esta tabla aparece como superficie la correspondiente a la parcela y el área invadida por la misma, además de toda la información del titular.

Figura 12. Intersección gráfica de la parcela GPS con la cartografía catastral.

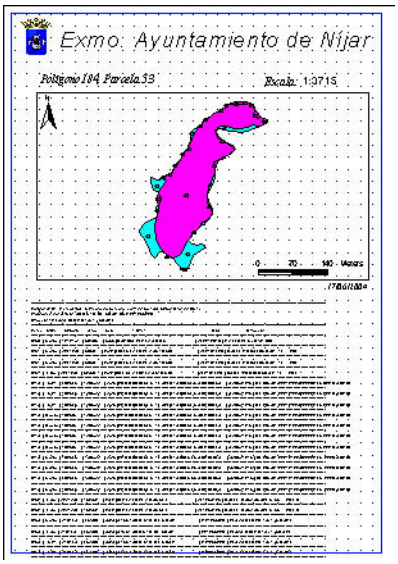


Figura 13. Informe final sobre invasión de parcela de monte público.

Figura 14. Detalle de la información alfanumérica obtenida.

CONCLUSIONES

Las técnicas GPS empleadas demostraron ser una buena herramienta para la actualización del monte público, por su rapidez y la sencillez de manejo, además es un método 'pie a tierra', que permitió recorrer las lindes con prácticos conocedores del terreno, a la vez que se realizaba el levantamiento de los mismos en zonas donde la cartografía catastral, basada en la interpretación de ortofotografías, no era capaz de distinguir las lindes dada la homogeneidad del uso del suelo.

Los Sistemas de Información Geográfica han demostrado ser una herramienta óptima para la integración de la información cartográfica, datos alfanuméricos de la base de datos catastral y datos GPS, con el fin de realizar análisis, tanto espaciales como de los datos alfanuméricos asociados a ellos, y para generar informes que permitan la gestión del catastro de rústica.

La herramienta SIG desarrollada para la aplicación de actualización del monte público presenta ventajas frente a la utilización genérica del Software SIG, siendo las más significativas, el menor tiempo empleado por los usuarios en su manejo y en la obtención de resultados.

La metodología desarrollada puede ser una alternativa eficaz para el inventariado del monte público y aplicable en otras situaciones similares, donde el usuario discreto sea, por ejemplo, una entidad local (ayuntamiento, pedanía,...).

AGRADECIMIENTOS

Al Ayuntamiento de Níjar por facilitarnos los datos necesarios para la realización de este trabajo, y financiar el proyecto "Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica Basado en el Inventariado con GPS para la Ordenación del Medio Rural del T.M de Níjar". Y en especial a D. Juan Antonio Pérez Torres, Ingeniero Técnico Agrícola y técnico de la Concejalía de Agricultura del Ayto. de Níjar por su colaboración en dicho proyecto.

REFERENCIAS

Aguilera Ureña, M.J. (2001): *Desarrollo de una Metodología de Cálculo de Redes Geodésicas Observadas mediante GPS. Análisis de la Influencia de los Métodos de Cálculo en la Precisión*. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.

Manzano. F., Garcia, T., Meroño, J.E. (1996): "Caracterización Gráfica de Superficies a Medir con GPS". En *Anales de Ingeniería Gráfica*, Volumen 2.

Manzano Agugliaro, F., Manzano Agugliaro, G. (2001): *Topografía por Satélite: GPS (Global Positioning System)*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería.

Manzano Agugliaro, F., Manzano Agugliaro, G. (2003): *Aplicaciones del GPS a la Topografía y Geodesia*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería.

La Selva de Irati: análisis de las actividades turísticas en un espacio de la Red Natura 2000 de Navarra

I. Sariego López [1], J.J. Pons Izquierdo [1] y A.H. Ariño Plana [2]

(1) Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Navarra, 31080, Pamplona.
(2) Departamento de Zoología y Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de Navarra, 31080, Pamplona.

RESUMEN

En nuestros días la actividad turística se ha convertido en uno de los sectores económicos más importantes de España y ha logrado consolidar nuevos destinos ligados a los espacios naturales.
El objetivo de este estudio es analizar la relación existente entre la actividad turística y la calidad ambiental de las áreas naturales, proponiendo como marco de investigación la Selva de Irati, uno de los mayores hayedos de Europa y futuro espacio de la Red Natura 2000.
Para desempeñar esta tarea, la presente investigación ofrece un amplio análisis de las actividades humanas relacionadas con el espacio natural. Se incide con mayor detenimiento en el sector turístico, presentando una aproximación de la situación recreativa a partir de las infraestructuras y de los equipamientos relacionados directa e indirectamente con esta actividad.
Los resultados obtenidos ofrecen una reflexión sobre la necesidad de encontrar un equilibrio entre el desarrollo turístico y la supervivencia y renovación de los recursos naturales.

***Palabras Clave**: Turismo, Espacios Naturales, Red Natura 2000.*

ABSTRACT

At the present moment tourism has become one of the most important economic sectors in Spain and one which has been able to consolidate new destinations associated with natural areas.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

The aim of the present study is to analyze the existing relationship between tourism and the environmental quality of natural areas, using as the framework of this research the Irati Forest, one of the largest beech forests in Europe, which will be included in the Natura 2000 Network.

To carry out this task, the present research offers a broad analysis of human activities related to natural spaces. Greater detail is given to the tourist sector by means of an approximation to the recreational situation from the standpoint of infrastructures and equipment facilities directly or indirectly related with the tourist activity.

The results obtained provide a reflection on the need to find a proper balance between the development of tourism and the survival and renewal of natural resources.

***Key Words**: Tourism, Natural Areas, Natura 2000 Network.*

INTRODUCCIÓN. TURISMO Y MEDIO AMBIENTE

El auge de la recreación en los espacios naturales

La utilización de las áreas naturales como espacios de ocio y recreación es una de las constantes en nuestra sociedad. Este uso recreativo no es ni mucho menos reciente, aunque se ha incrementado notablemente en las últimas décadas, de tal manera que cada vez son más las personas que disfrutan de sus ratos de ocio y esparcimiento, en contacto con la naturaleza. El incremento de la información ambiental, el apoyo desde organismos públicos debido a la crisis en el ámbito rural, los escasos espacios verdes en nuestras ciudades, así como los cambios en los valores de la sociedad, han provocado un incremento en el número de visitas de los espacios naturales (*Gómez-Limón*, 2002).

A medida que los paisajes urbanos se convierten en medios más hostiles para el hombre, crece la necesidad de buscar refugio en entornos más amables, fuera del bullicio y de la insana congestión de las ciudades. La generalización del uso del vehículo privado ha jugado en este proceso un papel fundamental. No sólo acceden más personas a los espacios naturales, sino que lo hacen de manera más difusa y adentrándose en áreas que hasta hace escaso tiempo resultaban poco accesibles. Además, las excursiones pedestres, ciclistas y a caballo se han convertido en propuestas de ocio ampliamente extendidas en nuestra sociedad.

El turismo vinculado al uso público de los espacios naturales incide con fuerza en la progresión económica de sus áreas de influencia. Esta actividad abre paso a nuevas expectativas para el desarrollo de actividades económicas ligadas a la utilización recreativa de los espacios protegidos, lo que a su vez posibilita la diversificación y la multifuncionalidad de numerosas zonas rurales (*Troitiño*, 2001).

El turismo de naturaleza en Navarra

El turismo rural y de naturaleza se desarrolla en Navarra –fundamentalmente– a partir de la década de los ochenta, y es a lo largo de la primera mitad de los años noventa cuando se registra el mayor crecimiento de la oferta de alojamientos rurales. La Comunidad Foral se posiciona en esos momentos como una de las regiones españolas pioneras a la hora de facilitar servicios y equipamientos turísticos en las áreas rurales.

La principal acción encaminada a crear alojamientos relacionados con el turismo en la naturaleza vino de la mano de la Red de Casas Rurales en Navarra, iniciativa promovida por la Dirección General de Turismo. En sus orígenes el proyecto tuvo un carácter sencillo debido a su escasa dimensión de aplicación, pero poco a poco ha ido creciendo hasta convertirse en un pilar básico para la articulación de determinadas economías comarcales.

Algunos estudios, que han analizado en detalle la situación del turismo en Navarra, constatan el indudable desarrollo de esta actividad (*Echamendi*, 1999). El número de viajeros que utilizaron los establecimientos turísticos pasó de 275.880 en 1985 a 311.159 en 1996, es decir, tuvo un incremento del 12,8%. Otras investigaciones, centradas en espacios naturales, han mostrado también una importante evolución en la afluencia de visitantes. Éste es el caso de la Foz de Lumbier que registró un aumento del 44% entre 1997 y 2000 (*Terra*, 2001).

Asimismo, Navarra destaca por su enorme riqueza y gran variedad ecológica y paisajística. En sus escasos diez mil kilómetros cuadrados atesora ecosistemas claramente contrapuestos, desde las altas cumbres del paisaje kárstico de Larra al panorama estepario que domina en la Ribera.

La variabilidad de contrastes geográficos, debida a su ubicación espacial, es un factor determinante en su configuración territorial. Sobre esta Comunidad Foral confluyen distintas unidades de paisaje –húmedos y secos, poblamientos dispersos y concentrados, estratos silíceos, calcáreos y arcillosos– todos ellos asociados a la heterogeneidad intrínseca de su relieve, clima, vegetación y fauna (*Floristán*, 1995-2002).

Además, de todos es conocida la gran riqueza natural de esta región, que cuenta en su territorio con las tres regiones biogeográficas (atlántica, alpina y mediterránea) presentes en la Península Ibérica. No en vano, la Comunidad Foral tiene un índice de diversidad de vertebrados (sin incluir peces) superior al de la mayoría de los países de la Unión Europea, y su ubicación territorial le proporciona enorme importancia como zona de paso para especies migratorias (*Gestión Ambiental, Viveros y Repoblaciones de Navarra*, 2000). La Comunidad Foral de Navarra conserva 42 espacios, provisionalmente declarados como Lugares de Importancia Comunitaria (LICs), y que en el horizonte del año 2004 pasarán a denominarse Zonas de Especial Conservación (ZECs). Junto con todas estas circunstancias, el estudio resulta especialmente interesante al ser Navarra una de las primeras comunidades autónomas españolas en la aprobación de la lista provisional de los Lugares de Importancia Comunitaria para la Red de Conservación Europea Natura 2000. En total ocupan una superficie superior a los 2.500 Km^2, lo que equivale aproximadamente a un 24% del territorio regional.

Navarra ha apostado por un número reducido de Lugares –aunque de extenso tamaño– como opción favorecedora de la gestión e integración de otras actividades, entre ellas el

turismo. Su Red Natura 2000 acoge una variada representación de espacios naturales, entre los que destaca la Selva de Irati que ahora se analizará con más detalle.

FUNDAMENTOS TERRITORIALES DE LA SELVA DE IRATI

Antes de comenzar con el estudio detallado de la actividad turística en la Selva de Irati, conviene describir brevemente los fundamentos territoriales presentes en este espacio. Para conseguir este objetivo, se trazarán primero unas pinceladas generales sobre su conjunto natural, profundizando posteriormente en el análisis del entorno humano que encuentran entre los límites de esta área natural.

Características ambientales de la Selva de Irati

Los ecosistemas

La Selva de Irati es uno de los hayedos más emblemáticos de Europa y se considera un marco excepcional de estudio para conocer las relaciones entre conservación ambiental y aprovechamiento turístico.

Este espacio cuenta con más de 17.000 hectáreas de superficie y se encuentra situado al Nordeste de Navarra, en la región biogeográfica alpina. Se trata de un territorio que limita por el norte con las regiones francesas de Baja Navarra y Zuberoa; por el oeste con el collado Ortzanzurieta; por el este con las cumbres del Ory y Pikatua; y por el sur con la sierra de Abodi, principalmente (Figura 1).

Exceptuando las pequeñas áreas correspondientes a los fondos fluviales, los suelos de esta comarca son en su mayoría pedregosos y de pequeño espesor, motivado por la acusada meteorización mecánica, que favorecen sus fuertes pendientes, provocando el transporte de los materiales hacia el fondo de los valles (*Elósegui et al.,* 1994).

Por su parte, la distribución territorial de las especies en la Selva de Irati depende de factores de diversa índole que abarcan escalas temporales y espaciales muy distintas. Por una parte, los condicionantes geográficos determinan la capacidad intrínseca del territorio para mantener sus especies, como puede ser las barreras de dispersión o el tamaño y la estructura de las poblaciones. Por otra parte, los atributos de cada especie reflejan una única historia filogenética y la composición de cada biota supone una excelente descripción de su región. Asimismo, esta distribución geográfica también se encuentra muy condicionada por otros factores como el tiempo de perturbación, productividad y heterogeneidad de su hábitat, así como sus relaciones interespecíficas con el resto de los ecosistemas.

Esta zona alpina, que mantiene las manchas de abetales más occidentales de la Península Ibérica, se halla bioclimáticamente compartimentada, y a medida que avanza hacia oriente, varía sensiblemente su composición. La gran variedad de microhábitats que posee origina complejos heterogéneos, compuestos por diversas comunidades en equilibrio, y no una formación vegetal homogénea dominante.

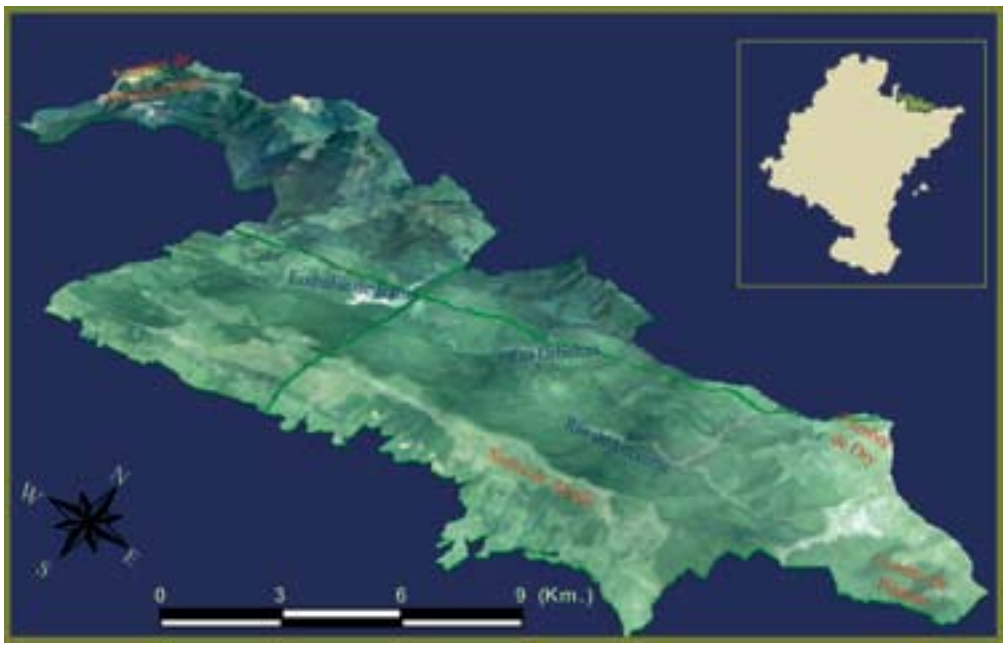


Figura 1. Imagen aérea de la Selva de Irati.
Fuente: Gobierno de Navarra. Elaboración propia.

La fisonomía de los ecosistemas de la Selva de Irati se refleja fundamentalmente a partir de su expresión botánica, que no está formada por individuos distribuidos al azar sino por especies vegetales que viven en comunidad. Estos individuos establecen relaciones de competencia, creando un equilibrio entre ellos y favoreciendo un mejor aprovechamiento de los recursos.

Este espacio cuenta con una importante superficie forestal, cobijo de numerosas especies frondosas que cubren más de la mitad de su territorio (Figura 2). Los bosques de especies coníferas juegan también un papel destacado, aunque la insuficiente envergadura de sus cumbres impide un desarrollo más fructífero.

Sin embargo, la aparición de las actividades antrópicas entre los límites de la Selva de Irati ha permitido la incorporación de otros ecosistemas más humanizados. La necesidad de encontrar un equilibrio entre el potencial demográfico, el tipo de hábitat y la actividad agro-silvo-pastoril, ha favorecido la aparición de nuevos hábitats como los matorrales y los pastizales (*Colomo*, 1998).

Se trata de ecosistemas que actúan como vínculo de unión entre la montaña y los paisajes agrarios de las tierras bajas, cubriendo cerca de una tercera parte de toda su superficie con una fisionomía muy variada. Estas superficies son empleadas intensamente por la ganadería de tipo extensivo, circunstancia que contribuye a que muchas áreas mantengan su paisaje natural, prácticamente intacto. Asimismo, el espacio ha tenido que aceptar otras transformaciones territoriales que han permitido una pequeña cobertura para los cultivos, con el objeto de evitar el despoblamiento masivo de la zona.

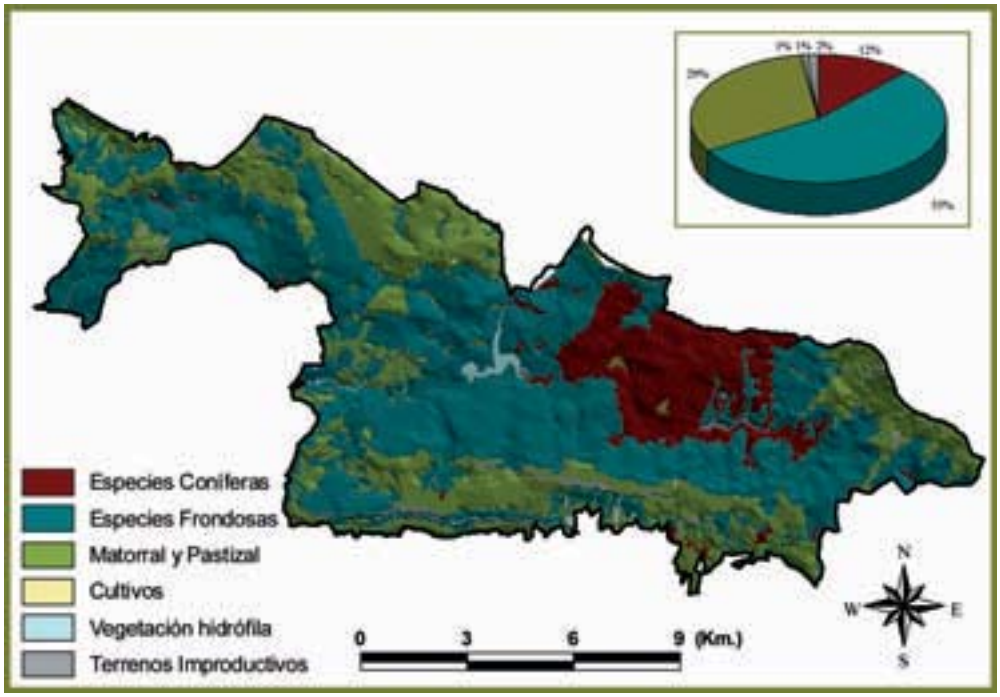


Figura 2. Ocupación del suelo en la Selva de Irati.
Fuente: Gobierno de Navarra. Elaboración propia

La Selva de Irati también acoge un denso sistema fluvial dominado por el embalse de Irabia que recibe las aguas del río Urbeltza, procedente de Francia, y del Urtxuria que drena las laderas occidentales del pico de Ory.

Fauna y Flora

Los ecosistemas de la Selva de Irati mantienen una rica diversidad biológica, fiel reflejo de la enorme variedad geológica, topográfica y climática de la zona. Algunos autores (*Larrea et al.*, 2002) consideran que este espacio es uno de los principales reservorios de la biodiversidad de Navarra. Sus ecosistemas mantienen más o menos un carácter natural próximo a su potencial, ofreciendo hábitats adecuados para numerosas especies singulares.

El complejo natural de la Selva de Irati proporciona un amplio panorama de recursos traducidos en flora y fauna. Su biodiversidad florística, con 1.260 especies, es exuberante y el número de ejemplares vertebrados diferentes ronda una cifra aproximada de 200; casi la mitad de las especies catalogadas en toda la Comunidad Foral, en ambos casos.

Según algunos expertos (*Larsson*, 2001), la presencia-ausencia de flora y fauna se considera uno de los resultados más significativos, debido a que constituyen elementos indispensables del paisaje, y cuya interacción determina la calidad ambiental de los ecosistemas. Su evaluación asociada a la lista de los anexos de la Directiva Hábitats aproxima la función ecológica

que realiza la Selva de Irati, en el marco del medio ambiente europeo.

La conservación de estas especies supone la necesidad de mantener un amplio conjunto de procesos biológicos en estado óptimo, como consecuencia de la interrelación constante entre unos y otros. Si esta labor se desempeña correctamente, los hábitats naturales reportan a la sociedad infinidad de bienes y servicios (*Rábade*, 2002).

Por este motivo, numerosos profesionales *TRAGSATEC* (1998) consideran cada vez más necesario evaluar correctamente las unidades ambientales de Navarra, etiquetarlas según una estimación económica y, de esta forma, jerarquizar correctamente cada espacio de acuerdo con el verdadero sentido humano del entorno natural. El modelo diseñado por este estudio propone asignar un valor económico a la biodiversidad según el flujo de rentas generado por los bienes que producen los ecosistemas en uso presente y futuro.

La metodología empleada para el siguiente análisis se basa en cruzar y filtrar las tablas de especies del Catálogo de Flora y Fauna –pertenecientes a la Selva de Irati–, con las especies incluidas en los anexos II (Especies animales y vegetales de interés comunitario para cuya conservación es necesario designar zonas especiales de conservación), IV (Especies animales y vegetales de interés comunitario que requieren una protección estricta) y V (Especies animales y vegetales de interés comunitario cuya recogida en la naturaleza y cuya explotación puede ser objeto de medidas de gestión) de la Directiva Hábitats (Cuadro1).

Además, los resultados del cuadro quedan completados con el valor económico asignado por *TRAGSATEC* (1998), para cada una de las especies animales o vegetales presentes en la Comunidad Foral de Navarra. Este valor de no-uso de las especies la Selva de Irati incluidas en la lista de anexos de la Directiva Hábitats otorga cerca de 30 millones de euros al espacio, de los cuales, la mitad de este valor lo aporta el oso pardo (*Ursus arctos*) dada la notable importancia de esta especie en el ecosistema.

Cuadro 1. Especies de la Selva de Irati incluida en la Directiva Hábitats.

Taxón	*Tipo*	*Anexo II*	*Anexo IV*	*Anexo V*	*Valor Económico (€)*
Aquilegia pyrenaica	Flora	+			208.976,81
Bufo calamita	Vertebrado		+		444.075,72
Chondrostoma toxostoma	Vertebrado	+			287.343,11
Doronicum plantagineum	Flora			+	235.098,91
Dorycnium pentaphyllum	Flora			+	239.452,59
Euproctus asper	Vertebrado		+		692.235,68
Galemys pyrenaicus	Vertebrado	+	+		3.139.005,80
Gentiana lutea	Flora			+	256.867,33
Graellsia isabellae	Invertebrado	+		+	169.793,66
Lycopodium alpinum	Flora			+	-
Lycopodium selago	Flora			+	-
Maculinea arion	Invertebrado		+		152.378,92
Narcissus bulbocodium	Flora			+	217.684,18
Parnassius apollo	Invertebrado		+		343.941,00
Rhinolophus ferrumequinum	Vertebrado	+			3.038.871,08
Rhinolophus hipposideros	Vertebrado	+			2.350.989,09
Rosalia alpina	Invertebrado	+	+		291.696,79
Ruscus aculeatus	Flora			+	243.806,28
Ursus arctos	Vertebrado	+	+		13.992.738,77

Fuente: Gobierno de Navarra y TRAGSATEC (1988). Elaboración propia.

Aunque el conocimiento de la diversidad biológica de especies es uno de los indicadores más empleados debido a que reflejan distintos aspectos de los ecosistemas, nuestro estudio ha decidido contar con la matriz de ocupaciones del suelo que proporciona un significado ampliamente entendible, al ser fácilmente detectables y cuantificables.

Para ello, se elabora una interpolación análoga a la ecuación de Shannon-Weber pero, en vez de contar con individuos de distintas especies, se cuenta con las distintas parcelas dedicadas a diferentes usos. [1]El índice obtenido (H) a partir de esta metodología es 1,977, valor notablemente superior al de otros espacios de la Red Natura 2000 de Navarra como el Robledal de la Ultzama, la sierra de Urbasa-Andía o las Bardenas Reales. Este resultado puede ser entendido como un recurso competitivo en el desarrollo territorial de algunas áreas desfavorecidas.

El entorno humano en la Selva de Irati

A lo largo de la historia, la agricultura y la ganadería han sido las principales actividades económicas de la población de la zona de Irati. Estas actividades, que sin duda alguna se encuentran en una fase regresiva desde hace tiempo (*Floristán*, 1995-2002), han sufrido unos cambios estructurales de gran importancia La desaparición del barbecho, el crecimiento del tamaño medio de las explotaciones, el abandono de tierras marginales, la supresión de rebaños comunales y la progresión del barbecho social con fines especulativos (entre lo que destaca la construcción), son algunas de las transformaciones más sustanciales que han repercutido inevitablemente en los paisajes de su entorno.

Sin embargo, los problemas más comunes con los que se enfrenta actualmente la Selva de Irati no siempre se encuentran relacionados con los cambios en los aprovechamientos agrícolas y ganaderos, sino más bien con la aparición de una nueva actividad económica para el territorio: el turismo. El aprovechamiento turístico de este espacio de la Red Natura 2000 ha traído consigo grandes beneficios para las sociedades rurales, habilitando nuevas posibilidades de desarrollo económico.

No obstante, la presencia –más o menos masiva– del hombre en estos entornos naturales no es inocua para los ecosistemas. Las actividades de ocio suelen ser poco impactantes en sí mismas, aunque hay que tener en cuenta el efecto sinérgico que provocan y el hecho que estas actividades se realizan en zonas vulnerables, por lo que su impacto adquiere un valor significativo.

Todos estos impactos en la naturaleza están significativamente influidos por los componentes territoriales y ambientales que caracterizan a los paisajes rurales (*Vera et al.*, 1997). La evaluación de los impactos producidos por el turismo es una materia muy compleja debido a que involucra un gran número de actividades asociadas. Además, la relación entre el uso recreativo de un territorio y su impacto es rara vez directo o lineal. Los impactos pueden ser indirectos y acumulativos, y por tanto más difícilmente detectables; sus consecuencias nega-

---

[1] La metodología empleada determina que: Diversidad de Paisajes (H) = $-\sum pi*\log_2 pi$; donde pi = Ni/Nt y donde Ni es la superficie de parcela para cada categoría y Nt es la superficie total de la Selva de Irati.

tivas aumentan rápidamente con el uso inicial y luego se estabilizan. La afección que padece el medio puede estar provocada por una gran variedad de motivos: las características de su naturaleza, la severidad de la actividad recreacional, el método de viaje, la escala espacial y el comportamiento individual, son cualidades decisivas para evaluar el impacto que se genera (*Hammitt et al.*, 1998).

LA PRESIÓN TURÍSTICA EN LA SELVA DE IRATI

Antes de comenzar con el repaso a la situación de las actividades turísticas relacionadas con la Selva de Irati, conviene advertir de las dificultades que ofrece la disponibilidad actual de datos sobre la oferta recreativa en este espacio. Como ya se ha destacado en trabajos anteriores (*Sariego*, 2002), el conocimiento exacto de los turistas que visitan los espacios naturales resul-

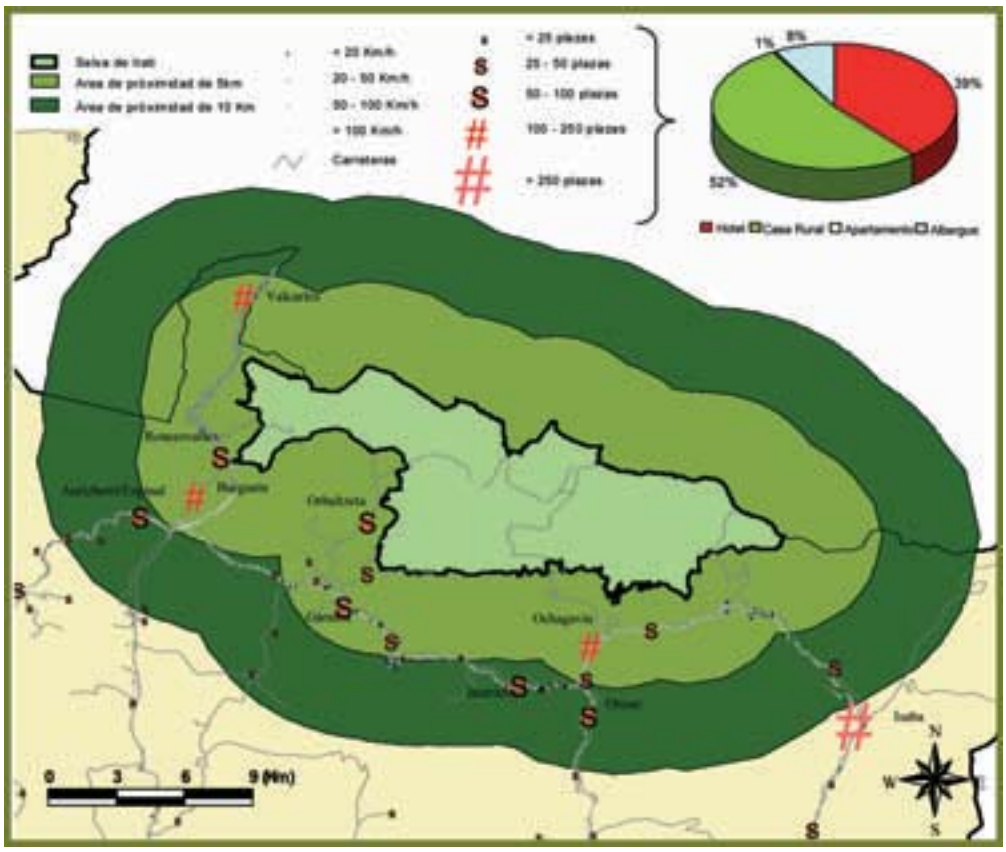


Figura 3. Infraestructuras Turísticas próximas a la Selva de Irati.
Fuente: Gobierno de Navarra. Elaboración propia.

ta hoy en día una tarea imposible. Por esta razón, se acude a métodos que de forma indirecta nos permitan obtener una visión aproximada de este fenómeno.

Para conseguir este objetivo se va a tratar de analizar distintos aspectos sobre la capacidad turística de la zona, estudiando la oferta recreativa en las áreas de proximidad de este espacio natural. En primer lugar, se trabajará con las plazas de alojamiento turístico en cualquiera de sus categorías y a continuación se estudiará la localización de algunos de los equipamientos recreativos como las Oficinas de Información Turística, los Centros de Interpretación, las zonas de baño, las áreas recreativas, la oferta de restauración, así como los itinerarios naturalísticos más destacados. Asimismo, se ha considerado interesante incluir el análisis del sistema de comunicaciones viarias como infraestructuras complementarias relacionadas directa o indirectamente con la actividad turística.

La evaluación según alojamientos turísticos

Mientras hace algunas décadas la mayor preocupación en la gestión de estas áreas naturales residía dentro de sus propios límites, en nuestros días se considera igualmente necesario evaluar la situación existente en el entorno próximo, ya que puede influir notoriamente en su comportamiento (García, 2003). Por este motivo, primeramente se delimitan tres espacios de estudio: el interior de los LICs, el área de influencia hasta 5 Km y el área circundante entre 5 y 10 Km (Figura 3).

A partir de la delimitación de estas zonas se seleccionan los asentamientos que disponen de algún tipo de oferta de alojamiento turístico en cualquiera de sus categorías. Se excluyen del estudio las plazas de acampada, ya que su volumen –que no se corresponde con la ocupación real– distorsiona notablemente el resultado del análisis, así como todos los alojamientos turísticos situados en Francia.

Los resultados que se obtienen de este estudio son muy explícitos: 22 de los 32 asentamientos cuentan con algún tipo de establecimiento turístico, dentro de las bandas de proximidad que se han establecido para la Selva de Irati.

La capacidad de alojamiento interno no existe debido a que el espacio no cuenta con núcleos poblados. Sin embargo, la primera franja de 5 Km alberga un total de 829 plazas turísticas, cifra superior al doble de la oferta existente entre los 5 y los 10 Km (365), pese a que la superficie que abarca esta última es mayor. Este análisis muestra que la oferta de alojamiento turístico se encuentra íntimamente ligada al espacio natural debido a la calidad de sus paisajes. Esta afirmación ya se pudo comprobar en investigaciones anteriores (Sariego *et al.*, 2002), a través del diseño de este modelo para toda la Red Natura 2000 de Navarra.

No obstante, si bien estas cantidades parecen importantes, debido a la configuración y localización espacial del territorio, resulta más sorprendente averiguar que en sus áreas de proximidad existe más de 1 plaza turística por cada 4 habitantes.

Por otra parte, las características del medio geográfico anteriormente definidas determinan en buena medida la distribución de la oferta de los alojamientos turísticos en las distintas categorías: hoteles, casas rurales, apartamentos o albergues. Por este motivo, más de la mitad de las plazas ofertadas corresponde a casas rurales frente al dominio de los hoteles (Figura 3).

La evaluación según equipamientos turísticos

La evaluación del volumen de plazas turísticas desarrollada anteriormente ha proporcionado una visión parcial de la posible influencia que desempeña la oferta de los alojamientos turísticos sobre las áreas naturales de Navarra. Pero además, junto al análisis de todos estos parámetros evaluados, se considera importante estudiar la posible relación existente entre otros equipamientos recreativos y el medio que los rodea (Figura 4).

En primer lugar, cabe mencionar la importancia que desempeñan las Oficinas de Información Turística como una de las herramientas clave en la promoción turística de esta zona. El Servicio de Turismo del Gobierno de Navarra emplea estos equipamientos para informar a los visitantes acerca de los atractivos del sector –hostelería y restauración– y las bondades paisajísticas de la zona, mejorando así la calidad en la experiencia recreativa. Según los datos registrados por el Departamento de Industria y Tecnología, Comercio, Turismo y Trabajo (2000), la Oficina ubicada en Roncesvalles recibió más de 50.000 visitas, al ser un punto neurálgico en el Camino de Santiago. Por su parte, más de 20.000 turistas demandaron información en la Oficina de Ochagavía.

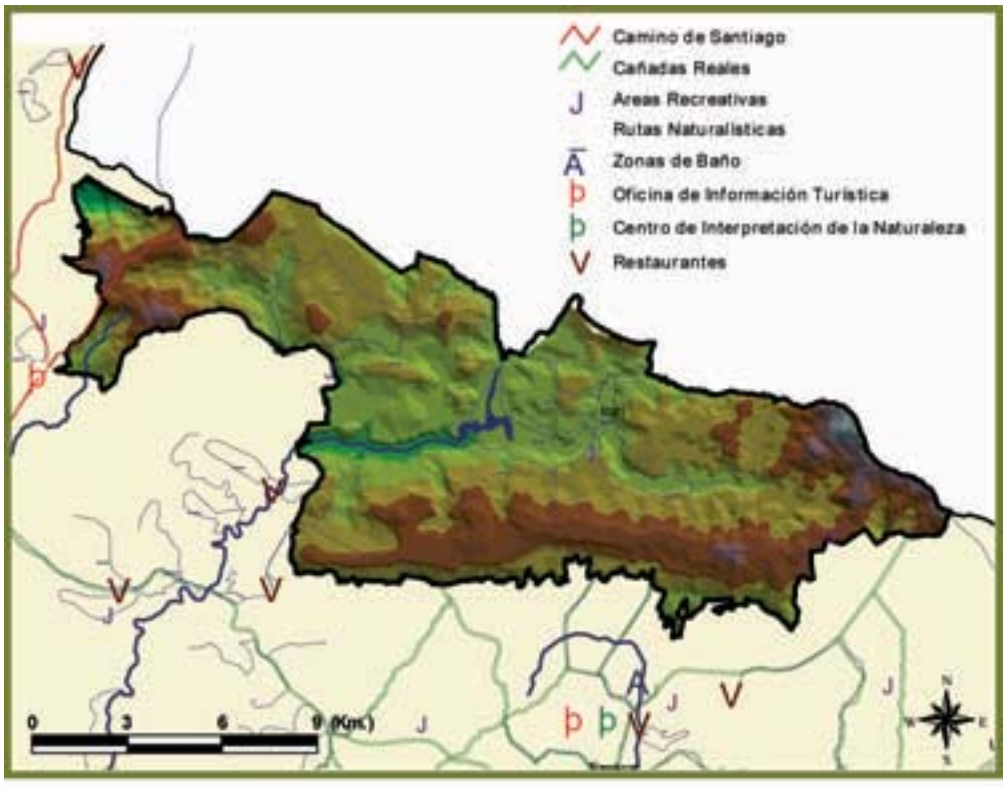


Figura 4. Equipamientos Turísticos complementarios próximos a Irati.
Fuente: Gobierno de Navarra. Elaboración propia.

Junto con este equipamiento, el asentamiento de Ochagavía también da cobijo a un Centro de Interpretación de la Naturaleza. Se trata de infraestructuras creadas para inculcar valores de protección del medio natural y educación ambiental a través del conocimiento de las características del territorio, tanto geográfica y biológica como humana. Concretamente, este equipamiento recreativo recibió cerca de las 10.000 visitas durante el año 2000.

Asimismo, estas áreas rurales también cuentan con una destacada gastronomía que constituye, junto al patrimonio natural y cultural, uno de sus principales atractivos de la zona. Este sector, al igual que el alojamiento, está experimentando un importante crecimiento tanto en el volumen de la oferta como en su calidad, circunstancia que facilitó en el año 2000 una capacidad cercana para 400 comensales.

Otros recursos turísticos que proporciona la zona son las áreas recreativas y las zonas de baño que, a diferencia de los anteriores equipamientos, se caracterizan por su carácter pasivo y desestructurado. El territorio presenta ocho áreas recreativas –tres situadas en su interior– y una zona de baño ubicada en las proximidades de Ochagavía.

Por último, la práctica del senderismo sobre las Cañadas Reales o vías pecuarias es una de las opciones recreativas más practicada en los últimos años. La señalización y restauración de los caminos desempeña una tarea fundamental para promocionar nuevos espacios turísticos y consolidar destinos ya existentes. Actualmente, la Selva de Irati cuenta con más de 10 itinerarios naturalísticos que permiten contemplar la grandeza de sus paisajes.

Al margen de todos estos pequeños recorridos, la Selva de Irati contiene entre sus límites parte del Camino de Santiago que constituye una fuente continua de visitantes. Muchos de estos senderistas utilizan algunos tramos del Camino para realizar excursiones en jornadas festivas. Algunas estimaciones muestran que durante 1992 el Camino fue transitado en Navarra por más de 30.000 peregrinos (*Gobierno de Navarra*, 1992).

La evaluación según otras infraestructuras turísticas complementarias

La calidad de la actual red de carreteras de Navarra, así como la flexibilidad y la universalidad del automóvil, permiten que la Selva de Irati no sea hoy en día un territorio inexplorado. La construcción de estas infraestructuras ha derivado importantes mejoras para la calidad de vida de sus pobladores, gracias a que facilitan una mejor accesibilidad comarcal y regional.

No obstante, en muchas ocasiones, la tarea de evaluar las consecuencias negativas de estas infraestructuras es sumamente compleja, debido a que sus efectos difícilmente se dejan percibir en pequeño espacio de tiempo. Sus impactos se ocasionan no sólo por su presencia sino también por su uso. Las carreteras producen importantes modificaciones en el medio natural debido a la gran superficie que ocupan, el efecto barrera que producen y el poder de penetración sobre el territorio. Además, la erosión, la fragmentación, aumento del efecto borde, modificación en el drenaje, atropello de la fauna, transporte de individuos alóctonos o el mayor acceso y dispersión del hombre en la naturaleza son algunas de sus consecuencias, que redundan en una pérdida de la biodiversidad y de la integridad de los ecosistemas (*Havlick*, 2002).

Por todas estas razones, se ha considerado de sumo interés para el estudio elaborar una aproximación sobre la facilidad de alcanzar la Selva de Irati como lugar de ocio, determinan-

do un radio de proximidad de 10 kilómetros. Para realizar estos análisis se parte de los datos suministrados por el Departamento de Obras Públicas, Transporte y Comunicaciones (2003), en los que se determina la velocidad específica según los radios mínimos y el peralte asociado. Los resultados obtenidos muestran que la media de velocidad de todos los tramos –el estudio no incluye las carreteras locales– no alcanza los 90 Km/h, debido a que su trazado y estado apenas permiten circular a gran velocidad (Figura 3).

Por último, el estudio también considera importante conocer el flujo de vehículos que circulan dentro o en el área de proximidad de esta área natural, establecida nuevamente en 10 Km. La intensidad media alcanza casi los 11.000 vehículos diarios cifra que también proporciona una aproximación para conocer la presión turística que recibe el medio.

CONCLUSIONES

En las últimas décadas las actividades turísticas en los espacios naturales han adquirido una importancia social cada vez mayor. Esto ha provocado un notable crecimiento en la oferta de infraestructuras y equipamientos turísticos ubicados en las áreas naturales más destacadas. A partir de los diferentes estudios que se han realizado en esta investigación se ha intentado demostrar la notable importancia que representa el sector turístico en la Selva de Irati, cuya consecuencia ha derivado en numerosas oportunidades de desarrollo, así como una nueva fuente de contaminación para el territorio.

Sin querer restar importancia a las dificultades observadas, y sabiendo que la cercanía de infraestructuras o equipamientos turísticos a un espacio natural no presupone necesariamente la visita de éste por parte del turista, defendemos la validez metodológica como una forma aproximada de explorar la presión turística que recibe la Selva de Irati. Los resultados obtenidos concuerdan –a grandes rasgos– con la valoración cualitativa que nos da el conocimiento de la situación en este espacio. Sin embargo, esta metodología no puede ser tomada más que como una aproximación general, y en ningún caso resultaría aceptable como estudio único sobre el contexto recreativo de la Selva de Irati.

Actualmente, el abundante y rico patrimonio ambiental de su entorno, junto con los atractivos servicios que se ofertan, permiten a este espacio tener excelentes perspectivas de desarrollo turístico que avalan su candidatura como destino turístico de calidad.

REFERENCIAS

Colomo, J. (1998): *El Pirineo de Navarra: Transformaciones y Perspectivas en el Uso Humano del Espacio*, Tesis Doctoral inédita, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Pamplona, pp. 339-452.

Departamento de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Vivienda (2000): *Catálogo de Flora y Fauna*, SIAN, Gobierno de Navarra, Documento de Trabajo inédito. CD-ROM.

Departamento de Obras Públicas, Transporte y Comunicaciones (2003): *Segundo Plan Director de Carreteras de Navarra 2002 - 2009*, Gobierno de Navarra, Pamplona, pp. 54-71.

Echamendi, P. (1999): *Turismo en la Montaña de Navarra: Análisis Geográfico*, Tesis Doctoral inédita, Universidad de Alcalá, Madrid, pp. 198-418.

Elósegui, J., de Orbe, A., Piedrafita, J.L. y Redón, F. (1994): *El Parque Natural Pirenaico en Navarra. II Irati - Ibañeta*, Gobierno de Navarra, Pamplona, pp. 25-57.

Floristán, A. (1995–2002): *Geografía de Navarra*, Vol. I, Diario de Navarra, Pamplona, pp. 49-320.

García J. (2003): *Planificación y Gestión de Parques Naturales: Conservación y Disfrute*, Revista Interdisciplinar de Gestión Ambiental, Año 5, nº 52, abril 2003, Madrid, pp. 7-24.

Gestión Ambiental, Viveros y Repoblaciones de Navarra (2000): *Propuesta de Lugares de Importancia Comunitaria en Navarra*, Departamento de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Vivienda. Gobierno de Navarra, Pamplona, 74p.

Gobierno de Navarra (1992): *Camino de Santiago: Topoguía de Senderos de Gran Recorrido. GR-65, GR-65·3*, Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, Departamento de Industria, Comercio y Turismo, Departamento de Educación y Cultura, Pamplona, 53p.

Gómez-Limón, J. (2002): *La Demanda Turística en Espacios Naturales*, en Viñals, Mª. J. (Coord.), *Turismo en Espacios Naturales y Rurales II*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, pp. 117-137.

Hammitt, W.E. y Cole, D.N. (1998): *Wildland Recreation: Ecology and Management*, John Wiley & Sons, New York, 21-113.

Havlick, D. (2002): *No Place Distant: Roads and Motorized Recreation on America's Public Lands*, Island Press, Washington D.C, pp. 36-58.

Larrea, J.A. y Lizarraga, Mª.A. (2002): Los Recursos Forestales y su Aprovechamiento, *Libro Blanco de la Agricultura y el Desarrollo Rural*, Jornada Autonómica de Navarra, Pamplona. *http://www.libroblancoagricultura.com/libroblanco/jautonomica/navarra/comunicaciones/larrea.pdf*

Larsson, T.-B. (Coord.) (2001): "Biodiversity Evaluation Tools for European Forest", *Ecological Bulletins*, nº 50, Oslo, 237p.

Rábade, J.Mª. (Coord.) (2002): *Atlas Forestal de España*, TRAGSA, Madrid, pp. 24-287.

Sariego, I., Pons, J.J. (2002): "Valoración de la Presión Turística sobre la Red Natura 2000 de Navarra", en Ramos, P., Márquez, C. (Coords.), *Avances en Calidad Ambiental, Aquilafuente*, Ediciones de la Universidad de Salamanca, Salamanca, pp. 595-601.

Terra (2001): "Ordenación del Uso Público en las Foces de Lumbier, Arbayún, Ugarrón y Benasa durante el Año 2000. *Informe final de Evaluación y Resultados*", Documento de Trabajo inédito, pp. 11-26.

TRAGSATEC (1998): *Valoración Integral de la Conservación de la Biodiversidad en la Comunidad Foral de Navarra*, Documento de Trabajo inédito, pp. 68-77.

Troitiño, M.A. (2001): "Espacios Protegidos y Desarrollo Rural", en Pillet, F. y Plaza, J. (Coords.), *Lecciones de Desarrollo Rural. Una aproximación formativa desde y para Castilla-La Mancha*, UCLM-CEDERCAM, Ciudad Real, pp. 229-249.

Vera, J.F., López, F., Marchena, M. J. y Antón, S. (1997): *Análisis Territorial del Turismo*, Ariel, Barcelona, 443p.

Utilización de un SIG y herramientas de análisis visual para la determinación del posible impacto ambiental debido a la implantación de un parque eólico en la 'Serra de L'Auleda' (La Jonquera, Girona)

Ll. Vicens Franquesa[1] y F. Orduña Aznar[1]

(1) Servicio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (SIGTE), Facultat de Lletres, Universitat de Girona, Plaça Ferrater Mora, 1, 17071 Girona.

RESUMEN

El proyecto nace de la necesidad de evaluar el impacto visual que puede conllevar la implantación de un parque eólico de doce aerogeneradores en la 'Serra de l'Auleda' de La Jonquera, población fronteriza del norte de la provincia de Girona.

A partir de un modelo tridimensional del territorio se procedió a evaluar, mediante la realización de diferentes cuencas visuales, el impacto visual que tendría la presencia de los aerogeneradores en lo alto de la sierra. Los análisis de visibilidad se realizaron en dos direcciones principales, determinando y delimitando la superficie de territorio que se podría divisar desde cada uno de los aerogeneradores, así como la determinación del número de aerogeneradores que se podrían visualizar desde cada una de las poblaciones existentes en un radio de quince kilómetros –teniendo sólo en cuenta, dentro de este radio de influencia, la porción de territorio perteneciente a la provincia de Girona–. Otro tipo de análisis contemplado en este trabajo fue el cálculo de visibilidad que comportaría el parque eólico desde el trazado de la autopista (AP-7), así como se determinaron líneas de visibilidad desde ciertos emplazamientos con puntos de interés de carácter patrimonial, natural, arqueológico…

Los resultados finales obtenidos en las diferentes cuencas de análisis visual se superpusieron –overlay– con el fin de generar una nueva capa de información, fruto de los diferentes

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

análisis efectuados y que ejercía la función de capa resumen de las áreas que deberían soportar un mayor impacto visual a causa de la implantación del parque eólico.
Cabe destacar, una vez finalizado el proyecto, que no se han tenido en cuenta, debido a las limitaciones de las herramientas utilizadas, los aspectos climáticos que pueden desvirtuar en algunas condiciones climáticas concretas, los resultados emitidos y que se desprenden del proyecto, como puede ser por ejemplo, la presencia de nieblas, nubes bajas que cubran las partes culminantes de la sierra, o períodos de lluvias torrenciales. En el presente estudio tampoco se tuvieron en cuenta ciertos obstáculos naturales (altura de la vegetación) así cómo ciertos obstáculos antrópicos (altura de las construcciones).
El resultado final del análisis se completó con la modelación en tres dimensiones del área de estudio, realizando diferentes vuelos virtuales y dinámicos en la zona afectada por la implantación del parque eólico.

Palabras Clave: *Serra de l'Auleda, SIG, Evaluación de Impacto Ambiental, parque eólico, aerogeneradores, cuencas visuales, líneas de visión, vuelos virtuales.*

ABSTRACT

This project born from the need to evaluate the visual impact that the construction of a wind park can suppose. This park will be build in a mountain know as Serra de l'Auleda, in La Jonquera (Spain). This city is located at hne north of Spain near the French boundary.
Based on a Digital Elevation Model of the area, there were evaluated within different viewsheds and lines of sight with the purpose for evaluate the visual impact that can suppose the existence of twelve wind generators over the mountains top.

Keywords: *Serra de l'Auleda, GIS, Ambiental Impact Evaluation, Wind Park, Wind generator, Viewshed, lines of sight, virtual flights.*

ASPECTOS PRELIMINARES DEL PROYECTO

El proyecto, que se presenta en el marco del XI Congreso MCSIGT de Murcia, tiene por objeto presentar los resultados que se desprenden del informe sobre el impacto visual debido a la futura implantación de un parque eólico de doce aerogeneradores en lo alto de la Serra de l'Auleda –que oscila entre los 620 y 778 metros de altitud respecto al nivel del mar– dentro del término municipal de La Jonquera, al norte de la provincia de Girona. Dicha evaluación de impacto visual se realizó por voluntad expresa del Ayuntamiento de La Jonquera (Girona) y de la empresa concesionaria del parque eólico (Energia i Vent S.A.).

Para tal fin, evaluar y analizar dicho impacto, se utilizó un Sistema de Información Geográfica y un conjunto de herramientas propias de los análisis espaciales clásicos en un SIG, entre los cuales caben destacar las cuencas visuales y las líneas de visión entre dos objetos

determinados. Para el desarrollo del proyecto se utilizó el software *ArcView 8.2 y 3.2* con las extensiones *Spatial Analyst* y *3D Analyst* así como el software Arc/Info 8.0.2 (*Environmental Systems Research Institute*).

A lo largo de esta comunicación se irán desglosando todos los pormenores del análisis efectuado, pero, previo a ello, deberíamos destacar algunos aspectos que a la postre resultarán de gran validez e interés para contextualizar los resultados finales obtenidos.

En primer lugar, debe apuntarse que, para la delimitación del área de estudio, se tuvo en cuenta todo el espacio o territorio contenido en un radio de 15 kilómetros tomando como punto de origen la ubicación del parque eólico. Este ámbito territorial o alcance máximo del área de estudio fue determinada por parte de la empresa propietaria del parque eólico, al considerar que el impacto visual sobre el espacio que quedaba fuera de este ámbito territorial así definido, sería mínimo. Este radio de 15 kilómetros desde el parque eólico, además, se subdividió en rangos de 5 kilómetros de radio, y se analizó y evaluó el impacto para cada una de las tres zonas: para una distancia de hasta 5 kilómetros, 10 kilómetros y 15 kilómetros. La delimitación de estas tres zonas responde estrictamente a criterios de impacto visual, considerándose el primer radio como de incidencia visual alta, el segundo de incidencia media y el tercero de incidencia baja.

Figura 1. Mapa de situación

De este modo, dicho proyecto de evaluación de impacto visual se realizó para los municipios de Agullana, Biure, Boadella d'Empordà, Cabanes, Cantallops, Campmany, Darnius, Espolla, Garriguella, La Jonquera, La Vajol, Llers, Maçanet de Cabrenys, Masarac, Mollet de Peralada, Peralada, Pont de Molins, Rabós, Sant Climent Sescebes, Sant Llorenç de la Muga, Terrades y Vilamaniscle. Todos estos municipios pertenecen a la comarca de l'Alt Empordà (Girona). Debido a la implantación del parque eólico en territorio Español, se desestimaron aquellos municipios o territorio que, aún estando contenidos dentro de una rango de 15 kilómetros a partir del parque eólico, administrativamente, pertenecían al Estado Francés.

En segundo lugar, cabe destacar que, para la realización del análisis visual no se han tenido en consideración determinados obstáculos visuales (vegetación, infraestructuras de carácter antrópico), ni tampoco factores climáticos externos que pueden tener lugar y, en consecuencia, desvirtuar relativamente algunos de los resultados expresados en este informe. A lo largo de la presente comunicación, todos estos aspectos serán tratados con mayor profundidad y detalle.

Por último comentar que, la cartografía base utilizada para realizar este proyecto ha sido el mapa topográfico 1:50.000 del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). En concreto, se ha trabajado sobre las hojas 219, 220, 257 y 258 de la serie anteriormente mencionada. A partir de esta cartografía, se ha generado un modelo digital del terreno (MDT) o Tridimensional del área de estudio, modelo que ha sido la base sobre la cual se ha sustentado la mayor parte de los análisis visuales del informe.

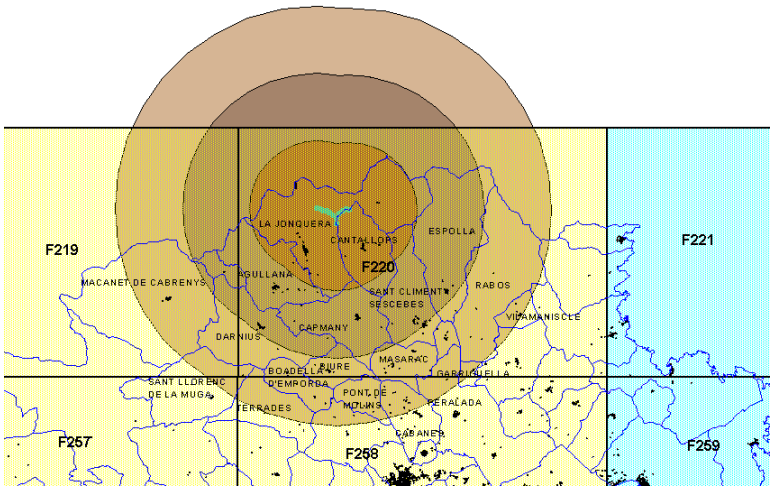


Figura 2. Área de estudio

En la Figura 2 podemos observar el área sobre la cual se ha realizado el estudio, diferenciando mediante tres anillos concéntricos en tonos marrones, aquellas zonas que se encuentran a 5, 10 y 15 kilómetros de distancia del parque eólico proyectado. También puede observarse, en amarillo, la referencia o número de las hojas del mapa topográfico 1:50.000 del Institut Cartogràfic de Catalunya utilizadas para este proyecto (véase anexo de figuras).

CREACIÓN Y INTEGRACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE BASE

Como ya se ha comentado con anterioridad, la cartografía base, sobre la que se ha asentado todo el proceso analítico del proyecto, es el mapa topográfico digital 1:50.000 del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), que presenta una equidistancia de curvas de nivel igual a 20 metros. Con estas curvas de nivel o isolíneas, juntamente con los valores en altura de las cotas

altitudinales que conforman esta capa de información vectorial y los vértices geodésicos, se generó un modelo digital del terreno o tridimensional del área de estudio. Este proceso se ha llevado a cabo con el software Arc/Info. Después de realizar la limpieza topológica pertinente sobre la capa vectorial, se ha generado un TIN (*Triangulated Irregular Network*), es decir, se ha modelado y representado la superficie y relieve del área de estudio como un conjunto de triángulos contiguos no superpuestos. La particularidad de esta capa generada es que nos remite información relativa al relieve de la zona y cualquier punto de este TIN contiene información alfanumérica de altitud. La estructura topológica del TIN, además, almacena en una lista los nodos (3) de cada uno de los triángulos o caras que conforman esta capa de información y almacena también datos acerca de las caras de los triángulos adyacentes. Este aspecto resultará interesante para realizar el análisis de visibilidad (cuencas visuales y líneas de visión).

Digitalización e integración de información en un SIG

Una vez generado el TIN, se procedió a la digitalización e integración de capas georreferenciadas de información, tales como la ubicación de los aerogeneradores, infraestructuras de comunicación, puntos de interés, límites municipales, las áreas urbanas y el topográfico 1: 50.000 del ICC en formato raster.

Para la digitalización de los aerogeneradores se introdujeron las coordenadas exactas de cada uno de ellos, mientras que su tabla alfanumérica se completó con la asignación de un identificador único, consistente en un número de aerogenerador previamente asignado y que va del uno al doce. También se introdujeron las coordenadas UTM de cada elemento, así como la altura mínima (altura de la base) y máxima sobre el nivel del mar o coordenada Z de cada aerogenerador.

ANÁLISIS VISUALES

Dos han sido los análisis básicos que se han desarrollado en el seno de este proyecto: Cuencas visuales y líneas de visión. Estos análisis se han realizado desde diferentes puntos previamente definidos dentro del radio de afectación visual establecido en los prolegómenos del proyecto. Este radio de afectación era de 15 kilómetros.

Así pues habiendo definido y digitalizado en sus coordenadas exactas todos y cada uno de los aerogeneradores, además de los puntos de interés, infraestructuras y áreas urbanas, se procedió propiamente al análisis visual.

Determinación de cuencas visuales

Dicho análisis se realizó calculando la extensión en hectáreas de todas aquellas áreas que eran visibles desde cada uno de los aerogeneradores para cada uno de los rangos, intervalos o perímetros definidos (5, 10 y 15 kilómetros). Además del área visible desde los diferentes puntos de observación, también se cuantificó el porcentaje de territorio avistado desde cada ae-

rogenerador en relación al total de la superficie. Todos los cálculos se realizaron basándose en el modelo tridimensional previamente generado. Para obtener el resultado final de este análisis se tuvo en cuenta la altura máxima del punto de observación (aerogeneradores) y la altitud de cada punto del territorio además de contemplar la orientación de las laderas, …

Para la obtención de las cuencas visuales se calcularon los perímetros de forma individualizada para cada aerogenerador, dado que su diferente ubicación hacía variar el perímetro en función de la cuenca visual considerada.

El cálculo de la cuenca visual se realizó para cada aerogenerador y perímetro, resultando un total de 36 cuencas visuales (12 aerogeneradores por 3 perímetros cada uno) o, lo que es lo mismo, generando un total de 36 nuevas capas de información que se agruparon en 12 mapas como el que se muestra en la figura 3.

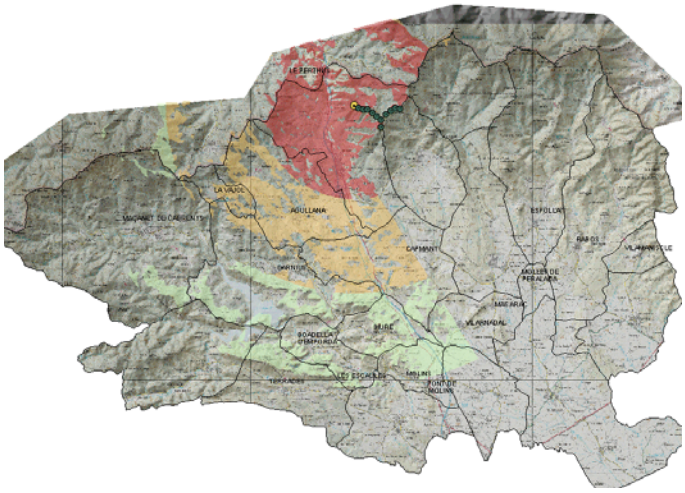


Figura 3. Análisis de cuenca visual desde el aerogenerador número 1

Como puede observarse en la figura 3 (Anexo de figuras), las áreas que son visibles desde el aerogenerador en cuestión se resaltan en color rojo si éstas se encuentran en un radio de 5 kilómetros o perímetro de impacto visual alto, tomando como punto de origen el aerogenerador número 1. En color anaranjado se puede observar la superficie visible en un radio de 10 kilómetros (impacto visual medio) y, en color verde, las que son visibles en un radio de 15 kilómetros (impacto visual bajo).

Los resultados del cálculo de las cuencas visuales fueron resumidos en una tabla que contiene la superficie en hectáreas de las cuencas visuales de cada aerogenerador y el porcentaje que representa sobre el área de cada perímetro y el área total de la zona de estudio.

A partir de estos 12 mapas (uno para cada uno de los aerogeneradores) se generó una nueva capa, resultante de la superposición de las 36 anteriores. En otras palabras, lo que se pretendía era la creación de un mapa resumen del impacto visual provocado por la implantación del parque eólico. Para realizar esta operación, paso previo a cualquier tipo de análisis, se procedió

a la rasterización de las capas que mostraban el análisis de visibilidad mediante la extensión *Spatial Analyst*. Una vez realizada esta transformación se procedió a la suma de las diferentes capas de información mediante la calculadora raster. Dado que las cuencas visuales de cada aerogenerador tienen un valor 1 para las áreas visibles y 0 para las no visibles, la suma de todas da como resultado una nueva capa raster en la cual el valor de cada píxel viene dado por el número de cuencas visuales que se solapan, es decir, por el número de aerogeneradores visibles desde el área ocupada por dicho píxel.

El resultado final fue un mapa donde se muestra la suma de los diferentes espacios visibles desde el parque eólico y paralelamente nos informa del número de aerogeneradores desde los cuales podemos observar un determinado espacio (Figura 4). Sobre este mapa se colocó como referencia la capa de perímetros de distancia. Como se ha comentado anteriormente, se calcularon de forma individual para cada aerogenerador. Los perímetros insertados en este último mapa se han calculado en base a la extensión máxima, resultado de la unión de los radios o perímetros de todos los aerogeneradores que componen el parque eólico.

De este último mapa se derivó otro, que presenta una ampliación, a mayor escala o detalle, de la suma de cuencas visuales en el área de impacto visual alto o perímetro de 5 Km.

A partir de este mapa se realizó una tabla que contienen información acerca de la superficie porcentual y en hectáreas, según el número de aerogeneradores visibles.

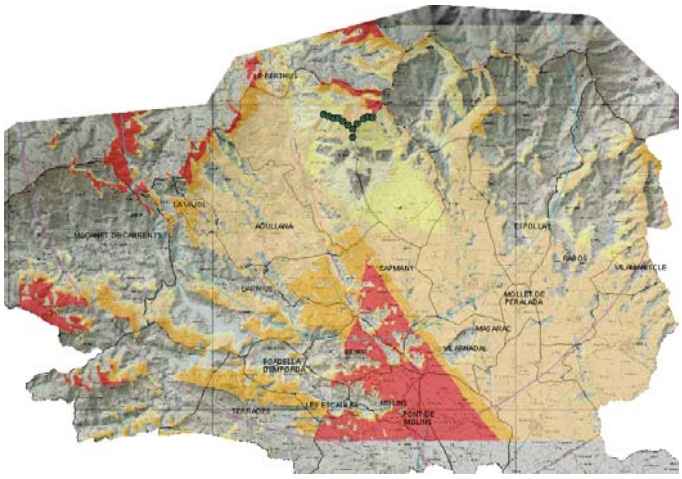


Figura 4. Áreas representadas en función del número de aerogeneradores desde los cuales son vistas.

Determinación de las líneas de visión

La segunda parte del estudio consiste en el análisis y cálculo de la visibilidad de los aerogeneradores desde unos puntos y enclaves determinados del territorio sobre el cual se ha trabajado. En esencia, se calculó si un determinado aerogenerador era visible desde un punto

concreto. Para ello, se realizaron un total de 336 líneas de visión entre 28 puntos de interés o puntos de observación para cada uno de los aerogeneradores.

Los puntos que se consideraron para tal análisis además de los propios aerogeneradores, fueron todos los núcleos de población existentes dentro del radio máximo de impacto visual definido (15 kilómetros), tres puntos kilométricos de la autopista AP7 –situados a 5, 10 y 15 kilómetros respectivamente– calculados a partir de la posición del aerogenerador número 7 (su situación es la más central dentro del ámbito del parque eólico), y cuatro puntos que, por sus características o singularidades debieron tenerse en cuenta: ermita de Santa Llúcia, Puig Neulós, Dolmen del Coll de Medàs y Estanys de Canadal.

Para la realización de los análisis de líneas de visión se consideraron ciertos aspectos básicos, como son las respectivas alturas del elemento observado (aerogeneradores) y de los puntos de observación. Para el primer caso, se asignó un valor de 60 metros equivalentes a la altura de los aerogeneradores, mientras que, como valor del observador, se asignaron 1,75 metros, medida equivalente a la altura media de una persona. Todos los análisis relativos a las líneas de visión se efectuaron mediante la extensión *3D Analyst* del software *SIG Arcview 3.2*.

Los puntos de observación y objetivo de las diferentes líneas de visión se fijaron y localizaron a partir de sus coordenadas. En el caso de los puntos observados (aerogeneradores), al tratarse de una información de tipo puntual, disponíamos de la coordenada UTM de la localización exacta de cada uno de ellos. En el caso de los núcleos de población, se digitalizó como punto de observación el área central del núcleo. El número de aerogeneradores visibles desde un núcleo de población puede variar sensiblemente en función la posición del observador, especialmente si este núcleo se encuentra en un área especialmente accidentada. Todo esto, al margen de los obstáculos visuales, que no se han tenido en cuenta en el presente estudio y que en el caso de áreas urbanas cobran una notable importancia. Esto significa que las posibilidades de trazar diferentes líneas de visión son en el mundo real infinitas. Como corresponde a los

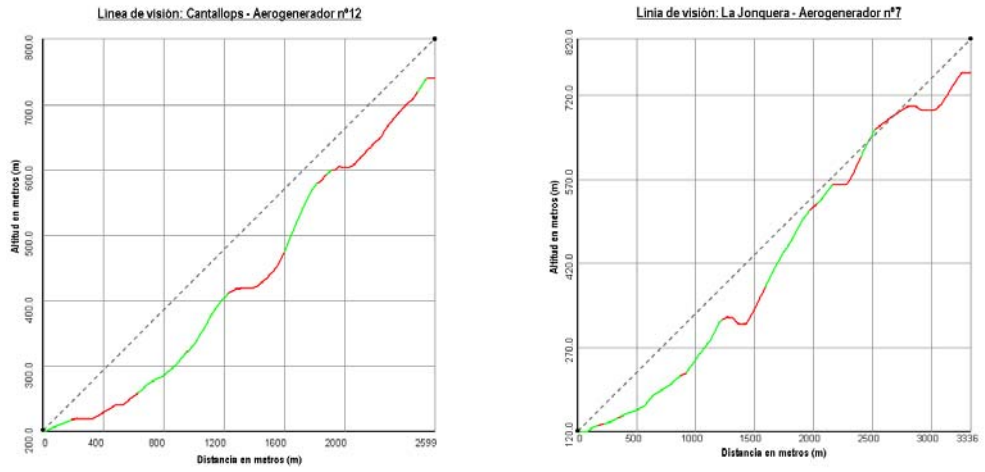


Figura 5. Líneas de visión entre núcleos de población y los aerogeneradores.

análisis SIG y a la cartografía en general, para la realización del informe se debió simplificar la complejidad del mundo real y, de forma coherente, tomar como punto de observación genérico un espacio concreto que pudiéramos ir asignando sin más problemas en cada uno de los núcleos de población, fuera cual fuera su estructura.

Para el cálculo de las líneas de visión fue preciso obtener previamente las coordenadas UTM de cada punto de observación. Esto se hizo mediante un *script* disponible en ArcView 3.2 llamado *addxycoor.ave*, el cual calcula las coordenadas de cada punto y las añade como un atributo de la base de datos de la capa.

Una vez obtenidas las coordenadas se procedió a determinar la visibilidad de los aerogeneradores desde los diferentes puntos de interés. Para tal fin se pensó en utilizar la herramienta *Create Line of Sight* (crear línea de visión) de ArcView 8.x. y que consiste en hacer un clic con el ratón sobre el punto donde se sitúa el observador y otro clic sobre el punto donde se sitúa el objetivo, teniendo como base un modelo digital del terreno. En la Figura 5 se muestran dos ejemplos de líneas de visión desde los municipios de Cantallops y La Jonquera hasta dos aerogeneradores concretos.

Si nos fijamos en la Figura 5, la línea irregular nos muestra información visual y gráfica del perfil existente entre el punto de observación y el objeto observado. Además, nos facilita información acerca de la visibilidad o invisibilidad de cualquier punto que se encuentre en la línea de visión que se ha definido. Mediante color verde se nos muestran aquellas zonas que quedaran visibles a nuestra observación en función de la altura del observador y del relieve de la zona mientras que, en color rojo, se nos muestran aquellas porciones de territorio que quedan ocultas a nuestra visión (Anexo de figuras). Son aquellas zonas que no podemos ver desde nuestra posición concreta.

En la misma figura podemos apreciar mediante una línea discontinua, la línea de visión entre ambos puntos definidos. Esta herramienta presenta el inconveniente de que a la hora de fijar el punto del observador y del objetivo se debe hacer a ojo y de forma imprecisa sobre el mapa. Por otro lado y como puede apreciarse, la línea de perfil, en su parte superior no llega jamás a conectar con la línea de visión pues, como se ha comentado con anterioridad, la altura máxima del objeto observado se encuentra a 60 metros por encima de la cota altitudinal máxima. Por tanto, no informa de forma explícita si éste es visible o no.

Los inconvenientes de esta herramienta se resolvieron con una extensión llamada *Visibility*, la cual sólo está disponible para la versión 3.x de ArcView. Mediante esta extensión los pará-

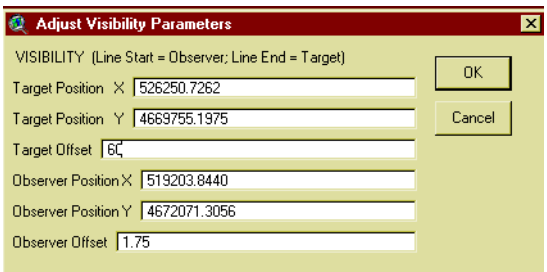


Figura 6. Cuadro de diálogo de la extensión *Visibility*.

metros de la línea de visión pueden ser ajustados a través de una ventana de diálogo en donde se introducen las coordenadas del punto de observación y del punto observado, así como las alturas respectivas de cada punto sobre la superficie.

Una vez ajustados y validados los parámetros con Visibility, se nos muestra un informe, en el que se nos indica si el aerogenerador es visible desde el punto indicado, dados los parámetros utilizados, y generándose a continuación el perfil topográfico ya comentado.

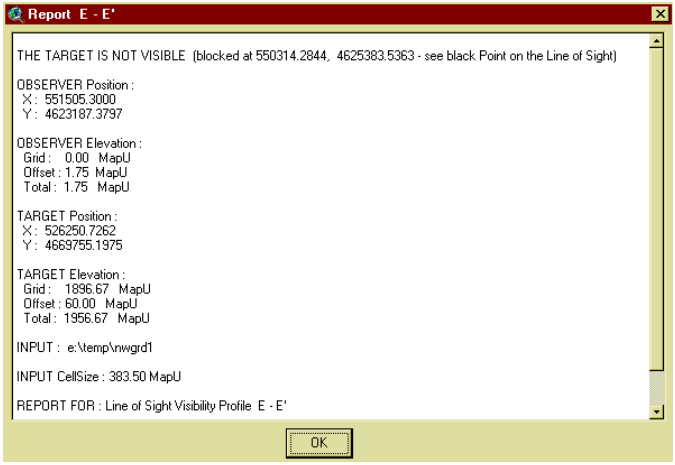


Figura 7. Informe de visibilidad generado con Visibility

Los resultados son introducidos en una tabla de Excel en la cual se indica para cada punto de observación qué aerogeneradores son visibles y cuáles no.

Aerogeneradors visibles des dels diferents punts d'interès

PUNT D'INTERÈS	AERO. 1	AERO. 2	AERO.3	AERO. 4	AERO. 5	AERO. 6	AERO. 7	AERO. 8	AERO. 9	AERO. 10	AERO. 11	AERO. 12	TOTAL
Agullana	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	Si	8
Biure d'Empordà	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0
Boadella d'Empordà	No	No	No	No	No	No	Si	No	No	Si	Si	Si	4
Cantallops	No	No	No	No	No	No	Si	No	No	Si	Si	Si	4
Capmany	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	11
Darnius	No	No	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	Si	4
Les Escaules	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0
Espolla	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0
La Jonquera	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	Si	7
el Portús	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	5
Maçanet de Cabrenys	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0
Masarac	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0
Molins	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0
Mollet de Peralada	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	8
Pont de Molins	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0
Rabós	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0
St. Climent de Sescebes	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	8
Terrades	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0
La Vajol	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	Si	9
Vilamaniscle	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	8
Vilamadal	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	10
Puig Neulós	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	11
Dolmen del Coll de Medàs	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	4
Estanys de Canadal	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	7
Ermita de Sta. Llúcia	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0
Autopista A-7 PK 5Km.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	Si	8
Autopista A-7 PK 10 Km.	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	8
Autopista A-7 PK 15 Km.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	12

Figura 8. Tabla de visibilidad de los aerogeneradores desde los puntos de observación

La figura 8 muestra la tabla final generada a partir del cálculo de las 336 líneas de visión. Para cada punto de interés se muestran en gris claro los aerogeneradores visibles y en gris oscuro los no visibles. En la columna de la derecha se indica el total de aerogeneradores visibles desde un determinado punto de observación.

SIMULACIÓN VIRTUAL DEL PARQUE EÓLICO

Como parte final del trabajo se generó una simulación tridimensional del futuro parque eólico. La modelización virtual de un elemento o infraestructura ayuda a valorar de forma sencilla y didáctica cuál será el impacto futuro de este elemento sobre el territorio. Para la realización de nuestra simulación se utilizó el módulo *ArcScene* de ArcGIS. Este módulo, incluido dentro de la extensión *3D Analyst*, permite hacer sencillas simulaciones tridimensionales siempre y cuando no tengan excesivas pretensiones (para simulaciones más sofisticadas existen en el mercado productos creados específicamente para tal fin). A pesar de que *ArcScene* tiene serias limitaciones, justificables por otra parte, ya que la modelización en 3D no es el objetivo para el que fueron ideados los SIG, sí que dispone de las herramientas básicas para poder crear una serie de escenas en tres dimensiones, que ayudan a imaginar al usuario, no familiarizado con los SIG, cómo será el futuro parque eólico de la Sierra de l'Auleda.

La simulación virtual permite también introducir otros parámetros que no han sido tenidos en cuenta en el cálculo de las cuencas visuales y líneas de visión, como es por ejemplo la presencia de nieblas o la luminosidad.

Figura 9. Ejemplo de modelización del parque eólico de la Serra de l'Auleda con presencia de niebla.

Para la modelización del parque eólico se utilizaron los ortofotomapas color del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), que fueron colocados sobre el modelo digital de elevaciones

para dar textura al relieve de la superficie. Para dar mayor sensación de realismo se añadió la capa de áreas urbanas del topográfico 1:50.000 del ICC a la cual se le aplicó una elevación de 10 m sobre la superficie y se le aplicaron diferentes texturas a las fachadas de los edificios. Lo mismo se hizo con la capa de puntos que representan los aerogeneradores, a los que se aplicó una altura de 60 m sobre la superficie. Por cuestiones de tiempo no se realizó con los bosques y la vegetación.

Con la simulación tridimensional podemos realizar vuelos a vista de pájaro por el área de estudio, los cuales pueden ser grabados en un formato de video. Pero además, permite que un usuario pueda recrear virtualmente el paisaje que podría observar desde el punto que él elija, sin necesidad de realizar ningún tipo de análisis y simulando determinadas condiciones meteorológicas o atmosféricas.

A nuestro entender, la ventaja más importante que supone la simulación virtual es la de poder analizar de forma subjetiva la importancia que cobra la variable distancia en el impacto visual de una infraestructura. Como se ha comentado en líneas anteriores se han generado unos perímetros que delimitan el nivel de incidencia visual del parque eólico. No obstante, se trata de algo puramente teórico que no podemos constatar visualmente. La simulación tridimensional nos permite en este caso ver cómo los aerogeneradores disminuyen de tamaño a medida que nos alejamos de ellos, reduciéndose por tanto el efecto que producen sobre el paisaje, tal y como puede apreciarse en la figura 10.

Figura 10. Dos vistas del parque eólico desde dos puntos situados a diferente distancia.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Gracias al análisis tridimensional, los SIG se han revelado como una potente herramienta para el análisis de impacto visual. No obstante, los datos utilizados para el análisis no dejan de ser una simple abstracción de la compleja realidad del territorio. Es por eso que los resultados obtenidos deben ser pasados por un tamiz que permita valorarlos en su justa medida.

Es evidente que una infraestructura colocada sobre un elevación será vista desde muchos puntos, especialmente si dicha elevación se encuentra rodeada de un territorio muy llano, como es el caso de buena parte del área de estudio. Que un elemento sea visible, no supone

necesariamente un impacto visual o paisajístico, ya que esto es una valoración subjetiva y supeditada a otros factores a la que no siempre puede responder un SIG.

Un ejemplo de ello viene dado por la variable distancia. Es el usuario el que, a la hora de calcular una cuenca visual, tiene que introducir en el sistema la distancia máxima a la que puede ser observado el territorio. El SIG nos informa de lo que podemos ver y lo que no, pero no sabemos a que nivel de precisión. El sistema *a priori* no puede interpretar la agudeza visual y ni precisar cómo ésta se reduce en función de la distancia. Esto se podría simular en parte superponiendo a las cuenca visual raster una capa de distancias en la cual el valor de cada píxel disminuyese a medida que nos alejamos del punto observado. Esto nos daría un resultado más aproximado del verdadero impacto visual de un elemento.

Consideraciones al margen, hemos podido observar en este trabajo que el número de aerogeneradores teóricamente visibles aumenta con la distancia. Esto es algo evidente dado el aumento de la perspectiva que supone alejarnos del punto observado. Desde el PK.15 de la autopista se pueden ver la totalidad de los aerogeneradores, mientras que desde el PK. 5 sólo se observan 8 (figura 8). Este dato se ha de relativizar, sin embargo, por el factor distancia, el cual minimiza el impacto visual a medida que aumenta aquélla. También se da la circunstancia de que el perímetro de 5 Km alrededor del parque, considerado de alta incidencia visual, se encuentra en un área más accidentada, lo cual supone mayores obstáculos visuales que se han de añadir a la menor perspectiva que supone la proximidad al parque eólico. Éste es el caso de poblaciones muy cercanas al futuro parque eólico como La Jonquera o El Portús, donde el número de aerogeneradores visibles es de 7 y 5 respectivamente, aunque esta cifra puede variar en función del lugar del municipio en el que nos situemos.

Como comentario general de los resultados obtenidos podemos concluir que a mayor distancia mayor es el número de aerogeneradores visibles (ver figura 4), aunque esto no debería considerarse como un aumento del impacto visual, ya que el factor distancia ejerce un fuerte poder minimizador de dicho impacto.

Para concluir, cabría resaltar que el análisis de visibilidad del parque eólico debe ser matizado por algunas consideraciones relativas a la precisión de la información de base y a aspectos metodológicos, que, sin duda, distorsionan los resultados obtenidos respecto al que podría ser el impacto visual real.

En primer lugar hay que tener en cuenta que para la obtención del modelo digital del terreno se utilizó la altimetría del topográfico 1:50.000 del ICC, lo cual ya supone de entrada una limitación en la precisión de los resultados obtenidos.

Las consideraciones metodológicas ya se han comentado a lo largo de esta comunicación y hacen referencia al hecho de que sólo se ha tenido en cuenta en el análisis la orografía, no incluyéndose otros obstáculos visuales de origen natural o antrópico, como son la vegetación, las edificaciones o las condiciones meteorológicas.

La no inclusión de estos obstáculos visuales en el análisis tiene, como contrapartida, la ventaja de que los resultados obtenidos reflejan el peor de los escenarios posibles. Se puede afirmar, en definitiva, que el impacto visual del parque eólico no será en ningún caso superior al que reflejan los datos obtenidos en nuestro análisis.

Finalmente, la realización de una simulación tridimensional permite en este caso comple-

mentar el análisis visual a través de una visión subjetiva desde el punto de observación, facilitándonos, de esta forma, la identificación de los puntos de ruptura de la línea de visión, que hacen que un elemento no pueda ser visible desde ese punto. Por otro lado, la simulación nos permite apreciar de forma más realista y clara la importancia que juega la variable distancia en el impacto visual o paisajístico.

REFERENCIAS

Bejarano Moreno, A.; Valencia Oca, J. (2001): "Parques eólicos: Cómo abordar sus Estudios de Impacto Ambiental". *II Semana de Evaluación de Impacto Ambiental*. Madrid.

Mourelle, A. (1999): "Evaluación de Impacto Ambiental de parques eólicos en el norte de la Península Ibérica. *Revista Residuos*, nº 50, Bilbao.

Canter,L.W. (1997): *Manual de Evaluación de Impacto Ambiental*, McGraw Hill, Madrid.

Dangermond, J. et al. (2003): *Advanced Spatial Analysis: The CASA book of GIS*. ESRI, USA.

Environmental Systems Research Institute (1997): *ArcView 3D Analyst*. ESRI, USA.

Environmental Systems Research Institute (1996): *ArcView Spatial Analyst*. ESRI, USA.

Felicísimo, A.M. Curso de Modelos Digitales del Terreno. Disponible en: *http://www.chanekes.org*

Felicísimo, A.M. (1992): *Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicación en las ciencias ambientales*. Universidad de Oviedo. Disponible en: *http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf*

Dinámica reciente de sellado artificial del suelo en espacios fluvio-litorales mediterráneos. El entorno metropolitano de Valencia

J.A. Pascual Aguilar, C. Añó Vidal y J. Sánchez Díaz

Departamento de Planificación Territorial, Centro de Investigaciones sobre Desertificación-CIDE (CSIC-UV-GV). Camí de la Marjal s/n, 46470 Albal (Valencia). Teléfono: 96 122 05 40; Fax: 96 127 09 67, e-mail: juan.a.pascual@uv.es.

RESUMEN

Entre los factores causantes de la degradación del edafosistema en los países más desarrollados, uno de los más importantes es el sellado artificial del suelo producido por la urbanización (tanto residencial como comercial-industrial) y los sistemas de comunicaciones e infraestructuras. En los llanos fluviales y litorales mediterráneos, como los de la Comunidad Valenciana, las transformaciones de los usos del suelo ocurridas recientemente son consecuencia del cambio de sistemas productivos tradicionales a economías muy consumidoras de suelos agro-forestales. Ante dicha situación, la evaluación tanto espacial como temporal producida por el sellado artificial del suelo se convierte en elemento clave para entender el proceso de su degradación y consiguiente pérdida irreversible.

El presente trabajo sintetiza los resultados obtenidos de la dinámica entre los usos artificiales (construcciones, sistemas de comunicaciones, infraestructuras) y los agrícolas-forestales en un período de casi 50 años (de 1956 a 1998) en el entorno metropolitano de la ciudad de Valencia. Para ello se ha utilizado una metodología basada completamente en el uso de Sistemas de Información Geográfica, desde la introducción de datos hasta las salidas gráficas, pasando por la implementación de análisis espacio-temporales. Las principales fuentes de información para dicho estudio han sido cuatro juegos de fotografías aéreas pancromáticas de distintas fechas (1956, 1978, 1991 y 1997).

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

Los resultados obtenidos muestran un alto dinamismo en la expansión de los usos del suelo artificiales, con gran influjo del núcleo urbano central de la ciudad de Valencia. Las tasas de sellado artificial del suelo han pasado de un mínimo del 2,4% –de una superficie total de 1.182 km²– a valores que indican un alto consumo de suelo, pues en 1998 la superficie total sellada era de 203 km², algo más del 17% del área estudiada. Cabe destacar que la mayor parte del sellado artificial se ha realizado sobre suelos de muy alta capacidad agrícola.

***Palabras Clave**: Degradación de suelos, usos del suelo, cubiertas superficiales, SIG, análisis espacio-temporal, entorno metropolitano de Valencia.*

ABSTRACT

Among factors causing soil degradation in developed countries, one of the most important is soil sealing. Artificial soil sealing is produced by urbanisation (residential, industrial, commercial) and transport systems infrastructures. In the Mediterranean alluvial and littoral planes, such as those in the Comunidad Valenciana, recent land use-cover transformations are consequence of the undergoing changes suffered by the shift from traditional productive systems to cash economies that area highly consumers of agriculture and forest soils. Thus, both spatial and temporal evaluation of land consumed by soil sealing is a key element to understand the process of soil degradation and consequently its irreversible loss.

This work synthesised land use-cover dynamics among artificial uses (buildings, communication systems, infrastructures) and agriculture and natural uses in almost a 50 year period (from 1956 to 1997) in the metropolitan area of the city of Valencia, Spain. It has been used an integral Geographical Information Systems methodology, from data gathering and input to development of a spatio-temporal analysis and device outputs. Most relevant data sources for land cove analysis have been four sets of panchromatic aerial photographs at different moments (1956, 1978, 1991 and 1997).

Results show that in such time lapse there has been a highly dynamic process produced by the artificial land uses, with great influence of the original city of Valencia settlement. Soil sealing rates have evolved from an overall minimum presence of 2,4% -of a total surface of 1.182 km²- to values that suggest an important consume of soils: in 1997 the total sealed surface was of 203 km², around 17% of the studied area. It has to bee said that most part of such soil sealing has been produced over soils of very high agronomic land capability.

***Key Words**: Soil degradation, land uses, land covers, GIS, spatio-temporal analysis, Valencian metropolitan area.*

INTRODUCCIÓN

El suelo, recurso natural no renovable a escala de tiempo humano, constituye un elemento fundamental en la planificación y gestión del territorio dado su carácter multifuncional (*Añó y Sánchez,* 2003). Son diversos y complejos los procesos que pueden intervenir en su degradación. Entre ellos, uno de los más alarmantes en Europa, especialmente en las regiones costeras del Mediterráneo, es el sellado artificial del suelo (*soil sealing*) con superficies duras e impermeables ocasionados por la urbanización, la industrialización o la implantación de infraestructuras, *CEC* (2002) (*EEA*, 2002a). Actualmente el impacto de este proceso está poco estudiado pese a suponer un factor importante de pérdida de recursos, (*Hasse y Lathrop,* 2003).

Uno de los principales causantes de la degradación por sellado artificial es el cambio de usos del suelo provocado por el crecimiento urbano (*EEA*, 2002a). Se han efectuado diversos estudios que analizan las consecuencias del crecimiento urbano, ya sea utilizando fuentes indirectas como la dinámica demográfica (*Plan Bleu*, 2001), o bien realizando un análisis y un seguimiento espacio-temporal de los cambios en los usos del suelo. Entre estos últimos proyectos sobresale el MURBANDY/MOLAND (*EEA*, 2002b), el cual, partiendo de las bases generales establecidas en el proyecto CORINE *Land Cover* (*EEA*, 2000), aborda detalladamente el análisis de la dinámica de usos del suelo en general (MOLAND –*Monitoring Land Use Changes*–) y particularmente de las cubiertas superficiales en las áreas urbanas (MURBANDY –*Monitoring Urban Dynamics*–). A partir de la comprensión de las dinámicas de cambio en las ciudades europeas analizadas, entre las que no se incluye ninguna aglomeración del litoral mediterráneo español, el proyecto MURBANDY pretende, además, desarrollar escenarios de crecimiento futuros con el fin de generar estrategias de desarrollo sostenible (*Fricke y Wolff*, 2002). Sin embargo, estos estudios se concentran sobre todo en la propia dimensión territorial del fenómeno de expansión urbana. Ninguno de ellos aborda la problemática del consumo del recurso edáfico, en concreto su pérdida por sellado artificial.

En la Comunidad Valenciana, al igual que en gran parte de la franja mediterránea, son los llanos aluviales las zonas que han mostrado con mayor virulencia en su paisaje los cambios socioeconómicos recientes. Durante la segunda mitad del siglo XX se introdujeron notorias modificaciones en las estructuras productivas, alcanzando a la propia composición del paisaje (*Pascual Aguilar*, 2002), por el crecimiento de la superficie urbana y/o urbanizada por la industria (*Gozálvez Pérez,* 1971), el turismo (*Quereda Sala*, 1979), la aparición de segundas residencias cercanas a las grandes ciudades (*Miranda Montero,* 1985), o por una combinación de varios de estos factores (*Hermosilla Pla,* 1993).

La ciudad de Valencia y su entorno metropolitano son, dentro del marco territorial de la Comunidad Valenciana, ejemplo de la confluencia de factores (poblacionales, económicos, administrativos) en el cambio de la fisonomía del territorio. Es por ello que se toman como modelo para explicar la dinámica espacial y temporal de los cambios en los llanos aluviales. Por medio de la dimensión espacial se pretende dar respuesta a la estructura de localización de los cambios, el dónde; con la temporal se identifican las tasas de transformación, el cuándo.

El área de estudio se localiza en el sector centro-oriental de la provincia de Valencia

(Figura 1). Delimitada a partir de características ambientales (topográficas e hidrológicas), está constituida por dos cuencas de medio tamaño que, junto a la cuenca baja del río Turia, conforman los llanos de inundación litorales en los que se asienta la ciudad de Valencia. Contexto general en el que se distinguen varias unidades de relieve (*Pérez Cueva,* 1988), entre las que destacan (1) el sector montañoso donde se originan las dos cuencas autóctonas (entre los 1.050 y 400/500 m s.n.m.), con mayores pendientes, se caracteriza por un roquedo calizo; (2) el área central (entre los 400/500 y 250/275 m.s.n.m.), con pendientes moderadas, principalmente levantada sobre materiales terciarios, está caracterizada por un frente de abanicos aluviales y sistemas de glacis; (3) la zona oriental, prácticamente llana, con algunos relieves residuales destacados sobre materiales cuaternarios del llano de inundación litoral.

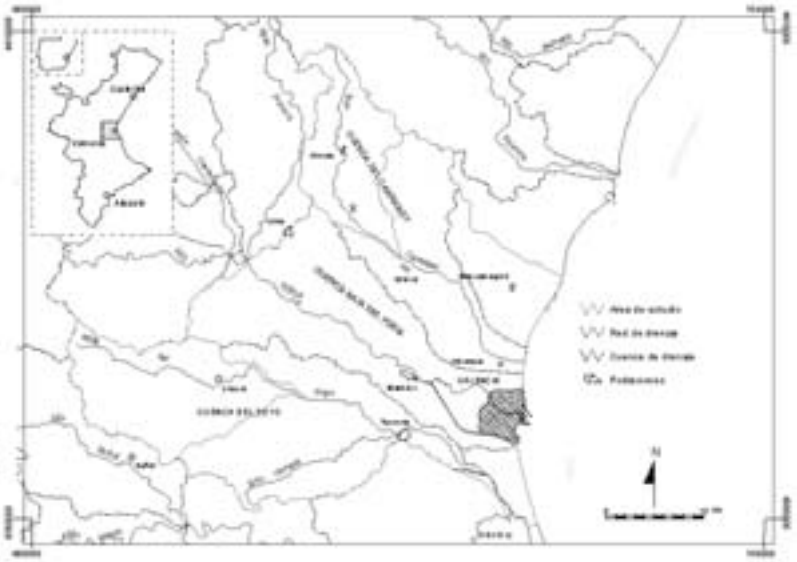


Figura 1. Ciudad de Valencia y entorno metropolitano analizado.

Tradicionalmente, estas unidades de relieve han sido espacios determinantes en la localización de las actividades humanas y, por ende, en la ubicación de los principales usos del suelo: el dominio montañoso era el ámbito de los usos forestales, en la franja de transición se localizaban mayoritariamente los cultivos de secano y en los llanos litorales, además de asentarse los principales núcleos de población, se encontraban, en los suelos más fértiles de la zona, los cultivos intensivos de regadío. Sin embargo, a pesar de las limitaciones impuestas por el relieve, los cambios de usos del suelo son similares a los ocurridos en las últimas décadas en la zona geográfica en la que se encuentra (*Tortosa Pastor*, 1994); siendo su proximidad al área metropolitana de Valencia un elemento determinante en las transformaciones de usos del suelo ocurridas desde 1956 (*Pascual Aguilar,* 2002).

METODOLOGÍA

La estructura metodológica se ha desarrollado en un entorno SIG vectorial (*Burrough y McDonnell*, 1998). El proceso ha seguido tres fases principales (Figura 2), desde la identificación de las fuentes y el tipo de dato a obtener, hasta el análisis y presentación de resultados.

Dos tipos de fuentes han sido utilizadas en el proceso de incorporación de información en el SIG: cartografías (digitales y analógicas) y fotografías aéreas. Las primeras han consistido en el mapa topográfico digital a escala 1:10.000 de la Comunidad Valenciana (constituyendo la fuente base para la georreferenciación de las distintas capas temáticas) y mapas de suelos. Para la construcción de capas que reflejen la dinámica de los usos del suelo, y principalmente los que producen sellado artificial del medio edáfico, se han utilizado cuatro juegos de fotografías aéreas correspondientes a las fechas de 1956, 1978, 1991 y 1997, esta última sirvió como imagen de referencia por lo que, combinada con el trabajo de campo, permitió la reconstrucción de los usos del suelo en 1998.

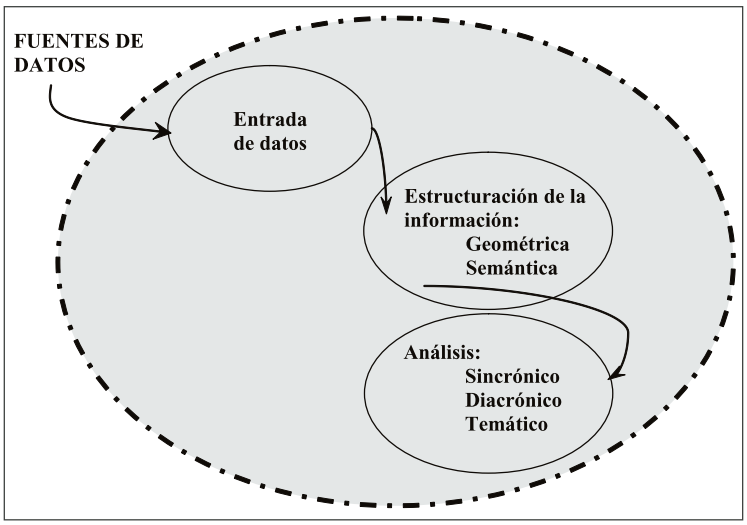


Figura 2. Esquema metodológico SIG para el análisis temporal del sellado del suelo.

Las fotografías aéreas fueron escaneadas e integradas en el entorno SIG (georreferenciadas) utilizando una serie de puntos de control común determinados en el mapa topográfico digital. La extracción o digitalización de los elementos de interés se realizó mediante un procedimiento convencional de fotointerpretación (*Taylor et al*., 2000).

En una segunda fase, se estructuraron las bases de datos semánticas (definición de leyendas) y las geométricas (extracción y posterior digitalización de los elementos, tanto de los mapas de suelo como de las fotografías aéreas). La leyenda edáfica se basa en el sistema de clasificación *FAO-UNESCO* (1988); mientras que la utilizada para los usos del suelo obedece a criterios locales orientados por la leyenda CORINE *Land Cover* (*EEA*, 2000).

Son tres los criterios de análisis tenidos en cuenta. En primer lugar se abordó uno sincrónico de la distribución espacial de los usos del suelo para cada una de las fechas cartografiadas. Con él se determina más concretamente la estructura del sellado artificial en la superficie y en un momento dado. Con el análisis diacrónico se representa el proceso en la secuencia temporal, es decir los cambios en el tiempo y la dinámica en el espacio. Asimismo se realizó un cruce cartográfico (análisis temático) entre los mapas de sellado artificial y los de suelos para establecer las tendencias espaciotemporales de pérdidas por unidades taxonómicas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En relación con los usos del suelo a lo largo del período analizado destaca el drástico retroceso de la agricultura de secano (Cuadro 1). En 1956 ocupaba casi la mitad, el 47,1% de la superficie (118.202 Ha), mientras que en 1998 se había reducido al 18,1%. El proceso y el ritmo de pérdida del secano arbóreo (algarrobo, almendro y olivo) y no arbóreo (mayoritariamente vid) son muy similares con ratios interanuales de descenso que oscilan entre 0,6 y 0,9, por lo cual cabe pensar que los factores de su retroceso son muy semejantes para ambos. Entre 1956 y 1998 el secano en general se ha reducido a casi un tercio de la extensión inicial; sin embargo, en 1978 se observan las mayores pérdidas, consecuencia de la gran expansión de los cítricos y del fenómeno de las segundas residencias. La continua reducción de los cultivos de secano ha invertido su importancia como uso del suelo agrario (*Pascual Aguilar*, 2002).

Cuadro 1. Valores absolutos, relativos y ratios interanuales de cambios de usos del suelo.

Usos del suelo	1956		1978		Ratio 1978/ 1956	1991		Ratio 1991/ 1978	1998		Ratio 1998/ 1991
	Superficie		Superficie			Superficie			Superficie		
	Ha	(%)	Ha	(%)		Ha	(%)		Ha	(%)	
Urbano	2.858	2,4	15.116	12,8	5,3	19.816	16,8	1,3	20.349	17,2	1,0
R. huerta	22.737	19,2	12.823	10,8	0,6	8.896	7,5	0,7	7.126	6,0	0,8
R. Arroz	2.689	2,3	1.845	1,6	0,7	1.784	1,5	1,0	1.802	1,5	1,0
R. Cítricos	8.658	7,3	23.634	20,0	2,7	31.012	26,2	1,3	39.250	33,2	1,3
S. no arbolado	17.420	14,7	14.476	12,2	0,8	9.199	7,8	0,6	6.761	5,7	0,7
S. arbolado	38.326	32,4	21.192	17,9	0,6	18.309	15,5	0,9	14.694	12,4	0,8
M. matorral	16.687	14,1	14.204	12,0	0,9	17.724	15,0	1,2	23.756	20,1	1,3
M. pinar	8.827	7,5	14.911	12,6	1,7	11.461	9,7	0,8	4.464	3,8	0,4
	Superficie total = 118.202 Ha										

En la dinámica de los usos del regadío, se comprueba el distinto comportamiento de los cultivos de huerta y los cítricos. Si se exceptúa la reducción entre 1956 y 1978, el arrozal

puede considerarse como un uso estable. Por contra, los cultivos hortícolas, con una superficie cercana al 20% en 1956, quedan reducidos al 6% en 1998, esto es, menos de un tercio de la extensión original. En este caso, la expansión de los núcleos de población y de los cítricos se ha hecho también en detrimento de los espacios de huerta.

Al igual que los cultivos de arroz, las zonas de vegetación natural, el monte, se han mantenido estables en sus dimensiones a lo largo del período estudiado (entre el 21 y 25% de la superficie total). El pequeño crecimiento registrado entre 1956 y 1978 puede ser atribuido, en primer lugar, a un reajuste de las superficies de secano marginales abandonadas que fueron colonizadas por la vegetación natural y, en segundo lugar, a la repoblación forestal desarrollada a partir de los años cincuenta. Sin embargo, las grandes fluctuaciones de masas arboladas a no arboladas ocurridas con posterioridad a 1978 deben interpretarse de manera diferente. Aumento de la biomasa (asociada con mayor combustibilidad) y presión humana sobre el medio natural han incrementado el significado de los incendios forestales. De un estado inicial (en 1956) de matorral escaso y de poco porte, se pasa a formaciones boscosas (tras las repoblaciones forestales) y, finalmente, se vuelve a una situación aún más escasa de masa arbolada, consecuencia del incremento de la combustibilidad y de la presión humana sobre el medio.

Por tanto, si en términos generales la superficie de monte no ha variado en el período estudiado, las fluctuaciones entre matorral y pinar han sido considerables. Si sólo se toman los momentos inicial y final de la serie temporal (1956 y 1998 respectivamente), la superficie forestal se ha reducido a la mitad (del 7,5 al 3,8%), convirtiéndose en formaciones de matorral tras los incendios (14,1% en 1956 y 20,1% en 1998).

En suma, para 1998 puede hablarse ya de un momento avanzado del proceso de sustitución de usos, pues ahora predominan los minoritarios en 1956. Dos son los usos que han incidido en el cambio del paisaje en los últimos 50 años: los regadíos citrícolas y, fundamentalmente, las superficies urbanas El uso urbano, un concepto amplio que engloba superficies artificiales construidas, ha mantenido un crecimiento constante desde 1956, cuando sólo cubría el 2,4% del espacio analizado. Con el fenómeno de las urbanizaciones iniciado en los años 70, la superficie considerada como artificial, causante del sellado y, por tanto, de la pérdida irreversible del recurso edáfico, alcanza su tasa de mayor crecimiento al quintuplicarse en 1978 (12,8%).

El proceso de expansión de los usos urbanos continúa; pero, a medida que nos acercamos al presente, se paraliza algo el ritmo (16,8% de la superficie en 1991 y 17,2 en 1998). Factor muy importante es la estructura espacial resultante: en 1956 su ocupación se limitaba a una serie de manchas diseminadas en el espacio, coincidentes mayoritariamente con los núcleos de población tradicionales del área de estudio. Sin embargo, en 1998 se observa un trazado de forma radial a lo largo de las principales vías de comunicación que convergen en la ciudad de Valencia, además de una corona externa, que conforman una mancha cada vez más compacta (Figura 3).

Por tanto, desde 1978 los usos artificiales van perfilándose a partir de una serie de ejes de crecimiento que para 1998 destacan la configuración de una amplia franja con una dirección SE-NW de unos 15 Km. de ancho que se originaría en Valencia. Su trazado subyacente se basa en la estructura anterior de ejes viales, germen inicial que va aglutinando los espacios intermedios dedicados a cultivos, creando un frente de crecimiento y ensanchamiento, hasta su posible total convergencia como usos urbanos.

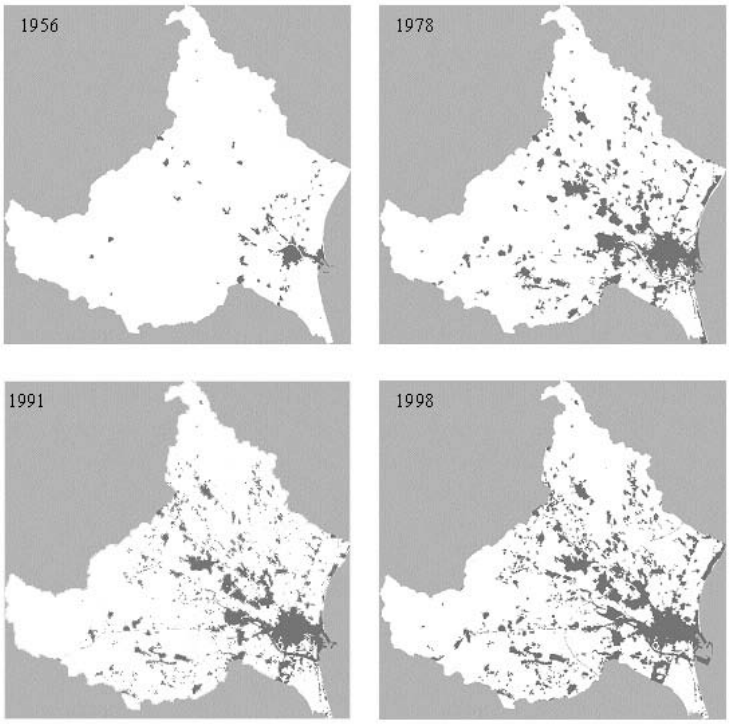


Figura 3. Distribución espacial de la evolución del uso urbano para el conjunto del área de estudio.

El crecimiento urbano de las últimas décadas, con el consiguiente sellado artificial del suelo con superficies duras e impermeables (piedra, ladrillo, cemento, asfalto, etc.), ha provocado en muchos sectores del área de estudio la pérdida prácticamente irrecuperable del recurso edáfico, convertido en mero soporte de las actividades relacionadas con la urbanización, la industrialización o la implantación de infraestructuras ligadas a los distintos medios de transporte. De este modo el suelo pierde su carácter multifuncional. Desde un punto de vista taxonómico las unidades más afectadas han sido los Fluvisoles (Cuadro 2), calcáricos a nivel de subunidad.

La información edáfica (Figura 4) se ha obtenido de los distintos mapas de suelos que la Consellería d'Agricultura de la Generalitat Valenciana viene publicando desde 1995. Esta cartografía, realizada en el marco del Proyecto LUCDEME, clasifica los suelos siguiendo el sistema propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO en su acrónimo inglés), en concreto la versión de 1988 (*FAO-UNESCO,* 1988).

Este sistema de clasificación utiliza como criterios de diferenciación propiedades esenciales e intrínsecas del suelo. Las propiedades clave se han elegido de forma que sean principios aceptados de carácter general sobre la formación del medio edáfico y que además se correspondan con tantas otras características como sea posible. Muchas de ellas son importantes para el uso del suelo y tienen un valor de aplicación práctico ya que permiten predecir el comportamiento de las unidades ante diferentes utilizaciones. Los nombres que reciben los suelos en esta no-

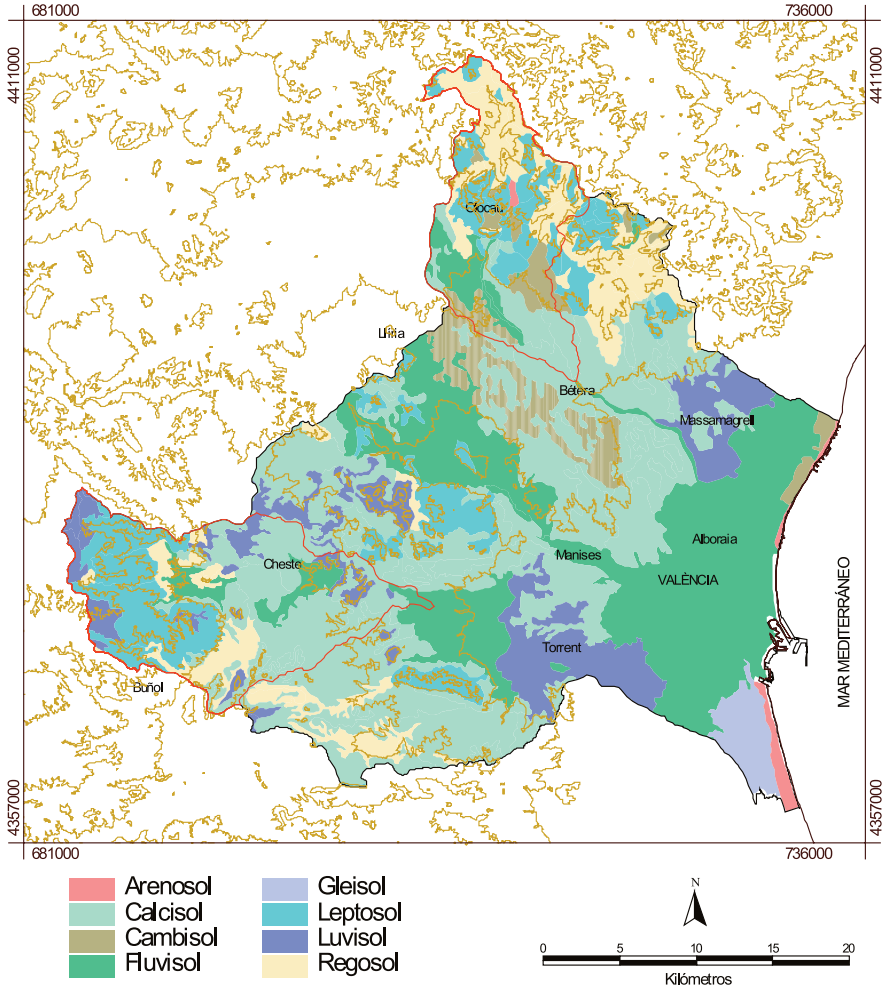


Figura 4. Distribución espacial de las unidades taxonómicas de suelos.

menclatura tienen por objeto resumir en una palabra fácilmente recordable el conjunto de sus características más representativas. Los tipos de suelo que existen en un lugar determinado, al conocerse en función de los factores que han guiado su formación, pueden cartografiarse aunque su presencia no sea continua. Esto sucede, por ejemplo, en Valencia y sus alrededores donde un proceso de progresiva antropización enmascara las características originales del suelo, pero el Edafosistema, más estable que las formaciones biológicas que lo recubren, tiende a mantener las propiedades anteriores, y la velocidad de sus cambios permite servir de registro de acontecimientos pasados y reconstruir los procesos sufridos, de tal manera que la modificación actual de sus propiedades no impiden su identificación (*Antolín et al.*, 1999).

Cuadro 2. Valores resumen de sellado artificial del suelo por unidades taxonómicas edáficas en el período 1956-1998.

Unidad	*Suelo*		*1956*		*1978*		*1991*		*1998*	
	Ha	*%*	*Ha*	*%*	*Ha*	*%*	*Ha*	*%*	*Ha*	*%*
Arenosol	*736,6*	*0,6*	*1,6*	*0,2*	*237,3*	*32,2*	*159,9*	*21,7*	*175,3*	*23,8*
Calcisol	*44.098,0*	*37,4*	*654,6*	*1,5*	*5.796,5*	*13,1*	*8.133,8*	*18,4*	*9.315,6*	*21,1*
Cambisol	*4.222,9*	*3,6*	*14,9*	*0,4*	*520,8*	*12,3*	*924,6*	*21,9*	*1.131,3*	*26,8*
Fluvisol	*28.915,1*	*24,5*	*1.929,8*	*6,7*	*6.502,7*	*22,5*	*7.476,3*	*25,9*	*8.567,8*	*29,6*
Gleisol	*2.037,2*	*1,7*	*1,8*	*0,1*	*90,8*	*4,5*	*117,2*	*5,8*	*98,0*	*4,8*
Leptosol	*14.792,8*	*12,6*	*29,9*	*0,2*	*530,7*	*3,6*	*830,1*	*5,6*	*1.025,5*	*6,9*
Luvisol	*11.532,2*	*9,8*	*160,5*	*1,4*	*720,7*	*6,2*	*1.126,5*	*9,8*	*1.344,5*	*11,7*
Regosol	*11.451,9*	*9,7*	*18,4*	*0,2*	*380,9*	*3,3*	*616,6*	*5,4*	*747,0*	*6,5*

Los Fluvisoles son suelos poco evolucionados que presentan propiedades flúvicas, es decir, se desarrollan a partir de depósitos recientes de origen fluvial, marino o lacustre, que han recibido, a intervalos regulares de tiempo, nuevos aportes de materiales más o menos finos y que incluso pueden recibirlos en la actualidad, imprimiendo un carácter claramente estratificado al perfil edáfico. Por este motivo los contenidos en materia orgánica decrecen irregularmente con la profundidad. En estos suelos carbonatados el espesor efectivo es elevado, la pedregosidad superficial escasa, la permeabilidad y la porosidad son muy altas, la aireación es buena, la textura suele ser equilibrada, el pH básico, la salinidad es baja y los contenidos en materia orgánica, nitrógeno y fósforo son, en general, bajos.

En conjunto estos suelos presentan una capacidad de uso muy elevada; en líneas generales pueden considerarse como los mejores suelos agrícolas de la Comunidad Valenciana (*Añó et al.*, 2002), ya que la falta de humus se palia generalmente con abonado.

CONCLUSIONES

Los fenómenos dominantes a lo largo de los casi cincuenta años analizados han sido la intensificación, implantación de regadíos, y conversión de los usos, transformación de usos agrícolas y forestales a urbanos. Son estos últimos, con sus constantes y amplias tasas de sustitución los que mayor consecuencia ambiental han tenido en los llanos fluvio-litorales del entorno de la ciudad de Valencia.

En primer lugar, el crecimiento urbano está produciendo una desestructuración del paisaje, siguiendo unos ejes norte-sur y este-oeste no homogéneos, que crean bolsas aisladas de parcelas principalmente cultivadas. Dicho fenómeno de estrangulación puede funcionar como un acelerador en potencia de la sustitución de las cubiertas superficiales por las urbanas más agresivas. En segundo lugar, la distribución espacial de los suelos, coincidente en gran medida con

los tres ambientes geomorfológicos de la zona, hace que los que presentan mayor capacidad de uso agrícola (principalmente Fluvisoles) se encuentran también en el ámbito más dinámico de la conversión de unos usos por otros.

En los llanos aluviales del área metropolitana de Valencia predominan los tipos de suelos más fértiles, aquellos que poseen las características idóneas para una utilización agrícola sostenible. Sin embargo, por su localización en las zonas más dinámicas, demográfica y económicamente, representan a las unidades que requieren un nivel máximo de protección frente a la expansión urbano-industrial y turístico-residencial que consumen, de forma irreversible, una cantidad muy elevada de los suelos más productivos.

De este modo, las modificaciones de usos del suelo impuestas sobre todo por los procesos de urbanización, industrialización o el establecimiento de infraestructuras y equipamientos, por regla general imposibles de reconstruir incluso a largo plazo, deberían realizarse analizando previamente las potencialidades y limitaciones del edafosistema, evaluando el impacto sobre la calidad edáfica y su capacidad productiva, y procurando proteger aquellas tierras utilizadas actualmente en su uso más apto. Este último principio debería dictar la planificación racional de usos del territorio, sobre todo si consideramos que la utilización inadecuada del suelo, recurso escaso y no renovable a corto o medio plazo, puede provocar su destrucción o degradación, especialmente en condiciones ambientales mediterráneas que determinan una deficiente capacidad de regeneración o recuperación de los ecosistemas alterados por las actividades antropogénicas.

REFERENCIAS

Antolín, C., Añó, C. y Sánchez, J. (1999): El recurs natural sòl a La Punta. En: *Els valors de La Punta. 18 arguments en defensa de l´horta*. Universitat de València, Valencia, 17-24.

Añó, C., Sánchez, J., Antolín, C. y Goberna, M. (2002). Capacidad y vulnerabilidad de los suelos de la Comunidad Valenciana. *Investigaciones Geográficas* 28, pp.105-123.

Añó, C. y Sánchez, J. (2003): *Orientaciones de Uso Agrario. Una metodología para la planificación de usos del suelo en la Comunidad Valenciana*. Biblioteca de Ciencias, 5. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 129 p.

Burrough, P.A. y McDonnell, R. A. (1998): *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford, 333 p.

CEC (2002): *Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Towards a Thematic Strategy for Soil Protection*. Commission of the European Communities, Brussels.

EEA (2000): *Down to earth: Soil degradation and sustainable development in Europe*. Environment issue series, 16. European Environment Agency, Luxembourg, 32 p..

EEA (2002a): *Proceedings of the Technical Workshop on Indicators of Soil Sealing*. Technical report, 80. European Environment Agency, Copenhagen.

EEA (2002b): *Towards an urban atlas*. Environment issue report, 30. European Environment Agency, Copenhagen.

FAO-UNESCO (1988): *Soil Map of the World. Revised Legend*. FAO, Roma, 115 p.

Fricke, R. y Wolff, E. (2002): The MURBANDY Project: development of land use and network databases for the Brussels area (Belgium) using remote sensing and aerial photography. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4 (1), pp. 33-50.

Gozálvez Pérez, V. (1971): *Crevillente. Estudio urbano y demográfico.* Departamento de Geografía, Universidad de Valencia, Valencia, 133 p.

Hasse, J.E. y Lathrop, R.G. (2003): Land resource impact indicators of urban sprawl. *Applied Geography* 23, 159-175.

Hermosilla Pla, J. (1993): *El camp de Túria y la Hoya de Buñol-Chiva. Accesibilidad, industria y segunda residencia*. Departament de Geografia, Universitat de València, Valencia, 266 p.

Miranda Montero, M. J. (1985): La segunda residencia en la provincia de Valencia. Departamento de Geografía, Universitat de València, Valencia, 260 p.

Pascual Aguilar, J.A. (2002): *Cambios de usos del suelo y régimen hídrico en la rambla de Poyo y barranc de Carraixe*t. Valencia: Servicio de Publicaciones de la Universitat de Valencia, 325.Pérez Cueva, A. J. (1988): *Geomorfología del sector ibérico valenciano. Entre los ríos Mijares y Turia*. Universitat de València, Departament de Geografia, Valencia, 217 p.

Plan Bleu (2001): *Urbanisation in the Mediterranean Region from 1950 to 1995*. Centre d´Activités Régionales, Sophia Antipolis, 56 p.

Quereda Sala, J. (1979): *Benicàssim y la espectacular transformación de su paisaje*. Diputación provincial de Castellón, Castellón, 71 p

Taylor, J. C., Brewer, T. R. and Bird, A. C. (2000): *Monitoring landscape change in the National Parks of England and Wales using photo interpretation and GIS*. International Journal of Remote Sensing 21, 2737-2752.

Tortosa Pastor, F. (1994): *Actividades humanas y medio ambiente en el Área Metropolitana de Valencia. Un estudio cartográfico*. Tesis doctoral, Facultat de Geografia i Història, Universitat de València, Valencia, 1059 p.

Propuesta metodológica de análisis de la contaminación por metales pesados en torno a la red viaria alicantina

I. Meléndez Pastor, J. Navarro Pedreño e I. Gómez Lucas

Grupo de Edafología Ambiental. Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente. Universidad Miguel Hernández, Elche. Avd. Universidad s/n. Edificio Torreblanca. 03202. Elche.

RESUMEN

Se propone y analiza críticamente una metodología de estudio de la contaminación por metales pesados en el suelo, originada por el tránsito rodado en torno a las redes viarias. Se toma como base de trabajo una red vectorial combinándola con modelos matemáticos de dispersión de contaminantes, para determinar las áreas afectadas por posible deposición en el suelo de metales pesados y la intensidad de la misma.

Utiliza como red lineal de referencia el entramado de carreteras situado en el marco referencial de la provincia de Alicante. Dicha red fue previamente digitalizada con un SIG vectorial, utilizando como base ortofotografías aéreas de toda la provincia. Para determinar la difusión de los agentes contaminantes y su posible inclusión en el medio edáfico, se realiza una estimación experimental bajo condiciones ambientales concretas sobre la base de modelos de dispersión de contaminantes y supuestos predefinidos, obteniendo el área sometida a dicha contaminación y los niveles de metales pesados que se alcanzarían en el suelo.

Esto permite detectar las posibles áreas contaminadas, el grado de contaminación y el impacto que supone el tránsito por las carreteras en el entorno cercano, asociado a la categoría de la vía analizada y a la capacidad de tránsito de vehículos en la misma.

Palabras Clave: *SIG, red viaria, suelo, metales pesados, modelos de dispersión de contaminantes.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

A heavy metal pollution methodology of study around road network is proposed, by means of the coordinate application of GIS's and other tools like pollutant dispersion models, for environmental modeling of the risk area of soil-atmosphere interchange.

***Key Words**: GIS, road networks, soil, heavy metals, pollutants dispersion models.*

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es actualmente uno de los problemas ambientales más graves, derivada principalmente de la actividad antrópica desarrollada desde la Revolución Industrial. La contaminación del aire también puede deberse a la emisión de partículas y compuestos químicos, así como diversos tipos de energía, a partir de fuentes naturales como erupciones volcánicas, descomposición de la materia orgánica, aerosoles marinos, etc.

El estudio de las fuentes de emisión, la dinámica de dispersión de los contaminantes y los sumideros, está en continuo avance y revisión, debido a la mejora de las técnicas analíticas y de estudio del Medio Físico, la evolución de los estudios clínicos y epidemiológicos, así como la implementación de medidas legislativas para disminuir la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera.

A pesar de todo, existen grandes incertidumbres todavía a discernir, siendo una de ellas el perfecto conocimiento de los complejos mecanismos y dinámica de dispersión de contaminantes. En este sentido se han realizado grandes avances para determinar modelos matemáticos de dispersión de contaminantes a partir de una o varias fuentes puntuales, gracias en parte a continuos procesos de ajuste empírico. Sin embargo, los modelos matemáticos de dispersión de contaminantes a partir de fuentes lineales simplemente son muchas veces correcciones de los anteriores, no siendo fácilmente asumibles algunas restricciones de partida de los modelos.

El transporte por carretera ha sido y es una de las principales fuentes de contaminación mundial y, el estudio de la dinámica de dispersión de contaminantes originada por esta fuente requiere la realización de modelos matemáticos, que consideren factores como densidad de tráfico, tasas de emisión de los vehículos a motor, condiciones atmosféricas, así con la geometría y orientación de las redes viarias.

Actualmente existen diversos modelos matemáticos que consideran todos esos factores y otros muchos más, permitiendo realizar estimaciones horarias de concentración de contaminantes en diferentes localizaciones dentro del área seleccionada.

Uno de los mayores problemas radica en la dificultad para extrapolar las predicciones de concentración de contaminantes a la cartografía de una región concreta, debido a la deficiente coordinación del software generador de ambos items.

El trabajo que aquí se presenta trata de realizar una aportación a la solución de dicha dificultad, mediante una propuesta metodológica para el desarrollo de un sistema experimental semiautomatizado, capaz de coordinar e intercambiar los resultados de los subsistemas generadores de cartografía y de predicción de concentración de contaminantes. Siendo conscientes de las múltiples dificultades y necesidades de corrección de dicho sistema de coordinación, se exponen algunas de las limitaciones de partida, así como las propuestas de mejora a acometer más urgentemente.

La posibilidad de extrapolar los resultados obtenidos por un modelo matemático de dispersión de contaminantes a un Sistema de Información Geográfica es, sin duda alguna, una potencialidad a explotar, ya que dada la enorme capacidad de los SIG's para realizar análisis espaciales, las aplicaciones de los resultados obtenidos pueden abarcar desde la cartografía de áreas de riesgo para la salud ambiental y humana, a la planificación de infraestructuras o la determinación de posibles causas de enfermedad en estudios epidemiológicos.

El sistema ha sido concebido para calcular la concentración a diferentes distancias y el área de afección, para la posible contaminación por metales pesados presentes en la materia particulada fina y en los hidrocarburos emitidos por los vehículos a motor que circulas por la red viaria de la provincia de Alicante. Como es comúnmente conocido estos contaminantes pueden finalmente transferirse de la atmósfera al suelo mediante deposición seca o húmeda, pudiendo generar en algunos casos graves problemas de contaminación edáfica y de las aguas superficiales y subterráneas por la presencia de ciertos metales pesados en niveles superiores a los de fondo.

SECUENCIA DE TRABAJO

Los principales pasos que se han realizado para generar dicho sistema experimental son los siguientes:

- Generación de la cartografía del área de estudio mediante un SIG (GeoMedia Professional 4.0)
- Creación y puesta a punto del sistema de cálculo del modelo matemático de dispersión de contaminantes.
- Creación un sistema de integración de los resultados para transferencia de datos entre los anteriores subsistemas.

ALCANCE

De los tres grandes bloques de trabajo de la metodología propuesta el alcance es el siguiente.

Cartografía

El marco espacial de referencia en el que ha desarrollado el estudio se corresponde con la red viaria de la provincia de Alicante, adoptándose como base la presentada en el "*Mapa de*

Carreteres. Comunitat Valenciana. 1:350.000. Generalitat Valenciana. Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports", editado en 1998.

Como ya se explicará con mayor detenimiento, la generación de la cartografía se efectuó mediante la digitalización, en un Sistema de Información Geográfica, del resultado de la fotointerpretación de aerofotogramas en formato digital, correspondientes a un vuelo de 1997.

Modelo matemático de dispersión de contaminantes

Se ha adoptado un sistema de calculo para estimar la concentración a diferentes distancias respecto de la red viaria, basado en el modelo gaussiano de dispersión, que es el más comúnmente aceptado. Para el cálculo de la dispersión de contaminantes, se han tomado una serie de restricciones que definen el alcance de las estimaciones:

1. Las concentraciones estimadas se corresponden a un periodo de muestreo de aproximadamente 10 minutos.
2. Las desviaciones verticales y horizontales se basan en la suposición de que el terreno es campo abierto.
3. Las estimaciones de concentración representan sólo los cientos de metros más bajos de la atmósfera.
4. Los valores de las desviaciones verticales son más dudosos que los de las desviaciones horizontales.
5. Las estimaciones están hechas adoptando ciertos parámetros, condicionados por las condiciones atmosféricas más frecuentes que se suelen dar en la provincia de Alicante, con fuerte a moderada radiación solar diurna y noches con escasa a moderada cobertura nubosa.

Para adaptar el modelo matemático al caso de estudio de una fuente lineal, es necesario adoptar una serie de supuestos teóricos de partida:

- Fuente lineal de distancia infinita y emisión continua.
- Dirección del viento normal a la línea de emisión.
- Ausencia de desviación normal horizontal.
- Concentración uniforme en la dirección y para una distancia x determinada.

Sistema de integración de los resultados

Se trata de un sistema semi-automatizado que permite incorporar los resultados numéricos obtenidos, mediante el sistema de cálculo del modelo de dispersión, en el Sistema de Información Geográfica, de tal modo que se puede acceder en éste a los resultados numéricos obtenidos por el primer sistema, permitiendo realizar diversas operaciones de análisis cartográfico, con el fin de representar gráficamente las estimaciones del área de dispersión de contaminantes para una concentración dada.

Para la obtención de nuevos resultados, tan sólo hay que modificar algunos parámetros en el sistema de cálculo, gestionarlos por medio de un sistema de base de datos intermedio, y realizar nuevas operaciones con el SIG, para poder comparar los resultados anteriores con los recién obtenidos.

LIMITACIONES DE PARTIDA

Tras un análisis de la metodología propuesta y de los resultados experimentales obtenidos, se han podido identificar ciertas limitaciones, que se resumen a continuación:

Cartografía

En cualquier trabajo cartográfico existen siempre un cúmulo de errores, determinados por la metodología de trabajo, las herramientas empleadas y el propio operario.

Tras un conocimiento exhaustivo de los posibles parámetros que afectaban a la precisión de la cartografía se concluyó que la mayor fuente de error en la cartografía viene dada por la propia imprecisión del operario en el proceso de digitalización, debido a errores en la localización de los nodos de la estructura vectorial asociados a las propias dificultades en la fotointerpretación de los aerofotogramas.

Una de las mayores dificultades y fuentes de error que se encontraron fue la correcta fotointerpretación de la ubicación de la red viaria en áreas de denso arbolado o a la sombra de taludes de grandes dimensiones (ver Figura 1).

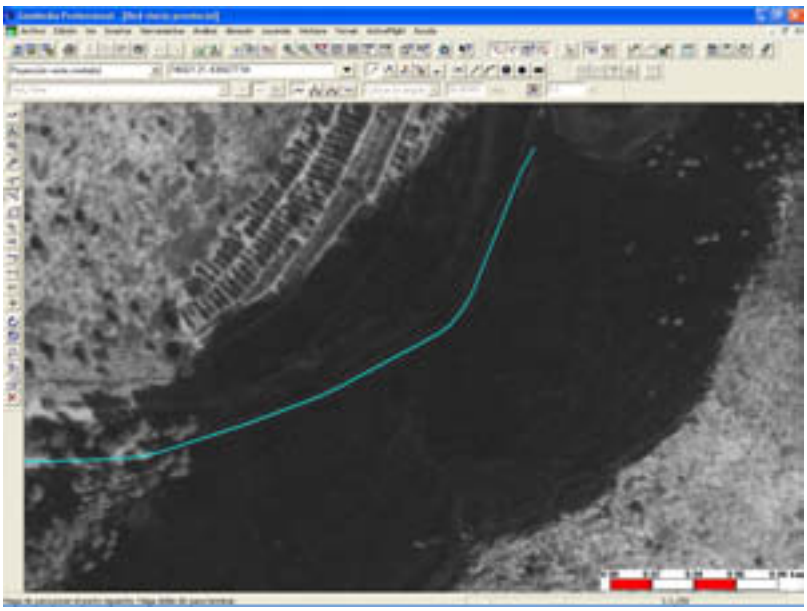


Figura 1. Tramo de carretera totalmente cubierto por la sobra de un talud y el arbolado. Escala 1:1.250

Modelo matemático de dispersión de contaminantes

Las restricciones y supuestos de partida, expuestos anteriormente en el alcance del modelo matemático, infieren las siguientes limitaciones al estudio.

Cuadro 1. Limitaciones del modelo matemático de dispersión de contaminantes.

Restricciones o supuestos de partida	**Afección a las estimaciones del sistema de cálculo del modelo matemático de dispersión de contaminantes**
Periodo de muestreo de 10 minutos	La afección para las estimaciones no es relevante, excepto en el supuesto de que queramos comparar los valores obtenidos con los valores límites de concentración de contaminantes en el aire ambiente marcados en la legislación de diversos países, pues son valores dados para períodos de muestreo de 1 a 8 horas generalmente, lo que implica asumir aún más restricciones para comparar las estimaciones con los valores límite.
Campo abierto	No modeliza la influencia que tienen sobre la dispersión de contaminantes, la orografía y altimetría del terreno, el efecto de pantalla del arbolado y las edificaciones humanas, o incluso el efecto cañón generado por cualquiera de los elementos anteriores.
Estimaciones para la parte inferior de la atmósfera	Las posibles desviaciones respecto a la dinámica modelizada de dispersión de contaminantes, influenciadas por la variación de las condiciones de presión, temperatura, dirección y velocidad del viento conforme se va ascendiendo en altura por la atmósfera, no han podido tenerse en cuenta, por lo que hay que asumir que las estimaciones realizadas sólo van a ser moderadamente fiables para la parte más inferior de la atmósfera (capa límite o *boundary layer*).
Mayor incertidumbre en las desviaciones verticales	Debido a la propia variación vertical de las condiciones atmosféricas, que en campo abierto en general es más acusada que las propias variaciones horizontales, el factor que representa la desviación gaussiana vertical para la modelización de la dispersión es menos fiable que el factor de desviación gaussiana horizontal normal a la dirección de máxima dispersión.
Clases de estabilidad de Turner	Las clases de estabilidad de Turner tratan de aglutinar una serie de condiciones atmosféricas muy diversas en unas pocas que sirvan para realizar las estimaciones de dispersión. Al tratar de representar las condiciones atmosféricas más usuales en una zona, tanto de día como de noche, hay que asumir que la posible variación diaria con respecto a esas clases de estabilidad no va a ser modelizada, a menos que se proceda a cambiar ciertos parámetros para representar las nuevas condiciones atmosféricas del momento,
Fuente lineal de distancia infinita y emisión continua	Al asumir que la fuente lineal tiene una longitud infinita, no se está teniendo en cuenta la posible influencia de la sinuosidad del trazado, mas este es un problema claramente influenciado por la escala de trabajo con la que se estudie el problema, ya que no existe una carretera totalmente recta para una escala tendente al infinito, por lo que la estimación de la influencia de esta limitación es bastante arbitraria. Por otra parte, se asume que la tasa de emisión es continua, algo que no es cierto, ya que la densidad de tráfico que circula por una vía concreta, fluctúa de manera aleatoria o siguiendo unos patrones.

Dirección del viento normal a la línea de emisión	Se asume que la dirección del viento es normal a la línea de emisión, debido a una simplificación del modelo de dispersión, ya que en el caso de que se deseara considerar la influencia de la dirección del viento respecto a la línea de emisión, sería necesario calcular el ángulo formado entre la dirección del viento incidente sobre un determinado tramo de carretera, con respecto a ésta, lo que repercutiría en una complicación no deseada, dados los objetivos de este trabajo de mera propuesta metodológica.
Ausencia de desviación normal horizontal	Una vez que se ha asumido que la dirección del viento es perpendicular a línea de emisión, es factible considerar que la desviación gaussiana horizontal, normal a dirección de máxima dispersión, es cero, ya que no se va a dar dispersión en una dirección paralela a línea de emisión, pues ya se ha asumido la ausencia de ciertos factores que podrían afectar al cumplimiento de esta suposición.
Concentración uniforme en la dirección *y*	Basada en la limitación anterior, de ausencia de desviación normal horizontal, las estimaciones realizadas consideran que la concentración existente a una distancia *x* respecto a la línea de emisión, va a ser constante, dependiendo únicamente de los parámetros de cálculo asumidos respecto a la densidad de tráfico y las condiciones atmosféricas, siendo independiente de la geometría del trazado o el efecto de cualquier otra afección que pudiera modificar la concentración en la dirección *y*.

Sistema de integración de los resultados

La mayor limitación del sistema de integración radica en la propia limitación de la capacidad de vinculación de los resultados obtenidos en el sistema de cálculo al SIG. De este modo, no es posible obtener una total automatización del sistema, ya que se requiere una operación intermedia de gestión de datos por parte del operador.

Sin embargo esta limitación es tremendamente beneficiosa para modificar la totalidad del sistema, gracias a las correcciones inducidas por los ajustes empíricos del mismo.

PROPUESTA METODOLÓGICA

Con este trabajo se pretende proponer una metodología para analizar problemas de contaminación ambiental debida a las emisiones de los vehículos a motor y su incidencia en el entorno más próximo.

Está restringido a la modelización de contaminantes gaseosos, tal y como se pueden considerar los hidrocarburos y la materia particulada fina emitida por los vehículos a motor.

Esquema metodológico de generación de la cartografía

El primer paso a realizar fue la generación de una cartografía vectorial de la red viaria, en este caso de la provincia de Alicante, mediante la digitalización de ortofotografías aéreas en formato digital, previamente georreferenciadas. Este es un proceso en el que se pueden distinguir claramente tres fases:

- FASE 1. Interpretación e integración de la información disponible.
- FASE 2. Generación del entorno de trabajo en el SIG y digitalización de entidades.
- FASE 3. Obtención de la cartografía resultante.

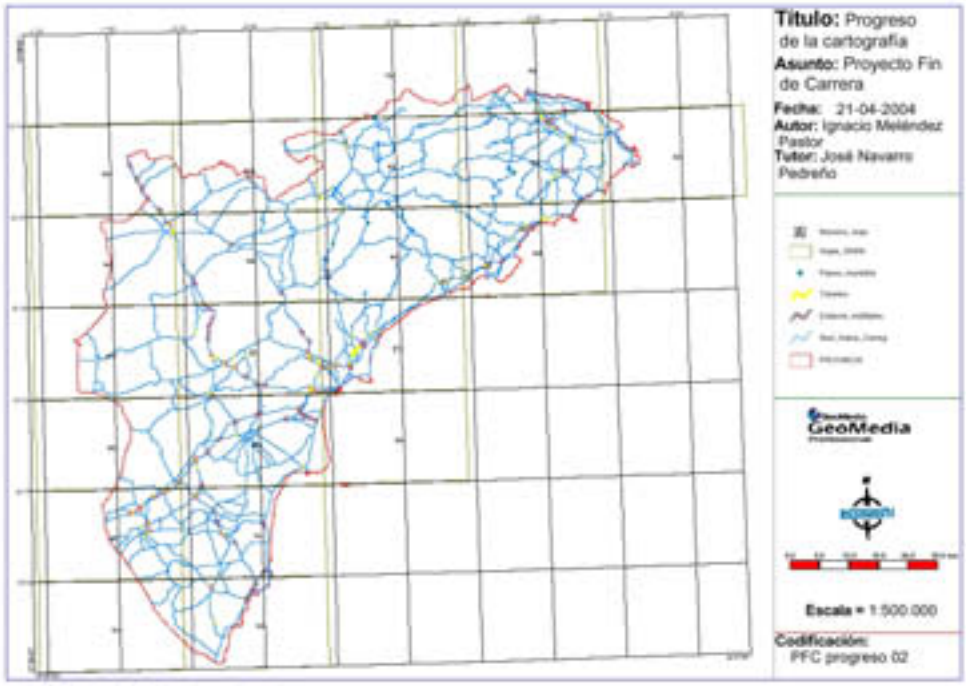


Figura 2. Cartografía resultante. Escala 1:500.000

Esquema metodológico de creación del modelo matemático de dispersión de contaminantes

El sistema de cálculo generado utiliza las formulaciones de los modelos matemáticos de dispersión de contaminantes más comúnmente aceptados, permitiendo el cálculo de dos parámetros principales:

- Concentración de contaminantes a diferentes distancias perpendicularmente respecto a la fuente lineal emisora.
- Distancia de seguridad para la no superación de ciertos límites de concentración de contaminantes, que pudieran suponer un peligro para la salud ambiental o humana.

Es posible distinguir cuatro fases en el proceso de cálculo:

- *FASE 1. Cálculo de la tasa de emisión ponderada:* representa la tasa promedio de emisión para los diferentes tipos de vehículos considerados, considerando la contribución porcentual de cada una de las clases constituyentes del parque de tráfico, respecto a las emisiones totales.

- *FASE 2. Cálculo de la fuerza de la línea:* se obtiene mediante el producto de la tasa de emisión por el número de vehículos por unidad de longitud.
- *FASE 3. Cálculo de la concentración de contaminante para las condiciones ambientales seleccionadas y a diferentes distancias respecto a la línea de emisión:* ha de considerar los parámetros independientes de las condiciones ambientales anteriormente expuestos, más unas clases de estabilidad ajustadas a las condiciones atmosféricas más comunes de una zona, o a las condiciones atmosféricas posibles existentes en un lugar que van a generar un episodio de contaminación extrema.
- *FASE 4. Cálculo de la distancia influencia de la red viaria para diferentes concentraciones de contaminantes y condiciones ambientales:* el procedimiento mediante el cual se realiza dicha estimación consiste en la representación gráfica de la concentración de contaminantes para un tipo de vía, periodo del día y distancia, respecto a la distancia desde la fuente de emisión, para posteriormente ajustar una función a la serie de datos resultante. Con las constantes de la misma se puede proceder a realizar el cálculo de la estimación de la distancia de seguridad, que habría que adoptar para que no se supere una concentración de contaminantes peligrosa para la salud.

Metodología para la generación del sistema de integración de los resultados

La vinculación de los resultados numéricos obtenidos en el sistema de cálculo con los resultados gráficos obtenidos en el SIG es la fase final del trabajo aquí presentado. Esta labor consta de las siguientes fases:

FASE 1. Adecuación del sistema de cálculo para la exportación de resultados: mediante la síntesis y reorganización de los resultados obtenidos.

FASE 2. Adecuación de las entidades generadas en el SIG para la vinculación de resultados: mediante la definición de las clases de atributos correspondientes a los resultados del sistema anterior.

FASE 3. Generación de la estructura de vinculación de los resultados: generación de un sistema de control y gestión de los resultados numéricos obtenidos, gracias a la creación de un sistema de intercambio semiautomático de datos en la estructura de una base de datos convencional.

SÍNTESIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se exponen algunos resultados gráficos obtenidos de la aplicación de esta propuesta metodológica.

Los valores numéricos y las representaciones gráficas son el mero fruto de un trabajo experimental en el que los valores introducidos al sistema no tienen la misión de realizar una estimación realista de la contaminación, sino la corroboración del correcto funcionamiento del sistema.

Es patente la necesidad de imponer mejoras al sistema mediante la realización de trabajos que permitan realizar un correcto ajuste empírico del mismo, gracias a la combinación de las predicciones realizadas, con los valores obtenidos por campañas de muestreo en campo.

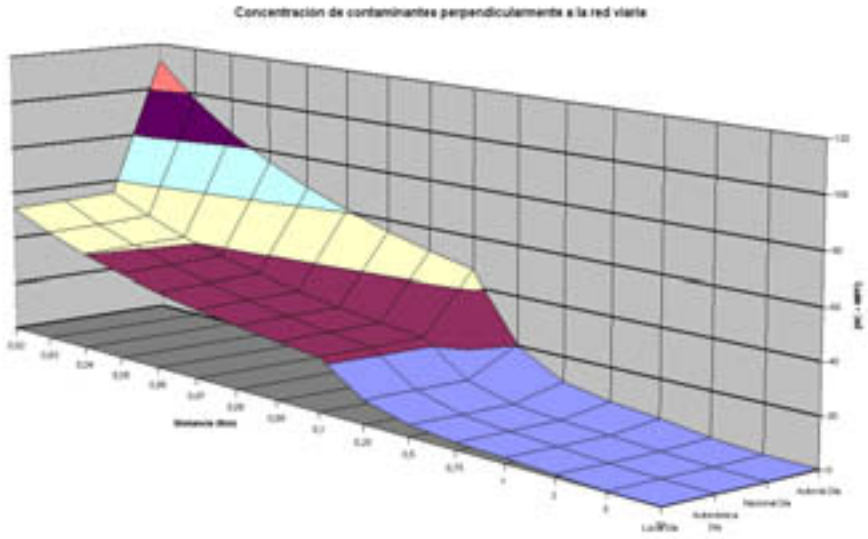


Figura 3. Concentración de monóxido de carbono en función del tipo de vía y la distancia a la fuente de emisión, durante el período diurno.

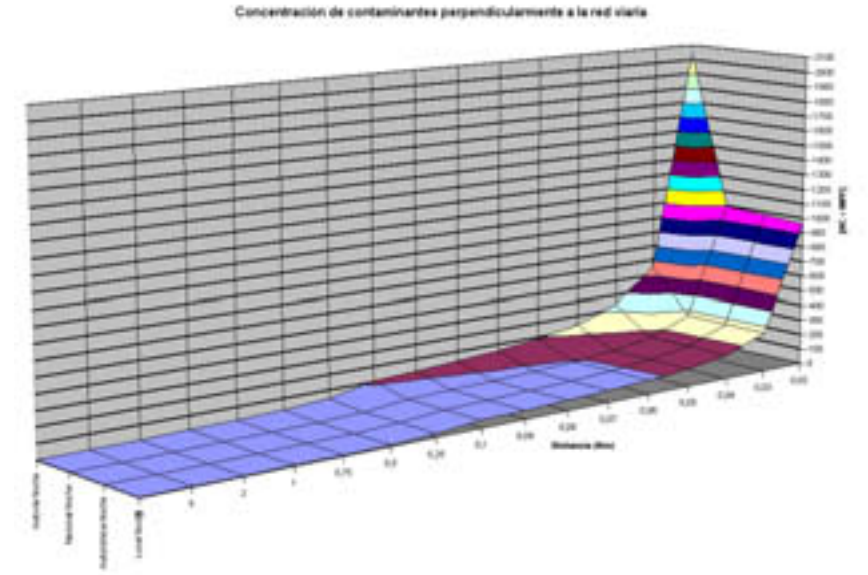


Figura 4. Concentración de monóxido de carbono en función del tipo de vía y la distancia a la fuente de emisión, durante el período nocturno.

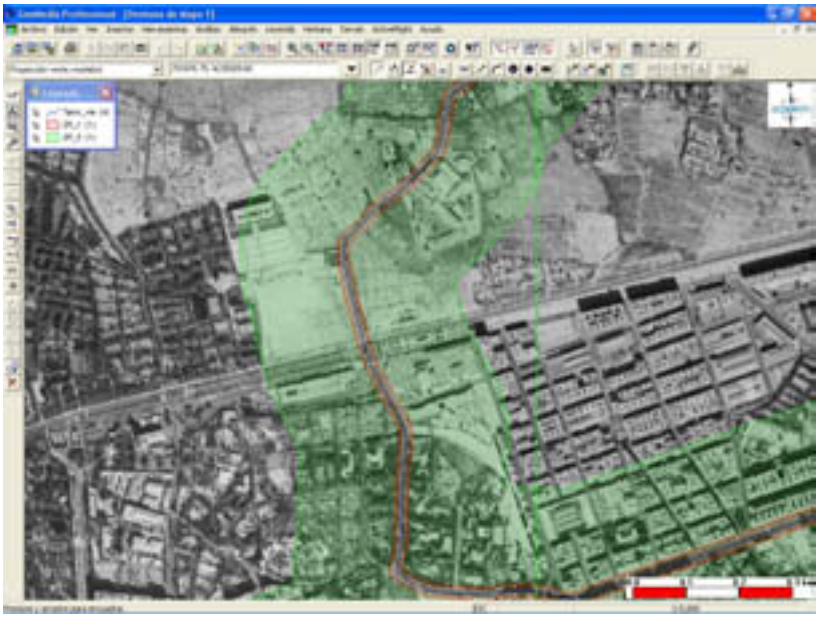


Figura 5. Resultado final obtenido tras la aplicación del sistema de integración para el estudio de la posible contaminación por hidrocarburos y materia particulada fina en torno a la red viaria de la provincia de Alicante. Puede observarse en el cuadrante superior izquierdo el edificio La Galia, perteneciente a la Universidad Miguel Hernández en Elche. Nótese la no estimación de la concentración generada por el tráfico urbano.

CONCLUSIONES

Una vez que se ha terminado de exponer y analizar la propuesta metodológica, se pueden obtener las siguientes conclusiones para finalizar el estudio.

- Cualquier propuesta metodológica como la aquí presentada, requiere la realización de multitud de estudios experimentales de ajuste empírico, que deben ser analizados mediante una intensa crítica constructiva.
- Es absolutamente necesario concebir los problemas ambientales en su dimensión espacial, pues de otro modo se pierde información y se dificulta la interpretación de los resultados obtenidos.
- El uso coordinado de Sistemas de Información Geográfica y otra serie de técnicas y herramientas (geoestadística, software de dinámica de sistemas, MDT,…), es clave para conseguir una modelización ambiental lo más aproximada a la realidad.
- La tecnología informática permite analizar gran cantidad de datos en ínfimas fracciones de tiempo, por lo que es imprescindible su uso de cara a poder modelizar procesos ambientales extraordinariamente complejos y dinámicos.
- Son necesarios estudios que permitan evaluar la tasa de transferencia de metales pesados al suelo, procedentes de las emisiones gaseosas de los vehículos a motor, una vez que se ha estimado la concentración y área de dispersión en la atmósfera.

REFERENCIAS

Baird, C. (2001): *Química ambiental*. Ed. Reverte. Barcelona. 622 pp.

Bosque Sendra, J. (1997): *Sistemas de Información Geográfica*. 2ª edición. Ed. Rialp. Madrid. 451 pp.

Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., Garrido, J., Mitsuo Jr, F. (1995): *SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 17 pp.

Clarke, K.C. (2003): *Getting Started with Geographic Information Systems*. 4th edition. Prentice Hall Series in Geographic Information Science. Pearson Education, Inc. Upper Saddle River. New Jersey. (Estados Unidos de América). 340 pp.

Doménech, X. (1995): *Química atmosférica. Origen y efectos de la contaminación*. Ed. Miraguano Ediciones. Madrid. 174 pp.

Doménech, X. (1995): *Química del suelo. El impacto de los contaminantes*. Ed. Miraguano Ediciones. Madrid. 190 pp.

EPA. (2000): *Six Common Air Pollutants*. United States Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning & Standards. Washington D.C. (Estados Unidos de América).

EPA. (2000): *Taking Toxics Out of the Air. Progress in Setting "Maximum Achievable Control Technology". Standards Under the Clean Air Act*. United States Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards. Washington D.C. (Estados Unidos de América).

EPA. (2004): *Air Trends. Toxic Air Pollutants*. United States Environmental Protection Agency. Washington D.C. (Estados Unidos de América).

Intergraph Corporation. (2002): *Manual del Usuario de GeoMedia Professional 5.0*. Intergraph Corporaton. Hunstville. Alabama. (Estados Unidos de América). 833 pp.

Generalitat Valenciana. (1998): *Mapa de Carreteres. Comunitat Valenciana. 1:350.000*. Generalitat Valenciana. Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports. Barcelona. 1 hoja.

Hazelton, P.A. (2002): Soil -The environmental link. *Proceedings of the third International Congress Man and Soil at the Third Millenium*; Vol. 1; pp. 227-233; Ed. Geoforma Ediciones. Logroño.

Marmur, A., Mamane, Y. (2003): Comparision and evaluation or several mobile-source and line-source models in Israel. *Transportation Research Part D*; nº 8; pp. 249-256.

Pascolo, P. y Brebbia, C.A. (Eds.) (1998): *GIS technologies and their environmental applications. First International Conference on Geographical Information Systems in the next Millennium*. WIT Press. Southampton. (Reino Unido). 352 pp.

Turner, D.B. (1969): *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. Ed. HEW. Washington, D.C. (Estados Unidos de América).

Wark, K., Warner, C.F. (2002): *Contaminación del aire. Origen y control*. Ed. Limusa. Noriega Editores. México D.F. (Estados Unidos de México). 650 pp.

Corrección geométrica para la comparación de imágenes de satélite de distinta resolución

V. Arévalo Espejo, J. González Jiménez y G. Ambrosio Cestero

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, E.T.S.I de Ingenieros en Informática, Universidad de Málaga, Boulevard Louis Pasteur, s/n, 29071 Málaga.

RESUMEN

En este artículo se presenta un procedimiento de corrección geométrica para la comparación de imágenes de satélite de distinta resolución basado en la búsqueda y emparejamiento automático de puntos control y en el empleo de métodos robustos de regresión para el cálculo de las transformaciones geométricas.

El procedimiento al que hacemos referencia comprende varias fases: una fase inicial en la que se iguala la resolución espacial de las imágenes que intervienen en el análisis; una fase en la que se alinean para incrementar su grado de solapamiento y una fase final en la que se ajustan con gran precisión. Para completar cada una de las etapas se hace uso de transformaciones proyectivas (homografías) que se calculan a partir de pares de puntos de control obtenidos de forma automática. El alineamiento de las imágenes se realiza a partir de contornos de ambas imágenes que son emparejados mediante descriptores invariantes a rotaciones. Por otro lado, el ajuste preciso se lleva a cabo mediante la búsqueda de puntos de interés en ambas imágenes y su emparejamiento mediante correlación cruzada. Para asegurar la robustez del procedimiento, el cálculo de las homografías se efectúa mediante técnicas de regresión estadística que garantizan la no inclusión de pares espurios en el procesamiento. También se presenta una técnica de interpolación de niveles de gris basada en un procesamiento piramidal de la imagen a muestrear.

El método propuesto ha sido probado satisfactoriamente con imágenes de los satélites IRS-1C y QuickBird, con unas resoluciones espaciales de 5 y 0.6 metros/píxel, respectivamente.

Palabras Clave: *Corrección geométrica, comparación de imágenes, detección de cambios, imágenes de satélite.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

Any change detection process of the earth's surface from a multi-temporal image series requires a very precise image registration procedure to avoid false positives (changes which have not occurred in reality). When high resolution images are used the degree of accuracy is even more demanding, and a greater number of control point pairs are required in the process. These pairs must be very exactly and robustly detected in both images. On the other hand, since the available images can be from different satellites and have different spatial resolutions, an additional complexity in the image registration process arises.

In this paper a procedure for multi-resolution satellite images registration is presented. This procedure makes use of a technique for the automatic search of control point as well as matching and robust computing methods of regression for deriving the geometric transformations. The proposed procedure comprehends several stages: at an initial stage, the spatial resolutions of images involved in the process are equalized; then, in order to increase their overlapping, the images are aligned using oriented-invariant features from both images; and finally, the images are precisely registered using pairs of control point detected by cross correlation with sub-pixel accuracy. Through all these stages, projective transformations (homographies) are employed to correct the images. In order to assure robustness, the homographies are computed by statistical regression techniques that guarantee a free of outlier computation. An interpolating technique of grey levels based on an image pyramidal processing is also presented.

The proposed method has been satisfactorily tested with images from IRS and QuickBird satellites, with spatial resolutions of 5 and 0.6 meters/pixel, respectively.

Keywords: *Image registration, multi-resolution, multi-temporal, sub-pixel accuracy, robust methods*

INTRODUCCIÓN

La detección de cambios en la superficie terrestre para seguir la evolución de áreas forestales, superficies quemadas, crecimiento urbano, etc. requiere un ajuste geométrico muy preciso de las imágenes que intervienen en el estudio para evitar que los desajustes entre ellas sean considerados en el proceso de comparación como cambios reales en la cubierta terrestre (falsos positivos). Por otro lado, cada vez hay más satélites capaces de proporcionar imágenes de alta resolución susceptibles de ser utilizadas en procesos de detección de cambios. Es decir, es bastante probable que dispongamos de imágenes pertenecientes a distintos satélites y con resoluciones espaciales muy diferentes. Surge, por tanto, la necesidad de igualar sus resoluciones espaciales como paso previo del procedimiento de corrección geométrica de las imágenes que intervienen en el proceso de detección.

El funcionamiento general de los procedimientos de corrección suele consistir en: a) la búsqueda de puntos de control en las imágenes que intervienen en el análisis; b) el emparejamiento de los puntos detectados; c) la construcción del modelo geométrico a partir de los

pares localizados y d) el ajuste geométrico de las imágenes a corregir con el modelo construido utilizando para ello algún tipo de función de interpolación (*Brown,* 1992).

Hoy en día, siguen siendo muchas las aplicaciones de teledetección que realizan la búsqueda de puntos de control de forma totalmente manual, siendo el usuario quien se encarga de la selección y emparejamiento de los puntos. Lógicamente, este procedimiento está supeditado a errores de precisión que son mayores cuando se utilizan imágenes de distinta resolución. Surge, por tanto, la conveniencia de localizar los puntos de control de forma automática. En el campo de la visión por computador, este tipo de técnicas se aplican habitualmente en un gran número de problemas como la visión estéreo, el seguimiento de objetos, etc., donde se detectan esquinas (*Hsiev et al.,* 1992), regiones (*Flusser y Suk,* 1994), líneas (*Moss y Hancock,* 1997), contornos (*Eugenio y Marqués,* 2003), etc.

Cuando las imágenes presentan distinta resolución, el problema de la búsqueda automática de puntos de interés se plantea como una búsqueda en un espacio de escalas[1] (*Chiou-Ting y Rob,* 2000; *Dufournaud et al.,* 2001; *Brown y Lowe,* 2003), ya que un cambio de resolución es análogo a un cambio de escala en la imagen. En teledetección, sin embargo, esto puede simplificarse, puesto que es habitual disponer de información relativa a la resolución espacial de las imágenes.

Por otro lado, el emparejamiento de los puntos detectados se puede realizar atendiendo a los niveles de gris de los píxeles de su entorno, su distribución espacial o una descripción simbólica de las características locales (*Brown,* 1992). Según el caso, se emplea correlación cruzada (*Fonseca y Manjunath,* 1996) y/o técnicas basadas en descriptores invariantes, como por ejemplo el algoritmo SIFT (*Brown y Lowe,* 2003) o descriptores de contornos (*Li y Kittler,* 1995). Dada la complejidad y limitación de estos últimos métodos, sólo se justifica su utilización cuando las escalas de las imágenes son variables (distintos ángulos de observación –"foreshortening"– y/o desconocidas). En otro caso, como el que aquí nos ocupa, resulta mucho más conveniente el empleo de correlación cruzada, si bien se requiere que la resolución y orientación de las imágenes sean exactamente las mismas. En este artículo se presenta un procedimiento en etapas que, antes de aplicar un procedimiento de búsqueda automática de puntos de interés y emparejamiento mediante correlación cruzada, realiza un ajuste de las imágenes en este sentido, es decir, iguala la resolución y alinea las imágenes, antes de iniciar dicho proceso.

Por último, para estimar la transformación geométrica entre ambas imágenes a partir de los pares de puntos de control establecidos se utiliza el estimador RANSAC (*RANdom Sample Consensus*) que asegura un cálculo robusto de la transformación y la detección de pares espurios. El procedimiento ha sido probado satisfactoriamente con imágenes de los satélites IRS-1C y QuickBird, con unas resoluciones espaciales de 5 y 0,6 metros/píxel, respectivamente, en un sistema de detección de cambios urbanos como el expuesto en (*Ambrosio et al.*, 2003).

Este artículo está organizado del siguiente modo: a continuación, se describe de forma general el método propuesto, en la sección 3 se detallan de forma pormenorizada cada una de las etapas del procedimiento de corrección geométrica propuesto, en la sección 4 se muestran los resultados obtenidos y, finalmente, se presentan algunas conclusiones.

---

[1] El espacio de escalas de una imagen consiste en una representación de la misma mediante un conjunto de imágenes de escalas conocidas y establecidas a priori.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MÉTODO PROPUESTO

Cuando se comparan imágenes que proceden de distintos satélites (multimodales), tanto la resolución espacial como la orientación son distintas, lo que dificulta la búsqueda automática de pares de puntos de control. En tal caso se requiere una serie de etapas previas que adecuen las imágenes. Estas etapas se detallan en el procedimiento general propuesto a continuación (ver figura 1):

1. La resolución espacial de las imágenes se iguala tomando como referencia una de ellas[2]. Se aplica una transformación de similaridad.
2. La imagen escalada se alinea con respecto a la imagen de referencia mediante una transformación euclídea. Para completar esta etapa: a) se buscan automáticamente pares de puntos de control empleando para ello técnicas basadas en contornos y momentos invariantes a rotaciones, b) los pares de puntos de control localizados se emplean para aplicar una transformación euclídea que gira y desplaza la imagen a corregir con respecto a la de referencia.
3. Se aplica una transformación proyectiva para ajustar de forma precisa ambas imágenes. Para completar esta etapa: a) se buscan automáticamente pares de puntos de control empleando técnicas basadas en puntos de interés y correlación cruzada, b) los pares de puntos de control localizados se utilizan para calcular una transformación proyectiva que nos permite ajustar geométricamente la imagen a corregir con respecto a la de referencia.

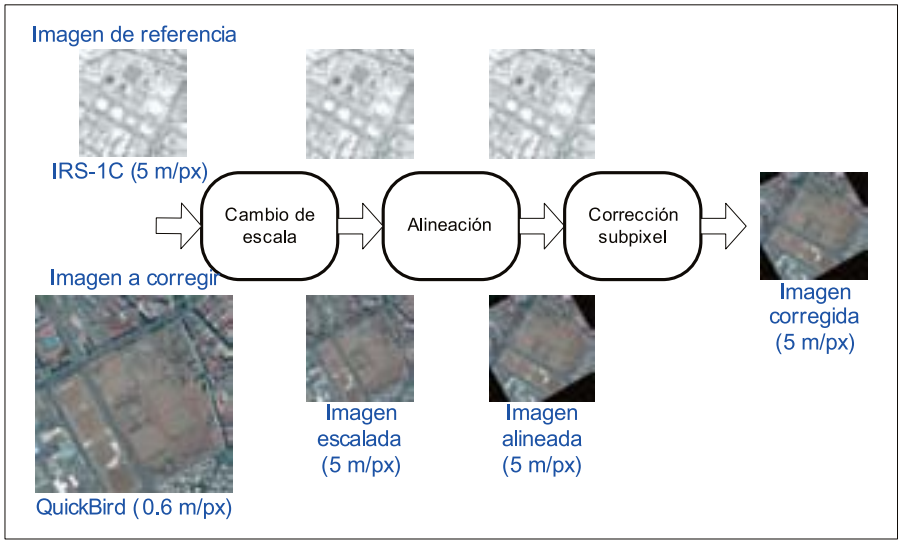


Figura 1. Esquema general del procedimiento de corrección geométrica previo a la detección de cambios.

[2] El método propuesto asume, sin pérdida de generalidad, que la resolución espacial de la imagen de referencia es menor o igual que las resoluciones de las imágenes a corregir.

En las etapas 2 y 3 se requiere el cálculo de transformaciones geométricas a partir de pares de puntos de control. En ambas etapas se hacen uso de métodos robustos de regresión para el computo de la transformación geométrica y la detección de correspondencias espurias.

A continuación se describen pormenorizadamente cada una de las etapas del procedimiento de corrección.

DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DEL PROCESO

En las siguientes secciones se detallan las distintas etapas de que consta el proceso de corrección geométrica. Siguiendo el enfoque habitual en visión por computador, las distintas transformaciones geométricas se expresarán en coordenadas homogéneas en lugar de coordenadas tradicionales, lo que aportará: a) un tratamiento homogéneo de todas las transformaciones (traslación, escalado, proyección, etc.) y b) un modo simple de agrupar un conjunto de transformaciones en una única matriz.

Cambio de resolución de las imágenes

Un cambio de resolución espacial es análogo a un cambio de escala en la imagen. Suponiendo conocidas las resoluciones, el cambio de resolución se puede expresar como una trasformación de similaridad $\mathbf{H}_S$ con un factor de escala conocido e igual a la relación que existe

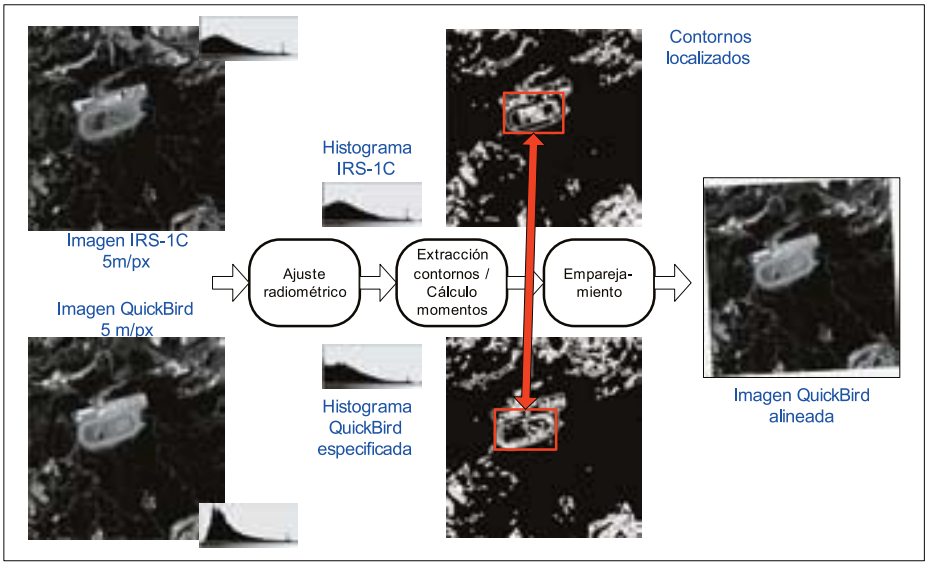


Figura 2. Esquema de la etapa de alineación.

entre la resolución de la imagen de referencia *r*' y la resolución de la imagen a corregir *r*. La transformación geométrica $\mathbf{H}_S$ viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_S \mathbf{x} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r'/r & 0 & 0 \\ 0 & r'/r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \tag{1}$$

donde **x** y **x**' son las coordenadas homogéneas[3] de la imagen a corregir y de la imagen de referencia, respectivamente. En el caso de los satélites IRS-1C y QuickBird, las imágenes presentan una resolución espacial es de 5 y 0.6 m/píxel, respectivamente, es decir, un factor de escalado de 0.12.

Alineación geométrica de las imágenes

El objetivo de esta etapa es alinear, es decir, orientar y desplazar la imagen a corregir con respecto a la de referencia, para poder utilizar en la fase de ajuste preciso, una técnica de emparejamiento de puntos de interés basada en correlación cruzada. La técnica empleada para alinear geométricamente las imágenes se basa en la detección de contornos mediante el detector de Canny (*Canny*, 1986), la descripción de los contornos mediante los momentos invariantes de Hu (*Hu*, 1962) y su posterior emparejamiento mediante un técnica que mide el grado de similitud de dos contornos (*Li y Kittler*, 1995). Antes de proceder a la extracción de contornos, la imagen a corregir es modificada radiométricamente mediante la especificación de su histograma (*González,* 1999). La figura 2 ilustra gráficamente el proceso de alineación.

Una vez detectados los contornos en las imágenes que intervienen en el análisis, se procede a su emparejamiento. De tal forma que dos contornos están emparejados si la distancia *d* entre sus descriptores es inferior a un determinado umbral *t*. La distancia *d* entre dos contornos C_1 y C_2 viene dada por la siguiente expresión:

$$d(C_1, C_2) = \sum_{i=1}^{4} | h_i^{C_1} - h_i^{C_2} | \tag{2}$$

donde $h_i^{C_1}$ y $h_i^{C_2}$ son los momentos de Hu i-ésimos normalizados de los contornos C_1 y C_2 (*Intel*®, 2001), respectivamente. Los resultados obtenidos han demostrado que con 4 momentos invariantes de Hu se obtiene suficiente poder discriminatorio.

A continuación, se determina la transformación euclídea $\mathbf{H}_E$ que modela el cambio de orientación y el desplazamiento de la imagen a corregir. La transformación $\mathbf{H}_E$ tiene 3 grados de libertad: el ángulo de giro θ y las dos componentes del vector de traslación $(t_u \; t_v)^T$ y se puede

[3] Nótese que aquí el uso de coordenadas homogéneas no aporta nada a la formulación. No obstante, se emplean por uniformidad con los desarrollos matemáticos posteriores.

calcular a partir de 2 pares de puntos como mínimo. Los pares de puntos de control utilizados en el proceso de estimación son los centroides de los contornos emparejados anteriormente. La transformación geométrica $\mathbf{H}_E$ viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_E \mathbf{x} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & t_u \\ \sin\theta & \cos\theta & t_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

donde $\mathbf{x}$ y $\mathbf{x}'$ son las coordenadas homogéneas de la imagen a corregir y de la imagen de referencia, respectivamente.

Finalmente, se estima de forma robusta la transformación euclídea $\mathbf{H}_E$ y se interpola la imagen a corregir. Ambos procesos se exponen con detalle más adelante.

Ajuste preciso de las imágenes

La técnica empleada para ajustar de forma precisa las imágenes se basa en la detección automática de puntos de interés con precisión subpixel mediante el detector de Harris (*Harris y Stephens,* 1988) y su posterior emparejamiento mediante correlación cruzada normalizada (*González,* 1999). El procedimiento consiste en asignar a cada uno de los puntos de interés un determinado vecindario de niveles de gris, vecindario que se utiliza para medir el grado de similitud de los pares de puntos candidatos (ver figura 3).

Una vez detectados los puntos de interés en las imágenes que intervienen en el análisis, se procede a su emparejamiento. De tal forma que dos puntos están emparejados si el coeficiente de correlación cruzada c de sus vecindarios es superior a un determinado umbral t. El coeficiente de correlación cruzada normalizada c entre los vecindarios v_1 y v^2 de dos puntos viene dado por la siguiente expresión:

$$c(x,y) = \frac{\sum_{x',y'} \left[v_1(x',y') - \overline{v}_1\right] \left[v_2(x+x',y+y') - \overline{v}_2\right]}{\sqrt{\sum_{x',y'} \left[v_1(x',y') - \overline{v}_1\right]^2 \sum_{x',y'} \left[v_2(x+x',y+y') - \overline{v}_2\right]^2}} \tag{4}$$

donde $\overline{v}_1$ y $\overline{v}_2$ son las medias de los niveles de gris de ambos vecindarios, respectivamente.

A continuación, se determina la transformación proyectiva $\mathbf{H}_P$ que modela las distintas deformaciones proyectivas que presenta la imagen a corregir. La transformación $\mathbf{H}_P$ tiene 8 grados de libertad y se puede calcular a partir de 4 pares de puntos como mínimo. La transformación geométrica $\mathbf{H}_P$ viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_P \mathbf{x} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \tag{5}$$

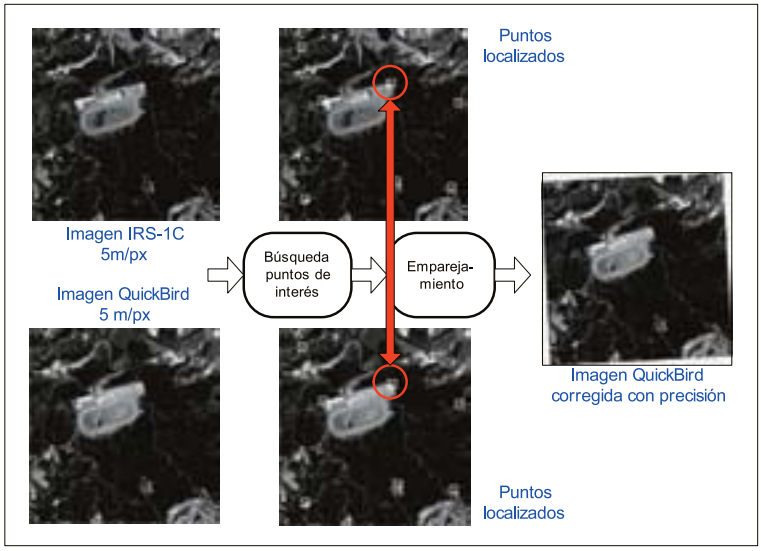


Figura 3. Esquema de la etapa de ajuste preciso.

donde **x** y **x'** son las coordenadas homogéneas de la imagen a corregir y de la imagen de referencia y h_{ij} el parámetro ij-ésimo de la transformación proyectiva, respectivamente.

Finalmente, se estima de forma robusta la transformación proyectiva $\mathbf{H}_P$ y se interpola la imagen a corregir. Ambos procesos se exponen con detalle en las dos secciones siguientes.

Cálculo robusto de la transformación geométrica

En las secciones anteriores se propusieron las transformaciones que modelaban las distintas deformaciones que presentan las imágenes que intervienen en el análisis. El proceso operativo para ambas es el mismo, con la única particularidad del número mínimo de emparejamientos que se requieren para su cálculo; 2 puntos para la transformación euclídea y 4 para la proyectiva. Las homografías se pueden calcular fácilmente con el algoritmo DLT (Direct Linear Tranformation) normalizado (*Hartley y Zisserman,* 2001). Sin embargo, en la práctica, los emparejamientos obtenidos, independientemente del método empleado, suelen incluir emparejamientos espurios. Para evitar que estos emparejamientos afecten al cálculo de los parámetros geométricos se utilizan procedimientos robustos de regresión. Los métodos robustos de regresión tratan de explotar la redundancia de emparejamientos para obtener una solución consistente con la mayoría de ellos (por ejemplo: el error de proyección en ambas imágenes debe estar por debajo de un determinado umbral *t*, normalmente 1 píxel). El método de regresión utilizado en este trabajo es el RANSAC–DLT normalizado (*Hartley y Zisserman,* 2001). En figura 4 se puede observar el pseudo código del método utilizado.

Objetivo

Dado $n \geq 2$ (Transf. euclídea $\mathbf{H}_E$) o $n \geq 4$ (Transf. proyectiva $\mathbf{H}_P$) pares de puntos de control $\{\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{x}_i'\}$, determinar la homografía $\boldsymbol{H}$ tal que $\mathbf{x}_i' = \mathbf{H}\mathbf{x}_i$.

Algoritmo

- Repetir N veces, donde N se determina adaptativamente:
  * Seleccionar una muestra de 2 (Transf. euclídea $\mathbf{H}_E$) ó 4 (Transf. proyectiva $\mathbf{H}_P$) emparejamientos y calcular **H** con el algoritmo DLT normalizado.
  * Calcular el error de proyección en ambas imágenes para cada correspondencia.
  * Determinar el número de correspondencias consistentes con **H**.
  * Recalcular N adaptativamente.
- Elegir la homografía **H** con el mayor número de emparejamientos consistentes con **H**.
- Recalcular **H** con los emparejamientos consistentes con **H**.

Figura 4. Método RANSAC-DLT normalizado para el cálculo de homografías.

Una vez se han determinado los parámetros de las transformaciones geométricas $\mathbf{H}_E$ y $\mathbf{H}_P$ por el método expuesto anteriormente, la siguiente etapa del procedimiento de corrección consiste en aplicar dichas trasformaciones para interpolar las imágenes a corregir.

Interpolación de las imágenes

En el proceso de interpolación se pueden utilizar distintas funciones dependiendo del tipo de aplicación (*Brown,* 1992). En nuestra aplicación de detección de cambios hemos optado por una función bicúbica. El proceso operativo consiste, básicamente, en determinar qué píxeles de la imagen a corregir se han de considerar en el cálculo del nuevo píxel en la imagen corregida (ventana de trasvase) y a continuación aplicarles la función de interpolación elegida, para calcular el nivel de gris correspondiente en la nueva imagen.

Este proceso es perfectamente válido para las trasformaciones geométricas definidas por $\mathbf{H}_E$ y $\mathbf{H}_P$, sin embargo, para aplicar la transformación $\mathbf{H}_S$ encargada de modelar un cambio de escala considerable (en nuestro caso un factor de escala de 0.12 –ver apdo. *"cambio de resolución de las imágenes"*–), la elección de la técnica de interpolación no es trivial. En efecto, si el proceso de interpolación no considera los niveles de gris de todos los píxeles de la ventana de trasvase (ver figura 5 arriba) se produce el denominado efecto *stair-stepped* o efecto escalón (ver figura 5 abajo). Es decir, el nivel de gris que se obtiene de interpolar los píxeles de la ventana de interpolación[4] no es representativo de toda la ventana de trasvase, sino tan sólo, de un fragmento de ella.

[4] La dimensión de la ventana de interpolación es de 4 x 4 píxeles si la función es bicúbica.

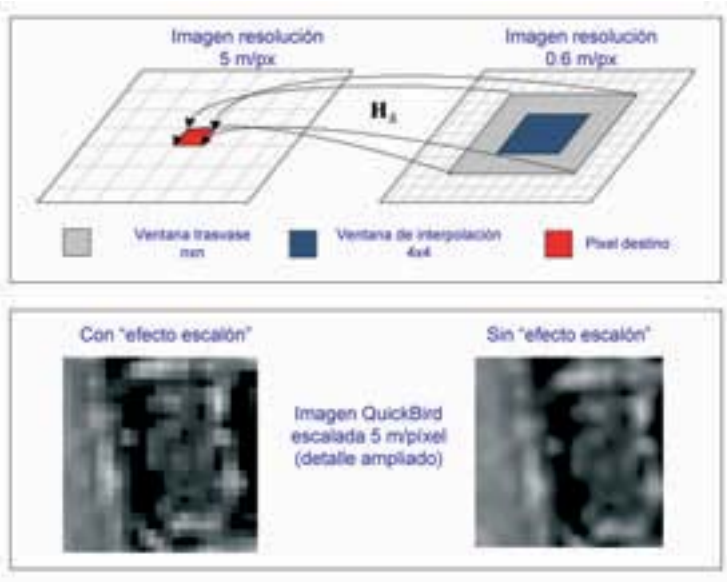


Figura 5. Efecto escalón debido a diferencias entre las ventanas de interpolación y de trasvase.

Para evitar esto, la transformación geométrica $\mathbf{H}_S$ se puede expresar como un producto de n transformaciones geométricas $\mathbf{H}_{Si}$ que verifican que el tamaño de su ventana de trasvase es menor que el tamaño de la ventana de interpolación (ver figura 6), es decir, controlamos el tamaño de la ventana de trasvase ya que el tamaño de la ventana de interpolación es conocido y viene definida por la función de interpolación utilizada (4x4 si la función de interpolación es bicúbica). Las n transformaciones geométricas $\mathbf{H}_{Si}$ vienen dadas por la siguiente expresión:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_S\mathbf{x} = \left(\prod_{i=1}^{n}\mathbf{H}_{S_i}\right)\mathbf{x} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} \sqrt[n]{r'/r} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt[n]{r'/r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^{\mathbf{H}_{S_1}} \cdots \overbrace{\begin{bmatrix} \sqrt[n]{r'/r} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt[n]{r'/r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^{\mathbf{H}_{S_n}} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$n = \max\left\{\text{int}\left(w/4\right)+1, \text{int}\left(h/4\right)+1\right\}$$

donde n es el número de niveles de la estructura piramidal y w, h el ancho y alto de la ventana de trasvase original, respectivamente.

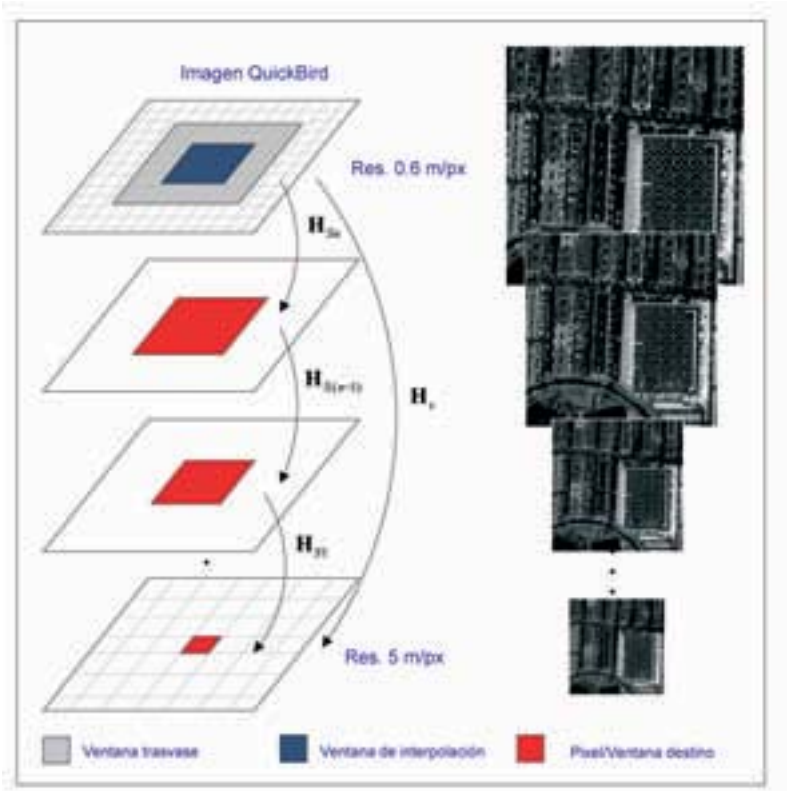


Figura 6. Aplicación de la transformación geométrica $\mathbf{H}_S$ mediante una técnica piramidal.

Geométricamente, la descomposición de la transformación geométrica $\mathbf{H}_S$ en n transformaciones $\mathbf{H}_{Si}$ se interpreta como un escalado piramidal de la imagen a corregir en n etapas.

RESULTADOS

A continuación, se presenta uno de los experimentos realizados con el procedimiento expuesto. En el experimento se han utilizado imágenes pertenecientes a los satélites IRS-1C y QuickBird con una resolución espacial de 5 m/píxel y 0.6 m/píxel, respectivamente. En la figura 7 podemos observar las imágenes utilizadas.

En la figura 8 se puede observar la imagen a corregir conveniente escalada y alineada, obtenida como resultado de aplicar las transformaciones geométricas calculadas en la primera y segunda fase del procedimiento.

La figura 9 muestra la imagen de referencia, la imagen corregida, la imagen de cambios obtenida en la detección de cambios y la imagen de cambios colocada sobre la imagen original a corregir (resolución espacial de 0.6 m/píxel), obtenida de aplicar secuencialmente

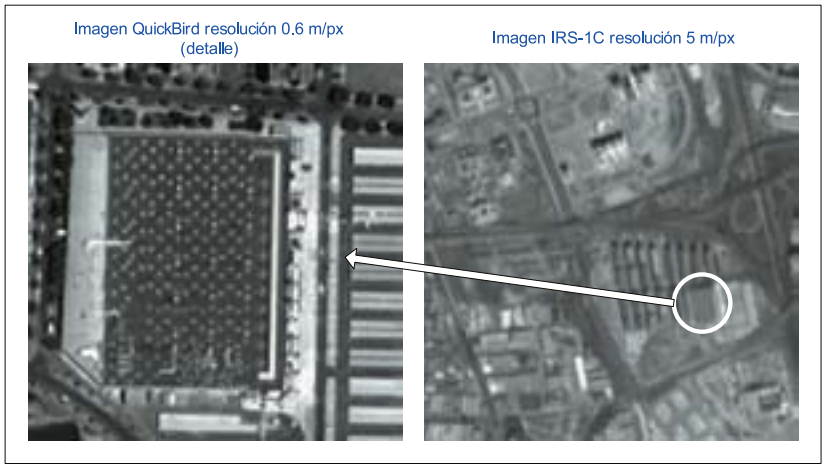


Figura 7. Detalle de la imagen a corregir e imagen de referencia utilizadas en el experimento.

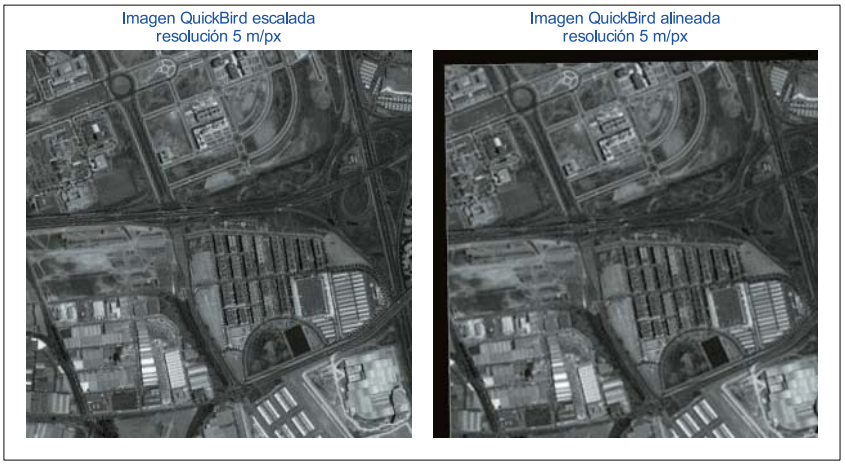


Figura 8. Imagen a corregir escalada y alineada.

las transformaciones geométricas calculadas en el procedimiento de corrección de forma invertida.

CONCLUSIONES

Según lo expuesto a lo largo de este artículo, el procedimiento descrito permite corregir de un modo automatizado dos imágenes de distinta resolución espacial para su posterior comparación en cualquier aplicación de detección de cambios. El empleo del algoritmo RANSAC-DLT normalizado en el cálculo de las distintas homografías asegura la robustez

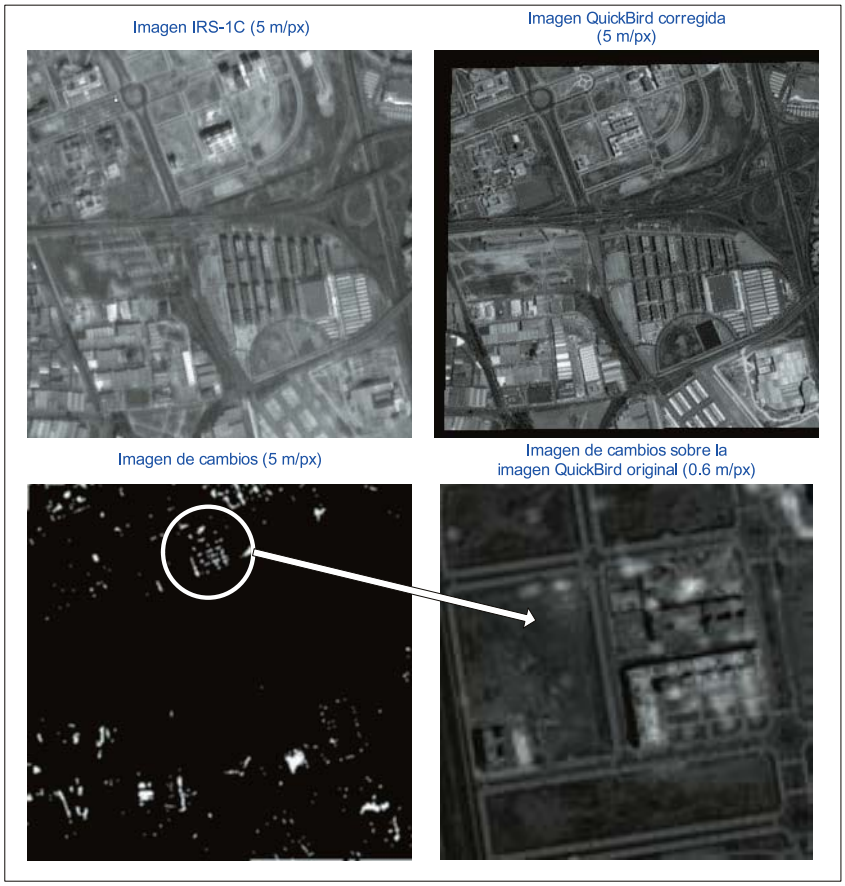


Figura 9. Imagen de referencia y corregida (arriba); imagen de cambios (abajo izquierda), imagen original a corregir con la imagen de cambios sobrepuesta (abajo derecha).

del proceso y la detección de pares espurios. Por último, la técnica de interpolación piramidal propuesta permite interpolar imágenes de gran resolución para su comparación con imágenes de una resolución menor o para su integración en algún sistema de información geográfica.

REFERENCIAS

Ambrosio, G., González, J. y Arévalo V. (2003): "Detección de Cambios Urbanos mediante Comparación de Imágenes Multi-temporales". *X Congreso Nacional de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección*.

Brown, L.G. (1992): "A Survey of Image Registration Techniques". *ACM Computing Surveys*. Vol. 24 No. 4.

Brown, M. y Lowe, D. (2003): "Recognising Panoramas". *Proceedings of International Conference on Computer Vision (ICCV'03)*, Nice, France, (October 2003). Vol. 1.

Canny, J.F. (1986): "A Computational Approach to Edge Detection". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, No. 6, Nov.

Chiou-Ting, H. y Rob A., B. (2000): "Multiresolution Feature-Based Image Registration". *Proceedings of SPIE*, Perth, Australia, pp.1490-1498.

Dufournaud, Y., Schmid, C. y Horaud, R. (2001): "Image Matching with Scale Adjustment". *Technical Report* No. 4458 (INRIA, Shophia-Antipolis)

Eugenio, F. y Marqués, F. (2003): "Automatic Satellite Image Georeferencing Using a Contour-Matching Approach". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 12, pp. 2869-2880.

Flusser, J. y Suk, T. (1994): "A Moment-Based Approach to Registration of Images with Affine Geometric Distortion". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, No. 32, pp. 382-387.

Fonseca, L.M.G. y Manjunath, B.S. (1996): "Registration Techniques for Multisensor Remotely Sensed Imagery". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, No. 62, pp. 1049-1056.

González, J. (1999): "Visión por Computador". *Paraninfo*.

Harris, C. y Stephens, M. (1988): "A Combined Corner and Edge Detector". In *Proceedings Alvey Conference*, pp. 189-192.

Hartley, R. y Zisserman, A. (2001): *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.

Hsiev, Y.C., McKeown, D.M. y Perlant, F.P. (1992): "Performance Evaluation of Scene Registration and Stereo Matching for Cartographic Feature Extraction". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, No. 14, pp. 214-237

Hu, M. (1962): "Visual Pattern Recognition by Moments Invariants". *IRE Transactions on Information Theory*, Vol. 8 No. 2, pp. 179-187.

Intel® Corporation (2001): "The Open Source Computer Vision Library. Reference Manual". *http://developer.intel.com*.

Li, S.Z. y Kittler, J. (1995): "A Contour-Based Approach to Multisensor Image Registration". *IEEE Transactions on Image Processing*, No. 18, pp. 320-334.

Moss, S. y Hancock, E.R. (1997): "Multiple Line-Template Matching with EM Algorithm". *Pattern Recognition Letters*, No. 18, pp. 1283-1292.

Tratamiento estadístico de variables radiométricas, orográficas y climáticas para la obtención de un mapa detallado de vegetación

G. Moré, J.A. Burriel, R. Castells, J. Ibáñez y X. Roijals

Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF), Edificio C, Universidad Autónoma de Barcelona, 08193 Bellaterra.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un método de clasificación mixta de imágenes de satélite y otras variables climáticas y orográficas para la cartografía de cubiertas vegetales. La cartografía obtenida se utilizará para la ampliación de leyenda de la nueva versión del Mapa de Cubiertas de Cataluña (MCSC). Las áreas de entrenamiento se obtienen de otras bases ya existentes sobre vegetación, como es el Mapa de Hábitats de Cataluña, y son sometidas a un tratamiento estadístico para garantizar su calidad, y evitar así problemas de cambios de usos de cubiertas debidos a la dinámica temporal. Los resultados expuestos aquí, aunque no definitivos, apuntan a que la metodología en su conjunto permite la creación de un mapa de vegetación con resolución espacial de 30 metros y con una leyenda que 15-20 categorías forestales por zona (34 contando categorías de mezclas temáticas), con unos porcentajes de acierto, valorados con un test independiente en más del 85%, o, a un nivel más general, una leyenda de 7 categorías por zona (12 con categorías de mezclas temáticas), con un 93% de porcentaje de acierto global.

Palabras clave: *Áreas de entrenamiento, Clasificación Mixta, Teledetección, cartografía de vegetación, Cataluña.*

ABSTRACT

A mix classification method for vegetation mapping is presented in this article. Landsat satellite images and climatic and orographic variables have been used in this pro-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

cess. Its results will be applied in the Catalonia Land Cover Map revision in order to extend its legend. Training areas are obtained from existing digital cartography like the Catalonia Habitats Map and submitted to a statistical treatment to assure their thematic quality and class homogeneity. Our results, yet not definitive, point out the ability of this method to create vegetation maps with an spatial resolution of 30 meters and with a 15-20 categories' legend. The classification accuracy achieved is about an 85% for the most detailed level and about a 93% when the categories are gathered into a 7 classes' legend.

***Key Words**: Training areas, Mix Classification, Remote Sensing, Vegetation Mapping, Catalonia.*

INTRODUCCIÓN

El Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña (MCSC) es un producto digital realizado en el CREAF que describe las principales cubiertas y usos del suelo de Cataluña. Las áreas de la primera versión del MCSC se obtuvieron a partir de la fotointerpretación y digitalización sobre pantalla de ortofotografías en color 1:25 000 del año 1993 (*MCSC*, 1999; *Ibàñez et al.*, 2002; *Burriel et al.*, 2001).

Actualmente se está llevando a cabo la segunda versión del MCSC, cuyo principal soporte son las ortofotografías 1:5 000 en color del período 2000/03. Otra comunicación en este Congreso explica más detalladamente la metodología utilizada en la reedición del MCSC. Sin embargo, la información obtenible con fotointerpretación de ortofotografías no permite la diferenciación de la mayoría de bosques. En este sentido, las imágenes de satélite, con una mayor resolución espectral y temporal que las ortofotografías, pueden ayudar a la discriminación de ciertas formaciones vegetales, al tiempo que el tratamiento digital de dichas imágenes permite mayores posibilidades de obtención de cartografía. Si bien es cierto que dichas imágenes tienen en muchos casos una resolución espacial menor, las ventajas comentadas permiten igualmente plantearse su utilización.

El objetivo de este trabajo es la cartografía de vegetación en el ámbito catalán utilizando clasificación digital de una serie continua de imágenes Landsat 7 ETM+ del período enero 2002 - mayo 2003, y Landsat 5 TM a partir de julio de 2003 (todas ellas con periodicidad de 16 días), así como otras variables de carácter climático y orográfico.

Existen otras experiencias donde se han utilizado imágenes de teledetección espacial para cartografiar con algún nivel de diferenciación las zonas forestales con una leyenda y extensión territorial similar a las que aquí nos ocupan, ya sea desde el ámbito de la fotointerpretación (*Corine Land Cover Project*, 1985), como desde el punto de vista de las clasificaciones digitales (*Baulies et al.*, 1991; *Viñas y Baulies*, 1995; *LCMGB*, 1990; *Fuller et al*., 1994; *Wulder*, 2002; *EOSD*, 2004; *Homer et al.*, 1994).

A diferencia de la mayoría de metodologías citadas anteriormente, en este trabajo se pretende aprovechar todas las posibilidades que ofrece la resolución temporal de las imágenes de satélite con el fin de aumentar el poder de discriminación de cubiertas vegetales con compor-

tamientos fenológicos diferenciados. En el proceso de clasificación se han incluido también variables climáticas y orográficas que contribuyen a la diferenciación de los diferentes tipos de vegetación. Otra característica del presente trabajo es la utilización de bases cartográficas digitales sobre vegetación realizadas recientemente (Mapa de Hábitats de Cataluña), como fuente para la obtención de las áreas de entrenamiento. Este proceso, que requiere un tratamiento estadístico previo, permitirá actualizar periódicamente y mediante tratamiento digital las bases utilizadas, y así mismo significa un considerable ahorro en tiempo y esfuerzo al disminuir los requerimientos en trabajo de campo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Las imágenes utilizadas han sido corregidas geométricamente por el Departamento de Geografía de la UAB, utilizando un MDE siguiendo la metodología de *Palà y Pons* (1995), implementada en el módulo CorrGeom de MiraMon (*Pons*, 2002). Se ha colaborado con dicho departamento para la corrección radiométrica de las imágenes, utilizando el módulo CorRad de MiraMon y siguiendo la metodología descrita en *Pons y Solé-Sugrañes* (1994), y contrastado en *Salvador et al.* (1996).

División del ámbito catalán en zonas de estudio mediante uso de variables climáticas

Como se ha comentado, el ámbito general de estudio de este trabajo es Cataluña. Sin embargo, la superficie que esto supone es demasiado extensa para trabajar al nivel de detalle espacial y temático deseado. Una división del ámbito catalán en zonas más reducidas hace que los procesos informáticos sean más rápidos, y más cómoda la revisión visual de las imágenes y de los resultados, al tiempo que evita la posibilidad de ciertas confusiones.

La distribución geográfica de la vegetación está influenciada por condiciones climáticas. Es por ello que se ha optado por realizar la división de todo el ámbito catalán utilizando variables climáticas, de modo que las nuevas áreas obtenidas sigan en cierta medida un patrón de distribución de vegetación.

Con este fin, se han introducido en un proceso de clasificación no supervisada de tipo IsoData (*Duda y Hart*, 1973), con núcleo clasificador basado en mínima distancia euclidiana, las cuatro primeras componentes principales estandarizadas de las siguientes variables, obtenidas todas ellas del Atlas Climático Digital de Cataluña (*Pons*, 1996; *Ninyerola et al*., 2000; *Ninyerola*, 2000; *ACDC*, 2001):

- Temperatura media de las mínimas en Enero.
- Temperatura media de las máximas en Julio.
- Valor máximo anual en cada píxel de las precipitaciones máximas mensuales.
- Valor mínimo anual en cada píxel de las precipitaciones mínimas mensuales.
- Valor máximo anual en cada píxel de la radiación máxima mensual.
- Valor mínimo anual en cada píxel de la radiación mínima mensual.

Como resultado se obtienen nueve *clusters* que a partir de ahora se denominarán zonas climáticas y que quedan resumidas en la siguiente figura y tabla:

Cuadro 1. Superficie ocupada por las zonas climáticas delimitadas con IsoData

Código Leyenda	Descripción Zona Climática	Superficie Total (km^2)
1	Temperatura muy alta en verano y media en invierno, precipitación muy baja y radiación alta	4 080,10
2	Temperatura muy alta en verano y media en invierno, precipitación baja y radiación media	4 117,07
3	Temperatura media, precipitación media, radiación alta.	4 870,63
4	Temperatura alta, precipitación media en estación húmeda y muy baja en estación seca, radiación alta	5 906,49
5	Temperatura moderadamente baja, precipitación media, radiación baja	2 266,70
6	Temperatura alta, precipitación muy alta en estación húmeda y media en estación seca, radiación media	4 502,76
7	Temperatura media, precipitación muy alta en estación húmeda y alta en estación seca, radiación alta	2 836,20
8	Temperatura muy baja, precipitación muy alta, radiación muy alta	2 024,94
9	Temperatura muy baja, precipitación muy alta, radiación muy baja	1 483,27

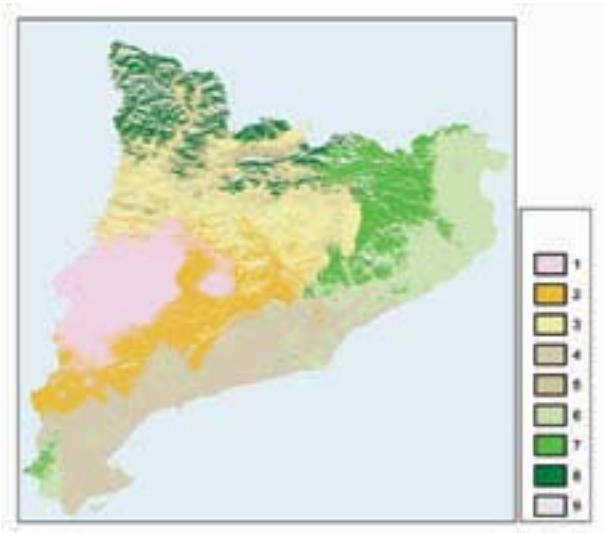


Figura 1. Zonas climáticas de Cataluña obtenidas con clasificación no supervisada IsoData (véase cuadro 1 para significado de cada categoría).

Cabe matizar un par de puntos sobre estas zonas climáticas. En primer lugar, se debe tener en cuenta que las variables utilizadas en la delimitación de las zonas climáticas serán introducidas también en los posteriores procesos de clasificación de vegetación. Como se podrá comprobar más adelante, la capacidad que tienen estas variables para discriminar tipos de vegetación va más allá de las nueve zonas delimitadas en este primer proceso IsoData. Desde un punto de vista de jerarquías en los resultados de una clasificación no supervisada, se puede considerar esta delimitación de zonas climáticas como un resultado general, donde de algún modo los *clusters* obtenidos incorporan en su interior otras categorías más concretas (que intentaremos diferenciar en los procesos posteriores). En segundo lugar, aquí se presentan las zonas como unidades. Sin embargo, algunas de las áreas se han visto separadas en dos zonas diferentes, para poder adaptarse a las trayectorias que siguen las dos órbitas Landsat sobre Cataluña. En otros casos, esta división de una unidad climática en varias se ha forzado para poder beneficiarse de la mayor disponibilidad de imágenes, que supone trabajar en ámbitos que compartan ambas órbitas Landsat, o incluso por problemas de nubosidad.

Detección de nubes y selección de imágenes utilizables

Aunque en teoría se dispone de todas las imágenes comprendidas entre enero de 2002 y octubre de 2003 (teniendo en cuenta tanto las imágenes Landsat 7 ETM+ como las Landsat 5 TM para fechas a partir de junio de 2003), la cantidad de imágenes realmente utilizables en cada una de las zonas queda muy reducida. Esto se debe a dos motivos. Por un lado, a la presencia de nubes y neblinas (fenómenos especialmente frecuentes durante el año 2002, uno de los más nubosos de los que existe registro) y, en menor grado, a la presencia de nieves en zonas de montaña. Por otro lado, al hecho que el modelo de corrección radiométrica todavía no funciona suficientemente bien en zonas sin radiación solar directa, con lo cual quedan prácticamente inutilizables las imágenes de invierno en zonas con relieve moderado o alto.

La cubierta nival ha sido detectada siguiendo la metodología descrita en *Dozier* (1989), y se han aplicado máscaras con el fin de excluir esta cubierta en el resto de procesos.

Algunas imágenes con nubes en poca proporción también han sido utilizadas. En estos casos se ha procedido a la detección de nubes, y a la aplicación de máscaras para su eliminación. La detección de nubes se ha efectuado mediante el uso de umbrales en las imágenes originales, previo estudio del histograma de la imagen. Las sombras de las nubes se han fotointerpretado después de la detección de nubes, puesto que los métodos automáticos no han dado todavía resultados suficientemente operativos.

Aplicación de máscara para vegetación natural

A partir del MCSC se ha creado una máscara de las cubiertas correspondientes a vegetación natural y se ha aplicado en cada una de les imágenes. Con la aplicación de esta máscara se está reduciendo la variabilidad espectral de las imágenes y, por lo tanto, las posibilidades de confusión entre categorías. Además, dicha máscara permite la creación de una leyenda dedicada exclusivamente a vegetación natural (no cultivos, no urbano, no agua, etc.).

Preparación de las áreas de entrenamiento

Como se comentaba en la introducción, la obtención de áreas de entrenamiento es un proceso lento y al mismo tiempo clave en los procesos de clasificación de imágenes. En este trabajo se opta por la utilización de información temática existente sobre vegetación en el ámbito de Cataluña. Concretamente, se ha utilizado el Mapa de Hábitats de Cataluña, que cartografía los hábitats del territorio catalán, basándose en la interpretación y adaptación de la clasificación de hábitats de la Unión Europea, según lo propuesto en el documento "CORINE Biotopes Manual" (CBM), editado por la Comisión Europea el 1991 (*CHC*, 1991). También ha sido utilizado el mismo Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña, ya sea indirectamente en la aplicación de la máscara, así como, de forma más directa, para obtener áreas de entrenamiento de ciertas categorías (bosques de ribera).

El Mapa de Hábitats se distribuye sobre un corte cartográfico 1:50 000. La elaboración de esta cartografía empieza el año 1998 y el trabajo de gabinete prácticamente ha finalizado a finales del año 2003. La leyenda del Mapa de Hábitats proviene de la Lista de hábitats de Cataluña (LHC) y está formada por 282 categorías. La base cartográfica es de tipo vectorial e incluye información sobre el recubrimiento de cada hábitat.

El levantamiento cartográfico de la base se efectúa por fotointerpretación de pares estereoscópicos de fotografía aérea IRC 1:60 000 del Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) y por trascripción de los elementos fotointerpretados sobre ortofotomapas IRC 1:25 000 en papel. Ha contado con el soporte de bases de referencia sobre hidrografía y topografía 1:50 000, así como la prospección de campo y la consulta de documentación y cartografía existente en la zona.

El tamaño mínimo para aceptar un polígono en la fotointerpretación es de 2.25 ha. Los polígonos con anchura igual o inferior a 50 metros y mínimo de 500 metros de longitud se han representado como líneas.

A continuación describimos una serie de procesos aplicados sobre esta base, con el fin de aprovechar de un modo eficiente para nuestros propósitos esta información tan exhaustiva territorial y temáticamente.

En primer lugar, para garantizar el uso de áreas de entrenamiento con una máxima homogeneidad temática, se han seleccionado aquellos hábitats con recubrimiento igual o mayor al 80%. Los hábitats seleccionados han sido erosionados (módulo BuffDist de MiraMon) 60 metros en ambos lados de las fronteras de sus polígonos, con el fin de reducir los posibles efectos de errores de posicionamiento geográfico, ya sean derivados de la escala cartográfica de la base, como debidos a los inevitables errores en la delimitación de hábitats naturales (fronteras borrosas).

Los polígonos erosionados han sido fragmentados a partir de cuadrados de 200 metros de lado. Esto permite que en un mismo hábitat existan píxeles utilizados en el proceso de clasificación y otros que serán reservados como verdad-terreno en una posterior validación de los resultados. Además, con ello se consigue una cierta homogeneización de la superficie que ocupa cada área de entrenamiento.

A pesar de las precauciones tomadas hasta aquí, se puede dudar aún de la calidad de las áreas de entrenamiento. El siguiente paso es una depuración de las áreas seleccionadas utilizando como criterio la variabilidad interna de las mismas. El proceso consiste en comparar,

para cada categoría existente en la zona, cada uno de los polígonos con el valor patrón de media y desviación para esa categoría, calculado promediando las medias y desviaciones de todos los polígonos de la categoría. Los polígonos más extremos son filtrados de forma iterativa hasta que los parámetros de la población se estabilizan.

La figura 2 muestra un fragmento de una imagen en falso color (4+5+3). Las líneas amarillas son los bordes de los polígonos del Mapa de Hábitats, en este caso una masa de *Quercus rotundifolia* con 100% de recubrimiento. En color azul aparecen las áreas de entrenamiento erosionadas y fragmentadas. Obsérvese que las flechas amarillas señalan zonas que podríamos considerar como contaminación en la categoría. Las áreas que se han descartado mediante el filtro aparecen con trama roja (véase anexo de figuras).

De todos los polígonos seleccionados finalmente se reservan, de modo aleatorio, la mitad para realizar una validación independiente de los resultados de la clasificación, dejándose la otra mitad para alimentar el clasificador.

Como se decía anteriormente, la complejidad de la leyenda del Mapa de Hábitats (282 categorías) es excesiva para nuestros fines. Algunas de estas categorías describen mezclas temáticas, aunque, dejando a parte la dificultad para delimitar este tipo de categorías mediante fotointerpretación o trabajo de campo, no siempre esta mezcla tiene por qué producirse a una escala subpíxel. Otras categorías se bifurcan en otras más concretas, debido a la presencia de especies muy minoritarias, con un interés local por lo que refiere a la botánica, pero con tal recubrimiento que hace muy difícil diferenciarlas con imágenes de satélite. Sin embargo, en la clasificación se han introducido todas las categorías disponibles y, una vez analizada la clasificación y la matriz de confusión, se ha reducido esta leyenda original reagrupando categorías con alta confusión entre sí en una más general, o eliminando aquellas categorías de mezcla de hábitats (las cuales sólo aportan confusión).

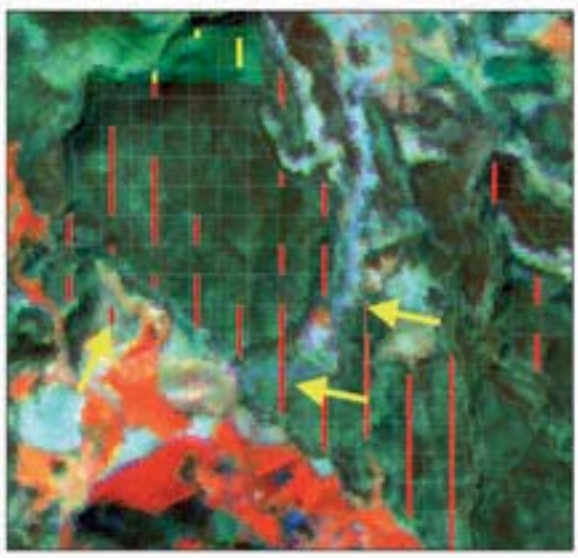


Figura 2. Composición en falso color 4+5+3 de una imagen Landsat 7 ETM+ de fecha 01-04-2003.

Una doble reflexión sobre este hecho es necesaria. Por un lado y tal como se verá más adelante, el método de clasificación adoptado presupone que las clases temáticas que queremos clasificar son a menudo una suma (o un conjunto) de distintas clases espectrales. El proceso de filtrado de áreas de entrenamiento puede convertirse en pernicioso para el proceso en el sentido de estar eliminando la posibilidad de que ciertas clases espectrales se asignen a una determinada clase temática (al estar eliminando los polígonos estadísticamente más extremos de cada categoría se corre el riesgo de reducir excesivamente la variabilidad espectral que recoge cada categoría o área de entrenamiento). Por otro lado, el hecho que la leyenda del Mapa de Hábitats sea tan extensa (recordemos, 282 categorías) implica que las categorías delimitadas sean, a excepción de las ya comentadas categorías referentes a mezclas temáticas, muy puras y concretas. La utilización de mapas previos también tiene el inconveniente de poder introducir errores por su paulatina obsolescencia, contra la cual el control de homogeneidad radiométrica parece un buen antídoto. Todo esto nos hace advertir que el proceso de filtrado, aunque necesario, debe ser especialmente cuidadoso.

La utilización del Mapa de Hábitats y del MCSC va más allá de la obtención de unas áreas de entrenamiento para un posterior proceso de clasificación digital. El conocimiento del comportamiento espectral de cada categoría, así como la continuidad temporal en la obtención de imágenes de satélite, permitirán que la actualización temporal de la cartografía sobre vegetación sea más fácil, más rápida y menos costosa.

Método de clasificación: IsoData masivo + reclasificador espectral a temático

La clasificación mixta ha sido el método utilizado hasta el momento, empleando ClsMix y, para la clasificación no supervisada, el módulo IsoData, ambos integrados en MiraMon. IsoData (*Duda y Hart*, 1973) típicamente agrupa, mediante criterio de mínima distancia, los píxeles de una escena a un centro de clase previamente ubicado según el número de *clusters* especificado. Se recalculan de nuevo los centros de clase teniendo en consideración los valores de todos los píxeles que se han incorporado durante la fase anterior. Todo el proceso se repite iterativamente hasta que las asignaciones de los píxeles a los centros llegan a una situación de estabilidad suficientemente satisfactoria, o bien hasta que se llega a un número máximo de iteraciones fijado previamente por el usuario, etc.

La implementación de IsoData (MiraMon) distribuye de dos formas distintas las semillas iniciales. Por un lado, permite introducir un determinado número de semillas sobre la diagonal multivariante de los datos, repartidas de forma equidistante. El rango donde repartir semillas en cada variable se puede restringir con un criterio basado en la media y desviación de cada banda, o bien en todo el rango posible. Por otro lado, se permite introducir otro grupo de semillas de forma aleatoria en todo el espacio multivariante de la imagen. Otra particularidad interesante de la implementación de IsoData utilizada, es la posibilidad de utilizar diferentes núcleos clasificadores para investigar cuál es el más adecuado a nuestros propósitos: mínima distancia, distancia de Manhattan, máxima probabilidad, etc. Con ello se tiene mayor flexibilidad en lo que respeta al tratamiento más o menos paramétrico del clasificador. Por el momento se han probado dos criterios distintos para el cálculo de distancias entre píxeles y clases o *clusters*: la distancia euclidiana y la distancia Manhattan.

Finalmente, comentar que la implementación utilizada permite la introducción de un gran número de variables (temperatura, pluviometría, reflectancia, etc.) sin necesidad de degradar a formato byte, así como la posibilidad de obtener gran número de categorías estadísticas (hasta un máximo de 32 767).

Las variables introducidas en IsoData provienen de todas las bandas de las imágenes disponibles en cada zona (en unidades de reflectancias, excepto la banda 6, en unidades de grado centígrado) y de índices derivados de ellas (NDVI), así como de variables orográficas (modelo digital de pendientes, de resolución nominal 30 m), y de variables climáticas (precipitación media anual, temperatura media de las mínimas en enero, temperatura media de las mínimas en abril, temperatura media de las máximas en julio, radiación mediana anual, todas ellas a resolución nominal 180 m).

Como puede observarse, las variables introducidas cuantifican diferentes propiedades físicas del terreno, y, por lo tanto, utilizan diferentes unidades para representarse. Esto hace que las variables tengan varianzas muy dispares entre sí, hecho que no responde a su variabilidad interna real, sino a la distinta magnitud que toman las unidades, con la que se representa cada imagen. Es necesario, pues, escalar o estandarizar de algún modo las imágenes si no queremos que este fenómeno, totalmente irrelevante, tenga una influencia excesiva en los resultados de la clasificación.

En este sentido, se han seguido dos propuestas distintas para la estandarización de variables en la clasificación no supervisada. Por un lado, una normalización de cada imagen, de modo que la imagen normalizada tenga media 0 y desviación estándar 1. Por otro lado, el uso del análisis de componentes principales (ACP). El ACP no se realiza sobre el conjunto completo de variables, sino que se escogen los mejores –los más explicativos– CP de conjuntos de variables con alta correlación entre sí (los mejores CP del conjunto de bandas del canal visible por un lado, del infrarrojo por el otro, de las variables climáticas por otro, etc.). De este modo, se minimiza la probabilidad de descartar un CP poco explicativo con relación al resto, pero con información válida para la discriminación de nuestras categorías. Ambos métodos tienen la desventaja que desperdician la información física que ofrece cada una de las imágenes. Futuras líneas de trabajo pretenden dedicarse a investigar nuevas formas de estandarización de las variables, que preserven su significado físico, al mismo tiempo que neutralicen el efecto de las unidades sobre la varianza de cada variable.

La segunda fase del clasificador se basa en el módulo ClsMix de MiraMon. ClsMix es un programa de clasificación mixta de imágenes. Utilizando unos umbrales de frecuencia dados por el usuario, ClsMix reclasifica cada clase espectral de una imagen obtenida con clasificación no supervisada en clases temáticas, previamente definidas por el usuario mediante áreas de entrenamiento. ClsMix utiliza básicamente dos parámetros para realizar la reclasificación. Por un lado, la *fidelidad* de la clase espectral a la clase temática, que es la mínima proporción con que una clase espectral se encuentra dentro de la clase temática a la que se asignará finalmente. Esta proporción se expresa en función de la clase espectral. Por otro, la *representatividad* de la clase espectral en la clase temática, que es la proporción de la clase espectral dentro la clase temática (en relación con la clase temática).

La clasificación resultante se valida con una matriz de confusión (módulo MatConf de MiraMon) utilizando las áreas de entrenamiento independientes reservadas para tal fin.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Hasta el momento la metodología aquí descrita se ha aplicado sobre dos de las zonas climáticas definidas anteriormente. Por un lado, se ha tratado la zona denominada "Temperatura Media, Precipitación Media, Radiación Alta" (código 3 de la leyenda de la figura 1 y cuadro 2) y, por otro, la de "Temperatura Alta, Precipitación Muy Alta en Estación Húmeda y Media en Estación Seca, Radiación Media" (código 6 de la leyenda de la figura 1 y cuadro 2). En el cuadro 2 se muestra la superficie ocupada por cada una de estas zonas, las fechas de las imágenes Landsat utilizadas durante la clasificación y un resumen de los resultados de la clasificación.

Cuadro 2. Zonas Climáticas donde se ha aplicado la metodología y resultados de la clasificación. (*) Sólo el área comprendida entre órbitas.

Código Leyenda	Superficie válida utilizada (píxeles)	Fechas Imágenes Landsat utilizadas en la clasificación	Número máximo de categorías clasificadas (con mezcla)	Porcentaje de acierto (ponderación sobre los clasificados)
3	7 460 696	01-04-2002, 19-05-2002, 02-08-2003, 24-09-2002	17 (34)	86.70%
6*	840 331	19-03-2003, 13-06-2002, 02-08-2003	14 (28)	86.9%

Los resultados obtenidos hasta el momento no son aún definitivos pero apuntan ya las tendencias generales a las que conduce la metodología descrita en esta comunicación. En general, se permite discriminar de forma aceptable un número de categorías forestales que varía entre 15 y 20, y hasta 34 si consideramos también las mezclas de categorías.

De las matrices de confusión se deduce que las áreas de entrenamiento obtenidas de forma automática son suficientemente válidas para utilizarlas en la clasificación. Las dimensiones de la matriz de confusión completa (con todas las categorías) sobrepasa los límites que permiten este documento. El cuadro 3 muestra un fragmento de una matriz para unas categorías características. En general, las categorías se muestran bien discriminables las unas de las otras, e incluso se llega a diferenciar satisfactoriamente a nivel de especie (ver, por ejemplo, el caso de los pinos, tradicionalmente muy difíciles de separar). Algunas de ellas, sin embargo, no consiguen clasificarse. Se trata de categorías con poca representatividad en la zona climática (por ello estos errores no tienen un peso importante en el porcentaje de acierto global). Los motivos por los que no aparecen se atribuyen a un excesivo filtrado de sus áreas de entrenamiento. Al ser tan poco frecuentes y tener pocos píxeles de áreas de entrenamiento, los valores patrones utilizados en el filtrado de estas categorías pueden estar desviados respecto a la realidad y, consecuentemente, introducir mayor confusión.

Los errores de omisión suelen ser considerablemente mayores a los de comisión. Obsérvese, sin embargo, que en general la mayoría de píxeles "omitidos" en una categoría no se confunden con otras sino que no se clasifican. Este hecho está íntimamente relacionado con el parámetro de fidelidad usado en ClsMix. Cuanto más alto es este parámetro, más exigente es el clasificador, más difícil es que un píxel se clasifique en una determinada categoría. El número de píxeles no clasificados puede reducirse si, a partir de los resultados de ClsMix, definimos nuevas categorías, mezcla de dos o más categorías presentes en las áreas de entrenamiento introducidas. A parte de reducir los píxeles no clasificados, estaremos ampliando la leyenda de la clasificación. Por ejemplo, en la clasificación presentada en el cuadro 3, pasamos de 21 categorías y 4 685 304 píxeles clasificados a, definiendo nuevas categorías de mezcla, 34 categorías y 6 645 330 píxeles clasificados.

Cuadro 3. Matriz de confusión para alguna de las categorías de la leyenda. Leyenda: 1= Otros (conjunto de 16 categorías no contempladas en esta tabla); 2= Matorrales y tomillares; 3= Prados silicícolas; 4= *Pinus halepensis*; 5= *Pinus sylvestris*; 6= *Pinus nigra*.

		Verdad-Terreno								
		1	2	3	4	5	6	Total	%com	Exusu
Clasificación	0	*4767*	2376	384	3928	1671	6135	19261		
	1	*16837*	*238*	*30*	*98*	*132*	*646*	*17981*	*6.36*	*93.64*
	2	*862*	5832	13	84	0	12	6803	14.30	85.70
	3	*215*	29	2657	0	0	0	2901	8.40	91.60
	4	*168*	377	0	15065	2	1424	17036	11.60	88.40
	5	*404*	0	0	0	5408	141	5953	9.20	90.80
	6	*788*	18	0	1361	77	7930	10174	22.10	77.90
	Total	*24041*	8870	3084	20536	7290	16288	80109		
	%om	*29.97*	34.30	13.80	26.60	25.80	51.30			
	ExProd	*70.03*	65.70	86.20	73.40	74.20	48.70			

Un hecho a destacar es que las confusiones existentes se suelen dar entre categorías parecidas, o bien suelen aparecer asociadas en la naturaleza (pinos y matorrales, por ejemplo). Esto puede aprovecharse para presentar los resultados cartográficos de la clasificación con distintos niveles de detalle y precisión temática (aunque a mayor detalle, menor grado de acierto general y por categoría). En lugar de intentar discriminar diferentes especies de pinos, por ejemplo, podemos generar una categoría más general que incluya a todas estas especies. El cuadro 4 es la matriz de confusión de la misma clasificación que el cuadro 3, pero con las categorías agrupadas. Obsérvese que el porcentaje de acierto ponderado sobre las zonas libre de NODATA aumenta del 86,7% al 93,0%.

Cuadro 4. Matriz de confusión para las categorías agrupadas procedentes de la clasificación. Leyenda: 0= NODATA, 1= Coscojas, 2= Prados, 3= Pinos, 4= Robles, 5= Encinares, 6= Carrizal, 7= Suelo.

		Verdad-terreno									
		1	2	3	4	5	6	7	Total	%com	ExUsu
Clasificación	0	2837	565	11789	476	3533	0	61	19261		
	1	6235	66	96	106	267	15	18	6803	8.30	91.70
	2	38	3316	23	19	42	0	2	3440	3.60	96.40
	3	490	0	31508	118	1063	0	2	33181	5.00	95.00
	4	68	2	82	2668	14	0	0	2834	5.90	94.10
	5	628	44	795	272	12795	0	0	14534	12.00	88.00
	6	0	0	0	0	0	22	0	22	0.00	100.00
	7	0	0	0	0	0	0	34	34	0.00	100.00
	Total	10296	3993	44293	3659	17714	37	117	80109		
	%om	39.40	17.00	28.90	27.10	27.80	40.50	70.90			
	ExUsu	60.60	83.00	71.10	72.90	72.20	59.50	29.10			

El uso del filtrado de las áreas de entrenamiento mediante el estudio de su variabilidad interna mejora sensiblemente los resultados de la clasificación. Por ejemplo, en la zona 6, utilizando una misma imagen IsoData con 310 *clusters*, con una leyenda de 16 categorías y exigiendo una fidelidad en ClsMix del 70%, el porcentaje de acierto aumenta modestamente del 86,9 (sin filtrado) a 87,1. El hecho que el área esté dominada por la categoría *Pinus halepensis*, la cual tiene un buen porcentaje de acierto en ambos casos, nos puede enmascarar algunas diferencias existentes entre los resultados con o sin filtro. Podemos observar cómo el uso del filtro reduce la confusión entre ciertas categorías y al mismo tiempo permite clasificar más superficie que el uso de áreas de entrenamiento sin filtrar. Sin embargo, dado que el filtrado iterativo descarta más de la mitad de la superficie de áreas de entrenamiento, se tendrá que estudiar con más detalle si es posible mejorar los resultados variando los parámetros estadísticos de eliminación, los parámetros de estabilización de la población y las imágenes de referencia.

REFERENCIAS

ACDC (2001): Atles Climàtic Digital de Catalunya. The Internet. (http://magno.uab.es/atles-climatic).

Baulies, X.; Joaquinet, M.; Pineda, L. y Tarda, A. (1991): El proyecto CORINE-Land Cover en el sector Oriental Peninsular y las Islas Baleares. *IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*, pp. 244- 250. A.E.T. Sevilla.

Burriel, J.A.; Ibàñez, J.J. y Pons, X. (2002): El Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña: Herramienta para la gestión y la planificación territorial. Montes para la sociedad del nuevo Milenio. *III Congreso Forestal Español*, 3, pp. 83-89, Junta de Andalucía. Granada.

CHC (1991): Cartografia dels Hàbitats de Catalunya. The Internet. (*http://www.gencat.net/mediamb/pn/2chabitats-2.htm*)

Corine Land Cover Project (1985): *Technical Guide*. Direction Generale de l'Environment, Comission des Communautes europeennes, Bruxelles, Belgique.

Dozier, J. (1989) Sepectral Signature of Alpine Snow Cover from Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, pp. 9-22.

Duda, R. D. y Hart, P. E. (1973): *Pattern Classification and Scene Analysis*. John Wiley & Sons. New York.

EOSD (2004): Earth Observation for Sustainable Development of Forests. The Internet. (*http://www.pfc.forestry.ca/eosd/cover/index_e.html*)

Fuller, R.M.; Groom, G.B. y Jones, A.R. (1994): The Land Cover Map of Great Britain: an automated classification of Landsat Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60, pp. 553-562.

Homer, C.G.; Ramsey, D.R.; Edwards, T.C. Jr.y& A. Falconer (1997): Landscape Cover-Type Modeling Using a Multi-Scene Thematic Mapper Mosaic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(1), pp. 59-67.

Ibàñez, J.J.; Burriel, J.A. y Pons, X. (2002): El Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya: Una eina per al coneixement, la planificació i la gestió del territori. *Perspectives territorials*, 31, pp. 10-65.

LCMGB (1990): Land Cover Map of Great Britain. The Internet. (*http://www.ceh.ac.uk/data/lcm/index.htm*)

MCSC (1999): Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya. The Internet. (*http://www.creaf.uab.es/mcsc/index.htm*).

Ninyerola, M. (2000): *Modelització climàtica mitjançant tècniques SIG i la seva aplicació a l'anàlisi quantitativa de la distribució d'espècies vegetals a l'Espanya peninsular*. Tesis doctoral (capítulo 3). Universitat Autònoma de Barcelona. (dirigida por los Drs. Xavier Pons y Joan M. Roure).

Ninyerola, M.; Pons, X. y Roure, J.M. (2000): A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*. 20, pp. 1823-1841.

Palà, V. y Pons, X. (1995): Incorporation of relief into geometric corrections based on polynomials. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61(7), pp. 935-944.

Pons, X. (1996): Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de evaciones. Propuesta metodológica. En: Juaristi,J. y Moro, I. (eds.), *VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*. Vitoria-Gasteiz

Pons, X. (2002): *MiraMon. Sistema d'Informació Geogràfica i software de Teledetecció*. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAF. Bellaterra.

Pons, X. y Solé-Sugrañes, Ll. (1994): A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 48, pp. 191-204.

Salvador, R.;Pons, X. y Diego. F. (1996): Validación de un método de corrección radiométrica sobre diferentes áreas montañosas. *Revista de Teledetección*, 7, pp. 21-25.

Viñas, O. y Baulies, X. (1995): 1:250 000 Land-use map of Catalonia (32 000 km2) using multitemporal Landsat-TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 16(1), pp. 129-146.

Wulder, M. (2002): Mapping the land cover of the forested area of Canada with Landsat data. *Proceedings of 2002 International Geoscience and Remote Sensig Symposium, June 24-28*, Toronto, Canada.

Detección, confirmación y validación de cambios con series de imágenes. Aplicación a Landsat 7

L. Martínez Rodrigo, M. Joaniquet Tamburini, V. Palà Comellas y R. Arbiol Bertran

Unitat de Teledetecció. Institut Cartogràfic de Catalunya. Parc de Montjuïc s/n, 08038 Barcelona

RESUMEN

En este trabajo hemos desarrollado una metodología para la detección de cambios cartográficamente significativos a partir de una serie de imágenes de satélite, con el propósito de asistir en los procesos de actualización cartográfica. Como paso previo, se aplica a la serie un proceso de corrección y compensación del efecto atmosférico, y se discriminan los cambios no deseados como nubes, variación de cubiertas de agua, etc. A continuación, se elaboran pares multitemporales que emplean la primera imagen de la serie como referencia. Estos pares se fotointerpretan para delinear las zonas que presentan diferencias radiométricas importantes. Las imágenes de diferencias obtenidas son clasificadas en árbol de tal modo que los cambios detectados en la primera imagen de diferencias pueden confirmarse en la segunda y validarse con la tercera imagen. La metodología de detección, confirmación y validación de cambios se ha aplicado a una serie multitemporal de cuatro imágenes Landsat 7 (banda pancromática) del área de Banyoles, y el resultado muestra que la técnica sugerida es adecuada para el fin propuesto. Adicionalmente, los resultados de la metodología aplicada han sido contrastados satisfactoriamente mediante la comparación con ortofotomapas 1:25000 del área de estudio.

Palabras Clave: *Detección cambios, actualización cartográfica, diferencia radiométrica, clasificación, Landsat 7, Banyoles*

ABSTRACT

In this paper, a methodology developed for the detection of significant changes for cartographic purposes on a set of satellite images is introduced. The main aim of this work is to as-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

sist the user in cartographic updating processes. As a previous step, a series of atmospheric compensation and correction processes are applied to the imagery. Besides, several covers such as clouds and water layers that are prone to generate blunder changes are detected and marked off. Next, multitemporal pairs of images are generated using the oldest image of the series as a reference image. Then, the pairs are photo interpreted to delineate the areas that show significant radiometric differences. The difference images obtained are analysed within a tree classification structure in such a way that the changes detected in the fist difference image can be confirmed on the second one, and can be validated with the third image. The methodology for detection, confirmation and validation of changes has been applied to a multitemporal set of four Landsat 7 images (pan band) on Banyoles area. The results show that the suggested technique is appropriated to the pursued objective. Additionally, the results of the methodology have been successfully verified by comparison with 1:25000 ortophotomaps of the area.

***Key Words**: Change detection, cartographic updating, radiometric difference, classification, Landsat 7, Banyoles.*

INTRODUCCIÓN

La localización de cambios territoriales, como los derivados de la obra pública, es fundamental para asistir a la planificación de los programas de actualización cartográfica, que es fundamental para una mejor gestión y planificación territorial. Por este motivo, el Institut Cartogràfic de Catalunya desarrolla un proyecto destinado a la detección de cambios territoriales significativos a partir de imagen de satélite.

Las imágenes obtenidas por un sensor como el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) de la plataforma Landsat 7, son un instrumento adecuado para el análisis de dichos cambios, gracias

Cuadro 1. Resolución espacial y espectral del sensor Landsat ETM+.

Número de banda	Longitud de onda (µm)	Resolución nadir (m)
1	0,45 - 0,52	30
2	0,52 - 0,60	30
3	0,63 - 0,69	30
4	0,76 - 0,90	30
5	1,55 - 1,75	30
6	10,4 - 12,5	60
7	2,08 - 2,35	30
Pan	0,50 - 0,90	15

a su resolución temporal, espacial y radiométrica. El satélite Landsat 7 cuenta con un ciclo de repetición de 16 días, un conjunto de bandas en espectro solar con resolución de 30 metros y una pancromática de 15 metros, y una banda en infrarrojo térmico con 60 metros de resolución (Cuadro 1). La banda pancromática es especialmente interesante por su resolución espacial, mientras que el resto permiten obtener información temática adicional que incorporar al proceso.

Las metodologías clásicas para la detección de cambios mediante imagen de satélite se basan en postclasificaciones o clasificaciones multitemporales a partir de dos imágenes (*Singh,* 1989). Por otro lado, existe la posibilidad de realizar el seguimiento del territorio a partir de una serie de imágenes por procedimientos aritméticos básicos (*Jensen,* 1996). En este trabajo planteamos una orientación diferente en la aplicación de una serie de imágenes para el seguimiento del territorio y la detección de cambios, de tal modo que la información de las nuevas imágenes permita validar o rechazar los resultados de las anteriores.

Para los procesos de actualización cartográfica, los cambios de especial interés son los de carácter artificial. Los cambios artificiales tienen unas especiales características en cuanto a radiometría, morfología y periodo temporal, lo que condicionará la metodología para su detección. En cuanto a la radiometría, cabe destacar las grandes fluctuaciones durante una modificación artificial del terreno, dado que con frecuencia implica la aparición de suelo desnudo, que tiene una elevada reflectividad, comparado con la reflectividad de la mayoría de las construcciones antropogénicas. Sobre la morfología, se puede mencionar que existe una gran variabilidad de formas en los cambios que son de interés, desde formas muy compactas como las construcciones urbanas, hasta formas claramente lineales, como las vías de comunicación terrestre. Respecto al periodo temporal, es destacable que el periodo típico de evolución de las modificaciones significativas de interés para la cartografía va de varios meses a varios años.

Las imágenes que conforman la serie de estudio son de carácter multitemporal, por tanto, cada una se ha obtenido bajo una geometría de iluminación y unas condiciones atmosféricas particulares. Por ello, es necesario paliar el impacto que sobre la medida radiométrica tiene cada condición de observación. De este modo se obtiene finalmente una serie de imágenes de reflectividad corregida atmosféricamente y normalizada (*Martínez et al.,* 2003c). Así mismo, los cambios de carácter natural y no relevantes en el ámbito cartográfico, como es la presencia de nubes y su sombra y las variaciones naturales de las cubiertas de agua, deben ser previamente identificados y eliminados de las imágenes (*Martínez et al.,* 2003a).

El problema que pueden presentar las imágenes que se emplean en el estudio, es la presencia de nubes no muy extensas y por lo general de carácter disperso. Este tipo de nube proyecta una sombra distinguible en la imagen Landsat debido a la elevada resolución espacial del sensor. La sombra de las nubes también debe ser delimitada correctamente, pues de lo contrario se manifiesta como un cambio acusado por disminución de la reflectividad en la imagen de diferencias (Martínez et al., 2003a).

El objetivo de este trabajo es establecer una metodología de trabajo a partir de imágenes de satélite para la detección de cambios reales en el territorio, susceptibles de ser reflejados en la cartografía. En el siguiente apartado se expondrá la metodología propuesta para la realización de este estudio. A continuación se presentará la zona de aplicación y los resultados alcanzados. Finalmente se expondrán las conclusiones obtenidas.

METODOLOGÍA

Corrección y compensación del efecto atmosférico

La corrección atmosférica de las imágenes se realiza mediante el método descrito por *Martínez et al.* (2003c) y *Martínez et al.* (2003b), que consiste en la aplicación consecutiva de un sistema de corrección atmosférica, basado en un método físico y simulaciones de transferencia radiativa, más un método de normalización estadístico basado en áreas pseudoinvariantes, que permite suavizar desviaciones no contempladas por el anterior.

Discriminación de cubiertas sin interés

La metodología propuesta para identificar las nubes se basa en tres fuentes de información. En primer lugar, la elevada reflectividad de las nubes en el espectro visible, que supone un incremento de reflectividad respecto a la serie. En segundo lugar la menor temperatura del techo de la nube respecto al suelo, debido al gradiente geométrico de temperatura en la atmósfera, que se asocia a un descenso de radiancia en la imagen térmica (*Martínez et al.,* 2000). Por último, la presencia de sombras proyectadas por las nubes sobre el suelo, que produce un descenso acusado de reflectividad. De cada una de ellas se establece una máscara por aplicación de umbrales que se supervisa buscando la alineación de nubes y sombras de acuerdo a la geometría de iluminación.

La metodología propuesta para la detección de agua se realizará en este trabajo mediante un clásico método de umbral aplicado sobre la reflectividad de la banda 4, puesto que en ella existe un gran contraste entre las cubiertas de agua respecto al suelo y la vegetación en general (*Martínez et al.,* 2003a).

Generación de los pares multitemporales y clasificación de las imágenes

La alteración de la cubierta terrestre tiene como consecuencia directa la modificación de su signatura espectral. Una vez compensadas las condiciones geométricas y atmosféricas en las que se realiza la observación, la signatura espectral depende tan sólo del comportamiento radiométrico de la superficie. Así las diferencias radiométricas que presenten las imágenes de la superficie de la Tierra se pueden interpretar como cambios reales en la cubierta. Para observar adecuadamente estas diferencias adoptaremos la táctica de generar imágenes RGB formadas con un canal de dos de las imágenes, empleando la configuración cromática descrita en el Cuadro. 2. El canal seleccionado para la composición del par es el pancromático, por su mayor resolución espacial y para evitar un exceso de información en la fase de fotointerpretación. Los pares que se generarán a partir de la serie de imágenes son los que contienen la imagen más antigua como imagen común a todos ellos, dado que permiten estudiar la evolución de los cambios observados en el territorio combinando la información obtenida de cada uno de ellos.

Cuadro 2. Configuración RGB para los pares multitemporales.

Color	Información
R (rojo)	Imagen más antigua
G (verde)	Imagen más moderna
B (azul)	Imagen más antigua

Cada uno de los pares se analiza por fotointerpretación para generar por delineación una imagen con los cambios radiométricos observados, tal como muestra la Figura 1. Dado el proceso que se ha realizado a las imágenes previamente, al observar el par con la configuración RBG descrita, la región que no presenta variación radiométrica tendrá unas tonalidades próximas al gris, la región que ha experimentado un crecimiento de la reflectividad presentará tonalidades verdes, mientras que aquélla que ha disminuido su reflectividad presentará tonalidades magenta (Anexo de figuras). Durante la fase de fotointerpretación, se hace uso de la información obtenida de los canales multiespectrales y térmico, de manera que toda la información que es capaz de proporcionar el sensor es susceptible de ser incorporada al proceso de detección de cambios, aunque la delineación de las diferencias radiométricas se realice empleando como base los canales pancromáticos.

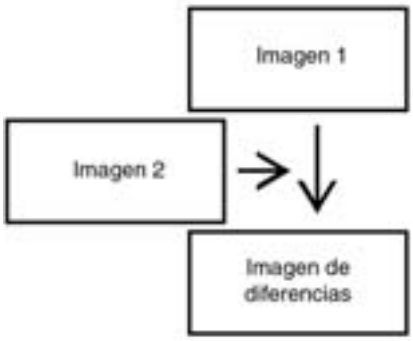


Figura 1. Esquema para la generación de la imagen de diferencias.

La fotointerpretación de cada par multitemporal nos proporciona una imagen de diferencias. Estas imágenes deben procesarse para determinar los verdaderos cambios en el territorio. Para esto emplearemos un mínimo de 3 imágenes de diferencias, resultado de la fotointerpretación descrita anteriormente. El procedimiento a emplear es una clasificación en árbol (Figura 2), que permitirá dilucidar el carácter de las diferencias en las primeras imágenes por comparación con las diferencias observadas en las sucesivas imágenes, de manera que la detección en la primera de las imágenes puede ser confirmada en la segunda y validada mediante la incorporación de la tercera. Siguiendo el esquema de la Figura 2, tendremos que:

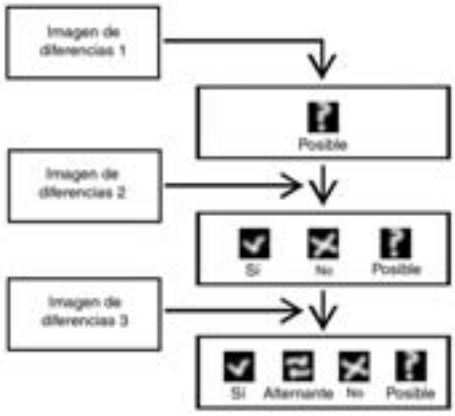


Figura 2. Esquema de clasificación en árbol para las imágenes de diferencias.

- **Primera imagen de diferencias**: todas las diferencias que se detectan en la primera imagen de diferencias se clasifican en la categoría de cambios "Posibles" y, por tanto, están pendientes de validar y confirmar.
- **Segunda imagen de diferencias**: algunos de los cambios detectados anteriormente se confirman en esta segunda imagen de diferencias, quedando clasificados como cambios "Sí", mientras que los cambios antes detectados y ahora no confirmados quedan clasificados como "No". En esta segunda imagen se producirá la detección de nuevos cambios, que como en la etapa anterior se clasifican en la categoría de "Posibles" cambios.
- **Tercera imagen de diferencias**: Los cambios confirmados anteriormente, que también aparecen, se muestran en la tercera imagen de diferencias, pasando a quedar validados, y se clasifican como "Sí". Los cambios confirmados que ahora no aparecen en la imagen, junto a los cambios detectados pero no confirmados, que ahora sí aparecen en la imagen, sugieren un comportamiento errático de la cubierta correspondiente, por lo que se clasifican como "Alternante" y deben ser analizados con información adicional. Por su parte, los cambios detectados pero no confirmados que siguen sin aparecer en la tercera imagen son definitivamente descartados y clasificados como "No". Como en los casos anteriores, en esta tercera imagen de diferencias se producirá la detección de nuevos cambios, que como ocurría previamente se clasifican en la categoría de "Posibles" cambios.

Tras la incorporación de la tercera imagen de diferencias se completa la inicialización del proceso de clasificación. El número de categorías ya no se incrementa si se incorporan más imágenes de diferencias al proceso, pero esto último sí que permitiría ir confirmando y validando los cambios que aparecen por primera vez en la segunda o tercera imagen de diferencias.

Comparación con ortofotomapa 1:25000

Para finalizar y comprobar que los cambios que se validan mediante la metodología propuesta, se realizará una comparación de diferentes series de ortofotomapas escala 1:25000

realizados con fotografías anteriores y posteriores a las fechas de las imágenes. De este modo, se realizará una estimación de la precisión de la metodología propuesta para discriminar los verdaderos cambios producidos en el territorio.

RESULTADOS

El conjunto de métodos expuesto se ha aplicado a una serie de 4 imágenes Landsat 7 ETM+ de Path y Row 031 del *World Reference System (WRS)* correspondientes a los días: 23-07-1999, 03-03-2000, 10-08-2000 y 13-08-2001. Las imágenes han sido orientadas geométricamente en un solo bloque usando el modelo geométrico de *Palà y Pons* (1995), y rectificadas por vecino más próximo en píxeles de 15 metros las pancromáticas y de 30 metros el resto. La Figura 3 muestra con detalle el fragmento de las imágenes que fue estudiado, y que supone aproximadamente 1000 Km^2 de superficie.

Figura 3. Zona de aplicación de la metodología de detección, confirmación, y validación de cambios (Imagen de fecha 23-07-1999)

A continuación se realizó el tratamiento de las imágenes para delinear adecuadamente las cubiertas nubosas y de agua siguiendo los pasos descritos anteriormente. Como ejemplo del tipo de resultado obtenido para cada imagen, la Figura 4 muestra el caso concreto de las nubes detectadas en la primera de las imágenes. Por su parte, la Figura 5 muestra la mascara de agua obtenida para la misma imagen.

Figura 4. Máscara de nubes obtenida de la imagen de fecha 23-07-1999.

Figura 5. Máscara de agua obtenida de la imagen de fecha 23-07-1999.

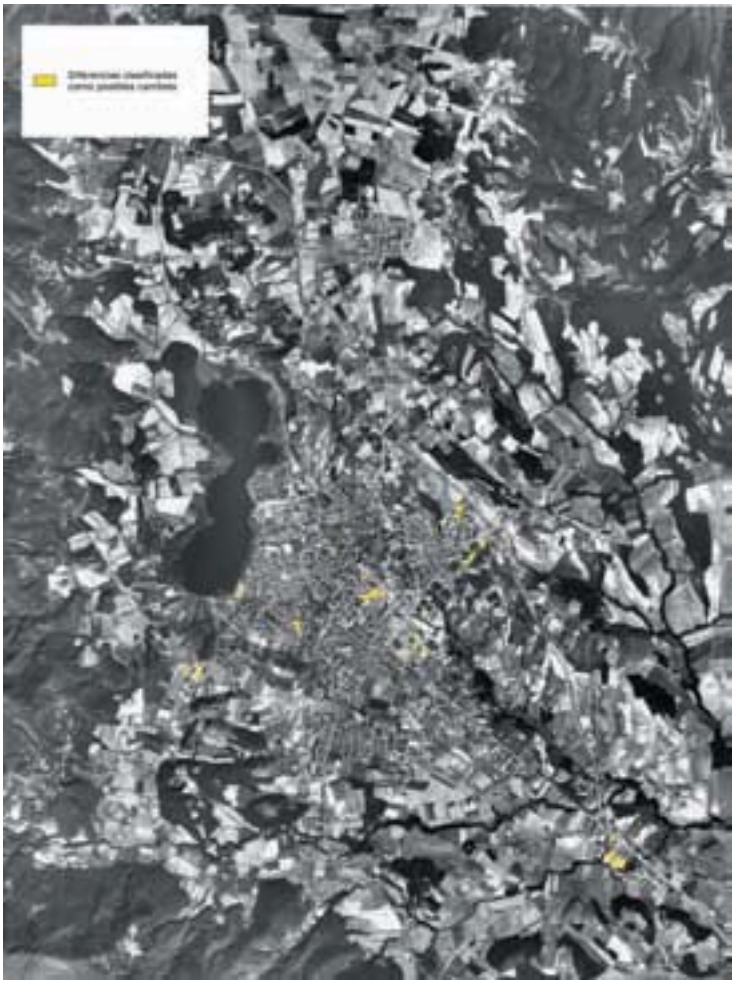


Figura 6. Clasificación de cambios con la primera imagen de diferencias (Detalle sobre ortofotomapa 1:25000 Banyoles (76-23)).

Con las 4 imágenes que conforman nuestra serie de trabajo se elaboraron 3 pares multitemporales empleando la más antigua de todas ellas, como imagen común a los pares. Los 3 pares fueron analizados por un fotointérprete experto, que delineó con precisión las áreas que mostraban diferencias radiométricas significativas, generando una imagen de diferencias por cada par procesado. El tiempo promedio necesario para fotointerpretar cada par y delinear la imagen de diferencias fue de 5 horas. Para las zonas de estudio, las principales dificultades en la tarea de fotointerpretación se centran en: problemas de precisión geométrica de las diferentes imágenes Landsat, las variaciones fenológicas de cultivos cerca de áreas urbanas que pueden dar falsos positivos, y la presencia de cursos fluviales con caudal y vegetación variable que generan cambios no relevantes para el estudio. Los problemas geométricos limitan en gran

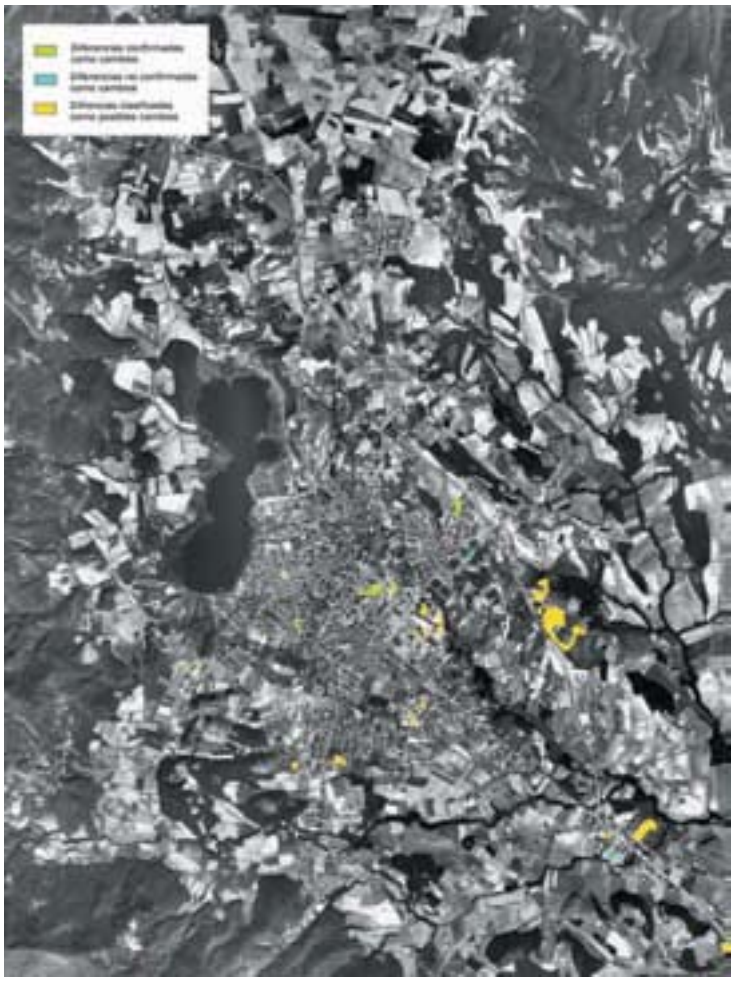


Figura 7. Clasificación de cambios tras la segunda imagen de diferencias (Detalle sobre ortofotomapa 1:25000 Banyoles (76-23)).

medida la capacidad de resolver los cambios por parte de la metodología, que se muestra más eficiente cuanto mayor es el cambio a detectar.

Empleando las tres imágenes de diferencias obtenidas, se realizó el proceso de clasificación para la detección, confirmación y validación de cambios, siguiendo la metodología propuesta. La Figura 6 muestra la primera etapa del proceso, donde todas las diferencias encontradas en la primera imagen de diferencias quedan clasificadas como posibles cambios. A continuación, al incorporar la segunda imagen de diferencias, podemos ver en la Figura 7 los cambios que se han confirmado, los que no se confirman y los nuevos cambios detectados en la segunda imagen de diferencias. Para completar el proceso, la incorporación de la tercera imagen de diferencias nos ofrece, tal como muestra la Figura 8. Ésta muestra la leyenda definitiva, con

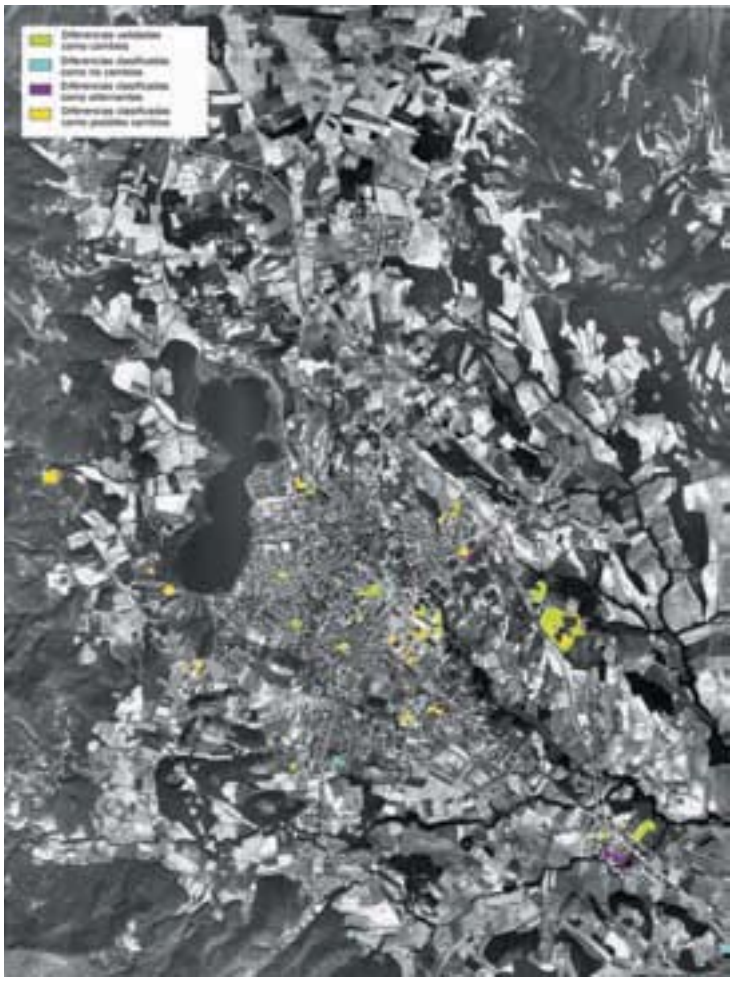


Figura 8. Clasificación de cambios tras la tercera imagen de diferencias (Detalle sobre ortofotomapa 1:25000 Banyoles (76-23)).

los cambios validados como tales, los que quedan declarados como alternantes, los que son rechazados como cambios reales y por último los nuevos cambios detectados en la tercera imagen de diferencias.

Seguidamente, los resultados que muestra la Figura 8 fueron comparados con 2 ortofotomapas de la zona, realizados a partir de fotografías realizadas en los años 1999 y 2002, respectivamente. Por lo tanto, la serie de imágenes objeto de este estudio debería reflejar los cambios que se observen entre ambos ortofotomapas. La Figura 9 nos muestra una pequeña clasificación temática del tipo de cambio que la metodología aplicada fue capaz de señalar. Así podemos ver que la metodología propuesta proporciona mayoritariamente cambios de interés para el proceso de actualización cartográfica.

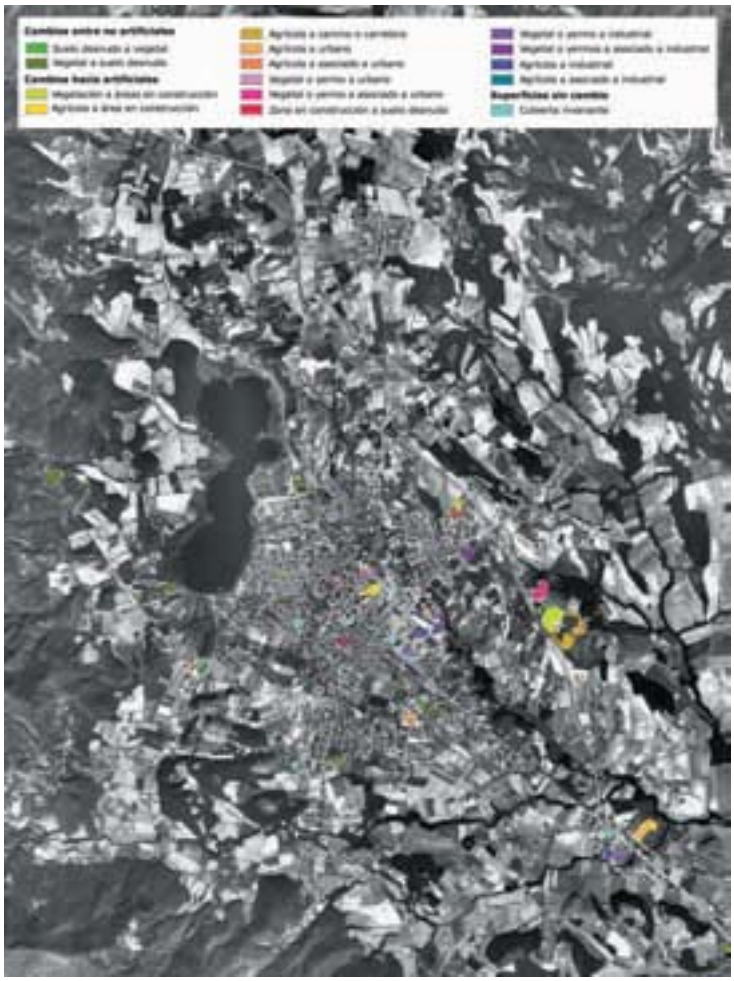


Figura 9. Comprobación con ortofotomapas 1:25000 de los cambios validados con la metodología y clasificación temática de los mismos (Detalle sobre ortofotomapa 1:25000 Banyoles (76-23)).

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos desarrollado una metodología para la detección de cambios cartográficamente significativos, a partir de una serie de imágenes Landsat 7. Se han filtrado los cambios no deseados, calculado imágenes de diferencias y clasificado éstas en árbol para la confirmación y validación de cambios. La comparación de los resultados con ortofotomapas 1:25000 muestra que la metodología es adecuada para la localización de cambios susceptibles de ser incorporados a la cartografía. La principal dificultad detectada se relaciona con la geometría de las imágenes Landsat, lo que hace complejo la detección de pequeños cambios. Sin embargo, la resolución temporal y espectral del sensor elegido parecen adecuadas para asistir a los procesos de actualización cartográfica con la metodología propuesta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a todo el personal del Institut Cartogràfic de Catalunya que ha colaborado en alguna medida para el desarrollo de este trabajo. En especial, desean agradecer al resto de los miembros desarrolladores de la Unitat de Teledetecció: Fernando Pérez, Oscar Mora y Roger Xandri.

REFERENCIAS

Jensen, J.R. (1996): *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Segunda Edición. New Jersey, USA. Prentice Hall.

Martínez, L.; Gimeno J.F. y Caselles, V. (2000) "Estudio de la precisión y tiempo de proceso en la teledetección nubosa mediante tres métodos", *Revista de Teledetección*, nº14, páginas 33-37.

Martínez, L.; Palà, V. y Arbiol, R. (2003a): "Discriminación de nubes, agua e innivación en series de imágenes corregidas y compesadas físico-estadísticamente", *V Setmana de Geomàtica*, 10-14 febrero, 2003, Barcelona.

Martínez, L.; Palà, V. y Arbiol, R. (2003b): "Comparision of Standard, Radiosounded and Forecasted Atmospheric Data in a Solar Spectrum Atmospheric Correction System", *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,* 21-25 julio, 2003, Toulouse.

Martínez, L.; Palà, V. y Arbiol, R. (2003c): "Corrección atmosférica en espectro solar para series multitemporales. Aplicación a imágenes Landsat 7 ETM+", *X Congreso Nacional de Teledetección*: "Teledetección y Desarrollo Regional", 17-19 septiembre, 2003, Cáceres.

Palà, V. y Pons, X. (1995): "Incorporation of relief in polynomial-based geometric corrections", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 935-944.

Singh, A. (1989): "Digital change detection technique using remotely-sensed data", *International Journal of Remote Sensing*, 10, 989-1003.

Obtención de productos cartográficos a gran escala mediante imágenes de alta resolución espacial

N. Sánchez Martín [1] y G. Santos Delgado [2]

(1) Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales, Universidad de Salamanca, Av. Filiberto Villalobos 117, 37007 Salamanca.
(2) Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Pza. de la Merced s/n, 37008 Salamanca.

RESUMEN

La irrupción de imágenes de satélite de alta resolución espacial, por debajo incluso del metro, tales como las de los sensores Quick Bird e IKONOS, ha abierto nuevos retos en el campo de las aplicaciones cartográficas. A la tradicional riqueza espectral de los sensores espaciales se añade la posibilidad de incrementar la escala del producto final. Este artículo expone la utilización de una imagen Quick Bird para la obtención de cartografía vegetal y agrícola a escalas 1:10.000 y 1:20.000, y forma parte de un estudio más amplio en el que se han expuesto (Sánchez, 2003*) las ventajas del uso de este sensor en aplicaciones agrícolas tales como la detección automática de cultivos y la cuantificación de superficies cultivadas con alta precisión aplicados al control de subvenciones de la Política Agraria Comunitaria (en adelante, PAC).*

Nuestro trabajo ha consistido, en primer lugar, en la conversión de la imagen en un producto cartográfico básico, mediante su ortorrectificación y posterior evaluación (puntos y trayectorias de control y modelo digital del terreno), y seguidamente en la aplicación de técnicas de tratamiento de imagen y diseño cartográfico para obtener mapas de usos de suelo, especies vegetales, cultivos y aprovechamientos, etc. a una escala inusual para este tipo de cartografía. El objetivo perseguido es demostrar la idoneidad de esta imagen como base cartográfica en estudios del medio natural, tanto en la obtención de mapas concretos como en tareas de actualización y valoración.

***Palabras Clave**: Resolución espacial, teledetección, Quick Bird, ortorrectificación.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

The new high space resolution satellite images, less than meter, such as Quick Bird and IKONOS sensors, open new challenges in cartographic applications. They possibility the scale increase, so, this article explains the use of a Quick Bird image for vegetable and agricultural cartography with scales 1:10.000 and 1:20.000. It is part of a wider study about the advantages of this sensor in agricultural applications such as the control of the European Union's Common Agricultural Policy subsidies and the quantification of cultivated surfaces with high precision.

Firstly, we convert the image in a basic cartographic product, by orthorectification process and accuracy evaluation (ground control points and trajectories and elevation digital model). After that, we apply digital treatment techniques and cartographic design for getting thematic maps about land uses, vegetation species and cultivations with an unusual scale. The final objective is to show the suitability of this image in cartographic applications and in upgrade and valuation jobs.

***Key Words**: Spatial resolution, remote sensing, Quick Bird, orthorectification*

INTRODUCCIÓN

Este artículo es el resumen de un trabajo de investigación sobre las aplicaciones de la teledetección en el campo de la agricultura, que partió del uso de una imagen de alta resolución espacial en tareas de cuantificación de cultivos y superficies (*Sánchez*, 2003) y culmina con su aplicación para la realización de cartografía agrícola y de vegetación. La primera parte consistió en una descripción del "estado de la cuestión" en cartografía agrícola, mediante un análisis comparado de los distintos formatos cartográficos oficiales (en el ámbito nacional y en el de la Comunidad de Castilla y León) y su articulación o clasificación. En segundo lugar se hace una propuesta metodológica (técnica y sintáctica) para la confección de los mapas. Éste es el objetivo del presente trabajo: sobre la imagen Quick Bird se harán diferentes tratamientos digitales y observaciones de campo que, junto al resto de datos, serán integrados en un SIG como herramienta final para el diseño de los mapas. Mapas cuya finalidad es realizar un inventario del medio físico y la actividad agrícola; se trata de una propuesta generalista, básicamente descriptiva.

Respecto a la escala, si bien en general podemos afirmar que es la extensión territorial objeto del mapa la que la condiciona, en nuestro caso el límite lo impone la resolución espacial del sensor, cuya imagen ortorrectificada va a constituir la cartografía base. Considerando que dicha resolución (tamaño del píxel en el terreno) es de 0,7 m en el modo pancromático y 2,8 m en el multiespectral, y teniendo presente el límite de percepción visual así como las pruebas de impresión finales, hemos considerado la escala 1:10.000 para la pancromática y 1:20.000 para la multiespectral.

Por último, dados la escala y el ámbito, podemos definir como superficie mínima de trabajo la parcela. Este grado de detalle convierte a nuestra cartografía en un valioso documento no sólo de conocimiento del medio, sino también administrativo y de control, y en una herramienta de reordenación y planificación rural a escala de término municipal.

Nuestra propuesta, por tanto, parte de dos premisas fundamentales:

1. Innovación: como fuente de información primordial se va a utilizar una imagen de teledetección de alta resolución espacial obtenida por un sensor de recientísima aparición. Esta imagen se convierte en un documento métrico que nos permite trabajar a una escala inédita para este tipo de mapas (salvo la cartografía catastral), planteando nuevos retos de diseño y contenido.
2. Eficacia: la combinación de la alta resolución espacial junto con la riqueza espectral del sensor, especialmente adecuada para estudios de vegetación, permiten realizar un proceso que sintetiza la calidad métrica y la extracción de la información temática en un único paso.

Una visión de conjunto acerca de los sensores de alta resolución espacial y su integración en los SIG podemos encontrarla en *Fritz* (1999), así como una aproximación a su tratamiento geométrico con fines cartográficos en *Fraser*, (2002) y *Paul et al.* (2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

Información previa

- Cartografía digital vectorial 1:10.000 de la Diputación de Salamanca. Es el marco cartográfico básico que tomaremos como referencia y que, además, nos ofrece información del parcelario aparente y leyenda de símbolos de aprovechamientos. Las capas de este mapa han sido previamente editadas y depuradas.
- Imagen Landsat 5 TM de abril y agosto de la zona (escena 202/032). Ha sido de gran utilidad para conocer la fisonomía de la zona y para caracterizar los cultivos en fechas significativas para la zona: abril para los cultivos de secano y agosto para el regadío.
- Hojas 479 (Peñaranda de Bracamonte) y 503 (Alba de Tormes) de la serie 1:50.000 del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos del MAPA.
- Zona correspondiente a la hoja 503 del *Corine Land Cover*, de gran utilidad para la propuesta de leyenda para el mapa de usos de suelo.
- Imagen QuickBird de julio de 2002. El sensor Quick Bird, cuyas imágenes distribuye la empresa americana *Digital Globe*, está especializado en las bandas azul, verde, rojo e infrarrojo cercano para el modo multiespectral. La banda del infrarrojo cercano es muy importante para estudios agrícolas ya que es la banda del espectro donde se produce mayor reflectividad de la vegetación vigorosa. También capta una imagen en el modo pancromático que consigue una resolución mayor que la multiespectral. La información sobre la imagen se facilita en los archivos de documentación proporcionados por el distribuidor:

Formato: geottiff
Fecha y hora de la toma: 7 de julio de 2002, 11:23 AM
Tipo de producto: Estándar 2A (corregida geométrica y radiométricamente)
Tamaño de las bandas: Multiespectral: 2839 (filas) x 2903 (columnas)
Pancromática: 11356 (filas) x 11612 (columnas)
Resolución radiométrica: 16 bits
Resolución espacial: Multiespectral: 2.80 m (teórica), 2.865 (real)
Pancromática: 0.70 (teórica), 0.717 (real)
Altura del sol: 66º.9623
Proyección UTM, huso 30, elipsoide WGS84

- Datos GPS. Se ha realizado un trabajo de campo específicamente para este estudio, para aplicar los resultados en tres tareas concretas:
  1)Obtención de los puntos de control para ortorrectificar la imagen (junto con el MDT).
  2)Extracción de trayectorias (caminos) para la comprobación de los resultados anteriores.
  3)Obtención de los puntos "verdad terreno" de los diferentes cultivos para introducirlos posteriormente en la clasificación supervisada.

Para las dos primeras se han realizado observaciones diferenciales (con receptores Leica 530 de doble frecuencia) con el fin de obtener precisiones centimétricas. Se realizó también la observación de siete vértices geodésicos de la zona con el fin de obtener los parámetros de transformación que serían posteriormente aplicados a las coordenadas WGS84 para la obtención de coordenadas ED50, dado que es el sistema en el que se ofrecen los resultados finales.

Para la obtención de los puntos "verdad terreno" se ha trabajado con receptores GPS tipo navegador mediante posicionamiento absoluto.

Zona de estudio y calendario

Se ha elegido la vega del río Tormes, a unos 25 km al este de la capital salmantina, a su paso por los términos municipales de Garcihernández, Encinas de Abajo y Peñarandilla, ya que es una zona con gran variedad agrícola y es un prototipo de alternancia entre el regadío de las zonas de terraza con el secano de las laderas y las elevaciones. Es una zona especialmente agrícola muy irrigada por canales y cauces de agua derivados del Tormes en la zona baja, y de reducido aprovechamiento ganadero. Los cultivos se reparten según esa alternancia: herbáceos de secano (cereales, forrajeras) y de regadío (maíz, remolacha, girasol, hortícola), con superficies en ambos casos dedicadas a barbecho y retirada. También existen superficies de prados y pastizales, forestal (de ribera y coníferas) y dehesa. Por lo que respecta a la ocupación urbana, los pueblos son pequeños -menos de mil habitantes-, y existen algunos conjuntos de viviendas dispersos.

Otro factor primordial en los estudios agrícolas y de vegetación es la fecha de adquisición de las imágenes. Cada cultivo tiene un ciclo fenológico propio y es conveniente conocerlo para elegir las fechas adecuadas que nos permitan diferenciar unos de otros. Si estudiamos el calendario de esta zona nos encontramos con que lo preferible habría sido adquirir dos imágenes:

una a comienzos del otoño (para el regadío) y otra a finales de primavera para el secano. Sin embargo, debido al alto coste de las imágenes Quick Bird, finalmente hemos adquirido una única en el mes de julio. Esta fecha nos permite discriminar los cultivos de regadío, en plena actividad vegetativa, con un color verde intenso, y las parcelas de cereal, recién recolectadas, con una textura característica "en hileras" derivada de la forma de recolección.

Obtención del documento cartográfico base

En esta fase hemos querido reunir en un solo documento cartográfico dos elementos esenciales, lo que ha sido posible merced a las características métricas y espectrales de la imagen Quick Bird:

- Calidad métrica, derivada de la alta resolución de la imagen y el proceso de ortorrectificación con puntos GPS de una precisión centimétrica.
- Cualidades de imagen, derivadas de su riqueza espectral.

En Cuartero y Felicísimo (2003) encontramos una comparativa de los métodos de rectificación y ortorrectificación y el control de calidad del producto resultante. Nuestra elección ha sido el de ortorrectificación (puntos de control planimétrico junto con el MDT). También hemos seguido el criterio de estos autores para la verificación de la imagen final.

El procedimiento ha sido recopilar los puntos GPS, extraer el MDT de la cartografía vectorial 1:10.000 e introducirlos junto con la imagen Quick Bird en el módulo Orthoengine del software PCI. Se han ortorrectificado ambas imágenes: pancromática y multiespectral. El método de ortorrectificación ha sido el de funciones racionales.

Para comprobar los resultados del proceso hemos recurrido a dos fases:

a. Calidad del ajuste*:* utilización de los resultados estadísticos extraídos del software en los puntos de control exclusivamente. Debemos destacar que los residuales entre las coordenadas imagen y las coordenadas de control GPS son muy altos, debido a la deficiente exactitud planimétrica de la imagen original. En efecto, debemos mencionar aquí que la imagen Quick Bird viene ya corregida métricamente desde el sensor; sin embargo, como hemos podido comprobar desde el primer momento al superponer la cartografía, tanto la imagen multiespectral como la pancromática tienen errores de desplazamiento. Los distribuidores admiten un error en su corrección geométrica en torno a los 10-15 m.
b. Calidad del producto final*:* obtención de unas trayectorias sobre el terreno mediante GPS (instalado en un vehículo) con la misma precisión que el resto de puntos de control usados en la ortorrectificación. Una vez transformada la imagen, hemos volcado estas líneas sobre la imagen y se ha comprobado el desplazamiento en buena parte de la imagen (figura 1).

Dada la alta resolución de la pancromática podemos evaluar el error con una gran precisión, pues al contrario de lo que ocurre en las imágenes de baja resolución espacial, en ésta los caminos y carreteras se pueden definir perfectamente. Aunque dejaremos el estudio estadístico de los vectores desplazamiento de los puntos para posteriores trabajos, el análisis visual ha sido satisfactorio. Otra línea de estudio abierta será comprobar la posible degradación radiométrica posterior al proceso de ortorrectificación al modificar por dos veces la posición de los píxeles (la primera la del propio sensor y la segunda la nuestra).

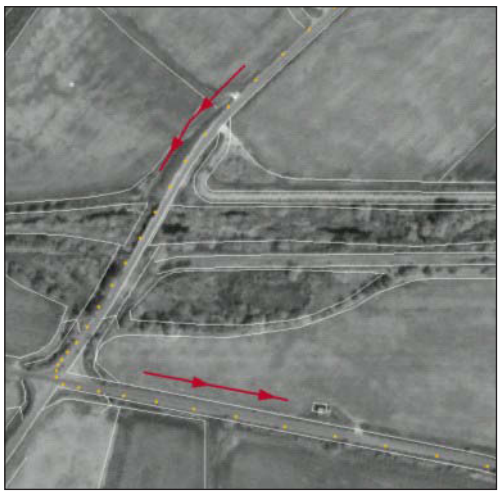


Figura 1. Superposición de las trayectorias GPS sobre la imagen pancromática (detalle) junto con la cartografía vectorial. Obsérvese cómo el receptor está situado en el lateral derecho del vehículo.

La imagen Quick Bird está georreferenciada en el sistema WGS84. Sin embargo, todos los productos resultantes de nuestro trabajo se van a realizar en el marco geodésico ED50 y la proyección será UTM. Los mapas se presentan con cuadrícula UTM.

Metodología para la confección de los distintos mapas

Cartoimagen (figura 2)

Este mapa-imagen está inspirado en las cartoimágenes del IGN y, aunque no es específicamente un mapa de vegetación o cultivos, ofrece la información de la cartografía vectorial sobre la reveladora imagen pancromática, de una calidad muy alta. Combina en un solo documento el mundo imagen, instantáneo y fiel a la realidad, con la esquematización de la cartografía vectorial. El formato impreso es A0.

- Leyenda: se ha optado por una leyenda para la información vectorial únicamente y dejar la imagen de fondo como elemento orientativo para el lector. Se han extraído los elementos lineales de la cartografía 1:10.000 y la rotulación, en la que va incluida la clasificación de cultivos y aprovechamientos propuesta por la Diputación de Salamanca.
- Metodología: la cartoimagen se obtiene a partir de la imagen pancromática del Quick Bird una vez ortorrectificada y reducida radiométricamente a 256 niveles. Sobre ella se ha volcado la información vectorial del 1:10.000 con la planimetría, la altimetría mediante curvas de nivel y el parcelario aparente. La zona se ha recortado por motivos de la impresión en papel.

Figura 2. Cartoimagen.

Usos del suelo (figura 3)

Como estudio previo para este mapa se ha realizado el estudio de la leyenda y metodología del *Corine Land Cover*, las Ortoimágenes, el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos, el Mapa Agronómico Nacional y el Mapa Agronómico de la Junta de Castilla y León. Así mismo, se han consultado los criterios de calificación agronómica del Catastro. Por último, se han utilizado para el análisis visual las dos imágenes Landsat de los meses de abril y agosto de 1999 de la misma zona y que resultan de utilidad para discriminar cultivos de secano y regadío gracias a las diferentes fechas de adquisición.

- Leyenda: un problema importante es la adaptación de la leyenda a la escala grande. El mayor nivel de detalle puede sugerir un similar nivel de detalle también en la leyenda, y podría pensarse que los mapas de escalas más pequeñas emplean leyendas más generalistas; sin embargo, el estudio preliminar de la cartografía oficial demuestra que no siempre es así. Por otro lado nos encontramos con el problema de establecer un criterio fisionómico de las clases o dar prioridad a los datos del censo, en el que muchos usos agronómicos (como el ganadero, por ejemplo) difícilmente caracterizan el uso del suelo. En el caso de nuestra zona nos decidimos por el criterio físico, ya que estos municipios tienen pocos usos ganaderos o industrias agroalimentarias. También hemos contado con la base de datos de la PAC del Municipio de Garcihernández, de la que se ha obtenido información detallada del cuadro de cultivos de la zona, y con la leyenda del mapa digital de la Diputación de Salamanca, que describe los aprovechamientos del suelo.

Finalmente, nuestra propuesta es la siguiente:

Herbáceos de secano: labor (incluido el barbecho) de cereales, forrajeras, leguminosas, girasol, etc.

Herbáceos de regadío: labor (incluido el barbecho) de cereales, maíz, forrajeras, patatas, remolacha, etc., y prados y praderas artificiales.

Barbecho o retirada: se incluyen las zonas que en el año de estudio, 2002, se dejaron para barbecho anual o en retirada.

Dehesa: pastizal con matorral y forestal de encinas dispersas.

Curso de agua con vegetación de ribera.

Urbano o semiurbano.

Agua: cursos o embalses.

Improductivo: retirada, roquedo, suelo desnudo.

Estas clases se representan en la leyenda mediante fragmentos de la imagen.

- Metodología: Para obtener el mapa de usos del suelo hemos barajado dos alternativas. La primera consistía en una clasificación supervisada de la imagen multiespectral previamente ortorrectificada. En campo se han tomado las áreas "verdad terreno" de cada clase mediante un navegador GPS monofrecuencia y luego se ha procedido a la clasificación de las cuatro bandas. Esta alternativa no ofrece resultados satisfactorios debido a la confusión entre algunas clases (regadío con vegetación de ribera o barbecho con retirada, por ejemplo), lo que se evitaría en gran medida contando con una imagen en otra fecha significativa del ciclo fenológico de las especies.

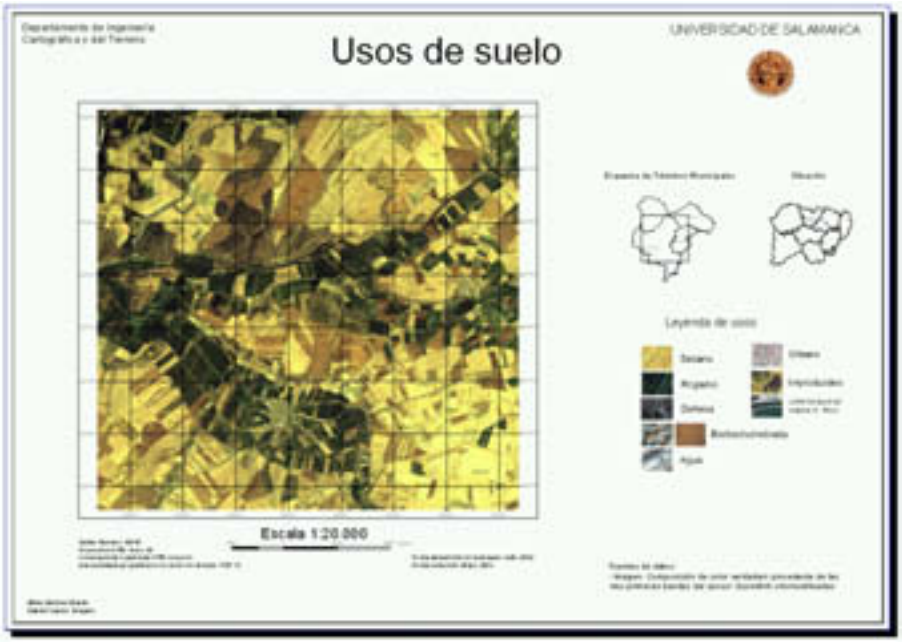


Figura 3. Mapa-imagen de usos de suelo.

Finalmente hemos recurrido a una segunda alternativa similar a la propuesta en las Ortoimágenes del IGN, es decir, presentar un mapa de usos de suelo resultante de una combinación de las tres primeras bandas en color verdadero al que se le ha superpuesto la capa de toponimia.

El formato de impresión es A1.

Regadío (figura 4)

Éste es un mapa extraído del tratamiento digital de las bandas multiespectrales de la Quick Bird y nos ayuda a comprender el paisaje agrícola de esta zona, directamente heredero del sistema de regadío derivado del Tormes.

- Leyenda: tan sólo se indica la superficie de regadío comparada con la superficie total de la zona de estudio.
- Metodología: se ha realizado un índice de vegetación simple y coloreado el resultado en verde junto a las bandas roja y azul de la misma. De dicho índice han resultado cinco categorías de niveles digitales que indican las zonas de regadío con distinta intensidad, ya que en el mes de julio, fecha de la imagen, el vigor vegetativo está directamente relacionado con estos cultivos. Estas categorías no se han incluido en la leyenda porque visualmente resultan muy homogéneas.

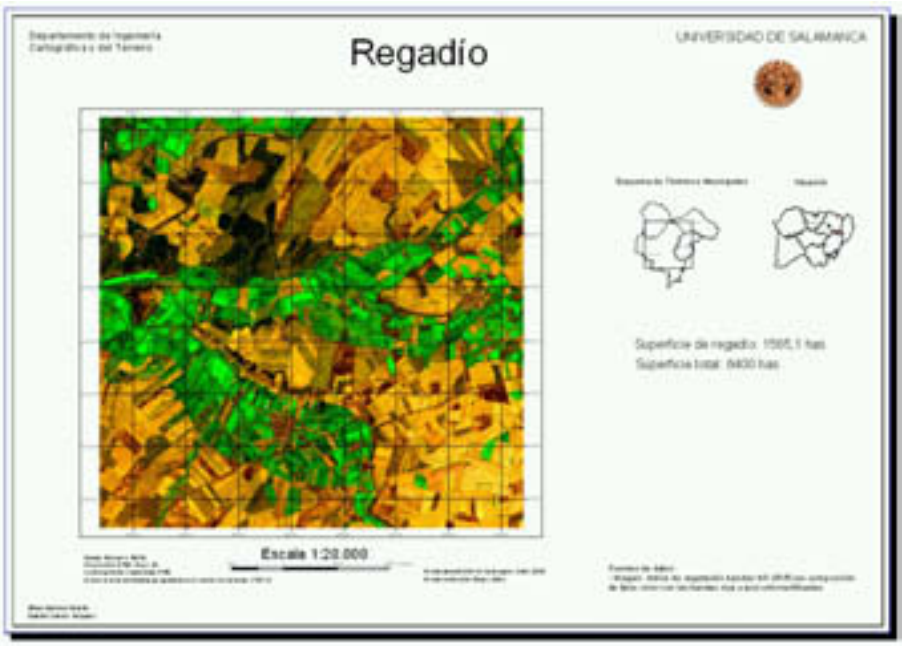


Figura 4. Mapa-imagen de regadío.

Masas forestales y dehesa (figura 5)

La zona objeto de estudio se ha elegido por la alternancia de cultivos de regadío y secano, pero en ella existen, como es habitual en el paisaje salmantino, zonas de dehesa nada despreciables y alguna mancha de aprovechamientos forestales, fundamentalmente coníferas. Este mapa pretende destacar estas superficies sobre el resto de usos.

- Leyenda: se han utilizado dos tramas de color superpuestas a la imagen para representar las masas forestales y de dehesa, y a su vez se han etiquetado con los valores de superficie de cada región. También se ofrece la superficie total de ambos usos.
- Metodología: se ha procedido a la digitalización sobre la imagen de las regiones de estudio. Para ello se ha utilizado como base una composición multiespectral en color verdadero apoyándonos en la cartoimagen para una mejor definición de los polígonos.

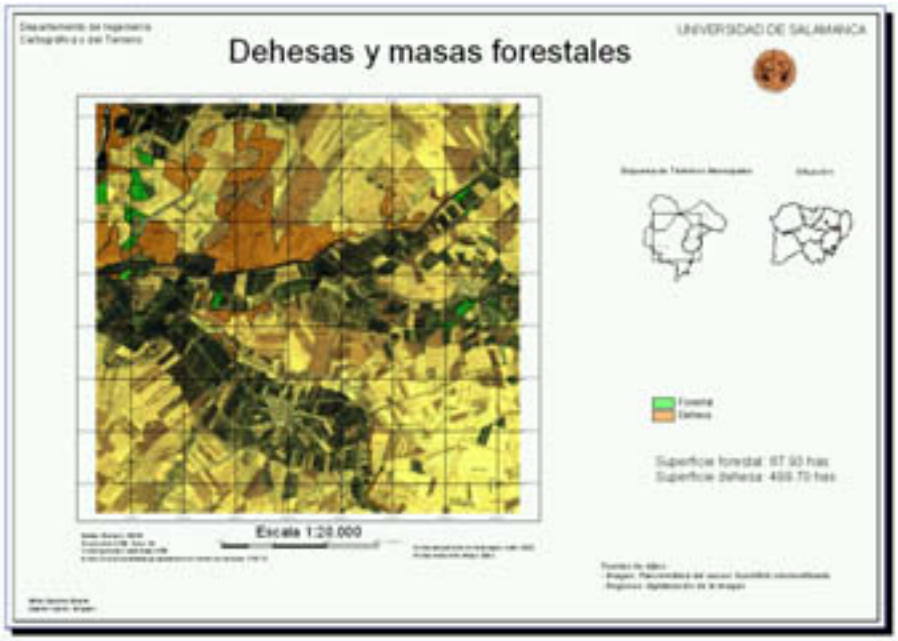


Figura 5. Mapa-imagen de zonas de dehesa y forestal.

MDT y aplicaciones 3D

El tratamiento de los datos de altitud se puede afrontar bajo el formato vectorial o el raster. En el primer caso, hemos utilizado la cartografía vectorial 1:10.000 previamente depurada en sus capas de puntos con cotas y curvas de nivel, a partir de las cuales se puede generar un modelo TIN y otros. En la figura 6 puede observarse el modelo TIN coloreado según las alturas en una vista tridimensional.

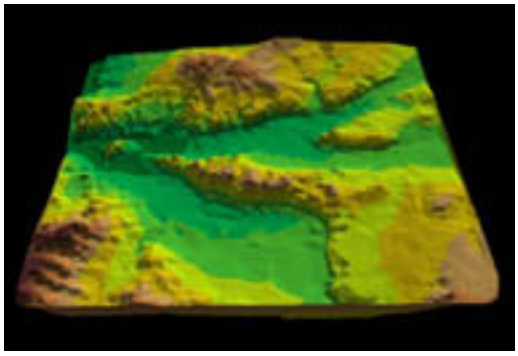


Figura 6. Escena 3D procedente del formato tridimensional TIN.

También se dispone del modelo digital del relieve generado por el proceso de ortorrectificación en formato imagen, al que se le ha dado una resolución de 10 m.

El software PCI proporciona la aplicación Fly! con la que podemos combinar el anterior MDT con la imagen multiespectral del Quick Bird y hacer una simulación dinámica tridimensional. En la figura 7 pueden verse dos instantáneas de dicha simulación, que proporcionan una visión muy plástica y descriptiva de la zona.

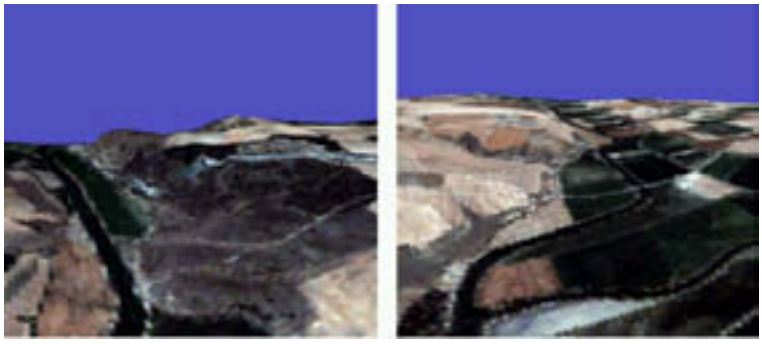


Figura 7. Dos escenas del simulador tridimensional en formato imagen.

Con el modelo digital de elevaciones se pueden extraer los mapas de atributos topográficos como pendiente y aspecto y otros derivados de éstos como insolación, humedad y escorrentía. Estos mapas, combinados con las características espectrales de la imagen, pueden mejorar la clasificación de especies vegetales (*Wheatley et al.*, 2000) o bien generar modelos predictivos de potencialidad de especies (*Franklin et al.*, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los mapas propuestos en este trabajo combinan las cualidades de la imagen junto con la modelización cartográfica vectorial. El grado de resolución de la imagen permite utilizar esta

cartografía en estudios cuantitativos de detalle, tales como catastro, control de superficies cultivadas, control de subvenciones, etc., y permite pormenorizar las aplicaciones a la unidad de parcela.

En su concepción ha sido de gran ayuda el estudio previo de la cartografía temática oficial, en nuestro caso de mapas agrícolas y vegetales. No obstante, exige al autor un recorrido por las diferentes etapas de producción cartográfica que abarca desde el trabajo de campo hasta las técnicas de impresión fotográfica, lo que requiere de recursos difíciles de controlar.

La propuesta está abierta a nuevos mapas: clases agrológicas, litológico-geológico, edafológico, etc., que serán desarrollados en nuevos trabajos. También quedan abiertas otras vías de trabajo: utilización de técnicas de clasificación por texturas (*Pekkarinen, A.*, 2003, *Franklin et al.,* 2001), inclusión de los aspectos topográficos del terreno en la clasificación espectral, estudios de escorrentía y drenaje en la zona a partir del mismo, generación automática de líneas, etc.

El proceso de ortorrectificación, a esta escala, exige un proceso de comprobación exhaustivo, que nosotros proponemos siguiendo el modelo de *Cuartero y Felicísimo* (2003) mediante trayectorias "terreno" tomadas con GPS y volcadas sobre la imagen previamente ortorrectificada. También hay que tener en cuenta que este proceso "mueve" los niveles digitales de los píxeles, y por tanto nuestra experiencia, al usar la imagen resultante en tratamientos que impliquen la manipulación de aquéllos, sugiere que es preferible adquirir una imagen sin corregir y proceder a una única transformación (además son normalmente productos más baratos).

Los diferentes formatos de los datos: mapas de diferentes organismos en distintos formatos, imágenes, datos GPS, etc., hacen necesario un tratamiento exhaustivo de integración de los mismos y una plataforma cartográfica común para obtener los resultados finales.

CONCLUSIONES

Las imágenes de alta resolución espacial son una buena fuente de información geográfica para la confección de mapas a escalas grandes, especialmente para aquéllos en los que podemos aprovechar sus cualidades espectrales, como los dedicados a la vegetación y usos del suelo.

En la parte negativa destacamos el alto precio de estas imágenes (a lo hay que añadir la necesidad de imágenes en distintas épocas del calendario fenológico de las especies, lo que aumenta considerablemente el presupuesto) y la dificultad de controlar todo el proceso incluida la impresión final de los mapas.

AGRADECIMIENTOS

La imagen Quick Bird ha sido financiada por el Servicio Transfronterizo de Información Geográfica de la Universidad de Salamanca, que además nos ha brindado todo su apoyo.

REFERENCIAS

Cuartero, A. y Felicísimo, A.M. (2003): Rectificación y ortorrectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusión. Geofocus, *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, nº3, pp. 45-57.

Franklin, J., Mccullough, P. and Gray, C. (2000): Terrain variables used for predictive mapping of vegetation communities in Southern California. En: *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John P. Wilson y John C. Gallart, eds., pp. 331-352.

Franklin, S.E., Maudie, A.J., Lavigne, M.B. (2001): Using spatial co-occurrence texture to increase forest structure and species composition classification accuracy. *Photogrammetric Engineeering & Remote Sensing* 67 (7), pp. 849-855.

Fraser, C.S. (2002): Prospects for mapping from high-resolution satellite imagery. Papers of ACRS 2002. Disponible en *http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/vhr/070.pdf*

Fritz, L.W. (1999): High resolution commercial Remote Sensing Satellites and Spatial Information Systems. *ISPRS Highigths* Vol 4 No.2.

Paul, D., Fraser, C. and Pendlebury, N. (2002): Digital orthomosaics as a source of control for geometrically correcting high resolution satellite imagery. *Papers of ACRS 2002*. Disponible en *http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/vhr/108.pdf*

Pekkarinen, A. (2002): A method for the segmentation of very high spatial resolution images of forest landscapes. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (14), pp. 2817-2836.

Sánchez, N. (2003): Imágenes de alta resolución en aplicaciones al medio agrícola. En *Teledetección, Nociones y Aplicaciones*. Pérez, C. y Muñoz-Nieto, A.L., eds., pp. 119-140.

Wheatley, J.M., Wilson, J.P., Redmond, R.L., Ma, Z. and Dibenedetto, J. (2000): Automated land cover mapping using landsat thematic mapper images and topographic attributes. En *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John P. Wilson y John C. Gallart, eds., pp. 355-389.

Generación de una ortoimagen Quickbird del año 2003 de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia: metodología y resultados

J. Pecci López [1], F. Cano González[1] y G. Maza Moreno[1]

(1) AURENSIS. Dpto. Análisis del Territorio. P/ San Francisco de Sales, 38,1. 28003, Madrid. Telf.: 91-5533865.

RESUMEN

En los últimos años, las imágenes de satélite de muy alta resolución están entrando con fuerza en las actividades de ordenación del territorio y del medio ambiente y están cambiando las aplicaciones en firme de la Teledetección; cada vez son más las empresas privadas y las administraciones que acuden a este tipo de imágenes para la realización de sus trabajos de ingeniería y de observación del medio ambiente.
Por iniciativa de la Dirección General del Medio Natural de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia, se ha realizado una ortoimagen de la totalidad de la Región de Murcia (12.000 Km^2). Se trata de un proyecto pionero en España no exento de cierto riesgo, ya que nunca se ha realizado la ortorrectificación y mosaicado de este tipo de imágenes en un área de interés tan grande, y la bibliografía y experiencia al respecto apenas existe. El satélite Quickbird fue programado especialmente para la realización de este trabajo. Los objetivos concretos de esta comunicación son los de presentar los resultados de dicha programación, describir la metodología y los resultados obtenidos.

***Palabras Clave**: Teledetección, Quickbird, Medio Ambiente.*

ABSTRACT

In the last years, very high resolution satellite images are entering with force into the activities of ordination of the territory and of the environment and they are changing the appli-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

cations in firm of the Remote Sensing; every time they are more the private companies and the adminsitraciones that you/they go to this type of images for the realization of their engineering works and of observation of the environment.
For initiative of the "Consejería" of Environment and Land Management of the Region of Murcia through the General direction of the Naturalenviroment, he/she has been carried out an orthoimagery of the entirety of the Region of Murcia (12.000 Km2). it is a pioneer project in Spainthat it is not exempt of certain risk, since never he/she has been carried out the ortorrectificación and mosaicado this type of images in an area of interest so big and the bibliography and experience in this respect it hardly exists. The Quickbird satellite was programmed especially for the realization of this work. The concrete objectives of this communication are those of showing results of satellite programation, decribing the metodology and the results obtained.

Key Words:*. Remote Sensing, Quickbird, Environment.*

INTRODUCCIÓN

La cobertura del satélite Quickbird de la Región de Murcia es un proyecto iniciativa de la Dirección General de Medio Natural, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia. La ortoimagen realizada tiene 12.000 Km^2 y mosaica unas 42 imágenes de satélite tomadas según una programación del satéltie Quickbird especialmente diseñada para este proyecto.

Este proyecto ha sido cofinanciado por el Programa Operativo Integrado 2000-2006 (apoyo permanente para el objetivo 1), Eje 3, Medida 6 con fondos FEDER.

Con este proyecto, la región de Murcia se convierte en la primera región europea en contar con una ortoimagen de satélite de muy alta resolución de todo su territorio, y aporta un alto grado de modernización al material utilizado para los estudios, proyectos y difusión del conocimiento del Medio Natural que realiza la citada Consejería.

La realización de esta ortoimagen ha sido todo un reto, tanto por parte de la Región de Murcia, como por parte de Aurensis, ya que nunca antes en Europa se había tenido la experiencia en la ortorrectificación de este tipo de imágenes de alta resolución en usos civiles.

La metodología y la ejecución de los trabajos han sido realizados por el Departamento de Análisis del Territorio de Aurensis. Aurensis tiene una amplia experiencia en adquisición y procesado de imágenes de satélite y en el desarrollo de las aplicaciones a todo tipo de campos, principalmente, medio ambiente, agricultura, geología.

Para aprovechar al máximo las posibilidades de la imagen de satélite se han obtenido dos tipos de productos: un producto con vocación visual y un producto con objetivos científicos. El primero consiste en la realización de una ortoimagen continua y homogénea en su visualización de los 12.000 Km^2 totales de Región de Murcia, dirigida al gran público, y el segundo consiste en una ortoimagen dirigida a aplicaciones científicas y que, por tanto, conserva los va-

lores originales de radiancia; éste último producto está destinado a aplicaciones cuantitativas, cualitativas y fotointerpretaciones rigurosas de carácter científico-técnico.

Muchas han sido las lecciones aprendidas durante este proyecto referente al comportamiento geométrico de este tipo de mosaicos y su comparación con la fotografía aérea y la experiencia ha servido para dar un paso adelante en el desarrollo de nuevos productos a gran escala.

Este documento presenta la metodología y resultados de la programación y ortorrectificación de estas imágenes, pero no se detiene en discutir los diversos problemas técnicos que han surgido, ya que serán objeto de varios estudios individuales en el futuro. Estas imágenes son un material experimental idóneo para investigar el comportamiento de estas imágenes con diversos metodologías de ortorrectificación.

MATERIALES DE TRABAJO

Imágenes de satélite de nueva adquisición

Condiciones técnicas de la programación solicitada

Para este trabajo ha sido especialmente diseñada una programación de satélite Quickbird. Las características técnicas de la programación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. características de la programación.

QB Programmation	
Adquisiton angle	<15º
Cloud cover	<10%
Mode	Bundle (pan+multi)
Product	Standard Orthoready
Processing	Radiometric and sensors correction
Projection	UTM, WGS84, Zona 30N
Location error	**23 m CE 90%** and **RMSE de 14 m**
Pixel resolution	16 bits
Tile	16k x 16k
Resampling algorith	cubic convolution, 4x4
Format	Geotiff
Maximun file size	1,6 GB for pan and 500 Mb for ms

Resultados de la programación. Diseño de un control de calidad de los datos de partida

En total se recibieron 42 DVD´s que contenían 81 escenas individuales pan y multi. La demora media entre adquisición y recepción en Aurensis fue de 15 días naturales.

La distribución espacial de las imágenes puede verse en el siguiente esquema:

Figura 1. Mapa de distribución de escenas de la cobertura QB de Murcia.

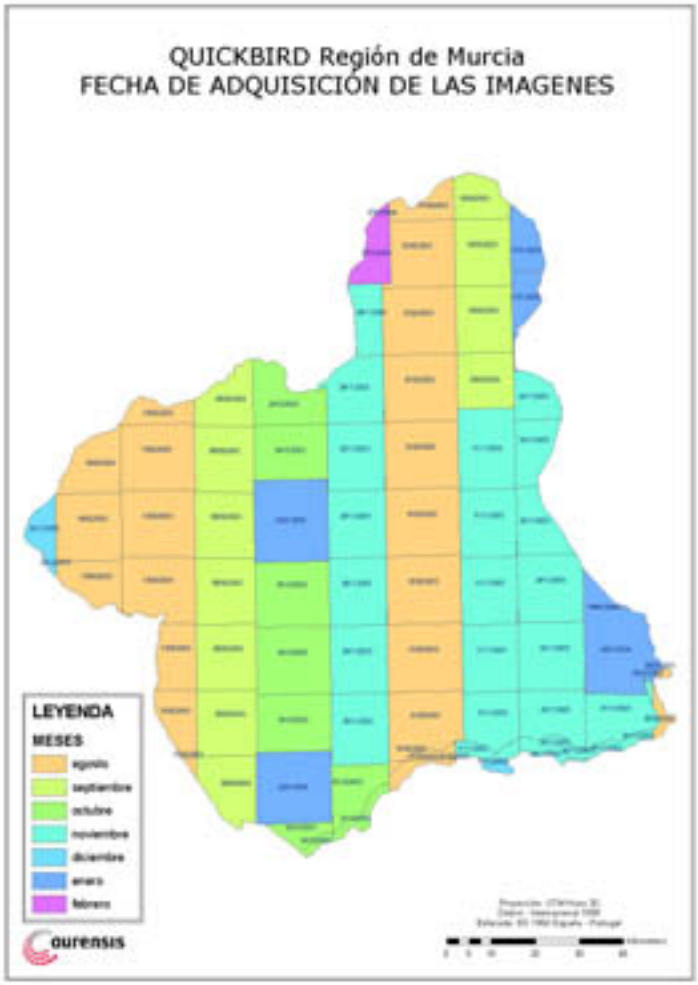


Figura 2. Mapa de distribución de fechas de la cobertura QB de Murcia.

Figura 3. Mapa de distribución de nubes de la cobertura QB de Murcia.

Cuadro 2. Resultados de la previsión temporal de la programación de satélite.

Temporal windows	**2003/04**	**Ago**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dic**	**Ene**	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**
Programación estándard	Pedido												
	Adquirido												

Para asegurar al cliente que la totalidad de las imágenes recibidas (tanto pancromática como multiespectral) cumplían las características técnicas se utilizó un sistema de **control de calidad de la captura (o adquisición) de datos** especialmente diseñado por Aurensis para este proyecto y que será utilizado en futuras adquisiciones cuando el cliente requiera de informes de calidad exhaustivos en grandes coberturas de satélite. Las imágenes que, según el control de calidad de Aurensis, no cumplían las especificaciones eran devueltas a los proveedores con una justificación de la reclamación. En la figura siguiente se muestra un esquema de actuación para el control de calidad de las imágenes originales (captura de datos).

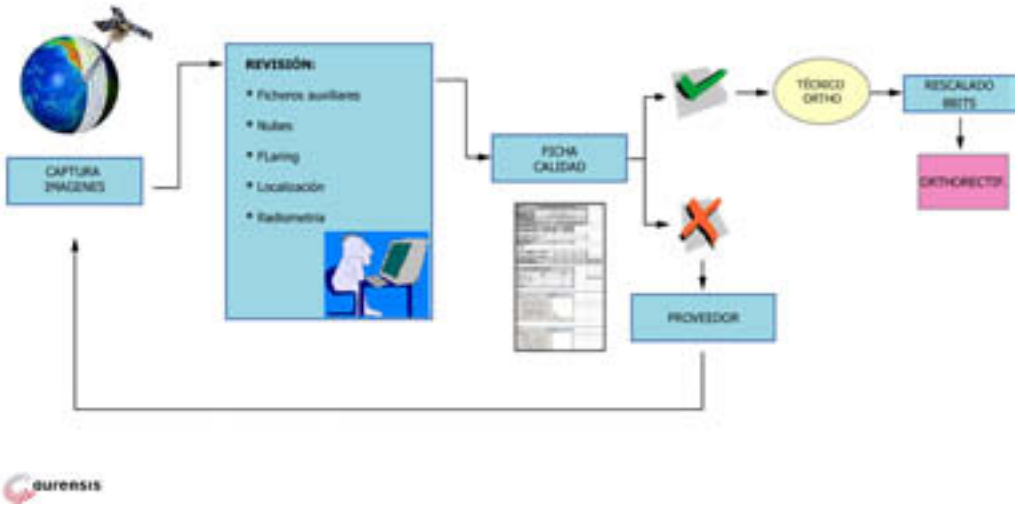


Figura 4. Metodología de control de calidad interno para la adquisición de imágenes.

En general, se puede concluir que todas las especificaciones técnicas fueron satisfechas en un 95%, un 5% de ellas fueron reclamadas y satisfechas adecuadamente. El inconveniente más grave fue el de la diferencia de fechas, que puede que restringirá a posteriori el número de aplicaciones a nivel general (aunque no a nivel local). La cobertura de nubes del 10% asegurada en cada una de las imágenes se ha satisfecho adecuadamente.

Fotografía aérea de referencia

Como referencia se ha utilizado una ortofoto de la Región de Murcia de 50 cm de tamaño de pixel, realizada a partir de un vuelo 1:30.000 de primavera de 2002 con RMSE absoluto inferior a 1m.

Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

El MDE utilizado como referencia vertical ha sido una malla ráster de 10 m de toda la Región de Murcia obtenido a partir de un vuelo fotogramétrico del año 1999 realizado por el IGN.

Un control de calidad externo ha aprobado la idoneidad de la utilización del MDE para este trabajo, mediante comparación con un MDE del año 2002. Este trabajo ha localizado las zonas de conflicto que muestran diversos grados de error en la determinación de la altura, sea por la propia realización del MDE, sea por desactualización del mismo.

Software

Para la ortorrectificación de las imágenes se ha utilizado Erdas, 8.5 y su módulo *Orthobase*.

También se ha utilizado, para el control de calidad de la captura y de la ortorrectificación y de herramienta auxiliar, el software Arc-View 8.3.

METODOLOGÍA DE ORTORRECTIFICACIÓN

Las especificaciones técnicas de la Región de la Murcia imponían una serie de restricciones

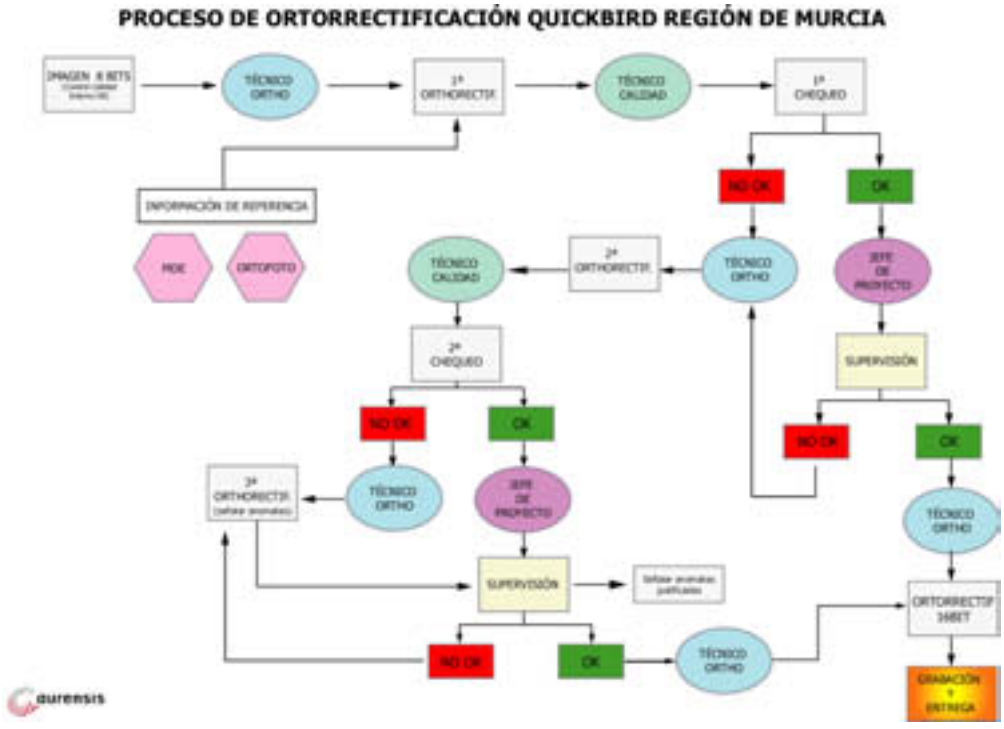


Figura 5. Esquema de la metodología de ortorrectificación.

en la calidad geométrica de la ortoimagen resultante: principalmente, las ortoimágenes debían asegurar un máximo de un RMSE en toda la imagen de 2.5 m en x-y respecto a la referencia. Para asegurar estas calidades se ha diseñado un esquema operativo iterativo de forma que las ortoimágenes pasen sucesivos y exhaustivos controles de calidad geométricos. En el siguiente gráfico se muestra cómo ha sido realizado el control de calidad de la ortorrectificación.

El proceso de ortorrectificación se ha llevado a cabo mediante toma de puntos de control en *Orthobase* de Erdas sobre la imagen pancromática inicialmente, utilizando una ortofoto como referencia horizontal, un modelo digital de elevaciones de un vuelo fotogramétrico como referencia vertical.

Una vez que el error en triangulación alcanzaba un valor inferior a los 2 m en x-y, teniendo en cuenta una nube homégenea de puntos, la imagen era remuestreada y enviada a un técnico de control de calidad que realizaba las siguientes operaciones:

* Análisis visual comparativo entre ortofoto y ortoimagen a escala 1:3000: localización de zonas de desviaciones visibles. Cualquier desplazamiento visualmente detectable es identificado.
* Análisis visual comparativo en zonas de solape entre imágenes: localización de zonas con desviaciones visibles. En este caso, se identificaba la ortoimagen con más desplazamiento respecto a la ortofoto y se localizaba la zona a corregir sobre la escena correspondiente.

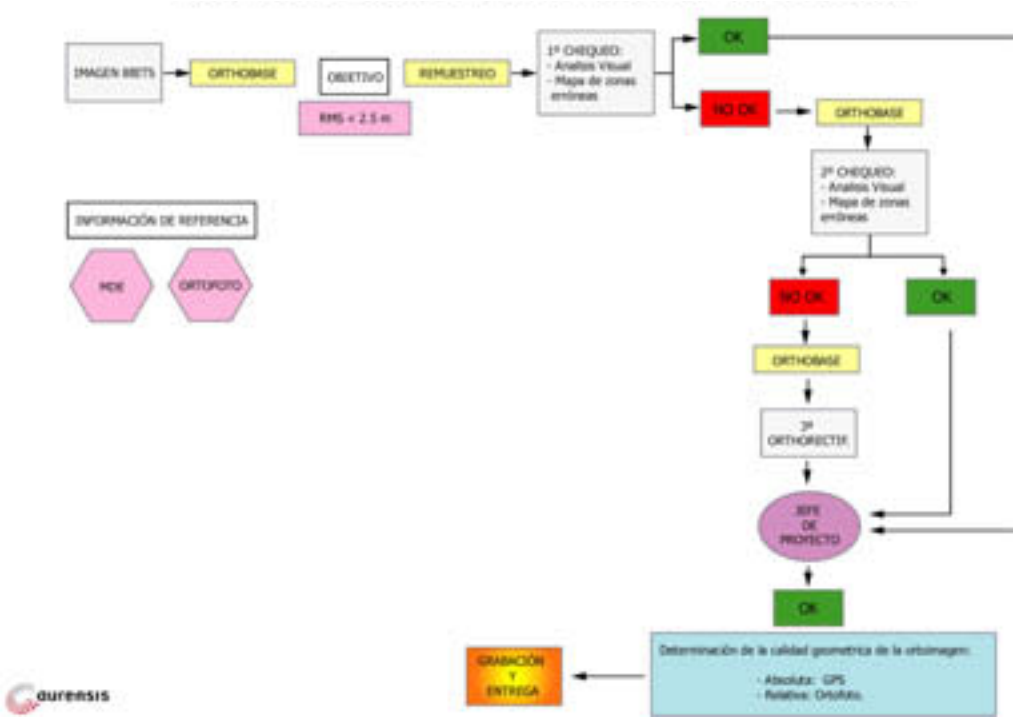


Figura 6. Metodología de control de calidad de la ortorrectificación

Un *shapefile* con las zonas a corregir es entregado de nuevo a los técnicos de ortorrectificación para que éstos sitúen nuevos puntos de control. A continuación se hace un nuevo remuestreo donde el técnico de calidad vuelve a revisar la imagen y comprueba si los errores han sido corregidos. Si es así, las imágenes se dan por finalizadas. El remuestreo a 16 bits se realiza una vez que el jefe de proyecto realiza los chequeos de calidad sobre las imágenes y da el visto bueno como producto definitivo.

La imagen multiespectral se ha ortorrectificado con la misma nube de puntos de control que se ha utilizado, dividiendo justamente las coordenadas del "input" entre 4. En los casos en los que existe un desfase de adquisición entre la imagen pancromática y la multiespectral se ha calculado ese desfase y se ha restado el pixel o pixeles correspondientes al valor del "input".

El mismo procedimiento de calidad que en el caso de la pancromática se ha llevado a cabo sobre las imágenes multiespectrales, aunque en este caso todo el proceso ha sido más rápido, por utilizar una nube de puntos de control ya creada.

La metodología de ortorrectificación y control de calidad está reflejada en el siguiente gráfico.

La ortorrectificación se ha realizado con un polinomio de transformación de grado 2 utilizando los ficheros RCP´s auxiliares que acompañan a cada una de las imágenes y mediante algoritmo de convolución cúbica para el producto de vocación visual y vecino más próximo para el producto científico.

RESULTADOS

El equipo de trabajo ha estado constituido por 1 jefe de proyecto, 2 técnicos de ortorrectificación y 1 técnico de calidad que han trabajado de lleno en la ortorrectificación durante cuatro meses.

El error medio cuadrático en triangulación referido a la totalidad de la imagen pancromática es de 1,128 metros. En total, se utilizaron unos 2050 puntos de control individuales para ortorrectificar las imágenes.

La ortorrectificación de la imagen multiespectral ha sido inmediata utilizando los mismos puntos de control. El tiempo de ortorrectifiación ha sido de 8 días, siendo el ajuste en triangulación con un RMSE de 0.5 m.

Para tener una evaluación de la calidad geométrica que nos da la ortoimagen pancromática se realizaron 2 tests:

1. Selección de una nube de puntos aleatoria sobre la totalidad de la ortofoto de la Región de Murcia. Se tomaron las coordenadas de estos puntos y a continuación se localizaron los mismos puntos sobre la ortoimagen, tomando del mismo modo las coordenadas. Se compararon ambos pares de coordenadas y el RMSE obtenido fue de 0.654 metros.
2. Toma de puntos GPS en campo en 4 hojas 1:50.000. La selección de estas hojas se realizó a partir del control de calidad del MDE. Se seleccionaron 2 hojas 1:50.000 donde se concentraran zonas con los mayores errores en altura y zonas consideradas sin errores significativos. Los RMSE fueron los siguientes:

RMS total H975	0,9558
RMS total H932	0,7672
RMS total H891	0,6240
RMS total H932	0,2982
	0,6613

Figura 7. Comparación de ortofoto (izq) con ortoimagen (der) a escala 1:3.000.

A pesar de los buenos resultados, se han localizado, durante las revisiones visuales de calidad (comparación, imagen ortorrectificad/ortofoto) una serie de desviaciones locales, que se deben a errores del modelo digital de elevaciones (bien por un dato erróneo, bien por cambios bruscos en la orografía del terreno no recogidos en el modelo o bien por desactualización del mismo). Estas zonas con desviaciones locales por encima de 2,0 m han sido localizadas y almacenadas en un *shapefile* para que sean utilizadas en caso de necesidad en estudios rigurosos.

Ha sido interesante comprobar cómo influye de manera diferente el MDE utilizado sobre el procesado de la imagen pancromática y sobre la multiespectral y cómo producen fuertes deformaciones los distintos tipos de algoritmos de remuestreo, más destacado en zonas de montaña. No es el objeto de esta comunicación el cuantificar y modelizar estas deformaciones, pero sí de futuros estudios, ya que es un tema importante cuando las imágenes deben utilizarse para realizar medidas de cierta precisión sobre las imágenes.

CONCLUSIONES

Pueden ser obtenidas las siguientes conclusiones respecto a los trabajos realizados para este proyecto:

1. Es posible, a partir de información ya existente (ortofotos y MDE), obtener ortoimágenes de alta resolución (<1m píxel) con ajustes geométricos relativos inferiores a 1,5 m (y absolutos similares a la referencia), en un corto periodo de tiempo y con medios reducidos. En el caso de Murcia, 2,5 meses de trabajo efectivo de 3 técnicos a tiempo completo han sido suficientes para producir la ortoimagen completa (el tiempo no cuenta el periodo de pruebas ni de cambio de formato, corte y grabación).
2. El software utilizado no está preparado, hasta el momento de la realización de este proyecto, para el mosaicado de gran número de escenas de este tipo. El equipo de trabajo ha tenido que enfrentar problemas de generación de puntos de atadura, manejo de puntos de control, recuperación de bloques de procesado, triangulaciones con errores desorbitados sin motivo aparente, etc.
3. Es posible guardar la metodología (puntos de control, referencia) y rehacer ortoimágenes en próximas adquisiciones con un mínimo de esfuerzo.
4. Se ha comprobado la alta influencia del MDE en la correcta geometría de la superficie. Por esto, es necesario disponer de MDE del terreno actualizados periódicamente que sean suficientes para la ortorrectificaión de las imágenes de satélite de alta resolución y de los nuevos satélites que pronto estarán disponibles en el mercado. De esta forma, será posible la generación periódica de ortoimágenes de grandes áreas: puesta a punto de un cadena de proceso de ortoimágenes.
5. Se proponen algunos ejemplos de estudios futuros que se intentarán llevar a cabo:
   Mejora de la metodología de toma de puntos de control (selección, distribución, disminución del número).
   Influencia de la calidad de MDE sobre la ortorectifiación de la imagen pancromática y multiespectral y teniendo en cuenta la topografía del terreno.
   Cuantificación de las posibles desviaciones o deformaciones según el algoritmo de remuestreo: caso de mediciones lineales y de superficies a escala 1:10.000 / 1:5.000.
   Posibilidad de ortorrectifiación de pasadas completas con un solo fichero RCP o bien posibilidad de introducir varios al mismo tiempo. Evita el alto número de ficheros a manejar y las revisiones de solapes entre escenas de la misma pasada.

AGRADECIMIENTOS

Al equipo de trabajo de la Dirección General del Medio Natural de la Región de Murcia: Inmaculada Ramírez, Mariano Vicente, Pedro Pérez etc.

A Juan Carlos Gumiel por su aportación técnica.

Generación de una ortoimagen Quickbird del año 2003 de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia: productos derivados y aplicaciones

M. Vicente Albadalejo[1], J. Pecci López[2], F. Cano González[2] y G. Maza Moreno[2]

(1) Sistema de Información Geográfica y Ambiental (SIGA). Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Calle Catedrático Eugenio Úbeda nº 3, 3ª Planta 30008-MURCIA.
(2) AURENSIS. Dpto. Análisis del Territorio. San Francisco de Sales, 38,1ºpl. 28003, Madrid.

RESUMEN

La Teledetección posee gran variedad de aplicaciones en la vida práctica y ha producido desde sus inicios en España gran expectación entre los gestores y observadores del territorio. Estas expectativas no se han cumplido totalmente debido a diferentes razones. Sin embargo, las imágenes de satélite de alta resolución relanzan el mercado de la Teledetección con nuevas y atractivas aplicaciones. A partir de aquí es posible reavivar el uso de la Teledetección y animar los campos tanto teórico como práctico.

Por iniciativa de la Dirección General del Medio Natural de la Región de Murcia, se ha realizado una ortoimagen de la totalidad de dicha Comunidad Autónoma (12.000 Km^2). De esta ortoimagen han derivado dos tipos de productos: un producto visual para ser distribuido al gran público y otro producto listo para ser utilizado por el ámbito científico; es decir, se obtendrán productos con valor añadido cualitativo y cuantitativo, con el objeto de aprovechar al máximo la imagen de satélite.

El objetivo de este documento es mostrar qué tipo de utilidades podrían ser desarrolladas a partir de las imágenes, y que pueda servir de ejemplo a otras iniciativas, sean del sector privado o del sector público.

***Palabras Clave**: Teledetección, Quickbird, ortoimagen, aplicaciones.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

Remote Sensing has a wide range of practical applications and it has produced great expectations between land managers and observers. In despite of this fact, most of these expectations had not been fulfil due to different reasons. Nevertheless, very high-resolution images (Ikonos and Quickbird) raise remote sensing market with new and attractive applications. Now it is possible to revive Remote Sensing and give new sense to theoretic and practical fields.

On Environmental Council of Murcia Region initiative, a Quickbird orthoimage of the totality of that Region (12,000 Km2) has been made. From this orthoimage It have been carried out two products: a visual product to be distributed to great public in general, and a scientific product ready to be used by scientific scopes, products with quantitative and qualitative added value will be obtained taking advantage of the images.

The objective of this document is to show what type of utilities could be developed from the images in order to be an example for other initiatives, from the private or the public sectors.

Key Words: *Remote sensing, Quickbird, orthoimage, applications*

INTRODUCCIÓN

La Dirección General del Medio Natural de la Región de Murcia ha ralizado la primera ortoimagen Quickbird de todo su territorio, que posee 70 cm de píxel en blanco y negro, 2.8 m en color, además de 70 cm en color en un futuro próximo. Se trata de un producto comparable a la ortofoto en cuanto a la calidad geométrica y con más ventajas desde el punto de vista de sus aplicaciones. Los trabajos técnicos han sido realizados por la empresa Aurensis.

Esta iniciativa murciana, pionera en Europa debía conllevar el que la imagen no quedase como mero producto visual sin más aplicaciones que la estética (póster, figuras de algunos informes, base para colocar alguna otra cartografía sobre ella, etc). Por ello, la iniciativa ha tenido un sentido eminentemente práctico a la hora de planificar la adquisición y los productos que se derivarán de él.

Es verdad que la ortoimagen Quickbird de la Región de Murcia ha representado un reto, tanto para Aurensis como para la propia Administración, pero se es consciente que el reto continúa y el verdadero reto acaba cuando se haya aprovechado al máximo toda la potencialidad en valor añadido de esta adquisición.

Con relación al sentido eminentemente práctico del proyecto, esta comunicación presenta una relación de futuras aplicaciones que la ortoimagen de satélite Quickbird tendrá en el marco de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia. Desde este punto de vista, se puede afirmar que también la Región de Murcia será

pionera en el desarrollo de gran número de aplicaciones sobre una ortoimagen de satélite de este tipo.

PUNTO DE PARTIDA

Tal y como ha sido expresado en la introducción, es importante, si se quiere obtener el mayor y mejor aprovechamiento posible de las imágenes, el planificar la finalidad de las imágenes y definir los productos que constituirán la base.

Para el presente trabajo, realizado por Aurensis, los productos finales constituyen al mismo tiempo los productos de partida de las aplicaciones que la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio podría darle, basándose, en primer lugar en los 2 grandes productos desarrollados (visual y científico). Por tanto, existe una gran variedad de productos de base con diferentes resoluciones y procesados que se han obtenido. Estos productos de partida son los siguientes:

Imágenes originales sin ortorrectificar (pan + multi)

- Ortoimagen pancromática (70 cm de píxel, b/n), algoritmo remuestreo convolución cúbica. Preparada inicialmente por escenas
- Ortoimagen multiespectral (2.8m de píxel, color), algoritmo remuestreo convolución cúbica. Preparada inicialmente por escenas
- Ortoimagen multiespectral (2.8m de píxel, color), algoritmo remuestreo vecino más próximo. Preparada inicialmente por escenas
- Ortoimagen multiespectral y ortoimagen pancromática homogénea en su apariencia para el producto de **vocación visual**. Preparada para la fusión y el mosaicado.
- Ortoimágenes multiespectrales con niveles de radiancia
- Ortoimagen fusión color verdadero (70 cm de píxel, color)(producto que la Consejería realizará a partir de las anteriores coberturas pan+ multi homogeneizados)

De todos éstos, como se indica arriba, el producto de vocación visual sería el producto homogéneo en su apariencia (con histogramas homogeneizados). El resto son diferentes tipos de productos que, inicialmente, puede servir para diferentes temas técnicos y científicos e incluso para desarrollar otros tipos de producto visuales.

A pesar de todo lo anterior, lo más importante en todos los productos anteriormente citados (salvo el producto original) es que el punto de partida es siempre una imagen de satélite con propiedades cartográficas. Puede asegurarse que la ortoimagen generada (en todas sus modalidades) equivale a un mapa en bruto 1:10.000 de Murcia. Se dice en bruto, porque en realidad no sólo la imagen es un mapa en sí, sino que constituye una fuente de cartografía.

Indudablemente, para el desarrollo de cualquier aplicación, es necesario utilizar conjuntamente con la imagen otro tipo de información, que puede ser: otras imágenes de satélite de distintas fechas (históricas o programación de otras adquisiciones), estadísticas, bases de datos históricos, coberturas vectoriales diversas según el tipo de estudio, etc.

Las herramientas que deben ser utilizadas son procesadores de imágenes especializados, un SIG, que sirva para interpretar los resultados del análisis de las imágenes procesadas conjun-

tamente con otro tipo de datos, así como desarrollar aplicaciones sobre el total de datos disponibles y quizás algunos otros programas informáticos auxiliares de tratamiento de estadísticas, gráficos, tratamiento de imágenes, etc.

APLICACIONES DEL PRODUCTO CON VOCACIÓN VISUAL

Este producto lo constituye el mosaico Quickbird homogéneo en color verdadero (o falso color) de la Región de Murcia. Se enumeran algunas de las aplicaciones que pueden desarrollarse:

1. Aplicaciones educativas (sea en papel, sea en digital)
   En general, una imagen de satélite es un material idóneo para mostrar visualmente a los escolares, desde el inicio de su formación en materia de geografía, el territorio donde viven (mostrado desde escala local a internacional), sus diferentes accidentes geográficos, sus ciudades, localización relativa, etc. Los escolares pueden, al mismo tiempo, conocer la relación entre la visualización del territorio a diferentes escalas, manejo de coordenadas y diferencias entre las diferentes proyecciones geográficas existentes de una manera atractiva, etc.
2. Promoción nacional e internacional del territorio
   Turismo y Medio Ambiente: Exposición de las zonas con interés turístico para promoción nacional e internacional; exposición de estas zonas en relación con el medio ambiente que lo rodea.
   Turismo Rural: Localización de entidades de Turismo Rural y visualización del entorno.
   Rutas de interés natural, turístico, etc.: definición y exposición al público de las mismas, accesibilidad, etc.
3. Simulación 3-D. Las visualizaciones en 3 dimensiones, así como los vuelos interactivos de estas imágenes son una gran ayuda para los puntos antes citados.

APLICACIONES DEL PRODUCTO CON VOCACIÓN CIENTIFICA-TÉCNICA

Para mostrar en esta comunicación la multitud de aplicaciones que puede llegar a tener la imagen de satélite de alta resolución Quickbird ortorrectificada, se ha hecho el ejercicio de dar una aplicación (en el caso de que sea factible) para cada uno de los temas descriptivos del medio natural. La enumeración de los distintos temas que se van a analizar, está tomada de la página web de la Dirección General del Medio Natural.

Los productos de partida de este tipo de aplicaciones son todas las imágenes ortorrectificadas con niveles de radiancia, de donde se extrae la información temática, la imagen pancromática ortorrectificada con histogramas no modificados para digitalizar a escala 1:10.000 o mayor.

Una de las aplicaciones en las que inmediatamente se puede pensar, sería el de redefinir las coberturas vectoriales de elementos oficiales de cierta importancia, y que se distribuye el gran

público interesado en este tipo de imágenes, con el fin de evitar los posibles desplazamientos por diferencia de escala que suelen existir. Hay que tener en cuenta que tanto la administración, como las empresas privadas, trabajan cada vez más con este tipo de imágenes y con escalas de trabajo cada vez mayores, con lo cual, necesitan de coberturas vectoriales (límites de provincias, parques naturales, zonas de interés oficial por cualquier motivo) cada vez más precisas.

Conocimiento del Medio Natural

Medio físico

- Características climáticas, propiedades de la atmósfera.
  Relación del tipo de vegetación y su distribución con el clima; estudios del cambio climático en relación con la presencia de los distintos tipos de vegetación, estudios sobre el protocolo de Kyoto, etc. Como información auxiliar, se necesitarían datos climáticos históricos y de estaciones meteorológicas o agro-meteorológicas distribuidas por todo el territorio, o bien imágenes de satélites climáticos históricos o actuales.
- Grandes estructuras geológicas: cartografía a escala de detalle de estructuras geológicas, identificación y caracterización sobre la imagen de los Lugares de Interés Geológico (LIG.
- Caracterización de unidades edafológicas: relacionar características espectrales del suelo con niveles de macronutrientes, humedad, prácticas ambientales (o agroambientales), etc.
- Características hidrológicas: definición y caracterización de cuencas hidrológicas.
  También pueden ser interesantes estudios de erosión a nivel de detalle, pérdidas de suelo, efectos de las normativas ambientales en este sentido.

Por otro lado, Murcia, se divide en 6 comarcas: la identificación y delimitación exacta sobre las imágenes, sería de alto interés.

Medio biótico (fauna y flora)

Identificación y caracterización de hábitats de flora y fauna, ecosistemas sobre la imagen de satélite, monitorización de los mismos, identificación de cada uno de los pisos bioclimáticos presentes en la Región de Murcia (Oromediterráneo, Supramediterráneo, Mesomediterráneo y ermomediterráneo.

Otra aplicación en la que se puede pensar es en la distribución de la flora y fauna en relación con actividades antrópicas, efectos de políticas de protección, etc.

También sería interesante analizar las funciones o aspectos beneficiosos sobre el paisaje, la convivencia ser humano-medio ambiente, etc.

Ecosistema forestal, sistemas forestales y funciones de los sistemas forestales

Caracterización de especies forestales, recuento de árboles, identificación prematura de enfermedades, síntomas de stress biótico o abiótico, etc.

Inventario forestal anual, inventario y seguimiento de reforestación, estimación de pérdidas por incendios forestales, identificación y estado de los cortafuegos, calidad de los sistemas forestales, estudios forestales por comarcas, etc.

No hay que olvidar su interés en la lucha contra incendios: la imagen es un buen elemento para identificar la mejor distribución y localización de los elementos de lucha contra incendios, diseñar campañas de prevención y programar las actuaciones en caso de incendio. Por otro lado, también los incendios forestales pasados pueden ser identificados e inventariados, además de realizar un seguimiento año tras año.

Por último, se tiene la certeza de que la ortoimagen sería una estupenda herramienta para determinar las funciones beneficiosas (sociales, económicas, paisaje, recreo, funciones ambientales varias, etc.) del medio natural (ecosistemas forestales, en este caso) sobre el territorio.

Humedales

Una de las primeras aplicaciones en las que se puede pensar es la revisión del inventario de humedales y actualización de su estado. Por otro lado, también es interesante relacionar su estado con los componentes faunísticos y vegetales. Algunas de las características que definen la tipología de los humedales, pueden ser observados en las imágenes de satélite. Una serie de imágenes de satélite es una herramienta inmejorable para facilitar la gestión de estos humedales, combinado con un SIG adecuado.

Los distintos tipos de zonas húmedas que podemos encontrar en la Región de Murcia son muy variados y la Consejería considera los siguientes: salinas interiores y costeras, arrozales, marismas, balsas de riego, depuradoras de lagunaje, criptohumedales, charcas y pozas, embalses, bosques de ribera, fuentes y manantiales, encañizadas y, por supuesto, El Mar Menor. Todos estos elementos pueden ser reconocibles en la ortoimagen Quickbird (algunos pueden ser discutibles), y por tanto, no sólo pueden inventariarse, sino estimar su estado de conservación e identificar impactos hasta cierto punto.

Litoral y Medio Marino

Todo lo anterior puede ser aplicado al litoral marino. En definitiva, esta imagen de satélite puede ser de gran utilidad para actualizar el estado ambiental del litoral, en lo referente a vegetación, biotopos, puntos de posible contaminación, identificación de vertidos y sus efectos sobre le medio ambiente, color de las aguas, edificaciones turísticas, etc.

En lo referente al Medio Marino, sería interesante realizar algunos estudios sobre el Mar Menor y el fenómeno de eutrofización. Como en otros estudios anteriores, sería necesario utilizar otras imágenes de diferente fecha y/o resolución espectral.

Políticas de Protección de la Naturaleza

Todas las aplicaciones anteriormente citadas, no sólo son de alto interés científico, sino que proporcionan parte de los datos (estadísticos, informes, etc.) necesarios para el análisis y

diagnóstico de conservación de medio natural. Sobre ellos se diseñan los diferentes programas de protección y conservación, gestión del territorio, control y seguimiento de aplicación de las distintas políticas, gestión y mejora de medio natural, restauración, ordenación y gestión forestal.

Las imágenes periódicas de satélite constituyen, para el conocedor y buen fotointérprete de las imágenes y de sus resultados, un buen instrumento con el que poder observar el impacto de las anteriores políticas.

CONCLUSIÓN

Como puede verse, las aplicaciones son variadísimas y la lista podría ampliarse; algunas de ellas no han sido desarrolladas aún, otras sí que se han puesto a punto en algunas administraciones y llevan operativas como herramientas de apoyo desde hace cierto tiempo.

Las imágenes de satélite de muy alta resolución, aun no teniendo la resolución espectral (número de bandas espectrales diferentes) que poseen otros satélites, proporcionan unas características fundamentales: el detalle y la precisión geométrica y geográfica, que en algunos casos son elementos prioritarios.

Por otro lado, la experiencia demuestra que la potencialidad de la banda multiespectral de las imágenes no ha sido aprovechada suficientemente en aplicaciones prácticas.

Como conclusión final, se espera que el trabajo de ortorrectificación Quickbird de la Región de Murcia, llevado a cabo por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, en colaboración con Aurensis, proporcione un empuje a la aplicación de las nuevas tecnologías en favor del medio ambiente.

ANEXO DE IMÁGENES

Figura 1. Ciudad de Calasparra. Imagen 70 cm color de 20 de octubre de 2003

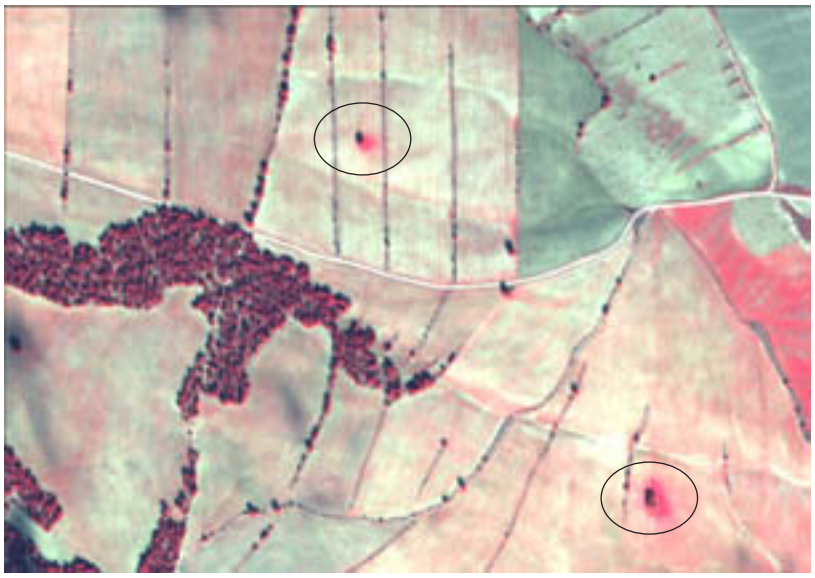


Figura 2. Detalle de árboles con vegetación alrededor. Los tonos grises representan distinto grado de humedad en el suelo.

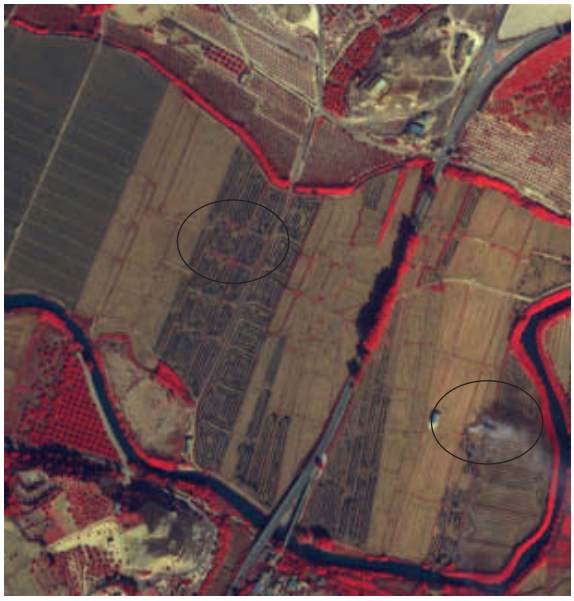


Figura 3. Detalle de quema de rastrojos de arroz.

Figura 4. Vegetación de ribera.

Teledetección aplicada al estudio del medio ambiente: seguimiento de la evolución del bañado del río Xanaes en la laguna Mar Chiquita (Córdoba, Argentina)

N. Martínez[1], A. Rodríguez[2], M. Rodilla[1], M. Pagot[2], G. Plencovich[2], M. Corral[2] y C. Oroná[2]

(1) Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, EPSG, U.P.V., (Valencia, España).
(2) Laboratorio de Hidráulica, FCEFyN, UN de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1601, Córdoba, Argentina, CP 5000. Tel./fax. (0054) (0)351 4334446.

RESUMEN

En este trabajo se ha ejemplificado a través de un caso concreto la validez y potencial del uso de la Teledetección a la gestión ambiental para la provincia de Córdoba (Argentina).
Se plantea el seguimiento temporal a través de imágenes de baja y alta resolución de una zona de bañados en la desembocadura del río Xanaes al sur de la laguna Mar Chiquita (Córdoba, Argentina), desde 1997 hasta el 2003 y su comparación con las áreas de los bañados del Río Dulce y áreas de la laguna. Dicha laguna ha sido declarada sitio RAMSAR por su alto valor ambiental en el 2002.
La metodología se basó en el uso de imágenes de alta y baja resolución cubriendo periodos húmedos y secos. A través de interpretación y análisis de transectos se definió un rango de áreas de bañados medidos. Esto permitió un cálculo teórico aproximado de las áreas inundadas periódicamente.

Palabras Clave: *seguimiento temporal, bañados, provincia de Córdoba (Argentina).*

ABSTRACT

In this study, it has tested the potential use and validity of remote sensing for environmental management in Córdoba Province (Argentina).

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

First of all, we bring up the issue about the temporal monitoring through low and high resolution pictures of "bañados" area at the end of Xanaes river in the south of the Mar Chiquita lagoon (Córdoba, Argentina) from 1997 until 2003. Then we compare them with Dulce river "bañados" and lagoon areas. This lagoon has been declarated RAMSAR place in 2002.

The methodology it was based using high and low resolution pictures during wet and dry periods. Through the performance and analysis about transects it was defined some monitoring areas, which allowed an approximately theorist calculate about the periodically flood areas.

***Key Words**: temporal monitoring, bañados, Córdoba (Argentina).*

INTRODUCCIÓN

Mar Chiquita es el mayor lago de Argentina y el quinto lago salino del mundo situado en el noreste de la provincia de Córdoba (Argentina). Constituye un área de gran riqueza en biodiversidad y uno de los atractivos turísticos más importantes de la provincia. Este lago es el colector final de una cuenca sin salida al mar, alimentada por los ríos Suquia y Xanaes, provenientes de las sierras de Córdoba, y el Río Dulce, el cual genera extensos bañados y un amplio delta al norte de la laguna. La laguna y los bañados constituyen un tesoro natural para la provincia de Córdoba, tienen valor paisajístico, por cuanto presentan un escenario de gran belleza que atrae al viajero; valor de biodiversidad, por cuanto albergan una gran cantidad de flora y fauna; valor arqueológico, ya que en el área se encuentran restos de culturas indígenas adaptadas a la vida en los bañados; y valor económico, generando recursos a través del turismo tradicional, el ecoturismo, y el turismo balneológico que aprovecha el valor curativo de sus aguas y fangos (*Bucher,* 2001).

Figura 1. Localización del la provincia de Córdoba (Argentina).

Un bañado es un terreno húmedo, a trechos cenagoso y a veces inundado por las aguas pluviales o por las de un río o laguna cercana. Entre las funciones de un bañado en un entorno natural destacan la de amortiguación de picos de crecida y ser fuente del desarrollo biológico. Las zonas en las que se forman bañados poseen una alta biodiversidad y están sometidas a ciclos de nivelación y descarga (*Martínez,* 2004). En este trabajo se estudia primeramente el bañado del río Xanaes (Segundo), el cual se localiza en la misma cuenca del río Xanaes una cierta distancia antes de que éste descargue sus aguas en la zona sur de la laguna Mar Chiquita. Es una zona húmeda propicia para el asentamiento de especies animales y vegetales que tiene un comportamiento particular. En un segundo lugar se comparará dicho bañado con los bañados del Río Dulce y con la Mar Chiquita.

En *Pagot* (2003) y *ILHUNC* (2004) se utilizaron imágenes con una resolución espacial de 360 m para calcular la superficie de la lámina de agua de Mar Chiquita. Estas imágenes fueron tomadas sin costes del catálogo de imágenes de la *CONAE.* Dichas imágenes únicamente se pueden obtener de forma gratuita con una serie de restricciones, entre las que destacan, un tamaño de píxel de 360 x 360 m, y sólo se obtienen con la combinación 7/5/2. En estos trabajos se estudió la correlación existente entre imágenes con una resolución espacial de 30 m e imágenes con una resolución espacial de 360 m, obteniendo como resultado una buena correlación, apuntando así, que el cálculo de áreas sobre imágenes con una resolución de 360 m es viable.

Las imágenes con un tamaño de píxel de 360 x 360 m que presenta el catalogo de la *CONAE* son obtenidas a partir de imágenes del satelite Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+.

En este trabajo se realiza un seguimiento de la evolución del bañado del río Xanaes con el uso de imágenes con una resolución espacial de 360 m. El lugar estudiado está dotado de un valor intrínseco, ya que del mismo depende la distribución de especies animales y vegetales de la zona. Por tanto, los objetivos planteados son los siguientes:

- Comprobar la validez de imágenes de baja resolución para el estudio del medio ambiente.
- Cálculo de áreas con apoyo de un programa de procesamiento de imágenes.
- Seguimiento de la evolución del bañado del río Xanaes desde el año 1997 hasta el 2003 haciendo uso de la resolución temporal de las imágenes.
- Evaluar las relaciones entre valores de niveles de la laguna Mar Chiquita y áreas de Bañados del Río Dulce con los valores medidos de áreas de Bañado del río Xanaes.

METODOLOGÍA

El periodo de estudio comprendió desde el día 28-Febrero-1997 hasta el día 10-Diciembre-2003, ambas fechas inclusive. El método seguido nos reflejó de forma aproximada la extensión del bañado en las distintas fechas.

Se utilizaron imágenes del satélite Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ con un tamaño de píxel de 360 x 360 m obtenidas del catálogo de internet presentado por la *CONAE* y una imagen Landsat 7 ETM+ con un tamaño de píxel de 30 x 30 m. La imagen con una resolución espacial de 30 m fue comparada con otra imagen de 360 m del mismo día con el fin de demostrar la utilidad de las imágenes de menor resolución para el cálculo de áreas de forma aproximativa.

Por otro lado, existen antecedentes hidrológicos sobre los bañados del río Dulce y sobre la laguna Mar Chiquita los cuales fueron tomados para la realización del análisis comparativo entre ambos con el bañado del río Xanaes.

Validez de las imágenes de baja resolución

A partir de una imagen de 30 x 30 m de tamaño de píxel y una con 360 x 360 m de tamaño de píxel tomadas el mismo día se realizó dos transectos, uno para cada imagen, atravesando un mismo lugar, obteniendo así, una representación gráfica de los valores de niveles digitales (N.D.) en función de su localización (Figura 2). En dicha Figura se observa que los valores de N.D. mantenían una cierta correlación, por lo que se justifica el uso de las imágenes de menor resolución.

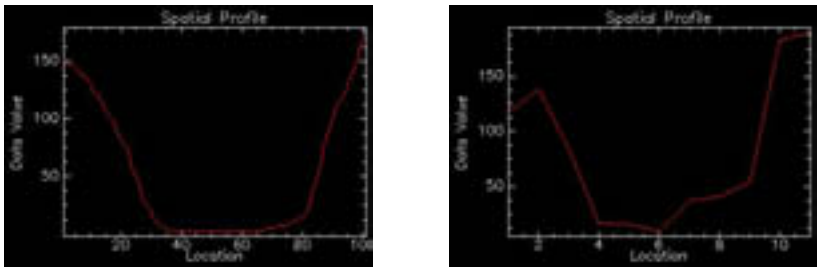


Figura 2. Valor de N.D. en alta resolución (izquierda) y en baja resolución (derecha).

Selección de imágenes

La selección inicial se realizó sobre las imágenes con "*Path/Row 228/82*", y cuando el área aparecía fragmentada se recurrió a las imágenes con "*Path/Row 228/81*" ubicadas una posición

Figura 3. 09/10/1998. Fuente: CONAE (adaptada).

más al sur que las primeras. Los pasos seguidos para la elección de las imágenes que se utilizaron en el estudio comparativo fueron:

a) Preselección (entre todas las imágenes existentes de la zona para el periodo 1997-2003) de escenas caracterizadas por un bajo porcentaje de nubes con el fin de observar con claridad el área de estudio. Como se puede ver en la Figura 3, las nubes dificultan la visión del bañado el cual del se encuentra dentro de un recuadro en rojo.
b) Segunda selección, en la cual se discriminaron aquellas escenas en las que el bañado aparecía parcial o totalmente seco, ya que sólo se precisaba aquellas imágenes en las que el bañado presentaba agua superficial. Esta selección se realizó de modo visual siguiendo los siguientes criterios, los cuales marcaron las pautas para discriminar las imágenes en las que el bañado se presentaba sin agua superficial:
   - Identificación de píxeles con tonalidades marrón-violáceo, caracterizándose por valores aproximados de nivel digital (N.D.) entre 87-174 para el canal del rojo, 63-164 para el canal del verde y 15-99 para el canal del azul; con la combinación de bandas 752 se identificaron como zona seca, sin humedad. En la Figura 4 se aprecia una sección de una de las áreas del bañado que se consideraron como "secas".

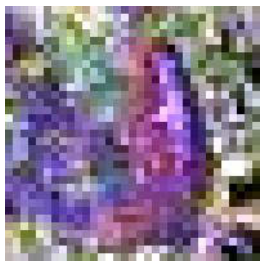


Figura 4. 28/09/2000. Fuente CONAE.

c) Como en algunas imágenes el bañado aparecía fragmentado debido a la extensión de la escena disponible, fue necesario conseguir para estos casos la imagen consecutiva y unir estas dos imágenes con el único fin de poseer una visión total del área del bañado. Se generaron así mosaicos cubriendo un área mayor.

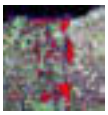
Se procesaron un total de 50 imágenes, de las cuales 11 fueron consideradas como área de bañado seco. Se pudieron relevar las áreas de 29 en las que el bañado presentaba agua superficial, mientras que las restantes presentaban una visión parcial o nula del bañado. En 2 de las 29 imágenes se necesitó recurrir a la creación de mosaicos con otras imágenes del mismo día para poder observar el bañado completo. En el Cuadro 1 se muestran cinco de las cincuenta imágenes procesadas.

Determinación de áreas del bañado

A partir del análisis de transectos y la lectura de intensidades de pixeles se obtuvo el rango de valores de Niveles Digitales (N.D.) que mejor representaba el bañado en cada una de las imágenes, pudiendo homogeneizar el rango con valores comprendidos en el canal del verde

entre 0 y 30. A esta decisión se llegó a través del análisis de los N.D., comparándolos con el comportamiento espectral de las zonas con agua. En la banda 5 se resaltaba el área del bañado con tonos oscuros (valores de N.D. bajos). En el Cuadro 1 se expone las imágenes procesadas del año 1998 mostrándose una imagen del bañado antes de realizar la "ROI" y la imagen con el área resaltada en un tono rojizo homogéneo (véase anexo de figuras).

Cuadro 1. Áreas del bañado del río Xanaes para el año 1998

Fecha	Área del bañado (Hectáreas)	Imagen LANDSAT 5 TM Baja Resolución	
		Imagen del bañado	Área del bañado
31/03/1998	10.368		
18/05/1998	19.932		
07/09/1998	Seco		S/d
26/11/1998	8.307		

S/d: sin determinar.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Bañado del Río Segundo

En la Figura 5 aparecen representadas las áreas del bañado del río Xanaes (eje y) para las fechas comprendidas entre el 28/02/1997 y el 10/12/2003.

Los picos máximos (punto donde cambia de crecer a disminuir el área) se dan en Abril 99, finales Marzo 00, Abril 01, Abril 02, finales Marzo 03, como se observa en el Cuadro 3.

Dentro del periodo de crecimiento del Bañado se observaron valores atípicos en la curva de pendiente positiva que generó un nuevo pico entre máximos. Estos valores corresponden a los meses de Marzo 1998, Noviembre 1999 y Febrero 2001.

En el cuadro 2 se pueden apreciar los valores máximo y mínimo del área del río Segundo para el periodo 1997-2003.

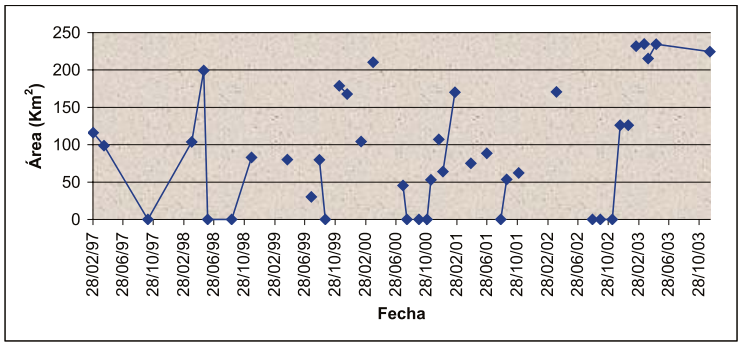


Figura 5. Áreas del bañado del río Xanaes durante el periodo 1997 - 2003.

Cuadro 2. Área máxima y mínima del bañado del río Segundo para el periodo 1997 - 2003.

	Área (km²)	Fecha
Valor máximo	234.83	21-Marzo-2003
Valor mínimo*	30.33	24-Julio-1999

*No se tuvo en cuenta las áreas del bañado que se consideraron cero.

En el Cuadro 3 se presentan los intervalos areales evaluados por días, junto con las variaciones parciales de crecimiento y recesión del Bañado.

Cuadro 3. Evaluación de la tendencia del bañado del río Segundo en función de las áreas medidas.

Ciclo 1997-2003	Crecimiento del bañado (Km²/día)	Recesión del bañado (Km²/día)	Intervalo areal (Km²)	Intervalo temporal (días)
Febrero 97 - Abril 97**		0.4	18	44
Abril 97 - Octubre 97		0.6	98	176
Octubre 97 - Mayo 98	0.9		199	224
Mayo 98 - Septiembre 98		0.9	199	112
Septiembre 98 - Abril 99	0.4		80	224
Abril 99 - Septiembre 99		0.5	80	152
Septiembre 99 - Marzo 00	1.1		210	192
Marzo 00 - Noviembre 00		0.7	157	232
Noviembre 00 - Abril 01	0.1		22	160
Abril 01 - Septiembre 01		0.2	22	144
Septiembre 01 - Abril 02	0.6		117	200
Abril 02 - Diciembre 02		0.2	45	256
Diciembre 02 - Marzo 03	1.1		109	96
Marzo 03 - Diciembre 03		0.01	10	264

** En este intervalo es posible que por cobertura de nubes no se haya registrado el pico de las áreas.

En el cuadro anterior se observa que entre octubre y abril, el bañado tiende a aumentar el tamaño del área que ocupa, mientras que entre mayo y septiembre se comporta de manera opuesta, es decir, tiende a disminuir su área.

Este fenómeno podría ser causado por grandes lluvias en periodo estival seguido por un periodo de escasez y evaporación favorecida por la poca profundidad de las aguas.

También se puede apreciar que las variaciones parciales de áreas, tanto al aumentar como al disminuir su tamaño, lo hace de modo lento y progresivo dentro del intervalo temporal que dura cada periodo de crecimiento o recesión (aumenta con una media de 0,7 km^2/día y disminuye con una media de 0,4 km^2/día), respecto de los valores registrados por los bañados del río Dulce (que aumenta con una media de 16 km^2/día y disminuye con una media de 10 km^2/día), el cual se estudia en el apartado siguiente.

Bañados del Río Dulce

Para poder realizar un estudio comparativo entre las áreas de Bañados del río Xanaes y del río Dulce se han analizado los datos disponibles de éste último con la misma metodología ya explicada.

En la Figura 6 aparecen representadas las áreas del bañado del río Dulce (eje y) para las fechas comprendidas entre el 28/02/1997 y el 10/12/2003.

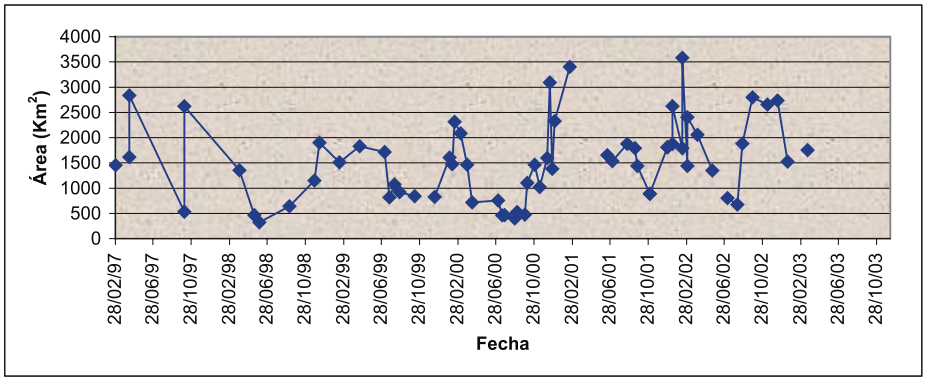


Figura 6. Áreas de los bañados del río Dulce durante el periodo 1997-2003.

Así para los Bañados del río Dulce los valores disponibles arrojaron los siguientes resultados presentados en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Evaluación de la tendencia del bañado del río Dulce en función de las áreas medidas.

Ciclo 1997-2003	Intervalo areal (Km^2)	Intervalo temporal (días)	Crecimiento del bañado (Km^2/día)	Recesión del bañado (Km^2/ día)
Febrero 97 - Abril 97	161	44	3.7	
Abril 97 - Octubre 97	1081	176		6.1
Octubre 97 - Mayo 98	2303	224	10.3	
Mayo 98 - Diciembre 98	2511	208		12.1
Diciembre 98 - Julio 99	1575	208	7.6	
Julio 99 - Febrero 00	1061	224		4.7
Febrero 00 - Abril 00	1485	56	26.5	
Abril 00 - Noviembre 00	1840	216		8.5
Noviembre 00 - Junio 01	2928	206	14.2	
Junio 01 - Febrero 02	2512	250		10.05
Febrero 02 - Mayo 02	2670	96	27.8*	
Mayo 02 - Noviembre 02	2904	176		16.5
Noviembre 02 - Febrer 03	2062	96	21.5	
Febrero 03 - Mayo 03	983	80		12.3

*en Mayo 02 se dio el máximo valor del área del bañado.

A continuación se muestran los valores de área máxima y mínima en Km^2 de los bañados del río Dulce para el periodo 1997-2003 (Cuadro 5):

Cuadro 5. Área máxima y mínima de los Bañados del río Dulce para el periodo 1997 - 2003.

	Área (Km^2)	Fecha
Valor máximo	3580	21/05/2002
Valor mínimo	325	12/12/1998

Estudio comparativo entre bañados

En el cuadro siguiente se puede observar una posible relación entre los comportamientos del bañado del río Xanaes y los bañados del río Dulce. Hasta el mes de Abril del año 2000, las áreas de los bañados del río Dulce aumentaron y disminuyeron su área con un retardo medio de tres meses con respecto a la forma en que aumentaron y disminuyeron los bañados del río Segundo.

Cuadro 6. Comparación entre bañados.

Ciclo 1997-2003 Bañado río Segundo	Ciclo 1997-2003 Bañado río Dulce	ÁREA	Intervalo temporal mensual entre cada pico y valle de Bañados
Abril 97 - Octubre 97	Abril 97 - Octubre 97	Disminuye	0
Octubre 97 - **Mayo 98**	Octubre 97 - **Mayo 98**	Aumenta	0
Mayo 98 - Septiembre 98	Mayo 98 - Diciembre 98	Disminuye	3
Septiembre 98 - **Abril 99**	Diciembre 98 - **08/Julio 99**	Aumenta	3
Abril 99 - Septiembre 99	Julio 99 - Febrero 00	Disminuye	5
Septiembre 99 - **28/Marzo 00**	febrero 00 - **13/abril00**	Aumenta	1
Marzo 00 - Noviembre 00	abril 00 - noviembre00	Disminuye	0
Noviembre 00 - **Abril 01**	noviembre 00 - **19/junio 01**	Aumenta	2
Abril 01 - Septiembre 01	Junio 01 - Febrero 02	Disminuye	5
Septiembre 01 - **Abril 02**	Febrero 02 - **Mayo 02**	Aumenta	1
Abril 02 - 15/Diciembre 02	Mayo 02* - 13/Noviembre 02	Disminuye	-1
15/Diciembre 02 - **21 Marzo 03**	13/Noviembre 02 - **Febrero 03**	Aumenta	-1
Marzo 03 - Diciembre 03	Febrero 03 - Mayo 03**	Disminuye	

Meses resaltados indican picos de máxima crecida.
*en Mayo 02 se dio el máximo valor del área de los bañado del río Dulce.
**No se poseen datos de las áreas de los Bañados del río Dulce a partir de Mayo del 2003.

A partir de Abril del 2000 disminuyó el retardo, pero hasta Mayo 2002, los bañados del río Dulce continuaban llegando a sus picos máximo y mínimo con un retraso entre 0 y 5 meses con respecto al bañado del río Xanaes.

Una posible explicación a este fenómeno sería la diferencia de cantidad de agua entre ambos ríos. Es lógico que el río Dulce (que contiene aproximadamente un 90% más de caudal que el río Xanaes) tarde más en llegar al punto crítico en el que cambia de un ciclo creciente a un ciclo decreciente, debido al tiempo de retardo propio de la cuenca; al mismo tiempo y por el mismo motivo tardaría más en llegar al punto crítico opuesto (donde cambia de disminuir su área a aumentarla). Al haber una mayor cantidad de agua, el bañado del río Dulce necesita más tiempo para su evaporación.

Por otro lado no se debe olvidar que existe una relación entre el comportamiento de las aguas del río Dulce y la laguna Mar Chiquita. Según *Hillman* (2003) y *Pagot* (2003), con respecto a esta relación, el pico sobresaliente de los bañados del río Dulce se da en el mes de Mayo y el pico máximo en los niveles de la laguna Mar Chiquita se retarda un mes, o sea que llega en el mes de junio.

En los dos últimos ciclos estudiados, el valor negativo (-1) indicó que los Bañados del río

Dulce alcanzaron su mínima área (valle) un mes antes que el Bañado del río Xanaes, situación que podría ser atribuida a un periodo de elevadas temperaturas en la zona norte de la laguna. Este fenómeno no se estudia en el presente trabajo ya que no ha sido incluido entre los objetivos propuestos.

Comparación entre áreas de bañados y de la laguna

Una vez analizadas las áreas del bañado del río Segundo y las de los bañados del Río Dulce, se compararon los comportamientos del bañado con respecto a las áreas de la laguna Mar Chiquita.

Con respecto a la laguna Mar Chiquita, el bañado del río Segundo alcanzaría su pico a finales de Marzo, principios Abril, y como la laguna experimenta su creciente en junio, esto podría significar que la entrada de aguas que proporciona el río Segundo a la laguna no sería una variable "importante" en cuanto a la variación de niveles para la Laguna, sino que sería un aporte mínimo.

A diferencia del comportamiento de crecimiento progresivo del área de la laguna de Mar Chiquita en el periodo 1997-2003, tanto los bañados del río Dulce como el Bañado del río Xanaes no experimentan este crecimiento continuo, es decir, el valor de sus áreas aumenta y disminuye conforme pasan los años, pero no se aprecia un patrón de crecimiento continuo en el periodo actualizado, porque el receptor final no es el bañado, sino la laguna.

Este fenómeno también podría deberse a las características de los bañados:

- Aguas poco profundas
- Poca cantidad de agua disponible.

En la Figura 7 la escala de la derecha hace referencia a los bañados, y la de la izquierda a la laguna.

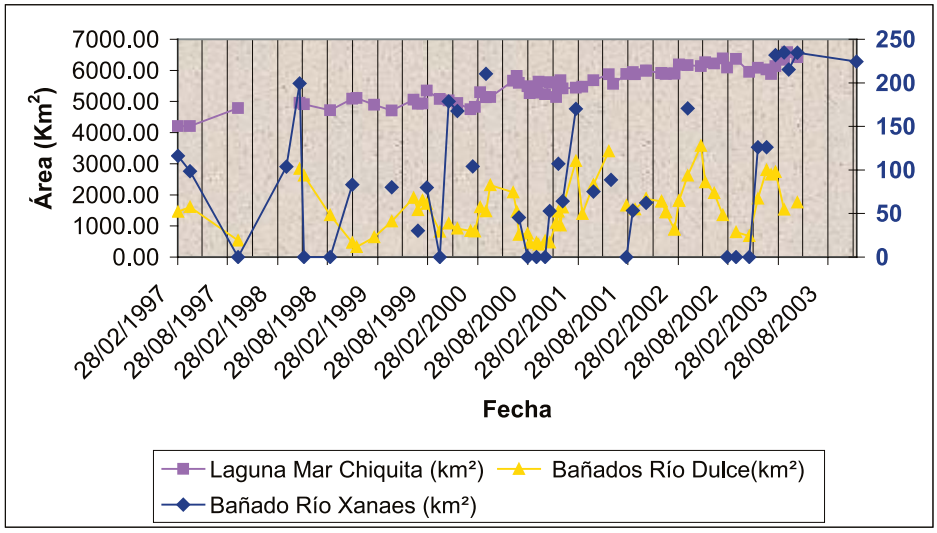


Figura 7. Áreas de los bañados y de la laguna en el periodo 1997-2003.

CONCLUSIONES

El bañado del río Segundo tiene un comportamiento parecido a los bañados del río Dulce en cuanto a variación del tamaño de sus áreas, ya que se mantienen dentro de un rango de valores y rara vez sobrepasan los valores medidos extremos.

El área que ocupa el bañado del río Segundo está en torno al 4% del área de los bañados del río Dulce.

El río Dulce alcanza sus picos de máxima crecida entre 0 y 5 meses de retardo con respecto del bañado del río Xanaes.

La principal diferencia entre los bañados y la laguna radica en que ésta ha incrementado su área durante el periodo 1997-2003, mientras que en los bañados se ha registrado un comportamiento homogéneo en el periodo analizado.

Los aportes de agua que proporciona el bañado del río Xanaes a la laguna son mínimos respecto de los aportados por el río Dulce.

El estudio mediante sistemas de Percepción Remota con imágenes de baja resolución de bañados y de zonas húmedas en general es de gran utilidad para el usuario, ya que las zonas con agua aparecen resaltadas en éstas.

Es una ventaja trabajar con imágenes satelitales ya que los bañados se caracterizan por zonas fangosas, lo cual dificultaría la medición del área *in situ*. Con técnicas convencionales hubiera sido necesario un equipo de por lo menos dos personas para ir todos los meses a medir el área del bañado, precisando como mínimo una jornada de trabajo.

También es importante destacar que la principal desventaja, cuando se trabaja con las imágenes satelitales ópticas, es que en días nublados se disminuye bastante la posibilidad de procesamiento de la imagen.

REFERENCIAS

Bucher, E. (2001): *Mar Chiquita, Córdoba, Argentina*, Centro de Zoología Aplicada (U.N.C.), Serie Educación Ambiental Nº4.

Comisión Nacional de Altos Estudios Espaciales (CONAE), Disponible en: http://www.conae.gov.ar

Hillman, G. (2003): *Análisis y Simulación hidrológica del sistema bañados del río Dulce*, Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos hídricos, Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales, Laboratorio de Hidráulica.

ILHUNC (2004): *Informe VI del Laboratorio de Hidráulica, Pronóstico Hidrológico de Inundaciones en la Región de Mar Chiquita*, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Martínez, N. (2004): *Aplicación de tecnologías complementarias al estudio del medio ambiente*, Proyecto Final de Carrera en Ingeniería Técnica Forestal, Escuela Politécnica Superior de Gandia.

Pagot, M. R. (2003): *Análisis y Simulación hidrológica del sistema bañados del río Dulce*, Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos hídricos, Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales, Laboratorio de Hidráulica.

Pagot, M. R. (2003): Modelado y Aplicación de Sensores Remotos a calidad del agua en el Embalse Los Molinos. Córdoba - Argentina. *Revista del Curiham*. Vol. 9, 2003 pp.73 - 93.

Fondo térmico de la Península Ibérica derivado de una serie multitemporal NOAA-AVHRR-LST

J. Yagüe Ballester

Universidad Complutense de Madrid. Dpto. Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Avenida Prof. Aranguren s/n. 28040 Madrid, Tel. +34 1 394 5962. Fax. +34 1 394 5963. jyague@ghis.ucm.es.

RESUMEN

La ecuación para el cálculo de temperaturas de la superficie terrestre entraña una operación compleja y multifactorial de elementos tales como la radiación global, albedo del substrato geológico, orientación, pendiente, cubierta nubosa y vegetal, etc. Los satélites meteorológicos facilitan esta tarea sustancialmente. A partir de la construcción de una serie multitemporal (47 meses, 1996-2001) de temperaturas de superficie de la Tierra (LST), derivadas de imágenes NOAA-AVHRR, se presenta la metodología seguida para obtener un fondo térmico de la península Ibérica; este fondo térmico ha servido de herramienta para constatar anomalías térmicas puntuales y sostenidas tales como: picos de recalentamiento estacional, flujos termales corticales asociados a episodios sísmicos, reducción de la actividad biológica de la cubierta vegetal por aumento de la temperatura, pérdidas fisurales de humedad y sedimentos o desecación del suelo por licuefacción. Los resultados se han obtenido en el contexto del proyecto de investigación SISMOSAT, financiado por la UE (ENV4 CT98 0760). La metodología del proceso de datos se centró en (i) la adquisición directa y selección de las imágenes más adecuadas para las áreas y fechas de trabajo, (ii) la elección y validación de los algoritmos para extraer los parámetros geofísicos térmicos en tierra y mar con la mayor fiabilidad y homogeneidad posible y (iii) la definición de un procedimiento automatizado a partir de herramientas de software comercial, para producir los mapas térmicos calibrados sobre la Península. Además de los datos de satélite, para la elaboración del fondo térmico basal se han recogido y procesado series de otros parámetros físicos: registros climáticos de precipitación y temperatura, mapas geológicos, cartografía de usos del suelo, índices de vegetación, etc.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

***Palabras Clave**: Series multitemporales LST, fondo térmico, temperatura superficie, anomalías térmicas.*

ABSTRACT

The equation to derive the Earth's surface temperature entails a complex analysis of elements such as the net global radiation, the albedo of the geologic strata, aspect, slope, cloud and vegetation cover, etc. Meteorological satellites have eased this task substantially. This study presents the methodology followed to obtain a thermal background image of the Iberian peninsula derived from a 47 month NOAA-AVHRR LST series. The thermal background has served as a checking tool to ascertain crustal thermal fluxes linked to seismic episodes, fissural ground water and sediment loses and soil compacting due to liquefaction. Project results have been obtained in the context of the EU founded SISMOSAT research project (ENV4 CT98 0760). The data processing method was as follows (i) satellite image acquisition, (ii) selection and validation of algorithms to derive land thermal geophysical parameters and (iii) the production of calibrated thermal maps over the peninsula, following automatic protocols of commercial software. Beside satellite data, other physical parameters were used to obtain the thermal background: climatic data, geological maps, land cover cartography, vegetation indices, etc.

***Key Words**: LST multitemporal series, thermal background, surface temperatures, thermal anomalies.*

INTRODUCCIÓN

Las temperaturas de la superficie terrestre son un factor de control importante en muchos de los procesos físicos, químicos y biológicos que se desarrollan sobre su corteza. En mayor o menor medida, las "temperaturas de la piel del suelo" son un elemento a considerar en los procesos de formación, erosión o degradación de las cubiertas. El registro y medida de las temperaturas de superficie de la Tierra (LST, *Land Surface Temperatures*) requiere el análisis de una ecuación compleja, en la que se suman factores tales como el balance de radiación global, los usos del terreno, la orografía del mismo, la orientación o la persistencia de la cubierta de nubes. En este contexto, los sensores térmicos transportados por los satélites de observación de la Tierra permiten un seguimiento macro-espacial de las temperaturas de superficie (*Prata*, 1991; 1995. *Vogt*, 1996). Atendiendo a las leyes de Wien y Plank, la temperatura emitida por la superficie de la Tierra (300ºK) se registra de manera óptima en el rango espectral del infrarrojo térmico, entre 8 y 14 μm. En otras palabras, la radiancia térmica registrada por los sensores corresponde a la emisividad radiada por la tierra y no a la energía solar reflejada; en este trabajo nos centramos en los datos térmicos registrados por los canales 4 (10.3-11.3 μm) y 5 (11.5-12.5 μm) de NOAA-AVHRR.

Los principios físicos que rigen la detección remota de LST están ampliamente contrastados en la literatura científica; de la misma manera, las aplicaciones cubren un amplio abanico de temas, tales como la sismología y la geofísica de ajustes tectónicos locales, que ayudan a determinar las leyes que rigen ciertos episodios sísmicos (*Tronin*, 1996; 1999), la relación entre las temperaturas de superficie y la densidad de la cubierta vegetal (*Givri*, 1995) o la presencia de suelos desnudos (*Labed et al.*, 1991), la desertificación, etc. El estudio de *Qin y Karniely* (1999) ofrece una revisión coherente de (i) las bases teóricas de la teledetección de las LST y (ii) de las metodologías para la obtención de dichas temperaturas de superficie a partir de los canales 4 y 5 de AVHRR, de acuerdo con varios algoritmos "*split window*". El algoritmo más utilizado es el $T_s=T_4+A(T_4-T_5)+B$, donde Ts es la temperatura de superficie, T_4 y T_5 son las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 del AVHRR, A y B son coeficientes relacionados con los efectos atmosféricos, la oblicuidad del ángulo de visión y la emisividad del suelo. Antes de cualquier estimación de las LST, deben corregirse las distorsiones de los datos del infrarrojo térmico: (i) la absorción atmosférica por el vapor de agua en el rango espectral de 10.5-12.3 μm y (ii) el coeficiente de emisividad de las cubiertas del terreno, que varía dependiendo de la naturaleza de la cubierta emisora y de la longitud de onda (*Caselles et al.*, 1997).

Conviene ahora introducir el concepto de teledetección multitemporal en el contexto de este estudio. El registro multitemporal de observaciones remotas es más que deseable para acometer el seguimiento de ciertas dinámicas terrestres, así como las leyes que rigen los ritmos ecológicos y biológicos (*Bruzzone et al.*, 2001). La cobertura espacial y temporal de los satélites NOAA les hace ser particularmente adecuados para aplicaciones relacionadas con las LST, ya que normalmente se requieren observaciones repetidas y secuenciales. Los sensores espectro-térmicos transportados por NOAA registran el campo térmico de la Tierra con una resolución de 0.12ºK (0.5ºC). La serie de satélites NOAA proporciona cuatro registros diarios de cada punto de la superficie, aproximadamente a las 3am, 10am, 3pm y 10pm. Las características de NOAA-AVHRR se resumen a continuación en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Síntesis de especificaciones técnicas de NOAA-AVHRR

Resolución espectral	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5
	0.58-0.68 μm	0.725-1.1 μm	3.55-3.93 μm	10.3-11.3. μm	11.5-12.5 μm
Anchura barrido (Swath)		2700 Km			
Resolución espacial		1100 m			
Resolución Térmica		0.12 ºK (0.5ºC)			

En este estudio presentamos una serie de 47 meses de observaciones LST (1996-2000), a partir de la cual se ha obtenido una imagen a modo de fondo térmico de la Península Ibérica; además se obtuvieron fondos térmicos mensuales. El desarrollo del estudio se ha realizado en el marco del proyecto Comunitario de investigación ENV4 CT98 0760, SISMOSAT, cuyo objetivo genérico era la determinación de las temperaturas de la superficie continental y marina

en la cuenca mediterránea mediante observación remota, combinada con datos de la cartografía de usos y cubiertas del terreno, geología y topografía.

DESARROLLO DEL TRABAJO. MATERIAL Y MÉTODOS

La serie multitemporal LST NOAA-AVHRR de 47 meses (LST47) constituye la fuente de datos más rica, versátil y principal en el estudio. Otras fuentes geo-digitales utilizadas para analizar la serie LST47 hasta derivar el fondo térmico han sido: base de usos y cubiertas del terreno (*Corine Land Cover*), topografía (MDT, 50m). Las características de la serie LST47 son:

- Periodo de observación: enero 1996-noviembre 1999; 47 meses.
- Área de observación: cuenca mediterránea con sus tres penínsulas y Turquía; en este estudio se presentan los resultados de la Península Ibérica.
- Total de imágenes procesadas: 282 NOAA-AVHRR 14 nocturnas, 6 imágenes por mes. Criterio de selección de imágenes: libres de nubes e interferencias con ángulo orbital alto.
- Estructura de la serie final: imagen de 47 canales construida mediante *stack layers*.
- Proyección: *Alberts conical equal area*. Esferoide y datum: WSG 72. Píxel: 1100m.

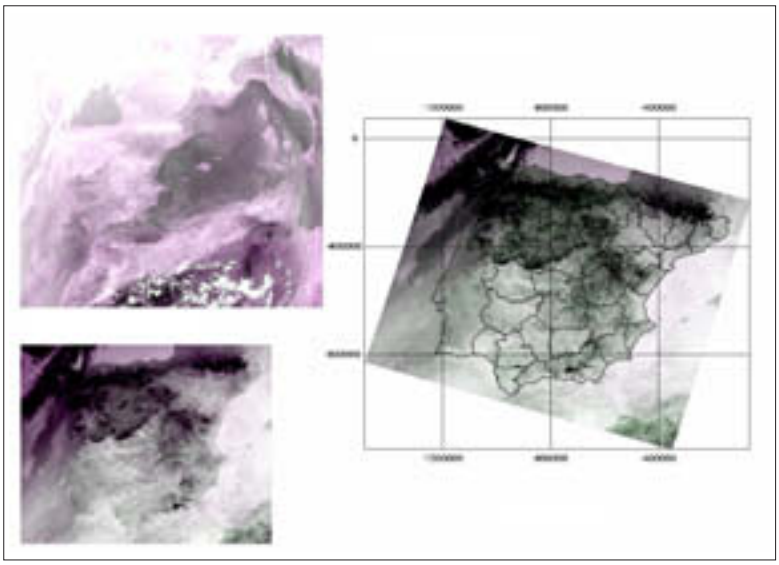


Figura 1. Secuencia del proceso de captura y georreferenciación de imágenes de la Península para la serie LST47. (i) Captura de escena completa de NOAA 14. Canales 4, 5, 4 RGB. 6 de abril 1997. 2:23h. (ii) Valores de radiancia de los canales 4 y 5. (iii) Imagen georreferenciada a *Alberts Conical Equal Area*.

El método seguido para la construcción de la serie LST47 queda secuenciado en las figuras 1 y 2 (a, b):

1. Captura de las imágenes NOAA-AVHRR 14 nocturnas.

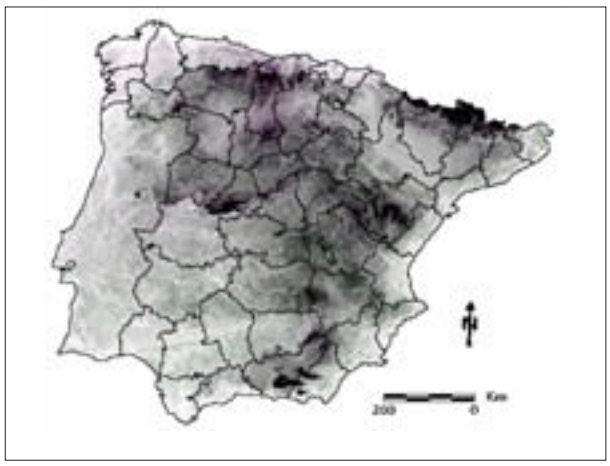


Figura 2 (a). Temperaturas de brillo de los canales 4 y 5. NOAA-AVHRR 14. 25 enero 1997.03:56h.

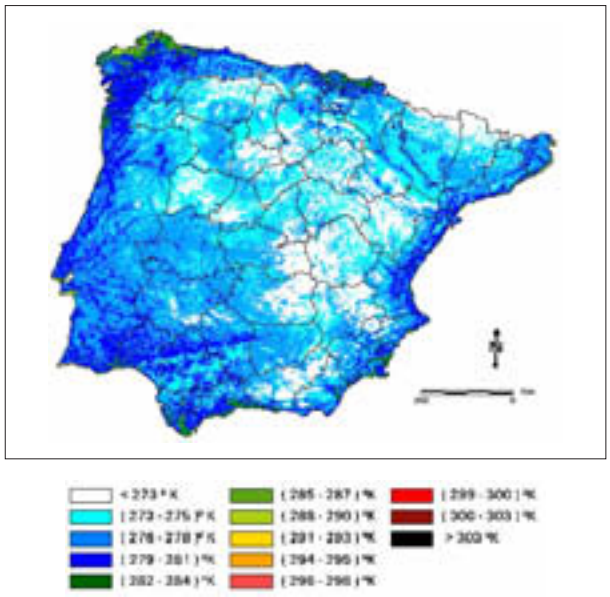


Figura 2(b). Temperaturas de brillo de los canales 4 y 5. NOAA-AVHRR 14. 25 enero 1997.03:56h.

2. Calibración radiométrica y georreferenciación de cada imagen; se corrigieron las siguientes interferencias:
   - Distorsiones radiométricas inherentes a las condiciones de la toma de datos: la corrección atmosférica se realizó aplicando el algoritmo espectral medio de la imagen; se filtraron las sombras debidas a la cubierta de nubes mediante máscaras así como las

distorsiones debidas a la topografía mediante la construcción de mapas de pendiente y orientación a partir del MDT.

- Las distorsiones radiométricas debidas al componente de emisividad de la radiación se filtraron mediante la técnica *"split window"* y la ayuda de información referente a la vegetación y cubiertas del terreno (series del NDVI y *Corine Land Cover*).
- Para corregir las distorsiones geométricas se aplicó el modelo de corrección del sensor SGP4 y los registros de tiempo asociados a cada línea de la imagen. La proyección final de las imágenes fue la *Alberts Conical Equal Area*; esta proyección pareció ser la más adecuada por tratarse de una amplia zona geográfica (la totalidad de la Cuenca Mediterránea).El ajuste final del píxel fue de 1100 m.

3. Los valores digitales de los canales 4 y 5 se convirtieron a valores de emisividad (LST) tal y como proponen *Caselles et al.* (1997). A partir de estos datos se construyeron compuestos mensuales del máximo valor de las LST. El criterio adoptado para la composición de estos máximos mensuales se tomó a partir de un análisis estadístico detallado de las imágenes LST diarias: la topografía afecta la distribución de las LST de una forma natural (temperaturas más bajas a mayor altura), afectando de igual manera las estadísticas de las imágenes (valores máximos, medios, mínimos y desviaciones estándar). Las imágenes correspondientes a las temperaturas medias, mínimas y a la desviación estándar estaban especialmente distorsionadas por las nubes, mientras que las imágenes de las temperaturas máximas sólo se encontraban distorsionadas por las condiciones de días especialmente anómalos. Para concluir, los compuestos mensuales se estructuraron en una sola imagen multicanal y multitemporal, mediante la técnica *stack layer*.
4. El análisis estadístico subsiguiente permitió obtener un nivel secundario de imágenes derivadas: imágenes del máximo, mínimo, media, amplitud y varianza de las series térmicas.
5. Se procesaron los componentes principales para deshacerse de la información redundante y para extraer nuevos canales de imágenes significativas, distintos a los ya tratados estadísticamente; además el ACP redujo la dimensionalidad de los datos, aglutinando la varianza en los n-componentes solicitados.
6. Se clasificaron los n-primeros componentes obtenidos, aplicando técnicas de *clustering* no supervisado (Isodata) y supervisado, basándonos en cartografías geológicas.

RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

Tras la construcción y análisis de la serie LST 47, presentamos tres conclusiones principales:

La serie multitemporal permite conocer las variaciones espaciales y temporales de los máximos del LST para un lugar dado, bien a través de perfiles espaciales o bien a través de perfiles espectrales perpendiculares a la estructura temporal de la serie (ver imágenes 3 y 4).

Los máximos mensuales de los compuestos del LST se procesaron y clasificaron independientemente para obtener una cartografía mensual de las regiones térmicas (imagen 5).

Se presenta por último una imagen que muestra las regiones térmicas (16) según los datos

procesados en el estudio. El criterio de clasificación en 16 categorías atiende a diferencias térmicas de1ºK.

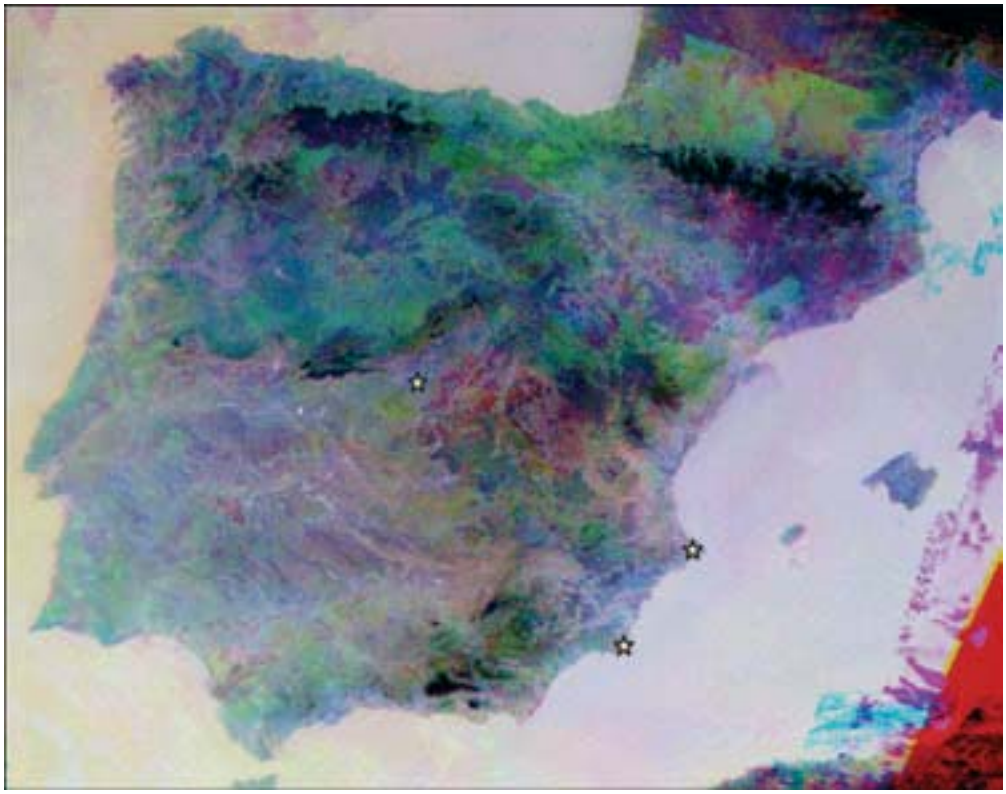


Figura 3. Serie Sismosat LST, RGB 13, 24, 33 (Enero 97, Diciembre 97, Septiembre 98).

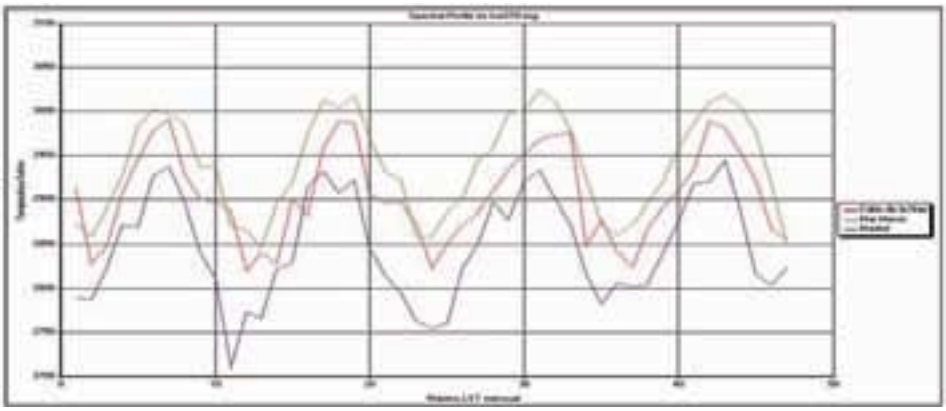


Figura 4. Perfil espectral temporal de 3 localidades señaladas: Cabo de la Nao, Mar Menor y Madrid.

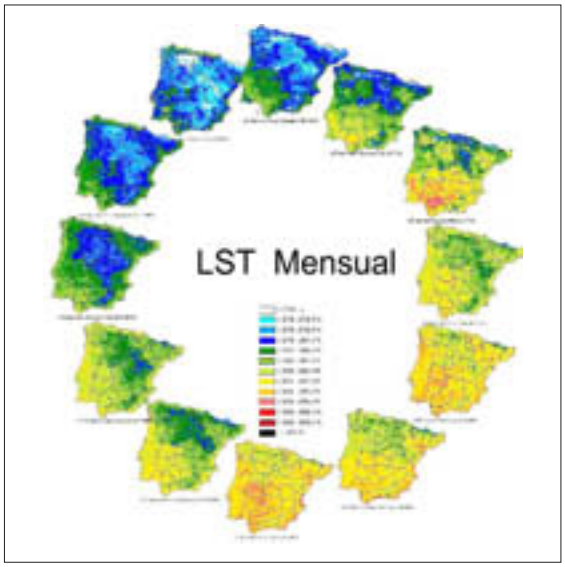


Figura 5. Máximos LST mensuales

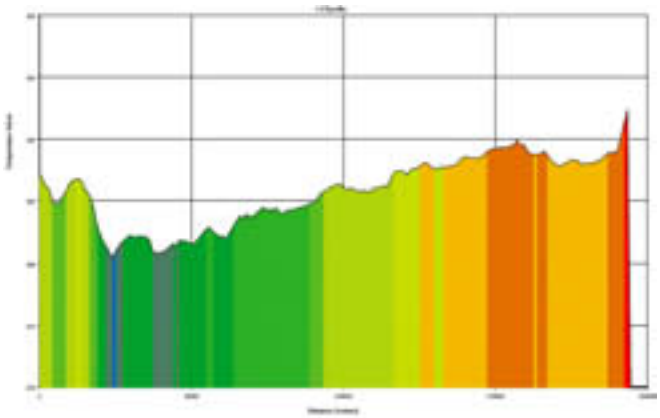


Figura 6. Perfil espacial (A-B, Figura 7) de las temperaturas del fondo térmico.

Los aspectos positivos de la serie termal multitemporal y su proceso de análisis son dobles: el registro multitemporal permite (i) un seguimiento mensual y anual de la evolución térmica sobre localidades determinadas y (ii) establecer un fondo térmico estandarizado como base de comparación de las anomalías térmicas que puedan producirse bien por situaciones climáticas extremas y adversas o bien por emisión de flujos térmicos previos a ajustes corticales. La clasificación de regiones térmicas (figura 7) proporciona las signaturas térmicas estandarizadas para cualquier región o punto de análisis, aunque encubre el dinamismo térmico inter-estacional, por lo que esta cartografía resulta bastante estática. Al fondo térmico resulta ser un documento de contraste de las LST diarias.

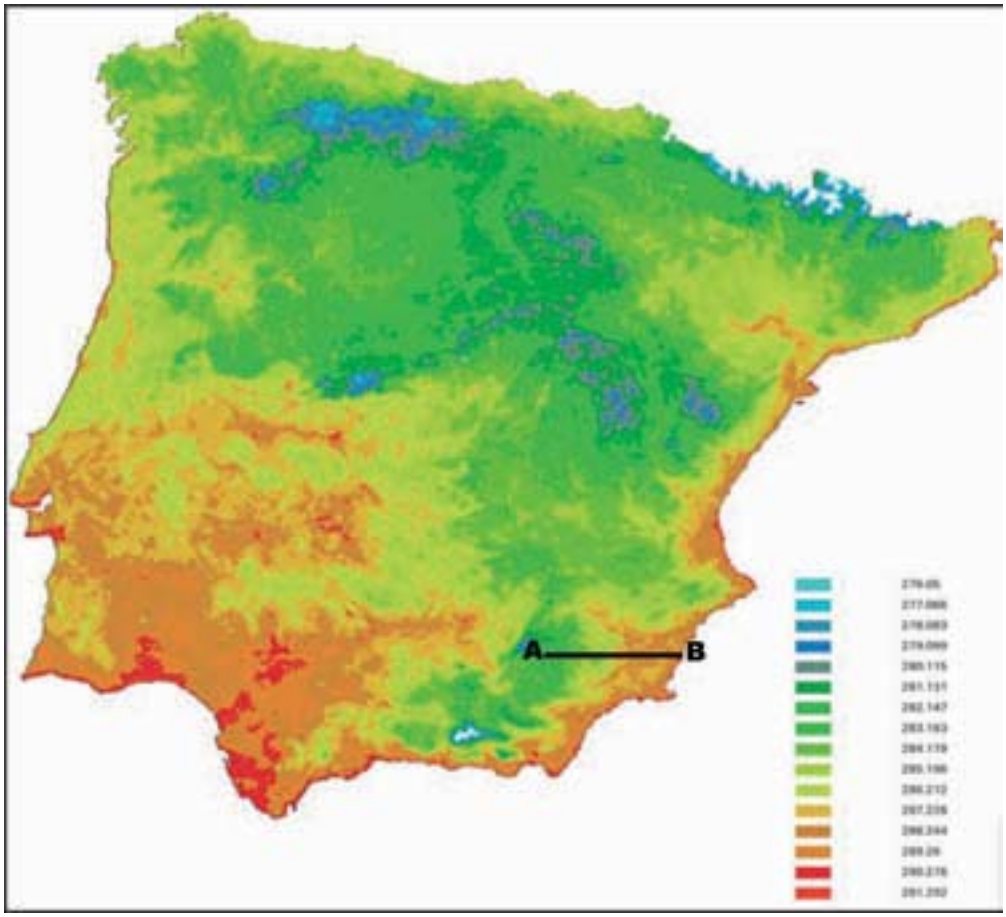


Figura 7. Perfil espacial (A-B, Figura 7) de las temperaturas del fondo térmico.

REFERENCIAS

Bruzzone, L. Smits, P. (2001): Analysis of multitemporal remote sensing images. *Proceedings of Multitemp 2001*. University of Trento, Italy. 13-14 Sept. World Scientific Pub.Co.

Caselles, V., Coll, C., Valor, E. (1997): Land surface emissivity and temperature determination in the whole HAPEX-Sahel area from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 1009-1027.

Givri, J. R., (1995): Assessing the relation between emissivity and vegetation with AVHRR. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2971-2988.

Labed, J., Stoll, M. P. (1991): Angular variation of land surface spectral emissivity in the thermal infrared: laboratory investigations on bare soils. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 2299-2310.

Prata, A. J., Platt, C. M. R., (1991): "Land surface temperature measurements from the AVHRR". *Proceedings of the 5th AVHRR Data Users' Meeting*. Tromso (Norway), 24-28 June 1991 (Darmstadt: EUMETSAT), pp. 433-438.

Prata, A. J., Caselles, V., Coll, C., Ottlé, C., Sobrino, J., (1995): Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews*, 12, 175-224.

Qin, Z., Karneli, A. (1999): Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, no. 12, 2367-2393

Tronin, A. A., (1996): Satellite thermal survey: a new tool for the studies of seismo active regions. *International Journal of Remote Sensing*, vol.17, No.8., pp. 1439-1455.

Tronin, A. A., (1999): "Satellite thermal survey application for earthquake prediction". In: *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes*. Edited by M. Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, pp717-746.

Vogt, J. V., (1996): Land surface temperature retrieval from NOAA-AVHRR data. In: *Advances in the Use of NOAA-AVHRR Data for Land Applications*, edited by G. D'Souza et al. (Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers), pp.125-151.

Modelo simplificado para la estimación de la evapotranspiración a escala regional a partir de temperatura de superficie

R. Rivas[1,2], V. Caselles Miralles[2], E. Valor Micó[2] y C. Coll Company[2]

(1) Instituto de Hidrología de Llanuras, Universidad Nacional del Centro y Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires Buenos Aires, CC 44, 7300, Azul, Buenos Aires, Argentina.
(2) Departamento de Termodinámica, Facultat de Física, Universitat de València, C/Dr. Moliner 50, 46100, Burjassot, Valencia.

RESUMEN

En este trabajo, se presenta la ecuación de Penman-Monteith adaptada para su uso en teledetección. La finalidad principal ha sido conocer la variabilidad espacial de la evapotranspiración de referencia (ET_{o_Ts}) a partir de datos meteorológicos e información de temperatura de superficie (T_s) obtenida a partir de imágenes de satélite. En primer lugar se expone la deducción de la ecuación operativa para estimar la ET_{o_Ts} a partir de T_s y dos parámetros locales que dependen de las condiciones meteorológicas. En segundo lugar, se ha validado la ecuación operativa en una zona de la llanura Argentina. Se ha comprobado que el modelo no presentaba tendencia y que el error de estimación es de ±0,6 mm d^{-1}. Por último, se ha aplicado el modelo para conocer la variación espacio temporal de la ET_{o_Ts} para dos momentos hidrológicos extremos (un período seco y otro húmedo).

***Palabras Clave**: evapotranspiración regional, ecuación de Penman-Monteith, teledetección, AVHRR.*

ABSTRACT

An adaptation of Penman-Monteith equation for its use in remote sensing is presented in this paper. The main purpose has been to find out the spatial variability of the reference evapotranspiración (ET_{o_Ts}) from weather data and remote sensed surface temperature (T_s) information. Firstly, the operational equation to estimate ET_o from T_s and two local

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

parameters is shown. The local parameters depend on local meteorological conditions. Secondly, the operational equation in a flat zone of Argentina has been validated. It has been verified that the model does not present any tendency and that the estimation error is of ±0.6 mm d^{-1}. Finally, the model has been applied to find out the spatial and temporal variation of the ET_{o_Ts} for two extreme hydrological moments (a dry period and a wet one).

***Key Words**: regional evapotranspiration, Penman-Monteith equation, remote sensing, AVHRR.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el conocimiento de la evapotranspiración (ET) con un nivel suficiente de precisión es fundamental, entre muchos otros, en estudios hidrológicos, climáticos, agronómicos y ecológicos.

A escala global el 64 % del agua que precipita es evapotranspirada; y cerca de un 97 % de ésta lo es desde la superficie, mientras que el 3 % restante lo es desde cuerpos de agua. Si nos centramos en zonas específicas del globo podemos decir que en muchos casos el agua que sale del sistema hidrológico puede llegar a un 90 % del agua precipitada, con lo cual hace más evidente que una estimación adecuada de la ET es fundamental.

La estimación de la ET a escala local (estaciones meteorológicas) en los últimos años ha mejorado de manera significativa y se cuenta con una ecuación de referencia, la ecuación de Penman-Monteith (*Jensen, et al.*, 1990; *Allen, et al.*, 1998).

Para la mayor parte de los estudios de carácter regional es importante estimar la variación espacial de la ET. Por lo tanto, en la actualidad los esfuerzos se centran en la extrapolación de las medidas puntuales a escala regional.

La teledetección representa una atractiva herramienta para detectar los cambios o anomalías regionales o aún más a nivel de parcelas (*Boegh et al.*, 2002). Las medidas de teledetección permiten extender los modelos de cálculo de la ET a zonas amplias, donde no se dispone siquiera de datos meteorológicos.

La mayor parte de los modelos que usan información de teledetección como dato de entrada permiten estimar la ET potencial o real. Todos los estudios en este dominio se sustentan en el principio de conservación de la energía. Éstos se basan en la distribución de la energía neta (R_N) en la superficie por medio del flujo de calor en el suelo (G), el flujo de calor sensible (H) y el flujo de calor latente (λE). Generalmente los estudios suponen que R_N y G son fácilmente calculables o conocidos. H y λE son cantidades muy difíciles de estimar. Normalmente se estima λE como residuo, mientras que H se obtiene a partir de condiciones específicas del aire y el intercambio de calor entre la superficie y un punto de referencia situado encima de ésta, además de las resistencias aerodinámicas y fisiológicas de la superficie. Un gran número de investigadores han basado sus estudios en la ecuación de balance de energía usando datos

de teledetección. Éstos sustituyen la temperatura radiométrica de superficie, obtenida por teledetección, por la temperatura aerodinámica (ver *Friedl*, 2002). En los últimos años se ha intentado mejorar la estimación de H, separando el aporte desde el suelo y la vegetación, y se han logrado avances significativos en el estudio de la estimación de λE. Los avances son importantes, pero, la falta de instrumentación específica restringe considerablemente la utilización de modelos sofisticados.

Sin embargo, existen métodos que proponen la determinación de la ET, combinando simplemente información meteorológica convencional con los datos de satélite habituales (*Reginato et al.*, 1985; *Caselles y Delegido*, 1987, *Brasa et al.*, 1998).

Siguiendo la filosofía de *Caselles y Delegido* (1987), se ha adaptado para la teledetección la ecuación de Penman-Monteith (PM).

MODELO PROPUESTO

Partiendo de la ecuación de PM (*Monteith y Unsworth*, 1990):

$$\lambda ETo = \frac{\Delta \cdot (R_N - G) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{(e_a - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (1)$$

donde λET_o es el flujo de calor latente (MJ m^{-2} $día^{-1}$), R_N es la radiación neta (MJ m^{-2} $día^{-1}$), G es el flujo de calor del suelo (MJ m^{-2} $día^{-1}$), ρ es la densidad del aire (kg m^{-3}), c_p es el calor específico del aire húmedo a presión constante (MJ kg^{-1} $ºC^{-1}$), e_a es la presión de vapor del aire (kPa), e_d es la presión de saturación de vapor (kPa), r_c es la resistencia del cultivo (día m^{-1}), r_a es la resistencia aerodinámica (día m^{-1}), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa $ºC^{-1}$) y γ es la constante psicrométrica (kPa $ºC^{-1}$).

Siguiendo a *Smith et al.* (1992), la ecuación (1) se puede descomponer en dos términos, uno radiativo (ET_{rad}) y uno aerodinámico (ET_{aero}):

$$ET_o = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}\right) \cdot \frac{(R_N - G)}{\lambda} + \left(\frac{1}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}\right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot C_p}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{e_a - e_d}{r_a}\right) = ET_{rad} + ET_{aero} \quad (2)$$

El término radiativo depende de la radiación entrante y saliente de la superficie, además de los efectos que se producen debido a las condiciones meteorológicas. Por lo tanto, R_N se puede escribir como:

$$R_N = R_{NS\downarrow} - R_{NL\uparrow} \quad (3)$$

siendo $R_{NS\downarrow}$ la radiación entrante y $R_{NL\uparrow}$ la radiación saliente. La $R_{NS\downarrow}$ viene dada por:

$$R_{NS\downarrow} = (1-\alpha)\cdot R_S \tag{4}$$

y la $R_{NL\uparrow}$ se obtiene a partir de:

$$R_{NL\uparrow} = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot \left(T_s{}^4 - \varepsilon_a \cdot T_a{}^4\right) \tag{5}$$

donde α es el albedo (adimensional), R_s es la radiación solar (MJ m^{-2} $día^{-1}$), ε_s es la emisividad de la superficie (adimensional), σ es la constante de Stefan-Boltzmann (4,9 10^{-9} MJ m^{-2} K^{-4} $día^{-1}$), T_s es la temperatura de superficie (K), ε_a es la emisividad de la atmósfera (adimensional) y T_a es la temperatura del aire (K).

Como el interés de nuestro trabajo es obtener una relación sencilla entre T_s y ET_o, si asignamos un valor a T_a se logra simplificar la ecuación (5). Además, si tenemos en cuenta que en el intervalo de temperatura que emite la superficie de la tierra, $T_s{}^4$ se comporta linealmente; se puede escribir:

$$T_s{}^4 \approx c \cdot T_s + d \tag{6}$$

donde c es 1,140 ±0,011·10^8 K^3, d es –2,600 ±0,032·10^{10} K^4, el coeficiente de determinación es de 0,99 para un intervalo de temperatura de superficie de 280 a 338 K y el error de estimación es de ±1,1·10^8 K.

Entonces, introduciendo en la ecuación (3) las ecuaciones (4), (5) y (6) se obtiene:

$$R_N = (1-\alpha)\cdot R_s - c\cdot\varepsilon_s\cdot\sigma\cdot T_s - d\cdot\varepsilon_s\cdot\sigma + \varepsilon_s\cdot\varepsilon_a\cdot\sigma\cdot T_a{}^4 \tag{7}$$

Teniendo en cuenta la ecuación (7), el término radiativo se puede expresar de la siguiente forma:

$$ET_{rad} = \left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma\cdot\left(1+\frac{r_c}{r_a}\right)}\right)\cdot\left(\frac{(1-\alpha)\cdot R_s - c\cdot\varepsilon_s\cdot\sigma\cdot T_s - d\cdot\varepsilon_s\cdot\sigma + \varepsilon_s\cdot\varepsilon_a\cdot\sigma\cdot T_a{}^4 - G}{\lambda}\right) \tag{8}$$

De la ecuación (8) es posible, separar los términos que contienen la temperatura de superficie (ET_{rad_Ts}) del resto (ET_{rad_Rs}). Entones, ET_{rad_Ts} se puede expresar de la siguiente forma:

$$ET_{rad_Ts} = \left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma\cdot\left(1+\frac{r_c}{r_a}\right)}\right)\cdot\left(\frac{-c\cdot\varepsilon_s\cdot\sigma\cdot T_s}{\lambda}\right) \tag{9}$$

y ET_{rad_Rs} como:

$$ET_{rad_Rs} = \left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma\cdot\left(1+\frac{r_c}{r_a}\right)}\right)\cdot\left(\frac{(1-\alpha)\cdot R_s + \varepsilon_s\cdot\sigma\cdot\left(\varepsilon_a\cdot T_a{}^4 - d\right) - G}{\lambda}\right) \tag{10}$$

Como el interés es estimar la demanda de agua desde la atmósfera para el cultivo de referencia a partir de las condiciones medias de la atmósfera en función de T_s, proponemos agrupar y organizar $ET_{rad_Rs} + ET_{aero}$ de la siguiente forma:

$$ET_{rad_Rs} + ET_{aero} = \left(\frac{1}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \left[\Delta \cdot \left((1-\alpha) \cdot R_s + \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot \left(\varepsilon_a \cdot T_a{}^4 - d \right) - G \right) + \rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{e_a - e_d}{r_a} \right) \right] \quad (11)$$

Teniendo en cuenta que el objetivo es la obtención de una relación sencilla entre T_s y ET_o hemos analizado por un lado el comportamiento del término ET_{rad_Ts} (ecuación (9)) y, por otro lado, los efectos de los términos restantes (ecuación 11) ($ET_{rad_Rs} + ET_{aero}$).

Para analizar el comportamiento a lo largo del año de las ecuaciones (9) y (11) se han utilizado los valores indicados en el Cuadro 1 y los valores medios mensuales climáticos registrados en una estación meteorológica (Cuadro 2). El resultado del comportamiento de ET_{rad_Ts} y $ET_{rad_Rs} + ET_{aero}$ se pueden ver en la Figura 1.

Cuadro 1. Valores asumidos en las ecuaciones 9 y 11.

Variable	**Valor - rango**
Albedo del cultivo de referencia (*Allen et al.,* 1989)	0,23
Altura de medida	2 m
Altura del cultivo de referencia	0,12 m
Resistencia del cultivo (*Allen et al.,* 1989)	70 m s^{-1}
Emisividad del cultivo (*Valor y Caselles,* 1996)	0,985 (10,5-12,5 µm)
Emisividad del aire para atmósfera estándar (*Brutsaert,* 1984)	0,76 (15 ºC)
Temperatura de la superficie	26 ºC
Calor específico del aire (kJ Kg^{-1} $ºC^{-1}$)	1,013
Densidad del aire (kg m^{-3})	1,2
Resistencia aerodinámica de la superficie vegetal para una velocidad de viento (U_2 in m s^{-1} medida a 2 m) (*Allen et al.,* 1989)	$r_a = 208.U_2^{-1}$

Cuadro 2. Valores medios climáticos medidos en la estación Azul utilizados en el análisis.

Localización y nombre de la estación: Azul (Argentina), rango 1950-2000												
Coordenadas: 36,7 S - 59,1 W Altitud: 132 m												
Variable / Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_a (ºC)	22,1	20,7	18,6	13,4	10,5	7,6	7,8	8,4	10,5	13,5	17,0	19,3
HR %	66,0	75,0	78,0	88,0	91,0	95,0	88,0	88,0	86,0	87,0	78,0	74,0
R_s (MJ m^{-2} d^{-1})	25,4	22,7	17,3	12,9	8,4	6,5	7,6	10,5	14,5	20,1	23,3	24,5
U_2 (m s^{-1})	2,6	2,6	2,5	2,0	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,6	2,6	3,0

La Figura 1 muestra claramente que ET_{rad_Ts} presenta una mayor variación que ET_{rad_Rs} + ET_{aero} a lo largo del año. Para el valor de T_s (26 ºC) adoptado, las variaciones de ET_{rad_Ts} dependen de las condiciones meteorológicas medias de los primeros metros de la atmósfera en el área de la estación (cambios en la temperatura del aire, humedad relativa del aire y velocidad del viento). Se puede ver claramente que el comportamiento de ET_{rad_Ts} en los diferentes meses del año no varía mucho respecto al valor medio anual.

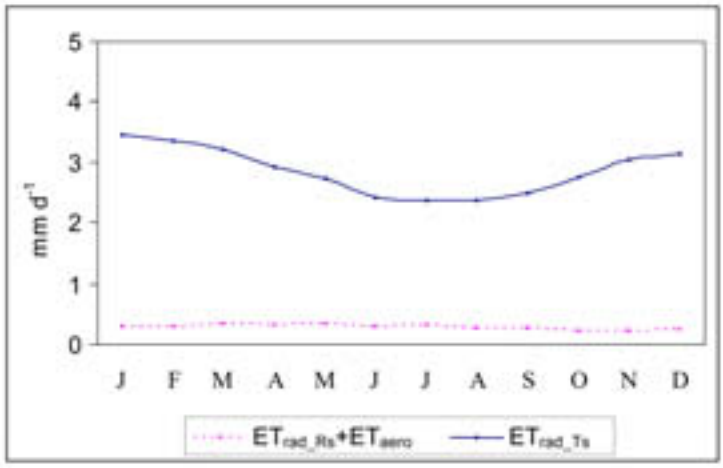


Figura 1. Comportamiento de los términos de la ecuaciones 9 y 11 (ET_{rad_Ts} y ET_{rad_Rs}+ET_{aero}) utilizando los valores asumidos en el Cuadro 1 y los datos meteorológicos del Cuadro 2.

Si se tiene en cuenta que T_s varía en el tiempo y que T_s contiene las variaciones de los primeros metros de la atmósfera (*Jackson et al.,* 1977; *Price* 1982, 1989; Kustas et al., 1989) es posible asumir que

$$\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma\cdot\left(1+\frac{r_c}{r_a}\right)}\right)\cdot\left(\frac{-c\cdot\varepsilon_s\cdot\sigma}{\lambda}\right) \qquad (11)$$

tiene mínimas variaciones, y que, el uso de un valor único para el año sería apropiado.

Como puede observarse en la Figura 1 ET_{rad_Rs}+ET_{aero} muestra un comportamiento más estable durante el año y las variaciones son menos significativas. El comportamiento de ET_{rad_Rs}+ET_{aero} representa los efectos medios de intercambio de flujo en los primeros metros de la atmósfera sobre una superficie vegetal de referencia, que recibe una cierta cantidad de energía.

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, es posible estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_{o_Ts}) a partir de la temperatura de superficie obtenida desde satélite por medio de la siguiente ecuación (*Rivas y Caselles*, 2004):

$$ET_{o_Ts} = a \cdot T_s + b \tag{12}$$

donde **a** se obtiene como:

$$a = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \right) \cdot \left(\frac{-c \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma}{\lambda} \right) \tag{13}$$

y **b** es:

$$b = \left(\frac{1}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \left[(\Delta) \cdot \left((1 - \alpha) \cdot R_s + \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot \left(\varepsilon_a \cdot T_a^{\,4} - d \right) - G \right) + \rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{e_a - e_d}{r_a} \right) \right] \tag{14}$$

El parámetro **a** representa la emisión media de la superficie de referencia para unas condiciones atmosféricas dadas, y el parámetro **b** representa los efectos aerodinámicos sobre la superficie hipotética que recibe cierta cantidad de radiación solar. Estos parámetros son propios del área de aplicación y pueden ser calculados usando datos meteorológicos medidos en estaciones convencionales.

RESULTADOS

El área en la que se ha aplicado el modelo propuesto corresponde a la cuenca del arroyo del Azul, ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 2). Cubre 6.262 km^2 de la denominada pampa húmeda. Es predominantemente llana con un pendiente media menor al 1 %, pudiendo llegar en la parte norte a un 0,2 %, y con altitudes en torno a los 100 m (*Varni et al.*, 1999; *Usunoff, et al.*, 1999).

La precipitación media anual en la zona estudiada es de 1005 mm (estación Azul para el período 1988-2000). En general, se presentan excesos pluviométricos en otoño (marzo-abril) y déficit en los meses invernales, aunque existe déficit puntual en los meses de verano.

La temperatura media anual es de 14,3 ºC, la velocidad media anual del viento es de 2,5 m s^{-1}, la humedad relativa anual media es del 72 % y la radiación global media anual es de 16,7 MJ m^{-2} d^{-1}.

El clima de la región, de acuerdo a la clasificación climática de Thornthwaite, es subhúmedo-húmedo, mesotermal, con poca a nula deficiencia de agua. El valor medio anual de la evapotranspiración es de 1090 mm, calculado con el método de PM FAO (*Allen et al*., 1998).

Para la estimación de los parámetros **a** y **b** en la cuenca del arroyo del Azul se han utilizado 5 estaciones meteorológicas (Figura 2). El período de análisis va desde enero de 1992 a diciembre de 1996 y los datos medios mensuales utilizados para la estimación de los parámetros son los que se observan en los Cuadros 3, 4, 5, 6 y 7 siguientes.

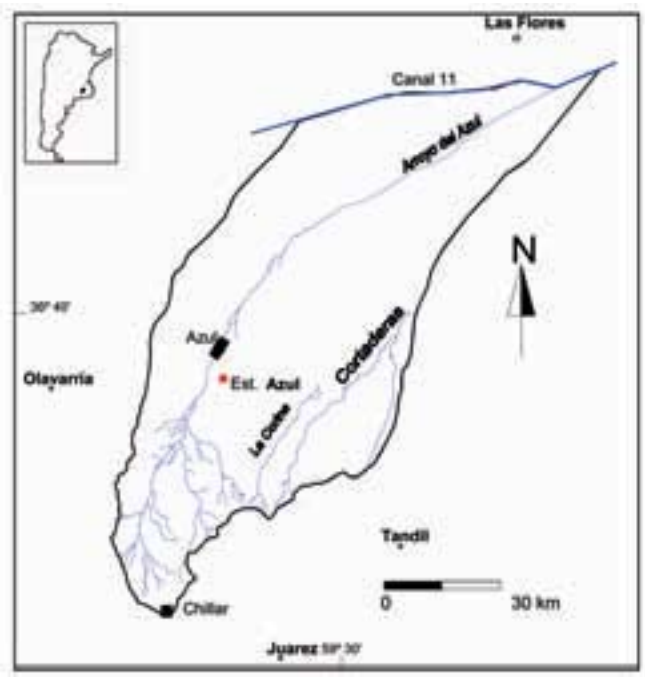


Figura 2. Área de estudio y ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas en el trabajo.

Cuadro 3. Valores medios mensuales de las variables meteorológicas en la estación Azul utilizados para la estimación de los parámetros **a** y **b**.

Estación: Azul (provincia de Buenos Aires, Argentina)												
Coordenadas: 36,7 S - 59,1 W Altitud: 132 m												
Variable-Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_a (ºC)	21,4	19,9	18,3	13,9	11,5	7,8	7,5	9,5	10,7	14,4	16,7	19,3
HR %	60	66	74	74	80	79	77	73	69	72	62	56
R_s (MJ m^{-2} d^{-1})	24,3	24,2	19,2	13,6	9,1	6,2	7,5	10,1	15,1	20,1	23,1	24,5
U_2 (m s^{-1})	2,8	2,4	2,2	2,0	1,9	1,9	2,3	2,4	3,0	3,0	3,1	2,8

Cuadro 4. Valores medios mensuales de las variables meteorológicas en la estación Benito Juarez utilizados para la estimación de los parámetros **a** y **b**.

Estación: Benito Juarez (provincia de Buenos Aires, Argentina)												
Coordenadas: 36,7 S - 59,8 W Altitud: 207 m												
Variable-Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_a (ºC)	21,7	20,4	18,4	13,6	10,5	7,5	7,3	8,4	10,0	12,8	16,2	18,8
HR %	58	64	74	82	88	91	88	80	82	84	79	67
R_s (MJ m^{-2} d^{-1})	24,4	22,7	17,9	12,5	8,6	6,6	7,3	10,6	14,3	19,5	22,7	25,1
U_2 (m s^{-1})	2,8	3,0	2,4	2,6	2,6	2,4	3,0	3,2	2,8	2,8	2,8	2,8

Cuadro 5. Valores medios mensuales de las variables meteorológicas en la estación Olavarría utilizados para la estimación de los parámetros **a** y **b**.

Estación: Olavarría (provincia de Buenos Aires, Argentina)												
Coordenadas: 36,9 S - 60,3 W Altitud: 166 m												
Variable-Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ta (ºC)	19,2	18,0	16,7	13,1	11,1	8,1	7,8	9,5	10,5	13,5	15,4	17,5
HR %	62	68	76	77	82	81	79	75	72	74	65	59
Rs (MJ m^{-2} d^{-1})	23,7	22,2	17,0	12,3	8,5	6,9	7,6	10,7	13,4	19,4	22,9	22,5
U2 (m s^{-1})	1,2	1,3	1,1	1,1	1,0	1,4	1,0	1,3	1,6	1,4	1,1	1,2

Cuadro 6. Valores medios mensuales de las variables meteorológicas en la estación Las Flores utilizados para la estimación de los parámetros **a** y **b**.

Estación: Las Flores (provincia de Buenos Aires, Argentina)												
Coordenadas: 36,0 S – 59,1 W Altitud: 34 m												
Variable-Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_a (ºC)	22,8	21,9	18,9	14,8	11,8	9,1	9,1	9,7	12,2	15,1	18,4	20,9
HR %	70	76	83	88	91	91	90	85	84	82	76	73
R_s (MJ m^{-2} d^{-1})	24,8	22,6	18,1	13,9	9,5	8,0	8,6	11,6	15,3	19,6	23,5	25,6
U_2 (m s^{-1})	2,6	2,6	2,5	2,0	1,81	2,0	2,2	2,4	2,6	2,6	2,6	3,0

Cuadro 7. Valores medios mensuales de las variables meteorológicas en la estación Tandil utilizados para la estimación de los parámetros **a** y **b**.

Estación: Tandil (provincia de Buenos Aires, Argentina)												
Coordenadas: 37,2 S - 59,3 W Altitud: 175 m												
Variable-Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_a (ºC)	21,6	20,6	18,7	13,8	10,8	8,1	7,8	8,8	10,6	13,6	17,1	19,0
HR %	72	74	81	87	90	93	93	84	84	83	78	74
R_s (MJ m^{-2} d^{-1})	25,4	22,6	17,1	12,6	8,1	6,2	7,3	10,2	14,3	20,0	23,3	24,5
U_2 (m s^{-1})	2,8	2,8	2,2	2,4	2,0	2,0	2,2	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4

A partir de los datos meteorológicos de los Cuadros anteriores se han calculado los valores de los parámetros **a** y **b** utilizando las expresiones (13) y (14). El cuadro 8 muestra los resultados de los parámetros para cada estación.

Cuadro 8. Valores de los parámetros **a** y **b** con la desviación estándar correspondiente entre paréntesis para las cinco estaciones utilizadas y valor medio de los parámetros para el conjunto de estaciones.

Estación	**a** (mm d^{-1} ºC^{-1})	**b** (mm ºC^{-1})
Azul	0,12 (±0,01)	-0,32 (±0,15)
B. Juarez	0,11 (±0,01)	-0,33 (±0,03)
Las Flores	0,11 (±0,01)	-0,29 (±0,03)
Olavarria	0,12 (±0,01)	-0,34 (±0,12)
Tandil	0,11 (±0,01)	-0,28 (±0,04)
Media	0,11 (±0,01)	-0,31 (±0,10)

El valor de T_s se ha calculado usando la ecuación split window propuesta por *Coll y Caselles* (1997):

$$ET_{o_Ts} = a \cdot T_s + b \qquad (15)$$

donde T_s es la temperatura de la superficie en el píxel considerado (K), T_4 y T_5 son las temperaturas de brillo en las bandas 4 y 5 de NOAA-AVHRR (K), α y β son coeficientes que dependen del contenido de vapor de agua en la atmósfera (K), ε es la emisividad de la superficie en el intervalo 10,5-12,5 µm y $\Delta\varepsilon$ es la diferencia de emisividad entre las bandas 4 y 5.

Para α se ha considerado un valor de 50 K y para β un valor de 98 K para verano y 115 K para invierno.

La determinación de ε se realizó utilizando la ecuación operativa propuesta por *Valor y Caselles* (1996):

$$\varepsilon = \varepsilon_v \cdot P_v + \varepsilon_s \cdot (1 - P_v) \quad (16)$$

donde ε_v es la emisividad de la vegetación, P_v es el porcentaje de vegetación y ε_s es la emisividad del suelo. Para la determinación de ε, ε_4 y ε_5 se han utilizado los siguientes valores en la ecuación (16): el valor de ε_v fue de 0,985 para todas las determinaciones, mientras que para ε_s se utilizó 0,96 para la determinación de ε, 0,949 para la determinación de ε_4 y 0,967 para la determinación de ε_5 (*Rivas et al.*, 2001). La determinación del porcentaje de vegetación (P_v) se calculó a partir del NDVI utilizando una ecuación que se obtiene de un modelo lineal de reflectividad con dos componentes (suelo y vegetación) (*Valor y Caselles*, 1996).

Para el cálculo de T_s se ha utilizado una imagen que cumpliera las siguientes condiciones: (1) días con menos de un 80% de cobertura nubosa, (2) píxeles con un ángulo de observación menor a 40º y (3) que la T_s sea estable los días previos y posteriores a la toma de la imagen. La estabilidad de la T_s nos asegura que la imagen así obtenida es representativa del período considerado (en nuestro caso una semana). De este modo, podemos considerar que la imagen procesada representaría la media semanal de T_s.

Así hemos seleccionado 58 imágenes NOAA-AVHRR 11 captadas a la hora de máxima radiación, comprendidas en el período 1992-1996, que abarcan diferentes condiciones de los primeros metros de la atmósfera.

Una vez determinados los parámetros medios regionales, se ha procedido a la evaluación del modelo. El objetivo principal fue evaluar si el modelo presentaba error sistemático y determinar el error de estimación de la ET_{o_Ts}. Para evaluar los errores se ha utilizado el bias y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

Para ello, se han comparado los valores calculados a partir de la ecuación de PM FAO (*Allen et al.*, 1998) en la estación Azul con los obtenidos aplicando el modelo (ecuación 12). Para la estimación de ET_{o_Ts} se ha utilizado una zona de 3 por 3 píxeles.

La Figura 3 muestra los resultados de los valores de PM FAO obtenidos a partir de datos meteorológicos frente a los calculados por el modelo con T_s y los parámetros estadísticos.

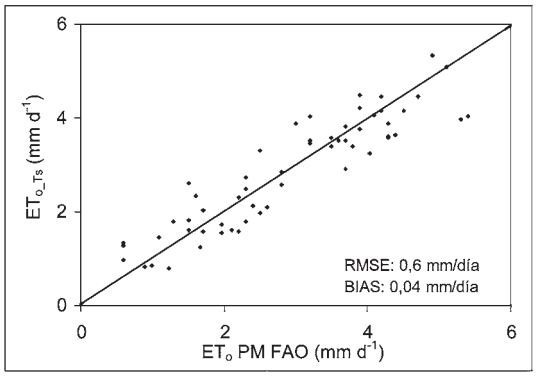


Figura 3. Valores de ET_o PM FAO con datos meteorológicos frente a los obtenidos aplicando el modelo con T_s en el área de la estación Azul.

Como puede observarse el modelo no presenta tendencia y el error en la estimación es de ± 0,6 mm d^{-1}. Es importante señalar que el error de estimación es semejante a los logrados con otros modelos de mayor complejidad, teniendo el beneficio de requerir sólo información meteorológica habitual.

Una vez evaluado el comportamiento del modelo para la estimación de la ET_{o_Ts}, se ha aplicado éste a imágenes de T_s de la cuenca del arroyo del Azul con el fin de obtener mapas regionales de ET_{o_Ts}.

En las Figuras 4 y 5 se puede observar una selección de mapas de ET_{o_Ts} para diferentes fechas en la cuenca del arroyo del Azul. Los mapas muestran la evolución espacio-temporal de la ET_{o_Ts} en dos momentos hidrológicos importantes: el primero de ellos durante un período seco (Figura 4) y el segundo para un período húmedo (Figura 5).

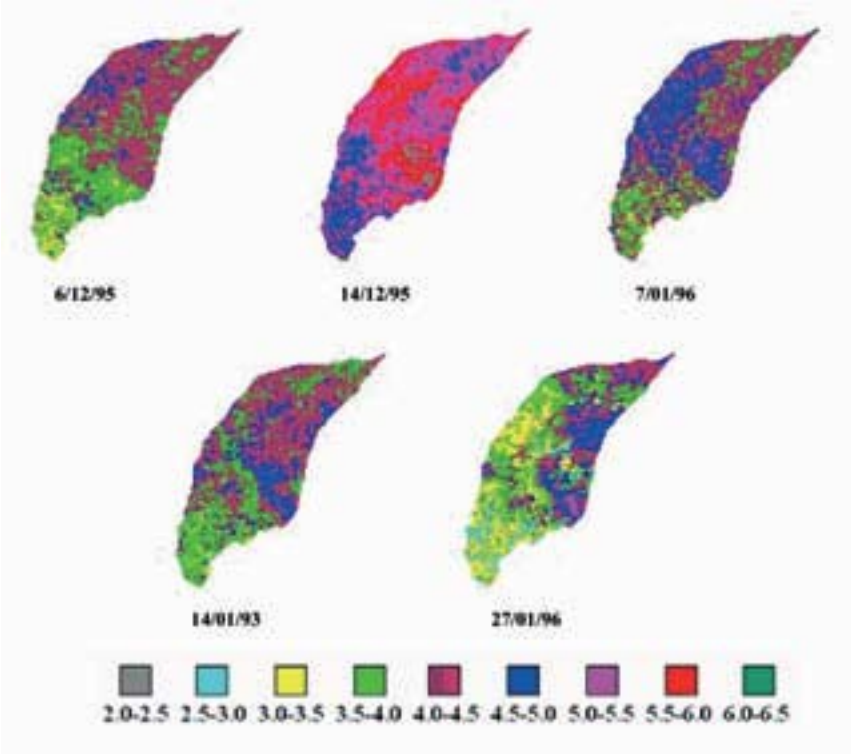


Figura 4. Mapas de ET_{o_Ts} (mm d^{-1}) de la cuenca del Azul obtenidos aplicando el modelo propuesto para un período seco.

En la Figura 4 se puede ver el comportamiento de la ET_{o_Ts} durante el período seco en dos mapas de diciembre de 1995 y 3 mapas de enero de 1996. En este período se observan ET_{o_Ts} máximas a inicios del mes de enero (mapa del 7/01/1996) con valores superiores a los 6 mm d^{-1}. También, se puede ver de manera clara la variación entre diferentes zonas, como consecuencia de una distribución diferente de las precipitaciones en la cuenca y en respuesta al cambio en

las condiciones meteorológicas. Por ejemplo, entre los mapas del 14/01/1993 y el 27/01/1993 se ha observado un aumento de la humedad relativa (HR) y la disminución de la T_a (estación meteorológica Benito Juarez) en la zona sur de la cuenca, que se ven reflejados en el descenso de ET_{o_Ts} del mapa del 27/01/1993. Para este mismo período la HR y T_a (estación meteorológica Las Flores) en la parte norte de la cuenca han variado poco, hecho que se ha traducido en una reducida variación de ET_{o_Ts}, lo cual también se puede observar comparando ambos mapas (observar el sector noreste de la cuenca en los mapas del 14/01 y del 27/01 de la Figura 4).

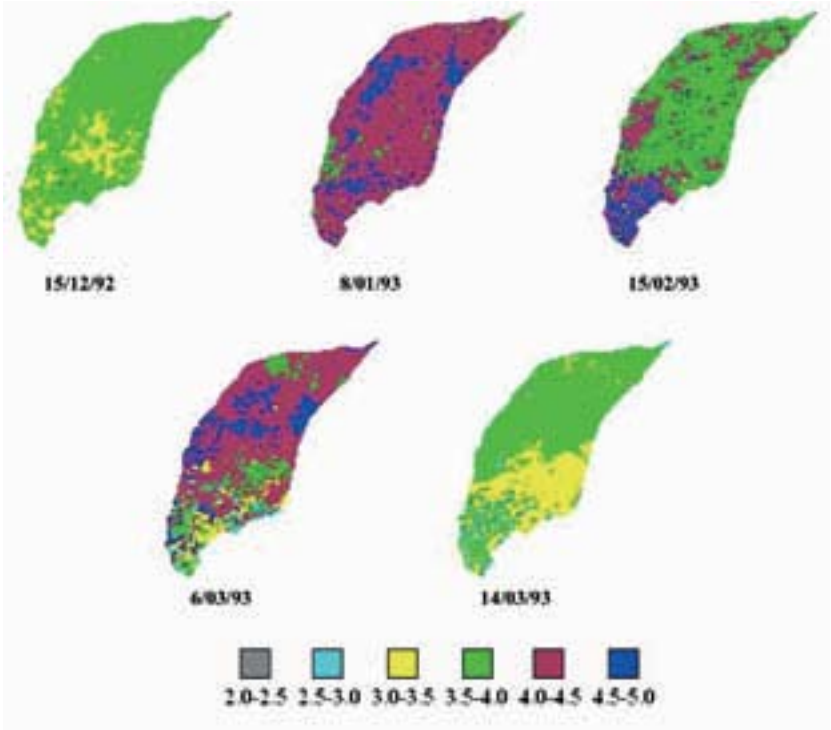


Figura 5. Mapas de ET_{o_Ts} (mm d^{-1}) de la cuenca del Azul obtenidos aplicando el modelo propuesto para un período húmedo.

En la Figura 5 se pueden ver los mapas que muestran el comportamiento de la ET_{o_Ts} en cinco fechas diferentes del período húmedo. Estos mapas se caracterizan por una baja demanda de agua desde la atmósfera como consecuencia de la alta HR y la baja T_a. También se puede ver claramente que no existe una alta variabilidad espacial de la ET_{o_Ts}. Es importante destacar que entre el 8/01/1993 y el 15/02/1993 (mapas 2 y 3 de la Figura 5) se produjo un incremento de la HR y un descenso de la T_a como consecuencia de 5 eventos pluviométricos que se produjeron en la cuenca. Los efectos del cambio en las condiciones se ven reflejados en el mapa de ET_{o_Ts} del 15/02/1993 con un descenso de la ET_{o_Ts} a escala espacial. Lo mismo ocurre para los dos mapas siguientes (mapas del 6/03/1993 y 14/03/1993), que muestran el descenso de la ET_{o_Ts}, como consecuencia de un aumento de la HR, y una caída de la T_a.

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que la evapotranspiración del cultivo de referencia puede ser estimada por combinación de la temperatura de superficie, obtenida desde imágenes de satélite, y datos meteorológicos. La combinación se obtiene a partir de una función lineal derivada de la parametrización de los primeros metros de la atmósfera por medio de dos parámetros (**a** y **b**). La ecuación operativa es:

$$ET_{o_Ts} = a \cdot T_s + b$$

Se han calculado los parámetros en una zona de la llanura pampeana Argentina (cuenca del arroyo del Azul) y se ha aplicado el modelo. Los datos del modelo han sido comparados con estimaciones locales y se ha observado que la derivación propuesta no presenta errores sistemáticos y que el error de estimación es de ±0,6 mm d^{-1}.

Se han calculado mapas de ET_{o_Ts} de la cuenca del Azul con los parámetros validados que reproducen la variación espacial de la demanda de agua para un período seco (entre 2 y 6,5 mm d^{-1}) y uno húmedo (entre 2 y 5 mm d^{-1}). Éstos muestran la sensibilidad del modelo a cambios en las condiciones de los primeros metros de la atmósfera.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto REN 2001-3116) y al apoyo del Programa Alban, Programa de becas de alto nivel de la Unión Europea para América Latina (Nº de identificación E03D06361AR).

REFERENCIAS

Allen, R. G;, Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. (1998): *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO*. Irrigation and drainage paper 56. Water Resources, Development and Management Service, Rome, Italy.

Boegh, E.; Soegaard, H y Thomsen, A. (2002): "Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance". *Remote Sensing of Environment,* vol. 79, pp. 329-343.

Brasa, A.; Martín de Santa Olalla, F.; Caselles, V. y Jochum, M. (1998): "Comparison of evapotranspiration estimates by NOAA-AVHRR images and aircraft flux measurement in a semiarid region of Spain". *Journal Agricultural Engineering Resources*, vol. 70, pp 285-294.

Brutsaert, W. (1984): *Evaporation into the atmosphere. Theory, history, and applications*. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 299 p.

Caselles, V. y Delegido, J. (1987): "A simple model to estimate the daily value of the regional maximun evapotranspiration from satellite temperature and albedo images". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 1151-1152.

Coll, C. y Caselles, V. (1997): "A split window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison". *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, nº 14, pp. 16697-16713.

Friedl, M. (2002): "Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements". *Remote Sensing of Environment*, vol. 79, pp. 344-354.

Jackson, R. D.; Reginato, R. J. y Idso, S. B. (1977): "Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements". *Water Resources Research*, vol. 13, pp. 651-656.

Jensen M. E.; Burman R. D. y Allen R. G. (1990): *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE Manual N° 70, 332 p.

Kustas, W.; Jackson, R. y Asrar, G. (1989): Estimating surface energy balance components from remotely sensed data. In: G. Asrar (Ed.), *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, New York, Wiley, pp. 578-603.

Monteith, J. L. y Unsworth, M. H. (1990): *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, second edition, 291 p.

Price, J. (1982): "On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales". *Journal of Applied Meteorology*, vol. 21, pp. 1111-1122.

Price, J. (1989): Quantitative aspects of remote sensing in the thermal infrared. In: G. Asrar (Ed.), *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, New York, Wiley, 578-603 p.

Reginato, R. J.; Jackson, R. D. y Pinter, J. P. (1985): "Evapotranspiration calculated from remote multispectral and ground station meteorological data". *Remote Sensing Enviroment*, vol. 18, pp. 75-89.

Rivas, R.; Caselles, V.; Valor, E. y Entraigas, I. (2001): "Mapa de emisividad calculado a partir de una imagen Landsat TM sobre un sector de la cuenca del Azul". *Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, vol. 16, pp. 134-160.

Rivas, R. y Caselles, V. (2004). "A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing –based surface temperature and local meteorological data". *Remote Sensing of Environment* (en prensa).

Smith, M.; Allen, R. G.; Monteith, J. L.; Perrier, A.; Pereira, L. y Segeren, A. (1992): *Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements*, FAO, Rome, Italy, 54 p.

Usunoff, E.; Varni, M., Weinzettel, P. y Rivas, R. (1999): "Hidrogeología de grandes llanuras: La pampa húmeda Argentina". *Boletín Geológico y Minero*, vol. 110 nº 4, pp. 391-406.

Valor E. y Caselles, V. (1996): "Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas". *Remote Sensing of Environment,* vol. 57, pp. 167-184.

Varni, M.; Usunoff, E.; Weinzettel, P. y Rivas, R. (1999): "The groundwater recharge in the Azul aquifer, central Buenos Aires Province, Argentina". *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 24 nº 4, pp. 349-352.

Cálculo de la evapotranspración real en un bosque boreal empleando técnicas de teledetección

J.M. Sánchez Tomás, V. Caselles Miralles, R. Niclòs Corts, E. Valor i Micó y C. Coll Company

Departament de Termodinámica, Facultat de Física, Universitat de Valencia, C/ Dr. Moliner, 50, 46100 Burjassot

RESUMEN

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en estudios sobre hidrología y climatología es la determinación de la evapotranspiración. Hasta hace poco el estudio de este término, fundamental en la ecuación de balance de energía, excluía zonas forestales debido a las dificultades experimentales de toma de medidas en estas regiones. La teledetección acabó con dichas dificultades, permitiéndonos así el estudio de la evapotranspiración real en zonas de bosque, que suponen en extensión entorno a un 30% de toda la superficie terrestre. En este trabajo presentamos un método operativo para determinar la evapotranspiración real a partir de medidas de temperatura de superficie realizadas desde satélite. Este estudio se llevó a cabo de abril a junio de 2002 en Sodankylä, una región de bosque boreal en el norte de Finlandia, dentro del proyecto SIFLEX-2002 (Solar Induced Fluorescence Experiment-2002) financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA). Hemos aplicado el método a imágenes de satélite Landsat-TM de la zona para obtener mapas de evapotranspiración. Finalmente hemos realizado una validación del método propuesto, comparando los valores de evapotranspiración calculados, con los que resultan de otras técnicas, correlación turbulenta y la ecuación de Penman-Monteith. Así pues, obtuvimos para nuestra zona un valor de evapotranspiración media diaria de 2,3 mm/día, con un error de estimación de ±0,6 mm/día.

***Palabras Clave**: Bosque boreal, temperatura, evapotranspiración real, imagen Landsat TM, teledetección.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

One of the most important aspects in hydrology and climatology studies, is the determination of evapotranspiration. Till a few years ago, studies left out forest areas because of the experimental measurement problem in these sites. Remote sensing put an end to these difficulties, allowing us to study actual evapotranspiration in forest areas, which occupy an extension of about 30% of the total Earth surface. In this work we propose an operational method for determining actual evapotranspiration using surface temperature measurements by remote sensing. This study was carried out as part of SIFLEX-2002 (Solar Induced Fluorescence Experiment-2002) project, financed by the European Space Agency (ESA). The method was applied to Landsat-TM images of the site in order to obtain evapotranspiration maps. Finally a validation of the model proposed has been made, comparing the evapotranspiration values calculated with those obtained by other techniques, eddy-correlation and Penman-Monteith equation. In this way, we obtained a value of mean daily evapotranspiration of 2.3 mm/day for our site, with an estimation error of ±0.6 mm/day.

***Key Words**: Boreal forest, temperature, actual evapotranspiration, Landsat-TM image, remote sensing.*

INTRODUCCIÓN

Los flujos de energía sobre la superficie terrestre constituyen la base de todos los procesos físicos que ocurren en la atmósfera. Por tanto, una adecuada formulación y parametrización de estos procesos en superficie son esenciales para la mejora de los modelos climáticos y de predicción meteorológica. Así pues, existe una necesidad de conocer los flujos de energía con una resolución espacial y temporal en proporción a las necesidades de los modelos hidrológicos y de circulación atmosférica a escala sinóptica. Estos requisitos hacen de la teledetección la técnica más adecuada para este tipo de estudios.

La ecuación de balance de energía, que modeliza un sistema formado por la vegetación, el suelo que la circunda y la atmósfera que rodea a ambos, se puede expresar de la forma:

$$R_n = G + H + LE + A \qquad (1)$$

donde R_n es el flujo de radiación neta (W/m^2), G el flujo geotérmico (W/m^2), H el flujo de calor sensible (W/m^2), LE es el flujo de calor latente en la capa límite de la atmósfera (W/m^2) y A es un término residual que engloba otros flujos e intercambios de energía (advección, fotosíntesis, almacenamiento de energía en el seno del sistema, etc.) (W/m^2). El flujo de calor latente es el producto de la masa de vapor de agua evaporada, E (kg), y el calor latente de vaporización de agua por unidad de masa, L (W/m^2 kg). El flujo de radiación neta se pue-

de medir directamente y el de calor sensible se puede obtener a partir de una diferencia de temperaturas entre dos puntos dados; en cambio, la determinación de la evapotranspiración es más complicada. Es por esto que habitualmente se emplea el método de la ecuación de balance de energía para obtener la evapotranspiración como un término residual de la misma (*Norman et al.* 1995).

Si trabajamos a escala diaria, el flujo geotérmico y el término A se pueden despreciar, con lo que podemos obtener la evapotranspiración a través de la expresión:

$$LE_d = R_{nd} - H_d \quad (2)$$

Así pues, el objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo que nos permita estimar el flujo de calor sensible, H, a partir de la información de temperatura de la superficie obtenida a través de un satélite. Posteriormente validaremos el método en una zona test, comparando nuestros cálculos de evapotranspiración, durante más de un mes, con los valores obtenidos a través de técnicas de correlación turbulenta y con la ecuación de Penman-Monteith. Una vez validado el método, lo aplicaremos a una imagen Landsat de la zona, de forma que se pueda observar el carácter regional del modelo desarrollado.

ÁREA DE ESTUDIO

Este trabajo está realizado dentro del marco del proyecto SIFLEX-2002 (*Solar Induced Fluorescence Experiment-2002*), financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA). La campaña experimental se llevó a cabo en el *Artic Research Center*, perteneciente al Instituto Meteorológico Finlandés (IMF) en Sodankylä (67º 21' 42,7" N, 26º 38' 16,2" E, alt. 179 m), situado a unos 100 km al norte del Circulo Polar Ártico. Se trata de una zona de bosque boreal, concretamente de coníferas del tipo *"Scots pines"* (*Pinus sylvestris L*), de unos 100 años de antigüedad. La altura media de los árboles es de 11 m y el LAI (índice de área foliar) es de 1,15.

Durante la campaña SIFLEX-2002, tres fueron los grupos participantes: LURE (*Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnetique*, Francia), Universitat de Valencia y el IMF. El LURE se encargó de realizar medidas de fluorescencia. Por parte de la Universitat de Valencia se realizaron medidas de radiación difusa, global y directa y de temperatura radiométrica de la superficie. Por último, el IMF se encargó de medir parámetros meteorológicos y los flujos de calor sensible y latente que emplearemos en este trabajo.

Las medidas de la temperatura de cultivo, T_c, y la temperatura del suelo, T_s, se realizaron a través de un radiómetro multicanal de infrarrojo térmico CIMEL CE-312, colocado en una torre de 20 m de altura. Las medidas se realizaron cada 10 minutos y tras ser corregidas de emisividad se obtuvieron con una precisión de ±0,2 K (*Niclòs et al*. 2004). Finalmente la temperatura del aire se midió a la altura de referencia de 23 m sobre una torre meteorológica, mediante un sensor PT100.

Los flujos de calor sensible se obtuvieron a esa misma altura de referencia, 23 m, mediante un anemómetro sónico SATI-3Sx, con una periodicidad de 30 minutos. Para una descripción detallada de estas medidas y de las técnicas de correlación turbulenta, ver *Aurela et al*. (2001).

Aunque la campaña de medidas se desarrolló de abril a junio de 2002, este trabajo se basa en los datos tomados desde el 5 de mayo, con el fin de evitar los problemas adicionales que conlleva la cubierta de nieve sobre el suelo.

MODELO PROPUESTO

Podemos suponer, por analogía con la ley de Ohm, que la diferencia de temperaturas entre dos puntos de referencia representa una diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera de un conductor. De esta forma, el flujo de calor sensible, H, haría el papel de la densidad de corriente eléctrica, con lo que podemos definir una resistencia aerodinámica, que modelizará la relación que existe entre el flujo de calor sensible y la diferencia de temperaturas entre los dos puntos elegidos. Si tomamos como puntos de referencia la altura a la que se toman los datos meteorológicos, en concreto la temperatura del aire, T_a, y por otro lado, un punto de la superficie del cultivo, que presentará una temperatura T_c, podemos escribir dicho flujo como (*Brown y Rosenberg*, 1973):

$$H = \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_a} \tag{3}$$

donde ρ es la densidad del aire (kg/m^3), C_p es el calor específico del aire (J/kg K) y r_a es la resistencia aerodinámica (s/m). Esta es la base de los modelos de una capa, solamente válidos para zonas homogéneas, aplicados a lo largo de las últimas décadas por diversos autores con resultados satisfactorios (*Monteith*, 1981).

Sin embargo, si tratamos de dotar a un método de un carácter regional, estos modelos de una capa no son válidos, ya que nos encontramos con zonas heterogéneas en las que la proporción de vegetación, P_v, puede variar mucho de unos puntos a otros. De esta forma vamos a desarrollar un modelo de dos capas apropiado para trabajar con teledetección.

Si nos encontramos con vegetación heterogénea, como ocurre en nuestro caso, la temperatura observada por el satélite va a depender de la proporción de vegetación, así como de las temperaturas de las dos fuentes establecidas, de forma que podemos escribir esta temperatura radiativa, en una primera aproximación, como (*Caselles et al*. 1992):

$$T_{rad} = T_c P_v + T_s (1 - P_v) \tag{4}$$

donde T_s es la temperatura del suelo.

Por analogía con la ecuación (3), podemos poner ahora:

$$H = \rho C_p \frac{T_{rad} - T_a}{r_a^*} \tag{5}$$

donde r_a^* es ahora una resistencia aerodinámica "equivalente" (s/m), que depende de las resistencias y las temperaturas que aparezcan en el sistema.

Para obtener el valor de esa r_a^*, emplearemos un modelo de resistencias en paralelo, propuesto por *Norman et al*. (1995) y modificado por *Sánchez et al*. (2004b). En la figura 1, podemos observar el esquema de este modelo, de acuerdo con el cual, los flujos de calor sensible correspondientes al suelo y a la vegetación vienen dados por las expresiones:

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a^s + r_a^a} \tag{6a}$$

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_a^a} \tag{6b}$$

donde r_a^a y r_a^s son, la resistencia aerodinámica del aire (s/m) y la resistencia aerodinámica del suelo (s/m), respectivamente.

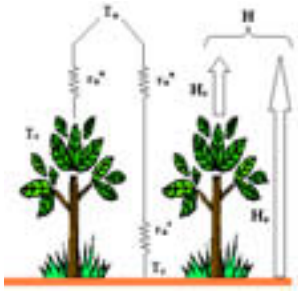


Figura 1. Esquema de resistencias y flujos de calor sensible correspondiente a un modelo de dos capas con asociación en paralelo.

Penman y Long (1960) propusieron la siguiente expresión para calcular la resistencia aerodinámica, r_a^a, en condiciones de atmósfera neutra:

$$r_a^a = \frac{\left[\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)\right]^2}{k^2 u} \tag{7}$$

donde z es la altura de referencia (m), z_0 es el parámetro de rugosidad (m), d es la altura del plano de desplazamiento cero (m), k es la constante de Von Karman (~0,41), y u es la velocidad del viento (m/s) medida a la altura z.

Por otro lado, la resistencia aerodinámica del suelo, se puede obtener a través de la expresión (*Norman et al.* 1995):

$$r_a^s = \frac{1}{c(T_s - T_c)^{1/3} + bu_s} \tag{8}$$

donde *c* y *b* son constantes y u_s es la velocidad del viento a nivel del suelo.

La relación entre los flujos de calor sensible, total y parciales, viene dada por la ecuación:

$$H = (1 - P_v)H_s + P_v H_v \tag{9}$$

A partir de las expresiones (5), (6) y (9) podemos encontrar una nueva ecuación que nos permita calcular el valor de la resistencia equivalente, r_a^*, a partir de las resistencias y las temperaturas por separado del suelo y de la vegetación:

$$r_a^* = \frac{T_c P_v + T_s (1 - P_v) - T_a}{P_v \dfrac{(T_c - T_a)}{r_a^a} + (1 - P_v)\dfrac{(T_s - T_a)}{r_a^a + r_a^s}} \tag{10}$$

A través de la ecuación (5), ya podemos calcular flujos de calor sensible instantáneos. Sin embargo, el objetivo del trabajo es estimar evapotranspiración diaria, y por tanto, necesitamos información del calor sensible medio diario. Para ello, emplearemos la relación entre valores instantáneos y diarios de los flujos, encontrada por *Itier y Riou* (1982):

$$\frac{H_d}{R_{nd}} = \frac{H_i}{R_{ni}} \tag{11}$$

De acuerdo con esta relación (11), podemos obtener el flujo de calor sensible medio diario a través de la expresión:

$$H_d = B(T_{rad} - T_a) \tag{12}$$

donde B es un coeficiente de intercambio (W/m^2 K) que viene dado por (*Seguin e Itier*, 1983):

$$B = \frac{R_{nd}}{R_{ni}} \frac{\rho c_p}{r^*_{ai}} \tag{13}$$

Con todo esto, ya podemos extraer valores de evapotranspiración media diaria, a través de la expresión (2), en una zona heterogénea. Para ello solo necesitamos conocer la temperatura radiométrica instantánea en cada punto y los valores de temperatura del aire y de radiación neta, representativos de la zona, en ese instante.

RESULTADOS

Validación del método

Antes de aplicar el método a imágenes de satélite, lo que debemos hacer es una validación del modelo propuesto sobre una zona test. Para ello elegimos exactamente el área en la que se colocó la torre desde la que se realizaban las medidas, ya que es en esta zona donde disponemos de toda la información necesaria.

En primer lugar, calculamos los valores de T_{rad} a partir de las medidas de T_c y T_s, de acuerdo con la expresión (4), para el intervalo horario 12-14 horas, y teniendo en cuenta que P_v=0,38 para esa zona. Una vez hecho esto, realizamos un ajuste lineal de los valores medidos de flujo de calor sensible total, H, frente a las diferencias entre la temperatura radiométrica y la del aire. De la pendiente de dicho ajuste extraemos el valor de la resistencia aerodinámica efectiva, r_a^*, para ese instante de acuerdo con la expresión (5). Así pues, llegamos a un valor de r_a^*=43±6 s/m (*Sánchez et al.* 2004a). Por otro lado, a partir de las medidas de radiación neta obtenemos, también para ese instante, un cociente de R_{nd}/R_{ni}= 0,48±0,12.

En la figura 2, podemos observar la evolución diaria de los valores calculados de evapotranspiración media diaria, a través de nuestro método. En la misma gráfica, y a modo de comparación, se muestran también los valores de evapotranspiración determinados por el IMF a través de la técnica de correlación turbulenta:

$$E = \rho \overline{w'q'} \tag{14}$$

donde *w* es la velocidad vertical del viento, y *q* es la humedad específica del aire. La prima significa desviaciones instantáneas de la media, y la barra nos indica un promedio sobre un cierto período de tiempo.

Con el fin de disponer de una segunda validación, también realizamos la comparación con los valores obtenidos por uno de los métodos más aceptados actualmente, la ecuación de Penman-Monteith:

$$LET = k_c \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p \dfrac{e_s - e}{r_a^a}}{\Delta + \gamma\left(1 + \dfrac{r_s}{r_a^a}\right)} \tag{15}$$

donde *e* es la presion de vapor (Pa), e_s es la presión de vapor de saturación (Pa), r_s es la resistencia de los estomas (s/m), γ es la constante psicrométrica (Pa/K), Δ es la pendiente de la relación entre la presión de vapor de saturación y la temperatura (Pa/K). Por último k_c es el coeficiente de cultivo.

En un primer análisis, podemos apreciar como en líneas generales los tres métodos siguen una tendencia similar, con las dispersiones propias de este tipo de estudios. El valor medio de evapotranspiración diaria para la zona y la época del año considerada, resulta ser con nuestro modelo de 2,3 mm/día, próximo a los 2,2 mm/día obtenidos a través de Penman-Monteith, y algo por encima de los 1,8 mm/día que resultan del método de correlación turbulenta.

Estos valores están de acuerdo con los obtenidos por otros autores para bosques de características similares. Por ejemplo, en bosques boreales de Canadá, se determinaron valores de 1,9 mm/día (*Baldocchi et al.*1997) y de 1,5-2,0 mm/día (*Lafleur*, 1992). Durante el proyecto NOPEX, se determinó en Suecia un valor medio de 1,9 mm/día (*Cienciala et al.* 1997). En la figura 3 se representa los valores de evapotranspiración obtenidos con nuestro método frente a los valores estimados a través de la técnica de correlación turbulenta, (a), y de la ecuación de Penman-Monteith, (b).

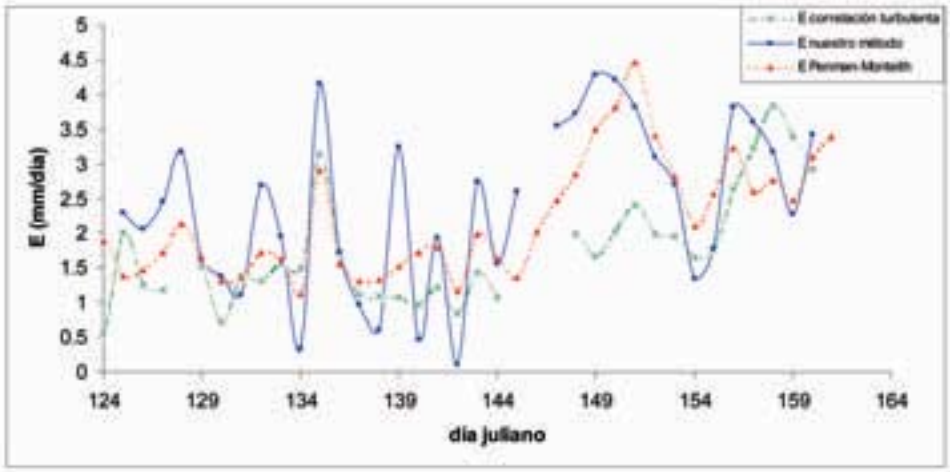
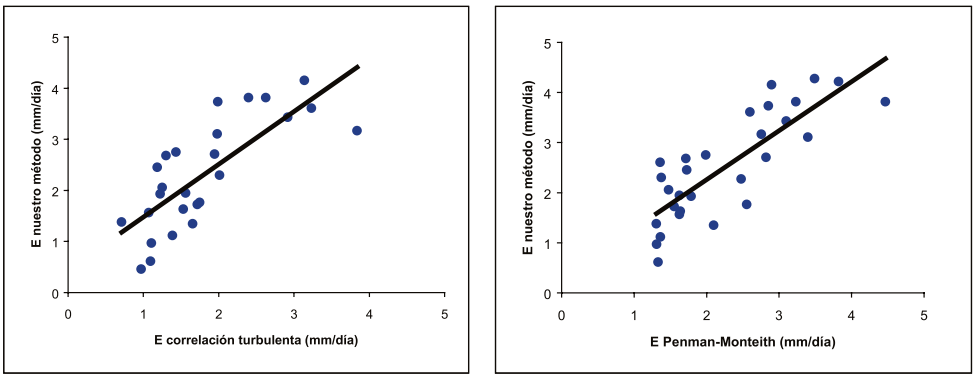


Figura 2. Evolución de la evapotranspiración media diaria.

Los resultados de estos ajustes se muestran en el Cuadro 1. Podemos ver como las pendientes están proximas a la relación 1:1 que se cumpliría en el caso ideal. En cuanto a los errores que se están cometiendo en el cálculo de la evapotranspiración, a pesar de que son elevados, están de acuerdo, o incluso mejoran, a los obtenidos en otros trabajos sobre este tema. *Norman et al.* (1995), empleando el modelo de dos capas con resistencias en paralelo y los datos de las experiencias Monsoon '90 y FIFE, obtuvieron unos ajustes con r=0,83 y r=0,93, respectivamente, entre los valores observados y los calculados a través de su método. Además se encontraron con unos valores de MAD (mean absolute difference) y de RMSD (root mean square difference) de 0,7 y 0,8 mm/día respectivamente, en ambas experiencias. *Kustas et al.* (1994) habían obtenido para Monsoon ´90 valores de MAD y RMSD entorno a 0,5 y 0,7 mm/día respectivamente, pero empleando en esta ocasión un modelo de una capa. *Nie et al.* (1992) calcularon la evapotranspiración para el FIFE con un error del 20%, considerado éste como el cociente RMSD/<O>. *Ibáñez et al.* (1997) determinaron, con un modelo similar, la evapotranspiración sobre una zona de hierba, con un error también de un 20% y una correlación de r=0,88.

Si nos referimos a estudios sobre bosque, *Burke y Stewart* (1997) determinaron una evapotranspiración media para un bosque abierto con un valor de RMSD entorno a 0,7 mm/día y por tanto con un error del 40%. En este caso además, la correlación entre los valores medidos y calculados fue de r=0,76.

En definitiva, hemos desarrollado un método que nos permite obtener un valor de la evapotranspiración diaria de una forma sencilla a partir de una diferencia instantánea de temperaturas, y con un error comparable (30 %) al obtenido por otros autores. Además la principal característica de nuestro modelo es que nos permite elaborar mapas de evapotranspiración de áreas extensas haciendo uso de la teledetección, sin necesidad de realizar medidas micrometeorológicas en cada punto de la zona seleccionada.



(a) (b)

Figura 3. (a): ajuste con valores de correlación turbulenta, (b): ajuste con valores de Penman-Monteith

Cuadro 1. Evaluación de nuestro método frente a los valores de evapotranspiración obtenidos mediante otros métodos. Las variables <O> y <P> son las medias de los valores encontrados por un método dado (O_i) y los obtenidos con nuestro método (P_i) respectivamente; σ_0 y σ_p son las desviaciones estandar en cada caso; a y b son la pendiente y la ordenada en el origen respectivamente del ajuste; r es el coeficiente de correlación;

Método de comparación	<O> (mm/día)	<P> (mm/día)	σ_o (mm/día)	σ_p (mm/día)	A (mm/día)	b	MAD (mm/día)	RMSD (mm/día)	RMSD/<O>	r
Correlación turbulenta	1,8	2,3	0,8	1,1	1,04± 0,19	0,4± 0,4	0,5	0,8	0,40	0,77
Penman-Monteith	2,2	2,3	0,8	1,1	0,96± 0,11	0,3± 0,3	0,2	0,6	0,30	0,82

Aplicación del método

Para este trabajo hemos seleccionado una imagen del sensor ETM+ a bordo del satélite Landsat 7, correspondiente a la fecha 27 de mayo de 2002. Centraremos nuestro estudio en un corte de dicha imagen, de aproximadamente unos 132 km^2 de extensión, dentro de la cual se incluye la zona de trabajo de la campaña SIFLEX-2002. En primer lugar, y a partir de las reflectividades de las bandas 3 y 4 del sensor ETM+, elaboramos una primera imagen de proporción de vegetación siguiendo el método propuesto por *Valor y Caselles* (1996). En la figura 4a podemos ver como en el corte seleccionado tenemos zonas de suelo desnudo y de cobertura completa de vegetación. También se distinguen, en blanco, las zonas de agua. Por otro lado, a partir de la banda 6 de la imagen podemos obtener la temperatura medida desde el satélite. Pero hay que tener presente que esta medida se ve influida por factores como las características de la atmósfera y la emisividad de la superficie. Por ello para llegar a la temperatura de

la superficie (figura 4b) hemos de aplicar una ecuación de transferencia radiativa aplicada en nuestro caso al canal 6 del sensor ETM+:

$$B(T_\theta) = \left[\varepsilon_\theta B(T_s) + (1-\varepsilon)R^{\downarrow}\right]\tau_\theta + R_\theta{}^{\uparrow} \quad (16)$$

donde todas las cantidades se refieren a una integración espectral sobre la banda del canal 6. T_θ es la temperatura radiométrica medida al nivel del satélite y bajo el ángulo cenital θ, que en nuestro caso es de unos 10º. $B(T_s)$ es la función de Planck a la temperatura de la superficie T_s, τ_θ es la transmisividad total de la atmósfera bajo el ángulo cenital θ, $R_\theta{}^{\uparrow}$ es la radiancia atmosférica ascendente bajo el ángulo θ, y siendo $R^{\downarrow}$ la radiancia atmosférica descendente. Los valores de $R_\theta{}^{\uparrow}$, $R^{\downarrow}$ y τ_θ se han obtenido aplicando un modelo de transferencia radiativa (Modtran), con los datos de un radiosondeo lanzado en la zona a las 11 horas ese mismo día. Mientras, el valor de emisividad en cada punto vendrá dado por (*Valor y Caselles*, 1996):

$$\varepsilon = P_s\varepsilon_s + P_v\varepsilon_v + 4\langle d\varepsilon\rangle P_v(1-P_v) \quad (17)$$

donde ε_s es la emisividad del suelo y ε_v la emisividad de los pinos. Ambas fueron estimadas a partir de *Niclòs et al.* (2004), resultando: ε_s=0,944±0,004 y ε_v=0,974±0,004. Por otro lado, <dε> es el valor máximo del término de cavidad para la configuración característica de nuestra zona, y toma el valor de 0,035.

A partir de estos dos mapas, de proporción de vegetación y de temperatura, ya podemos extraer todos los parámetros necesarios en nuestro modelo. Así pues, a partir de las zonas de cobertura completa y suelo desnudo, extraemos los valores de T_c=15 ºC y T_s=29 ºC, respectivamente. Estos valores junto con los de las resistencias calculadas, $r_a{}^a$ y $r_a{}^s$, y la temperatura del aire medida, T_a=10 ºC, nos permiten obtener el valor de la resistencia aerodinámica equivalente, $r_a{}^*$, en cada punto de la imagen, a partir de la expresión (10).

Por otro lado, a partir de los valores de radiación neta medidos en la estación, encontramos para la hora de paso del Landsat por la zona, entorno a las 9:30 horas, un valor para el cociente R_{nd}/R_{ni} de 0,46. A partir de la ecuación (13), podemos elaborar un mapa de coeficientes de intercambio, B. En la figura 4c podemos observar como este coeficiente varía entre un valor de 0,1, para las zonas más desprovistas de vegetación, hasta valores de 1,1, en zonas de cobertura máxima.

Con todo esto, finalmente a partir de las expresiónes (2) y (12), y teniendo en cuenta que para ese día se registró un valor de R_{nd}=232 W/m^2, ya podemos elaborar un mapa de evapotranspiración de la zona completa. La figura 4d es el resultado final de todo el proceso. En ella se muestra la evapotranspiración real total para el día 27 de mayo de 2002. Se puede observar como ésta oscila entre valores de 1 a 6 mm/día, según la zona del bosque que consideremos. Es importante advertir que los valores de evapotranspiración más elevados se encuentran en zonas de cobertura de 20-50%, mientras que, tanto en zonas de suelo desnudo, como en zonas de alta proporción de vegetación, se registran los valores mínimos. Esto está de acuerdo con la evolución del parámetro B con la proporción de vegetación, P_v, (*Sánchez et al.* 2004b).

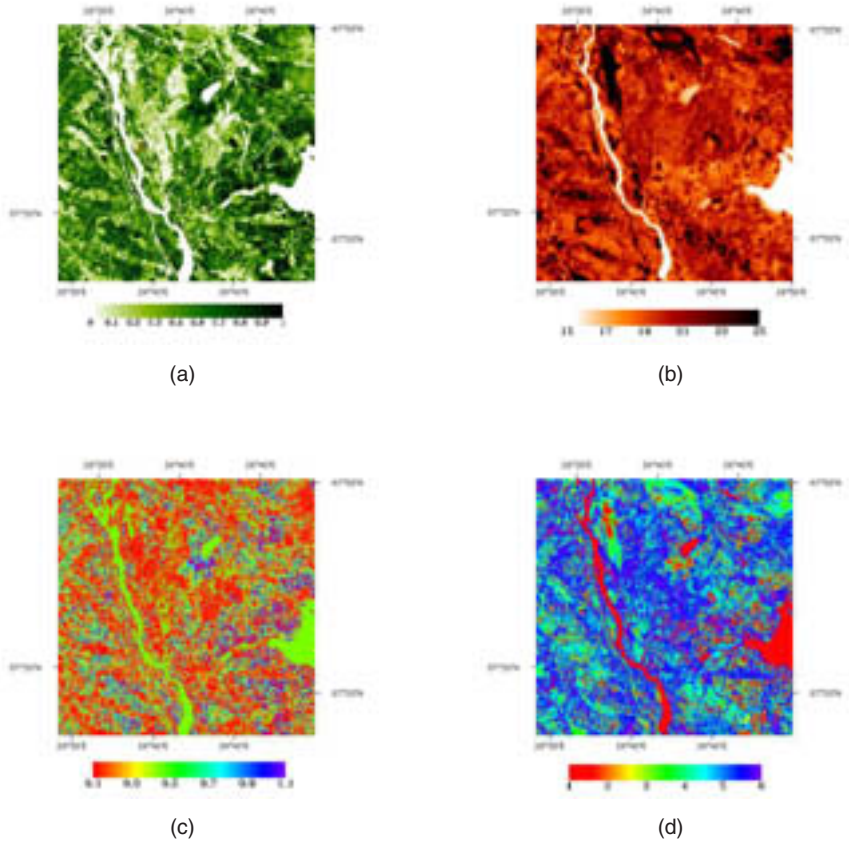


Figura 4. (a) mapa de proporción de vegetación, P_v; (b) mapa de temperatura de la superficie, T_{rad} (ºC); (c) mapa del coeficiente de intercambio, B (mm/día K); (d) mapa de evapotranspiración (mm/día).

Si nos fijamos ahora en la zona concreta de la imagen, sobre la que hemos realizado la validación del método en el apartado anterior, marcada con el recuadro señalado, y realizamos una media de los valores de evapotranspiración de los píxeles encerrados por él, obtenemos un valor de 4,8±1,2 mm/día. Para este mismo día, habíamos obtenido, como puede verse en la figura 2, un valor de 3,5±1,1 mm/día. De esta forma se pone de manifiesto la validez del método, al mismo tiempo que se advierte la potencialidad del modelo desarrollado, ya que nos permite conocer la evapotranspiración en distintos puntos de una cierta región con la resolución espacial propia del satélite empleado.

CONCLUSIONES

Después de todo lo visto, podemos resaltar los aspectos más destacables del trabajo a modo de las siguientes conclusiones:

- Hemos desarrollado un método que nos permite estimar la evapotranspiración diaria en una región heterogénea, a partir de datos instantáneos de temperatura de superficie y del aire.
- A partir de una imagen del sensor ETM+ del satélite Landsat 7, podemos extraer la información necesaria sobre la proporción de vegetación (bandas 4 y 5), y la temperatura de la superficie (banda 6), en cada punto del área considerada. Esto hace que sólo necesitemos registros de temperatura del aire y radiación neta de una estación meteorológica situada en la zona, o en sus proximidades.
- Los valores de evapotranspiración diaria calculados con nuestro método están de acuerdo con los que se obtienen a través de técnicas de correlación turbulenta y de la ecuación de Penman-Monteith.
- El valor medio de la evapotranspiración diaria en la zona de estudio, para los meses de mayo y junio, resultó de 2,3±0,6 mm/día. Este valor, relativamente bajo, es del orden de las estimaciones de evapotranspiración media diaria realizadas por otros autores sobre bosques de características semejantes.
- En la figura 4d, se puede observar como las zonas del bosque sobre las que se produce una mayor evapotranspiración, próxima a 6 mm/día, son las zonas de coberturas intermedias. En cambio, para zonas de suelo desnudo y áreas de cobertura total, la evapotranspiración es mínima.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra gratitud a la Agencia Espacial Europea (ESTEC Contract nº 16026/02/NL/SF), al Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto REN2001-3116 y Contrato de Investigación "Ramón y Cajal" del Dr. E. Valor) y a la Unión Europea (Fondos Feder), por la financiación recibida. También son muy apreciados los comentarios y sugerencias de R. E. Rivas (Universitat de València).

REFERENCIAS:

AURELA, M.; LAURILA, T. y TUOVINEN, J. P. (2001): "Seasonal CO2 balances of a subartic mire". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, pp. 1623-1638

BALDOCCHI, D.D. y VOGEL, C.A. (1997): "Seasonal variation of energy and water vapor exhange rates above and below a boreal jack pine forest canopy". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, pp. 28,939-28,951.

BROWN, K. W. y ROSENBERG, N. J. (1973): "A resistance model to predict evapotranspiration and its applications to a sugar beet field". *Agronomy Forest*, Vol. 65, pp. 341-452.

CASELLES, V., SOBRINO, J.A. y COLL, C. (1992): "On the use of satellite thermal data for determining evapotranspiration in partially vegetated areas". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 13(14), pp. 2669-2682.

CIENCIALA, E.; KUERA, J.; LINDROTH, A.; CERMAK, J.; GRELLE, A. y HALLDIN, S. (1997): "Canopy transpiration from a boreal forest in Sweden during a dry year". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 86, pp. 157-167.

IBAÑEZ, M.; PEREZ, P.J.; CASELLES, V. y CASTELLVI, F. (1997): "A simple Method for Estimating the Latent Heat Flux over Grass from Radiative Bowen Ratio". *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 37, pp. 387-392.

ITIER, B. y RIOU, C. (1982): "Une nouvelle méthode de détermination de l`evapotranspiration réelle par thermographie infrarouge". *Journal de Recherches Atmospheriques*, Vol. 16, pp.113-125.

KUSTAS, W.P.; MORAN, M.S.; HUMES, K.S.; STANNARD, D.I.; PINTER Jr.; HIPPS, L.E.; SWIATEK, E. y GOODRICH, D.C. (1994): "Surface energy balance estimates at local and regional scales using optical remote sensing from an aircraft platform and atmospheric data collected over semiarid rangelands". *Water Resources Research*, Vol. 30, pp. 1241-1259.

MONTEITH, J. (1981): "Evaporation and surface temperature". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 107, pp. 1-27.

LAFLEUR, P.M. (1992): "Energy balance and evapotranspiration from a subartic forest". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 58, pp. 163-175.

NICLÒS, R.; CASELLES, V.; COLL, C.; VALOR, E. Y SÁNCHEZ, J.M. (2004): " In situ Surface Temperature Retrieval in a Boreal Forest under Variable Cloudiness Conditions". *Agricultural and Forest Meteorology*, (enviado).

NIE, D.; KANEMASU, E.T.; FRITSCHEN, L.; WEAVER, H.L.; SMITH, E.A.; VERMA, S.B.; FIELD, R.T.; KUSTAS, W.P. y STEWART, J.B. (1992): "An intercomparison of surface energy flux measurement systems used during FIFE 1987". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, pp. 18715-18724.

NORMAN, J.; KUSTAS, W. y HUMES, K. (1995): "Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 77, pp. 263-293.

PENMAN, H.L. y LONG, I.F. (1960): "Weather in wheat - an essay in micro-meteorology". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 86, pp. 16-50.

SÁNCHEZ, J.M.; CASELLES, V.; NICLÒS, R. y LAURILA, T. (2004a): "Evapotranspiration in a boreal forest using remote sensing". *Agricultural and Forest Meteorology*, (enviado).

SÁNCHEZ, J.M.; CASELLES, V.; VALOR, E.; COLL, C. y NICLÒS, R. (2004b): "Determinación del flujo de calor sensible desde un satélite". *Revista Española de Física*, (enviado).

SEGUIN, B. e ITIER, B. (1983): "Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 4(2), pp. 371-383.

VALOR, E. y CASELLES, V. (1996): "Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and Soth American Areas". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 57, pp. 167-184.

Determinación de la evapotranspiración en Cataluña mediante el uso de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica

J. Cristóbal Rosselló [1] y M. Ninyerola Casals [2]

(1) Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Barcelona, Edificio B, Cerdanyola del Vallès (Barcelona), 08193.
(2) Departamento de Biología Animal, Vegetal y Ecología. Unidad de Botánica. Universidad Autónoma de Barcelona, Edificio C, Cerdanyola del Vallès (Barcelona), 08193.

RESUMEN

El seguimiento de la evapotranspiración tiene importantes implicaciones en la modelización global y regional del clima y del ciclo hidrológico, así como para asesorar sobre el estrés medioambiental que afectan a los ecosistemas agrícolas y forestales. La Teledetección y los SIG son actualmente las únicas tecnologías capaces de proporcionar les medidas necesarias para el cálculo global y económicamente factible de la evapotranspiración. En este trabajo se presentan los primeros resultados de la determinación de la evapotranspiración real diaria (ETRd), a escala regional, de la mitad occidental de Cataluña (27.227 km^2), mediante el uso de una serie temporal de once imágenes del satélite Landsat-7 EMT+ y de los SIG, dando como resultado un conjunto de once mapas digitales con una resolución espacial de 60 metros (una área de 3.600 m^2) y con resolución temporal casi mensual de la ETRd de Cataluña durante el periodo 2002-2003. Para determinar la ETRd a escala regional, se ha utilizado el método semiempírico descrito por Seguin y Itier (1989) y Vidal y Perrier (1992), formulados a partir del método propuesto por Jackson et al. (1977), para el cual es necesario el cálculo de tres variables: la temperatura de la superficie terrestre, la temperatura del aire y la radiación neta. La temperatura de la superficie terrestre se ha obtenido a partir de la corrección por emisividades del canal térmico (canal 6) del Landsat-7 ETM+ (Hurtado et al., 1996; Valor et al. 2000). El cálculo de la temperatura del aire se ha llevado a cabo mediante técnicas de regresión múltiple y de interpolación espacial de

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

los datos provenientes de las estaciones meteorológicas a la hora de paso del satélite (Ninyerola et al., 2000). La radiación neta se ha estimado mediante la ecuación de balance radiativo. Los resultados obtenidos son de gran valor, debido a la dificultad en la obtención de datos de ETR en las cubiertas forestales.

Palabras Clave: *Evapotranspiración real, radiación neta, interpolación espacial, teledetección, Landsat.*

ABSTRACT

Evapotranspiration monitoring has important implications on global and regional climate modelization, as well as in the hydrological cycle and to assess about environmental stress that affect forest and agricultural ecosystems. Nowadays, Remote Sensing and Geographical Information Systems (GIS) are the most important techniques allowing the scientific community to compute the actual evapotranspiration in a feasible way. In this study we present the preliminary results in daily actual evapotranspiration (ETd) at a regional scale (North-West of Spain) by means of eleven Landsat-7 ETM+ images and GIS tools during the 2002-2003 period. The result of this analysis consists on a set of ETd GIS layers having 60 meters of spatial resolution (total area of 3600 m^2) with an almost monthly temporal resolution. The methodology proposed by Seguin and Itier (1989) and Vidal and Perrier (1992) has been used, requiring three main variables to compute the ETd: land surface temperature, air temperature and net radiation. Land surface temperature has been obtained by means of the Landsat-7 ETM+ thermal band emissivity correction (Hurtado et al., 1996; Valor et al. 2000). Air temperature has been computed by multiple regression analysis and spatial interpolation from meteorological ground stations at satellite pass (Ninyerola et al., 2000). Net radiation has been calculated by means of the raditive balance. These preliminary results are very interesting due to the difficulty in obtaining forest and crop ETd data and to the high spatial and temporal resolution used, not usual in such combination.

Key Words: *ActualEvapotranspiration, net radiation, spatial interpolation, remote sensing, Landsat.*

INTRODUCCIÓN

El seguimiento de la evapotranspiración tiene importantes implicaciones en la modelización global y regional del clima y del ciclo hidrológico, así como para asesorar sobre el estrés medioambiental que afecta los ecosistemas agrícolas y naturales (*Kustas y Norman,* 1996). La concentración atmosférica de gases causantes del efecto invernadero y de otros elementos climáticos como la precipitación, la nubosidad, la humedad y la distribución de

los vientos también afectarán a la temperatura. Uno de los procesos que pueden verse afectados con estos cambios es la evapotranspiración, que a su vez juega un papel clave en el balance hidrológico. Un incremento de la evapotranspiración en una determinada región, mientras que la precipitación se mantiene constante o se ve reducida, puede comportar un decremento en el agua disponible para los sistemas naturales y agrícolas, así como para suplir las necesidades humanas. Es por esto, que los métodos basados en la medida del balance hídrico y, entre ellos, el cálculo de la evapotranspiración, han sido ampliamente usados para estimar los efectos del cambio climático (*McKenney y Rosenberg,* 1993). Así mismo, la evapotranspiración también ha sido muy usada en las ciencias agroforestales para estimar las necesidades hídricas de los cultivos (*Delegido et al.,* 1991). Actualmente, la Teledetección es la única tecnología capaz de proporcionar las medidas radiométricas necesarias para el cálculo de la evapotranspiración de una manera global y económicamente factible (*Kustas y Norman,* 1996).

La evaporación representa la cantidad de agua, que por el proceso físico de vaporización, se transfiere a la atmósfera proveniente del suelo. En un suelo con vegetación existe, además, una aportación de agua a la atmósfera por parte de la transpiración de las plantas, principalmente a través de los estomas. Ambos fenómenos, evaporación y transpiración, se dan al mismo tiempo en la naturaleza y, es por esto, que se usa el término de evapotranspiración para describir el proceso total de transferencia de agua a la atmósfera desde suelos con vegetación (*Delegido et al.*, 1991). La evapotranspiración constituye un importante elemento que enlaza el ciclo hidrológico y el balance de energía superficial, permitiendo a partir de la transferencia de masa y energía mantener unos niveles energéticos e hídricos adecuados en el sistema tierra-atmósfera (*Sánchez y Chuvieco*, 2000).

La evapotranspiración depende de dos tipos de factores: los climáticos y los intrínsecos a la superficie del objeto. Los factores climáticos son la radiación global, la velocidad del viento, la temperatura del aire y la humedad del aire. Los principales factores locales son el albedo, la emisividad de la superficie, la rugosidad del suelo, el tipo de planta, el tipo de suelo y el contenido de agua en el suelo (*Delegido et al.,* 1991).

En este trabajo se presenta una metodología basada en el método propuesto por *Seguin y Itier* (1989) y *Vidal y Perrier* (1992) para la determinación de la evapotranspiración real (ETR) a escala regional, de la mitad occidental de Cataluña, mediante el uso de una serie temporal de once imágenes del satélite Landsat-7 EMT+ y de los Sistemas de Información Geográfica. El resultado final consistirá en un conjunto de once mapas digitales con una resolución espacial de 60 metros (una área de 3.600 m^2) y con resolución temporal casi mensual de la evapotranspiración real de Cataluña.

MATERIAL Y ÁREA DE ESTUDIO

En este trabajo se han utilizado 11 imágenes del satélite Landsat-7 ETM+ de la órbita 198 y las filas 31 y 32 de las siguientes fechas: 11/01/2002, 12/02/2002, 01/04/2002, 19/05/2002, 07/08/2002, 24/09/2002, 26/10/2002, 27/11/2002, 14/01/2003, 19/03/2003 y 04/04/2003.

El ámbito geográfico del área de estudio corresponde a la parte occidental de Cataluña y está definido por la siguientes coordenadas ubicadas en el huso UTM 31-N: 258000 (UTM X mínima), 535020 (UTM X máxima), 4485000 (UTM Y mínima) y 4752000 (UTM Y máxima), con una superficie de 27227 km^2.

METODOLOGÍA

El método usado para el cálculo de la evapotranspiración real diaria es el propuesto por *Seguin e Itier* (1989) y *Vidal y Perrier* (1992), al ofrecer éste un cálculo de la ETR a escala regional, teniendo en cuenta no sólo las superficies cultivadas sino también las superficies de vegetación natural. Este método puede ser usado para calcular la ETR con un error de ±1 mm día^{-1} en días claros. En una área extensa es casi imposible contar con una cubierta completamente libre de nubes. Aun así, y puesto que la mayoría de imágenes presentan estas condiciones, se ha decidido adoptar la asumción de una atmósfera libre de nubes.

Según los autores, el método propone dos alternativas para calcular la ETR en función de:

1- Si $(T_{st} - T_a) < 0$, condiciones estables, se aplica la siguiente ecuación:

$$ETR_d - Rn_d = -0.18 \cdot (T_{st} - T_a) \quad (1)$$

2-Si $(T_{st} - T_a) > 0$, condiciones inestables, se aplica la siguiente ecuación:

$$ETR_d - Rn_d = -1.1 - 0.25 \cdot (T_{st} - T_a) \quad (2)$$

dónde:

Rn_d: radiación neta diaria (mm día^{-1}).

T_{st}: temperatura de la superficie terrestre (K).

T_a: temperatura del aire (K).

El subíndice $_d$ hace referencia a un periodo diario.

Según *Vidal y Perrier* (1992), la temperatura del aire y la temperatura de la superficie terrestre tendrían que obtenerse, aproximadamente, entre las 13:00 y 14:00 hora solar local, al darse en este intervalo los valores máximos de la temperatura de la superficie terrestre y, por lo tanto, las diferencias diarias más importantes entre esta temperatura y la temperatura del aire que dan lugar al cálculo de la ETR. Landsat-7 ETM+ pasa aproximadamente entre las 10:00 y las 11:00 hora solar local, ahora bien, según *Lagouarde y Olioso* (1995), la temperatura de la superficie terrestre captada por un sensor aproximadamente entre las 10:00 y las 11:00 o, entre las 13:00 y 14:00, es igualmente útil para estimar la ETR en días claros.

El cálculo de las variables implicadas en la ecuación del cálculo de la ETR (ec. 1 y 2) se ha llevado a cabo según las siguientes metodologías:

Corrección geométrica de las imágenes: las imágenes se han corregido geométricamente mediante técnicas avanzadas basadas en polinomios de primer grado con un ajuste polinómico

con zetas y considerando el relieve a través de un MDE (*Palà y Pons*, 1995). Las imágenes se han corregido con una resolución espacial de 15 metros para el canal pancromático, 30 metros para los canales multiespectrales y 60 metros para el canal térmico.

Corrección radiométrica de las imágenes (canales no térmicos): la corrección radiométrica se ha llevado a cabo mediante el método propuesto por *Pons y Solé* (1994). El objetivo de este método es reducir la presencia de artefactos no deseados provocados por los efectos de la atmósfera o de la iluminación diferencial provocada por la hora del día, el día del año, la posición de la Tierra y el relieve (zonas más o menos iluminadas, ocultas, sombras proyectadas, etc). La conversión de DN a radiancias se ha realizado mediante la lectura de los datos incluidos en la cabecera de cada imagen, aunque en el caso del formato original de las imágenes (formato CEOS) se ha de tener en cuenta en la lectura de estos parámetros (*Cristóbal et al.*, 2003).

Temperatura del aire: se ha calculado mediante técnicas de regresión múltiple y de interpolación espacial de los datos provenientes de las estaciones meteorológicas a la hora de paso del satélite *Ninyerola et al.*, (2000) y *Pla* (2001). Esta metodología ha sido aplicada en la elaboración de mapas climáticos mensuales y también ha mostrado su utilidad en la obtención la temperatura del aire en una franja horaria de un día en concreto. Este método, basado en un análisis de regresión múltiple, donde la temperatura del aire a la hora exacta de paso del satélite es estimada mediante una media ponderada de las temperaturas entre las 10:00 y 11:00 hora solar local, como variable dependiente y, la altitud, la continentalidad, la latitud y la radiación solar potencial como variables independientes. Mediante la validación de los mapas (con datos independientes) se han obtenido unos resultados operativos con unos coeficientes de determinación (r^2) entre 0,67 y 0,96 aunque los resultados en la mayoría de las fechas están comprendidos entre 0,70 y 0,82. Estos resultados hacen posible poder calcular la ETR en zonas extensas.

Emisividad de la superficie: para la determinación de la emisividad del suelo y la vegetación se ha seguido el método propuesto *Valor et al.* (1996). El método propone calcular los valores de emisividad de una superficie a partir de la relación existente entre el índice NDVI y la emisividad de las superficies (*van de Griend y Owe*, 1993); y los valores de emisividad obtenidos en el laboratorio y/o en el campo.

Definimos como emisividad efectiva de una superficie:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \delta\varepsilon \qquad (3)$$

donde:

ε_0: es la parte de la emisividad que corresponde a la radiación directa de los elementos que componen la cubierta y se establece como la media de las emisividades de los elementos que la componen. Esta parte de la emisividad no contempla las reflexiones internas de las diferentes cubiertas. Los valores de emisividad de las cubiertas vegetales varían entre 0,980 y 0,990, con un valor medio de 0,985 ± 0,007 y los valores de emisividad de los suelos varían entre 0,950 y 0.970 con un valor medio de 0,960 ± 0,010 en la región espectral situada entre los 10,5 y 12,5 mm, región espectral donde se sitúa la banda térmica del Landsat-7 ETM+ (*Rubio et al.*, 1996). Según *Valor et al.* (1996), este término se resuelve según la ecuación (4).

$$\varepsilon_0 = 0.985 \cdot Pv + 0.960 \cdot (1 - Pv) \quad (4)$$

donde:

Pv: es la proporción de la vegetación obtenida a partir del índice NDVI según el método propuesto por *Valor y Caselles* (1996).

δε: es un término relacionado con la radiación que llega al sensor indirectamente por la vía de las reflexiones internas que tienen lugar entre las paredes y el tierra de las superficies rugosas naturales. Este efecto se conoce con el nombre de efecto de cavidad e implica que la radiación observada por el sensor es mayor que la emitida directamente por las superficies rugosas. (*Caselles y Sobrino*, 1989; *Sobrino et al.*, 1991; *Sobrino et al.*, 2000). Al presentar este término una gran complejidad en su cálculo se ha estimado su valor en las superficies forestales a partir de los datos del *"Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya"* (*Gracia*, 2002). Para el resto de las cubiertas se han utilizado los valores citados en la bibliografía (*Caselles y Sobrino*, 1989; *Valor y Caselles*, 1996)

Temperatura de la superficie terrestre: dada la ausencia de perfiles atmosféricos a la hora de paso del satélite para llevar a cabo la corrección atmosférica y, dado que la modelización con las atmósferas estándar en latitudes medias de verano e invierno de MODTRAN (*Kneisys et al.*, 1995) no han dado buenos resultados, se ha llevado a cabo la corrección sólo por emisividades de la banda térmica del Landsat-7 ETM+ por el método propuesto por *Badenas y Caselles* (1992), *Hurtado et al.* (1996) y *Valor et al.* (2000).

$$T_{st} = T_{ab} + \{((1-\varepsilon)/\varepsilon) \cdot (T_{ab}/n)\} \quad (5)$$

donde:

T_{st}: temperatura de la superficie terrestre (K).

T_{ab}: temperatura aparente de brillo (K).

ε: emisividad de la superficie.

n: parámetro radiométrico que depende del canal y del intervalo de temperaturas considerado. Este valor, en el caso del canal térmico del Landsat-7 ETM y por el rango de temperaturas habituales (200 a 350 K) es igual a 4.7774 (*Badenas y Caselles*, 1992).

Radiación Neta: para el cálculo de la radiación neta instantánea se ha partido de la ecuación del balance radiativo:

$$Rn = Rs\downarrow \cdot (1-\alpha) + \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{st}^4 \quad (6)$$

donde:

α: albedo de la superficie calculado en base al método propuesto por *Dubayah* (1992) mediante la suma ponderada de los canales del visible, infrarrojo cercano y infrarrojo medio (canales 1, 2, 3, 4, 5, y 7 del Landsat-7 ETM+).

$R_{s\downarrow}$: radiación de onda corta incidente. Según *Martín Vide* (1991), *Moran et al.* (1989) y *Delegido et al.* (1991), este término se puede aproximar a la radiación solar global. La radiación solar global potencial instantánea se ha calculado según el metodología propuesta por *Pons* (1996).

T_a: temperatura del aire (K).

T_{st}: temperatura de la superficie terrestre calculada (K).

σ: constante de Stephan-Boltzmann.

ε: emisividad de la superficie.

ε_a: emisividad del aire. Ésta se ha calculado mediante la ecuación propuesta por *Idso* (1981):

$$\varepsilon_a = [0.7 + 5.9 \cdot 10^{-5} \cdot e \cdot \exp(1500/T_a)] \quad (7)$$

dónde:

e: presión del vapor de agua (kPa) calculada a partir de *Allen et al.* (1989).

Para la conversión de los valores instantáneos de radiación neta (Rn_i) a valores diarios (Rn_d) se ha seguido la relación propuesta por *Seguin e Itier* (1983), donde los valores diarios de Rn se pueden derivar a partir de la siguiente expresión:

$$Rn_d / Rn_i = 0.30 \pm 0.03 \quad (8)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se observa en el cuadro 1, la media de la ETR aumenta desde las fechas invernales, dándose un máximo en las fechas finales de primavera y principios de verano, y descendiendo en las fechas de otoño. Se observa también que la media de los valores de ETR en fechas de distintos años (11/01/2002, 01/04/2002, 14/01/2003 y 04/04/2003) presentan valores similares.

Los valores máximos de ETR para cada una de las fechas corresponden siempre a zonas de vegetación natural y los valores mínimos corresponden a zonas con vegetación escasa o nula. Aunque los valores máximos de ETR presentan valores muy elevados en la mayoría de las fechas, el 95% de los píxeles está siempre por debajo de estos valores. La presencia de estos valores máximos se puede atribuir al error del modelo en sí y a la propagación de errores en el cálculo de cada una de la variables que integran el modelo.

Cuadro 1. Estadísticos de la evapotranspiración real (mm día^{-1}) de cada fecha del área de estudio. Des. Est.: Desviación estándar; Mín: Mínimo; Máx: Máximo.

Fecha	Media	Des. Est.	Mín.	Máx.
11/01/2002	2.9	0.84	0.0	7.4
12/02/2002	3.8	1.05	0.0	9.2
01/04/2002	6.2	1.21	0.0	11.1
19/05/2002	9.1	1.28	0.4	13.1
07/08/2002	7.0	1.29	0.0	11.6
24/09/2002	5.6	1.24	0.0	10.7
26/10/2002	5.6	1.11	0.9	10.6
27/11/2002	3.1	0.90	0.0	7.9
14/01/2003	3.1	0.90	0.1	7.8
19/03/2003	5.4	1.22	0.0	10.3
04/04/2003	6.1	1.23	0.0	11.0

En la figura 1 se puede observar la variación temporal de la ETR durante los años 2002 y 2003 para las fechas seleccionadas en una zona comprendida entre las comarcas de la Noguera y el Urgell en la provincia de Lérida. Como se observa en estas imágenes, los valores de ETR de las zonas agrícolas (correspondientes a cultivos de regadío e indicados con la letra A en la figura 1) varían en función de que las parcelas estén o no cultivadas, dándose valores máximos en las parcelas cultivadas. Como ya se ha mencionado anteriormente, la ETR de la vegetación natural es siempre superior a la ETR de los cultivos (correspondientes a comunidades arbustivas bajas y encinares e indicados con la letra B en la figura 1).

Debido a la falta de corrección atmosférica del canal térmico del Landsat-7 ETM+, al posible error introducido en el cálculo de las otras variables implicadas en el método y al no disponer de datos de campo para verificar el modelo, se asume que el modelo presenta un error de ±1 mm día^{-1} según *Seguin e Itier* (1983) aunque, seguramente, este error sea mayor.

CONCLUSIONES

La complejidad de la metodología expuesta para el cálculo de la evapotranspiración hace que los resultados se tengan que tomar como preliminares. Aun cuando el método se puede mejorar determinando con mayor exactitud cada uno de sus componentes, los resultados obtenidos se pueden considerar correctos a una escala regional. Pese a no poder verificar los datos cuantitativamente en términos absolutos, creemos que el método ha dado unos resultados aparentemente operativos en términos relativos.

El hecho de poder contar con una serie larga de imágenes repartida a lo largo del año ha permitido observar las limitaciones que presenta el método para estimar los diferentes parámetros implicados en el cálculo de la evapotranspiración.

En la bibliografía consultada hay trabajos que dan mejores resultados, pero se trata de zonas más pequeñas, uniformes y con datos de campo. Haría falta, aun así, comprobar la aplicabilidad de estos métodos en una serie de imágenes más larga y en una zona de estudio más amplia. En este estudio, se ha optado por la visión más sinóptica del territorio que ofrece la Teledetección y gracias al hecho de poder contar con las imágenes de alta resolución espacial que proporciona el Landsat-7 ETM+. En el futuro se espera mejorar los resultados y, si es posible, obtener datos de campo de los diversos parámetros implicados en el cálculo de la evapotranspiración el mismo día del paso del sensor para poder verificar los resultados.

El método de obtención de unos valores óptimos de la temperatura de la superficie terrestre sólo ha funcionado en uno de los términos, la emisividad. Los parámetros implicados en la corrección atmosférica no han podido determinar más precisión.

Una profundización en el conocimiento de la concentración de vapor de agua y de la temperatura de la atmósfera en sus diversas capas mediante el análisis de las radiosondas disponibles, así como disponibilidad de información de otros satélites, como por ejemplo el NOAA-AVHRR, darían lugar a un mejor conocimiento del vapor de agua y de la temperatura atmosférica ascendente, y, por lo tanto, a una mejor corrección atmosférica.

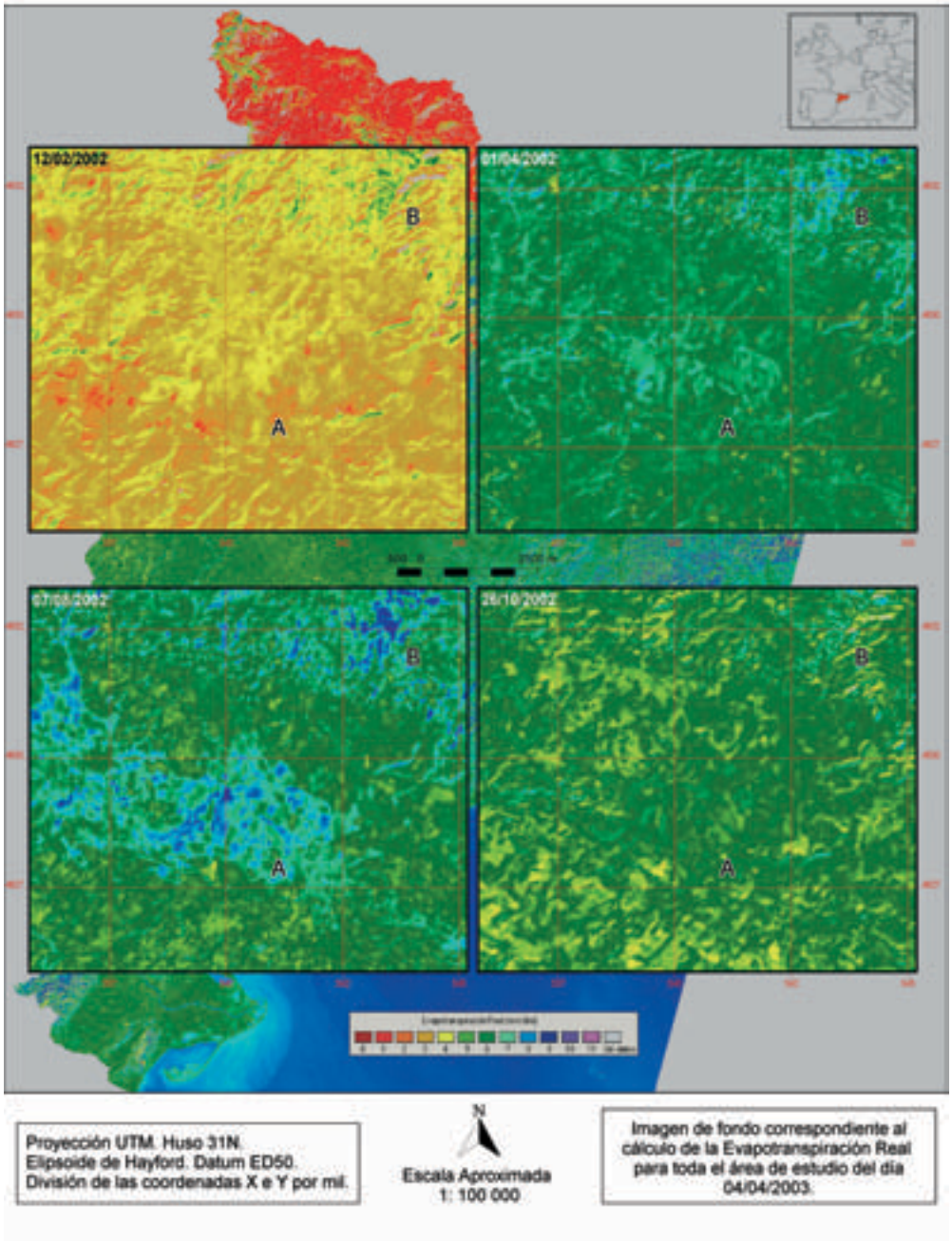


Figura 1. Evolución de la evapotranspiración en Cataluña durante el periodo 2002 - 2003.

Los modelos de las temperaturas del aire obtenidos presentan unos coeficientes de determinación (r^2) muy próximos a 0,7 en la mayoría de los casos y, por lo tanto, son adecuados para realizar la corrección atmosférica de las imágenes del canal térmico del Landsat-7 ETM+ y en el cálculo de la evapotranspiración. En ninguno de los estudios consultados no se comenta la modelización de la temperatura mediante técnicas de interpolación SIG. Parecería que en éstos se usan valores constantes de temperatura, aun cuando no se profundiza en este tema, seguramente, por tratarse de trabajos con unas áreas de estudio más pequeñas y uniformes. Cualquier estudio a nivel regional que pretendiera tratar un área como nuestra zona de estudio posiblemente tendría que tener en cuenta este tipo de aproximaciones.

Finalmente, respecto a la radiación neta (Rn), hay que considerar que la aplicación de ecuaciones con diversos parámetros multiplicativos puede inducir a una mal cálculo de la Rn. En un futuro se probarán otras metodologías para la determinación de la radiación neta, por ejemplo su determinación mediante el uso del satélite NOAA-AVHRR (*Sobrino*, 2000), así como un estudio detallado de la propagación de errores en los diferentes modelos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Agència Catalana de l'Aigua y al Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya los recuros materiales proporcionados en la adquisición y procesado de las imágenes.

REFERENCIAS

Allen, R. G.; Pereira. L. S.; Raes, D.; Smith, M. (1998): *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requeriments*. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56.

Badenas, C. y Caselles, V. (1992): "A simple technique for estimating surface temperature by means of a thermal infrared thermometer". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 13, pp. 2951-2956.

Caselles, V. y Sobrino, J. A. (1989): "Determination of frosts in oranges groves from NOAA-9 AVHRR data". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 29, pp. 135-46.

Cristóbal, J.; Pons, X.; Serra, P. (2003): "Sobre el uso operativo de Landsat-7 ETM+ en Europa. X Congreso de Teledetección". *X Congreso Nacional de Teledetección*. Cáceres 17, 18 y 19 de septiembre del 2003.

Delegido, J.; Caselles, V.; Hurtado, E. (1991): "Determinación a escala regional de la evapotranspiración". En S. Gandía, J. Meliá (Eds.), *La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: Agricultura*. Curso de Postgrado, Universitat de Valencia. Estudi General. Departament de Termodinámica. Unidad de Investigación de Teledetección.

Dubayah, R. (1992): "Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data". *Water resources research*, Vol. 28, pp. 2469-2484.

Gracia, C. (2002): *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Regió Forestal I*. Centre de Recerca Ecológica i Aplicacions Forestals. Bellaterra.

van de Griend, A. A. y Owe, M. (1993): "On the relationship between thermal emissivity and the nor-

malized difference vegetation index for natural surfaces". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, pp. 1119-1131.

Hurtado, E.; Vidal, A.; Caselles, V. (1996): "Comparison of two atmospheric correction methods for Landsat TM thermal band". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, pp. 237-247.

Idso, S. B.(1981): "A set of equations form full spectrum and 8 to 14mm and 10.5 to 12.5 mm thermal radiation from cloudless skies". *Water resources research*, Vol 17, pp.: 295-304.

Kneisys, F. X.; Abreu, L. W.; Anderson, G. P.; Chetwynd, J. H.; Shettle, E. P.; Berk, A.; Bernstein, L. S.; Robertson, D. C.; Acharya, P.; Rothman, L. S.; Selby, J. E. A.; Gallery, W. O.; Clough, S. A. (1995): *The MODTRAN 2/3 and LOWTRAN 7 model*. Ontar Corporation. North Andover. USA.241.60

Kustas, W. P. y Norman, J. M. (1996): "Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring ove land surfaces". Hydrological Sciences - *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 41, pp. 495-516.

Lagouarde, J. P. y Olioso, A. (1995): "Interest of mid-morning acquisition of surface temperature for deriving surface fluxes". *Remote Sensing Reviews*, Vol. 12, pp. 287-309.

Martín Vide, (1991): *Fundamentos de climatología analítica*. Colección Espacios y Sociedades, Serie General nº 22. Editorial Síntesis.

McKenney, M. y Rosenberg, N. J. (1993):"Sensitivity of some potencial evapotranspiration estimation methods to climate change". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 64, pp. 81-110.

Moran, M. S.; Jackson, R. D.; Raymond, L. H.; Gay, L. W.; Slater, P. N. (1989): "Mapping surface energy balance components by combining Landsat Thematic Mapper and ground-based meteorological data". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 30, pp. 77-87.

Ninyerola, M.; Pons, X. i Roure, JM. (2000): "A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques". *International Journal of Climatology*. Vol. 20, pp. 1823-1841.

Palà, V. y Pons, X. (1995): "Incorporation of relief into geometric corrections based on polynomials". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61, pp. 935-944.

Pla, M. (2001): "Modelització climatològica de la temperatura i la precipitació a les Illes Balears (Mar Mediterrani)".En IEEC (Ed.), *Màster en Teledetecció i Sistemes d'Informació Geogràfica 2000/ 2001*.Barcelona.

Pons, X. (1996). "Estimación de la radiación solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica". En Juaristi, J; I. Moro, *Modelos y Sistemas de Información en Geografía*. pp. 87-97.

Pons, X. y Solé-Sugrañes, L. (1994): "A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 47, pp. 1-14.

Rubio, E.; Caselles, V.; Badenas, C. (1997): "Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14 μm wave band: analysis of two field methods". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, pp. 490-521.

Sánchez, M. y Chuvieco, E. (2000): "Estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET0, a partir de imágenes NOAA-AVHRR". *Revista de Teledetección*, Vol. 14, pp. 11-21.

Seguin, B. y Itier, B (1983): "Using midday surface temperature to estimate daily evapotranspiration from satellite IR data". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 4, pp. 371-383.

Sobrino, J. A.; Coll, C.; Caselles, V. (1991): "Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR channels 4 and 5". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 38, pp. 19-34.

Sobrino, J. A.; Raissouni, N.; Kerr, Y.; Olioso, A.; López-García, M. J.; Belaid, A.; El Kharraz, M. H.; Cuenca, J.; Dempere, L. (2000): *Teledetección.* Sobrino, J. A. (Ed), Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia. Valencia, España.

Valor, E. y Caselles, V. (1996): "Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas". *Remote Sensing of Environment,* Vol. 57, pp. 167-184.

Valor, E.; Caselles, V.; Coll, C.; Sánchez, F; Rubio, E.; Sospedra, F. (2000): "Simulation of a medium-scale-surface-temperature instrument from Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(16): 3153-3159.

Vidal, A. y Perrier, A. (1989): "Analysis of a simplified relation for estimating daily evapotranspiration from satellite thermal IR data". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, pp. 1327-1337.

Distribución espacial de material en suspensión y clorofila-a en cuerpos de agua naturales y artificiales

M. Pagot[1], A. Rodríguez[1], L. F. Niencheski[2], G. Hillman[1], M. Corral[1], C. Oroná[1], M. Scavuzzo[3], R. Bazán[1], A. Cossavella[4], S. Del Olmo[5], M.I. Rodríguez[1], N. Larrosa[1], E. Bonfanti[5], F. Busso[5], G. Plencovich[1] y N. Martínez[6]

(1) Laboratorio de Hidráulica, Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Argentina. Av. Vélez Sarsfield1601, Córdoba, CP 5000.
(2) Laboratorio de Hidroquímica, Dpto. de Química, Fundación Universitaria de Río Grande (FURG), Brasil.
(3) Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich (CONAE-UNC), Argentina.
(4) Dirección Provincial de Aguas Cordobesas (DiPAS), Argentina.
(5) Aguas Cordobesas (AACC), Córdoba, Argentina.
(6) Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, EPSG, UPV, (Valencia, España).

RESUMEN

En el presente trabajo se han aplicado técnicas de teledetección para modelizar la distribución espacial de parámetros sedimentológicos y biológicos en dos cuerpos de agua: la Laguna de Los Patos, ubicada al sur de Brasil, y el embalse Los Molinos, en la región central de Argentina. En ambos casos se han desarrollado modelos cuantitativos que correlacionan parámetros de calidad con valores de reflectividades medidos sobre imágenes LANDSAT. El primer caso de estudio, la Laguna de Los Patos, presenta una superficie aproximada de 10.360 km² y se conecta al sur con el Océano Atlántico. Las condiciones hidrometeorológicas en esta laguna (vientos, corrientes, marea) causan frecuentemente resuspensión de sedimentos. El ingreso de agua dulce por los tributarios representa el mayor mecanismo de transporte de material en suspensión, generalmente con dirección Norte-Sur. El segundo caso, el embalse Los Molinos, constituye la segunda fuente de suministro para agua potable de la ciudad de Córdoba. Las principales actividades desarrolladas en la cuenca son agrícola-ganaderas y se señalan como una de las causas del marcado deterioro de la calidad del agua, con signos de eutrofización y periódicos florecimientos algales.

Palabras claves: *Material en suspensión, clorofila-a, teledetección, modelo.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

In this work was applied technical of remote sensing for to model the space distribution of sedimentary and biological parameters in two bodies of water: the Patos lagoon, located to the south of Brazil, and the Los Molinos reservoir, in the central region of Argentina. In both cases, quantitative models have been developed that correlated parameters of quality with reflective values measured on images LANDSAT. The first one of study was the Patos lagoon with approximate surface of 10,360 km² and it is connected to the south with the Ocean Atlantic. The conditions hydrometeorological in this lagoon (winds, currents, tide) cause frequently resuspension of sediments. The entrance of fresh water from the tributary ones represents the biggest mechanism of matter transport in suspension, generally with orientation North-south. The second case was the Los Molinos reservoir, which is the second supply source for drinkable water of the city of Córdoba. The main activities developed in the basin are agricultural-cattlemen and they are pointed out like one of it is the causes of the marked deterioration of the quality of the water, with eutrophication signs and periodic algal blooms.

***Key Words**: Material in suspension, chlorophyll-a, remote sensing, model.*

INTRODUCCIÓN

La Laguna de Los Patos se sitúa entre -30° y -32° de latitud al sur de Brasil. Este es un cuerpo de agua de aproximadamente 10,360 km², conectado en su extremo sur con el Océano Atlántico. En la dirección NE-SO mide 250 km con un ancho promedio de 40 km y una profundidad media de 5 m (*Möller et al., 1999*). Entre los principales tributarios al sistema se encuentran los ríos Guaiba, Camaquã y el Canal São Gonçalo, con un aporte total medio anual de 1,800 m³/s y una distribución porcentual de 57%, 15% y 28%, respectivamente (Figura 1). Las condiciones hidrometeorológicas en esta Laguna (vientos, corrientes, marea) representan las principales causas de resuspensión de sedimentos, con un mecanismo de transporte dominado en mayor medida por los tributarios. Las características del tipo de sedimentos y la metodología utilizada para su medición se presenta en *Niencheski et al.* (1994 y 2001).

El segundo lugar de estudio, el Embalse Los Molinos (Figura 2) presenta un área de 21,1 km² y se ubica en la región semiárida central de Argentina. La cuenca de aporte al embalse abarca una superficie de 894 km².

Las principales actividades desarrolladas en la cuenca del embalse Los Molinos son de tipo agropecuario prevaleciendo la ganadería en la mayor parte de la cuenca. Los principales cultivos de la zona son de soja, maíz y papa. Desde hace 30 años se señalan signos de eutroficación tales como proliferaciones de algas, junto con elevadas concentraciones de fosfato y nitrógeno amoniacal (*Bonetto et al.,* 1976). Los antecedentes más recientes (*Rodríguez et al.,* 2002 *y Cossavella,* 2003) verifican las condiciones eutróficas de este cuerpo de agua en relación con los valores límites establecidos por la *OECD* (1982).

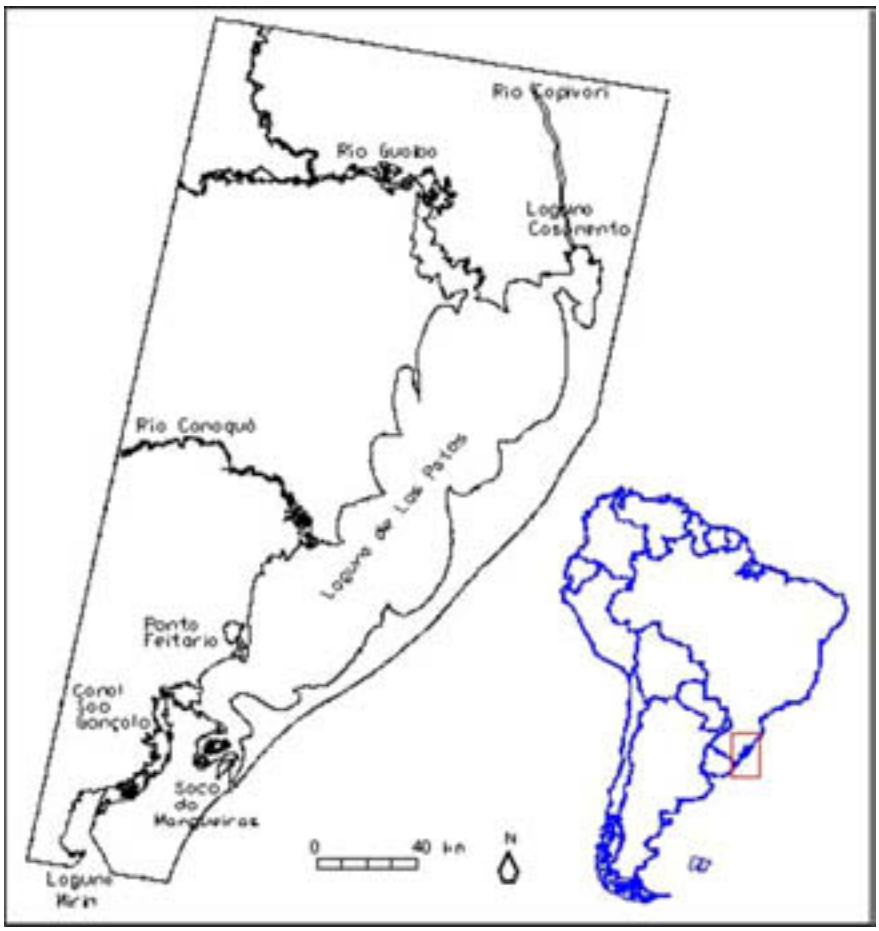


Figura 1. Esquema de ubicación de la Laguna de los Patos, sur de Brasil.

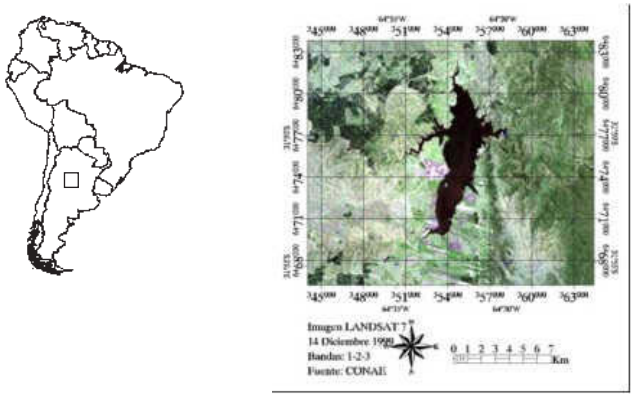


Figura 2. Ubicación relativa del embalse Los Molinos.

El principal objetivo planteado fue definir y calibrar modelos de distribución espacial que permitan cuantificar parámetros sedimentológicos y de calidad como material en suspensión (MES) en la Laguna de Los Patos y clorofila-a (Cl-a) en el embalse Los Molinos, en base a niveles de reflectancia obtenidos por teledetección como herramienta complementaria a los métodos tradicionales.

Datos de campañas

Los datos disponibles de MES y otros parámetros como temperatura, pH, conductividad, profundidad de disco Secchi, etc., fueron obtenidos en campañas mensuales llevadas a cabo durante marzo a noviembre de 1999 por la Fundación Universitaria de Río Grande (FURG-Brasil), sobre diez estaciones de monitoreo (Figura 3).

Figura 3. Esquema de ubicación de las estaciones de monitoreo en Los Patos. De arriba hacia abajo: R1: Desembocadura Guaiba, P1 a P8: Laguna de los Patos, desde el norte al sur y O1: Salida al Océano Atlántico.

En el marco de un proyecto de investigación conducido por la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina), se iniciaron también en 1999 campañas estacionales de monitoreo de agua y sedimentos en el embalse Los Molinos. Actualmente estas campañas se realizan mensualmente y con la participación de otras instituciones como la Dirección Provincial de Agua y Saneamiento (DiPAS) y la empresa Aguas Cordobesas S.A., actual concesionaria del servicio de agua potable para la ciudad de Córdoba. En esta etapa de trabajo se procesaron datos correspondientes al período 1999-2003.

El monitoreo del embalse se realizó en seis estaciones (Figura 4). Los parámetros medidos *in situ* fueron: temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad, turbiedad y profundidad de disco Secchi. En laboratorio se determinaron: Cl-a, alcalinidad, dureza total, fósforo

total (PT), fósforo reactivo soluble (PRS), serie de nitrógeno, carbono orgánico total, fitoplancton, iones mayoritarios, pesticidas, coliformes totales (CT) y termorresistentes (CTr).

Figura 4: Esquema de ubicación de las estaciones de monitoreo en Los Molinos.

Datos satelitales

Se utilizaron para este estudio, imágenes productos de los satélites LANDSAT 5 y 7, correspondientes a los años 1999 a 2003 cedidas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) a través del Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich" (CONAE-UNC). Cubrieron la zona de la Laguna de los Patos un total de 8 imágenes satelitales con las cuales se generaron 4 mosaicos completos de la Laguna (debido a que la extensión de la misma (cerca de 250 km) superó el área de cobertura de las imágenes LANDSAT: 180 km aproximadamente de lado). Mientras que en Los Molinos se procesaron 7 imágenes próximas a las fechas de campañas de muestreo.

El procesamiento de las imágenes se realizó con el programa ENVI 3.5, *The Environment for Visualizing Images*, desarrollado por *ESRI* (2001).

Cuadro 1: Fechas de campañas e imágenes satelitales disponibles en Los Patos (Año: 1999) y en Los Molinos (período 1999-2003).

Los Patos			**Los Molinos**		
Campaña	Imágenes x 2	Sensor	Campaña	Imágenes	Sensor
03/03/1999	17/03/1999	Landsat 7	15/12/1999	14/12/1999	Landsat 7
08/08/2000	24/08/1999	Landsat 5	01/06/2000	30/05/2000	Landsat 5
22/09/1999	17/09/1999	Landsat 7	16/08/2000	18/08/2000	Landsat 5
03/11/1999	12/11/1999	Landsat 7	15/11/2000	14/11/2000	Landsat 7
			11/06/2002	13/06/2002	Landsat 7
			07/01/2003	07/01/2003	Landsat 7
			12/03/2003	12/03/2003	Landsat 7

En el Cuadro 1 se observa que las imágenes satelitales disponibles en su mayoría difieren en uno o dos días respecto de la fecha de campaña, y sólo dos coinciden (07/01/03 y 12/03/03) ya que a partir del año 2003 inclusive se logró coordinar los monitoreos con el paso de los satélites LANDSAT. Para evaluar la posibilidad de utilización de estas series de imágenes se verificó que en el intervalo entre las respectivas fechas de campaña e imagen no se registraran alteraciones climáticas de importancia.

METODOLOGÍA

La metodología adoptada consistió en utilizar dos tipos de métodos empíricos (deductivo e inductivo). El primero, consistió en convertir, a partir de funciones ya establecidas valores de niveles digitales (ND) a valores físicos de reflectividad. Se utilizaron factores definidos propios de cada banda y cada sensor (*Chuvieco*, 2002). Por otro lado, en el método inductivo se ha inferido una función matemática entre los valores observados de ND convertidos a reflectividad con respecto a los valores medidos de MES y Cl-a.

El resultado del proceso de identificación de los ND para cada estación y fecha se consideró efectuando previamente un filtro espacial con respecto a los ocho píxeles vecinos. Esto se realizó con el objetivo de disminuir el error introducido en las coordenadas de la estación y su ubicación en la imagen.

En la Figura 5 se presenta el gráfico resultante del proceso anterior con datos de Los Patos, a partir de los que se identificó una tendencia en aumento de los valores de ND a medida que aumentan las concentraciones de los parámetros de campo. Esto derivó en la definición de una ley logarítmica entre las respectivas variables (ND y MES por un lado y ND y Cl-a por otro lado), lo que hace al desarrollo del método inductivo.

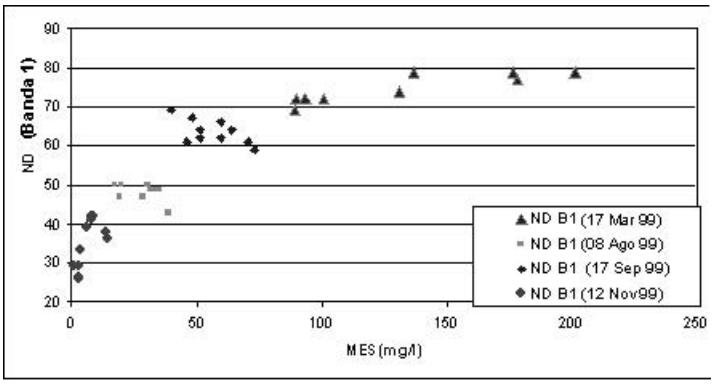


Figura 5: Niveles digitales (ND) medidos en la Banda 1 (B1) de cada imagen satelital junto con los respectivos valores de MES medidos en campaña. (Laguna de Los Patos)

De esta forma el algoritmo adoptado para ambos casos presentó la misma estructura matemática (Ecuación 1). Éste se basó en un proceso de regresión múltiple entre los datos de campaña y los datos de reflectividad calculados en cada banda. Se realizó una evaluación entre las distintas alternativas propuestas en los antecedentes consultados, seleccionando aquélla que mejor superó las pruebas estadísticas realizadas –prueba de los coeficientes de regresión, de significancia, etc.– (*Hines et al.*, 1996).

La fórmula propuesta se adaptó a partir de la recomendada para estimar la profundidad de disco Secchi (*Kloiber et al*., 2002). Se han utilizado dos bandas espectrales (1 y 2), correspondiendo a la región azul (0,45 – 0,52 µm) y verde (0,53 – 0,62 µm) del espectro electromagnético, respectivamente.

$$Ln(y) = a \times \left(\frac{R1}{R2}\right) + b \times (R1) + c \qquad (1)$$

Donde *y* es el parámetro a calcular: MES (mg/L) o Cl-a (µg/L); R1 y R2 son los valores de reflectividad de las bandas 1 y 2, respectivamente. Los coeficientes *a*, *b* y *c* son los parámetros a ajustar por regresión múltiple. Para el conjunto de datos analizados se calibraron los coeficientes (a, b y c) de la Ecuación (1), basándose en una operación de regresión múltiple convencional (*Hines et al.*, 1996).

Así, la expresión resultante para estimar valores de MES a través de datos satelitales y hasta los 200 mg/L se presentan a continuación: (este límite se adoptó debido a la escasez de mediciones superiores a este valor, sólo se disponía de dos mediciones).

$$Ln(\text{MES}\,[\text{mg/L}]) = -4{,}6502 \times \left(\frac{R1}{R2}\right) + 12{,}3698 \times (R1) + 5{,}1550 \qquad (2)$$

En la relación planteada se observa que cuando en el agua se presentan importantes concentraciones de MES, la reflectividad en la banda azul (R1) tiende a aumentar, disminuyendo la reflectividad en la banda verde (R2). Esto explica el signo negativo en el primer término del segundo miembro en la ecuación (2), al vincular la reflectividad del agua en la banda azul y la concentración de MES medida. La expresión resultante para estimar Cl-a entre 0 y 10 µg/L, se presenta a continuación:

$$Ln(Cl-a\,[\mu\text{g/L}]) = -0{,}0329 \times \left(\frac{R1}{R2}\right) - 4{,}2854 \times (R1) + 1{,}9544 \qquad (3)$$

La relación planteada en la Ecuación (3) muestra que cuando se presentan concentraciones elevadas de Cl-a, la reflectividad en la banda azul (R1) disminuye, aumentando la reflectividad en la banda verde (R2). Esto explica el signo negativo en el segundo y tercer término del segundo miembro de dicha ecuación.

La relación con el MES arrojó un valor de coeficiente de determinación (R^2) igual a 0,72 determinado sobre 30 pares de valores en la Ecuación (2) y de 0,79 con 17 pares de valores en un intervalo de confianza de 95 % en la Ecuación (3).

En la Figura 6 se presentan las series de Cl-a calculadas con la Ecuación (3) (eje vertical) y las medidas en campañas (eje horizontal). En el mismo se observó la buena correlación alcanzada.

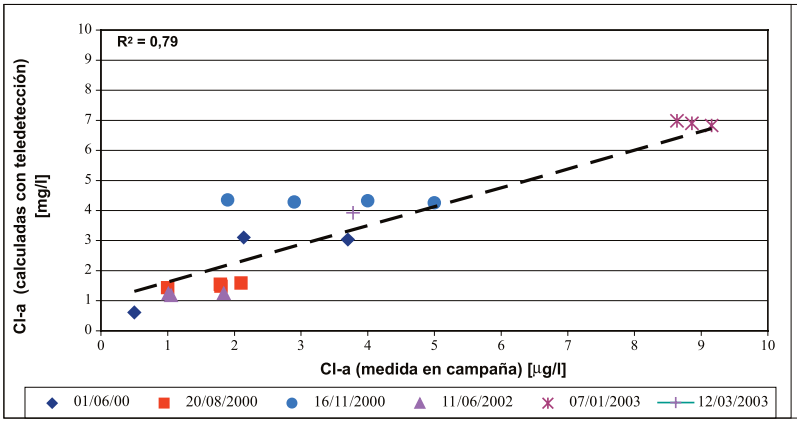


Figura 6. Valores de Clorofila-a medida en campaña y los respectivos calculados con valores de reflectividades.

Aplicación del modelo

La modelación requiere la posibilidad de combinar planos de acuerdo con varias ecuaciones matemáticas. De esta forma, la resolución de las ecuaciones 2 y 3, junto con la aplicación del programa ENVI 3.5, permitieron arribar a modelos de distribución espacial de MES y Cl-a en la Laguna de Los Patos y en el embalse Los Molinos, respectivamente. Ello se logró modificando los valores originales en el plano de las imágenes a través de las operaciones y transformaciones matemáticas detalladas.

En la Figura 7 se presenta el modelo propuesto aplicado sobre la imagen del día 17 de septiembre de 1999 en Los Patos. Se observa, al norte de la Laguna, altas concentra-

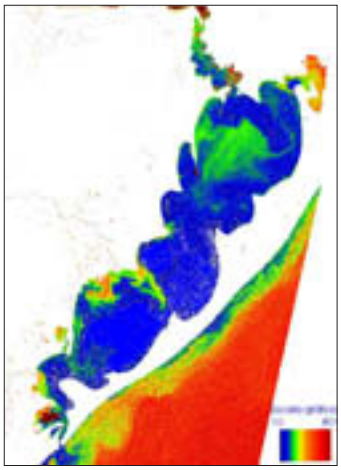


Figura 7: Modelo provisorio de MES aplicado sobre la imagen satelital del 17 de septiembre de 1999, con datos de campaña que variaron entre 10 y 80 mg/l.

ciones de MES con el aporte del río Guaiba (ver Figura 1). Según la escala gráfica se pueden estimar valores próximos a los 80 mg/l (correspondiendo 73.13 mg/l medidos en campaña). Se detectaron también, hacia la Laguna de Casamento al Noreste, pequeñas intrusiones entre rangos de 40 y 50 mg/l. Por otro lado, en la zona de desembocadura del río Camaquã, se observó la influencia de dicho ingreso sobre la costa oeste de la Laguna y una intrusión hacia el centro de la misma. La simulación no es válida en la zona del Océano Atlántico.

En la Figura 8 se presenta el resultado del modelo para distribución de Cl-a aplicado sobre una imagen del embalse Los Molinos correspondiente al día 18 de agosto de 1999. En la misma es posible distinguir mayores concentraciones de Cl-a en la zona norte del embalse incrementándose hacia la Toma (ver Figura 4).

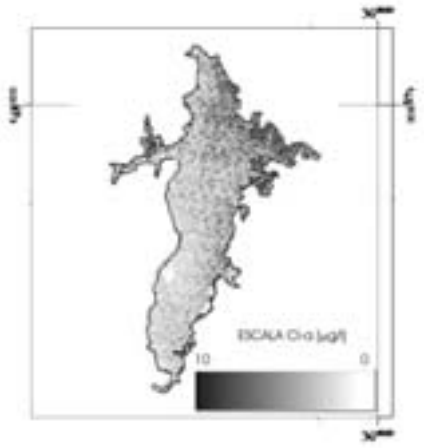


Figura 8: Distribución de Cl-a sobre imagen satelital del 18/08/00. Rango (0-10 µg/l).

CONCLUSIONES

Para evaluar el comportamiento espacial y temporal de la distribución de material en suspensión en la Laguna y de clorofila-a en el embalse, se aplicaron herramientas de teledetección que proporcionaron información temática espacial del cuerpo de agua y permitieron determinar y relacionar niveles de reflectividad con parámetros de calidad a través de la definición y calibración de algoritmos matemáticos.

Adoptando como correctas las leyes matemáticas deducidas (Ecuaciones 2 y 3) es necesario adquirir mayor cantidad de datos que validen el rango de valores calibrados. Es por esto, que es factible considerar a los modelos planteados como estimadores iniciales para cuantificar la distribución espacial de MES y Cl-a con apoyo satelital.

En resumen, los resultados obtenidos permitieron combinar metodologías de teledetección y simulación numérica para evaluar el comportamiento del sistema junto a los trabajos de campo.

REFERENCIAS

Bonetto, A.; Di Persia, D.; Maglianesi, R. y Corigliano, M.. (1976): "Caracteres limnológicos de algunos lagos eutróficos de embalse de la región central de la Argentina", *Ecosur*. Vol. 3, (5), pp. 47-120.

Cossavella, A. (2003): *Influencia de efectos antrópicos y naturales en el proceso de eutroficación de las aguas del embalse Los Molinos*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Tecnológica. Córdoba, Argentina. 600 p.

Chuvieco, E. (2002): *Teledetección ambiental*. 3ra edn. RIALP, S.A. Madrid. 587 p.

Delaney, P. (1965): *Fisiografia e geologia de superficie da planicie costeira do Rio Grande do Sul*. Publicacao special da Escola de Geologia de Porto Alegre. Brasil. Vol. 6, pp. 1-105.

ESRI. Manual del Programa ENVI V3.5. (2001): *Environmental System Research Institute, Redlands, California*,Estados Unidos (EE.UU). 750 p.

Hines, W. W. y Montgomery, D. C. (1996): *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 2nd edn. Editorial Continental. S.A. México.

Jupp, D. L. B.; Kirk, J. T. O. y Harris, G. P.(1994): "Detection, identification and mapping of cyanobacteria, using remote sensing to measure the optical quality of turbid inland waters". *Aust. J. Mar. Freshwater Res. EE.UU.* Vol. 45, pp. 801-828.

Kloiber, S. M.; Brezonik, P. L. y Bauer, M. E. (2002): "Aplication of LANDSAT imagery to regional-scale assessmentes of lake clarity". *Water Research. EE.UU.* Pergamon (eds.). Vol. 36, pp. 4330-4340.

Möller, O. (1996): *Hydrodynamique de la Lagune dos Patos. Mesures et modelisation*. Tesis doctoral. Universite Bordeaux I, France.

Niencheski, L. F. y Smith R. (1994): "Distribution of Particulate Trace Metal in Patos Lagoon Estuary (Brazil)". *Marine Pollution Bulletin*, Brasil. Vol. 28 (2), pp. 96-102.

Niencheski, L. F. y Baumgarten (2001): "Distribution of particulate trace metal in surrounding waters of Rio Grande City (Brazil)". *Aquatic Ecosystem Health & Management*. Brasil. Vol. 3(4), pp. 515-520.

Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) (1982): *Eutrophication of on monitoring assessment and control*. Reporte Final. *Cooperative Programme on monitoring of inland waters, eutrophication control*. Environment Directorate, París. 154 p.

Rodríguez A.; Avena, M.; Rodríguez, M.; Cossavella, A.; Oroná, C.; Del Olmo, S. Larrosa, N.; Bazán, R. y Corral, M. (2002): *Estimación de aportes de nutrientes de fósforo a los embalses San Roque y Los Molinos en Córdoba Argentina e implicancias en su gestión*. Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS. Buenos Aires. Nro. 60, pp. 45-51.

Caracterización espectral de la vegetación mediante espectro-radiometría, cámara hiperespectral e imágenes del satélite Hyperion

C. Robles, P. Vaughan, A. De Santis y E. Chuvieco

Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, C/ Colegios 2, 28801, Alcalá de Henares, Madrid.
(cristina.robles@uah.es)

RESUMEN

En los últimos años se ha puesto más énfasis en el estudio de aplicaciones tales como la estimación del peligro de ignición de la vegetación o en la clasificación de vegetación a partir de datos de satélite. Esto ha dado lugar a la necesidad de información precisa sobre la vegetación, como por ejemplo sus propiedades espectrales y su relación con parámetros biofísicos claves como el índice de área foliar (Leaf Area Index, LAI) o el contenido de humedad. Con los datos obtenidos durante las campañas de verano de 2003 y 2004 se ha elaborado una biblioteca espectral denominada ESPECTRA. Esta biblioteca contiene información sobre las especies vegetales más abundantes de la Comunidad de Madrid. Para ello, se han escogido especies arbustivas y arbóreas representativas y se ha medido su radiancia y reflectividad con un espectro-radiómetro (GER 2600) y una cámara hiperespectral (Specim). Las mediciones espectrales de campo están además documentadas con información auxiliar de parámetros biofísicos de interés como el LAI efectivo (LAIe), inclinación foliar (LAD), contenido de humedad de las hojas y medidas alométricas del dosel. Esta biblioteca está disponible gratuitamente a través de la página web del Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá: http://www.geogra.uah.es/espectra/ con el objeto de ayudar a otros estudios y grupos a complementar y validar su información.

En esta comunicación se presenta detalladamente la metodología utilizada para la adquisición de los datos que formarán las bibliotecas espectrales y una descripción de estas bibliotecas. Se presenta también una imagen Hyperion obtenida el 30 de julio de 2003 sobre

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

la zona este de la Comunidad de Madrid, con la que se pretende identificar las principales especies presentes en la Comunidad de Madrid.

***Palabras Clave**: Teledetección, biblioteca espectral, base de datos, clasificación vegetal, Hyperion.*

ABSTRACT

In the last years the interest in the estimation of fire danger and vegetation classification from satellite data has grown up. This type of applications requires accurate information about vegetation properties. Important vegetation properties such as spectral signature, leaf area index (LAI), and water content of vegetation are required for this type of studies. It is also important to know the relation among these parameters. During the summers 2003 and 2004 field campaigns have been carried out to measure the spectral signature of the most common Mediterranean species in the area of Madrid. A spectral library called ESPECTRA has been created with this data. A radiometer GER 2600 and a hyperspectral camera (Specim) have been used to measure the spectral response of the vegetation. The spectral measurements were complemented with biophysical parameters such as the leaf area index (LAI), leaf angular distribution (LAD), water content and size and location of the selected canopy. This information is available via internet through the website of the Department of Geography of the University of Alcalá (http://www.geogra.uah.es/espectra/).
In this paper we show the methodology employed for the acquisition of data for the spectral libraries and a description of these libraries. In addition, a Hyperion image obtained on July 30, 2003 over the area of Madrid will be presented. The most abundant species in the area of Madrid will be classified from this image

***Key Words**: Remote sensing, spectral library, data base, classification, Hyperion.*

INTRODUCCIÓN

La teledetección espacial ha mostrado ya en numerosos campos de aplicación sus posibilidades para obtener información de gran calidad para la mejor gestión del medio ambiente y los recursos naturales (*Barret y Curtis, 1992*). Entre sus propiedades más importantes para el estudio de las cubiertas vegetales cabe citar la observación cíclica que proporcionan, la transmisión de datos en tiempo real, la información sobre regiones no visibles del espectro, la visión sinóptica, su cobertura exhaustiva del territorio y el formato digital de los datos (*Chuvieco, 2002*).

Los sensores hiperespectrales ofrecen información en un espectro prácticamente continuo, lo que permite discriminar parámetros críticos de la vegetación y los suelos que no serían perceptibles con sensores convencionales. De esta manera se llega a discriminar diversos aspectos

muy específicos relacionados con la vegetación como el estado fenológico (*Chen et al., 1998*), la estructura de la vegetación (*Ustin y Trabucco, 2000*), el contenido de agua (*Serrano et al., 2000, Riaño et al., 1999*) o la cantidad de clorofila (*Zarco Tejada et al., 2000*). Hasta hace poco tiempo las imágenes hiperespectrales eran solamente aerotransportadas, pero con la puesta en órbita de sensores hiperespectrales como *Hyperion* (*http://eo1.usgs.gov/instru/hyperion.asp*) se abren nuevas posibilidades a la investigación, permitiéndose una cobertura sistemática de la Tierra y una reducción en el coste de adquisición de este tipo los datos. Estas nuevas oportunidades de obtener información espacial ponen de manifiesto la necesidad de dirigir nuestros esfuerzos a una mejor comprensión de los datos facilitados por estas plataformas. Para ello una de las herramientas que complementan a los sensores aerotransportados es la radiometría de laboratorio y de campo.

Por medio de radiómetro o espectro-radiómetros se puede medir la reflectividad sobre el terreno en condiciones controladas. Existen muchas razones que justifican la necesidad de realizar mediciones radiométricas sobre el terreno (*Milton, 1987*):

- Calibrar la reflectividad de la imagen aérea o de satélite con la reflectividad de la superficie terrestre.
- Conocer la respuesta espectral de las cubiertas en condiciones conocidas de observación e iluminación.
- Proporcionar una base de datos para el estudio automático de las imágenes y la validación de los resultados.
- Facilitar información acerca de las signaturas espectrales de las cubiertas en el área de interés, así como de las variaciones y cambios espectrales que pueden esperarse en las imágenes y de esta manera puedan servir para el desarrollo, perfeccionamiento y comprobación de modelos de reflectividad que relacionan atributos biofísicos con datos espectrales.
- Determinar qué resolución espacial, espectral, temporal y radiométrica deberán tener futuros satélites para el estudio de un determinado fenómeno.

La recopilación de medidas de radiometría llevó a la generación de librerías o bibliotecas espectrales. La mayor parte de ellas son fundamentalmente una recolección de clases geológicas como la biblioteca del USGS (*http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html*), o la ASTER (*http://speclib.jpl.nasa.gov/*). Existen bibliotecas espectrales con algunas especies vegetales por ejemplo la biblioteca MEDSPEC (*http://www.landwatermed.net/cameleo/uk/res_medspec.html*) creada en colaboración por 7 países Mediterráneos, la de Southampton en el Reino Unido (*http://www.soton.ac.uk/~epfs/resources/speclibrary.shtml*) la de la Universidad de Santa Bárbara (*Roberts et al., 1998*), la de Kentucky en Estados Unidos (*http://www.murraystate.edu/qacd/cos/marc/projects/nasa98/veg_library*) o la biblioteca SPECCHIO (*Bojinski et al., 2003*) de Zurich, Suiza. En general es escaso el número y representatividad de las especies estudiadas en estas bibliotecas, así como la información respecto a las condiciones y procedimientos de medición.

Hasta el momento las librerías espectrales disponibles son unidimensionales con lo que es difícil determinar el aporte en el espectro del suelo, de las hojas en sombra o de la variabilidad dentro de cada especie vegetal debida a sus características biofísicas (por ejemplo estrés

hídrico o estado fenológico diferencial). El desarrollo de cámaras hiperespectrales portátiles (*www.specim.fi*) permitirá obtener librerías bidimensionales en campo, convirtiéndose en complemento idóneo a las imágenes hiperespectrales espaciales.

La respuesta espectral de la vegetación está ligada al tipo de especie, estado (p.e. estrés hídrico), estructura y substrato subyacente. Por ello, en este trabajo se ha desarrollado una completa biblioteca con información sobre la respuesta espectral de las principales especies vegetales de la Comunidad de Madrid, basándonos en la experiencia adquirida en laboratorio. Otros parámetros físicos y químicos de los individuos medidos están también incluidos en esta biblioteca. La biblioteca ESPECTRA está publicada en la web (*www.geogra.uah.es/espectra*) para que pueda ser utilizada gratuitamente por otros usuarios. La biblioteca ESPECTRA es de utilidad para complementar trabajos de cartografía y estadísticas aplicadas a inventarios regionales.

En este proyecto se analizará además la capacidad del satélite hiperespectral *Hyperion* para estudiar la vegetación en un área piloto de la Comunidad de Madrid, en la que se recoge la variabilidad específica, utilizando como fuente de información las bibliotecas espectrales generadas. Además se analizará la viabilidad de la extrapolación de la metodología utilizada en el área piloto a toda la Comunidad de Madrid.

METODOLOGÍA E INSTRUMENTOS

Consideraciones generales

Las medidas se realizaron en la Comunidad de Madrid. Se seleccionaron zonas poco escarpadas y de escasa pendiente que permitieron la correcta instalación de instrumental de medida. Las mediciones radiométricas se llevaron a cabo desde primeros de junio hasta mediados de agosto de 2003 y 2004 y entre las 10 y las 14 horas solares, para que el ángulo cenital solar fuera mínimo. A fin de medir radiación directa y disminuir el nivel de ruido de la señal intentamos medir únicamente en días de cielo totalmente despejado, no obstante una breve descripción de las condiciones atmosféricas en las que se tomaron las medidas acompaña a los datos espectrales en la biblioteca espectral. En cada caso se especificaron las incidencias ocurridas durante las mediciones. También se eligieron individuos alejados de objetos grandes o brillantes (muy claros), ya que esto aumentaría la radiación difusa.

El sensor se situó a una altura de alrededor de 2 m sobre la superficie a medir. Cuanto mayor es la altura mayor es el campo de visión efectivo (Field Of View, FOV). El FOV efectivo debe ser tan grande como permitan los soportes para que la reflectividad medida de la planta sea representativa de ésta. El sensor se orientó siempre en la misma posición respecto al sol y respecto al del resto del equipo de medida incluido el operario.

Para realizar medidas de árboles de altura superior a 4 m se utilizó un vehículo propiedad del Departamento de Termodinámica de la Universidad de Valencia, dotado de un brazo elevador, como se muestra en la figura 1a. Este vehículo tiene una cesta metálica donde se colocaron los instrumentos de medida, el GER 2600 y cámara hiperespectral. La figura 1b muestra el montaje en más detalle. Para medir arbustos y vegetación inferior a 4 m de altura se usó un

trípode y una torre elevadora. En estos casos sólo se pudo medir con el espectro-radiómetro debido a la dificultad que conlleva realizar medidas con la cámara hiperespectral por su elevado volumen y peso (alrededor de 40 Kg.) que dificulta el correcto nivelado del equipo.

(a)

(b)

Figura 1. Montaje del equipo usado para medir árboles de altura superior a los 4 m. (a) Muestra una imagen general mientras que la (b) muestra el montaje con más detalle.

Para poder caracterizar correctamente el vigor y el estado de la vegetación es necesario complementar la información espectral con información sobre parámetros biofísicos claves como el LAI, el contenido de humedad de las hojas o el LAD. Además en la biblioteca espectral ESPECTRA también se incluye una descripción del entorno donde está localizado el individuo medido y las dimensiones del mismo. Todos estos datos están disponibles en la página web de la biblioteca ESPECTRA.

GER 2600, DESCRIPCIÓN Y METODOLOGÍA

El espectro-radiómetro GER 2600 (*www.ger.com*) tiene 586 bandas que van desde el ultravioleta (350 nm) hasta el SWIR2 (*short wave infrared*) del infrarrojo de onda corta (2500 nm). La anchura de bandas varía de 1,5 nm (aprox.) entre 350 nm y 1050 nm, a 6,5 nm para 1050 nm-1900 nm y 9,5 nm entre 1900 nm y 2500 nm. La radiancia recibida por el sensor se parte en estas anchuras de banda gracias a tres rejillas fijas, una construida con silicio (Si) para el visible, VIS e infrarrojo cercano (NIR), y las otras dos con PbS para el NIR-SWIR1 y el SWIR2. El FOV puede ser de 3º o de 10º. En la mayoría de los casos se usó la lente de 10º para poder tener un FOV más amplio y por lo tanto una curva espectral más representativa del individuo en su totalidad y no sólo de una parte de él. En todos los casos se indicará en las observaciones cual de las lentes se utilizó.

Para obtener las curvas espectrales se realizaron entre 10 y 15 medidas por cada individuo. El espectro-radiómetro GER 2600 se colocó a una distancia de unos 2 m por encima del individuo a medir. En la figura 2 se puede ver en detalle el montaje de este espectro-radiómetro. Para cada medida el GER 2600 fue desplazado sobre el dosel para obtener una señal que fuera representativa de éste. Posteriormente se eliminaron las bandas extremas de cada sensor (entre 350-400 nm y 2400-2500 nm para medidas de GER 2600), ya que no son muy precisas. Para calibrar la señal digital a reflectividad se usa un panel de referencia (Spectralon) fabricado por Labsphere (*http://www.labsphere.com/*), que se mide justo antes que el objetivo.

Estos datos están almacenados en ficheros ASCII con 3 columnas, la longitud de onda en nanómetros, la media de las reflectividades en tantos por cien y la desviación típica de las medidas. Estos ficheros están disponibles a través de la página web del proyecto ESPECTRA.

CÁMARA HIPERESPECTRAL; DESCRIPCIÓN Y METODOLOGÍA

La cámara hiperespectral adquirida por el departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá fue fabricada por Specim (*www.specim.fi*) en Oulu, Finlandia. Esta cámara está formada por un espectrógrafo ImSpector N17, una cámara digital (CCD) SU320-1.7TR NIR, y un espejo que rota proporcionando una imagen espacial en dos dimensiones. La cámara hiperespetral consta de 320×240 sensores que miden una línea de 320 píxeles espaciales y 240 bandas entre los 900 y 1750 nm en cada instante. De estas 240 bandas sólo 166 de ellas están calibradas, éstas se localizan entre 970 nm y 1600 nm y tienen una resolución espectral de 4,5 nm.

Gracias a la rotación del espejo la cámara recibirá información de líneas de píxeles diferentes en instantes distintos, que hará posible la obtención de una imagen espacial bidimensional. El FOV en la dirección perpendicular a la del movimiento del espejo es de 24º, dando como resultado 0,075º por cada uno de los 320 píxeles. En el sentido de rotación del espejo el número de píxeles puede variar de 300 a 500, dependiendo de las necesidades de cada aplicación.

El sensor hiperespectral se colocó a una distancia de unos 2 m por encima del individuo seleccionado. En la figura 3 se muestra una imagen detallada del montaje de la cámara. La reflectividad se obtuvo a partir de la señal digital medida por la cámara realizando las siguientes operaciones: (i) corrección radiométrica y (ii) conversión a reflectividad. La corrección radiométrica se hace con un programa desarrollado por los fabricantes de la cámara hiperespectral, en el que se tiene en cuenta los coeficientes de calibración de cada sensor y la señal de fondo del instrumento. Esta señal se mide antes y después de cada imagen cerrando un obturador que impide la entrada de luz a la cámara, de esta forma se mide la señal producida únicamente por la cámara. Para obtener la reflectividad a partir de la radiancia hemos utilizado el mismo panel de referencia que se usó para las medidas con el espectro-radiómetro GER 2600. Este panel se coloca en la parte inferior de la imagen de forma que cubra los 320×240 sensores, con los que la cámara mide cada línea de la imagen. La radiancia de cada píxel de la imagen será dividida por la del panel de referencia medido por el mismo sensor para obtener la reflectividad. En general, el panel de referencia se incluyó en la misma imagen que el objetivo. Sólo en los casos en los que el sol estaba demasiado alto y la cámara proyectaba sombra sobre el panel de referencia éste se midió justo antes o después que el objetivo.

Figura 2. Montaje del GER 2600.

HYPERION, DESCRIPCIÓN

Es un sensor hiperespectral a bordo del satélite EO-1 (*Earth Observing 1*). Este sensor mide 220 bandas pero sólo 198 de ellas están calibradas (*http://eo1.usgs.gov*). Hyperion proporciona un área de 7,5 km de ancho y el tamaño de los píxel es de 30 m. El rango espectral completo cubierto por este sensor es de 357 a 2576 nm con una anchura de bandas de entre 10 y 11 nm.

La imagen de Hyperion fue obtenida el 30 de julio de 2003 sobre una franja del oeste de la Comunidad de Madrid, cerca de su límite con Ávila. A esta imagen se le ha realizado la corrección atmosférica usando el programa FLAASH (*Adler-Golden et al., 1999*) desarrollado por ENVI (*www.rsinc.com*). Posteriormente fue georeferenciada. Para eliminar el ruido de la imagen se aplicó la transformación Mimimun Noise Fraction (MNF) (*Boardman and Kruse, 1994*) de ENVI a las 129 bandas mejores bandas. Estas bandas se seleccionaron por medio de un análisis visual, eliminando las de más ruido y las que tenían alguna línea de píxeles erróneos. A partir de la imagen transformada se calcularán los píxeles más puros de la imagen y se incluirán en la biblioteca ESPECTRA después de analizarlos y validarlos con trabajo de campo. La transformación inversa se realizó incluyendo los primeros 16 componentes de la imagen transformada. Esta imagen se usará para la clasificación de especies vegetales.

En la figura 4 se puede observar la imagen de Hyperion después de realizar la transformación MNF inversa usando los primeros 16 componentes. Esta imagen se generó como combinación de las bandas rojo: 813 nm, verde: 1606 nm y azul: 650 nm. A partir de esta imagen se estudiará la capacidad del sensor hiperespectral Hyperion de distinguir la vegetación en un área piloto de la Comunidad de Madrid, en la que se recoge una variabilidad específica, utilizando como fuente de información las bibliotecas espectrales generadas a partir de la propia imagen y a partir de los datos de campo.

Figura 3. Montaje de la cámara hiperespectral.

Figura 4. Imagen del sensor HYPERION a bordo del Earth Observing 1 (EO-1) después de aplicarle la transformación de Minimum Noise Fracction inversa.

RESULTADOS PRELIMINARES

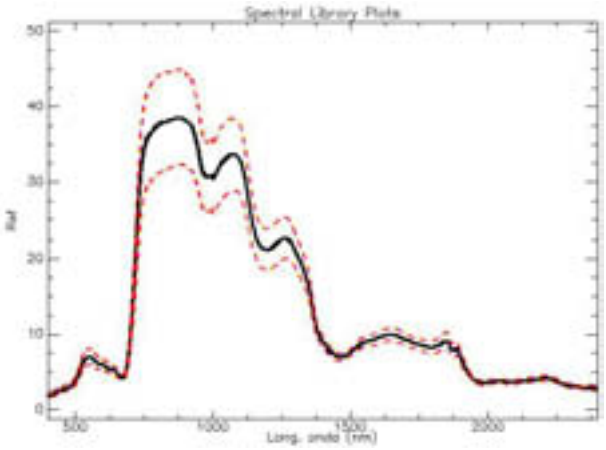
En este capítulo sólo mostraremos unos ejemplos de resultados preliminares. Es necesario un análisis en mayor profundidad para poder mostrar resultados definitivos. Los resultados definitivos se publicarán más adelante.

Dos ejemplos de reflectividad obtenidos a partir de datos del espectro-radiómetro GER 2600 pueden observarse en la figura 5. En esta figura se muestra la reflectividad en tanto por cien en el eje vertical, mientras que la longitud de onda se representa en el horizontal (entre 400 y 2400 nm) para una *Retama sphaerocarpa* (figura 7.a) y un *Quercus coccifera* (figura 7.b). La línea negra representa el valor medio mientras que las líneas discontinuas rojas muestran la media más/menos la desviación típica. Éstos son dos ejemplos de los espectros que se incluyen en la biblioteca ESPECTRA.

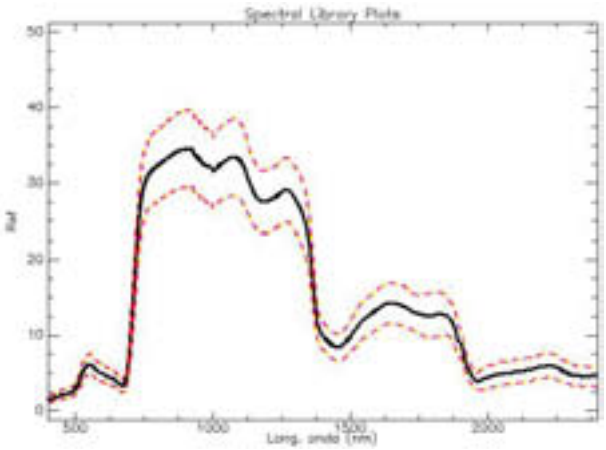
Es importante resaltar que en la biblioteca ESPECTRA se ha incluido información adicional sobre parámetros físicos y químicos del individuo considerado, así como información sobre su entorno y localización. Toda esta información, junto con las signaturas espectrales obtenidas a partir de medidas del espectro-radiómetro GER 2600 y de la cámara hiperespectral y fotos del individuo, se pueden obtener en la página web de la biblioteca ESPECTRA. La información espectral puede obtenerse gratuitamente pulsando el botón “Descarga de datos

espectrales". En la figura 6 se muestra un ejemplo de cómo está organizada esta información tal y como aparece en la página web. Los datos medidos con la cámara hiperespectral y la comparación de los espectros obtenidos por ambos instrumentos pueden verse pulsando el botón "Datos de cámara hiperespectral". Este botón estará disponible sólo en los casos en los que existan datos de la cámara hiperespectral.

Un ejemplo de los datos obtenidos por la cámara hiperespectral y su comparación con los espectros obtenidos por el GER 2600 se muestran en la a figura 7. En la figura 7.a se observa una imagen de reflectividad obtenida a partir de las medidas de la cámara hiperespectral sobre



(a)



(b)

Figura 5. Signatura espectral medida por un espectro-radiómetro GER2600. La línea continua negra muestra la reflectividad media mientras que las líneas discontinuas muestran la media más/menos la desviación típica para (a) la *Retama sphaerocarpa* medida el 7 de agosto de 2003 y (b) *Quercus coccifera* medida el 1 de septiembre de 2003.

un *Quercus pyrenaica*. Esta imagen se generó como combinación de las bandas 77 (1286 nm), 30 (1077 nm) y 130 (1519 nm). En este caso se midió primero la vegetación y después el panel de referencia para que la cámara no proyectara sombra sobre este. Las zonas azules son zonas de suelo desnudo mientras que las verdes representan la vegetación (véase anexo de figuras en color). La figura 7.b compara la curva de reflectividad del *Quercus pyrenaica* para longitudes de onda entre 970 y 1600 nm obtenida a partir de datos de la cámara hiperespectral (línea de puntos verde) con la obtenida a partir del espectro-radiómetro GER 2600 (línea continua negra). Las líneas discontinuas rojas muestran los valores de la desviación típica de las medidas del GER 2600. En la figura 7b podemos observar cómo ambos resultados concuerdan perfectamente, excepto para longitudes de onda menores de 1000 nm, que se encuentran en el límite inferior de la resolución de la cámara hiperespectral, y por tanto, tienen menor precisión. En la figura 7b también observamos cierta divergencia entre ambas curvas alrededor de 1400 nm. Esta divergencia es debida a la gran absorción del agua en esta zona del espectro. De todas formas es importante destacar la buena concordancia obtenida en la comparación de la figura 7b, más aún teniendo en cuenta que en esta figura se compara el valor medio de la reflectividad de 10 píxeles de unos 35 cm cada uno, medidos con el GER 2600, con el valor medio de reflectividad de 200 píxeles de unos 0,27 cm cada uno, obtenidos con la cámara hiperespectral. Es decir, esta comparación debe hacerse con cuidado ya que el FOV de cada tipo de medida varía. A partir de estos datos será analizado el efecto provocado por las sombras y por el suelo.

CONCLUSIONES

Utilizando datos de un espectro-radiómetro GER 2600 y de una cámara hiperespectral se ha generado la biblioteca espectral ESPECTRA de las especies arbóreas y arbustivas más abundantes en la Comunidad de Madrid. La información espectral está completada con información sobre parámetros biofísicos claves como el índice de área foliar (*Leaf Area Index*, LAI), el contenido de humedad de las hojas o la distribución angular foliar (*Leaf Angular Distribution*, LAD). Datos alométricos y de situación geográfica también están incluidos en esta biblioteca espectral.

La biblioteca espectral ESPECTRA está disponible gratuitamente a través de la página web del Departamento de Geografia de la Universidad de Alcalá (*www.geogra.uah.es/espectra*).

En este artículo se muestran resultados preliminares a la espera de un análisis en mayor profundidad para la obtención de resultados definitivos. No obstante, este artículo muestra los espectros disponibles en la biblioteca ESPECTRA y describe brevemente la información extra que acompaña a estos datos radiométricos en la página web de esta biblioteca. Estos resultados muestran un comportamiento espectral igual al de las curvas teóricas de la vegetación. Los resultados obtenidos a partir de datos del GER 2600 y de la cámara hiperespectral muestran también una clara concordancia. La técnica de combinar datos de espectro-radiómetro con los de cámara hiperespectral, obtenidos cerca del objetivo (a unos 2 m), es nueva y, que nosotros sepamos, ningún grupo hasta ahora ha realizado experimentos similares.

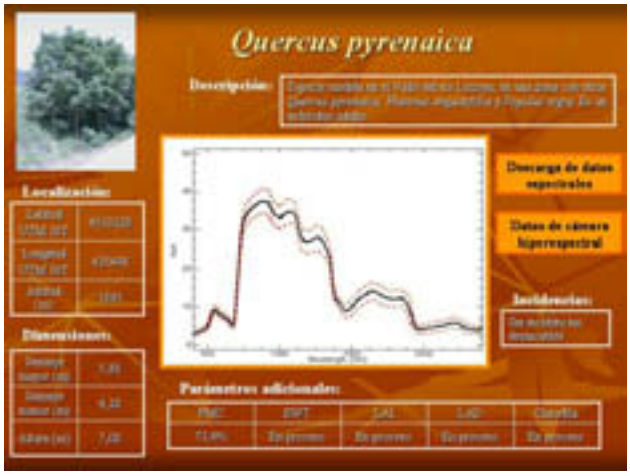
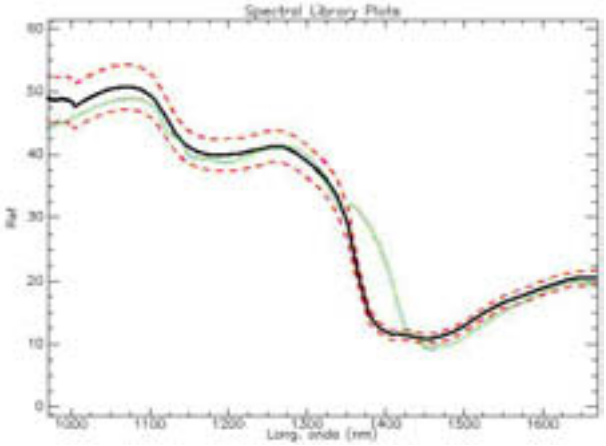


Figura 6. Ejemplo de entorno gráfico de la biblioteca ESPECTRA, www.geogra.uah.es/espectra

(a)



(b)

Figura 7. En la imagen (a) se muestra la refletividad de un *Quercus pyrenaica* obtenida a partir de la medidas de la cámara hiperespectral. Esta imagen es combinación de las bandas 1286 nm, 1077 nm y 1519 nm. La grafica de la figura (b) muestra una comparación entre las curvas espectrales medidas por la cámara hiperespectral (línea de puntos verde) y la media de las curvas de reflectividad obtenidas a partir del espectro radiómetro GER 2600 (línea continua negra) incluyendo las desviaciones típicas de las medidas del GER 2600 (líneas discontinuas rojas) (Anexo de figuras en color).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Joaquín Meliá del Departamento de Termodinámica de la Universidad de Valencia y a todo su grupo su gran generosidad al dejarnos utilizar su vehículo para nuestra campaña de medidas. Algunos de los resultados que aquí se muestran no hubieran sido posibles sin esta ayuda.

Agradezco también a Alexander Parra, Armando Cortés, Gemma Ventura, Jesús Martínez, Lara Arroyo y Mariano García todo su apoyo y ayuda en las tareas de campo.

REFERENCIAS

Adler-Golden S. M., Matthew M.W., Bernstein L.S., Levine R.Y., Berk A., Richtsmeier S.C., Acharya P.K., Anderson G.P., Felde G., Gardner J., Hoke M., Jeong L.S., Puñall B., Mello J., Ratkowski A. and Burke H.-H. (1999): Atmospheric Correction for Short-wave spectral Imagery Based on MODTRAN4. *SPIE Proceeding, Imaging Spectrometry*, Volume 3753, July 1999.

Barret, E.C. y Curtis, L.F. (1992). *Introduction to Environmental Remote Sensing*. Editorial Chapman & Hall. London.

Boardman J. W., and Kruse, F. A., (1994): "Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada": in *Proceedings, Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. I-407 - I-418.

Bojinski S., Schaepman M., Schläpfer D., Itten K. (2003): "SPECCHIO: a spectrum database for remote sensing applications". *Computers & Geosciences* 29 (2003) 27–38.

Chen, Z., Elvidge, C.D. y Groenveld, D.P. (1998). "Monitoring of seasonal dynamics of arid land vegetation using AVIRIS data". *Remote Sensing of Environment* 65: 255-266.

Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Editorial Ariel Ciencia. Barcelona.

Milton, E.J. (1987). "Principles of field spectroscopy". *International Journal of Remote Sensing* 8: 1807-1827.

Riaño D., Vaughan P., Chuvieco E. (1999): "Estimación del contenido de humedad en la Jara (Cistus Ladanifer) a partir de radiometría de laboratorio". *Teledetección Avances y Aplicaciones.* Asociación Española de Teledetección - *Papeles de la Diputación de Albacete*, 92-95.

Roberts, D.A., Gardner, M., Church, R., Ustin, S., Scheer, G. y Green, R.O. (1998). "Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmembers spectral mixture models". *Remote Sensing of Environment* 65: 267-279.

Serrano, L., Ustin, S.L., Roberts, D.A., Gamon, J.A. y Peñuelas, J. (2000). "Deriving Water Content of Chaparral Vegetation from AVIRIS Data". *Remote Sensing of Environment* 74: 570-581.

Ustin, S.L. y Trabucco, A. (2000). "Using hyperspectral data to assess forest structure". Journal of Forestry 98 (6): 47-49.

Zarco Tejada, P.J., Miller, J.R., Mohammed, G.H., Noland, T.L. y Sampson, P.H. (2000). "Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: II. Laboratory and Airborne canopy-level measurements with hyperspectral data". *Remote Sensing of Environment* 74 (3): 596-608.

Dinámica actual del Parque Regional del Sureste de Madrid mediante teledetección

M. Serrano Cambronero, F. Pacios Robles y F. Santander del Amo

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Facultad de Geografía e Historia, Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria, 28009 Madrid.

RESUMEN

La declaración en 1994 como Parque Regional del Sureste de un área de alto valor ecológico y social próxima a Madrid ha supuesto la protección de un territorio que tradicionalmente ha estado marcado por la presión antrópica y muy degradado desde una perspectiva medioambiental, por lo que, a priori, su dinámica reciente puede haberse visto alterada.
Esta comunicación analiza la evolución referente a los usos del suelo producida en el Parque Regional del Sureste de la Comunidad de Madrid en el periodo 1987-2003.
Mediante la utilización de la teledetección, se ha desarrollado un estudio abordando una doble dimensión de la ocupación del suelo. En primer lugar se estudia su dinámica desde 1987 (antes de su creación en 1994) hasta 2003; para posteriormente analizar las modificaciones que la misma ha podido introducir en la evolución ambiental del Parque Regional.
La detección de los cambios de usos del suelo se ha realizado por medio de la comparación de mapas de usos para cada época, obtenidos mediante clasificaciones supervisadas, que luego se han analizado por distintos métodos para extraer las conclusiones de la evolución espacio-temporal del Parque Regional del Sureste.

Palabras Clave: *Teledetección, evolución usos del suelo, Parque Regional del Sureste, Comunidad Madrid.*

ABSTRACT

Recent dynamics of South East Regional Park of Autonomic Region of Madrid. Approach with remote sensing methodology.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

An area with high social and ecological values, situated in the South East of Madrid's Region was declared Regional Park in 1994. This area had traditionally been very affected by human pressing. The protection of the area could have change the dynamics in the use of ground and the environmental or ecological values of the protected area.
This paper analyses and studies with remote sensing methods the evolution of land uses between 1987 and 2002. Remote sensing images and software and automatic supervised classifications are the tools used to find out the land use's changes and the human and natural contemporary tendencies.

***Key Words**: Remote Sensing, land-uses, changes, Regional Parc in south-east Madrid.*

INTRODUCCIÓN: CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En la presente comunicación presentamos los resultados obtenidos en el estudio de la evolución de los distintos usos del Parque Regional del Sureste de la Comunidad de Madrid. Este estudio está basado fundamentalmente en la utilización de imágenes de satélite Landsat TM.

El Parque Regional del Sureste de la Comunidad de Madrid (PRSE), como su propio nombre indica, está localizado en el Sureste de la Comunidad de Madrid (Figura 1). Tiene una extensión de 31,550 Has que afecta a un total de 16 municipios, y que se distribuye en torno a los cursos bajos de los ríos Jarama y Manzanares. De Norte a Sur, el Parque ocupa el espacio comprendido entre la confluencia del río Jarama con el Henares, hasta unos kilómetros más al Sur del punto donde el río Tajuña le dona sus aguas. De Oeste a Este, el Parque se extiende desde el municipio de Pinto hasta Arganda del Rey.

Geológicamente es una zona donde predominan dos tipos de litologías. Por un lado, depósitos aluviales de las cuencas de los ríos Jarama y Manzanares. Por otro lado, se hallan los afloramientos de materiales yesíferos característicos del sur madrileño.

Ambas litologías van a determinar la presencia de un gran número de explotaciones de extracción de áridos para construcción, lo que ha hecho de este Parque una de las zonas de Madrid que tradicionalmente ha estado sometida a una gran presión antrópica. Además, los yesos aparecen en relieves desnudos, que favorecen la incisión de las aguas de escorrentía y que dan lugar a notables extensiones de cárcavas.

La sobreexplotación a la que ha estado sometida la zona de estudio obligó en 1994 a la redacción de la Ley 6/94, por la que se creó el Parque Regional del Sureste de Madrid, que establece 6 zonas con distintos grados de protección. Estos 6 grados de protección incluyen zonas denominadas *reserva integral* (la máxima protección) hasta zonas en las que se permite una explotación ordenada de los recursos naturales (es decir, no se elimina la extracción de áridos, debido a su importancia económica). Pero la figura de protección que más destaca es la *zona F*: *"Zona periférica de protección"*, que hace referencia a un ámbito concreto del Parque, la zona situada al Este de Velilla de San Antonio, en la que el deterioro por actividades de áridos ha sido tan grande que la ley 6/94 prevé un plan especial de restauración. Esta zona nos permite atisbar el grado de presión a la que ha estado sometido el Parque.

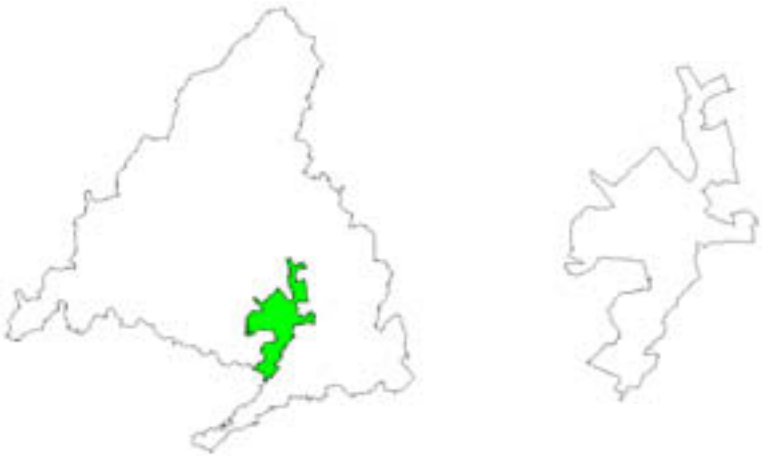


Figura 1. Localización Parque Regional del Sureste de la Comunidad de Madrid.

METODOLOGÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Las fuentes de información utilizadas han sido tres imágenes multiespectrales del satélite LANDSAT, sensor TM-5, que cubren el área de estudio durante tres años, 1987 (figura 2) (anterior a la declaración del Parque Regional del Sureste de la Comunidad de Madrid), 1997 (figura 2) y 2003 (figura 3), todas capturadas en la misma época del año, verano.

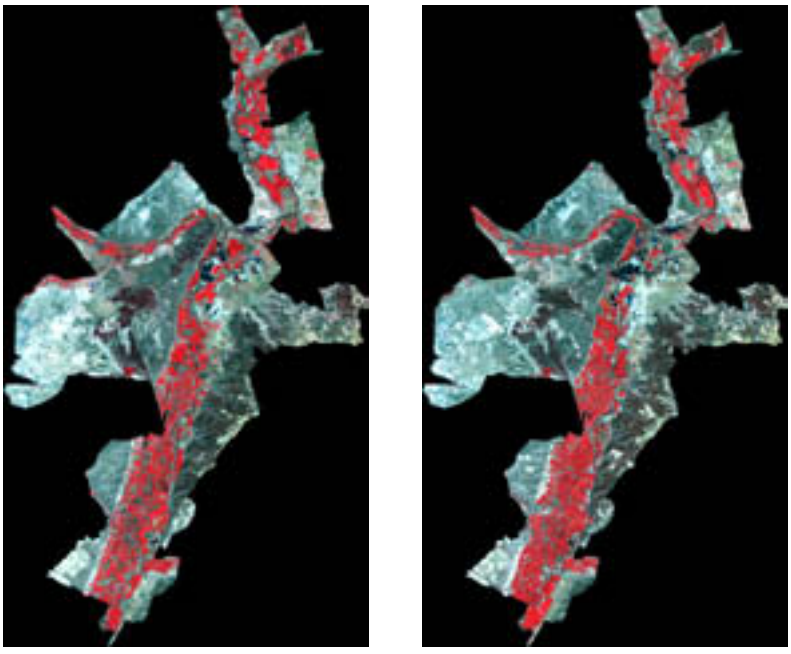


Figura 2. Imagen Landsat (4,3,2) PRSE 1987 (izda.) y 1997 (dcha.).

Las imágenes correspondientes a los años 1997 y 2003 han sido clasificadas mediante técnicas de clasificación automática para obtener una tipología de usos del suelo del Parque.

Adicionalmente se ha utilizado una imagen pancromática SPOT 5 con una resolución de 2,5 m de agosto del 2002. Debido a su alta resolución espacial, esta imagen ha sido utilizada fundamentalmente para determinar muestras y valorar los resultados obtenidos con las clasificaciones supervisadas.

La aplicación de cualquier clasificación exige una adecuada corrección geométrica y radiométrica de las imágenes de satélite. Por lo tanto, sobre nuestras imágenes se ha realizado la corrección atmosférica y se han georreferenciado.

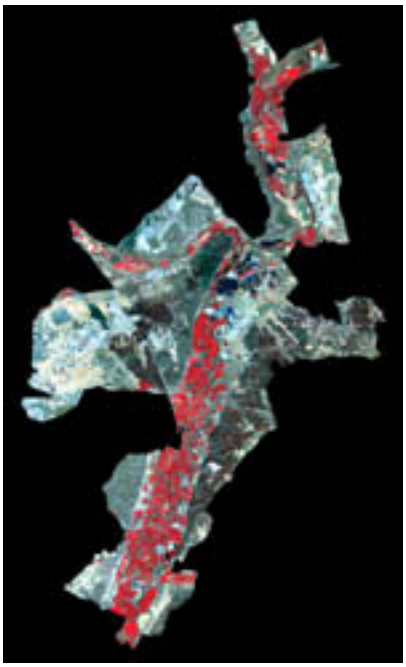


Figura 3. Imagen Landsat (4,3,2) PRSE 2003.

Las imágenes fueron referidas a la proyección UTM ED50 para poder superponerlas a la cartografía de base: el contorno del PRSE. La superposición dejó ver que las imágenes necesitaban una corrección.

La corrección geométrica y la georreferenciación se llevaron a cabo empleando unos 50 puntos de control repartidos por todo el área de estudio. El RMS medio obtenido finalmente para todas las imágenes está en torno al 0,2.

Previo a la clasificación supervisada, se realizó una fase de identificación e interpretación visual con la imagen SPOT del 2002 y la imagen del año 2003, lo cual permitió una aproximación a la leyenda de usos del suelo.

La fase de obtención de muestras para la clasificación presentó una serie de obstáculos

debido a la heterogeneidad de las parcelas o al comportamiento similar de la industria y las zonas urbanas, debido a la escasa superficie ocupada de las primeras y a su localización muy próxima a las zonas de regadío.

La obtención de los usos del suelo se realiza aplicando una clasificación supervisada, sobre las imágenes de 1997 y 2003, de máxima probabilidad con realce del vecino más próximo, y después perfeccionada con ayuda de diversas funciones como la eliminación de puntos dispersos.

La elección de las clases de partida y las definitivas ha sido el resultado de la interpretación visual sobre las imágenes ya citadas y del trabajo de campo. Además se realizó la matriz de confusión.

Los usos del suelo correspondientes a 1987 fueron obtenidos a partir del mapa CORINE Land Cover de 1987.

Las clases, usos del suelo, obtenidas son:

1. Improductivo: Engloba las canteras, pero también las cárcavas y áreas en proceso de erosión.
2. Secano: Se trata de los cultivos en secano como viñedos, olivares, frutales y mosaicos de cultivos anuales.
3. Regadío: Esta clase comprende los cultivos herbáceos y frutales en regadío.
4. Vegetación Natural: Esta clase hace referencia a la vegetación natural, reuniendo a todas las formaciones boscosas (pináceas) y arbustivas (matorral), además de una pequeña zona de pastizal.
5. Agua: Hace referencia a las antiguas canteras inundadas o a lagunas naturales.

La dinámica de usos del suelo del Parque Regional del Sureste de la Comunidad de Madrid se ha establecido mediante la interpretación visual de los resultados de las clasificaciones (figura 4) y mediante análisis estadístico (figura 5).

DINÁMICA DEL PARQUE REGIONAL DEL SURESTE DE LA COMUNIDAD DE MADRID

Una vez realizadas las clasificaciones supervisadas de 1997 y 2003, y comparando con la clasificación de 1987 del CORINE Land Cover, se puede observar una modificación de la distribución de los usos del suelo a lo largo de los últimos años. Los resultados más significativos de esta evolución son los siguientes:

1. Improductivo

La superficie ocupada por estos usos se ha duplicado de 1987 a 1997, variando la localización de las explotaciones de extracción de áridos, por cierre de unas graveras y apertura de otras nuevas, así como la aparición de nuevos espacios de vertidos incontrolados (figura 6-7).

Se observa que a partir de 1997 es cuando se acelera el ritmo de crecimiento y en seis años, hasta el 2003, la superficie de espacio improductivo vuelve a duplicarse.

Una de las causas de este aumento es la ampliación del vertedero de La Aldehuela, lo-

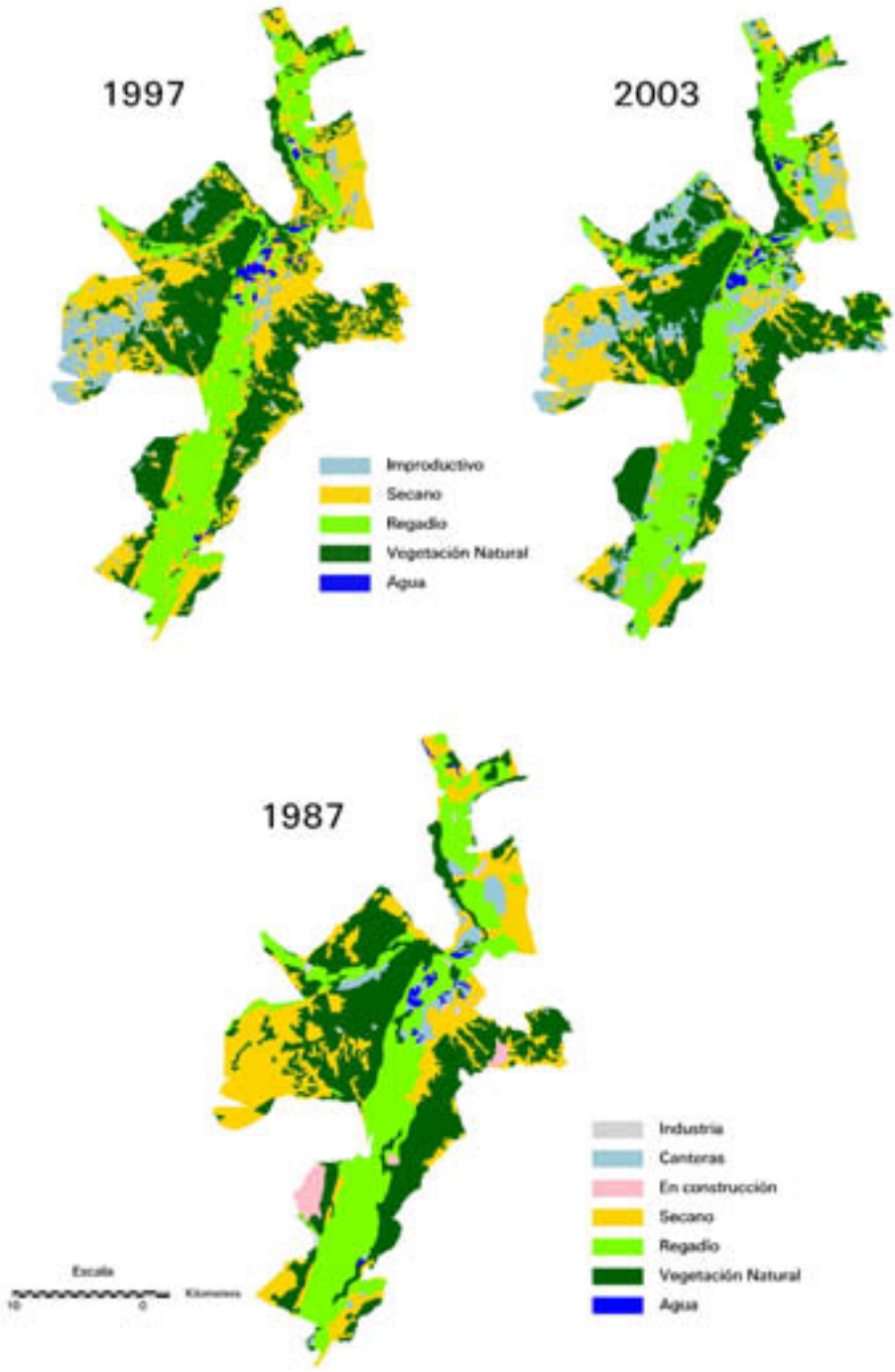


Figura 4. Usos del suelo PRSE

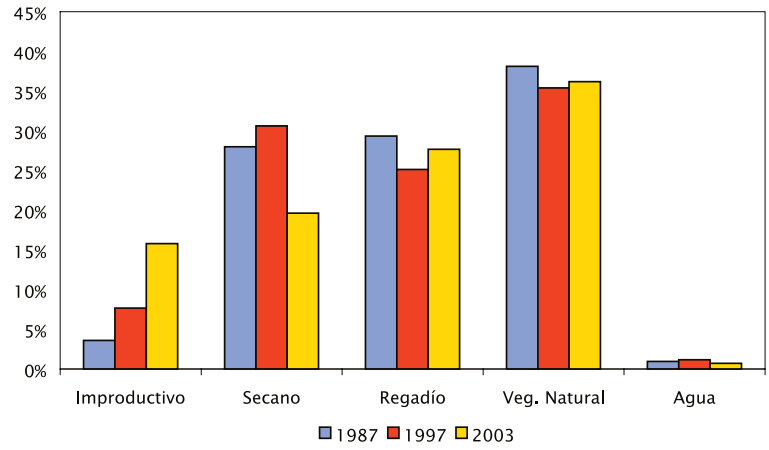


Figura 5. Porcentaje de superficie ocupada por clase y por año de estudio

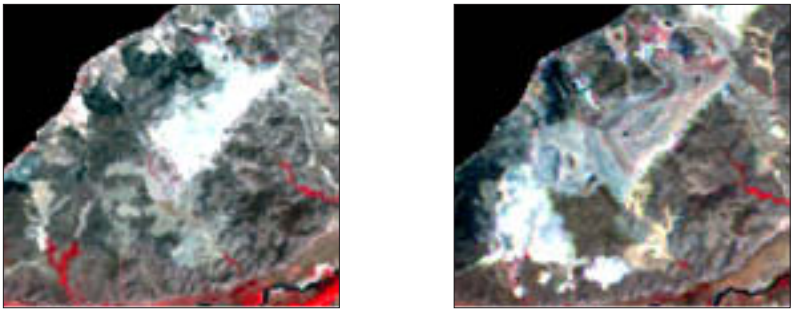


Figura 6. Evolución canteras 1997 (izda.) 2003 (dcha.).

calizado en las inmediaciones del núcleo urbano de Perales del Río (Getafe). Esta zona de vertidos se autorizó en su momento con la limitación expresa de *admitir únicamente tierras procedentes de las obras de Metrosur*, aunque en la actualidad se ha convertido en un vertedero sin control (figura 8).

Otro ejemplo que repercute directamente en el aumento de este uso considerado improductivo son los terrenos en los que la fábrica de armamento de La Marañosa realiza sus prácticas de tiro, localizados dentro del Parque (figura 9).

2. Secano

Esta clase se ha mantenido de 1987 a 1997 y, posteriormente, se reduce un 10% hasta 2003. La causa radica principalmente en la pérdida de población en el sector primario. Esta reducción se ha producido sobre todo en aquellas áreas donde el cultivo de secano suponía una ocupación marginal del suelo. Por el contrario, este uso se ha mantenido en las amplias llanuras que se extienden al Oeste y al Sur del Parque, especialmente en los términos municipales de Pinto, Valdemoro y San Martín de la Vega.

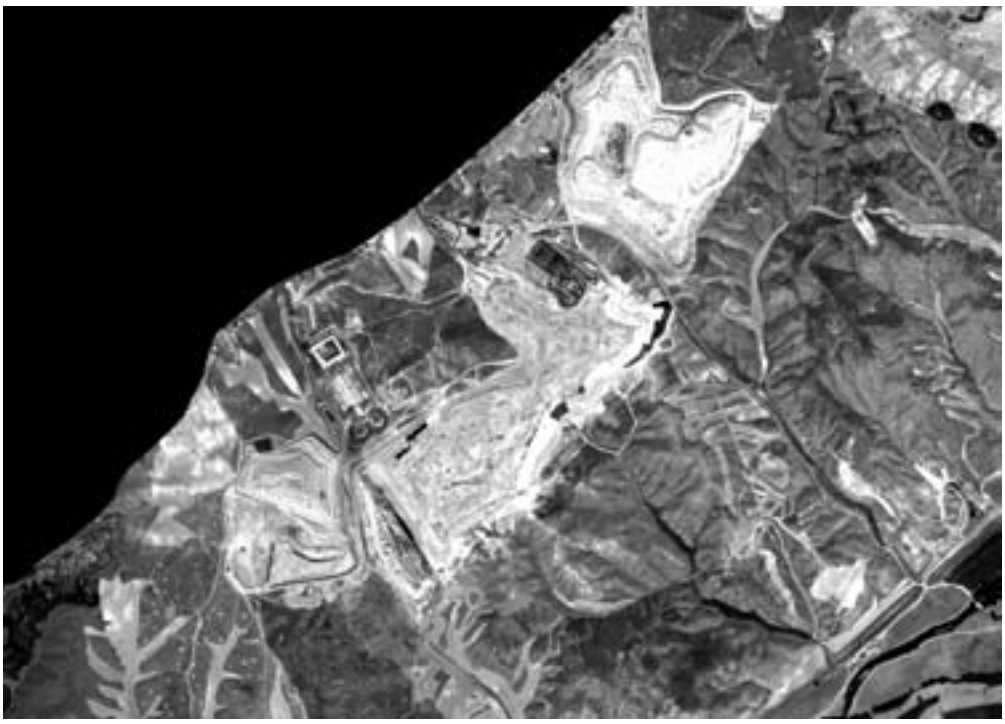


Figura 7. Detalle canteras PRSE, imagen Spot 5. 2002.

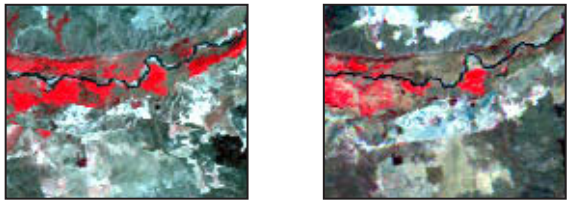


Figura 8. Aldehuela 1997 (izda.) 2003 (dcha.).

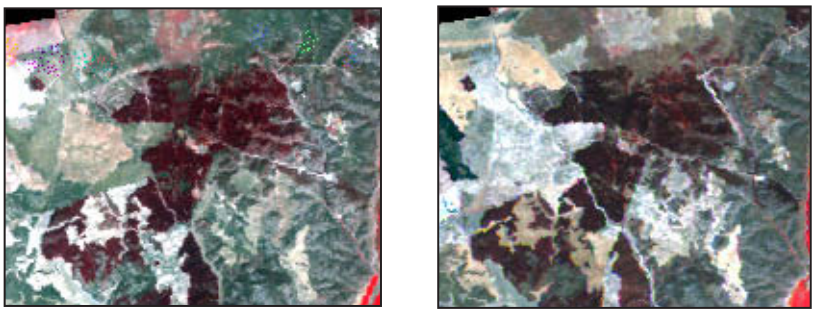


Figura 9. La Marañosa 1997 (izda.) 2003 (dcha.).

3. Regadío

Los cultivos agrícolas de regadío constituyen el uso menos dinámico del Parque, su superficie se mantiene más o menos constante en los últimos años, aunque pueden observarse algunas pérdidas desde 1987. Resulta llamativo un ligero repunte en los cinco últimos años.

4. Vegetación Natural

La superficie ocupada por Vegetación Natural se mantiene más o menos constante, aunque en el Sureste se aprecia una recuperación de la vegetación. Esta recuperación es uno de los efectos de la creación del Parque, pues el área donde se produce la regeneración de la vegetación está inserta en una zona tipo "C" del parque, es decir, una zona degradada a regenerar.

5. Agua

En este caso no puede hablarse en términos de superficie absoluta, porque ésta es prácticamente la misma, pero sí de un cambio de localización. Parte de las lagunas han sido enterradas y por otro lado se han creado otras en antiguas explotaciones extractivas (figura10).

En este caso son muy significativas las modificaciones artificiales del cauce del río, debidas también a las extracciones de áridos.

Aunque en este estudio sólo hemos constatado un número muy reducido de *reubicaciones* de lagunas, debido a la utilización de sólo 3 imágenes, pensamos que este fenómeno es bastante más intenso y merece ser retomado en investigaciones futuras.

Por último, quisiéramos mencionar un detalle que nos ha llamado bastante la atención porque considerábamos un error en nuestras clasificaciones. Se trata de un pequeño fallo que se produjo en la elaboración del proyecto CORINE en 1987. Dicho error se refiere a la clase *en construcción* incluida en el interior del Parque del Sureste. Pues bien, hemos constatado que en el lugar que ocupaba dicha clase, en las imágenes de 1997 y 2003 aparece vegetación natural. Obviamente, es incoherente el hecho de que un espacio que en un momento está en construcción, diez o quince años más tarde esté ocupado por vegetación natural.

Figura 10. Evolución lagunas PRSE 1987 (izda.) 1997 (centro) 2003 (dcha.).

CONCLUSIONES

La progresiva degradación del Parque Regional del Sureste madrileño, desde su declaración en 1994, es la conclusión más significativa de este trabajo. Ello de deduce de los cambios de usos del suelo observados. A pesar de que dichos cambios en ningún momento superan el 15% para el periodo de tiempo máximo (de 1987 a 2003), influido probablemente por su protección como Parque Regional, los que aparecen son muy representativos de los procesos de degradación que sufre este espacio natural de la Comunidad de Madrid.

El método ha permitido la localización y delimitación de las áreas donde se ha producido el aumento del uso de suelo improductivo, en detrimento de la vegetación natural en los primeros momentos y del secano en los últimos años.

Las noticias encontradas y el trabajo de campo confirman el acierto de los resultados obtenidos en las clasificaciones, tales como la aparición de vertidos en la Aldehuela.

Las clasificaciones realizadas expresan una disminución de la fragmentación y de la heterogeneidad espacial en el tiempo. Los usos del suelo más antropizados (cultivos, vertidos y graveras) son los que poseen mayor fragmentación frente a los más naturales (comunidad arbustiva y pinar).

Se constata una disminución de la fragmentación de la vegetación natural, mientras que la superficie que ocupa se mantiene constante.

REFERENCIAS

Ruiz B. et al. (1997): "Las transformaciones del ecosistema de la Comunidad de Madrid". *El paisaje vegetal en la Comunidad de Madrid*. Arqueología, Paleontología y Etnografía, 5 (Pilar López Coord.), pp. 95-164.

Álvarez Cobelas, M., Riolobos, P., Sánchez Carrillo, S. y Himi, Y. (1998): "La calidad de las aguas del Parque Regional del Sureste de la Comunidad Autónoma de Madrid". *Revista Técnica de Medio Ambiente* 11 (mayo junio), pp. 17-27.

Álvarez Cobelas, M., Himi, Y., Sánchez Carrillo, S. y Riolobos, P. (1998): "Un estudio del CSIC refleja la grave contaminación del Parque del Sureste". *Quercus*, 154, pp. 54-55.

Comunidad de Madrid (1994): *LEY 6/1994, de 28 de Junio, sobre el Parque Regional en torno a los ejes de cursos bajos de los ríos Manzanares y Jarama*. B.O.C.M., 163: 2-22.

Comunidad de Madrid (1996): *Plan de Ordenación de los Recursos Naturales en torno a los ejes de cursos bajos de los ríos Manzanares y Jarama*. Documento de información pública. Agencia de Medio Ambiente. 263 pp.

Gordón, L. (1999): *El Parque Regional del Sureste*. Comunidad de Madrid. 167 pp.

Domínguez, J. A. (2000): "Evaluación de áreas de graveras mediante tratamiento multitemporal de imágenes aéreas y espaciales", *IX Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible*, 2000.

El País (27/01/2003): *El fiscal indaga la existencia de grandes vertidos en el parque del Sureste*.

Análisis de los cambios paisajísticos en los humedales costeros del Mar Menor (Murcia, SE Ibérico) mediante técnicas de teledetección ambiental

M.T. Pardo, M.A. Esteve, M.F. Carreño, J.Martínez, J.Miñano y S. Rodríguez

Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología, Universidad de Murcia, Campus de Espinardo, 30100 Murcia.

RESUMEN

Una de las aportaciones más destacadas de la teledetección al estudio del medio ambiente es su capacidad para seguir los procesos dinámicos. En el presente trabajo se lleva a cabo un análisis de los cambios paisajísticos operados en los humedales marginolitorales del Mar Menor (Playa de la Hita, Marina del Carmolí, Lo Poyo) mediante una clasificación supervisada de imágenes digitales del sensor Landsat-TM y ETM+ correspondientes al período 1984-2001. Los humedales del Mar Menor, situados entre el Campo de Cartagena y la laguna del Mar Menor, se han visto sometidos en las últimas décadas a una serie de transformaciones físico-químicas e hidrológicas como consecuencia de un incremento de los drenajes agrícolas procedentes de la cuenca vertiente. El empleo de técnicas de teledetección indica que dichas alteraciones se expresan a nivel paisajístico en un cambio en la distribución y extensión de los hábitats. La clasificación digital constata un proceso de extensión gradual de los hábitats más higrófilos, fundamentalmente del carrizal y el saladar, a expensas de otros más xerófilos (estepas salinas y cultivos). Este proceso ha implicado en la Marina del Carmolí y en Lo Poyo una ampliación de sus fronteras a costa de los terrenos cultivados o estépicos inmediatos, aumentando así la superficie total ocupada por dichos humedales.

Palabras Clave: *Teledetección, clasificación supervisada, humedales, cambios paisajísticos, saladares, estepas salinas, Mar Menor.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

Remote sensing is a useful tool for analysing dynamic processes. In the present work, we study the landscape changes in coastal Mar Menor wetlands (Playa de la Hita, Marina del Carmolí and Lo Poyo) through a supervised classification of Landsat TM and ETM+ imagery corresponding to the 1984-2001 time period. In the last decades the increase in agricultural drainages from the Mar Menor watershed, the Campo de Cartagena, has led to physical-chemical and hydrological changes in the Mar Menor wetlands, located between the Campo de Cartagena and the Mar Menor lagoon. Remote sensing techniques reveal that these alterations have generated changes in the distribution and the area occupied by the different habitats. Supervised classification points out the gradual increase in hygrophilous habitats as reedbeds and saltmarshes at the expense of more xerophilous ones (salt steppes and cropped land) in a process by which Marina del Carmolí and Lo Poyo wetlands extend over cultivated land and steppic adjacent areas, leading to increasing wetland sizes.

***Key Words**: Remote Sensing, Supervised Classification, Wetlands, Landscape Changes, Salt Marshes, Salt Steppes, Mar Menor.*

INTRODUCCIÓN

Asociados a la laguna hipersalina del Mar Menor (Murcia, SE Ibérico) se sitúan un conjunto de humedales marginolitorales que constituyen espacios protegidos por su gran interés ecológico y ambiental. Estos humedales, como la Marina del Carmolí, la Playa de la Hita y el saladar de Lo Poyo, constituyen el hábitat de comunidades y especies de alto valor ecológico, como la vegetación de saladares, así como especies faunísticas raras o de distribución restringida como el fartet y la cerceta pardilla. En los últimos años, la intensificación agrícola en la cuenca drenante al Mar Menor, el Campo de Cartagena, ha implicado un incremento continuado del nivel freático en la parte más baja de la cuenca. Los cambios hidrológicos en los humedales del Mar Menor se han traducido en una transformación de la biodiversidad asociada que se puede detectar a nivel paisajístico a través del estudio temporal de los cambios de la distribución y extensión cubierta por las diversas formaciones vegetales. El análisis de esta dinámica de cambio resulta del máximo interés para comprender las relaciones que se establecen entre los patrones de cambio en los humedales y la biodiversidad que sustentan, así como para contribuir al desarrollo sostenible del Mar Menor y su entorno.

El estudio de las dimensiones espacial y temporal que nos ocupan puede abordarse empleando como herramienta de gran potencia la teledetección ambiental (*Carter*, 1982). La rapidez y efectividad de estas técnicas para cartografiar los usos del suelo y analizar la dinámica de cambio de la vegetación de una zona determinada hace que se encuentren cada vez más presentes en la gestión de espacios naturales. En este sentido, son numerosos los

estudios que emplean la teledetección para documentar la intensificación de determinados usos y los procesos de cambio de la vegetación (ej. *Rees et al*., 2003; *Boles et al*., 2004; *Maselli*, 2004).

Diversas técnicas de teledetección han sido empleadas en el estudio de los humedales para realizar inventarios de estos sistemas y calcular su extensión (*Noriega y Lozano-García*, 2000); para localizar cuerpos de agua superficiales y cuantificar los cambios del área ocupada por éstos (*Moore y North*, 1974; *Ackleson et al*., 1985; *Jaques*, 1989; *Toÿrä et al.,* 2001), así como para cartografiar la vegetación (*Sippel et al.*, 1994; *Novo y Shimabukuro*, 1997; *Hess et al*., 2003; *Kokaly et al*., 2003), llegándose incluso a considerar el nivel específico en cartografías de saladares (*Zhang et al.*, 1996). Una premisa básica para la cartografía de la vegetación de los humedales es que los tipos de vegetación presentes en los mismos son espectralmente separables (*Skidmore et al*., 1988), lo que fue comprobado empíricamente por *Schmidt y Skidmore* (2003). Estos autores se preguntaron si las 27 asociaciones vegetales presentes en un humedal costero de Dinamarca, muchas comunes a las encontradas en nuestro área de estudio, se pueden diferenciar mediante su reflectancia hiperespectral, concluyendo que la mayoría de estas asociaciones presentan espectros de reflectancia con diferencias estadísticamente significativas.

En este trabajo se presenta una clasificación multitemporal supervisada de imágenes de satélite de sensores Landsat TM y ETM+ de cinco años distintos comprendidos en el período 1984-2001. Nuestros objetivos son: (1) analizar si la clasificación de imágenes de satélite procedentes de estos sensores resulta adecuada para caracterizar los cambios en los humedales costeros del Mar Menor; (2) obtener en su caso, una cuantificación de la extensión ocupada por diversos hábitats (carrizal, saladar, estepa salina, cultivo) que permita documentar el efecto de las externalidades del regadío sobre los humedales del Mar Menor; (3) generar para cada uno de los humedales una cartografía multitemporal que facilite el análisis de las variaciones en la estructura interna de los mismos. Las hipótesis de trabajo son: (1) La clasificación de imágenes de Landsat permite la discriminación en estos humedales de pequeño tamaño de distintos tipos de hábitats y la distinción de los usos principales en el entorno de los mismos; (2) El aumento de los drenajes agrícolas en los humedales del Mar Menor ha favorecido la expansión de formaciones más freatofíticas y helofíticas (carrizales, saladares) frente a otras más xerófilas (estepas salinas, cultivos), lo que se ha traducido en un incremento de la superficie de estos humedales a costa de los terrenos cultivados o estépicos inmediatos.

ÁREA DE ESTUDIO

La Marina del Carmolí, la Playa de la Hita y el saladar de Lo Poyo son definidos en el Inventario Abierto de los Humedales de la Región de Murcia del año 2000 como criptohumedales litorales. En ellos los fenómenos hidrológicos e hidrogeológicos son muy complejos, constituyendo sistemas muy fluctuantes. La estratégica localización de estos humedales entre el Campo de Cartagena y el Mar Menor resulta idónea para optimizar la funcionalidad de los mismos para retener y eliminar parte de los nutrientes agrícolas del Campo de Cartagena, re-

duciendo con ello la afección de los mismos al Mar Menor (Departamento de Ecología de la Universidad de Murcia, 1998).

Dichos humedales presentan en mayor o menor medida manchas de saladar (*Sarcocornia fruticosa*, *Arthrocnemum macrostachyum*, *Halimione portulacoides*, *Limonium cossonianum*), estepa salina (*Lygeum spartum*, *Suaeda vera*, *Frankenia corymbosa*, *Limonium caesium*) y carrizal (*Phragmites australis*) que atienden a la disponibilidad de agua y a la salinidad de la misma, desarrollándose la estepa salina en zonas donde la disponibilidad de agua es menor y el carrizal donde el agua es más accesible y menos salada. En la Playa de la Hita el carrizal se encuentra en la franja más próxima al Mar Menor, asociado a una zona de descarga de agua subterránea. En la Marina del Carmolí las formaciones helofíticas de carrizal se encuentran asociadas a los cauces de las tres ramblas que atraviesan el humedal. Lo Poyo presenta una zonación vegetal clara, interrumpida en diversas zonas por áreas cultivadas. De este a oeste y paralelas a la línea de costa se distribuyen una estrecha franja arenosa, las antiguas salinas abandonadas, una banda de saladar y otra de carrizal. Estos humedales constituyen el hábitat de aves esteparias, como el alcaraván y la terrera marismeña, y acuáticas como la cerceta pardilla, la cigüeñuela y el chorlitejo patinegro. Asimismo, en estos humedales está presente el fartet (*Aphanius iberus*). Todos estos valores quedan refrendados por los estatus de protección existentes en la zona.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se han aplicado técnicas de clasificación digital de imágenes de satélite procedentes de sensores Landsat TM y ETM+ correspondientes al período 1984-2001 (Cuadro 1). Para ello se emplearon técnicas de clasificación supervisada, por el método de la máxima verosimilitud, y no supervisada (véase *Chuvieco,* 2002) utilizando combinaciones de las bandas a las que les corresponde una mayor diferencia espectral entre las clases tras realizar diagramas de signatura espectral. Igualmente, se compararon los resultados de las clasificaciones obtenidas con dos métodos: (1) el empleo de los rangos de signatura espectral extraídos para cada una de las clases a partir de las imágenes de satélite de 1997 para clasificar el resto de imágenes; (2) la clasificación de todas las imágenes a partir de áreas de entrenamiento a las que les corresponde la misma categoría en todos los años. Asimismo, se realizaron pruebas clasificando las escenas por separado y combinando las dos imágenes disponibles, de invierno y verano, de un mismo año. Por razones de espacio, presentaremos únicamente las clasificaciones realizadas con la técnica con la que se ha logrado una mejor descripción de la evolución del área de estudio. La mayor capacidad de discriminación de la clasificación supervisada con respecto a la no supervisada la han mostrado como la técnica más apropiada para analizar los cambios paisajísticos en los humedales del Mar Menor. Las cartografías más aproximadas a las reales se han logrado empleando las bandas de la 1 a la 8 para clasificar imágenes combinadas de invierno y verano del mismo año en base a áreas de entrenamiento que permanecen invariables a lo largo del período de estudio. La clasificación se realizó mediante GRASS (versión 5), utilizando tamaños de la malla de píxeles de 25 x 25 m.

Cuadro 1. Listado de las imágenes de satélite Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM clasificadas.

Sensor	Fecha de realización
Landsat 5 TM	19 julio 1984
Landsat 5 TM	20 abril 1992
Landsat 5 TM	10 agosto 1992
Landsat 5 TM	13 abril 1995
Landsat 5 TM	17 marzo 1997
Landsat 5 TM	9 septiembre 1997
Landsat 7 ETM+	26 julio 2001
Landsat 7 ETM+	1 diciembre 2001

Empleando el material fotogramétrico disponible (cuadro 2), y tras la realización de varias salidas de campo, se procedió a realizar, para cada uno de los humedales, un mapa de áreas de entrenamiento, considerando zonas cuya formación vegetal dominante permanezca invariable durante el período de estudio. Las categorías que se distinguen son: saladar, estepa salina, carrizal, cultivo, suelo desnudo, población y cuerpos de agua. La clase arenal, considerada en un principio, se omitió por no ser discriminada. Las áreas de entrenamiento utilizadas son de pequeño tamaño, siempre superior a 8 píxeles (*Schowengerdt,* 1997), estableciéndose para cada una de las categorías un número mínimo de 3 campos de entrenamiento. Las clasificaciones se realizaron utilizando todas las imágenes disponibles para el caso de los humedales Marina del Carmolí y Playa de la Hita. En el caso del saladar de Lo Poyo, la intensa dinámica de roturación-abandono del carrizal nos ha llevado a clasificar únicamente las imágenes adquiridas en fechas en las que el carrizal no estaba roturado (años 1984 y 2001).

Cuadro 2. Listado del material fotogramétrico empleado.

Material fotogramétrico y fecha correspondiente	escala	Propiedad
Fotogramas julio1984	1/30000	C.E.C.A.F. Ejército del Aire
Fotagramas marzo1986	1/18000	C.E.C.A.F. Ejército del Aire
Fotogramas febrero 1990 (vuelo de costas)	1/5000	MOPU, Dirección General de Puertos y Costas de Murcia
Fotogramas junio 1991	1/20000	Dirección General de Política Alimentaria
S.I.G. oleícola 1997	1/30000	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
Ortofotomapas digitales agosto 1999	1/25000	Ministerio de Fomento

Finalmente, se validaron las clasificaciones correspondientes al año 1997, en el caso de los humedales de la Marina del Carmolí y la Playa de la Hita, y 1984, para Lo Poyo. La elección de

las clasificaciones a validar se basó en la disposición y adecuación del material fotogramétrico correspondiente a la verdad-terreno. La validación se ha realizado superponiendo 100 puntos al azar sobre cada una de las imágenes clasificadas y las utilizadas como verdad-terreno, el S.I.G. oleícola de 1997 en los dos primeros casos, y los fotogramas de 1984, en el tercero. Para analizar cuantitativamente los resultados se preparó una matriz de confusión y se calculó el coeficiente Kappa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Playa de la Hita

A continuación se presentan los resultados obtenidos relativos a la variación en la superficie de los hábitats en la Playa de la Hita a lo largo del período 1984-2001 (Cuadro 3, Figura 1). Para facilitar la interpretación de los resultados, las cifras se han obtenido aplicando una máscara que permita trabajar únicamente con el humedal y su entorno inmediato.

Cuadro 3. Variaciones en el tamaño correspondientes a cada una de las categorías en la Playa de la Hita.

	Superficie (ha)				
categoría/año	1984	1992	1995	1997	2001
saladar	19’75	16’62	15’81	16’06	13’37
carrizal	3’12	3’43	6’12	6’50	7’62
estepa salina	0’12	0	0’81	0	0’12
cultivo	0’93	1’37	1’12	0’31	0’06
población	1’06	3’62	2’37	3’87	5’31
cuerpos de agua	7’37	7’31	6’12	5’63	5’87

En la Playa de la Hita se observa un crecimiento del carrizal hacia el interior de la llanura costera, aumentando progresivamente la superficie del humedal. Esta extensión se produce fundamentalmente a expensas del saladar inmediato, produciendo una disminución en el área de éste, que también se ve reducida por el paso a usos urbanos y agrícolas. Asimismo, paralelamente al aumento del carrizal, se observa una disminución de la superficie correspondiente a los cuerpos de agua, debido al avance de esta formación vegetal. Así, en la serie de imágenes se observa cómo hasta el año 2001 el carrizal presenta una estructura compleja lobulada, que indica el proceso de crecimiento hacia la laguna. Dicho crecimiento se ha constatado con las fotografías aéreas y en el campo. En el año 2001 se observa una homogenización de la formación del carrizal, que alcanza en este año un tamaño máximo. Por otra parte, en este último año se localizan manchas dispersas de carrizal hacia el interior de la llanura costera que se corresponden con una segunda banda de carrizal probablemente asociada a flujos de agua superficial

y subsuperficial. Durante el trabajo de campo realizado en 2004 esta banda se presenta continua y con una extensión mayor. Asimismo, se observa al comienzo de la serie de imágenes un proceso de crecimiento del saladar hacia el interior del humedal, proceso que tiene como límite determinadas infraestructuras anexas. Posteriormente, el saladar sufre un retroceso de parte de su superficie por la instalación de un vertedero de residuos sólidos urbanos.

A la validación de la clasificación (Cuadro 4), realizada sobre el mismo área representada en las Figura 1, le corresponde un coeficiente Kappa de 0'78 y una exactitud total del 89%, siendo el porcentaje de acierto en la clasificación del saladar y el carrizal del 83% y el 100%, respectivamente.

Cuadro 4. Matriz de confusión correspondiente a la validación de la clasificación de la Playa de la Hita (año 1997). S: saladar, ES: estepa salina, CA: carrizal, CU: cultivo, P: población, A: agua.

		Verdad-terreno						**total fila**	**exactitud productor**
		S	**ES**	**CA**	**CU**	**P**	**A**		
	S	30	0	0	0	0	0	30	1
	ES	0	13	0	2	1	0	16	0'81
	CA	1	0	6	0	0	0	7	0'86
	CU	0	1	0	4	1	0	6	0'67
	P	5	0	0	0	24	0	29	0'83
	A	0	0	0	0	0	12	12	1
total columna		36	14	6	6	26	12	100	
exactitud usuario		0'83	0'93	1	0'66	0'92	1		0'89

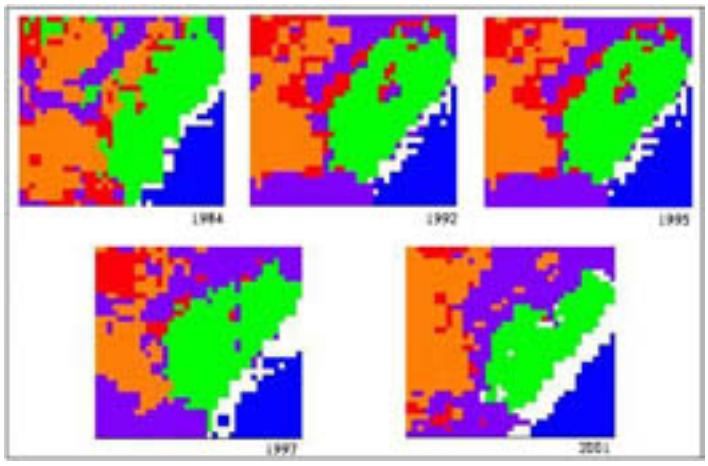


Figura 1. Serie de imágenes clasificadas correspondientes al humedal Playa de la Hita en los años 1984, 1992, 1995, 1997 y 2001. Leyenda: verde, saladar; naranja, estepa salina; blanco, carrizal; rojo, cultivos; violeta, población; azul, cuerpos de agua (véase anexo de figuras en color).

Marina del Carmolí

A continuación se presentan los resultados correspondientes a los cambios operados en la Marina del Carmolí (Cuadro 5, Figura 2). Las cifras indicadas en el Cuadro 5 se han obtenido realizando una máscara para acotar la superficie correspondiente al humedal y su entorno inmediato. Asimismo, se ha eliminado con la máscara toda la franja costera que queda desde la carretera que llega al Carmolí y los Urrutias hasta la laguna, donde los píxeles han sido asignados a una categoría con una probabilidad de acierto inferior al 40%.

Cuadro 5. Variaciones en el tamaño de los hábitats y los usos en la Marina del Carmolí y su entorno. La categoría áreas urbanas incluye tanto las poblaciones anexas al humedal, como las instalaciones militares presentes en el interior del mismo.

	Superficie (ha)				
categorías/año	1984	1992	1995	1997	2001
saladar	0	72’56	130’5	100’81	81’25
estepa salina	196’5	151’18	113’5	107’06	119’94
carrizal	0	0	8’56	33’18	61’31
cultivo	54’25	78’94	44’93	46’12	31’75
áreas urbanas	83’3	31’37	36’56	46’87	39’81

En el año 1984 la Marina del Carmolí se correspondía con una gran estepa salina de *Lygeum spartum* y *Suaeda vera* con una estructura interna heterogénea. En la Figura 2, se observa en 1984 en la parte sur de la Marina una gran zona de suelo desnudo, correspondiente a un área militar roturada y una extensa zona cultivada. En el período 1984-1995 se constata una extensión de la categoría saladar, a expensas de la estepa, las instalaciones militares y los cultivos, alcanzando un tamaño máximo en torno al año 1995. A partir de este año la suma saladar+carrizal se estabiliza entre las 135 y 140 ha y el saladar decrece por el progresivo incremento del carrizal desde 1995. Estos procesos han implicado un incremento de la extensión del humedal, que ha crecido lateralmente y en profundidad a expensas de los cultivos inmediatos, alcanzando un tamaño máximo en el año 2001.

Los resultados de la validación indican que el coeficiente de Kappa es de 0’82 y la exactitud total del 79% (Cuadro 6). El porcentaje de acierto en la clasificación del saladar y la estepa es del 74% y 78%, respectivamente, valores que se han visto reducidos respecto a los obtenidos en el anterior humedal fundamentalmente por la confusión entre ambas clases.

Saladar de Lo Poyo

En este humedal se constata un aumento de la superficie del carrizal, que tiene lugar fundamentalmente a expensas de los cultivos y, asimismo, del saladar y el suelo desnudo (Cuadro 7, Figura 3). El área ocupada por el saladar queda reducida principalmente por la expansión del

carrizal. En este humedal se pueden distinguir dos zonas: una al norte de la rambla del Beal y otra al sur. En esta última desde el año 1984 han permanecido una serie de regadíos con una extensión más o menos constante. Esta zona ha cambiado muy poco, aunque sí se constata en la misma una extensión de la superficie que corresponde al carrizal. La Figura 3 indica que el proceso de cambio ha sido más intenso en la zona situada al norte de la rambla del Beal, donde se produce un crecimiento tanto del saladar como del carrizal hacia el interior de la llanura costera. Estas transformaciones se encuentran ligadas a los cambios en el régimen hídrico.

Cuadro 6. Matriz de confusión correspondiente a la validación de la clasificación del humedal Marina del Carmolí (año 1997). S: saladar, ES: estepa salina, CA: carrizal, CU: cultivo, P: población.

		Verdad-terreno					**total fila**	**EP**
		S	**ES**	**CA**	**CU**	**P**		
	S	25	2	0	0	0	27	0’92
	ES	7	7	0	1	1	16	0’43
	CA	1	0	4	1	0	6	0’67
	CU	0	0	0	15	1	16	0’94
	P	1	0	0	2	13	16	0’81
total columna		34	9	4	19	15	81	
EU		0’74	0’78	1	0’79	0’87		0’79

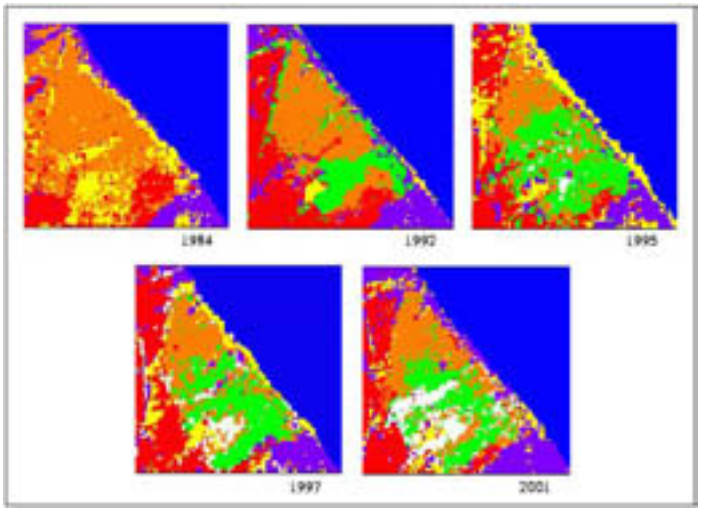


Figura 2. Variación de los hábitats en la Marina del Carmolí. Leyenda: verde, saladar; naranja, estepa salina; blanco, carrizal; amarillo, suelo desnudo; rojo, cultivos; violeta, población; azul, cuerpos de agua (véase anexo de figuras en color).

Cuadro 7. Variaciones en el tamaño correspondientes a cada una de las categorías en el saladar de Lo Poyo.

	Superficie (ha)	
categoría/año	**1984**	**2001**
saladar	45'94	28'56
carrizal	26'50	54'75
cultivos	210'44	179'81
suelo desnudo	174'31	165'43
población	28'63	57
cuerpos de agua	376'88	377'13

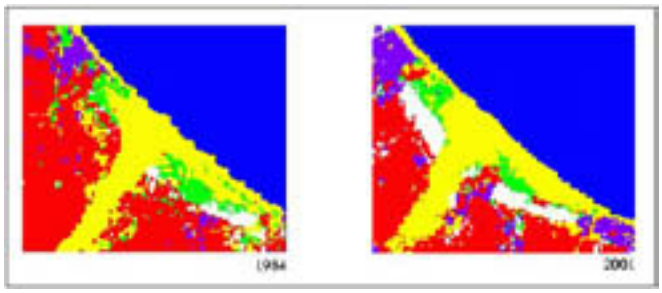


Figura 3. Variación en los hábitats correspondientes al saladar de Lo Poyo. Leyenda: verde, saladar; blanco, carrizal; amarillo, suelo desnudo; rojo, cultivos; violeta, población; azul, cuerpos de agua (véase anexo de figuras en color).

La validación de la clasificación (Tabla 8) indica que a la clasificación le corresponde un coeficiente Kappa de 0'81 y una exactitud total de 0'89. Al saladar y al carrizal les corresponde un porcentaje de acierto en la clasificación del 78% y 86%, respectivamente.

Cuadro 8. Matriz de confusión para los datos correspondientes a la validación de la clasificación del saladar de Lo Poyo (año 1997). S: saladar, CA: carrizal, CU: cultivo, SD: suelo desnudo, P: población, A: agua.

		Verdad-terreno						**total fila**	**exactitud productor**
		S	**CA**	**CU**	**SD**	**P**	**A**		
	S	14	1	0	0	0	0	15	0'93
	CA	2	6	0	0	0	0	8	0'75
	CU	2	0	39	0	0	0	41	0'95
	SD	0	0	6	18	0	0	24	0'75
	P	0	0	0	0	3	0	3	1
	A	0	0	0	0	0	9	9	1
total columna		18	7	45	18	3	9		
exactitud usuario		0'78	0'86	0'87	1	1	1		0'89

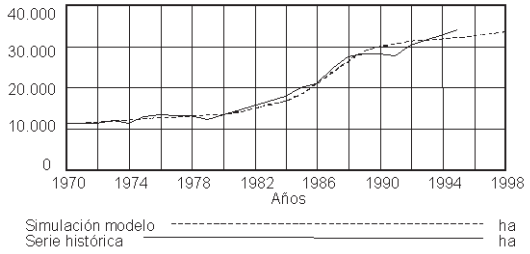
Efectos del regadío sobre la vegetación de humedales

Aunque la clasificación de imágenes de satélite ha sido empleada en numerosas ocasiones para documentar la intensificación directa del uso agrícola a expensas de la vegetación, la investigación de las extenalidades ambientales de la agricultura de regadío sobre los humedales se suele abordar con métodos basados en el estudio de fotografías aéreas y el trabajo de campo. Los resultados de la clasificación y validación demuestran, a pesar de las limitaciones encontradas en el estudio de los humedales con imágenes Landsat (*Noriega y Lozano-García*, 2000), la utilidad de las mismas para analizar la evolución temporal de este tipo de sistemas, obteniendo de forma rápida una cartografía cuya realización sería muy costosa con otros métodos. Con fotografías aéreas la tarea de delimitación de las fronteras entre los diversos tipos de vegetación del humedal estaría sometida a una enorme subjetividad, especialmente cuando estos tipos se encuentran en plena transición de unos a otros. Por otra parte, la clasificación de imágenes Landsat permite discriminar entre saladar y estepa salina aun cuando éstas formaciones comparten etapas de transición dominadas por la misma especie.

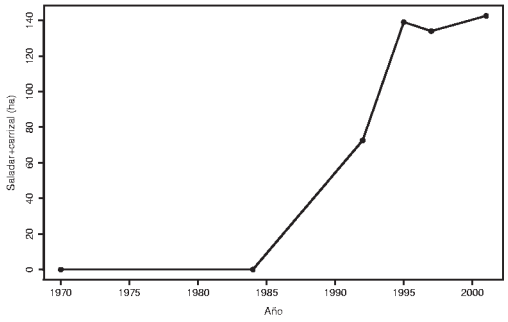
Los resultados de la clasificación confirman que los cambios en el régimen hídrico en los humedales del Mar Menor se han traducido en cambios internos en los hábitats de dichos humedales hacia formaciones más freatofíticas, especialmente los carrizales, que se superponen sobre cualquier unidad ambiental anterior: sobre antiguos cultivos (MC), saladares (PH, MC, LP), estepas salinas (MC) e incluso cuerpos de agua (PH). Asimismo, en la Marina del Carmolí, que constituía una estepa salina en 1984, se observa el incremento del saladar a expensas de esta formación. Este proceso ha implicado un aumento de la superficie de la Marina del Carmolí y Lo Poyo a costa de los terrenos cultivados o estépicos inmediatos, mientras que la playa de la Hita no incrementa de tamaño por la presencia de determinadas infraestructuras que limitan ese crecimiento (Cuadro 9). Dado que la extensión de estos sistemas depende de los usos consolidados en el entorno de los mismos, así como de su estado de protección, la superficie de los humedales no constituye un indicador preciso de los cambios en el régimen hídrico. Sin embargo, la extensión del carrizal presenta una mayor capacidad indicadora de estas transformaciones, al no existir tales restricciones a su crecimiento. Así, las cifras correspondientes al porcentaje del humedal original que se convierte en carrizal (Cuadro 9) parecen mantener una cierta proporción con el incremento global del 30-40% de la cantidad de agua en la cuenca de drenaje (datos propios). Asimismo, existe una correspondencia acusada entre el incremento de la superficie ocupada en la Marina del Carmolí por el saladar y el carrizal y la extensión del regadío en el Campo de Cartagena (Figura 4). Ambos procesos se caracterizan por un crecimiento sigmoideo que, en el caso de la superficie de regadío se estabiliza hacia el año 1991, produciéndose un retardo de al menos 5 años en la estabilización del proceso de incremento del humedal. Estos resultados sugieren el interés de la realización de modelos dinámicos capaces de describir las relaciones anteriormente comentadas y de simular los efectos previsibles bajo distintos escenarios socioeconómicos y ambientales para contribuir al desarrollo sostenible del Mar Menor y los humedales asociados. En este sentido, nos planteamos la utilización de modelos de simulación dinámica, ya empleados para describir la entrada de nutrientes en el Mar Menor (*Martínez y Esteve*, 2002), dada su capacidad para abordar sistemas complejos en los que interaccionan múltiples factores ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos.

Cuadro 9. Superficie de los humedales en 1984 y 2001 y cálculo del porcentaje del humedal original que pasa a constituir carrizal.

Humedal	área 1984 (ha)	área 2001 (ha)	variación área (ha)	variación área (%)	extensión carrizal (%)
Playa de la Hita	22'99	21'11	-1'88	8'18	19'6
Marina del Carmolí	196'5	262'5	+66	33'59	31'2
Lo Poyo	72'44	83'31	+10'87	15'01	38'99
Total	291'93	366'92	+74'99	25'68	32'22



(A)



(B)

Figura 4. (A) Evolución de la superficie de regadío en el Campo de Cartagena. Se representan tanto la serie histórica como la serie simulada mediante modelos de simulación dinámica (*Martínez y Esteve,* 2002). (B) Incremento de la superficie ocupada por el saladar y el carrizal en la Marina del Carmolí.

CONCLUSIONES

El cambio de régimen hídrico en los humedales del Mar Menor producido en las últimas décadas como consecuencia del incremento de los drenajes agrícolas procedentes del Campo de Cartagena se ha traducido a nivel biológico en cambios en los hábitats de los mismos ha-

cia formaciones más higrófilas (saladar, carrizal). Dichas transformaciones han implicado la extensión de algunos humedales, aunque este proceso depende de las circunstancias concretas del entorno de cada humedal. Sin embargo, la expansión gradual del carrizal parece constituir un buen indicador de los cambios hidrológicos operados en los humedales, relacionados en primera instancia con el incremento de la superficie de regadíos del Campo de Cartagena y sus drenajes agrícolas. Estos resultados sugieren el interés de profundizar en el análisis de las relaciones existentes entre los cambios generales ocurridos en el Campo de Cartagena, fundamentalmente en relación con los usos del territorio y los patrones de cambio observados en los humedales del Mar Menor a lo largo de los últimos años.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto europeo DITTY, "*Development of Information Technology Tools for the Management of European Southern lagoons under the influence of river-basin runoff*" (EVK3-CT-2002-00084), realizándose gracias a la concesión de una beca F.P.I. por la Fundación Séneca (Consejería de Economía, Industria e Innovación de la Región de Murcia). Igualmente, agradecemos la ayuda prestada a Juan Carlos González, José Antonio Palazón y Pedro Pérez.

REFERENCIAS:

Ackleson, S.G., Klemas, V., McKim, H.L. y Merry, C.J. (1985): "A comparison of SPOT simulator data with LANDSAT MSS imagery for delineating water masses in Delaware Bay, Broadkill River, and adjacent wetlands". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 51(8), pp. 1123-1129.

Boles, S.H., Xiao, X., Liu, J, Zhang, Q., Munkhtuya, S., Chen, S. y Ojima, D. (2004): "Land cover characterization of Temperate East Asia using multi-temporal VEGETATION sensor data". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 90, pp. 477-489.

Carter, V. (1982): "Applications of remote sensing to wetlands". En C.J. Johansen y J.L.Sanders (Eds.), *Remote Sensing for Resource Management*. Soil Conservation Society of America, Ankeny, pp. 284-300.

Chuvieco, E. (2002): *Teledetección ambiental*. Ariel Ciencia, Barcelona. 586 p.

Hess, L.L, Melack, J.M., Novo, E., Barbosa, C. y Gastil, M. (2003): "Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 87, pp. 404-428.

Jaques, D.R. (1989): *Topographic mapping and drying trends in the Peace-Athabasca Delta, Alberta using Landsat MSS imagery*. Parks, Canada. 52 pp.

Kokaly, R.F., Despain, D.G., Clark, R.N. y Livo, E. (2003): "Mapping vegetation in Yellowstone Park using spectral feature analysis of AVIRIS data". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, pp. 437-456.

Martínez, J. y Esteve, M.A. 2002: "El regadío del Campo de Cartagena y la exportación de fertilizantes agrícolas al Mar Menor". En J.Martínez y M.A.Esteve (coords.), *Agua, regadío y sostenibilidad en el Sudeste ibérico*, Bakeaz, Bilbao, pp 133-150.

Maselli, F. (2004): "Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 89, pp. 423-443.

Moore, G.K. y North, G.W. (1974): "Flood inundation in the southeastern United States from aircraft and satellite imagery". *Water Resources Bulletin*, Vol. 10(5), pp. 1082-1096.

Noriega, J. y Lozano-García, D.F. (2000): "Spatial filtering of radar data (RADARSAT) for wetlands (Brackish marshes) classification". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 73, pp. 143-151.

Novo, E.M.L.M y Shimabukuro, Y.E. (1997): "Identification and mapping of the Amazon habitats using a mixing model". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, pp. 663-670.

Rees, W.G., Williams, M. y Vitebsky, P. (2003): "Mapping land cover change in a reindeer herding area of the Arctic using Landsat TM and ETM+ imagery and indigenous knowledge". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85, pp. 441-452.

Schmidt, K.S. y Skidmore, A.K. (2003): "Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85, pp. 92-108.

Schowengerdt, R.A. (1997): *Remote Sensing. Models and methods for image processing*, 2ª edición. Academic Press, California.

Sippel, S.J.., Hamilton, S.K., Melack, J.M. y Choudhurry, B.J. (1994): "Determination of inundation area in the Amazon river fllodplain using the SMMR 37 GHz polarization difference". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 48, pp. 70-76.

Skidmore, A.K., Forbes, G.W. y Carpenter, D.J. (1988): "Non-parametric test of overlap in multispectral classification". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9(4), pp. 777-785.

Töyrä, J., Pietroniro, A. y Martz, L.W. (2001): "Multisensor hydrologic assessment of a freshwater wetland". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 75, pp. 162-173.

Zhang, M., Pinzon, J.E., Ustin, S.L. & Rejmankova, E. (1996): "Differenciating salt marsh species using foreground/background analysis", *ERIM 2nd Ann. Airborne Remote Sensing Conference*, Vol. I, pp 83-92, San Francisco.

Análisis mediante Teledetección y SIG de la estructura del paisaje en entornos forestales mediterráneos

A. García Martín, F. Pérez Cabello y J. de la Riva Fernández

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza.

RESUMEN

Las nuevas tecnologías de la información geográfica –Teledetección y SIG– constituyen herramientas útiles para la obtención, análisis, modelización y visualización de la información ambiental. En concreto, las imágenes de satélite proporcionadas por la Teledetección pueden ser consideradas como una representación digital del mosaico paisajístico. Esta información ha sido aprovechada por la Ecología del Paisaje para estudiar el patrón paisajístico territorial, el cual ayuda a entender muchos de los procesos ecológicos que en él tienen lugar, ya que éstos tienen un fuerte componente espacial. La Ecología del Paisaje ha desarrollado una nomenclatura sencilla y una serie de índices cuantitativos para la descripción y análisis de la estructura del paisaje. Estos índices permiten cuantificar la fragmentación, conectividad y heterogeneidad de los paisajes, que son los tres conceptos básicos considerados por esta disciplina. La medición de estos conceptos constituye un paso previo imprescindible para el estudio de las relaciones patrón-proceso.

El objetivo de este trabajo es analizar y describir el paisaje de la comarca de la Sierra de Albarracín en el marco conceptual de la Ecología del Paisaje mediante la utilización de índices cuantitativos. La metodología empleada parte de la utilización de una imagen Landsat para conocer la estructura paisajística de la comarca. Tras ser corregida geométrica y radiométricamente y calcular una serie de neocanales, se ha realizado una clasificación digital supervisada y, a partir de ella, una cartografía de ocupación vegetal del suelo. Sobre ésta se ha aplicado una serie de índices de fragmentación –área total / área de la clase, número de parches, porcentaje del paisaje, densidad de parches y dimensión fractal área-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

perímetro– de conectividad –distancia euclidiana al vecino más próximo e índice de cohesión– y de diversidad –índice de Shannon–. A partir de los resultados obtenidos, se ha caracterizado el paisaje de la comarca, constatando la potencialidad al respecto del uso de las imágenes de teledetección.

***Palabras Clave**: Teledetección y SIG, ecología y estructura del paisaje, clasificación digital, Albarracín (Teruel).*

ABSTRACT

New geographic information technologies –Remote Sensing and GIS– are useful tools to obtain and analyse environmental data. Since satellite images can be considered as a digital representation of the landscape mosaic, Landscape Ecology has used this information to study the landscape spatial pattern, that helps to understand many ecological processes. Several quantitative indices have been developed to quantify the fragmentation, the connectivity and the diversity of landscapes –three basic concepts to describe the landscape structure. The measure of these concepts is an essential previous step to study the relation pattern-process.

In this context, the aim of this paper is to analyse and to describe the landscape structure of Sierra de Albarracín (Iberian Range, Spain) by means of some landscape quantitative indices. Methodology in this work is based on the use of a Landsat image –to know the regional landscape structure. The satellite image was geometrically and radiometrically pre-processed and several new spectral bands were derived. A supervised classification was then performed to obtain landscape cartography. Finally, some fragmentation indices –Total Area/ Total Class Area, Number of Patches, Percentage of Landscape, Patch Density and Perimeter-Area Fractal Dimension–, connectivity indices –Euclidean Nearest-Neighbour Distance, Cohesion Index–, and a diversity index –Shannon Index– were applied. Results were used to describe the landscape structure of the study area.

***Key words:** Remote Sensing and GIS, Landscape structure, supervised classification, Albarracín (Teruel).*

INTRODUCCIÓN

La generación de cartografía de ocupación del suelo a partir del tratamiento digital de imágenes de satélite es una de las aplicaciones de la teledetección más prolíficas y contrastadas (*Chuvieco*, 2002). Una de las informaciones que se puede derivar a partir de una cartografía de ocupación del suelo es la identificación del patrón espacial que presentan las cubiertas vegetales de un territorio. El conocimiento de este patrón espacial es importante, ya que ayuda a entender muchos de los procesos ecológicos. Desde una perspectiva basada en la conservación

de la biodiversidad y el desarrollo sostenible, considerar tales procesos es un requisito fundamental para aplicar planes de ordenación territorial (*Botequilha y Ahern*, 2002), establecer directrices de gestión y diseñar estrategias para la conservación de la naturaleza (*Burel y Baudry,* 2001).

Los procesos ecológicos se caracterizan por tener una fuerte componente espacial, de ahí que el estudiar las relaciones entre la estructura espacial de un ecosistema y su funcionamiento ecológico suscite un gran interés por parte de la comunidad científica. Cuestiones como el funcionamiento y dinámica de las poblaciones, las relaciones interespecíficas, la biodiversidad y los flujos geoquímicos que tienen lugar en el paisaje son algunos de los procesos ecológicos considerados de primer orden en el contexto general de la investigación y de la problemática ambiental a nivel internacional en las dos últimas décadas (*Burel y Baudry*, 2001). Una modificación en los patrones del paisaje puede comprometer su integridad funcional interfiriendo en los procesos ecológicos críticos necesarios para la persistencia de una población, el mantenimiento de la biodiversidad y de la salud del ecosistema (*McGarigal et al.,* 2002). Desde la Ecología del Paisaje los esfuerzos se han centrado mayoritariamente en desarrollar métodos cuantitativos que den rigor a este tipo de análisis patrón espacial-proceso ecológico (*Turner y Gardner*, 1991; *Forman y Godron*, 1986; *Naveh y Liebermann*, 1984; *Haines-Young y Chopping*, 1996): en concreto, la definición de índices capaces de medir los elementos del mosaico paisajístico y las relaciones existentes entre ellos, como paso previo al estudio de las relaciones patrón-proceso.

Para la descripción, análisis y comparación de distintos paisajes desde el punto de vista estructural, en la Ecología del Paisaje se ha desarrollado una nomenclatura específica propuesta en uno de sus textos fundadores por *Forman y Gordón* (1981). Estos dos autores plantean que los paisajes están constituidos por una serie de elementos (*Burel y Baudry*, 2001): **parches** o **manchas** –áreas discretas con una serie de condiciones ambientales relativamente homogéneas, que se distinguen por discontinuidades marcadas con su entorno–, **corredores** –elementos lineales del paisaje que se diferencian de su entorno de una forma clara y que pueden unir manchas de vegetación de unas características similares– y **matriz** –el elemento dominante, es decir, el parche o mancha dominante dentro de un paisaje tanto en extensión como en conectividad–.

El conjunto de parches de diferente naturaleza que aparecen en un territorio delimitado constituyen el *mosaico paisajístico*, mientras que el conjunto de corredores presentes forman una *red*. La disposición espacial del mosaico y de las redes a una determinada escala constituyen el *patrón paisajístico*, que permite analizar la *unidad de paisaje*[1] desde el punto de vista estructural.

Dependiendo de la escala de trabajo elegida y de los datos espaciales considerados se pueden diferenciar cuatro tipos de patrones paisajísticos (*McGarigal et al.,* 2002): puntuales, lineales, de superficie y de categorías. La cartografía de ocupación que se ha utilizado en este trabajo per-

[1] Por *unidad de paisaje* entendemos el mosaico paisajístico que queda dentro de unos límites definidos en una determinada escala de trabajo.

tenece a la de categorías, ya que los límites de cada uno de los elementos que la integran tienen unos límites claramente definidos. En esta cartografía el paisaje se presenta como un mosaico de parches discretos que, desde una perspectiva ecológica, tienen unas condiciones relativamente homogéneas a una determinada escala. El objetivo de los análisis realizados sobre estos datos suele ser el de caracterizar su composición (diversidad del territorio) y su configuración espacial, siendo muy numerosos los índices creados para medir las características geométricas y espaciales de los patrones categóricos de un mapa representados a una determinada escala.

Así pues, la Ecología del Paisaje ha desarrollado una serie de índices que pretenden cuantificar tres nociones básicas: la *fragmentación* –concepto que hace referencia a la cantidad y variedad del hábitat disponible en una unidad de paisaje–, la *conectividad* –relacionada con la distancia física entre dos parches y a la capacidad de desplazamiento de los individuos– y la *heterogeneidad* –formada por dos componentes: la diversidad de los elementos paisajísticos (parches) y la complejidad de sus relaciones espaciales (reparto espacial-conectividad)–. Estos tres conceptos se encuentran muy interrelacionados (*Burel y Baudry*, 2001).

Dentro de este marco conceptual, el presente trabajo se propone como objetivo analizar y describir el paisaje de la comarca de la Sierra de Albarracín mediante la aplicación algunos de estos índices cuantitativos sobre la cartografía de ocupación obtenida mediante clasificación digital supervisada de una imagen Landsat.

De esta manera, este trabajo hace hincapié en la validez de las técnicas de clasificación digital para la obtención de información sobre la cubierta vegetal de un territorio en un momento determinado y en la utilidad de los índices desarrollados por la Ecología del Paisaje para analizar un paisaje desde el punto de vista estructural.

ÁREA DE ESTUDIO

Este trabajo utiliza como área de estudio la comarca de la Sierra de Albarracín, que se encuentra situada en el sector Sur-Suroeste de Aragón, ocupando una superficie de 1414 km^2 (Figura 1). El área delimitada queda incluida dentro del dominio morfoestructural del Sistema Ibérico. En concreto, las serranías de Albarracín constituyen el sector centro de este sistema montañoso, formando el núcleo de la "Rama Castellana". La fisiografía de la comarca de la Sierra de Albarracín está caracterizada por un conjunto de sierras y parameras calcáreas aplanadas que se encuentran individualizadas por la red hidrográfica. La dirección dominante del relieve es NO-SE, existiendo un gradiente altitudinal de Oeste –que es la zona donde se localizan las mayores altitudes, cercanas a los 2.000 m– a Este, si bien la mayor parte del territorio se encuentra por encima de los 1.000 m sobre el nivel del mar. En cuanto a la red hidrográfica podemos distinguir entre los ríos que pertenecen a la vertiente atlántica –Tajo y Gallo– y los que pertenecen a la mediterránea –Guadalaviar, Ebrón y Cabriel–. De todos ellos el más importante es el río Guadalaviar. En cuanto al clima, se distinguen tres dominios climáticos: mediterráneo continental, de transición entre mediterráneo continental y de montaña, y de montaña. Conforme se va produciendo el incremento de altura se pasa de un dominio climático a otro.

En este contexto geográfico se dan dos de los seis pisos bioclimáticos de la Región Mediterránea, dentro de la cual queda enmarcada la totalidad del área de estudio: el piso Oromediterráneo (por encima de los 1.500-1.600 m) y el Supramediterráneo (entre los 980 y los 1.500-1.600 m). Aparecen cinco dominios de vegetación (*Querol*, 1995): dominio del pino silvestre con sabina rastrera, dominio del rebollar, dominio de los sabinares albares, dominio del quejigar ibérico y dominio del carrascal somontano.

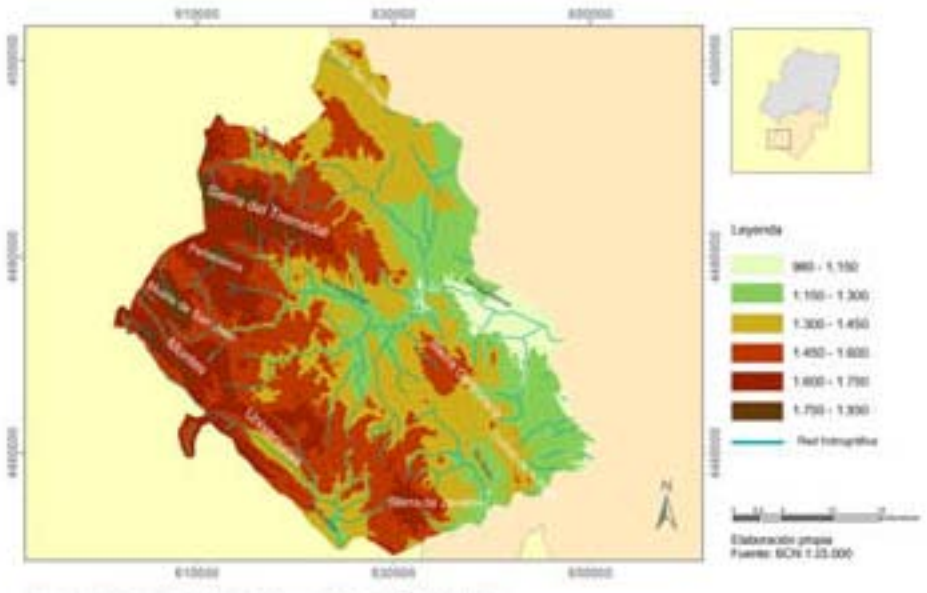


Figura 1. Mapa de localización de la comarca de la Sierra de Albarracín.

METODOLOGÍA

La metodología que se aplica en este trabajo se sitúa en el contexto de las nuevas tecnologías de la información geográfica (Teledetección y SIG) como fuentes de información y herramientas en el marco de la Ecología del Paisaje. La escala de trabajo elegida es 1:50.000, adecuada para el trabajo con imágenes Landsat y a la cual se encuentra el documento de información auxiliar que servirá para dirigir el proceso de clasificación digital. Los programas informáticos utilizados son: Erdas Imagine 8.4 y Dimple 3.2 para el tratamiento digital de la imagen de satélite, ArcView 3.2 y ArcGis-ArcInfo 8.1 para el tratamiento de la información auxiliar y la edición de la cartografía y Fragstats 3.3 y Excel 2000 para la aplicación de los índices cuantitativos y su tratamiento estadístico.

En primer lugar se generó la **cartografía de ocupación del suelo de la comarca de la Sierra de Albarracín**. Esta etapa se articuló en cinco fases: *aplicación de pretratamientos* –corrección geométrica y radiométrica de la imagen y cálculo de neocanales–, *preparación*

de información auxiliar para la clasificación digital –se elaboraron dos documentos: Mapa Forestal comarcal escala 1:50.000 y un mosaico con ortoimágenes de resolución espacial de un metro–, *clasificación digital de la imagen* –mediante el método supervisado–, *verificación de los resultados* y, finalmente, *edición de la cartografía de ocupación del suelo* (Figura 2).

Durante el proceso de clasificación, además de las bandas reflectivas originales y de los neocanales obtenidos, se utilizó un modelo digital de elevaciones (MDE) generado a partir de las hojas de la Base Cartográfica Nacional (BCN) 1:25.000. Para validar la clasificación se combinaron dos fuentes: datos proporcionados por el Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN-2) de la provincia de Teruel y áreas de verificación tomadas a priori sobre el mosaico de ortoimágenes. Con un total de 116 puntos, se obtuvo un 77,59% de fiabilidad en la matriz de exactitud y un coeficiente Kappa de 0,7379.

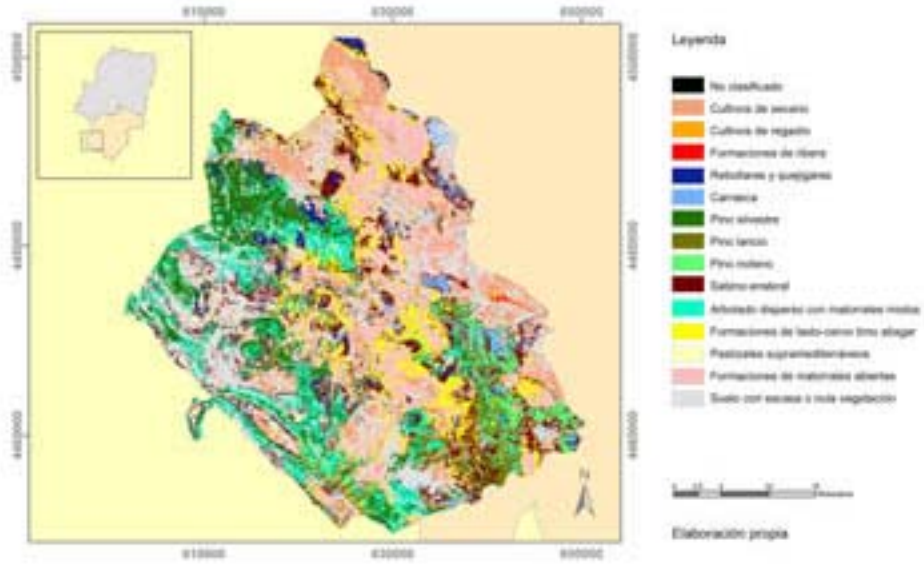


Figura 2. Cartografía de ocupación del suelo de la comarca de la Sierra de Albarracín.

En la segunda etapa se seleccionaron una serie de índices para determinar la fragmentación, la conectividad y la heterogeneidad del paisaje de la comarca. Estos índices son aplicados a nivel de unidad de paisaje (mosaico paisajístico) y/o a nivel de clase[2]. Las formulaciones, tomadas de *McGarigal et al.* (2002), son las siguientes:

$$TA = A\left[\frac{1}{10000}\right] \qquad (1)\ \text{Área total } (TA)$$

[2] Se denomina clase al grupo formado por todos los parches existentes en el mosaico paisajístico que son de un mismo tipo (*McGarigal et al*., 2002).

Donde *A* es el área total de la unidad de paisaje medida en m^2. Resultado en hectáreas.

$$CA = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}\left[\frac{1}{10000}\right] \tag{2}$$

Donde C*A* es el área de la clase, a_{ij} es el área en m^2 del parche *ij*. Resultado en hectáreas.

$$NP = N \tag{3}$$

Donde *N* es el número total de parches de la unidad de paisaje.

$$NP_i = n_i \tag{4}$$

Donde NP_i es el número de parches de cada clase, n_i es el número de parches presentes en la unidad de paisaje de la clase *i*.

$$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{A} \tag{5}$$

Donde *PLAND* es el porcentaje del paisaje, P_i es la proporción de la unidad de paisaje ocupada por los parches de la clase *i*, a_{ij} el área que ocupa el parche *ij* y *A* el área total de la unidad de paisaje. Resultado en porcentajes.

$$PD = \frac{N}{A}\ (10000)(100) \tag{6}$$

Donde *PD* es la densidad de parches, *N* es el número total de parches en la unidad de paisaje y *A* el área total de la unidad de paisaje. Resultado en número de parches por cada 100 hectáreas.

$$PD_i = \frac{n_i}{A}(10000)(100) \tag{7}$$

Donde PD_i es la densidad de parches de la clase, n_i es el número de parches presentes en la unidad de paisaje de la clase *i* y *A* el área total de la unidad de paisaje. Resultado en número de parches por cada 100 hectáreas.

$$PAFRAC = \frac{\left[N\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(\ln p_{ij}\cdot \ln a_{ij})\right] - \left[\left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\ln p_{ij}\right]\left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\ln a_{ij}\right]\right]}{\left[N\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\ln p_{ij}^{\ 2}\right] - \left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\ln p_{ij}\right]^2} \tag{8}$$

Donde *PAFRAC* es la dimensión fractal área-perimetro, a_{ij} es el área del parche *ij*, p_{ij} el perímetro del parche *ij* y *N* el número total de parches en la unidad de paisaje. Resultado comprendido entre 1 y 2.

$$PAFRAC = \frac{\left[n_i \sum_{j=1}^{n} (\ln p_{ij} \cdot \ln a_{ij})\right] - \left[\left[\sum_{j=1}^{n} \ln p_{ij}\right]\left[\sum_{j=1}^{n} \ln a_{ij}\right]\right]}{\left[n_i \sum_{j=1}^{n} \ln p_{ij}^{2}\right] - \left[\sum_{j=1}^{n} \ln p_{ij}\right]^{2}} \quad (9)$$

Donde *PAFRAC* es la dimensión fractal área-perimetro aplicada a la clase, a_{ij} es el área del parche *ij*, p_{ij} el perímetro del parche *ij* y n_i es el número de parches presentes en la unidad de paisaje de la clase *i*. Resultado comprendido entre 1 y 2.

$$ENN_MN = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_{ij}}{n_i} \quad (10)$$

Donde *ENN_MN* es la distancia euclidiana media al vecino más próximo (aplicado a nivel de clase) x_{ij} es la distancia euclidiana al vecino más próximo del parche *ij* y n_i es el número de parches presentes en la unidad de paisaje de la clase *i*. Resultado en metros.

$$\text{COHESION} = \left[\ 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n} p_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} p_{ij}\sqrt{a_{ij}}}\ \right]\left[\ 1 - \frac{1}{\sqrt{A}}\ \right]^{-1}(100) \quad (11)$$

Donde COHESION es el índice de cohesión, aplicado a nivel de clase, p_{ij} es el perímetro del parche *ij* en términos de número de píxeles ocupados, a_{ij} el área del parche *ij* en términos del número de píxeles y *A* el número total de píxeles de la unidad de paisaje. El resultado varía entre 0 (clase muy disgregada) y 100 (clase muy agregada).

$$SHDI = -\sum_{i=1}^{m} (P_i \cdot \ln P_i) \quad (12)$$

Donde *SHDI* es el índice de Shanoon aplicado a nivel de paisaje, P_i es la proporción del paisaje ocupada por la clase *i*. Cuanto más alto sea el valor obtenido al aplicar el índice de Shannon, mayor heterogeneidad tendrá el paisaje, aunque esta cifra no es significativa por sí misma, ya que es un índice relativo que adquiere valor al compararlo con el calculado para otros paisajes o sobre él mismo en diferentes épocas.

En la tercera etapa se aplican todos estos índices sobre la cartografía de ocupación. También se incluye en esta etapa la obtención de cartografía de diversidad paisajística de la comarca de la Sierra de Albarracín para determinar la localización de áreas que poseen una mayor heterogeneidad. Por último, se describe el paisaje de la comarca según los resultados obtenidos.

RESULTADOS

Para estudiar el patrón paisajístico de la comarca de la Sierra de Albarracín se divide el

análisis según las tres nociones establecidas por la Ecología del Paisaje para el estudio de las estructuras espaciales: fragmentación, conectividad y heterogeneidad o diversidad *(Burel y Baudry,* 2001). Los resultados obtenidos se recogen en los Cuadros 1 a 4; la Figura 3 presenta una cartografía de heterogeneidad elaborada tras aplicar el índice de Shanoon, utilizando un sistema de ventanas móviles.

Cuadro 1. Índices de fragmentación aplicados a nivel de unidad de paisaje.

Comarca	**TA**	**NP**	**PD**	**PAFRAC**
Sierra de Albarracín	141370.13	64151	45.38	1.3285

Cuadro 2. Índices de fragmentación aplicados a las clases.

Clase	**CA**	**PLAND**	**NP_i**	**PD_i**	**PAFRAC**
Cultivos de secano	13679.50	9.68	3892	2.75	1.3013
Cultivos de regadío	438.31	0.31	376	0.27	1.3157
Formaciones de ribera	252.81	0.18	241	0.17	1.2950
Rebollares y quejigares	2276.13	1.61	1706	1.21	1.3084
Carrasca	3523.56	2.49	2958	2.09	1.3015
Pino silvestre	11331.13	8.02	2773	1.96	1.3128
Pino laricio	3921.00	2.77	2302	1.63	1.2978
Pino rodeno	5018.06	3.55	2169	1.53	1.3313
Sabino-enebral	19020.19	13.45	11201	7.92	1.3347
Arbolado disperso con matorrales mixtos	13353.25	9.45	6886	4.87	1.3564
Formaciones de lasto-cervo timo aliagar	13493.56	9.54	9029	6.39	1.3338
Pastizales supramediterráneos	1279.63	0.91	1116	0.79	1.3021
Formaciones de matorrales abiertas	15533.38	10.99	5829	4.12	1.3132
Suelo con escasa o nula vegetación	38205.38	27.03	13111	9.27	1.3449
No clasificado	44.25	0.03	562	0.40	1.2778

Cuadro 3. Índices de conectividad aplicados a las clases.

Clases	**ENN_MN**	**COHESION**
Cultivos de secano	108.76	97.01
Cultivos de regadío	147.96	89.64
Formaciones de ribera	264.28	87.11
Rebollares y quejigares	167.11	92.50

Carrasca	104.42	91.13
Pino silvestre	100.59	98.74
Pino laricio	114.40	93.13
Pino rodeno	105.39	96.37
Sabino-enebral	79.39	94.52
Arbolado disperso con matorrales mixtos	74.11	95.51
Formaciones de lasto-cervo timo aliagar	82.34	93.55
Pastizales supramediterráneos	168.90	90.22
Formaciones de matorrales abiertos	95.97	97.07
Suelo con escasa o nula vegetación	70.76	98.75
No clasificado	127.18	14.74

Cuadro 4. Índice de Shanoon aplicado a nivel de unidad de paisaje.

Comarca	**SHDI**
Sierra de Albarracín	2.1923

El Cuadro 1 ofrece una primera aproximación sobre la estructura del paisaje de la comarca; así, uno de los rasgos principales a destacar es que el paisaje de esta comarca se encuentra bastante fragmentado (45,38 parches por cada 100 ha). El resto de índices sirven, más que para caracterizar esta unidad de paisaje, para compararla con otras.

Los resultados recogidos en el Cuadro 2 permiten analizar la fragmentación de las clases presentes en la comarca. Los valores muestran cómo la clase más abundante es *suelo con escasa o nula vegetación*, que ocupa algo más del 27% de la comarca. Le siguen en importancia las clases que hacen referencia a formaciones vegetales que tienen una estructura abierta: *sabino-enebral* (13,45%), *formaciones de matorrales abiertas* (10,98%), *formaciones de lasto-cervo timo aliagar* (9,54%) y *arbolado disperso con matorrales mixtos* (9,45%). Los *cultivos de secano* presentan porcentajes de ocupación similares a los de las formaciones de matorral (9,67%). En cuanto a las especies forestales[3], las dominantes son las pináceas, que juntas representan algo más del 14% del total del área de estudio, destacando entre ellas el *pino silvestre* con un 8%. El porcentaje de ocupación de las frondosas apenas llega al 4%, siendo la especie más abundante la *carrasca* (2,49%). Por otra parte, la presencia en la comarca de *pastizales supramediterráneos*, *cultivos de regadío* y *formaciones de ribera* es casi testimonial, ya que ninguna de las tres representa el 1% de la superficie total.

[3] En la cartografía de ocupación del suelo se asignaron dentro de las categorías de especies forestales sólo las formaciones densas (bosques). Cuando el estrato arbustivo era más importante que el arbóreo se asignaron a *Arbolado disperso con matorral mixto* o a alguna de las tres categorías de matorral, dependiendo de su composición.

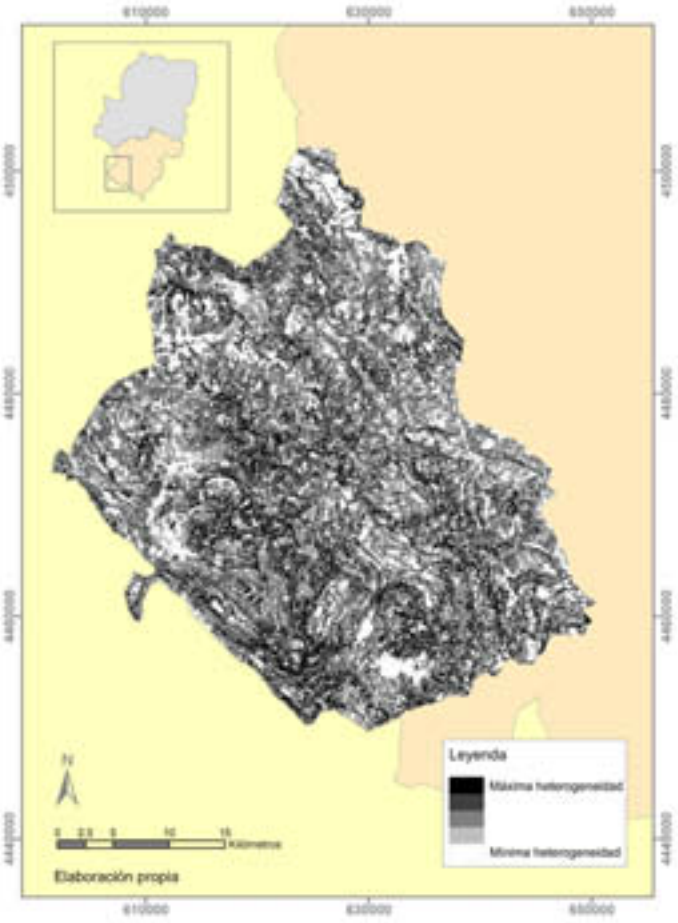


Figura 3. Cartografía de heterogeneidad de la comarca de la Sierra de Albarracín.

Los índices NP_i y PD_i nos muestran cómo es la fragmentación de cada una de estas clases. Los valores obtenidos guardan en general una relación directa con los porcentajes de ocupación comentados, lo que viene a significar que existe una escasa concentración espacial. Así, la clase más fragmentada es *suelo con escasa o nula vegetación*. Otras clases con un alto grado de fragmentación son *sabino-enebral* y las tres correspondientes a formaciones de matorrales. Muy significativos son los valores obtenidos para la clase *cultivos de secano* que era la cuarta categoría que más superficie ocupaba y pasa a ser la sexta en cuanto a número de parches. Esto se debe a la propia naturaleza de esta clase. Dentro del grupo de clases forestales destaca la fragmentación de la *carrasca*, ya que, a pesar de ser la cuarta especie forestal en cuanto a ocupación, es la que se encuentra dividida en mayor número de parches. Esto significa que la carrasca se encuentra mucho más fragmentada que el resto de especies forestales. En el caso opuesto se encuentra *rebollares y quejigares*, que es la clase forestal más agrupada.

En cuanto a la complejidad geométrica de los parches de las clases presentes en la Sierra de Albarracín, los bajos valores obtenidos al aplicar el índice *PAFRAC* nos muestran que las formas en general son relativamente simples. Los parches con geometrías más complejas son los de *arbolado disperso con matorrales mixtos*, lo que es lógico por la disposición espacial de esta categoría en el área de estudio, ya que es la formación dominante en los claros y en las zonas de borde de los bosques de coníferas. Le siguen en complejidad *suelo con escasa o nula vegetación* y dos formaciones caracterizadas por su estructura abierta: *sabino-enebral* y *formaciones de lasto-cervo timo aliagar*. Las clases con menor complejidad geométrica corresponden a *cultivos de secano*, *pino laricio* y *formaciones de ribera*. La acción antrópica es la causa directa de la baja complejidad geométrica de los *cultivos de secano* y, seguramente, también tiene un papel relevante en las otras dos clases ya que el *pino laricio* es la especie más empleada en la zona para repoblaciones y para la discriminación en la clasificación de *formaciones de ribera* se utilizaron como áreas de entrenamiento choperas introducidas por el hombre para su posterior tala.

Para determinar la conectividad a nivel de clase interpretamos los valores recogidos en el Cuadro 3. De esta manera, las mayores distancias entre parches de una misma clase se dan en *formaciones de ribera* (264,28 m). Otras formaciones que también presentan un alto aislamiento son los *pastizales supramediterráneos* (168,90 m) y los *rebollares y quejigares* (167,11 m). Los intercambios ecológicos entre los parches de estas clases son a priori los más dificultosos, dependiendo mucho los movimientos de las especies de la conectividad funcional. Las clases con menor distancia entre sus parches coinciden con aquellas que son más abundantes: *suelo con escasa o nula vegetación*, *arbolado disperso con matorrales mixtos*, *sabino-enebral*, *formaciones de lasto-cervo timo aliagar* y *formaciones de matorrales abiertas*, todas ellas con distancias inferiores a los 100 m. La conectividad espacial de estas clases es alta, por lo que la conectividad funcional no tendrá tanta importancia como en los casos anteriores. Dentro de las especies forestales las menores distancias entre parches se dan en la clase *pino silvestre*. Los valores obtenidos al aplicar el índice *COHESION* ayudan a caracterizar la información sobre la conectividad espacial ofrecida por *ENN_MN*. Así, de las tres clases con un índice *COHESION* más bajo dos coinciden con las que mayor *ENN_MN* tenían: *formaciones de ribera* y *pastizales supramediterráneos*. Las clases con mayor cohesión interna son *suelo con escasa o nula vegetación*, *pino silvestre*, *formaciones de matorrales abiertos* y *cultivos de secano*. Destaca dentro de este grupo la clase *pino silvestre* debido a que, al contrario que las otras, no es de las más abundantes en la comarca. Este hecho indica que los parches de *pino silvestre* se encuentran muy concentrados espacialmente, formando zonas de bosques más o menos cercanas, facilitándose los posibles flujos ecológicos.

De forma sintética, desde el punto de vista de la estructura, podemos decir que en la comarca de la Sierra de Albarracín las formaciones vegetales con estructura abierta son dominantes sobre las densas, siendo muy importante la presencia de espacios con escasa o nula cubierta vegetal y los espacios ocupados por la actividad agrícola, dedicados casi exclusivamente al secano. Por otro lado, si atendemos al tipo de cubierta vegetal, las clases que hacen referencia a cubiertas forestales (incluyendo dentro de este grupo *sabino-enebral* y *arbolado disperso con matorrales mixtos*) son más abundantes que las comunidades arbustivas y herbáceas.

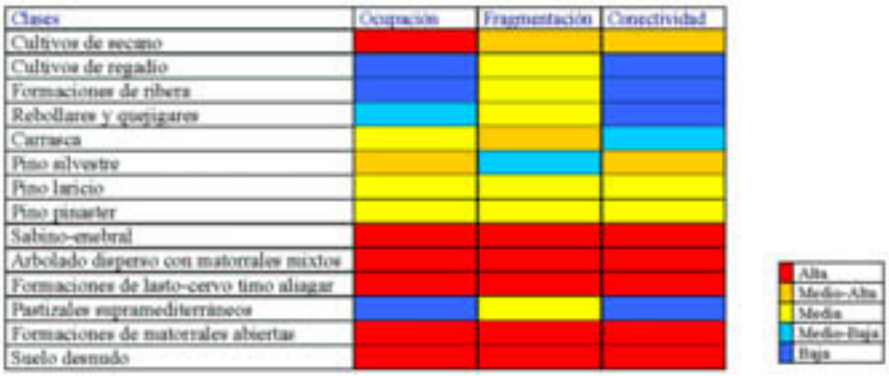


Figura 4. Ocupación, fragmentación y conectividad en la Sierra de Albarracín.

En la Figura 4 se expresa de una manera cualitativa la información sobre ocupación, fragmentación y conectividad de cada clase. La formación vegetal más importante en el conjunto del área de estudio es el *sabino-enebral*, que es la segunda clase en porcentaje de ocupación. Esta formación se encuentra muy fragmentada, ya que es también la segunda clase que más parches tiene, siendo la forma geométrica de éstos de las más complicadas. Debido a su abundancia y a su amplio reparto espacial, la distancia entre los parches que la forman es relativamente baja. Todos estos aspectos –abundancia, amplia distribución y alta conectividad espacial– parecen señalar que los sabino-enebrales pueden jugar un papel esencial en el funcionamiento de los flujos ecológicos de la comarca.

La mayor parte de las características de *sabino-enebral* se repiten en el caso de la clase *suelo con escasa o nula vegetación*: presencia importante (es la que mayor superficie ocupa), alta fragmentación (superior al resto), formas geométricas de los parches relativamente complejas y un amplio reparto espacial, si bien la concentración espacial de esta clase es importante ya que presenta la menor distancia euclidiana entre parches y el mayor valor de *COHESION*.

En lo que hace referencia a las especies forestales, las pináceas son las que mejor se adaptan a los factores ecogeográficos de la comarca, siendo la clase más importante el *pino silvestre*. Los altos porcentajes de ocupación de *pino silvestre*, así como su escasa fragmentación en comparación con el resto de las especies forestales, indican que las masas de este pino constituyen los bosques más importantes en el área de estudio. Le siguen en importancia las masas de *pino rodeno* y *pino laricio*. Como ya hemos comentado, el carácter de repoblación de los pinares de laricio explicaría el bajo valor de *PAFRAC* de esta clase. Por otro lado, la amplia distribución potencial que las frondosas tienen en el área de estudio contrasta con su distribución real, lo que indica que se encuentran muy degradadas. Sin embargo, se identifican diferencias entre las dos clases que componen este grupo: mientras que la *carrasca* es la especie forestal más fragmentada, *rebollares y quejigares* es la que menos, aunque la distancia entre los parches que la constituyen es alta por lo que los intercambios ecológicos entre ellas son difíciles.

La clase *arbolado disperso con matorrales mixtos* identifica las zonas de transición situadas entre las masas forestales densas que acabamos de describir y las comunidades arbustivas y herbáceas. Su mayor o menor presencia es importante, ya que complementa la información sobre el estrato arbóreo. La alta conectividad espacial existente entre los parches de esta clase, los altos porcentajes de ocupación y su disposición espacial hacen que, a priori, esta clase regule una gran parte de los flujos ecológicos que se dan entre los bosques.

Las comunidades arbustivas y herbáceas tienen una alta representación en la Sierra de Albarracín (21,44%). Las clases *formaciones de lasto-cervo timo aliagar* y *formaciones de matorrales abiertos* se encuentran muy fragmentadas y se distribuyen por gran parte del territorio, lo que hace que la distancia entre parches sea baja. Los *pastizales supramediterráneos*, además de ser la clase menos representativa de este grupo, es la que menor conectividad tiene debido a que sólo se localiza en zonas de alta montaña.

La superficie dedicada a los *cultivos de secano* es importante (9,68%), caracterizada por la concentración espacial y la baja complejidad geométrica de sus parches. Por último cabe señalar la escasa representación que los cultivos de regadío y las formaciones de ribera tienen en el área de estudio ya que solamente representan un 0,31% y un 0,18%, respectivamente.

La *cartografía de heterogeneidad de la Sierra de Albarracín* (Figura 4) muestra varias zonas con valores altos, entre las que destacan: la cuenca del río Gallo y sus afluentes, situada en el sector Noroeste de la comarca; el tramo medio de la cuenca del río Guadalaviar y la cabecera de sus afluentes, emplazada en el centro; el tramo final del río Cabriel y sus afluentes, localizados al Sur; y la cuenca de cabecera del río Ebrón y sus afluentes, situada en el cuadrante Sureste de la comarca. En todas estas zonas se da un mosaico paisajístico caracterizado por la presencia en reducidos espacios de categorías que hacen referencia a bosques densos, bosques de estructura abierta, formaciones de matorral, zonas de suelo con escasa vegetación y/o espacios agrícolas. La menor diversidad se identifica en aquellos espacios donde una determinada clase es dominante y alcanza una extensión importante, como en las elevaciones montañosas del sector oriental, donde dominan las clases *pino silvestre* y *arbolado disperso con matorrales mixtos*, y en las zonas llanas de las parameras septentrional y meridional, donde aparecen importantes espacios asignados a *cultivos de secano* y *suelo con escasa o nula vegetación*.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han aplicado con éxito una serie de índices cuantitativos de la Ecología del Paisaje sobre cartografía de ocupación del suelo creada a partir del tratamiento digital de una imagen de satélite para analizar y describir la estructura del paisaje en un entorno forestal mediterráneo. El resultado es una abundante información acerca de la estructura espacial del paisaje de la comarca de la Sierra de Albarracín, que puede ser utilizada a la hora de establecer futuras políticas de ordenación y gestión del territorio, así como para la elaboración de planes forestales ya que, según *Baskent y Jordan* (1995), "(…) una base cuantitativa para medir la estructura espacial es un prerrequisito para implementar políticas forestales. Sin esta

base, no se pueden establecer objetivos estructurales y tampoco puede ser entendida la dinámica espacial necesaria para que los objetivos puedan materializarse".

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por una Ayuda a la Investigación del Instituto de Estudios Turolenses (Diputación de Teruel) y por el proyecto *Lignostrum* (AGL2002-03917-AGR-FOR).

REFERENCIAS

Baskent, E.Z. y Jordan, G.A. (1995): "Characterizing spatial structure of forest landscapes". *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 25, pp. 1830-1849.

Botequilha, A. y Ahern, J. (2002): "Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning". *Landscape and Urban Planning*, Vol. 59, pp. 65-93.

Burel, F. y Baudry, J. (2001): *Ecología del Paisaje. Conceptos, métodos y aplicaciones*. Mundi-Prensa, Madrid.

Chuvieco, E. (2002): *Teledetección ambiental*. Ariel, Barcelona.

Forman, R.T.T. y Godron, M. (1981): "Patches and structural components for a landscape ecology". En Burel, F. y Baudry, J. (2001): *Ecología del Paisaje. Conceptos, métodos y aplicaciones*. Mundi-Prensa, Madrid. pp. 70-72.

Forman, R.T.T. y Godron, M (1986): Landscape ecology. Wiley, New York.

Haines-Young, R. y Chopping, M. (1996): "Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes". *Progress in Physical Geography*, Vol. 20, pp. 418-445.

McGarigal, K., Cushman S. A. y Neel, M.C. (2002): *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. Computer software program. University of Massachusetts, Amherst.

Naveh, Z. y Lieberman, A.S. (1984): *Landscape ecology. Theory and applications*. Springer-Verlag, New York.

Querol, J.V. (1995): *Ecogeografía y explotación forestal en las serranías de Albarracín y Gúdar-Maestrazgo*. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón nº 2, Zaragoza.

Turner, M.G. y Gardner, R.H. (dir.) (1991): *Quantitative methods in landscape ecology*. Springer-Verlag, New York.

Teledetección aplicada al estudio de los recursos naturales en un medio kárstico

T. Bullón Mata

Departamento de Geografía. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Autónoma de Madrid. Carretera de Colmenar km15. 28049Madrid.

RESUMEN

El trabajo está localizado en un sector de la alta Alcarria, en las proximidades del sector de confluencia de los río Tajo- Gallo. El trabajo consiste en la búsqueda de las técnicas de trabajo más adecuadas para análisis del medio natural de un espacio kárstico, caracterizado por extensas parameras, entre las que se abren imponentes gargantas. Los contrastes topográficos, de humedad y la variedad de las formaciones vegetales son las tres claves que se han utilizado para profundizar en el conocimiento de este espacio geográfico.
A través de las imágenes derivadas de los análisis de componentes principales, del Tasseled Cap y de los índices de vegetación y humedad, se han obtenido las claves de la organización del medio y se han aislado, mediante sucesivas reclasificaciones y tabulaciones cruzadas, los elementos que explican de modo más significativo su funcionamiento.

***Palabras Clave**: Métodos cuantitativos. Teledetección. Karst. Análisis del medio natural.*

ABSTRACT

Situated in the Alta Alcarria, next to the join of the Tajo and Gallo rivers, this paper develops some remote sensing techniques to analyze the natural environment in a karst landscape. The three main clues that have been used to know this geographical area are topographic contrast, water content and changes in vegetal cover.
The organization and activity of these natural environment could be obtained by using of images that derive from PCA and TTC that afterwards have been submitted to reclassifications and cross tabulations.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

Key Words: *Quantitative Methods. Remote Sensing. Karst. Natural environment analysis.*

INTRODUCCIÓN

El trabajo se desarrolla en el medio kárstico del Alto Tajo, en las proximidades de la confluencia del río citado con el Gallo. Es un territorio representativo de uno de los entornos naturales más singulares del centro peninsular ibérico, en el que la red fluvial discurre a lo largo de decenas de Km por gargantas profundas y estrechas, de sinuosos meandros y abundantes escarpes calcáreos verticales. Sobre las tortuosas gargantas se sitúan las planicies de las parameras, que son los restos de las extensas superficies de erosión, que se formaron durante el terciario superior y que enmascaran una estructura plegada sobre rocas mesozoicas y cenozoicas.

Es un relieve que está basado en la dualidad garganta - paramera y en el que las rocas calcáreas, que afloran por todas partes, están intercaladas entre capas de arcillas, margas o arenas. A causa ello, existen abundantes formas kársticas. En general, las amplias extensiones planas de las parameras funcionan como áreas de absorción de las aguas, los fondos y laderas de las gargantas como focos de salida al exterior de las circulaciones subterráneas y como colectores generales de las aguas regionales.

Es reconocido por todos la singularidad geomorfológica, climática y biogeográfica de los medios kársticos. En ellos, las variaciones de la humedad y los contrastes de exposición o de pendiente están tan sólidamente amalgamados en un espacio repleto de casos singulares, que no es fácil conocer su organización interna y menos aún conseguir una modelización científica. En este trabajo se exponen algunas de las posibilidades que tiene la teledetección para el estudio de estos medios, pues, a la capacidad de esta técnica para hacer compatible las observaciones de conjunto con los análisis de detalle, se une la posibilidad de aunar la interpretación de fenómenos que ocurren en lugares inaccesibles con la valoración sistemática, regular y formalizada del espacio analizado.

El trabajo está basado en tres líneas de investigación diferentes: 1º) Análisis de las imágenes. 2º) Fotointerpretación y digitalización sobre imagen pancromática. 3º) Observaciones y comprobaciones de campo. La imagen original es la escena 200/32 Landsat ETM de 30/07/2000, que ha sido cortada, para ajustarla al área concreta de trabajo. El análisis se ha efectuado a partir de las reflectividades aparentes de las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7, y la temperatura de brillo de las 6_1 y 6_2, a partir de las ecuaciones de *Chuvieco* (2002). Con el análisis de las imágenes se han definido los factores que intervienen en la organización del medio natural y se han buscado las relaciones causales entre ellos. Mediante la fotointerpretación y digitalización se han obtenido diferentes capas vectoriales, que, al proyectarlas sobre las imágenes, han mejorado la interpretación de éstas y aportado fiabilidad a los resultados parciales o totales.

La mayor parte de la información se ha obtenido de imágenes derivadas, que resultan de las operaciones de Análisis de Componentes Principales (ACP), de la transformación *Tasseled Cap* (TTC) y de los índices NDVI Y NDII, *Chuvieco et al*. (2001), ya que ellos expresan muy

bien, aunque con matices diferentes, lo esencial de la reflectividad media, la cubierta vegetal y la humedad del suelo. Posteriormente se han obtenido correlaciones entre bandas y reclasificaciones, que se han utilizado para elaborar tabulaciones cruzadas y gráficos de extensión superficial de los diferentes aspectos del medio natural.

LOS RASGOS FISIOGRÁFICOS

Para determinar los rasgos fisiográficos, que en general forman parte de los aspectos visibles más evidentes de un territorio, se han utilizado las imágenes del primer componente del ACP y la imagen *brightness* del TTC. La comparación entre las dos imágenes muestra una alta correlación interna y un coeficiente de determinación elevado, por lo que se puede concluir que son casi idénticas. En ambas, las variaciones de reflectividad señalan, como si se tratara de un mapa en curvas de nivel, los cambios en la inclinación y en la exposición de las laderas. De mayor a menor reflectividad se identifican:

Espacios de reflectividad casi nula, en sombra en el momento de la toma de datos, que son laderas de exposición septentrionales u occidentales. Se detectan claramente las laderas de umbría de la garganta del Gallo, de dirección general E–W, y las laderas occidentales de la del Tajo, en el tramo que corre en sentido SSE–NNW, así como las de los barrancos afluentes de éste, muy encajados, que descienden por sus paredes. Las comprobaciones de campo y de foto aérea indican que estos espacios están cubiertos por bosques de *Pinus nigra*, que suelen dar asimismo una muy baja reflectividad sobre la imagen

Espacios de escasa reflectividad. Son depresiones de terreno o laderas que por su orientación o topografía no están bien iluminadas en el momento de paso del sensor. Se distinguen dentro de este grupo un relieve monoclinal, en el extremo oriental de la garganta del Gallo, de buzamiento SW, sobre rocas triásico-jurásicas, y otro de crestas formadas sobre flancos de pliegues de dirección E-W, en el margen noroccidental del Tajo, sobre rocas de edad jurásica y cretácica.

Espacios de reflectividad media. Definen pendientes escasas, rellanos en las laderas y fondos de valles, superficies extensas de topografía horizontal bien iluminadas por el sol y laderas en exposición meridional. Generalmente son espacios no cultivados, o con roturación muy antigua, en los que se ha regenerado la vegetación natural. La mayor extensión en esta clase corresponde a las superficies de paramera, recubiertas de escaso suelo y pobladas de sabinares y matorral xerofítico.

Espacios de alta reflectividad. Campos de labor activos o abandonados recientemente, en los que la vegetación natural apenas se ha regenerado. Se desarrollan sobre las capas blandas, no coherentes, de la serie sedimentaria. Hay cuatro tipos de materiales diferentes dentro de la imagen: arcillas del Keuper, margas toarcienses, arenas albenses, y arcillas-arenas paleógenas. Las respuestas espectrales de los cuatro grupos son muy similares, a pesar de que tienen diferentes texturas y color.

Por lo tanto, gargantas, dorsos estructurales, parameras y campos de labor son los grupos principales de entidades fisionómicas que explican y organizan el espacio de la imagen. Las

superficies más extensas son las de las parameras y solanas (60%), aunque son las umbrías (6%), que generalmente están asociadas a las gargantas, y las laderas (19%), las más singulares y evidentes de este paisaje natural. Los campos de cultivo (15%) se distinguen con toda claridad entre las superficies de paramera.

Se han estudiado las variaciones de reflectividad de estos grupos en las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 del espectro. Las respectivas respuestas espectrales confirman que existen diferencias notables entre ellas. La curva espectral de las parameras indica una cobertura escasa de vegetación, que oscurece el suelo en el visible, pero tiene escasa actividad clorofílica y poco recubrimiento. Los campos de labor, que tienen la mayor reflectividad de los cuatro grupos, tienen una curva característica de suelo descubierto, con valores muy destacados en las bandas 3 y 5. Las laderas y las umbrías muestran una influencia de la vegetación, con una típica depresión en la reflectividad de la banda 3 y un incremento fuerte en la 4. Estas dos últimas clases se diferencian entre sí por el comportamiento de la banda 5, que tiene una reflectancia similar a la de la banda 4 en las laderas y desciende en las umbrías.

Figura 1. Rasgos estructurales e hidrológicos del Alto Tajo a partir de fotointerpretación.

EL MODELADO KÁRSTICO

El análisis que se ha realizado ha consistido en definir las formas de relieve kárstico mediante observaciones de terreno, fotointerpretación y análisis de las imágenes. Asimismo, se ha buscado la asociación entre la circulación kárstica y otros elementos del medio, como los agrupamientos vegetales y los usos del suelo (Figura1).

Las formas principales formas de relieve kárstico que se han apreciado son:

Poljés. Son depresiones alargadas, de varios km de longitud, cerradas en su cabecera, que se conectan a la red hidrográfica actual mediante valles encajados de escasa importancia y funcionalidad. Se desarrollan sobre niveles impermeables interestratificados entre las capas calcáreas, que favorecen la salida al exterior de aguas subterráneas. La mayor parte de las

aguas que discurren a lo largo de los poljés se reintegran a la circulación subterránea antes de confluir con los ríos principales.

Dolinas. Depresiones circulares pequeñas, de fondo plano y paredes escarpadas, que suelen aparecer concentradas en grupos o asociadas a las depresiones cerradas y poljés. No son muy numerosas y tienen varios tipos de coberturas; con frecuencia son campos roturados o están cubiertas por vegetación diversa.

Depresiones cerradas. Se trata de formas más pequeñas que los poljés, pero mayores que las dolinas. Tienen contornos más irregulares que éstas y distribución aleatoria. Como los poljés se desarrollan sobre niveles impermeables estratificados entre las series calizas jurásicas y cretácicas.

Paleovalles. Son restos de valles fragmentados y abandonados que circulan por la paramera. A veces desembocan o son cortados por poljés y depresiones. Son retazos de redes que debieron funcionar en algún momento y fueron sustituidas por otras, que están asimismo desconectadas de la circulación superficial actual. En todos los casos se trata de valles de trazado meandriforme y fondo plano, rellenos de sedimentos, que habitualmente han sido roturados y cultivados.

Gargantas. Son las formas principales y las organizadoras del sistema de circulación externa e interna. Tienen una geomorfología interna muy rica en detalles, en parte a causa de las importantes deformaciones y plegamientos que afectan a las rocas. En sus paredes, interfluvios y barrancos se exhiben con gran claridad un nutrido muestrario de formas estructurales, utilizadas de diverso modo por la actividad kárstica. Los más mínimos cambios en la composición, estratificación o cohesión de las rocas provocan las surgencias de agua, asociadas a conductos colgados, covachas o cornisas en localizaciones impensables y vertiginosas. Los numerosos edificios tobáceos, que marcan las salidas de las fuentes principales, indican, junto con los conos aluviales y los rellenos de ladera, una larga e interesante evolución morfológica. En fin, en el interior de estas gargantas hay un abigarrado y exclusivo espacio interior, en el que las acciones biológica y climática se alían con el relieve para formar enclaves únicos.

LA FUNCIONALIDAD DE LAS FORMAS KÁRSTICAS

Se considera como hipótesis de partida que la humedad del suelo, acompañada o no de vegetación, es indicadora de la funcionalidad de estas formas kársticas, pues, si no tuvieran actividad alguna, tendrían que comportarse espectralmente como sectores secos con suelo descubierto. Por ello, se ha procedido a proyectar los contornos digitalizados de estas formas sobre las imágenes, con el fin de establecer la relación entre forma kárstica y humedad / vegetación. A continuación, se han tomado muestras de los lugares de mayor indicación de humedad, para obtener los valores medios de las signaturas espectrales.

La asociación entre la humedad del suelo y especies hidrófilas se percibe con facilidad en las combinaciones de imágenes en las que interviene el infrarrojo cercano. Tomando como referencia inequívoca los bordes de los ríos, se aprecian numerosos puntos de respuesta espectral similar a éstos, en lugares muy alejados de ellos. Estos puntos están situados unas

veces en las gargantas, a diversas alturas sobre los cauces, otras sobre los campos de cultivo, en el interior de las parameras, o en pasillos deprimidos al pie de escarpes de roca calcárea. La comprobación de las localizaciones más significativas sobre las fotos aéreas, o sobre el terreno, ha proporcionado la evidencia de que éstos están asociados inequívocamente a morfologías kársticas y coinciden con surgencias o puntos de escaso drenaje de aguas superficiales. La abundancia de agua permite el desarrollo de una vegetación de gran cobertura, con alta exigencia en humedad, que es la clave principal para la identificación sobre las bandas espectrales.

Los poljés, las depresiones y los paleovalles

Los resultados en los puntos de mayor humedad y cobertura vegetal situados en los poljés de mayor extensión muestran una muesca en la banda 3 y un pico muy acusado de reflectancia en la banda 4, que indica presencia de una vegetación con un alto contenido en agua, especialmente en el de Lebrancón. En los poljés de Escalera y Fuembellida se aprecia un suelo húmedo, pero está recubierto por vegetación menos densa o de menor contenido clorofílico. En todo caso, las aguas que circulan por estos valles proceden de surgencias situadas en las proximidades de sus cabeceras. Asimismo, se han detectado puntos similares, de gran humedad, en la base de los escarpes sobre los que los poljés quedan colgados, que podrían ser surgencias de las aguas que se infiltran a lo largo de éstos.

Las depresiones cerradas, por otro lado, son inactivas o no tienen surgencias de tamaño suficiente como para ser detectadas. Asimismo, la mayoría de los paleovalles permanecen inactivos y secos, aunque en algunos casos se observa que existen puntos con algún contenido en humedad, lo que indica que de algún modo han seguido conectadas a la red kásrtica.

Las dolinas

La comprobación de la presencia de suelo húmedo o de vegetación con alta intensidad clorofílica es más difícil en las dolinas, debido a su pequeño tamaño. Por ello, su estudio se ha efectuado en tres fases: 1º) Delimitación, cartografía y descripción del uso del suelo mediante fotointerpretación. 2º) Determinación de las reflectividades aparentes de píxeles seleccionados dentro de ellas. 3º) Determinación de la temperatura de brillo en la banda 6_1 de esos mismos píxeles. Las interpretaciones de los datos obtenidos se muestran en el cuadro 1.

Como se puede observar en ambos cuadros, hay una gran relación entre los resultados de los tres procedimientos de interpretación. Aunque hay que considerar el desfase temporal de las imágenes de partida, pues las fotos aéreas son de 1985. Según la temperatura de brillo de la banda térmica $6_{1,}$ las dolinas 2, 4, 7 y 10 tienen más humedad que las demás, con temperaturas de brillo inferiores. Por ello, son éstas las que se consideran activas. El significado geomorfológico de ellas corrobora esta funcionalidad, pues las dolinas 4 y 7 son cabeceras de barranco, la 10 está capturada por un barranco, y la 2 es una dolina cuyo fondo está formado por capas impermeables.

Cuadro 1. Interpretación de la actividad de las dolinas

Serie	Reflectancia aparente	Temperatura de brillo	Fotointerpretación
1	Vegetación escaso vigor	Suelo seco	Roturado
2	Roturado con suelo húmedo	Suelo húmedo	Prado
3	Suelo en cultivo o recientemente abandonado	Suelo seco	Roturado
4	Suelo en cultivo o recientemente abandonado	Suelo húmedo	Roturado
5	Suelo oscuro o recubierto de vegetación	Suelo seco	Pastizal seco
6	Campo de labor abandonado y oscurecido	Suelo seco	Roturado abandonado
7	Suelo en cultivo o recientemente abandonado	Suelo húmedo	Roturado
8	Suelo en cultivo o recientemente abandonado	Suelo seco	Pastizal seco
9	Suelo en cultivo o recientemente abandonado	Suelo seco	Cultivo reciente
10	Suelo en cultivo o recientemente abandonado	Suelo húmedo	Prado sin cultivo

Otras formas kársticas

Los poljés, depresiones cerradas, paleovalles y dolinas explican solo una parte de la dinámica kárstica, pues existen otros focos singulares de gran humedad, con las siguientes localizaciones:1º) Sobre el borde exterior de las parameras, en donde suelen asociarse a pequeños barrancos que desembocan en el Tajo o Gallo. Surgen donde por razones topográficas o estructurales aflora un nivel de rocas favorable. 2º) En las cabeceras de barrancos cortos y profundos situados sobre las laderas de las gargantas, aguas abajo de pequeñas dolinas o restos de paleovalles. 3º) En pasillos alargados o depresiones, que siguen la dirección general de las capas geológicas. La explicación de la gran variedad de localizaciones de todos ellos está en la gran diversidad de tipos de estructuras geológicas y en los contrastados cambios de dirección de las mismas.

Se detectan dos conjuntos de formas: 1º) Las asociadas directamente al encajamiento fluvial, las más activas y recientes, con barrancos encajados que se inician en una surgencia, situada habitualmente en el borde de las parameras; 2º) Los poljés, depresiones, dolinas y paleovalles, generalmente localizadas en el interior de éstas últimas, que son las formas de mayor tamaño, más reconocibles y cartografiables, que quedan colgadas sobre los sistemas de drenaje actuales. Estas son formas en parte inactivas, que parecen ser restos de modelados antiguos, incorporados incompletamente a la circulación actual.

En todos los casos se ha visto la coincidencia entre estos focos de humedad y afloramientos de las rocas impermeables. Aunque las arcillas del Keuper y las arcillas toarcienses son importantes, las facies Utrillas del Albense son las que tienen mayor trascendencia en la evolución kárstica, debido a la extensión y frecuencia de sus afloramientos en el nudo de confluencia Tajo - Gallo. La finura de la asociación surgencia / Albense es asombrosa.

A través de los resultados obtenidos, se han podido determinar el grado de funcionalidad de las formas kársticas, lo que da una gran seguridad en la interpretación. La organización y localización de este conjunto geomorfológico muestra que el sistema de circulación kárstico actual responde a criterios que parecen estar relacionados con tres aspectos del medio natural: 1º) Los niveles de base que proporcionan los fondos de los ríos principales, que segmentan fuertemente el espacio. 2º) Los contrastes topográficos, muy acentuados, con pendientes casi verticales sobre las gargantas. 3º) La variedad litológica, con alternancia de capas permeables e impermeables.

ORGANIZACIÓN DEL MEDIO NATURAL

El procedimiento de trabajo ha consistido en estudiar aquellas imágenes derivadas que resuman la información sobre la cubierta vegetal y humedad del suelo. Se han extraído las clases de mayor contenido en estos dos aspectos y se han comparado entre sí mediante tabulaciones cruzadas. A partir de estas tabulaciones se han obtenido agrupaciones de similar comportamiento en humedad / vegetación que, al comparados con los datos de campo, han permitido definir los contenidos naturales básicos del medio físico y su organización espacial.

En primer lugar, se ha efectuado una correlación entre las imágenes derivadas de ACP, TTC y NDVI - NDII, para comprobar su expresividad, significado y contraste de información que aportan. Existe alta correlación de las imágenes TTC con las NDVI o NDII, y muy baja entre cualquiera de las anteriores y los componentes 2 y 3 del ACP.

La explicación de esta diferencia pudiera estar basada en el hecho de que el ACP depende de las condiciones radiométricas en las que se realizó la imagen y las demás variables del comportamiento espectral del suelo y la vegetación, tal y como es recogido por el sensor. También estos resultados podrían estar influidos por el procedimiento estadístico de elaboración de los datos, pues hay una la similitud entre las ecuaciones de obtención del TTC y las de los índices NDVI y NDII.

Para efectuar el estudio de las relaciones entre la humedad y vegetación se han reclasificado las imágenes de los índices NDVI, NDII, las de *wetness* y *Greenness* del TTC y las de los componentes 2 y 3 del ACP. Se ha ajustado el intervalo de las diferentes clases a las características de cada imagen, teniendo en cuenta los grupos de contrastes y el valor de las áreas con una cobertura conocida. El análisis individualizado de cada uno de estos grupos proporciona aspectos complementarios para la interpretación del medio natural.

Información que aporta el ACP

Los valores de los eigenvectores de las bandas empleadas en el ACP (1, 2, 3, 4, 5, 7) indican que el componente 2 está asociado positivamente a las bandas 7 y 5 (0.527 y 0.411 respectivamente) y negativamente con las demás. El componente 3, a su vez, se relaciona positivamente con las bandas 4 y 5 (0.734 y 0.346 respectivamente), y negativamente con las demás. Por ello, se deduce que el segundo componente expresa variaciones de roca, suelo y humedad y el tercero indica cambios en el vigor vegetal dentro de la imagen. Esta interpretación es coherente con la realidad del terreno, que en gran parte está constituido por afloramientos de roca desnuda o por campos de cultivo, sin ningún tipo de cubierta vegetal.

De la tabulación cruzada de los componentes 1 y 2 del ACP se deduce que las umbrías no son sistemáticamente los lugares donde se concentra la máxima humedad, pues hay bastantes lugares que tienen humedad en otras exposiciones. Según el gráfico que resume la extensión superficial de los grupos resultantes, el 16% de los suelos húmedos se sitúan fuera de las umbrías y de éstas últimas, que están situadas en el interior de las gargantas, sólo el 5% tienen humedad. Muchas de las áreas húmedas fuera de las umbrías o de las orillas de los ríos corresponden a pasillos impermeables, o a áreas más puntuales asociadas a fracturas y pliegues es decir, a causas típicamente kársticas. Además, es evidente que la relación entre la dinámica kárstica y el medio natural es más compleja y activa en las paredes de las gargantas, en cualquier exposición, pues es donde existe el mayor número de surgencias.

Información de las imágenes del Tasseled cap

Los resultados de las tabulaciones cruzadas son muy útiles para interpretar los rasgos de humedad y vegetación. Se han obtenido 5 agrupaciones de clases que ocupan una superficie mayor del 1%, de las que se han analizado sus respuestas espectrales medias en las bandas 1,2,3,4,5,7, y su distribución espacial (*Figura 2*).

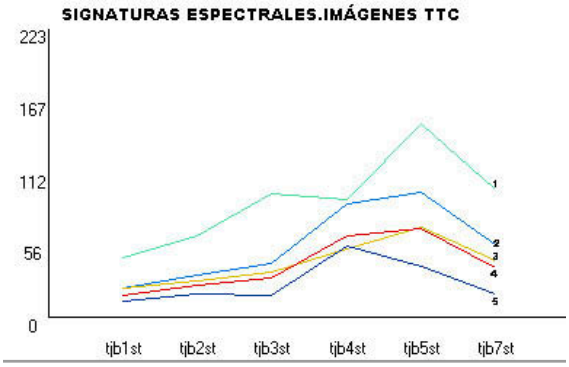


Figura 2. Signaturas espectrales de las clases obtenidas por tabulación cruzada de TTC 1 = Secos, sin vegetación sol. 2= Secos con vegetación sol. 3= Secos sin vegetación sombra. 4= Secos con vegetación sombra. 5= húmedos con vegetación sombra.

La clase 1 corresponde a un suelo descubierto, por lo que tiene una alta reflectividad en las bandas 3 y 5. La clase 2, y, con valores menores, la clase 4, por el efecto de sombra, corresponden a una vegetación de cobertura media. La 5 tiene una respuesta espectral típica de vegetación vigorosa, por lo que se interpreta como bosque denso. La 3 indica suelo oscurecido o matorral sin respuesta clorofílica.

La localización espacial de las diferentes clases es asimismo conforme a la realidad del terreno, donde, por ejemplo, la clase 3 marca el reborde rocoso que las parameras forman sobre las gargantas y la 4 a la parte superior de éstas últimas y a la de otras laderas mal iluminadas. La clase 5 que coincide con las superficies más densas de bosque de pino, también es identificable con facilidad (Figura 3 y Cuadro 2).

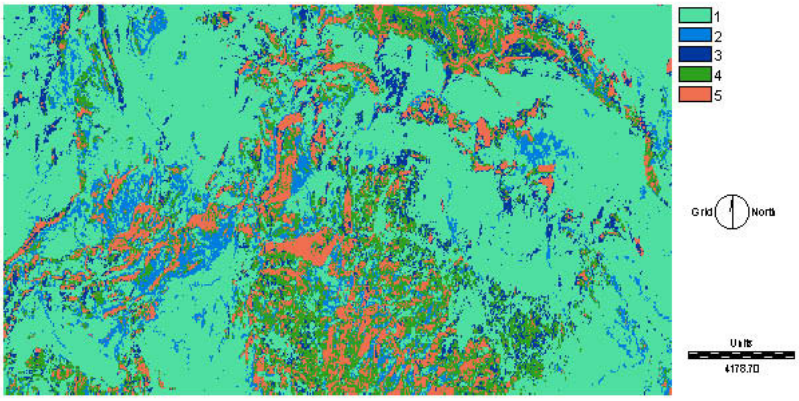


Figura 3. Distribución espacial de clases. Imágenes TTC 1 = Secos, sin vegetación sol. 2= Secos con vegetación sol. 3= Secos sin vegetación sombra. 4= Secos con vegetación sombra. 5= húmedos con vegetación sombra.

La información de los índices INDVI y NDII

Con la extracción de las clases de mayor humedad y contenido clofílico se han obtenido sendas imágenes booleanas, que combinadas en *crosstab*, reflejan el contenido en humedad de los agrupamientos con actividad clorofílica. El 58% son deficitarios y el 42% no. Existe una gran coincidencia espacial entre la localización de la clase no deficitaria y la clase 5 de la combinación de componentes TTC. Asimismo, la clase deficitaria comprende en la mayor parte de los casos a la clase 2 de TTC. Todo ello indica que ambos conjuntos de imágenes expresan resultados muy parecidos. Al mismo tiempo parece que en el momento de recogida de los datos de la imagen hay gran falta de humedad fuera del núcleo más profundo y umbroso de las gargantas.

Las formaciones vegetales

Las coberturas vegetales reflejan la variedad de relieves y de tasas de humedad, aunque sus aspectos y composiciones concretas se deban a causas biogeográficas. Hay que destacar que

con las operaciones efectuadas no se detectan muestras de actividad clorofílica cuando hay una cobertura de sabinares, ni en el caso de las formaciones de mayor densidad y vitalidad. Tampoco las formaciones de matorral xerofítico se aprecian con claridad. Por otra parte, se han podido diferenciar bien los pinares, las especies marcescentes (robles y quejigos) y los agrupamientos ripícolas.

Las diferentes clases, obtenidas a partir de las imágenes TTC y INDVI, corresponden, en síntesis, a agrupamientos que suelen estar controlados por las diferencias de relieve, tipo de roca o grado de humedad. Como resumen de la relación entre todos estos aspectos del medio natural se ha realizado el cuadro 2, en el que se recoge la información extraída del mapa representado en la figura 3 y se añaden las formaciones vegetales equivalentes.

Cuadro 2. Organización del medio natural en el Alto Tajo.

TTC	Clave	% Superficie	Formación vegetal	Equivalencia con NDVI_NDII	Localización
1	Secos, sin Actividad clorofílica, con sol	60	Sabinares nanofanerofitos xerofíticos	Sin vegetación	Parameras, laderas calcareo-margosas del Gallo. Solanas de la confluencia Tajo- Gallo
2	Secos, con actividad clorofílica, con sol	9	Encinar-pinares con boj	Con vegetación y sin humedad	Tramos más abiertos o de laderas de solana de la Garganta del Tajo. Sobre pasillos de rocas blandas o en suelos coluvial-aluviales
3	Secos, sin actividad clorofílica, en sombra	7	Sabinar-encinares rupícolas. Matorrales xerofíticos	Con vegetación y sin humedad	Borde escarpado de la paramera hacia las gargantas del Tajo, Gallo y Bullones
4	Secos, con actividad clorofílica, en sombra	14	Encinar-pinares densos con boj	Con vegetación y sin humedad	Tramo N-S de la garganta del Tajo, en las exposiciones W de la vertiente de solana y tramos superiores de la vertiente de umbría
5	Húmedos, con actividad clorofílica, en sombra	9	Pinar denso con marcescentes. Ripícolas	Con vegetación y humedad.	Exposiciones occidentales y septentrionales de las gargantas, tramos más profundos y húmedos de las mismas. Areniscas triásicas del monoclinal del Gallo. Riberas

Los datos derivados del análisis ACP expresan las características de un terreno dominado por elementos detectables en el visible e infrarrojo medio, como son fuertes pendientes con contrastes de iluminación y afloramientos potentes de roca desnuda. Por el contrario, los datos de las imágenes TTC y las de los índices NDVI y NDII, expresan mejor las condiciones de humedad independientemente de la topografía y de la densidad de la cobertura vegetal.

Las exposiciones norte y oeste son las adecuadas para la ubicación de los agrupamientos vegetales de mayor densidad. Asimismo, los agrupamientos vegetales crecen en importancia y en exigencias ambientales progresivamente desde la garganta del Gallo al tramo N-S del Tajo y al E-W del mismo posiblemente debido al aumento de la profundidad e importancia fluvial de las gargantas.

CONCLUSIONES

En resumen, una parte del medio natural del alto Tajo ha podido ser analizado en sus múltiples aspectos y variabilidad espacial mediante los recursos técnicos que ofrece la teledetección. A través de las diversas bandas espectrales proporcionadas por el satélite se han podido reconocer los rasgos generales, las asociaciones espaciales y los elementos que intervenían en la organización del medio. La circulación del agua, guiada por la dinámica kárstica, es esencial para entender tanto las topografías de las gargantas como las localizaciones de los focos de humedad. A su vez, las claves de esta circulación son los variados tipos de rocas y sus variadas disposiciones y estructuras. Las coberturas vegetales se adaptan a la base hídrica y geomorfológica y permiten por ello que los datos recogidos por el satélite Landsat expresen con claridad la unidad de conjunto y variedad de detalles de este medio natural.

La combinación de análisis de imágenes, fotointerpretación y observaciones de campo ha resultado muy eficaz para conocer los elementos naturales y sus interacciones, especialmente los que explican la dinámica kárstica y la organización morfoestructural. Por otra parte, la comparación las imágenes ACP, TTC, NDVI y NDII ha servido para comprender las condiciones de humedad y densidad de la cobertura vegetal en un medio dominado por los contrastes topográficos y gran número de afloramientos de roca desnuda.

REFERENCIAS

Chuvieco,E. et alter(2001): Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución. *Geofocus* nº1, p1-16.

Chuvieco, E.(2002): *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona, Ariel, 584 p.

IGME(1981): *Mapa Geológico de España E 1:50.000 nºs 489 Ablanque, 490 Molina,513 Zaorejas, 514 Taravilla*. Madrid.

González Amuchastegui, M.J. (1991): *Parameras de Molina y cañón del Alto Tajo. Guía de Castilla la Mancha*. Servicio de Publicaciones de Castilla La Mancha. pp 201-215.

Nasa: (2002): *Landsat 7 Science Data users handbook*.
http://itpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls

Tecnologías de observación de la Tierra en los servicios de asesoramiento de riegos

A. Cuesta García[1], A. M. Jochum[2] y A. Calera Belmonte[1]

(1) Grupo de Teledetección y SIG, Universidad de Castilla La Mancha. C/ Campus Universitario s/n, 02071 Albacete.
(2) ALFAclima Asesoramiento Medioambiental. Avda. España 9, 02002 Albacete.

RESUMEN

Los Servicios de Asesoramiento de Riegos (SAR) son uno de los más importantes instrumentos de gestión para conseguir una mejor eficiencia en el uso del agua para riego. En este trabajo se trata de mostrar cómo la integración de las tecnologías de Observación de la Tierra dentro de los SAR puede mejorar la gestión operativa diaria de los SAR, permitiendo un seguimiento de los cultivos más detallado y preciso, y a la vez menos costoso. Asimismo las nuevas tecnologías de la información han de permitir que la información generada por el SAR pueda llegar al agricultor como usuario final de forma más rápida, fluida y personalizada. El trabajo se basa en el proyecto europeo DEMETER (DEMonstration of Earth observation TEchnologies in Routine irrigation advisory services). En este artículo se describen tanto el concepto y las componentes del sistema como las primeras experiencias y resultados obtenidos al respecto.

Palabras clave: *Teledetección, índice de vegetación, Servicio de Asesoramiento de Riegos, coeficiente de cultivo.*

ABSTRACT

Irrigation Advisory Services (IAS) are the natural management instruments to achieve a better efficiency in the use of water for irrigation. In this work we try to demonstrate how the integration of Earth Observations (EO) into IAS can improve the day-to day operative management, allowing a more detailed and precise monitoring of the crops and at the same time, cost efectiveness. In the same way new Information Technologies have to allow

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

that the generated information by IAS could arrived to the end user (i.e: farmer) in a fast and personalized way. In this work is based the European Project DEMETER (DEMonstration of Earth observation TEchnologies in Routine irrigation advisory services). Here the concept and the components of the system are described, as well as the first experiments and results.

Key words: *Remote Sensing, vegetation index, Irrigation Advisory Service, crop coefficient.*

INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadío es la principal consumidora de agua en la Península Ibérica (72% en España, 59% en Portugal), así como en todos los países del arco mediterráneo y en otros muchos lugares del mundo, por lo que su uso eficiente es un aspecto estratégico en cualquier política de uso sostenible del agua, tal y como se recoge en las normas legales tanto a nivel nacional como europeo (Directiva Marco Europea, Planes Hidrológicos Nacionales, Planes Nacionales de Regadíos).

Los Servicios de Asesoramiento de Riegos (SAR) son uno de los más importantes instrumentos de gestión para conseguir una mejor eficiencia en el uso del agua para riego. Los SAR proporcionan a los agricultores la información necesaria para determinar la cantidad de agua aplicable, adecuada a las necesidades hídricas de los cultivos para conseguir optimizar la producción en función del coste. El reconocimiento de la estratégica importancia de los SAR para ayudar en una gestión sostenible ha llevado a que se haya producido un proceso generalizado de creación de estos instrumentos, impulsado a nivel de los diferentes estados y de la propia Comisión Europea.

La metodología actual que utilizan los SAR está basada en las recomendaciones realizadas por FAO (*Food and Agriculture Organisation*), según la denominada "aproximación K_c-ET_0", donde K_c es el coeficiente de cultivo y ET_0 la evapotranspiración de referencia (*Allen et al*., 1998). Asimismo los SAR abordan la transmisión de la información de forma práctica y útil para el usuario final, el agricultor (*Martín de Santa Olalla et al.,* 1999; *Calera Belmonte et al.,* 1999).

La tarea del SAR suele ser costosa en recursos humanos y materiales por la necesidad de un seguimiento intensivo de campo en áreas extensas. Parece natural que las tecnologías de Observación de la Tierra mediante sensores a bordo de satélites, que proporcionan imágenes de la superficie terrestre a intervalos regulares, sean las adecuadas para hacer más efectivo ese seguimiento. Asimismo las denominadas nuevas tecnologías de la información han de permitir que la información generada por el SAR pueda llegar al usuario de forma más rápida, fluida y personalizada. La introducción de estas nuevas tecnologías, basadas en internet y telefonía móvil, puede generar valor añadido al introducir oportunidades de empleo de alto valor en entornos rurales.

En este trabajo se trata de mostrar cómo la integración de las tecnologías de Observación de la Tierra dentro de los SAR puede mejorar la gestión operativa diaria de los SAR, permitiendo un seguimiento de los cultivos más detallado y preciso. Asimismo la utilización de estas tecnologías hace necesario incorporar aquéllas otras denominadas tecnologías de la información, tanto para generar información necesaria y útil, como para hacerla llegar al agricultor como usuario final. Este trabajo que aquí se presenta se basa en el proyecto europeo DEMETER (DEMonstration of Earth observation TEchnologies in Routine irrigation advisory services), que se desarrolla en zonas piloto en España, Portugal e Italia. En la actualidad, muchos SAR ya utilizan mapas de uso de suelo derivados de imágenes de satélite. Pero el funcionamiento diario de predicción de las necesidades hídricas sigue basándose en el tradicional trabajo de campo, aunque varios estudios de viabilidad han demostrado el potencial de la teledetección al respecto (*Montesinos y Castaño*, 1999). La teledetección no se ha usado todavía en las operaciones diarias por tres motivos y obstáculos principales, que son:

- la resolución temporal y espacial de las imágenes inadecuada a las necesidades del SAR,
- la falta de productos tecnológicamente maduros y robustos derivados de las imágenes, coherentes con el procedimiento operativo actual del SAR, y que puedan ser integrados directamente en su funcionamiento,
- aspectos relacionados con la información que se ofrece y su transmisión al usuario final de una forma útil.

Tal y como señalan *Bastiaanssen et al.* (2000) estas limitaciones se deben a que la teledetección se utiliza fundamentalmente como una herramienta para investigación y es mucho menos frecuente su aplicación en la gestión de superficies agrarias regadas. Las causas que originan este desfase se pueden encontrar en varios ámbitos; primero en que es la comunidad científica la que principalmente establece el diseño de los sensores y las características orbitales, esto es el período de revisita, resolución espacial, etc., atendiendo a sus propios intereses, que pueden no coincidir con las necesidades de los usuarios en el campo de la gestión de recursos hídricos. En segundo lugar, la comunidad de usuarios y gestores administrativos suele ser bastante reacia a la introducción de nuevas técnicas, y requiere para su convencimiento de demostraciones operacionales que muestren de forma evidente las ventajas.

El objetivo del proyecto DEMETER (*DEMETER*, 2002) es el de desarrollar y demostrar soluciones innovadoras, dirigidas a remediar y mejorar la situación respecto a cada una de esas tres limitaciones, estableciendo además mecanismos de diálogo permanente entre representantes de usuarios y científicos. En el presente artículo iremos resumiendo las soluciones correspondientes, dedicándole un epígrafe a cada uno.

METODOLOGÍA PARA CONSEGUIR LA RESOLUCIÓN ADECUADA

Los requerimientos de los usuarios han sido objeto de estudios como LISSE (*Land Irrigation Support Service*) y otros proyectos recientes (*Moreno et al.,* 2001). Los resultados indican claramente que se necesitan mapas de varios parámetros (coeficiente de cultivo, etc.) con una

resolución espacial de 10-30 metros. Dicha resolución nos permitirá identificar de forma precisa superficies de entre 1000-10000 m^2, teniendo en cuenta que para el seguimiento de la cubierta vegetal es necesario usar una secuencia temporal de imágenes. Estos tamaños permiten la discriminación y el seguimiento de parcelas en los diferentes tipos de agricultura de regadío más usuales. La resolución temporal requerida se basa en los ciclos de asesoramiento de riego habituales de una semana.

Los satélites denominados de alta resolución permiten acercarse muy bien a la resolución espacial de 15-30 metros necesaria para la tarea del SAR. En la actualidad se encuentran en órbita varios de esos satélites, como Landsat, Spot, IRS y ASTER (Cuadro 1), en los que se dispone de una extensa y dilatada experiencia en la observación de la Tierra. Muy recientemente se han lanzado otros como Ikonos, Quickbird, denominados de muy alta resolución, en los que la resolución espacial se sitúa entre 1-5 m, y que podrán ser utilizados en tipos de agricultura muy intensiva con un pequeño tamaño de parcela individual.

Si consideramos los satélites de alta resolución espacial encontramos que cada uno de ellos tiene un ciclo de repetitividad de 14-25 días (Cuadro 1), con lo cual proporciona datos de la misma zona cada 2-3 semanas. Teniendo en cuenta la posibilidad de presencia de nubes, esa resolución temporal es claramente insuficiente para fines operacionales.

La clave está en el uso del conjunto entero de satélites de alta resolución para conseguir una cobertura temporal adecuada del ciclo fenológico de los cultivos. Dadas las distintas características de órbita y sensor de cada satélite, la primera tarea consiste en hacer comparables entre sí las observaciones realizadas desde los diferentes sensores a utilizar. Para ello se ha de proceder a la intercalibración de sensores y a la utilización de imágenes cuasi-síncronas, de acuerdo con el método desarrollado por *Calera Belmonte et al.* (2001). Al ser las imágenes cuasisimultáneas, captan la misma realidad física de la cubierta vegetal de la superficie terrestre, ya que ésta cambia lentamente. De esta forma, es posible relacionar las observaciones realizadas por un sensor con las de otro que podremos elegir de referencia.

Otro aspecto de gran importancia a la hora de usar series temporales de imágenes procedentes de diversos satélites es el tema de corrección atmosférica. En la actualidad son los datos de modelos de predicción numérica los que se usan con frecuencia para este propósito. Los perfiles verticales de vapor de agua y de aerosoles procedentes de esos modelos suelen estar afectados por errores del proceso de asimilación (interpolación) de datos observacionales, sobre todo en regiones semiáridas y montañosas y/o cercanas al mar (Jochum *et al.,* 2002). Esos errores influyen la calidad de los parámetros derivados, puesto que pueden causar errores hasta un 15% en la reflectividad de la superficie, por ejemplo. Por consiguiente se pretende usar aquí una combinación de datos de radiosondeos operacionales con un modelo numérico de alta resolución. Asimismo será necesario tener en cuenta también el cambio en la reflectividad debido a la distinta geometría de la iluminación solar y del ángulo de observación del sensor (BRDF). Para ello se han de definir los rangos de ángulos de iluminación y observación que minimicen los cambios debidos a la geometría. Por otro lado han de elegirse parámetros derivados de las imágenes lo más insensibles posible a dichos cambios asociados a la atmósfera e iluminación.

Cuadro 1. Características de los satélites utilizados en este trabajo. VIS: visible; NIR: infrarrojo cercano; SWIR: infrarrojo medio; TIR: infrarrojo térmico.

Satélite	*Repetitividad*	*Tamaño de imagen*	*Bandas (número)*	*Resolución espacial*
ASTER	16 d	60 km x 60 km	VIS (2) NIR (1)	15 m
			SWIR (6)	30 m
			TIR (5)	90 m
IRS-C	24 d	142 km x 142 km	VIS (2) NIR (1)	23 m
			SWIR (1)	70 m
IRS-D	25 d	148 km x 148 km	igual a IRS-C	
Landsat 5	16 d	185 km x 185 km	VIS (3) NIR (1) SWIR (2)	30 m
			TIR (1)	60 m
Landsat 7	16 d		igual a Landsat 5	
Spot 1, 2, 3	*)	60 km x 60 km	VIS (2) NIR (1)	20 m
Spot 4	*)	60 km x 60 km	VIS (2) NIR (1) SWIR (1)	20 m

*) La órbita de SPOT 1, 2, 3 y 4 permite una revisita cada 26 días. La frecuencia varía con la latitud.

LÍNEA DE PRODUCTOS Y SU GENERACIÓN MEDIANTE TELEDETECCIÓN

El segundo impedimento importante para el uso operacional de imágenes de observación de la Tierra en los SAR consiste en que dichas imágenes, al menos en la forma de reflectividades o índices de vegetación, no son utilizables directamente en el procedimiento del día a día de los SAR. Para salvar esta limitación, y como en el funcionamiento del SAR, se requiere la evolución temporal de los coeficientes de cultivo, obtenidos a partir de las imágenes e integrados en la cadena de trabajo del SAR.

Así pues los mapas de los coeficientes de cultivo, obtenidos a partir de las imágenes adquiridas por sensores de alta resolución a bordo del Landsat, IRS, SPOT y ASTER (debidamente corregidas e intercalibradas, como se ha expuesto en el epígrafe anterior) serán el producto básico integrado en el SAR para que éste determine las necesidades hídricas del cultivo y permita al agricultor elaborar la programación de riego. De esta forma, dicha información puede ser usada directamente por el SAR con mínimos cambios sobre su funcionamiento actual.

El método más sencillo para derivar el coeficiente de cultivo se basa en la aproximación, que considera la existencia de una relación lineal entre Kc y el índice de vegetación NDVI.

Moran et al. (1997) consideran que este método es una prometedora vía para aplicaciones operativas. El índice NDVI se obtiene a partir de una combinación de las reflectividades en las bandas del rojo e infrarrojo cercano, lo que permite su cálculo desde todos los sensores de alta resolución espacial considerados en este trabajo. Además la utilización del NDVI facilita la intercalibración de los diferentes sensores, ya que es el parámetro de mejor correlación en las observaciones desde los diferentes sensores (*Calera Belmonte et al.,* 2001; *Teillet et al.,* 2001)

Para comprobar y validar esta metodología se ha llevado a cabo una experiencia en campo, de seguimiento del cultivo de maíz a lo largo de su ciclo de desarrollo, durante la primavera y verano del año 2001. La respuesta espectral a lo largo del ciclo de crecimiento se ha obtenido utilizando un espectrorradiómetro GER3700 con un rango de 300 a 2300 nm. Se ha derivado el NDVI simulando las bandas del sensor Landsat7-ETM+. Por otro lado se ha estimado la evolución del coeficiente de cultivo basal, Kcb, definido como la ratio entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia, cuando la superficie del suelo está seca de acuerdo con las recomendaciones FAO (*Allen et al.,* 1998). De esta forma Kcb representa la componente debida a la transpiración. En la Figura 1 se muestra cómo la evolución temporal del NDVI sigue estrechamente la evolución temporal del coeficiente de cultivo.

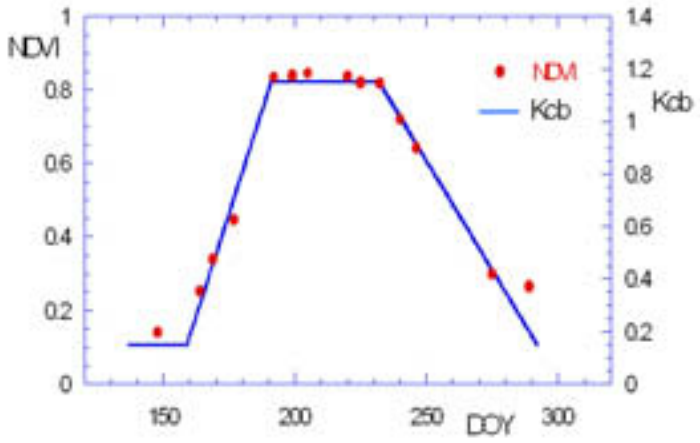


Figura 1. La evolución temporal del coeficiente de cultivo basal, Kcb, y la del NDVI correspondientes a un cultivo de maíz a lo largo de su ciclo de crecimiento muestra una estrecha relación. DOY es el número ordinal del día del año.

En un segundo paso se plantea la generación de productos avanzados, derivados de las imágenes, que puedan ser incorporados en un posible desarrollo futuro de los SAR. Un resumen de los parámetros considerados se muestra en el cuadro 2, donde aparecen clasificados atendiendo a tres niveles: básico, avanzado y potencial, en función del posible uso que puedan hacer de ellos el SAR, así como de la madurez de la tecnología usada para derivarlos. Muchos de los productos pueden derivarse del NDVI de una u otra manera (*D'Urso*, 2001). Los índices de

rendimiento del riego están destinados al seguimiento de la eficacia del uso del agua (*Menenti,* 2000). Su aplicación a acuíferos piloto en España y Portugal ha dado muy buenos resultados (*Montesinos y Castaño,* 1999). Los últimos tres parámetros de la lista se consideran muy útiles por parte de los usuarios, aunque la metodología correspondiente todavía se encuentra en fase de investigación y desarrollo.

Cuadro 2. Definición de productos DEMETER.

Nivel de producto	***Parámetro***
Básico	Coeficiente de cultivo, Kc (metodología FAO)
Avanzado	Kc (aproximación analítica) Fracción de cobertura vegetal verde Indice de área foliar (LAI) Fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (fAPAR) Biomasa seca acumulada Indicadores de rendimiento de riego: IPI1 agua vs. área cultivada IPI2 agua vs. necesidades hídricas de los cultivos IPI3 margen de beneficio del agua
Potencial	Indicadores de estrés hídrico Contenido en agua de la cubierta Fracción evaporativa

TRANSMISIÓN DE LA INFORMACIÓN

La función básica del SAR es generar mapas de necesidades hídricas de los cultivos y distribuir dicha información a los usuarios, bien de forma personalizada o, con carácter general, de libre acceso. En los SAR más desarrollados la componente de distribución tiene un fuerte peso, y utiliza tanto medios impresos (hojas divulgativas, periódicos, etc.) como acceso telefónico e internet (como ejemplo, véase la página *http://www.itap.es*). La utilización de tecnologías de observación de la Tierra en el SAR junto con herramientas tipo Sistemas de Información Geográfica (SIG) va a permitir generar mapas digitales de las necesidades hídricas de los cultivos, tal y como se ha visto en los epígrafes anteriores.

A partir de dichos mapas puede distribuirse la información en la forma tradicional tal y como se viene haciendo actualmente. Sin embargo, esta nueva forma en la que podemos representar como capas de un SIG las necesidades hídricas de los cultivos introduce profundos cambios que afectan a la propia generación de la información por el SAR, a las posibilidades que se abren para su uso y, fundamentalmente, a su distribución. Permite además la incorporación de información complementaria útil al usuario final procedente de otras fuentes, que puede ofrecer valor añadido y que puede viajar en los mismos vehículos de distribución.

Por todo ello es necesario considerar detalladamente la transmisión de información en el nuevo SAR, al que podemos definir como un "*corredor de información*" constituido por tres

componentes o módulos. El primer módulo ("Integración de datos de satélites") está basado en el sistema de información geográfico (SIG) de la zona. Allí los productos derivados de imágenes de satélite, generados en el centro de proceso y análisis, son integrados en el SIG y luego introducidos en el flujo de datos *input* a los cálculos operacionales del SAR (cálculos de necesidades hídricas, etc.).

El segundo módulo está dedicado a adquirir, preparar y hacer disponibles todas las informaciones procedentes de cualquier fuente de datos. Se entiende como centro "intercambiador de información", dotado de herramientas de visualización avanzadas. Según las definiciones de requerimientos de usuarios obtenidas en el contexto de LISSE y otros proyectos recientes (*Moreno et al.,* 2001), los agricultores necesitan informaciones más precisas y más detalladas acerca de las necesidades hídricas de sus cultivos de forma personalizada para cada parcela. Necesitan además informaciones generales de contenido más amplio sobre la situación meteorológica y el contexto climatológico. La información meteorológica puede incluir, por ejemplo, los datos de estaciones meteorológicas regionales, imágenes de satélites meteorológicos, datos de precipitación obtenidos mediante rádar, mapas de precipitación acumulada y de predicción numérica del tiempo.

El tercer módulo prevé dos modalidades de transmisión de la información al usuario. La primera se dirige al agricultor, proporcionándole la información personalizada acerca de las necesidades hídricas de sus propios cultivos en cada parcela. La segunda es de acceso libre al público general, ofreciendo informaciones de interés más amplio y general. Los medios de transmisión tradicionales (boletines, prensa, radio y teléfono) se mantienen, incrementándose sustancialmente el peso de la distribución por internet y herramientas especializadas de telefonía móvil. Es necesario considerar en este tercer módulo un análisis referido al grado de desarrollo del SAR tradicional y su grado de inserción entre los usuarios. Asimismo, puede ser de gran importancia introducir en el mecanismo de distribución el concepto de "usuario preferente local", al que se ha de dotar de medios y formación suficiente para permitirle interpretar, contrastar y distribuir la información en un entorno ya muy cercano al agricultor, haciendo prácticamente posible el contacto personal. Las entidades más adecuadas pueden ser: las comunidades o asociaciones de regantes, servicios de extensión agraria local y cooperativas.

EL SERVICIO DE ASESORAMIENTO DE RIEGOS ASISTIDO MEDIANTE SATÉLITE (e-SARAS)

El diagrama de flujo de la Figura 2 muestra esquemáticamente la integración de la información derivada de las imágenes de satélite, dando lugar a lo que podría denominarse *Servicio de Asesoramiento de Riegos Asistido mediante Satélite (e-SARAS)*. La incorporación de las Tecnologías de la Información permitirá un importante salto cualitativo y cuantitativo en la información que se ofrece al agricultor, al concentrar en un solo vehículo la información tradicional sobre las necesidades hídricas, sustancialmente mejorada en su contenido y presentación, personalizada y que incorpora datos meteorológicos relevantes de días anteriores y los

predichos para los días siguientes, así como otros de interés. El cuadro 3 trata de resumir los aspectos en que se esperan mejoras con la introducción del e-SARAS, respecto a la situación actual de los SAR.

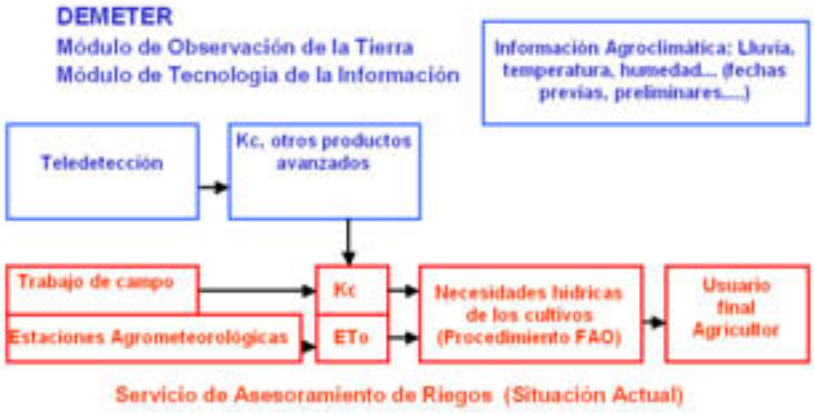


Figura 2. Concepto y funcionamiento del nuevo Servicio de Asesoramiento de Riegos Asistido mediante Satélite (e-SARAS).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Las tecnologías de observación de la Tierra han alcanzado el punto de madurez y desarrollo en la generación de productos que hace posible plantearnos su integración en el funcionamiento diario de los SAR para conseguir, entre otros aspectos, una mejor eficiencia del agua para riego. Los SAR son uno de los más importantes instrumentos en la gestión de los recursos hídricos, siendo la agricultura la principal consumidora de agua.

Así pues DEMETER (*DEMETER,* 2002) significa un intento de poner en práctica operativa el Servicio de Asesoramiento de Riegos asistido por satélite, utilizando la actual constelación de satélites de alta resolución espacial, durante una campaña de riego en tres zonas piloto de España, Italia y Portugal, altamente representativas de los tipos de agricultura mediterránea, con diferentes niveles de implantación y desarrollo de los SAR.

El esquema básico en cada país de los equipos que forman DEMETER responde al perfil de: Centros de investigación y desarrollo (Universidades, Institutos de Investigación), Servicio de Asesoramiento de Riegos de la zona piloto correspondiente, Administración competente y compañías de Tecnologías de la Información. Este esquema pretende que el diálogo entre usuarios (regantes y administración), especialistas de teledetección y tecnologías de la información se produzca desde el inicio del proyecto. De esta forma el producto final podrá acercarse a las necesidades de los usuarios, que finalmente han de aplicarlo, en función de un diseño realizado conjuntamente por todos los participantes del proyecto.

Cuadro 3. Aspectos en que se esperan mejoras sustanciales con la integración de las Tecnologías de Observación de la Tierra, junto con las Tecnologías de la Información, en los Servicios de Asesoramiento de Riegos.

	SAR (actual)	*e-SARAS*	*Mejoras*
Generación de productos	Seguimiento de parcelas piloto mediante costoso trabajo de campo	Seguimiento de áreas extensas. Permite el seguimiento parcela a parcela; incluso dentro de la parcela.	Personalización de la información explotación a explotación, sin incrementar el trabajo de campo. Posibilita el seguimiento y control de riego en áreas con déficit hídrico.
Línea de productos	Necesidades hídricas (Kc-ET_0)	Necesidades hídricas (Kc-ET_0); Fracción de cubierta vegetal, LAI, fAPAR, Biomasa; Índices de rendimiento del riego; Estado hídrico del cultivo.	Incremento cualitativo y cuantitativo de los productos. Productos avanzados georeferenciados para agricultura de precisión. Mejora en la eficiencia en el uso del agua para riego.
Transmisión de la información	Boletines, Prensa, Teléfono e Internet	Boletines, Prensa Potenciación de Internet y teléfono móvil. Creación de "usuarios locales preferentes"	Incorpora información con valor añadido de otras fuentes (meteorología, plagas, tratamientos…). Abre oportunidades de empleo de alto valor en entornos rurales.

AGRADECIMIENTOS

DEMETER (*DEMonstration of Earth observation TEchnologies in Routine irrigation advisory services*) es un proyecto financiado por la Comisión Europea dentro del V Programa Marco (Programa "Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible", contrato EVG2-2001-00042).

REFERENCIAS:

Allen, R.A., Pereira, L.S., Raes D. y Smith M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

Bastiaanssen, W.G.M, Molden, D.J. y Makin, I.W. (2000). "Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications". *Agricultural Water Management*, Vol. 46, 137-155.

Calera Belmonte, A., Medrano González, J., Vela Mayorga A. y Castaño Fernández, S. (1999). "GIS tools applied to the sustainable management of water resources. Application to aquifer system 08-29". *Agricultural Water Management*, Vol. 40, nº. 2-3, 207-220.

Calera, A., Martínez C., y González-Piqueras, J. (2001). "Integration from multiscale satellites, DAIS and Landsat, applying a linear model to the NDVI values in La Mancha (Spain)", *Proceedings ESA Workshop. 15-16 March 2001*.

DEMETER (2002). *Demonstration of Earth observation Technologies in Routine irrigation advisory services, http://www.demeter-ec.net*.

D'Urso, G. (2001). *Simulation and management of on-demand irrigation systems*. Ph.D. Thesis, Wageningen University.

Jochum, A.M., Rodríguez Camino, E. Y De Bruin, H.A.R. (2002) "Performance evaluation of the HIRLAM land-surface and boundary layer description in a semi-arid heterogeneous region: Comparison with EFEDA observations", submitted, *Monthly Weather Review*.

Martín de Santa Olalla, F., Brasa Ramos, A., Fabeiro Cortés, C., Fernández González D. and López Córcoles H. (1999). "Improvement of irrigation management towards the sustainable use of groundwater in Castilla-La Mancha, Spain". *Agricultural Water Management*, Vol. 40, nº. 2-3, 195-206.

Menenti, M. (2000). "Irrigation and Drainage. Chapter 17" En G.A. Schulz & E.T. Engman (Eds.). *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*. Springer Verlag Berlin, 377-400.

Montesinos, S. y Castaño, S. coords. (1999). *ASTIMwR-Application of Space Techniques to the Integrated Management of river basin Water Resources*. EC Contract nº ENV-CT96-0366, Final Report; ISBN-84-605-9867-5.

Moran, M.S., Inoue, Y. y Barnes, E.M. (1997). "Opportunities and Limitations for Image-Based Remote Sensing imprecision Crop Management". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 61, 319-346.

Moreno, J.F., Cabeza, I., Calera, A., Jochum, A., Marti J.M. and Menenti M. (2001). *Land Irrigation Support Service (LISSE)*, Report, ESA contract 14236/00/NL/DC.

Teillet, P.M., Barker, B.L., Markham, B.L., Irish, R.R., Fedosejevs, G. y Storey, J.C. (2001). "Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 78, 39-54.

Estimación, mediante técnicas SIG, de las pérdidas de agua por evaporación en embalses de riego en la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena

V. Martínez Alvarez [1], J.M. Molina Martínez [1] y M. Soto García [2]

(1) Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola de la Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia).
(2) Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 22, 30201 Cartagena (Murcia).

RESUMEN

La importancia económica de las pérdidas de agua por evaporación en embalses de regulación de riego es alta en zonas áridas como el Sureste Español, donde existe un marcado déficit hídrico y el valor añadido del agua es muy elevado. En el caso de balsas de riego impermeabilizadas, características por su escasa profundidad y su función de reserva, estas pérdidas pueden llegar a suponer un porcentaje importante sobre el volumen que regulan y hacer que la eficiencia del sistema de distribución disminuya notablemente.

Con el fin de evaluar la magnitud de estas pérdidas en la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena se ha realizado un estudio mediante el empleo del sistema de información geográfica ArcView. El estudio consiste básicamente en relacionar la información gráfica y alfanumérica sobre embalses de riego disponible en la base de datos de la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena y la información sobre evaporación en tanque evaporímetro clase A registrada en las estaciones meteorológicas de la zona.

A partir de los valores puntuales de evaporación se ha interpolado, mediante el método del inverso de las distancias, una cobertura matricial con la evaporación en lámina libre correspondiente a cada punto. Posteriormente se ha asignado, por superposición, el valor de evaporación correspondiente a cada balsa en función de su localización. De esta forma se han estimado unas pérdidas anuales por evaporación de 7,96 hm^3, valor que supone un 6,32% de los recursos hídricos disponibles en la Comunidad de Regantes. Finalmente, se han extrapolado los resultados obtenidos para toda la superficie regable de la Región de Murcia.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

***Palabras Clave**: Evaporación, embalses de riego, SIG, ArcView.*

ABSTRACT

The economic significance of evaporation water losses in irrigation reservoirs is important in arid regions like the southeast of Spain, where there is a marked water shortage and the associate productivity of water is very high. In case of waterproof irrigation reservoirs, characterized by their small depth and a strategic reserve function, these losses can mean an important percentage, considering the total regulated volume, and the efficiency of water distribution systems can notably decrease.

In order to quantify water losses in the Campo de Cartagena Irrigation Association, the geographic information system ArcView has been applied. The study essentially consist of relating the graphic and alphanumeric information about irrigation reservoirs, available in the data base of the Campo de Cartagena Irrigation Association, and the information of tank A evaporation collected in the meteorological stations of the study area.

A raster coverage has been interpolated from point located evaporation values weighting the value of each point by the distance that point is from the cell being analyzed. Subsequently the coverage of evaporation has been overlapped with the irrigation reservoirs coverage, and the evaporation corresponding to every dam has been obtained. The estimated annual water losses are 7,96 hm^3, value that represents a 6,32% of the available water resources in the Campo de Cartagena Irrigation Association. Finally, obtained results have been extrapolated to the whole irrigation areas in Región de Murcia.

***Key Words**: Evaporation, irrigation reservoir, GIS, ArcView.*

INTRODUCCIÓN

El desarrollo socioeconómico experimentado en los últimos años en el Sureste Español está fundamentado en el considerable crecimiento de los sectores de la producción agrícola intensiva y del turismo de calidad, así como en las industrias y servicios vinculados a los mismos. El desarrollo de estos sectores ha estado asociado a un continuo crecimiento de las demandas hídricas.

La situación actual presenta serios interrogantes sobre la sostenibilidad del desarrollo conseguido, sobre todo en lo que respecta a la disponibilidad del nivel de recursos hídricos demandados. Por este motivo, desde la Administración se están planificando nuevas actuaciones que garanticen los recursos hídricos necesarios para mantener los ritmos de crecimiento alcanzados, entre las que destacan:

- Incorporación de recursos hídricos a la región mediante el desarrollo de nuevos trasvases.
- Implantación de nuevas plantas desaladoras en zonas costeras.
- Mejora en la eficiencia del uso del agua, sobre todo en el sector agrario.

Ante la paralización actual del proyectado trasvase del Ebro, las actuaciones más inmediatas para abordar la actual carestía de recursos hídricos deben orientarse a la mejora en la eficiencia del uso del agua, sobre todo en la agricultura, dado que la construcción de plantas desaladoras sólo es viable para determinados usos de alto valor añadido entre los que, generalmente, no se encuentra la agricultura.

Los sistemas de distribución de agua se componen básicamente de conducciones para el transporte y embalses de regulación. Las conducciones permiten situar el recurso en el lugar de consumo con los requisitos de caudal y presión exigidos por la demanda. Los embalses de regulación amortiguan el desfase temporal que se produce entre la disponibilidad de los recursos y los requerimientos de la demanda, situación que se presenta sobre todo en la producción agrícola. Estos embalses de regulación, tan abundantes en el Sureste Español, pueden ocasionar grandes pérdidas de agua por dos motivos fundamentales: filtraciones, a través de la plataforma y los taludes que definen el vaso, y evaporación a la atmósfera.

En los lugares con altos índices de evaporación y escasez de precipitaciones, donde el agua se convierte en el mayor limitante para la producción agrícola, siempre se ha sido consciente de la importancia económica de las perdidas por evaporación en los embalses de riego. Sin embargo, son muy escasas las investigaciones orientadas a cuantificar la magnitud de estas pérdidas, por lo que cualquier esfuerzo orientado a este objetivo resulta de notable interés.

La importancia de las perdidas por evaporación es relativa en función de las características del embalse y de su funcionamiento. Para el caso de balsas de riego impermeabilizadas, características por su escasa profundidad y su función de reserva, estas pérdidas pueden llegar a suponer un porcentaje importante sobre el volumen que regulan y hacer que la eficiencia de distribución sea muy baja. Por esta circunstancia, a pesar de los importantes esfuerzos técnicos y económicos que se están realizando para mejorar la eficiencia de aplicación del agua en parcela, las eficiencias globales del sistema presentan valores discretos. En este sentido *Bengoechea et al*. (1991) estiman que el porcentaje de pérdidas por evaporación en balsas de riego en el Campo de Dalias (Almería) supone un 17% del total de pérdidas de agua en la actividad agrícola.

En este trabajo se recoge la metodología aplicada con el fin de evaluar la magnitud de las pérdidas por evaporación de agua en embalses de regulación de riego de la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena (CRCC) mediante el empleo del sistema de información geográfica ArcView. El estudio se ha realizado a partir de la información gráfica y alfanumérica sobre embalses de riego disponible en la base de datos de la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena y de la información climática registrada en las estaciones meteorológicas de la zona. Finalmente, se han extrapolado los valores obtenidos al total de la superficie regable de la Región de Murcia, estimando así la magnitud regional del problema.

INFORMACIÓN EMPLEADA EN EL ESTUDIO

Para la estimación de la evaporación en los embalses de regulación de riego de la CRCC se ha empleado información con dos orígenes diferentes. En primer lugar resulta necesario

disponer del conocimiento de los embalses existentes, con su superficie y su localización. Esta información ha sido obtenida a partir del SIG de gestión implantado en la CRCC (*Del Amor et al.*, 2001). Se trata de un SIG vectorial donde se dispone, en distintas coberturas, de toda la información gráfica del parcelario de la zona regable y de las infraestructuras de riego existentes, incluidos los embalses de riego. La cobertura vectorial de polígonos de los embalses de riego permite conocer el área de la superficie evaporante de cada uno de ellos y su localización.

El análisis del parcelario de la CRCC indica que existe una superficie regable de 40.316 ha dividida en tres zonas (figura 3). El número total de comuneros asciende a 8.435, los cuales se distribuyen de forma proporcional a su superficie los 126 Hm^3 de recursos hídricos anuales de que dispone la Comunidad. El análisis de la cobertura de embalses de regulación de riego nos permite conocer que en la CRCC existen 3.490 balsas de regulación de riego (figura 5), que ocupan una superficie total 674,3 ha (considerando el contorno en coronación), lo que supone que casi el 2% de la superficie agraria disponible en la CRCC está ocupada por estas estructuras. Estas balsas son propiedad de los comuneros, excepto las de mayor tamaño, que forman parte del sistema general de distribución y regulación de agua por parte de la CRCC. Su distribución por tamaños y la superficie de agua libre correspondiente a cada uno de los intervalos se muestra en las figuras 1 y 2.

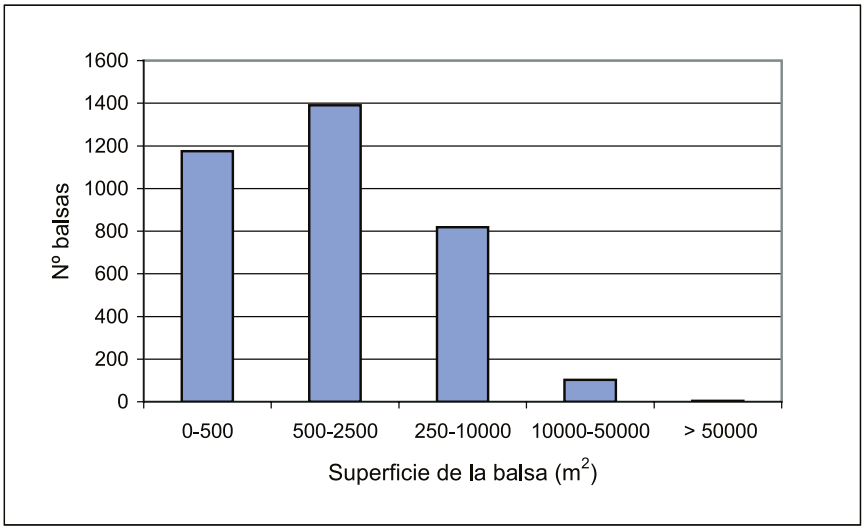


Figura 1. Distribución de las balsas de riego de la CRCC según tamaño.

El segundo tipo de información necesaria es la evaporación en tanque evaporímetro clase A. Esta variable se registra habitualmente en las estaciones meteorológicas y puede presentar una variación espacial significativa, por lo que se han seleccionado aquellas estaciones que se localizan dentro de la zona de estudio o en las proximidades (San Cayetano, San Javier, El

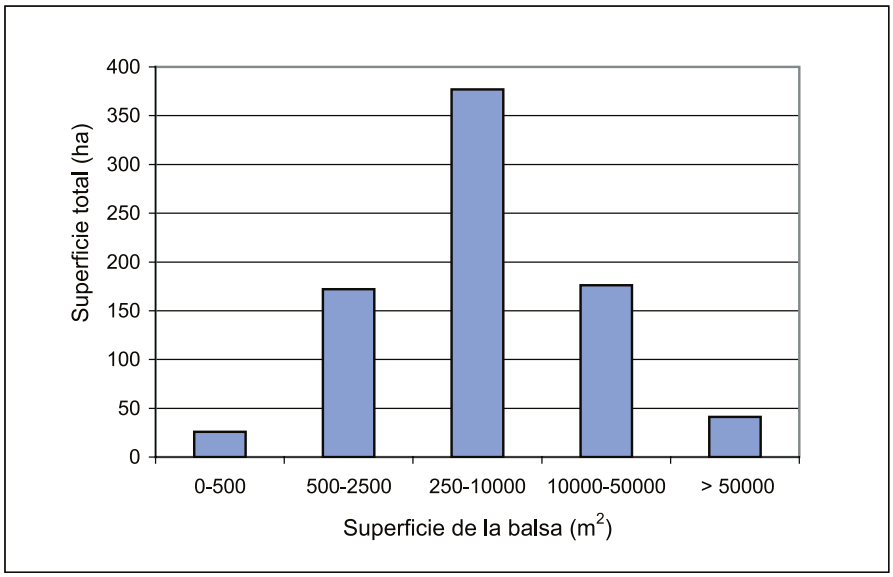


Figura 2. Distribución de las balsas de riego de la CRCC según tamaño.

Campillo y La Palma), según se muestra en la figura 3. esta información ha sido publicada para la Región de Murcia por la *Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente* (2000).

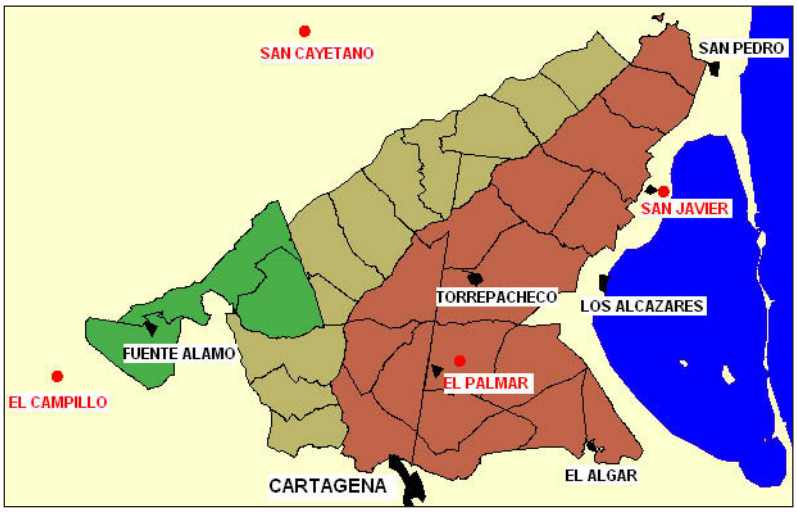


Figura 3. Zona regable de la CRCC y estaciones meteorológicas consideradas (en color rojo) (Anexo de figuras, color).

METODOLOGÍA

La metodología seguida para evaluar las pérdidas por evaporación los embalses de riego de la CRCC, a partir de la información indicada en el epígrafe anterior, se recoge en el diagrama de flujos de la figura 4. Esta metodología se ha implementado en el SIG *ArcView 3.2.*, con la extensión *Spatial Analyst*.

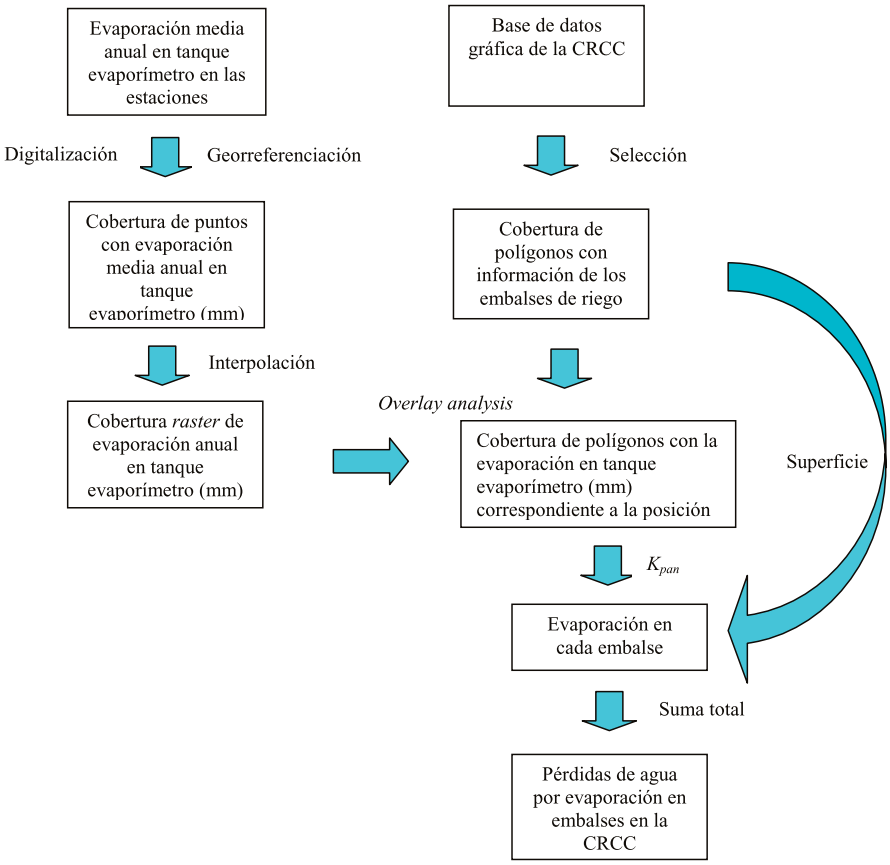


Figura 4. Diagrama de flujos de la metodología seguida

En primer lugar, se ha creado una cobertura de puntos con las estaciones meteorológicas seleccionadas, cuyas coordenadas UTM son conocidas, y se ha incorporado la información de evaporación anual en evaporímetro clase A de cada una de ellas. A partir de estos datos se ha interpolado una cobertura *raster* mediante el método del inverso de las distancias considerando todas las estaciones. Se consideró la posibilidad de incorporar otras variables en la interpolación (*kriging*), como la altitud o la proximidad al mar, pero dada homogeneidad geomorfológica de la zona no introducían variaciones significativas respecto a la técnica empleada. De esta

forma se obtuvo la cobertura con los valores anuales de evaporación en evaporímetro clase A correspondientes a cada localización.

A partir de la cuantiosa información gráfica del SIG de la CRCC, se elaboró una cobertura de polígonos con todos los embalses existentes, tanto de propiedad particular como de la propia Comunidad.

Considerando estas dos coberturas, se realizó un análisis por superposición (*overlay análisis*) con el fin de obtener para cada embalse de la cobertura de polígonos el valor de evaporación en evaporímetro clase A correspondiente a su localización (figura 5).

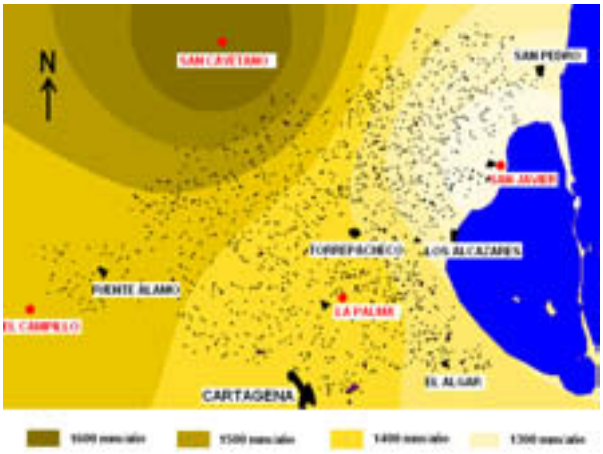


Figura 5. Superposición de las coberturas de evaporación en tanque clase A y de embalses.

A continuación, con el fin calcular la evaporación anual en cada embalse, se aplicó la ecuación 1, donde S representa la superficie del embalse y K_{pan} el coeficiente para pasar de evaporación en tanque cla se A a superficies mayores como las de los embalses. Se consideró un valor de $K_{pan} = 0{,}7$ (*DarRé et al.,* 2003).

$$E_{embalse}(m^3) = K_{pan} \cdot E_{\tan que}(mm) \cdot S(m^2) \cdot 10^{-3} \qquad (1)$$

Finalmente, se estimaron Pérdidas de agua por evaporación en embalses en la CRCC como la suma de todos los valores correspondientes a cada uno de los embalses.

RESULTADOS

El valor final al que se llega es de 7,96 hm^3 de pérdidas anuales por evaporación en embalses, valor que supone un 6,32% de los recursos hídricos disponibles en la CRCC. El valor económico de esta pérdida, valorada al precio actual del agua en la CRCC (0,126 €/m^3), es de 1 millón de EUROS anuales.

En la Región de Murcia el Plan Nacional de Regadíos, horizonte 2008 (*Ministerio de Agricultura pesca y Alimentación*, 2001) reconoce una superficie regable de 264.122 ha, de las cuales, y ante el déficit hídrico coyuntural existente en la actualidad, sólo se riegan 192.698 ha. La generalización de los datos obtenidos en la CRCC al total de la Región Murciana, siendo conscientes de la heterogeneidad de infraestructuras existentes entre zonas regables, nos llevaría a valores de perdidas por evaporación en balsas de riego próximas a los 50 Hm^3 anuales.

Para darse cuenta de la importancia de esta cantidad, basta con decir que es equivalente a un 20% de la cantidad media anual de agua trasvasada a la Región de Murcia mediante el acueducto Tajo-Segura desde su puesta en funcionamiento. También equivale al 11% de las redotaciones correspondientes a la cuenca del Segura en el paralizado trasvase del Ebro.

CONCLUSIONES

Dada la actual coyuntura política, en la que las actuaciones orientadas a reducir el déficit hídrico en la cuenca del Segura pasan principalmente por la mejora de la eficiencia en el uso del agua, sobre todo en la agricultura, resulta de notable interés estimar la magnitud de las pérdidas por evaporación que se producen en embalses de regulación de riego.

Con el fin de evaluar estas pérdidas en la CRCC se ha planteado una metodología sencilla a partir de la información de embalses disponible en el SIG de dicha Comunidad y de información meteorológica fácilmente accesible. Esta metodología se ha implementado con el SIG *ArcView 3.2*, empleando la extensión *Spatial Analyst*. La metodología ha sido aplicada con éxito, obteniendo un valor de pérdidas anuales por evaporación en embalses de 7,96 hm^3 para la CRCC, lo que supone un 6,32% de los recursos hídricos disponibles en la misma.

Mediante un estudio semejante el Instituto del Agua de la Universidad de Granada ha estimado las pérdidas por evaporación en embalses de riego de la provincia de Almería en 20 hm^3/año. Si valoramos estas cantidades de agua al precio que costaría obtenerla por otros medios (desalación o trasvase del Ebro) estaríamos hablando de unas pérdidas anuales en torno a los 16 millones de EUROS anuales en la región de Murcia y de 7,2 millones en la provincia de Almería. Si además se tienen en cuenta las posibles producciones asociadas a los volúmenes de agua perdidos por evaporación, la incidencia económica es mucho mayor.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Fundación Séneca mediante el proyecto PI-45/00851/FS/01 “Desarrollo y evaluación experimental de un modelo de evaporación de agua en lámina libre. Aplicación a la mejora del aprovechamiento del agua mediante el estudio de la eficiencia de técnicas reductoras de la evaporación en embalses de riego”.

REFERENCIAS

Bengoechea, J.M.; Pérez de los Cobos, J.; Pérez Parra, J. y Lópes Segura, J.G. (1991): "Evaluación de las pérdidas de agua de Riego en el Campo de Dalías, Almería". *Symposium sobre el agua en Andalucía*. Córdoba. Disponible en: *http://www.larural.es/servagro/sta/publicaciones/riego/publ9707/crt-1-2.htm.*

Dal-Ré, R.; Ayuga, F.; García, A.I.;Martínez, V.; Guerrero, I. y Gallego, E.(2003): *Pequeños embalses de uso agrícola*. Ediciones Mundi-Prensa, Madri, pp 70-71.

Del Amor García, F;, Claver Valderas, J.M.; Soto García, M.; Albaladejo Hernández; J.F., Martínez Álvarez, V. y Valiente Gómez, M. (2001): "Modelo de gestión de la zona regable del campo de Cartagena". *Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos*, Murcia, pp 210.

Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia (2000): *Mapa Digital de Suelos de la Región de Murcia*. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia, Murcia.77 p.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2001): *Plan Nacional de Regadíos, horizonte 2008*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, pp 199-209.

La teledetección en el contexto agrario andaluz

A. J. Rodríguez Pérez, M. Fuentelsaz Pérez, S. Baños Calvo, J. M. Durán Paredes, A. Muñoz Rastrero

Empresa Pública Desarrollo Agrario y Pesquero S.A.; C/ Bergantín 39, 41012, Sevilla-España.

RESUMEN

El proyecto "El uso de la teledetección espacial en el Sistema Integrado de Información Agraria (S.I.I.A)", se enmarca dentro de las actuaciones específicas del Plan de Modernización de la Agricultura Andaluza 2000-2006, que está llevando a cabo la Consejería de Agricultura y Pesca (CAP) de la Junta de Andalucía y la Empresa Pública Desarrollo Agrario y Pesquero S.A.

Los datos generados a partir de las imágenes satélite representan una novedosa fuente de información estadística dentro del S.I.I.A, siendo utilizados para la evaluación, contraste y seguimiento del estado de los cultivos, no sólo durante distintas fases temporales del mismo año agrícola, sino también entre años diferentes.

Los procesos de análisis y generación de estadísticas se basan, hasta la fecha, en valores de NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) obtenidos a partir de imágenes NOAA-AVHRR diarias (National Oceanic American Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer).

Se ha desarrollado una aplicación web de teledetección que facilita al usuario la posibilidad de realizar el seguimiento de los cultivos en Andalucía y visualizar los datos. La aplicación accede a una base de datos (actualizada cada diez días), que contiene los valores de los últimos once años (1992-2003), organizados decenalmente, por cultivo, tipo de sensor y límites geográfico-administrativos. El análisis se puede realizar desde un punto de vista multi-geográfico y multi-temporal (histórico).

El módulo de teledetección del SIIA también pretende la integración real y práctica con otros usuarios y fuentes de información (información local agraria, meteorológica, modelos agro-meteorológicos, estadísticas varias, etc.) que sirvan para generar las oportunas vali-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

daciones y una óptima retroalimentación al sistema. Esta integración permitirá una explotación más fiable a medio plazo, para cada momento y lugar en Andalucía.

***Palabras Clave**: Teledetección, aplicación web, NOAA-AVHRR, NDVI, cultivos, Andalucía.*

ABSTRACT

A new remote sensing application was developed and incorporated to the Agrarian Integrated Information System (S.I.I.A), project which is involved on integrating the regional farming databases from a geographical point of view, adding new values and uses to the original information. The project is supported by the Servicio de Estudios y Estadísticas, Consejería de Agricultura y Pesca (CAP) from Junta de Andalucía.

The process integrates NDVI values from daily NOAA-AVHRR and crop classes location maps. Agrarian local information and meteorological information is being included in the working process to produce a synergistic effect.

An updated crop-growing evaluation state is obtained by ten-month-year periods, crop class, sensor type (including data fusion) and administrative geographical borders. Crop database (1992-2003) has been organized according to these variables.

Crop class database can be accessed by an application which helps users on the crop statistical analysis. Multi-temporal and multi-geographical comparative analysis can be done by the user, not only for a year but also for a historical point of view. Moreover, real time crop anomalies can be detected and analysed. Most of the output products will be available on the Internet in the near future by a on-line application.

***Key Words**: Remote sensing, Web application, GIS, NOAA-AVHRR, NDVI crops Andalusia.*

INTRODUCCIÓN

En los inicios del siglo XXI, Andalucía sigue apostando por la agricultura como uno de sus principales recursos y como una forma de vida de la que nuestra región es un excelente representante de la Unión Europea.

La Teledetección espacial es una ciencia, ya consolidada a pesar de su relativa "juventud", que fundamenta sus estudios y desarrollos en la medida y el análisis de la radiancia electromagnética emitida y reflejada por la superficie terrestre. En la actualidad, es una de las técnicas más fiables y avanzadas para el seguimiento permanente y el control, en tiempo real, de la vegetación natural y de los cultivos.

En este contexto, surge el proyecto *"El uso de la teledetección espacial en el Sistema Integrado de Información Agraria (S.I.I.A)"* como una forma de apostar con claridad por una agricultura andaluza moderna y tecnológicamente en vanguardia. Este proyecto tiene su mar-

co operativo dentro del "Plan de Modernización de la Agricultura Andaluza 2000-2006", que está desarrollando la Consejería de Agricultura y Pesca (C.A.P) de la Junta de Andalucía y la Empresa Pública Desarrollo Agrario y Pesquero (D.a.p).

El Sistema Integrado de Información Agraria, sistema marco de este proyecto, trata de aglutinar bajo un mismo entorno de trabajo la información agrícola alfanumérica disponible, junto con la cartografía en uso (mapas raster y vectoriales, ortofotos, imágenes satélite, etc.), para facilitar el acceso, la consulta y el análisis de la información a todos sus potenciales usuarios.

El uso de la Teledetección aplicada a la agricultura ofrece una buena alternativa tecnológica para la consecución de los objetivos generales del S.I.I.A y para complementar, desde otro punto de vista, "a vista de pájaro", la información que dispone la Consejería sobre el estado de los cultivos en Andalucía, a partir de imágenes satélite adquiridas a más de 800 Kilómetros de altura sobre la superficie terrestre.

El proyecto está generando una nueva fuente de información que se está utilizando en la evaluación, contraste y seguimiento del estado de los cultivos, tanto en su evolución anual durante distintas fases del mismo año agrícola (decenas, meses) como también entre años distintos. A través de estas comparaciones se podrá entender con mucha mayor claridad el contexto agro-climatológico en el que se desarrollan o desarrollaron los cultivos. También se podrán identificar las posibles anomalías o alteraciones biológicas que afecten a los cultivos, como, por ejemplo, crecimientos anómalos o tardíos, sequías, heladas, inundaciones, plagas, etc.

Dentro del proceso de crecimiento del proyecto, se pretende que, a diferencia de otros sistemas endógenos, el módulo de teledetección se integre de manera directa con otros usuarios y Sistemas, para facilitar la circulación y el acceso a la información, la producción de las

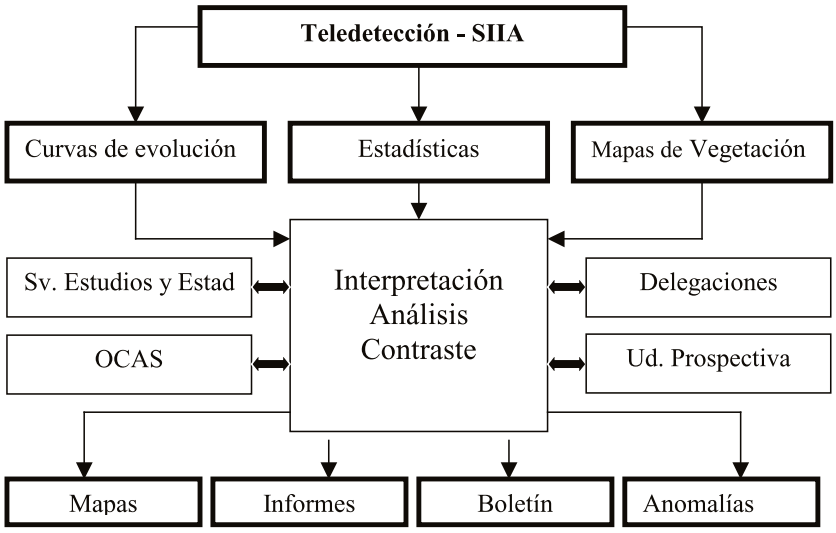


Figura 1. Integración y flujo de la información

correcciones y las validaciones a realizar (estadísticas, curvas de desarrollo, imágenes, etc.). Esta integración permitirá una explotación más sólida, con mayor fiabilidad, para cada sitio y momento. La Figura 1 resume esta filosofía: el equipo de Teledetección del S.I.I.A pretende ser el aglutinante hacia el que fluyan todos los datos complementarios que ayuden en la interpretación de los resultados, a la vez que genera productos que faciliten el trabajo de los técnicos a diferentes niveles: Consejería, Delegaciones, Oficinas Comarcales y Empresa Pública Dap.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo global de este proyecto es el seguimiento y control, en tiempo real, de la evolución de los diferentes grupos de cultivos en Andalucía mediante técnicas de Teledetección.

Los objetivos específicos se pueden resumir como sigue:

- Creación de nuevas fuentes de información en el SIIA a partir de imágenes satélite.
- Generación de mapas de vegetación diarios a partir de datos de satélite.
- Análisis del desarrollo de los cultivos de Andalucía a partir de los mapas de vegetación obtenidos.
- Constitución de un archivo multitemporal de mapas de vegetación que permita el seguimiento de los cultivos a lo largo del tiempo.
- Localización de la sequía.
- Detección en tiempo real de cualquier anomalía que puedan sufrir los cultivos.
- Producción de mapas de ET_o a nivel regional con periodicidad diaria.

METODOLOGÍA

La metodología de trabajo se fundamenta en el tratamiento integrado de dos fuentes de datos: datos procedentes de los satélites y cartografía de cultivos (Figura 2). En la actualidad, el seguimiento del estado vegetativo de los cultivos se está realizando a partir del índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), propuesto por *Rouse et al. (1974)*, índice que es sensible a la actividad fotosintética del cultivo, a su estado vegetativo y a un posible estrés hídrico.

Cada decena de mes se constituyen mapas de MVC-NDVI (máximo valor compuesto de NDVI), a partir de los cuales se generan las estadísticas de evolución, agrupadas por grupo de cultivo y término municipal, datos que son posteriormente cargados en la base de datos ORACLE del S.I.I.A para su consulta y análisis, ya sea en forma de mapas de vegetación, curvas de evolución o de detección de anomalías.

El seguimiento en tiempo real de la evolución de los grupos de cultivo de Andalucía se basa en tres tipos de análisis:

- Análisis intra-anual: seguimiento del desarrollo de los grupos de cultivo entre diferentes fechas del mismo año agrícola.

- Análisis inter-anual: comparación del estado de los grupos de cultivo entre el año en curso y los años anteriores.
- Comparación del estado de los grupos de cultivos entre el año en curso y la evolución típica, por cultivo y término municipal, obtenida a partir de los datos históricos almacenados en la base de datos del S.I.I.A.

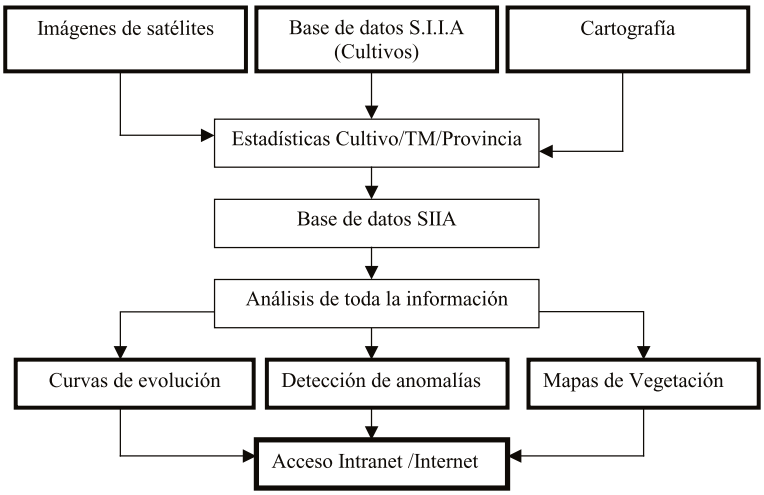


Figura 2. Metodología general de trabajo.

Fuentes de información

Las fuentes de datos se circunscriben a dos grupos fundamentales, imágenes satélites y cartografía de cultivos.

Se dispone de:

- Histórico de imágenes diarias NOAA-AVHRR desde los años 1992 a 2003.
- Imágenes diarias de NOAA-AVHRR para el año en curso, a través de un servicio FTP.
- Imágenes Landsat TM de determinadas zonas de interés.

Las estadísticas se están generando en la actualidad a partir de las imágenes NOAA-AVHRR, pero en un breve periodo de tiempo se empezarán a utilizar otros sensores de manera recurrente como Landsat y Modis.

El proyecto se ha iniciado con imágenes del sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) del satélite NOAA (*National Oceanographic and American Administration*). Este sensor tiene una resolución espacial de 1 kilómetro y ha sido usado extensamente y con éxito en estudios aplicados al reino vegetal *(Eidenshink & Haas, 1992; Foodi & Curran, 1994)*. La gran disponibilidad de los datos, la cobertura global de la tierra y su fácil adquisición explican el papel protagonista de este sensor, ya que permite estimar el estado de la vegetación sobre grandes áreas *(Goward et al.,1991; Los et al., 1994)*. Además, su alta frecuencia

temporal permite calcular el índice de vegetación a diario y llevar a cabo estudios de evolución temporal que resultan fundamentales en la vigilancia del estado de los cultivos. Por otro lado, la resolución espacial de este sensor no permite el análisis de precisión para cultivos dispersos o aquéllos que ocupan superficies muy reducidas. Para subsanar esta limitación y obtener estadísticas más precisas se incorporarán imágenes de sensores con mayor resolución espacial.

Para los procesos de generación de estadísticas se utilizan dos fuentes cartográficas:

- Mapa de cultivos y aprovechamientos de Andalucía de la Consejería de Agricultura y Pesca.
- Mapa anual S.I.I.A elaborado a partir del Catálogo de Explotaciones Agrícolas (declaraciones de cultivos).

En la actualidad para la fuente de contraste cartográfica se está usando el mapa de cultivos y aprovechamientos de la CAP, que comprende en realidad una asociación de cultivos por grupos, a saber: *Arroz, Choperas, Cítricos, Cultivos subtropicales, Frutal de regadío, Frutal de secano, Herbáceos de regadío, Herbáceos de secano, Olivar de regadío, Olivar de secano, Olivar/Frutal de secano, Subtropical/Cítricos, Viñedo y Cultivos protegidos*. Se han excluido los denominados como *Improductivo, No cultivado, Invernadero y Huerta*, los tres primeros por razones agronómicas obvias y el último debido a sus características de dispersión y poca representatividad en el global de la región.

Para mejorar el grado de actualización del mapa de cultivos para cada campaña agrícola, se confeccionará un nuevo mapa, denominado en adelante mapa de cultivos S.I.I.A, a partir del parcelario digital y de todas las declaraciones de cultivos gestionadas por la C.A.P y reunidas en el núcleo de datos del S.I.IA. Esto supone representar e identificar geográficamente cada cultivo o cultivos asociados para cada parcela catastral y, a partir de aquí, realizar las agrupaciones de cultivos que en cada caso sean necesarias.

PRODUCTOS OBTENIDOS Y SU USO

Se ha realizado una aplicación para ayudar a los usuarios a realizar el análisis estadístico, la visualización y la extracción de los datos. La aplicación accede a la base de datos ORACLE (actualizada cada diez días), que contiene todos los valores del histórico y del año en curso, organizados decenalmente y por cultivo, tipo de sensor (incluyendo fusión entre sensores) y límites geográfico-administrativos. El análisis se puede realizar desde un punto de vista multi-geográfico y multi-temporal (histórico). La forma de selección se basa en la elección del grupo de cultivo, provincia y término municipal. La aplicación está en continua progresión y mejora. También permite identificar las posibles anomalías o alteraciones biológicas que afectan a los cultivos como, por ejemplo, crecimientos anómalos o tardíos, sequías, heladas, inundaciones, plagas, etc. En la actualidad ya se dispone de una aplicación on-line en Internet, *http://www.cap.junta-andalucia.es/agriculturaypesca/publico*, entrando en cartografía, en donde se pueden consultar los resultados disponibles. La Figura 3 muestra un ejemplo de visualización general de la aplicación.

Destacar también que, como una forma de difusión de los resultados, el Servicio de Estudios y Estadísticas de la Consejería de Agricultura y Pesca, del cual depende en origen todo el

proyecto S.I.I.A, edita con cierta periodicidad un Boletín de Teledetección que trata de resumir la situación general de los cultivos en Andalucía. Además, se han realizado otros trabajos como la estimación de la producción de fresa bajo plástico en la provincia de Huelva para las dos últimas campañas y la estimación de la producción de algodón para la provincia de Sevilla en la campaña 2002/2003.

Figura 3. Pantalla inicial de la aplicación

Se incluyen a continuación algunos ejemplos de la evolución vegetativa de varios grupos de cultivo en Andalucía para la campaña 2003, por provincia, municipio y grupo de cultivo. Para cada uno, se incluye la curva NDVI de este año y su comparación con las del año 2002, el año 1998 y la evolución de la curva típica, que es la media histórica menos el máximo y el mínimo históricos (ver Figuras). Asimismo, se incluyen una serie de tablas que describen la posición relativa de cada grupo de cultivo analizado respecto de los datos del histórico. En las tablas se pueden encontrar los siguientes campos:

- *Fecha*: se estructura en base a decenas de mes.
- *Val. Típico*: valor típico para esa decena, grupo de cultivo y término municipal. El calendario de siembra del cultivo define las decenas sobre las que ha de realizarse el análisis.
- *Desv. Típica*: desviación típica respecto de la media histórica para una decena, grupo de cultivo y término determinado. Establece los rangos superior e inferior de la curva típica para la decena *i*.
- *Val. 2003*: valores de NDVI para el año 2003.
- *Porcent1*: expresa el porcentaje de desviación positiva o negativa del valor actual respecto del valor típico.
- *Porcent2*: expresa el porcentaje de desviación, positiva o negativa, del valor presente respecto de los límites superior e inferior del rango de normalidad, para la combinación decena, grupo de cultivo, término municipal.

Para interpretar estos datos, el equipo de Teledetección del S.I.I.A pretende desarrollar el esquema planteado en la Figura 1, antes comentada. Entre las mejoras en las que se está

trabajando cabe destacar el establecimiento de una red de parcelas agrícolas "controladas", de "historial" agrológico conocido, con el fin de ir mejorando y estableciendo cada vez mayor número de relaciones entre los datos de satélite y los de campo.

Herbáceos de secano: María (Almería)

Según el mapa de cultivos y aprovechamientos de la CAP, los grupos de cultivo más representativos para este término son: Herbáceos de secano y de regadío, Frutal de secano.

Superficie total del término	**22.500 Ha**
Superficie cultivada aproximada	81 %
% Herbáceos de secano /cultivado	57%

La Figura 4 muestra la evolución del índice de vegetación de los Herbáceos de secano en el término municipal de *María* durante el periodo enero-junio y los años 1998, 2002, 2003, además de la curva típica. A partir de las curvas, se puede inferir la parecida evolución de este grupo de cultivo en los años 2002 y 2003, y los valores superiores de NDVI-MVC que adopta la curva en el año 1998.

El Cuadro 1 (*Porcent1* y *Porcent2)* indica la misma tendencia: este año, para el término de María y en comparación con la distribución típica del histórico, está siendo un año que estará por debajo de la normalidad. De igual manera, los datos de este año comparados con los del año pasado, (ver Figura 4 y Cuadro 1, campo *% 03/02*, de cambio relativo entre ambos años) confirman que la campaña actual para los herbáceos de secano no será como la del año pasado. La tendencia observada también se repite en municipios como Vélez Rubio y Vélez Blanco, donde también existe bastante superficie de este tipo de cultivos.

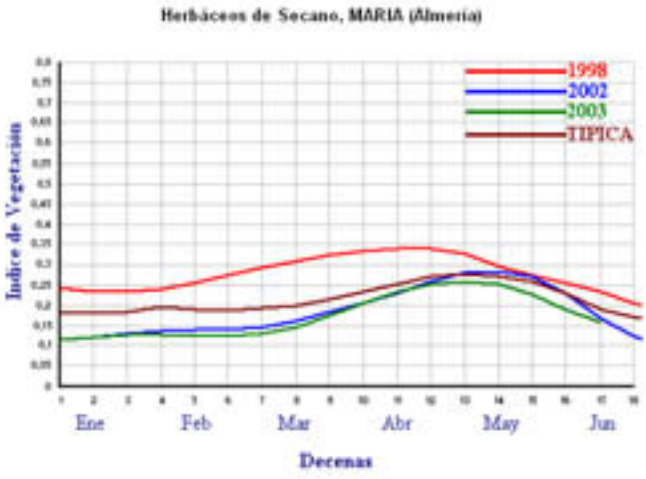


Figura 4

Cuadro 1. María (Almería), Herbáceos de secano

FECHA	VAL. TÍPICO	DESV. TÍPICA	VAL. 2002	VAL. 2003	% 03/02	Porcent1	Porcent2
1-10 Ene	0,185	0,024	0,113	0,114	0%	-38%	-29%
11-20 Ene	0,182	0,021	0,121	0,119	-1%	-34%	-26%
21-31 Ene	0,182	0,018	0,13	0,125	-3%	-31%	-24%
1-10 Feb	0,195	0,012	0,136	0,127	-6%	-35%	-31%
11-20 Feb	0,189	0,011	0,138	0,125	-10%	-34%	-30%
21-28 Feb	0,188	0,013	0,14	0,124	-11%	-34%	-29%
1-10 Mar	0,191	0,016	0,146	0,13	-11%	-32%	-26%
11-20 Mar	0,2	0,017	0,161	0,145	-9%	-27%	-21%
21-31Mar	0,215	0,016	0,182	0,173	-5%	-20%	-13%
1-10 Abr	0,234	0,014	0,206	0,206	0%	-12%	-6%
11-20 Abr	0,254	0,011	0,232	0,234	1%	-8%	-4%
21-30 Abr	0,272	0,011	0,26	0,252	-3%	-7%	-3%
1-10 May	0,278	0,01	0,28	0,258	-8%	-7%	-4%
11-20 May	0,273	0,008	0,285	0,252	-11%	-8%	-5%
21-31 May	0,259	0,008	0,272	0,228	-16%	-12%	-9%
1-10 Jun	0,23	0,008	0,229	0,19	-17%	-18%	-15%
11-20 Jun	0,191	0,008	0,169	0,157	-7%	-18%	-14%

Arroz: Los Palacios y Villafranca (Sevilla)

Para este término, los grupos de cultivo más representativos, según el *Mapa de cultivos y aprovechamientos* de la C.A.P, son Arroz, Herbáceos de secano y de regadío, Olivar de secano y de regadío, Cítricos e Invernaderos.

Superficie total del término	11.389 Ha
Superficie cultivada aproximada	88 %
% Arroz /cultivado	8 %

El arroz en el *mapa de Cultivos y Aprovechamientos* de la Consejería de Agricultura y Pesca es el único cultivo herbáceo que se trata de manera diferenciada y no agrupado en forma de grupo de cultivo.

Las curvas obtenidas a través de las imágenes satélite muestran una regularidad muy acusada para casi todos los casos (Figura 5). Sin lugar a dudas es el herbáceo el que muestra un patrón de actividad más característico.

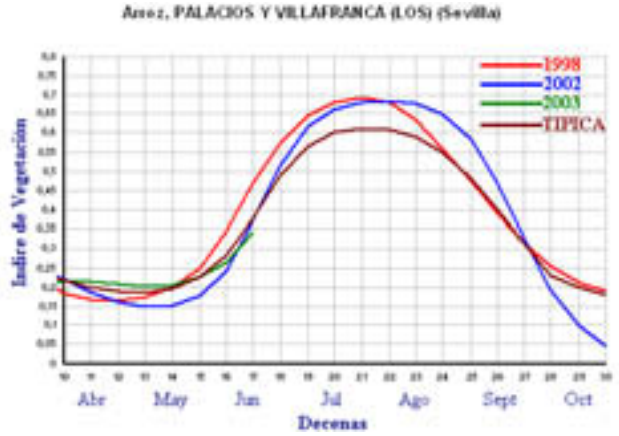


Figura 5

El arroz se trasplanta entre los meses de mayo y junio: el Cuadro 2 refleja perfectamente esta actividad, ya que los valores típicos permanecen por debajo de 0,2 puntos hasta la segunda decena de mayo, valores que indican que los terrenos se encuentran inundados. Esta tendencia se rompe a finales de mayo y sobre todo a principio de junio, con un crecimiento progresivo, que no se detendrá hasta mediados de los meses de julio o agosto, fechas en las que la mayoría de las curvas alcanzan los máximos absolutos.

Cuadro 2. Los Palacios y Villafranca (Sevilla), Arroz.

FECHA	*VAL. TÍPICO*	*DESV. TÍPICA*	*VAL. 2003*	*Porcent1 (%)*	*Porcent2 (%)*
1-10 Abr	0,217	0,011	0,216	-1%	0
11-20 Abr	0,2	0,008	0,216	8	4
21-30 Abr	0,189	0,009	0,21	11	6
1-10 May	0,185	0,011	0,202	9	3
11-20 May	0,196	0,01	0,206	5	0
21-31 May	0,227	0,012	0,226	0	0
1-10 Jun	0,284	0,018	0,267	-6	0
11-20 Jun	0,377	0,022	0,34	-10	-4

Herbáceos de regadío: Alcalá del Río (Sevilla)

Para el término de Alcalá del Río, los cultivos más representativos son: Herbáceos de secano y de regadío, Olivar de secano y de regadío, Cítricos, Frutal de secano y de regadío. En el caso de los herbáceos de regadío en Alcalá del Río (Cuadro 3), los valores de NDVI para el año 2003 muestran una tendencia positiva, aunque respecto del valor típico (expresado en la columna *Porcent1*), la mayoría de los valores se encuentran por debajo. En cambio, el porcen-

taje respecto del umbral típico (*Porcent2)* indica que los valores se pueden asumir como dentro de la normalidad. Los valores que han de marcar la realidad del cultivo se obtendrán de aquí hasta final del verano (Figura 6).

Superficie total del término	**8.288 Ha**
Superficie cultivada aproximada	81 %
% Herbáceos de regadío /cultivado	78 %

Cuadro 3. Herbáceos de regadío, Alcalá del Río (Sevilla).

FECHA	VAL. TÍPICO	DESV. TÍPICA	VAL. 2003	Porcent1 (%)	Porcent2 (%)
1-10 Abr	0,211	0,004	0,205	-3	-1
11-20 Abr	0,221	0,005	0,221	0	0
21-30 Abr	0,238	0,005	0,237	0	0
1-10 May	0,255	0,006	0,253	-1	0
11-20 May	0,276	0,007	0,272	-2	0
21-31 May	0,305	0,012	0,292	-4	-1
1-10 Jun	0,339	0,017	0,317	-6	0
11-20 Jun	0,373	0,016	0,346	-7	0

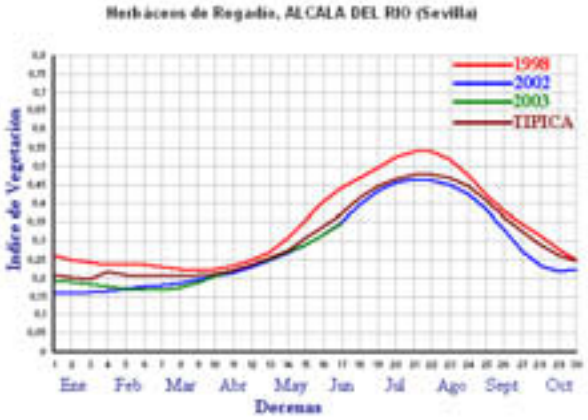


Figura 6

Olivar de secano: Córdoba (Córdoba)

Los grupos de cultivo más representativos son Olivar de secano, Herbáceos de secano y de regadío.

Superficie total del término	125.151 Ha
Superficie cultivada aproximada	71 %
% Olivar de secano /cultivado	9 %

El olivar es el monocultivo más importante de Andalucía. Aun así, es uno de los sistemas que más necesitan de un estudio integral a todos los niveles: agronómico, ecológico, económico, social, etc. La Consejería de Agricultura y Pesca es consciente de esta realidad y fruto de este interés surgen estudios como "El olivar andaluz", trabajo que caracteriza el olivar desde distintos puntos de vista. El enfoque del S.I.I.A y, por ende, de los trabajos de teledetección, supone establecer los pasos necesarios para profundizar en su análisis, considerando todas las variable implicadas en el sistema, y poder, así, suministrar la mejor cantidad y calidad de información a los técnicos dedicados a su estudio.

En esta ocasión, se muestran los resultados obtenidos para el olivar del municipio de Córdoba. Con los datos disponibles, se observa una tendencia positiva en el mes de abril y la primera parte de mayo (Cuadro 4). Sin embargo se es consciente de la poca sensibilidad del sensor y de la gran variabilidad espacial y de manejo que puede englobar estos datos. Por esta razón se están ejecutando gradualmente un conjunto de mejoras metodológicas que quizás reviertan en un análisis más detallado.

Las curvas representadas en la Figura 7 coinciden en mostrar los máximos a finales de marzo y principios de abril. En esas fechas, todas las curvas confluyen y se sitúan en un estrecho rango de valores.

Cuadro 4. Herbáceos de regadío, Alcalá del Río (Sevilla)

FECHA	VAL. TÍPICO	DESV. TÍPICA	VAL. 2003	Porcent1 (%)	Porcent2 (%)
1-10 Ene	0,246	0,015	0,235	-5	0
11-20 Ene	0,247	0,015	0,238	-4	0
21-31 Ene	0,258	0,013	0,244	-5	0
1-10 Feb	0,296	0,012	0,249	-16	-12
11-20 Feb	0,307	0,011	0,258	-16	-13
21-28 Feb	0,322	0,012	0,276	-14	-11
1-10 Mar	0,337	0,01	0,3	-11	-8
11-20 Mar	0,35	0,009	0,326	-7	-4
21-31Mar	0,353	0,007	0,345	-2	0
1-10 Abr	0,339	0,008	0,35	3	1
11-20 Abr	0,317	0,014	0,342	8	3
21-30 Abr	0,294	0,016	0,321	9	4
1-10 May	0,275	0,015	0,292	6	1
11-20 May	0,267	0,015	0,263	-2	0
21-31 May	0,261	0,016	0,235	-10	-4
1-10 Jun	0,251	0,015	0,211	-16	-10
11-20 Jun	0,237	0,017	0,196	-18	-11

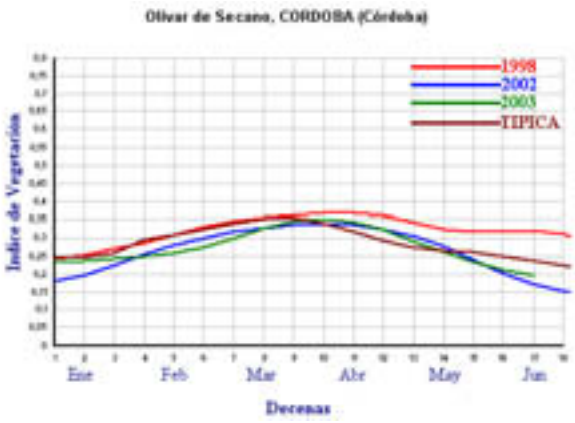


Figura 7

REFERENCIAS

Eidenshink, J. C., Haas, R. H., 1992. Analyzing vegetation dynamics of land systems with satellite data. *Geocarto International* 1:53-61

Foody, G. M; Curran, P. J; 1994: Estimation of tropical forest extent and regeneration stage using remotely sensed data. *Journal of Biogeography*; 21 (1), 223 – 244.

Goward, S.N., Markham, B, Dye, D.G., Dulaney, W., and Yang, J., 1991: Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing of Environment*, 35, 257-277.

Los, S.O., Justice, C.O., and Tucker, C.J., 1994: A global 1 by 1 degree NDVI data set for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3493-3518.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. H., and Harlan, J. C., 1974: *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of nature vegetation*, NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt, MD, 371.

Análisis de imágenes Thematic Mapper para detectar la respuesta espectral de invernaderos

J.F. Sanjuan Estrada

Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería (FIAPA). Ctra. de la playa s/n, 04120 La Cañada de San Urbano. Almería.

RESUMEN

El análisis de la superficie invernada en la provincia de Almería a través imágenes multiespectrales de los satélites LANDSAT V y VII, captadas con los sensores Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper (ETM), se basa en la caracterización de la respuesta espectral de la cubierta del invernadero. En el presente trabajo de investigación se obtuvo la firma espectral de distintos invernaderos con diferentes cubiertas, tanto de plástico como de malla, distribuidos por toda la provincia de Almería, especialmente en la comarca del Campo de Dalias y el levante almeriense. Los invernaderos con cubierta de plástico presentan dos respuestas espectrales diferentes dependiendo del grado de humedad depositada en su superficie. Sin embargo, ambas respuestas espectrales son fácilmente clasificables del resto de superficies, aunque se pueda confundir con la respuesta espectral de la nieve. Respecto a la respuesta espectral de los invernaderos con cubierta de malla se complica el proceso de clasificación, por lo que se deben introducir algunas restricciones en el proceso de clasificación. Finalmente se ha elaborado un estudio multi-temporal de la evolución que ha experimentado la superficie invernada en la provincia de Almería, a partir de diez imágenes captadas en el periodo comprendido entre febrero de 1985 y enero de 2004.

Palabras Clave: *Respuesta espectral de invernaderos, teledetección de la superficie invernada.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

The analysis of greenhouse-covered surface in the province of Almería through multispectral images of LANDSAT V and VII satellites, caught with Thematic Mapper (TM) and Enhanced Thematic Mapper (ETM) sensors, is based on characterization of spectral response of greenhouse covers. In the present research work spectral signature of different greenhouse with different covers was obtained, as much of plastic as of mesh distributed by all the province of Almeria, specially in the region of Campo de Dalias and Almeria East. The greenhouses with plastic covers show two different spectral signatures depending on the humidity degree deposited on their surface. Nevertheless, both spectral responses are easily differentiable of any surface, although it is possible to be confused with snow spectral signature. With respect to the spectral signature of greenhouse covered with mesh, the classification process is more difficult, some restrictions need to introduce in the classification process. Finally, a multi-temporary study of greenhouse surface evolution in the province of Almeria, with ten images caught in the period between february of 1985 and january of 2004.

Key Words: *Spectral signature greenhouse, teledetection of greenhouse surface.*

INTRODUCCIÓN

En la década de los años 70 comienzan a desarrollarse en la provincia de Almería, más concretamente en la comarca del campo de Dalias, los cultivos forzados, haciendo su aparición los cultivos bajo plástico en estructuras tipo "*parral*" con un alto índice de crecimiento.

Conocer con cierto grado de exactitud la superficie de cultivos bajo plástico, posibilitaría un control de la oferta y de los precios, absolutamente necesario para el futuro de la agricultura forzada en la provincia de Almería.

Sin embargo, los sistemas de evaluación estadística convencionales carecen de agilidad necesaria para poder ofrecer unos resultados con suficiente rapidez y economía en el control de las estadísticas. Un inventario tradicional suele realizarse con periodicidades quinquenales, convirtiéndose sus datos en algo meramente histórico ante el dinamismo de las nuevas agriculturas y de procesos de "*conquista de espacios*", como los que se están llevando actualmente a cabo en la provincia de Almería, entre los que resaltamos las construcciones en las laderas de montañas e incluso en los límites de reservas naturales.

La teledetección espacial con su elevado grado de dinamismo en el análisis de los recursos naturales terrestres puede solucionar este problema dando una alternativa complementaria a los inventarios convencionales.

Por otra parte, la mayoría de los procedimientos de evaluación de superficies de cultivos con imágenes de satélite se vinculan a tratamientos estadísticos de los datos relacionados y corregidos, mediante encuestas de campo (*Pastorelli,* 1989), en diferentes segmentos de control.

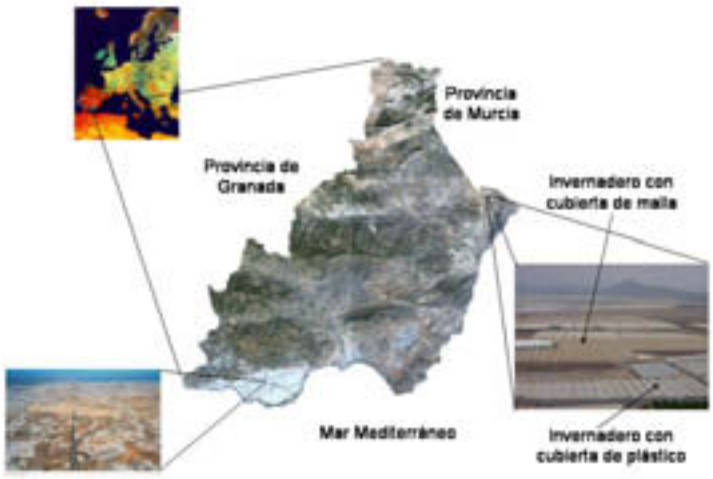


Figura 1. Imagen del sensor Thematic Mapper en color natural de la provincia de Almería, compuesta a partir de dos imágenes georeferenciadas. También, se aprecian diferentes vistas panorámicas de la superficie invernada, con diferentes cubiertas.

En estos sistemas la representación de los cultivos carece de importancia, siendo lo esencial la bondad de la tendencia estadística. No son muy frecuentes los procedimientos que unen y obtienen el resultado estadístico a partir de la cartografía de dichas imágenes, ya que son numerosas las confusiones de firmas espectrales en medios muy diversos.

Para conseguir obviar esta problemática sería preciso generar programas de clasificación de imágenes que incluyan, no sólo la asistencia habitual de parcelas conocidas en campo para inicializar la clasificación, sino también la experiencia de un intérprete humano, que sea capaz de diferenciar (a pesar de respuestas digitales o visuales idénticas) aquellos medios donde es imposible la existencia de determinados fenómenos.

La finalidad del proyecto de investigación es estimar con gran precisión la superficie invernada en la provincia de Almería. Sin embargo, el éxito del estudio basa su pilar en la detección eficiente de la respuesta espectral de diferentes tipos de invernaderos, para una fácil discriminación del resto de superficies.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La provincia de Almería situada en el sureste de la Península Ibérica, entre las provincias de Murcia y Granada (ver figura 1), está constituida por 102 términos municipales. Principalmente, la mayor concentración de invernaderos se localiza en las comarcas del Campo de Dalias (situado en el sur-oeste almeriense), Campo de Nijar (situado en el sur-este almeriense), Bajo Andarax (situado en el sur almeriense) y levante almeriense (ver figura 2).

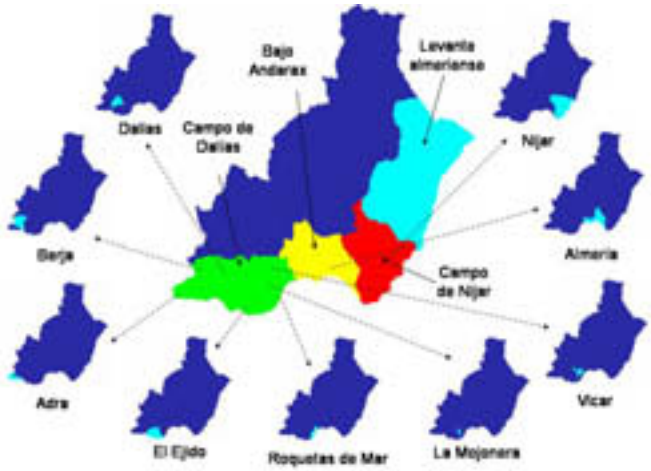


Figura 2. Localización de las comarcas más significativas respecto a la superficie invernada en la provincia de Almería, destacando los términos municipales con mayor superficie invernada.

Estas comarcas se reparten el 99,67% de toda la superficie invernada en la provincia de Almería, donde destaca primordialmente el Campo de Dalias con el 78,48%, seguido muy distante por el campo de Nijar con el 12,53% (*Sanjuan,* 2001). En la comarca del Campo de Dalias, destaca concretamente la mayor concentración de invernaderos de Europa abarcando los términos municipales de El Ejido, Vicar, Roquetas de Mar, La Mojonera, Adra, Berja y Dalias, más comúnmente conocido como el "*mar del plástico*". Sin embargo, existen otros municipios con menor superficie invernada como son Almería capital (en la comarca del Bajo Andarax), y Nijar (en el Campo de Nijar) con una inminente proliferación de invernaderos en los últimos cinco años, y donde más expectativas de crecimiento existen. Finalmente indicar, que la agricultura intensiva compite en Almería con otros sectores económicos como son el sector de la piedra (por ejemplo, mármol de Macael) y el turismo, aunque casi un 30% de la superficie total de la provincia de Almería se encuentra invernada.

MATERIAL

Las grandes posibilidades radiométricas del sensor TM, y sobre todo del ETM, así como su menor coste global han dirigido los trabajos relacionados con los recursos agrícolas hacia este sensor, por lo que ya se han realizado otros estudios de evaluación de superficies bajo plástico con resultados altamente significativos y ajustados a la realidad (*Moreira et all*, 1988).

Actualmente, una opción más costosa son las imágenes de alta resolución ofertadas por los satélites Quick-Bird e Ikonos, resultando de gran interés para abordar con absoluta precisión la superficie invernada. Sin embargo, estas imágenes salen relativamente económicas cuando se requiere abarcar pequeñas zonas (decenas de Km^2), tales como términos municipales, interesados en realizar una ordenación rural e incluso urbana del municipio.

Cuadro 1. Listado de imágenes de satélite de la provincia de Almería.

Campaña agrícola	Fecha adquisición	Zonas	Satélite
1984/1985	27 enero 1985	Este	Landsat V
	3 febrero 1985	Oeste	Landsat V
1993/1994	27 enero 1994	Oeste	Landsat V
	21 febrero 1994	Este	Landsat V
1994/1995	13 diciembre 1994	Este	Landsat V
	18 diciembre 1994	Oeste	Landsat V
1996/1997	20 febrero 1997	Oeste	Landsat V
1999/2000	9 noviembre 1999	Oeste	Landsat V
	18 noviembre 1999	Este	Landsat V
2000/2001	11 marzo 2001	Oeste	Landsat VII
2002/2003	1 marzo 2003	Oeste	Landsat VII
	10 marzo 2003	Este	Landsat VII
2003/2004	23 enero 2004	Oeste	Landsat V[1]

El análisis de la evolución de la superficie invernada en la provincia de Almería se remonta a la década de los años ochenta hasta la actualidad. Todas las imágenes fueron adquiridas en los meses de invierno garantizando así que los invernaderos estén en explotación en la campaña agrícola correspondiente, debido a que generalmente los agricultores deciden utilizar los meses de verano para realizar el cambio de cubierta. En el cuadro 1 se muestra información sobre las imágenes adquiridas de la provincia de Almería para realizar este estudio multi-temporal.

METODOLOGÍA

A partir de las imágenes de 1999 y 2001 se seleccionaron 50 puntos de control correspondientes a zonas invernadas repartidas por toda la provincia de Almería, principalmente de las Comarcas del Campo de Dalias (20 invernaderos), del Bajo Andarax (10 invernaderos), Campo de Nijar (10 invernaderos) y levante almeriense (10 invernaderos). La elección de estos puntos de control se realizó con los siguientes criterios:

1º) El 50% de los invernaderos seleccionados deben aparecer en las imágenes más antiguas, desde la campaña 84/85 hasta 96/97, para garantizar que se trate de invernaderos antiguos.

[1] En el verano de 2003 se produjeron problemas con el sensor ETM del satélite Landsat VII, por lo tuvimos que adquirir imágenes del satélite Landsat VII.

2º) El 50% restante son superficies invernadas que aparecen a partir de la campaña 99/00, para garantizar invernaderos nuevos.
3º) Seleccionar invernaderos que presenten respuestas espectrales lo más diferentes posibles.
4º) Todos los invernaderos seleccionados deben aparecer en las imágenes de las campañas agrícolas 02/03 y 03/04.

En el mes de marzo de 2004 se realizaron visitas de campo a esos invernaderos, para estudiar el tipo de cubierta que presentan, anotando aspectos tales como: tipo de cubierta (plástico o malla), estado (nuevo, viejo, sucio, limpio, en-calado), estado del cultivo (adulto, siembra, abandonado).

La selección de invernaderos cubiertos de malla fue más complicada de realizar a partir de las imágenes, por lo que se aprovecharon las visitas de campo para seleccionar invernaderos con cubierta de malla, para una posterior localización y estudio de su respuesta espectral en las distintas imágenes.

Transformación Tasseled Cap

La selección de invernaderos a partir de una imagen TM o ETM en color natural (infrarrojo próximo, visible rojo y visible verde) es relativamente difícil. Sin embargo, con ayuda de la transformación Tasseled Cap (ver figura 3 - inferior derecha) y con cierto conocimiento de la zona de estudio, se puede distinguir visualmente las diferentes tipologías de cubiertas de invernaderos. En los cuadros 2 y 3 se muestran los coeficientes aplicados a cada banda de las imágenes TM y ETM para obtener la transformación *Tasseled Cap*.

Cuadro 2. Coeficientes para obtener la transformación *Tasseled Cap* de una imagen Landsat V.

	Banda 1	**Banda 2**	**Banda 3**	**Banda 4**	**Banda 5**	**Banda 6**	**Banda 7**	**Constante**
Brillo	0.2909	0.2493	0.4806	0.5568	0.4438	0.0000	0.1706	10.3695
Verdor	-0.2728	-0.2174	-0.5508	0.7221	0.0733	0.0000	-0.1648	-0.7310
Humedad	0.1446	0.1761	0.3322	0.3396	-0.6210	0.0000	-0.4186	-3.3828

Cuadro 3. Coeficientes para obtener la transformación *Tasseled Cap* de una imagen Landsat VII.

	Banda 1	**Banda 2**	**Banda 3**	**Banda 4**	**Banda 5**	**Banda 6**
Brillo	0.3561	0.397	0.39	0.697	0.229	0.16
Verdor	-0.3344	-0.354	-0.456	0.697	-0.024	-0.263
Humedad	0.263	0.214	0.093	0.066	-0.763	-0.539

La transformación Tasseled Cap tiene un significado preciso, independiente de las condiciones de la escena, puesto que esta basado sobre las características de las bandas espectrales consideradas. Las tres nuevas componentes generadas por combinación lineal de las bandas originales son brillo, verdor y humedad. La componente brillo refleja los cambios en la reflectividad total de la escena, puesto que es generada como una suma ponderada de todas las bandas excepto la térmica, permitiendo resaltar más intensamente el brillo característico de la superficie invernada sobre el resto de superficies (ver figura 3 - superior izquierda). La componente verdor, refleja el contraste entre las bandas visibles y el infrarrojo próximo, sin resaltar ninguna característica de la cubierta de invernaderos (ver figura 3 - superior derecha). Finalmente, la componente humedad es significativamente importante puesto que resalta el contenido de humedad depositado en las superficies, como es el caso de las superficies invernadas que a primeras horas de la mañana se caracterizan por presentar un alto nivel de condensación de agua (ver figura 3 - inferior izquierda).

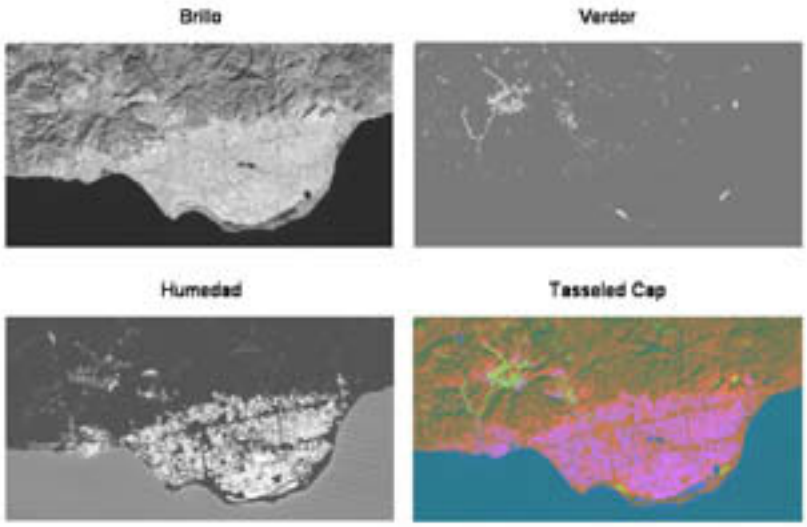


Figura 3. (Superior-izquierda) Componente de brillo, (superior-derecha) componente de verdor, y (inferior-izquierda) componente de humedad e (inferior-derecha) transformación Tasseled Cap de la imagen TM (Noviembre 1999).

Asignando los colores primarios rojo, verde y azul a los componentes de brillo, verdor y humedad respectivamente, se obtiene una composición coloreada de los tres componentes, que resulta muy expresiva (ver figura 4). Con tonos verdosos se distinguen las zonas con vegetación, y las zonas húmedas con colores azulados. Sin embargo, se ha de resaltar que las superficies invernadas aparecen en color rosa-azulado, donde el color rosáceo corresponde a superficies con alto nivel de brillo (por ejemplo, plástico o nieve), mientras que el color azulado corresponde a superficies con alto contenido de humedad, provocado por la condensación de agua en la cubierta del invernadero (ver anexo de figuras a color). La hora local de pasada

del satélite Landsat se estima entre las 9:30 y 10:00 de la mañana, coincidiendo con un alto nivel de condensación, producida generalmente por el rocío nocturno.

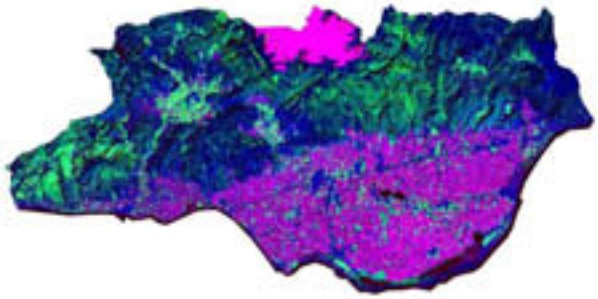


Figura 4. Imagen *Tasseled Cap* de la Comarca del Campo de Dalias de la imagen ETM (marzo 2003).

RESPUESTAS ESPECTRALES

En este territorio las condiciones de los cultivos bajo plástico son muy diferentes a las existentes en otras zonas, tales como en Huelva, donde predomina un sistema denominado tunelillo y/o sistema de acolchado para la planta en los primeros momentos de crecimiento. Este hecho explica el distinto comportamiento de la firma espectral del plástico en Huelva y Almería (ver figura 5 - derecha). Dado que los tunelillos dejan, entre túnel y túnel, suelo desnudo, la firma espectral del plástico se ve afectada por la respuesta del suelo, arena en su mayor parte, lo que hace aumentar los valores digitales del infrarrojo medio. Por otro lado, la utilización del plástico negro para acolchado bajo el tunelillo blanco disminuye los valores de respuesta en el espectro visible. Todos estos detalles inciden en que la firma espectral del tunelillo difiera del invernadero típico de Almería (ver figura 5 - izquierda).

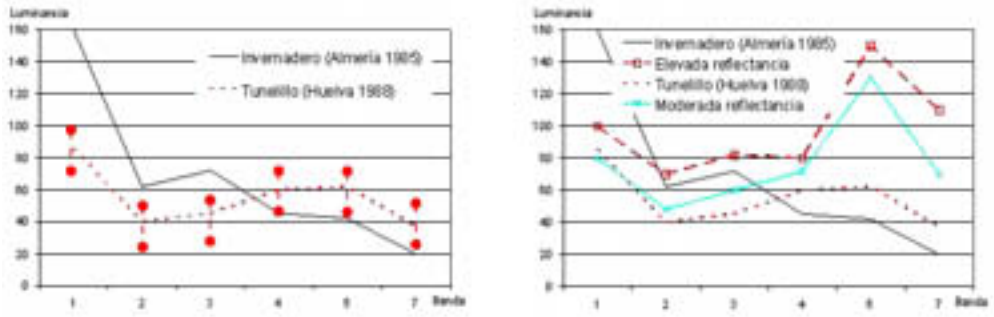


Figura 5. (Izquierda) Comparación de firmas espectrales para cultivos bajo plástico en tunelillo (Huelva), e invernaderos (Almería). (Derecha) Comparativa de las respuestas espectrales del invernadero típico de Almería y el tunelillo de Huelva con superficies de diferente nivel de reflectividad.

El 75% de los invernaderos seleccionados en la provincia de Almería presentaban una cubierta de plástico, entre los cuales detectamos un 45% tipo A y un 30% tipo B, mientras que el 25% restante poseía un cubierta de malla.

Cubierta de plástico

Entre los invernaderos con cubierta de plástico se detectaron dos respuestas espectrales claramente diferentes, a los que denominamos tipo A y tipo B. La respuesta espectral del invernadero tipo A se caracteriza por tener niveles digitales altos en el espectro visible, típico de superficies de aspecto claro, y niveles digitales bajos en el infrarrojo próximo y medio, típico de superficies húmedas. Por otro lado, la respuesta espectral del tipo B presenta altos niveles de reflectividad en todas las bandas, muy parecida a la respuesta espectral de la nieve (ver figura 6 - izquierda).

El 92% de los invernaderos tipo A corresponde a invernaderos con cubierta de plástico sucio o deteriorado. Mientras que el 89% de los invernaderos tipo B corresponde a invernaderos con plástico nuevo, limpio o encalado. Con relación al cultivo, el 86% de los invernados con cultivo adulto presentaba una respuesta espectral tipo A, mientras que el 93% de los invernaderos sin cultivo ofrecían una firma espectral del tipo B.

La diferenciabilidad de la superficie invernada de plástico del resto de superficies, es relativamente sencilla, puesto que las superficies con respuesta espectrales parecidas son: nieve, superficies calizas, y ciertas orillas de marismas. Sin embargo, este tipo de superficie son fácilmente localizables por su situación geográfica (ver figura 6 - derecha).

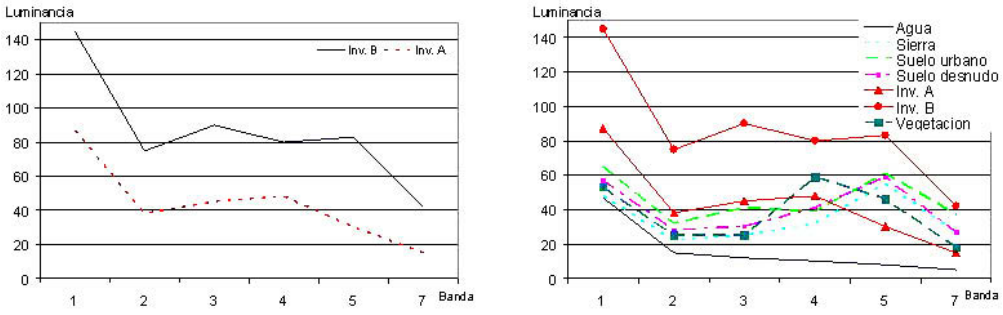


Figura 6. (Izquierda) Firmas espectrales promedios de las dos tipologías de cubiertas de invernaderos. (Derecha) Comparación de las firmas espectrales de invernaderos con cubierta de plástico con otro tipo de superficies (enero 2004).

Cubierta de malla

La respuesta espectral de las superficies invernadas con cubierta de malla es muy diferente a la presentada por un invernadero con cubierta de plástico, pero muy parecida a la que presentan las superficies de tierra desnuda, llegándose a confundir con parcelas desnudas (ver figura

7 - izquierda). Sin embargo, el estado de la malla influye considerablemente en la respuesta espectral, de tal forma que cuando la malla ofrece un aspecto nuevo y limpio, los niveles digitales del infrarrojo medio disminuyen, por lo que es ligeramente diferenciable de una superficie arenosa. En cambio, si la malla está sucia la firma espectral del invernadero de malla se aproxima mucho a la firma espectral del suelo desnudo (ver figura 7 - derecha).

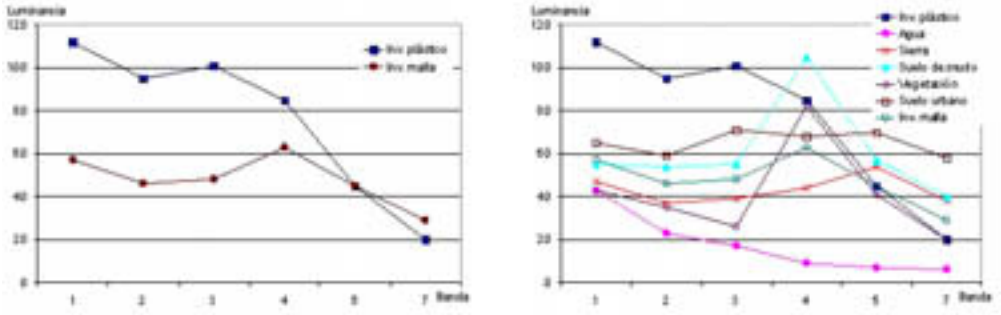


Figura 7. (Izquierda) Comparativa entre la respuesta espectral de invernadero de malla e invernadero de plástico. (Derecha) Comparación entre las firmas espectrales de invernaderos con cubierta de malla y el resto de superficies (marzo 2003).

Finalmente, para una correcta clasificación de la superficie invernada con cubierta de malla se requiere, a parte de la transformación *Tasseled Cap*, las imágenes pancromáticas de mayor resolución con las que se puede delimitar con mayor precisión el contorno y la tipología de superficie, lo que no elimina la necesidad de realizar visitas de campo para una correcta verificación.

EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE INVERNADA

El estudio de la evolución de la superficie invernada en la provincia de Almería se realizó a través de una clasificación mixta de cada una de las imágenes disponibles. A partir de las firmas espectrales de los distintos tipos de cubiertas de invernaderos obtenidas de forma supervisada, así como de otras superficies más significativas, también se seleccionaron otras firmas de forma no supervisada, tal que el programa utilizado (en nuestro caso ERDAS) redefina cada una de las firmas espectrales a partir de toda la imagen.

En el proceso de clasificación se probaron diferentes tipos de clasificadores, sin embargo, el clasificador de Mínima distancia sin reglas paramétricas fue el que mejores resultados obtuvo.

La evaluación de la clasificación se realizó visitando 375 puntos de control repartidos según un muestreo sistemático no alineado por diferentes cuadrículas UTM de 10 km^2 de área. Las visitas se realizaron acompañadas del GPS-45, para comprobar "*in situ*" el tipo de superficie existente. Tras la elaboración de la matriz de confusión se comprobó que la clasificación

mixta ofrecía un 91% de fiabilidad, obteniéndose un error de omisión del 1,97% y un error de comisión del 0,43% para las superficies invernadas.

En las figuras 8 y 9 se muestran los resultados de la superficie invernada estimada en la comarca del Campo de Dalias desde la campaña 1984/1985 hasta la campaña 2003/2004.

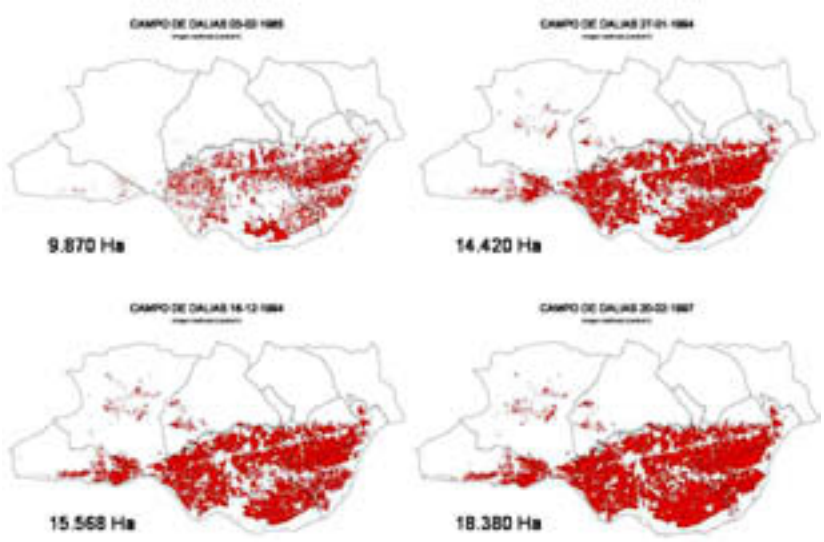


Figura 8. Estimación de la superficie invernada en la comarca del Campo de Dalias para las campañas 84/85 (superior izquierda), 93/94 (superior derecha), 94/95 (inferior izquierda) y 96/97 (inferior derecha).

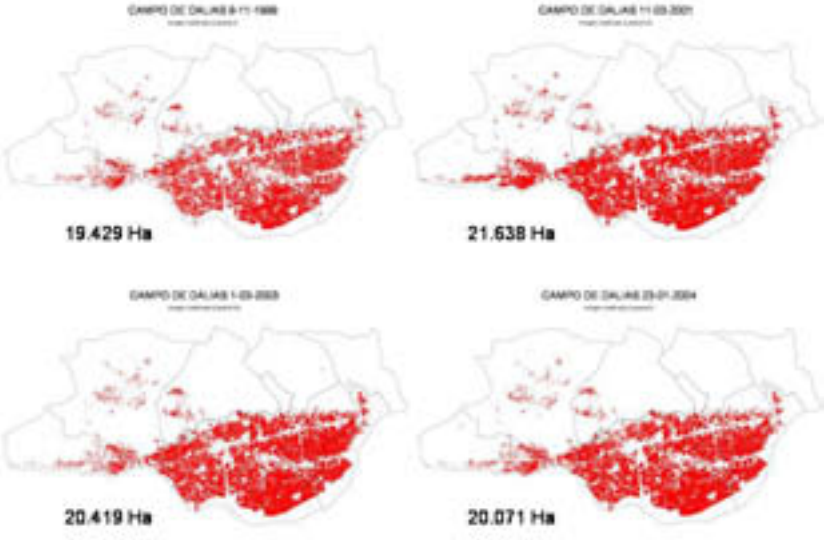


Figura 9. Estimación de la superficie invernada en la comarca del Campo de Dalias para las campañas 99/00 (superior izquierda), 00/01 (superior derecha), 02/03, (inferior izquierda) y 03/04 (inferior derecha).

Finalmente, a partir de la digitalización y georeferenciación de los contornos de cada uno de los términos municipales, se puede estimar la superficie invernada correspondiente a cada uno de los municipios. En la figura 10 se muestra un ejemplo de la superficie invernada asignada a los municipios de Adra, Berja, Dalias, El Ejido, La Mojonera, Vicar y Roquetas de Mar en la campaña 02/03.

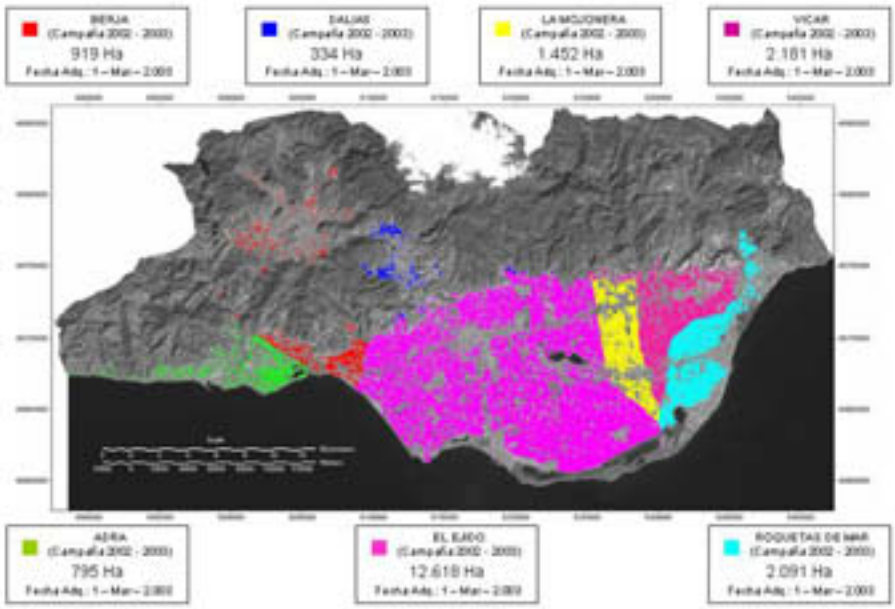


Figura 10. Asignación de la superficie invernada a cada uno de los términos municipales de la comarca del Campo de Dalias (marzo 2003).

CONCLUSIONES

La firma espectral de un invernadero típico de Almería es fácilmente diferenciable del resto de superficies cuando la cubierta es de plástico, caracterizándose por ser una superficie de alta reflectividad, por lo que presenta un elevado nivel de brillo y, generalmente, un alto nivel de humedad, producido principalmente por la evaporación a primeras horas del día, del rocío acumulado durante la noche sobre la superficie del plástico. Sin embargo, cuando la cubierta es de malla, la firma espectral se asemeja a la del suelo arenoso, por lo que su correcta discriminación es particularmente difícil.

La reciente comercialización de imágenes de alta resolución permitirá en un futuro próximo resolver el problema de la detección de superficies invernadas con cubierta de malla a un precio razonablemente económico.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría finalizar agradeciendo la actual política de la Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería (*http://www.fiapa.es*), que se remonta a la década de los 90, encaminada a potenciar el análisis de imágenes de satélite para teledetectar principalmente la superficie invernada en la provincia de Almería.

REFERENCIAS

Moreira, J.M., Lobato, A., Ramos, A. Otero, F. y Martínez, M.J. (1988): El tratamiento de imágenes TM como ayuda a la actualización de usos del territorio. *II Reunión Nacional del Grupo de Trabajo en Teledetección*. 290 -300 Valencia.

Pastorelli, M.R. (1989): *PEDITOR, un logiciel de Télédétction au scees*. Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques. Ministère de I'Agriculture et de la Forêt. Cahiers nº 3. París.

Sanjuan Estrada, J. F. (2001): *Análisis de la evolución de la superficie invernada en la provincia de Almería mediante teledetección de imágenes Thematic Mapper (TM) del satélite Landsat*. Edita: FIAPA. Almería.

Estimación a partir de imágenes Landsat de la superficie cultivada con cítricos en Santomera (Murcia)

J. C. González Rojas y J. A. Palazón Ferrando

INUAMA, Instituto Universitario del Agua y del Medioambiente, Universidad de Murcia, Edificio D, Campus de Espinardo, 30100 Murcia.

RESUMEN

El cultivo de cítricos en la Región de Murcia es de gran importancia económica; los inventarios agrícolas realizados por la metodología tradicional son costosos y de difícil actualización, sobre todo debido a la alta tasa de cambios de uso de secano a regadío. En busca de una alternativa se ha utilizado la teledetección para estimar la superficie cultivada con cítricos en Santomera como zona piloto de un estudio a nivel Regional.

Se ha contado con imágenes del satélite Landsat7 sensor ETM+ correspondientes al invierno y verano del año 2000. Inicialmente se enmascararon las superficies de agua correspondientes a balsas y embalses. Se realizó una clasificación no supervisada con el objetivo de determinar la capacidad de separación de las clases y un muestreo de campo para tener datos de la verdad terreno, con el fin de usar una parte como áreas de entrenamiento y otra para la validación de los resultados. Se elaboraron los índices de vegetación de diferencia normalizada para cada una de las fechas. A continuación, se procedió a realizar una clasificación supervisada basada en el método clasificador de máxima probabilidad, tomando las áreas de entrenamiento obtenidas en el muestreo de campo; las clasificaciones fueron multiespectrales y multitemporales. La validación de las clasificaciones se verificó con los datos obtenidos en el muestreo mediante una matriz de confusión y por medio de la aplicación del estadístico Kappa. Además, se comparon de los resultados con las cifras oficiales de las estadísticas agrarias.

Los resultados presentan la menor calidad con la clasificación de superficies cultivadas con cítricos en la imagen de la fecha de invierno, con un acierto del 79%, en contraposición a

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

la imagen de verano, que proporciona un acierto del 94%, mejorando hasta llegar al 96% en la combinación de imágenes de las dos fechas.

***Palabras Clave**: Teledetección, Landsat, clasificación, cítricos, Murcia.*

ABSTRACT

The cultivation of citruses in the Region of Murcia is very important for the economy; the agricultural inventories made by traditional methods are expensive an their actualization is difficult, because is too high rate of changes of use from unwatered to irrigate land. Searching for a new alternative it is utilized the remote sensing to estimate the area cultivated with citruses in Santomera as a pilot area of a studious in the Region.

It has disposed with images from satellite Landsat7 sensor ETM+ belongings to winter and summer of the year 2000. Initially were masquered the water surfaces of the ponds and impounds. It was realized a non supervised classification in order to find out exactly the capacity of separation of the classes. A pattern of cultivated ground to obtain data of the truth terrain, to be used one part as training fields and the other one for the validations of the results. It was elaborated the normalized difference vegetation index (NDVI) for each one ot the dates. At continuation was realized a supervised classification supported on the classify method of maximum likelyhood taking the training fields obtained from the pattern of cultivated ground; the classifications were multispectral and multitemporal. The validation of the classifications was verified by the data obtained in the pattern of cultivated ground by means of a matrix of confusion and by means of the application of the Kappa statistic. In adition of the comparison of the results with the official numbers of the agrarian statistics.

The results show minor quality on classification of cultivated areas with citruses on the image from the winter data with an approximation of 79%, in contraposition the image from summer provide an approximation of 94%, reaching to 96% combining the images of the two dates.

***Key Words**: Remote Sensing, Landsat, Classification, Citruses, Murcia.*

INTRODUCCIÓN

La superficie cultivada con cítricos en la Región de Murcia ha sufrido una gran expansión en los pasados años recientes *Porras* (2001), lo que ha llevado a que este cultivo sea considerado como de gran importancia económica en la Región. Los inventarios agrícolas realizados por el método tradicional son costosos y de difícil actualización, sobre todo por la alta tasa de cambios de uso, de secano a regadío, y ante el uso cada vez más frecuente y probado, de imágenes

de satélite como una herramienta útil en la discriminación de cultivos (*López*, 1998; *Gumiel et al*., 2001), se ha planteado como objetivo de este trabajo el uso de la teledetección como una alternativa fiable y de bajo coste, para estimar la superficie de cítricos en Santomera.

Se trata de un municipio situado en la Vega Media del Río Segura, al Este de la ciudad de Murcia, de la cual dista 13 kilómetros. Posee una extensión de 44,2 km^2; vive principalmente de la agricultura siendo la producción y exportación de cítricos su mayor fuente de ingresos, contando en el 2000 con 1.581 hectáreas dedicadas al cultivo de cítricos, que representan el 35,7% de su territorio (*CREM*, 2002).

MATERIAL Y MÉTODOS

Para el presente estudio se ha contado, como material de partida, con imágenes del satélite Landsat 7 sensor ETM+ correspondientes al 1 de marzo y 8 de agosto del año 2000, una imagen pancromática del satélite IRS-1 de junio del 2000 geométricamente corregida y ortofotos del SIG Oleícola captadas entre los años 1997-1998.

En una primera fase se procedió a la corrección geométrica de las imágenes Landsat 7 ETM+, seleccionando los puntos de control de la imagen pancromática del satélite IRS-1. Como función de transformación se eligió una polinomial de segundo grado, remuestreando los números digitales a su nueva posición corregida a partir del método del vecino más próximo, que no supone una alteración de los valores digitales de la imagen original (*Pinilla,* 1995); el error cuadrático medio derivado del ajuste polinómico fue inferior a un píxel. Posteriormente se reescalaron las imágenes a píxel de 25 metros. La imagen fue proyectada en el sistema de coordenadas UTM, zona 30.

A continuación sobre las imágenes se aplicó una máscara para extraer la zona perteneciente al municipio en estudio y también ocultar las superficies de agua correspondientes a balsas y embalses, con el fin de evitar la introducción de información no deseada; de igual manera se procedió con una cantera de grandes dimensiones existente en el área de estudio (Figura 1).

Seguidamente se realizó una clasificación no supervisada para cada una de las fechas, con el objetivo de determinar la capacidad de separación de las clases, en las que cada una agrupa a píxeles de comportamiento espectral homogéneo (*Chuvieco*, 2002), procediéndose a comparar visualmente estas categorías espectrales con la información de las ortofotos de la zona y determinar el grado de concordancia con el correspondiente uso del suelo.

Se elaboró el NDVI para la imagen de cada una de las fechas, por ser el más ampliamente usado en el análisis de imágenes de satélite, y ser un claro indicativo de la actividad fotosintética de la planta (*Bannari et al.*, 1995), permitiendo discriminar la vegetación con alta actividad fotosintética, sobre todo en la imagen de verano y compararla con la observada en las fotos aéreas del SIG Oleícola.

Paralelamente y con el fin de realizar una clasificación supervisada, se realizó un muestreo de campo, en el que se delimitaron las áreas de entrenamiento, las mismas que fueron digitalizadas sobre las ortofotos de la zona, asignándolas a las siguientes categorías: cítricos, pinar, urbano, natural, herbáceo, desnudo, teniendo presente que cada una sea representativa de la

Figura 1. Composición RGB de la zona de estudio. La mayor de las zonas enmascaradas (blanco) corresponde al embalse de Santomera.

categoría a la que pertenece y que el número, para cada clase sea, según el criterio de varios autores, entre 10 y 100 veces el número de categorías a discriminar (*Campbell*, 2002).

Posteriormente se procedió a realizar clasificaciones supervisadas, basadas en el método clasificador de máxima probabilidad (*Chuvieco*, 2002), se evaluaron para cada una de las fechas las clasificaciones multiespectrales, en las que se agruparon las seis bandas de las imágenes Landsat7 y a las que se añadió el NDVI de la fecha correspondiente.

La validación de los resultados de las clasificaciones se verificó mediante una matriz de confusión y del coeficiente estadístico Kappa (k) (*Congalton*, 1991), que establece la diferencia entre el acuerdo mapa-verdad terreno y el que supondría el azar, y en el que valores a partir de 0,75 indicarían buenos resultados de clasificación (*Monserud y Leamans*, 1992).

Todos los procesos fueron realizados en el entorno del programa informático GRASS (V.5.0.2), instalado en una plataforma Linux (Debian 3.0).

RESULTADOS

Los resultados obtenidos, siguiendo la metodología descrita para la clasificación supervisada de la imagen correspondiente al invierno, considerando las seis bandas más el índice de vegetación, dan como resultado la estimación de 1.268 hectáreas de cítricos en Santomera, para la imagen de verano 1.479 hectáreas y para la clasificación multitemporal 1.581 hectáreas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Resultados de la clasificación supervisada, expresados en hectáreas

Categoría	Descripción	Invierno	Verano	Invierno-Verano
1	Cítricos	1.268,4	1.479,4	1.581,7
2	Pinar	334,1	336,0	305,2
3	Urbano	642,5	948,7	987,0
4	Natural	839,8	717,1	781,5
5	Herbáceo	453,4	304,2	200,7
6	Desnudo	566,4	319,2	248,5
Total				4.104,6

En la matriz de confusión (Cuadro 2) correspondiente a la clasificación de la imagen de invierno, añadido el índice de vegetación, se aprecia el alto número de aciertos para la categoría cítricos, lo que determina según el índice Kappa (Cuadro 3) una fiabilidad del 79%. Cabe destacar el alto grado de confusión en la discriminación de la categoría "pinar" y el reducido número de aciertos para la categoría "desnudo".

Cuadro 2. Matriz de confusión para la clasificación de invierno.

		Verdad terreno					
Clasificación	**Categoría**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
	1	451	0	9	0	21	46
	2	16	311	10	200	53	26
	3	3	1	149	7	16	15
	4	1	1	46	208	12	16
	5	14	0	5	3	29	61
	6	11	0	13	3	3	8

Cuadro 3. Coeficiente Kappa para la categoría cítricos.

Clasificación	Coeficiente Kappa
Invierno	0,7995
Verano	0,9486
Invierno-Verano	0,9656

La matriz de confusión de la clasificación de la imagen de verano (Cuadro 4) muestra el aumento del número de observaciones correctas para la categoría cítricos en relación a la cla-

sificación de invierno, lo que supone de acuerdo con el índice Kappa (Cuadro 3) una fiabilidad de los resultados del 94%. También se aprecia la confusión de la categoría "desnudo" con la categoría "urbano".

Cuadro 4. Matriz de confusión para la clasificación de verano.

		Verdad terreno					
Clasificación	**Categoría**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
	1	509	0	11	0	7	0
	2	3	374	17	91	73	58
	3	3	1	145	1	14	27
	4	0	1	35	219	6	23
	5	69	0	17	0	14	12
	6	8	0	23	0	6	1

La clasificación conjunta de las imágenes de invierno y verano, más el índice de vegetación, presenta el mayor número de aciertos según la matriz de confusión (Cuadro 5), lo que se corrobora con el coeficiente Kappa (Cuadro 3).

Cuadro 5. Matriz de confusión para la clasificación invierno-verano.

		Verdad terreno					
Clasificación	**Categoría**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
	1	515	0	5	0	5	2
	2	4	376	33	152	21	30
	3	4	0	173	2	5	7
	4	1	0	49	230	2	2
	5	68	0	16	1	7	20
	6	5	0	16	0	2	15

En la figura 2 se presenta la cartografía correspondiente al resultado de la clasificación multitemporal más el índice de vegetación, que como se ha demostrado, con un porcentaje de fiabilidad del 96%, estima la superficie de cítricos en Santomera para el año 2000 en 1.581 hectáreas.

CONCLUSIONES

La clasificación de imágenes Landsat7 se considera un método adecuado para la discriminación y cartografía de cítricos a la escala requerida por el problema, a tenor de los valores del coeficiente estadístico Kappa obtenidos.

La utilización de imágenes de verano resulta ventajosa frente a las de invierno, pues eleva la calidad de los resultados, lo que, de hecho, corrobora el importante aumento del valor del coeficiente Kappa.

La utilización conjunta de imágenes de invierno y verano eleva la calidad de los resultados para todas las clases; sin embargo no proporciona un aumento sustancial de la fiabilidad en la discriminación de la categoría cítricos.

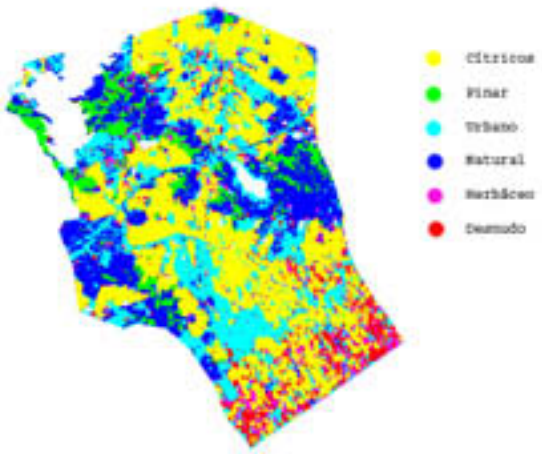


Figura 2. Clasificación multitemporal más el índice de vegetación.

REFERENCIAS

Bannari, A.; Morin, D.; Bonn, F. y Huete A. R. (1995): "A review of vegetation indices". *Remote Sensing Reviews*, Vol.13, pp. 95-120.

Campbell, K. (2002):"Remote Sensing". *Encyclopedia of Environmetrics*, Vol. 3, pp. 1744-1755.

Centro Regional de Estadística de Murcia (2002): *Anuario estadístico de la Región de Murcia .Tomo II Murcia*. Disponible en: http://www.carm.es/econet/publica/anuario/a02/tomoii/aeii.htm

Chuvieco, E. (2002): *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Editorial Ariel, Barcelona. 586 p.

Congalton, R. G. (1991): "A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 37, pp. 35-46.

Gumiel, J.C.; García, J.; Hornero, J.; Aragón, R.; Fabregat, V.; Fernández, A. y Moreno M. (2001): "Evaluación mediante teledetección de superficies agrícolas y estimación de demandas de agua en la Vega Media del Segura (Murcia)", *VII Simposio de Hidrogeología*, Murcia. Disponible en: http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/sim_hidro_Murcia/tomo%20XXIII/06.pdf

López, S. (1998): "El proyecto piloto del registro citrícola de España: una aplicación operacional de la teledetección en la agricultura", Ordenación del territorio y medio marino, *V Reunión científica de la Asociación Española de Teledetección, noviembre, 1993*, Las Palmas de Gran Canaria.

Monserud, R .A. y Leamans, R. (1992): "Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic". *Ecological Modelling*, Vol. 62, pp. 275-293.

Pinilla, C. (1995): *Elementos de teledetección*, Ra-ma, Madrid, 313p.

Porras, I.; García, M. y Pérez, F. (2001): "Citricultura en la Región de Murcia". *Agrícola Vergel*, Vol. 20, pp. 238-250.

Creación de metadatos para desarrollar un SIG aplicable a la agricultura cañera cubana

S. Segrera Francia, R. Marín Mazorra, A. Pérez Pérez, R. Villegas Delgado, Y. Viñas Quintero, L. Benítez Puig e I. Machado Contreras

Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Carretera CAI Manuel Martínez Prieto km 2 ½, CP 19390 Ciudad de la Habana, Cuba.

RESUMEN

La producción cubana de caña de azúcar está en notable evolución hacia la diversificación de su agricultura y su industria, constituyendo los Sistemas de Información Geográfica (SIG) una herramienta esencial en su análisis. En este trabajo se muestra la importancia de los metadatos en el diseño y desarrollo de un SIG, con cuya implementación se pretende contribuir al conocimiento y gestión de datos de la agricultura cañera cubana. Tras una descripción e información sistemática del contenido de la base de datos se alude a los programas disponibles, modelos o procedimientos (algoritmos) y formatos de funcionamiento. Es la primera vez en que se reporta el uso de metadatos para la aplicación de los SIG en el Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar. La creación de una base del metadatos ha sido aconsejable para establecer un control preciso en las bases de datos y algoritmos utilizados en su procesamiento. De hecho, el conocimiento de los datos y sus características, calidad, accesibilidad y la demostración de las capacidades analíticas de los SIG son de gran utilidad para usuarios y especialistas agrícolas. Finalmente se presentan ejemplos y métodos para la creación de la base de metadatos digitales en el estudio de la agricultura cañera.

***Palabras Clave**: Metadatos, SIG, caña de azúcar, agricultura, Cuba.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

Cuban sugarcane production is in noteworthy evolution toward the diversification of both its agriculture and its industry, where Geographical Information Systems (GIS) are playing a crucial role. Importance of the metadata base for either to design and to develop a GIS are given in the present paper, which has been made as a contribution for the knowledge and data mining of the Cuban sugarcane agriculture. Results show both description and systematic information of database content, available programs, models or procedures (algorithms) and, operation formats. This is the first time in which is reported the use of metadata for GIS implementation at the National Sugarcane Research Institute. Set up of a metadata base has been advisable to establish an accurate control on the databases and algorithms for its processing. Knowledge of data content and its characteristics, quality, accessibility and, demonstration of the GIS analytical capacities, are the main benefits for agricultural users and specialists. Both examples and methods for set up digital metadata base are presented for the sugarcane agriculture.

***Key Words**: Metadata, GIS, sugarcane, agriculture, Cuba.*

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en Cuba, entre otras aplicaciones, han sido empleados en el reordenamiento territorial de las áreas que hasta el año 2000 eran dedicadas al cultivo de la caña de azúcar en Cuba y, además, en la toma de decisiones agrícolas de este cultivo a través de análisis espaciales. El Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA) ha estado directamente vinculado a estas tareas.

El Ministerio del Azúcar (MINAZ) ha encargado a esta Institución el desarrollo de un Sistema Automatizado Geoespacial de Soporte a las Decisiones de Planificación (SAGSDP) de la caña de azúcar. Entre otras tareas, el equipo SIG deberá ordenar los datos que hasta el momento posee y continuar de cerca los trabajos que realizan la Oficina de Hidrografía y Geodesia de la República de Cuba, el Grupo Empresarial GEOCUBA y el Ministerio de la Informática y las Comunicaciones, que coordinan la implementación de la infraestructura de datos espaciales del país (IDE) para hacer compatible el SAGSDP.

Las aplicaciones de SIG que el INICA ha realizado requieren numerosos mapas digitales y bases de datos de atributos de distintas fuentes, naturaleza y características, que, para trabajos futuros, deberían estar organizados con el objetivo de efectuar un mejor uso de los recursos y mayor aprovechamiento del tiempo en la obtención de resultados superiores. Por esta razón, se ha comenzado un trabajo para la creación de los metadatos correspondientes a los datos de la agricultura cañera cubana empleados en los SIG realizados por el INICA.

Los metadatos se pueden definir como los datos sobre los datos, es decir son aquellas informaciones que definen las características de los datos (*Zabala et al.*, 2003). Un metadato encierra la identificación, calidad, organización, entidad y atributos, distribución y referencia de los datos, de modo que documenta claramente al dato en sí.

El uso de metadatos ayudaría a establecer pautas encaminadas a documentar la calidad, estructura y alcance de los datos espaciales del SIG, si bien, con la próxima implementación y aprobación de la infraestructura de datos de la República de Cuba, el dominio y entendimiento de los datos relacionados será fortalecida (*Delgado*, 2001; *Delgado y Alum*, 2002).

El empleo de estándares de metadatos (*FGDC*, 1998; *ISO*, 2003) y su armonización permite mejorar la comunicación entre vecinos, reducir el costo al compartir la información geográfica digital, aumenta la utilidad y estabilidad de productos de información y permite el uso de los datos espaciales por múltiples aplicaciones (*Nebert*, 2003).

El objetivo de este trabajo es mostrar la organización, que en este sentido ha logrado el INICA a partir del surgimiento de metabases, para contribuir a catalogar los datos, y, de esta forma, favorecer el desarrollo de aplicaciones SIG de las áreas cañeras en Cuba de manera rápida y ordenada.

MATERIALES Y MÉTODOS

En 1999 durante el desarrollo del Proyecto "Manejo Conservacionista y Sostenible del Cultivo de la Caña de Azúcar en Cuba" se recomendó sentar las bases para la creación de los metadatos, es decir, de una base que describiera y sistematizara información acerca del contenido de las bases de datos, los programas existentes, los modelos o procedimientos disponibles y los formatos de operación.

El SIG desarrollado por el INICA relaciona datos que han sido documentados a partir de distintas herramientas.

En un principio se empleó el sistema *Corpsmet95 - Geospatial Metadata File Generator*, que se basa en el contenido de los estándares de datos geoespaciales definidos por el FGDC, organismo de los Estados Unidos de América, que desarrolla la *National Spatial Data Infrastructure,* y también se utilizó el software SDI (Seguridad de Datos e Índices) (*Segrera y Senra*, 1994).

El INICA ha utilizado en la implementación del SIG como soporte *software ILWIS (The Integrated Land and Water Information System),* que, como todo sistema, posee características específicas en cuanto a formatos de almacenamiento, gestión de datos y metadatos.

En la actualidad se almacena y se realizan análisis espaciales, teniendo en cuenta bases de datos en formato DBF y Microsoft Access, relacionadas con el clima, suelo, aptitud de las tierras, estructura física de las Empresas Azucareras, servicios agrícolas científico-técnicos dirigidos a la aplicación adecuada de fertilizantes, ubicación correcta de variedades, control de malezas y medios biológicos fitosanitarios.

En la Figura 1 se muestra la interrelación entre la información que soporta el SIG y que a su vez forma parte de las distintas bases de datos empleadas para su generación.

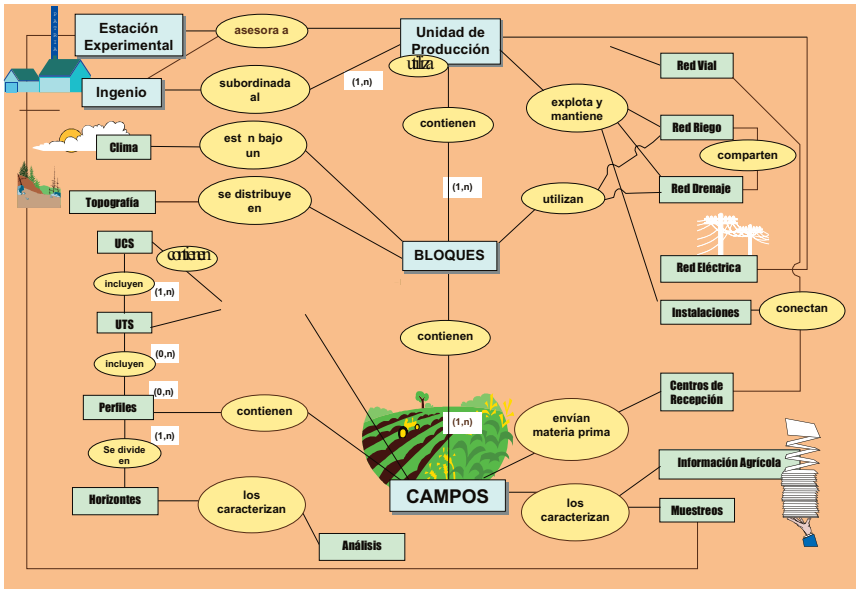


Figura 1. Diagrama de flujos de información derivado del Modelo Conceptual de Datos del SIG de *Ponce de León et al.* (1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las aplicaciones SIG que el INICA ha desarrollado, en una primera etapa, para apoyar el ordenamiento territorial de las áreas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar, vincularon a distintos tipos de mapas y atributos, que generaron análisis para determinar la aptitud física de las tierras para este cultivo (Figura 2 y 3).

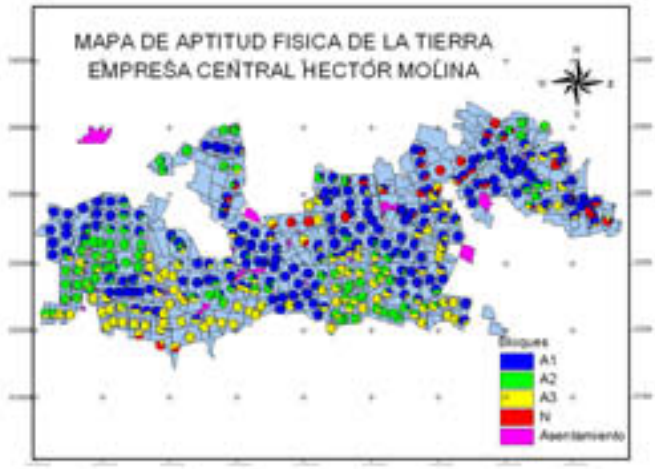


Figura 2. Mapa de aptitud física de las tierras para caña azúcar de la Empresa Azucarera Héctor Molina

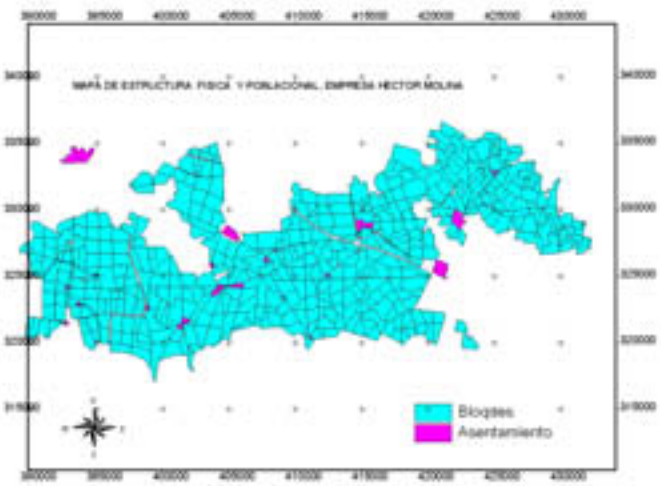


Figura 3. Mapa de la estructura física y poblacional de la Empresa Azucarera Héctor Molina

Durante la implementación y perfeccionamiento del SIG, que, sobre la agricultura cañera, desarrolla el INICA, ha sido posible lograr la documentación de las bases de datos correspondientes de forma parcial.

Los metadatos de una base cartográfica son extensos; es por ello que, hasta el momento, el INICA ha logrado establecer solamente metadatos de suelo y de la aptitud de las tierras relacionadas con el cultivo de la caña de azúcar.

Como se conoce, los metadatos se desglosan para dar una documentación más completa del dato (Figura 4).

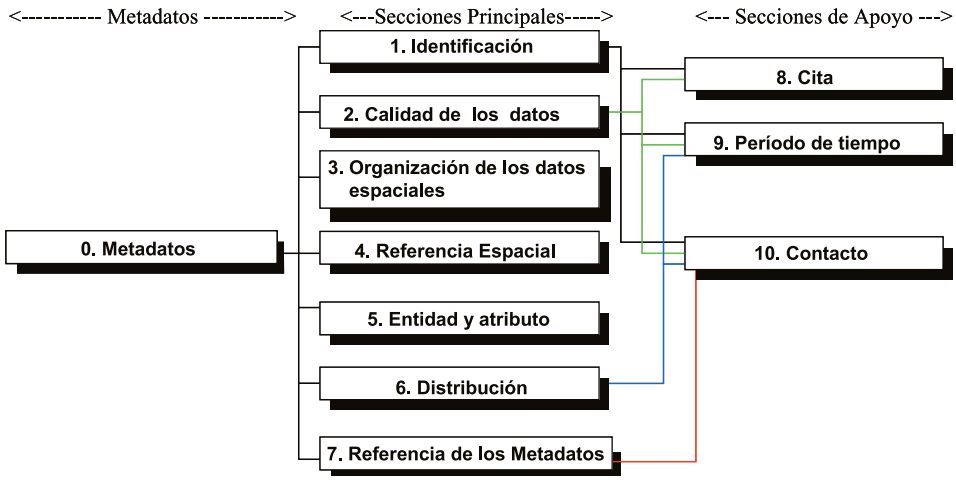


Figura 4. Contenido de los metadatos, tomado de *INEGI* (2003).

El uso de los dominios en ILWIS, para acotar y enmarcar la estructura de los datos, ha permitido que claramente se documenten la naturaleza de los datos; entre ellos, están los objetos llamados dominio y sistema de coordenadas, por sólo citar 2 ejemplos, que estructuran, establecen tipos, alcance y rangos de los datos. En la Figura 5 se muestra un objeto dominio del tipo clase, definido en ILWIS, que establece la clasificación de los tipos de suelos, crea identificadores reales de los subtipos correspondientes a dicha clasificación y, a su vez, se aplica a una columna de una tabla de atributos.

De igual forma, en ArcView se pueden obtener, de forma sencilla, resultados similares a través de la definición de estructuras y referencias de los datos, que forman parte de la base informativa.

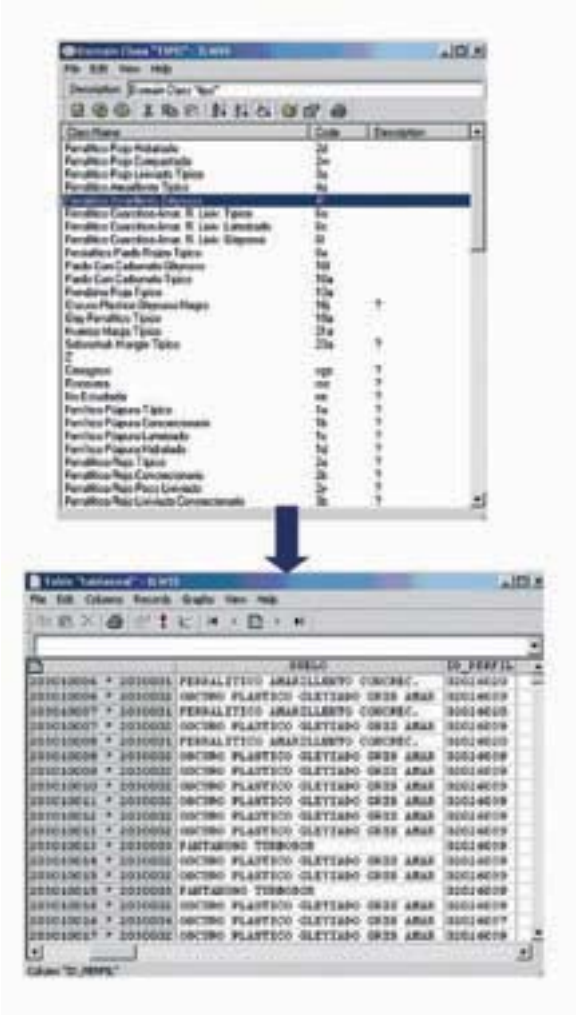


Figura 5. Ejemplo del dominio correspondiente al Tipo de Suelo en ILWIS.

Con la opción Creación de Diccionario de Datos de la herramienta SDI fue posible documentar ficheros de datos e índices, permitiéndole al usuario describir sus ficheros, campos e índices, para facilitar la comprensión de los mismos. Con la ayuda de SDI se recogieron argumentaciones sobre las diferentes columnas que componen la base de datos de atributos. Por ello, en un preincipio se empleó simplemente para la identificación de las columnas de las bases de datos (Figura 6). Más adelante se han realizado contactos con el Grupo Empresarial GEOCUBA para colaborar en la implementación de la IDE nacional (este trabajo continúa desarrollándose).

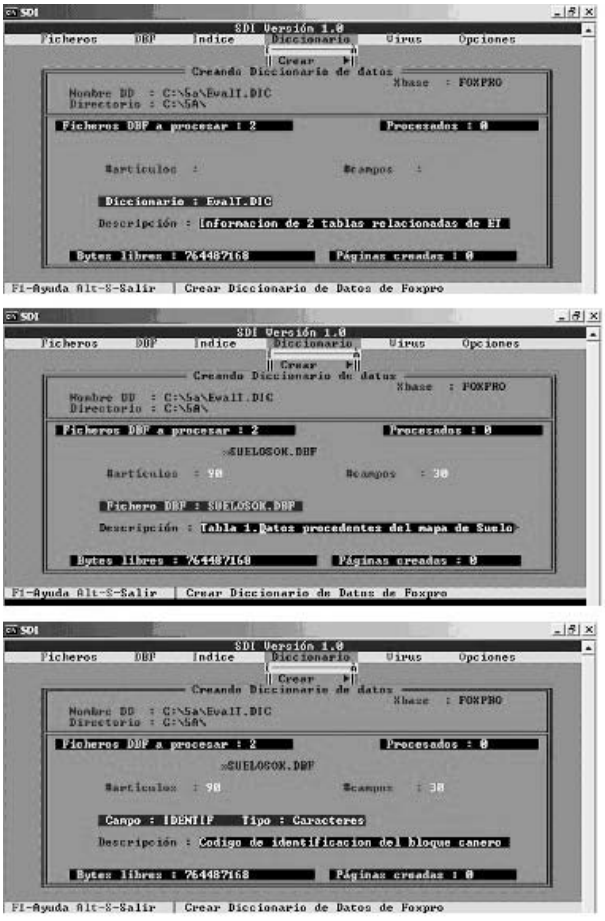


Figura 6. Contenido del archivo diccionario creado por SDI para la base de datos de aptitud de las tierras.

A través de *Corpmet95*, que emplea el estándar FGBC, se estandarizó el contenido (Figura 7) y se permite la exportación en formato HTM, lo cual en un futuro podrá emplearse de forma más amplia en la intranet que la Institución construye.

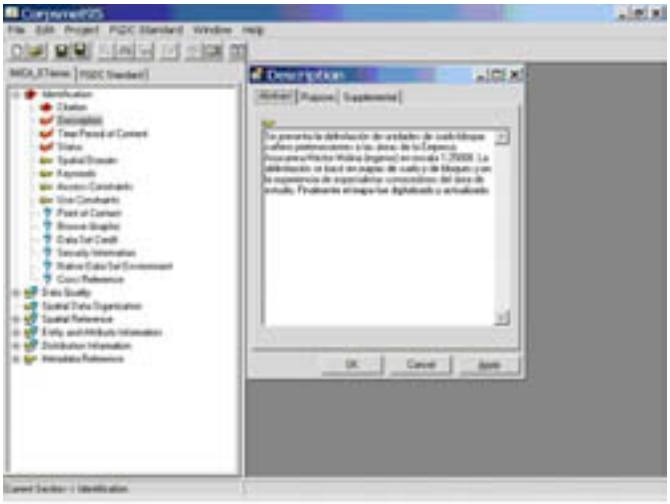


Figura 7. Proyecto de metadatos desarrollado a través de la herramienta *CorpMet95*.

Actualmente, se estudian editores o herramientas disponibles que soportan formatos compatibles para Microsoft Windows con los usados por el estándar FGDC, con el propósito de verificar la estructura sintáctica y no la precisión del contenido, ya que esto último deberá ser revisado por una o varias personas aptas (expertos) en la comprobación de la veracidad del dato.

En el caso de los metadatos de representación gráfica se ha decidido evitar su modificación para asegurar la consistencia entre datos y metadatos. El INICA forma parte del conjunto de instituciones que constituyen usuarios de GEOCUBA, que es la entidad cubana que brinda los servicios de adquisición y certificación del catastro especializado.

Se logró establecer metadatos para los datos correspondientes a la evaluación de la aptitud de las tierras realizada por el INICA, en la que se trabajó con una base cartográfica a escala 1: 25000, aplicada a la totalidad de los Complejos Agroazucareros Industriales (151), que, hasta el año 2002, poseía el Ministerio del Azúcar (MINAZ). Hoy se perfeccionan y se detallan aún más de acuerdo a nuevos requerimientos y especificidades del proceso de diversificación y reordenamiento dentro del Organismo.

En la etapa actual el INICA debe avanzar en las tareas de ordenamiento territorial, empleando un cúmulo mayor de datos de distintas fuentes y naturalezas (sociales, económicas, entre otras). Se hace necesario, una vez lograda cierta organización de estas bases de datos ,prestar atención al desarrollo de la IDE de Cuba, para garantizar la transformación de la documentación alcanzada y dar paso a la estandarización digital, facilitando con ello las acciones que la Institución realiza a través del uso de los SIG.

CONCLUSIONES

Los metadatos permiten describir la información existente para organizar el conocimiento

y así poder realizar un uso más efectivo del mismo en el entendimiento y desarrollo de distintas aplicaciones o análisis. De esta forma se informa a los usuarios sobre los detalles de un mapa y sus atributos asociados.

Se ayuda a la Institución a organizar sus datos y maximizar la inversión en ellos.

Las tareas de ordenamiento territorial de mayor envergadura contarán con información de base documentada; lo que hará más viable los análisis y procesos, derivados a través de SIG y de los metadatos hasta ahora generados.

Con la creación de metadatos, a partir de la información que incluye el SIG desarrollado por el INICA, favorece la integración a la IDE del territorio nacional.

REFERENCIAS

Delgado, T. (2001): "Iniciativa Cubana para la creación de una Infraestructura Nacional de Datos Espaciales: Marco institucional, Estudio de Factibilidad y Servicio de Catálogos", *Proceedings of 5th GSDI Conference*, May 21-25, 2001, Cartagena de Indias.

Delgado, T. y Alum, E.L. (2002): "Avances en la Infraestructura de Datos Espaciales de la República de Cuba", *III Congreso Internacional GEOMATICA 2002*,19-22 de febrero, 2002, La Habana.

FGDC – Federal Geographic Data Committee. (1998): *Content Standard for Digital Geospatial Metadata*. CSDGM Version 2: FGDC-STD-001-1998. Disponible en: *http://www.fgdc.gov/metadata/contstan.html*

INEGI – Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2003): *Metadatos Geoespaciales*. Disponible en: *http://antares.inegi.gob.mx/metadatos/metageo2.ppt.*

ISO – International Organization for Standardization. (2003): *Geographic Information Metadata*. ISO 19115:2003. Technical Committee 211, Disponible en: *http://www.iso.org*

Nebert, D. (2003): *Las Normas para la Información y los Servicios Geográficos. Estado de los estándares relacionados*. GSDI/FGDC. Disponible en: *www.fgdc.gov/ppt/StandardsPCIDEA0603es/ StandardsPCIDEA0603es.ppt*

Ponce de León, D.; Balmaseda, C.; González, J.; Segrera, S.; Villegas, R. y Espinosa, A. (1999): *Aplicación de un Sistema de Información Geográfica en el Manejo de Áreas Cañeras Estudio de Caso CAI "Patria o Muerte"*. Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar, 35 p.

Segrera, S. y Senra, Y. (1994): *Seguridad de Datos e Índices (SDI)*. Tesis de Grado en la Especialidad de Sistemas Automatizados de Dirección, Instituto Superior Politécnico José A. Echevarría, 1994, La Habana.38 p.

Zabala, A.; Masó, J. y Pons, X. (2003): "Metadatos para bases cartográficas digitales", *5ta. Setmana Geomàtica "Cartografía, Telemática y Navegación"*, 11-14 de febrero, 2003, Barcelona.

Cartografía de cultivos y áreas urbanas mediante técnicas de teledetección en los acuíferos terciarios de Torrevieja y Cabo Roig (Alicante)

J.C .Gumiel Gutiérrez[1] y J.E. Hornero Díaz[2]

(1) Departamento de Teledetección. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Calera nº 1 Tres Cantos 28760 (Madrid)
(2) Oficina de Proyectos de Murcia. Instituto Geológico y Minero de España (IGME) C7 Alfonso X nº 6 30008 Murcia

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio se ha centrado en el cálculo de superficies de regadío y áreas urbanas en el año 2000 para los acuíferos de Cabo Roig y Torrevieja (Alicante). Se han utilizado dos imágenes Landsat 7ETM+ de dos épocas diferentes (primavera y verano) para ese año. A partir de un coeficiente asignado en función del tipo de cubierta "vegetal" y las dotaciones de agua para cada tipo de cultivo se puede estimar el volumen de agua utilizada y, por consiguiente, el cálculo de la recarga por retorno de agua de riego, en el caso de cultivos de regadío, y el retorno por agua de lluvia en el caso urbano. Esta información es crítica para la simulación del funcionamiento de los acuíferos.

El método ha consistido en la realización de clasificaciones digitales de imágenes para la discriminación y cuantificación de las superficies de regadío. En el caso de las áreas urbanas, se ha realizado una cartografía mediante fotointerpretación de la imagen de agosto.

El área estudiada comprende 21619 Has de las cuales 15741 corresponden al acuífero de Torrevieja y 5878 Ha al de Cabo Roig. En el poco tiempo transcurrido entre la adquisición de las imágenes (5 meses), se pone de manifiesto un aumento de las áreas urbanas en detrimento de las zonas agrícolas y de vegetación natural. La superficie total cultivada estimada mediante clasificación supervisada en los acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig en el año 2000 es de 9760 Ha, lo que supone el 42% del total del área correspondiente a los dos acuíferos.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

Palabras Clave: *Clasificación digital, Imágenes Landsat, Modelización de acuíferos*

ABSTRACT

The aim of this study has been the calculation of irrigation surfaces and urban areas in the year 2000 for the Cabo Roig and Torrevieja (Alicante) aquifers. Two images Landsat 7ETM+ of two different periods have been used (spring and summer) for that year. From a coefficient assigned based on the type of "vegetable" cover type, and the endowments of water for each cultivation type can be considered the volume of utilized water and consequently the calculation of the recharge for return of irrigation water, in the case of cultivations and the return for rain water in the urban case. This information is critical for the simulation of the aquifers.

The method has consisted on the accomplishment of digital classifications of images for the discrimination and quantification of the surfaces of irrigation. In the case of the urban areas, a mapping by photointerpretation of the August image has been carried out.

The studied area covers 21619 of which 15741 correspond to the Torrevieja aquifer and 5878 to the Cabo Roig aquifer. The little time lapsed among the acquisition of the images (5 months) shows an increase of the urban areas in detriment of the agricultural zones and natural vegetation. The total cultivated surface estimated using supervised classification in the aquifers of Torrevieja and Cabo Roig in the year 2000 is of 9760 Has, what supposes 42% of the whole area corresponding to both aquifers.

Key Words: *Classifications, Landsat Images, simulation of the aquifers.*

INTRODUCCIÓN

El acuífero de Cabo Roig tiene una superficie de 61 km2 y está comprendido en la Unidad Hidrogeológica 07.31 "Campos de Cartagena". Los afloramientos permeables ocupan una extensión aproximada de unos 18 km^2.

El tramo acuífero principal está formado por niveles de areniscas y calcarenitas pliocenas, bastante homogéneas litológicamente, que afloran en el borde occidental del acuífero y que son equivalentes a los materiales que conforman el acuífero plioceno del Campo de Cartagena y del Terciario de Torrevieja. Por encima de las calcarenitas se sitúa estratigráficamente un nivel de margas blancas de la misma edad, de escasa extensión en la zona debido a que se encuentra erosionado. En la mayor parte del acuífero de Cabo Roig, sobre las calcarenitas hay depósitos de arenas y limos del Plio-Cuaternario y Cuaternario de permeabilidad moderada, que actúan como acuitardo. Los niveles margosos del Mioceno superior actúan como impermeable de base.

La potencia del acuífero plioceno de Cabo Roig varía entre los 10 y 90 m con una media de 70 m. Tales variaciones responden a fracturas y estructuras de plegamiento que han condicionado la sedimentación (ITGE, 1989). Los menores espesores se observan en el sector occidental del acuífero (15-20 m), y los mayores en el oriental (casi 100 m). En la zona de la Cañada de la Estaca se observa un importante surco, donde los espesores alcanzan los 80 m, con una cota

del muro impermeable que se sitúa entre –50 y –70 m s.n.m. Existe una extensa zona paralela a la costa donde el muro impermeable del acuífero se encuentra por debajo del nivel del mar, situándose la isohipsa de cota cero a una distancia de 3-4 km de la costa, justamente coincidente con la franja donde se concentran la mayor parte de los puntos de extracción.

La Unidad Hidrogeológica 07.48 "Terciario de Torrevieja" está compuesta por un solo acuífero de 167 km^2 de superficie, de los que unos 13 km^2 son afloramientos. El tramo acuífero principal está formado por el nivel de areniscas y calcarenitas pliocenas comprendido entre la aureola de afloramientos del Plioceno y Andaluciense y el mar. La potencia de este tramo varía entre los 30-40 m de la zona centro-septentrional a más de 100 en el área de San Miguel de Salinas. Por encima de las calcarenitas se sitúa estratigráficamente un nivel de margas blancas de la misma edad, de escasa extensión en la zona debido a que se encuentra erosionado. En la mayor parte del acuífero de Torrevieja, sobre las calcarenitas hay depósitos detríticos, de arenas y limos, fundamentalmente, del Plio-Cuaternario y Cuaternario de permeabilidad moderada que actúan como acuitardo. Los niveles margosos del Andaluciense actúan como impermeable de base.

La definición geométrica del acuífero quedó establecida en el estudio *IGME* (1990), basándose en varias campañas de prospección geofísica realizadas con anterioridad (*IGME*, 1988). Se ha observado que la importante actividad neotectónica es responsable de la existencia de diferentes bloques que delimitan zonas de surco y umbral. Las lagunas de La Mata y Torrevieja vienen a coincidir con grandes fosas entre las que se observa un umbral del sustrato impermeable que, recubierto por sedimentos cuaternarios de muy escasa potencia, llega a ser subaflorante. El máximo espesor de acuífero coincide aproximadamente con el área de Los Montesinos superando los 60 m, en el resto, el espesor oscila entre 20-30 m. La potencia de acuífero se va atenuando por cambio lateral de facies en dirección sureste y desaparece por erosión hacia el norte.

METODOLOGÍA

Con el fin de cuantificar la superficie correspondiente a los diferentes tipos de cultivo de regadío y áreas urbanas del año 2000 se ha considerado la utilización de imágenes Landsat 7 ETM+ registradas en dos periodos sucesivos: primavera y verano. El método consiste en la realización de clasificaciones digitales de imágenes para la discriminación y cuantificación de dichas superficies (*Gumiel et al* 2000 *y* 2001). En el caso de las áreas urbanas, se ha realizado una cartografía mediante fotointerpretación de la imagen de agosto. La cartografía de las áreas regadas y urbanas se ha realizado a partir de los datos vectoriales y raster mediante un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.).

Base de datos S.I.G.

Se ha establecido una base digital de datos, que incluye las hojas topográficas del Instituto Geográfico Nacional a escala 1:25.000, incluyendo límites provinciales, términos municipales, comunicaciones, red hidrográfica y núcleos de población. Asimismo, se han incorporado los límites correspondientes a los acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig.

Como datos raster se han incorporado 2 imágenes Landsat 7 ETM+ de Marzo y Agosto del año 2000 y la fotografía aérea de 1998 facilitada por la Diputación de Alicante.

Tratamiento e interpretación de imágenes de satélite

Se han elegido dos imágenes Landsat 7 ETM+ (primavera y verano) que resultan complementarias para la discriminación de cultivos permanentes y temporales. La banda pancromática (P) que proporciona este sensor (15 m de resolución espacial), va permitir diferenciar parcelas que con los datos anteriores de la serie Landsat 5 TM no era posible.

En primer lugar se ha realizado la corrección geométrica de las imágenes. Para ello, se han tomado puntos de control de la imagen pancromática (15 m) a partir de la base cartográfica a escala 1:25000. El error cuadrático medio (RMS) obtenido ha sido menor de 15 m. Posteriormente se han corregido el resto de las bandas a partir de la corregida, obteniéndose un RMS inferior a 30 m. La imagen de verano, se corrigió a partir de la de primavera, obteniéndose RMS similares.

Con el fin de minimizar los efectos atmosféricos de las imágenes, se ha realizado una normalización radiométrica relativa de las dos escenas. Para ello se ha obtenido una función de correlación a partir de los valores de reflectividad aparentes de distintas superficies que son constantes en las dos fechas (píxeles claros y oscuros), (*Caselles y López,* 1989).

Realizadas las correspondientes correcciones en las imágenes, se han hecho combinaciones de bandas, índices de vegetación y cocientes ente bandas con el fin de enfatizar la respuesta de la vegetación con respecto al suelo.

Con el fin de aprovechar la mayor resolución espacial de la banda pancromática (15 m), se ha realizado una fusión entre las bandas 3, 4 y 5 con la banda 8 (P) mediante el método IHS, obteniéndose como resultado una imagen que integra las ventajas de los datos multiespectrales y la resolución espacial de 15 m de la banda pancromática.

Se ha utilizado la combinación 4, 5,3 (R, V, A) (*Figura 1. A y B*), que de forma general va permitir diferenciar las áreas agrícolas de las no agrícolas.

Figura 1. A: Imagen ETM+ 453 Marzo 2000. B: Imagen ETM+ 453 Agosto 2000

También se ha realizado el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de ambas fechas para obtener una mascara de áreas con vegetación. Se han superpuesto los dos índices de vegetación con el fin de obtener el máximo de recubrimiento en primavera y verano Esta máscara ha permitido discriminar áreas con vegetación, de áreas sin vegetación la primera se ha utilizado para realizar la clasificación digital, y la segunda se ha empleado en la fotointerpretación de zonas urbanas.

Fotointerpretación de los Usos del Suelo

Con el fin de obtener una cartografía de áreas urbanas, se ha realizado la fotointerpretación de los usos del suelo de las dos imágenes. Para ello se ha utilizado la mascara de los índices de vegetación y la combinación de bandas 4, 5,3 (R, V, A).

Se han diferenciado 16 usos del suelo que representan los distintos tipos de cubiertas más característicos de la zona para cada una de las fechas (Urbano puro, Urbanizaciones, Áreas recreativas (campos de Golf), Zonas en desarrollo, Coníferas, Matorral poco denso, Matorral denso, Matorral arbolado, Pastizal, Áreas sin vegetación, Humedales, Lagunas, Salinas, Playas y Balsas. De este modo se ha diferenciado una cubierta de uso agrícola, sobre la que se ha realizado la clasificación digital, del resto de cubiertas no agrícolas.

En el caso de las zonas de urbano, se han diferenciado 4 clases en función de sus características:

- **Urbano puro**: corresponde generalmente a áreas urbanas sobre asfalto, donde apenas suele haber recarga (Figura 2 a).

Figura 2. a: Urbano puro. b: Urbanizaciones, áreas con jardines. c: áreas recreativas (campos de golf). d: desarrollo urbano (blanco).

- **Urbanizaciones**: áreas urbanizadas con jardines donde la recarga puede ser importante (Figura 2. b).
- **Áreas recreativas**: corresponden a campos de golf, donde la recarga es importante (Figura 2. c).
- **Zonas en desarrollo urbano**: zonas urbanas que están construyéndose en el momento de la adquisición de la imagen, no suelen tener asfalto y por tanto pueden tener algo de recarga (Figura 2. d).

Mediante fotointerpretación de las imágenes, se ha realizado un mapa de usos del suelo en las dos fechas (Figura 3: A y B), a partir de los cuales se ha generado un mapa de cambios, donde se ha puesto especial énfasis a los referentes al desarrollo urbano. Dada la escasa diferencia en el tiempo de las imágenes (5 meses), los mayores cambios corresponden a usos que han cambiado a zonas en que se encuentran en el momento de la toma de la imagen en desarrollo urbano, donde el 90 % de los casos corresponden a la nueva autovía, y el 10 % restante a la construcción de nuevas urbanizaciones y nuevas zonas industriales y comerciales.

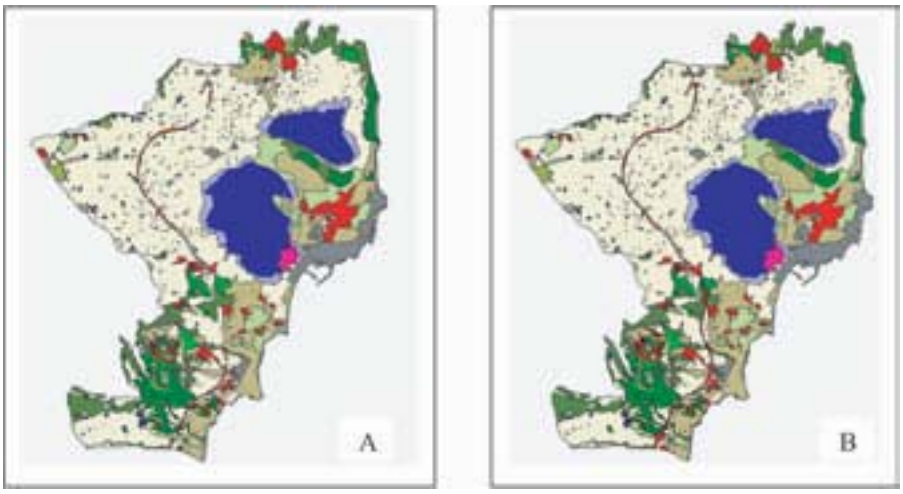


Figura 3. Mapas de uso del suelo realizados mediante la fotointerpretación de las imágenes Landsat 7 ETM +, A: en marzo y B: agosto del año 2000.

Clasificación digital de áreas agrícolas

Se ha realizado la clasificación digital supervisada en los acuíferos mediante la toma de muestras de control (training áreas) de los distintos tipos de cultivos. Para ello se han llevado a cabo dos campañas de campo: una primera donde se han tomado parcelas de cada uno de los cultivos existentes en ambas fechas como entrenamiento de la clasificación supervisada y una segunda para obtener la verdad terreno y contrastarla con los resultados de la clasificación.

Con el fin de separar al máximo la información espectral de las imágenes, se han diferenciado 15 clases espectrales (Tabla 1): tres categorías para los cítricos: cítricos 1, con cubiertas superiores al 70%, cítricos 2**,** entre 40% y 70% y cítricos 3, menores del 40%, distintas cate-

gorías de cultivos de huerta, palmeral de vivero, cultivos bajo plástico e invernaderos y leñosos de secano (almendro y olivo).

Cuadro 1. Clases espectrales y usos agrícolas aplicados en la clasificación digital.

Clase	Nombre	Uso
1	Cítricos1	Cítricos con facción cabida cubierta > 70%
2	Cítricos2	Cítricos con facción cabida cubierta entre el 40% y 70%
3	Cítricos3	Cítricos con facción cabida cubierta < 40% y mayor del 10%
4	Barbecho	Zonas sin cultivar durante todo este año
5	Huerta1	Cultivos herbáceos (patatas, brócoli etc.) cultivados en Marzo 2000
6	Invernadero	Cultivos en invernadero ó bajo plástico
7	Huerta2	Algo de plástico
8	Huerta3	Cultivos herbáceos (patatas, brócoli etc.) cultivados en Agosto 2000
9	Palmeral	Viveros en la gran mayoría de palmeras
10	Transformación	Árboles pequeños con una fracción de cabida cubierta < del 10 %
11	Erial1	Zonas abandonadas con vegetación natural
12	Erial2	Zonas abandonadas sin vegetación
13	Almendros	Leñosos de secano principalmente almendros y olivos
14	Forrajeros	Cultivos de forraje (alfalfa)
15	Huerta4	Cultivos herbáceos (patatas, brócoli etc.) que aparecen cultivos en ambas fechas

Los cultivos de huerta se han dividido en cuatro clases espectrales: campos de cultivos de huerta, con máximo desarrollo fenológico en la imagen de verano y preparados para la siembra en la imagen de primavera, los que tienen su máximo desarrollo en primavera y permanecen en blanco durante el verano, cultivos con desarrollo en ambas fechas y campos que se encuentran en blanco durante todo el año y cuya información espectral es muy similar a zonas sin vegetación. Además, se ha definido una clase denominada transformación, que corresponde a zonas con árboles recién plantados con fracción de cabida cubierta <10%.

Resultados

Después de la fase de asignación de cada una de las clases, se ha realizado una clasificación supervisada. Esta ha sido contrastada con diferentes puntos de verificación en el campo. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios obteniéndose un porcentaje de fiabilidad del 80% para un nivel de confianza del 95%. Los cultivos de cítricos en general, se discriminan bien en ambas fechas del resto de las clases, en algún caso se mezcla con algún palmeral. En el caso de los cultivos de huerta que presentan su máximo desarrollo fenológico en primavera, su respuesta espectral es muy similar al de áreas abandonadas con vegetación natural en primavera.

Los cultivos que se encuentran plantados en verano no presentan ningún tipo de mezcla espectral con otra clase, lo que permite discriminarlos bien del resto. Los campos en transformación presentan una respuesta espectral similar a zonas abandonadas sin vegetación y en algunos casos se suele mezclar con campos de almendros y olivos.

Se ha aplicado un filtro de mayoría a la clasificación obtenida, con el fin de suavizar la excesiva fragmentación de clases. Este filtro conserva el valor entero de los ND asignados a cada categoría de la leyenda *(Pinilla et. al).*

En el mapa resultante (Figura 6) se presentan los usos del suelo en agosto de 2000 y los resultados de la clasificación supervisada de las dos imágenes.

El total del área estudiada es de 21619 ha de las cuales 15741 ha corresponden al acuífero de Torrevieja y 5878 ha a Cabo Roig. El total de **uso urbano** estimado es de 4146 ha de las cuales 2426 ha corresponden al acuífero de Torrevieja y 1720 ha al acuífero de Cabo Roig. El gráfico de la Figura 4 muestra la distribución de los diferentes de usos del suelo en tanto por ciento. Como se puede observar en la Tabla 6, en cinco meses de diferencia (marzo y agosto) el desarrollo urbano a aumentado en 15,53 ha en el acuífero de Torrevieja y 76,28 ha en el acuífero de Cabo Roig en detrimento de otros tipos usos del suelo. Es destacable la perdida de 36 ha de zonas regables y 39 ha de zonas naturales en Cabo Roig. Esta perdida es debida básicamente a la construcción de la autovía.

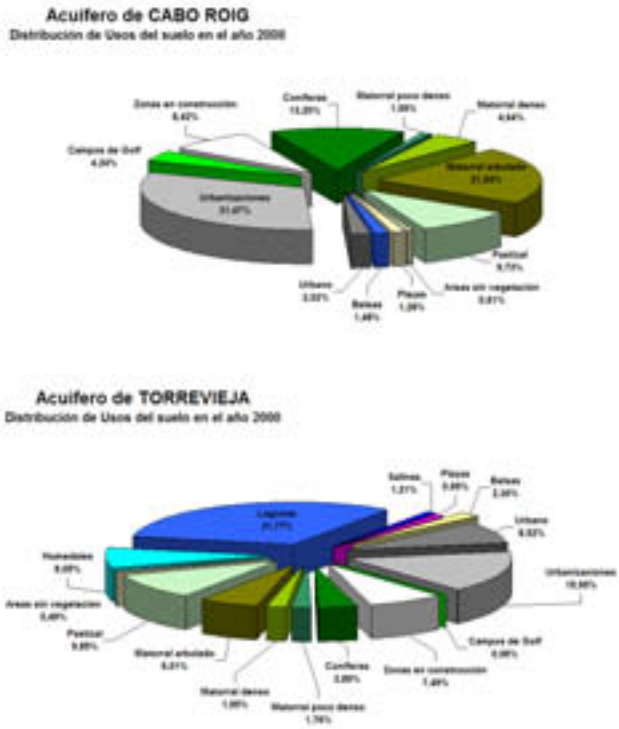


Figura 4. Distribución de los usos del suelo en los acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig en el año 2000.

Los resultados obtenidos mediante la clasificación supervisada de las zonas regables, se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Resultados de las superficies de cultivos obtenidos de la clasificación supervisada en los acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig en el año 2000.

Clase	Cultivo	Acuífero de Torrevieja (Ha)	%	Acuífero de Cabo Roig (Ha)	%	Área Total (Ha)	%
0	Zonas no regables *	8350,86	53,05	4192,00	71,31	12542,87	58,02
1	Leñosos de regadío (Cítricos)	3484,90	22,14	590,42	10,04	4075,32	18,85
4	Herbáceos (Hortícola y Forrajeros)	2454,75	15,59	813,85	13,85	3268,60	15,12
6	Invernadero	46,91	0,30	39,33	0,67	86,24	0,40
9	Palmeral	29,97	0,19	0,00	0,00	29,97	0,14
10	Transformación	102,51	0,65	48,04	0,82	150,55	0,70
11	Improductivo	495,14	3,15	104,97	1,79	600,11	2,78
13	Leñosos de secano (Almendros y Olivos)	14,04	0,09	1,71	0,03	15,75	0,07
20	Áreas sin clasificar	762,48	4,84	87,95	1,50	850,43	3,93
Total		**15741,57**	**100,00**	**5878,28**	**100,00**	**21619,84**	**100,00**

Es de destacar que más de la mitad de la superficie de los acuíferos (53% y 71%) no está cultivada y corresponde, en buena parte, a zonas urbanas que siguen experimentando una expansión urbanística importante.

En el caso del acuífero de Torrevieja, la mayor parte de la superficie cultivada corresponde a cítricos con 3484 ha los que supone el 47 % del área regable (Figura 5). Los cultivos de huerta (hortalizas de hoja y tubérculos especialmente) presentan una superficie de 2456 ha (33% de la superficie cultivable). El resto de cultivos corresponden a 1451 ha lo que supone el 9,32% de la superficie regable. De estos cultivos cabe destacar las zonas correspondientes a improductivo que corresponden a eriales y campos abandonados que suponen el 6,7%. Este tipo de campos en muchos casos suelen ser campos preparados para urbanizar. Hay 762 ha (10,32%) que corresponden a zonas donde el clasificador de máxima probabilidad no ha podido clasificarlas con las áreas de entrenamiento que se ha introducido.

En el caso de Cabo Roig (Figura 5) hay mayor numero de hectáreas correspondientes a zonas naturales (pinares etc.) y zonas urbanizadas (4192 ha, el 71 % del total del acuífero) el 39 % restante corresponde a zonas cultivables donde, los herbáceos son los cultivos mayoritarios, ocupan una superficie de 813,85 ha el 48 % de las zonas cultivables. En el caso de los cítricos hay 590 ha correspondientes al 35 % de áreas regables. El resto de cultivos suman un total de

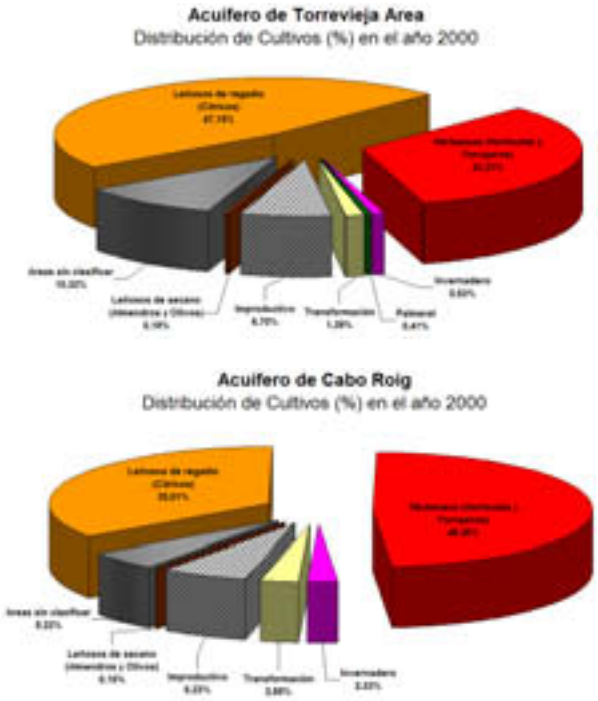


Figura 5. Distribución de cultivos en el acuífero de Torrevieja y Cabo Roig en el año 2000.

282 ha que supone el 16 % restante de áreas cultivables. En esta zona hay un 6,23 % de zonas improductivas debidas al abandono de campos agrícolas y desarrollo urbano.

CONCLUSIONES

El **estudio multitemporal** mediante imágenes de satélite ha resultado ser un método eficaz para determinar la distribución de cultivos en los acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig.

Los cultivos leñosos de hoja perenne (cítricos) se han podido diferenciar en las imágenes en tres categorías según el porcentaje de fracción cabida cubierta (FCC).

La discriminación entre los diversos cultivos de huerta no ha sido posible aunque, a efectos de estimar volúmenes de agua aplicados, no debe suponer una merma significativa de los resultados obtenidos.

La superficie total cultivada estimada mediante clasificación supervisada en los acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig en el año 2000 es de 9760 ha, lo que supone el 42% del total del área correspondiente a los dos acuíferos. La mayor parte de la superficie cultivada corresponde a cultivos leñosos de regadío de hoja perenne (cítricos) y supone 4075 ha, el 49 % de la superficie cultivada.

El 58 % de la superficie de los acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig no esta cultivada y

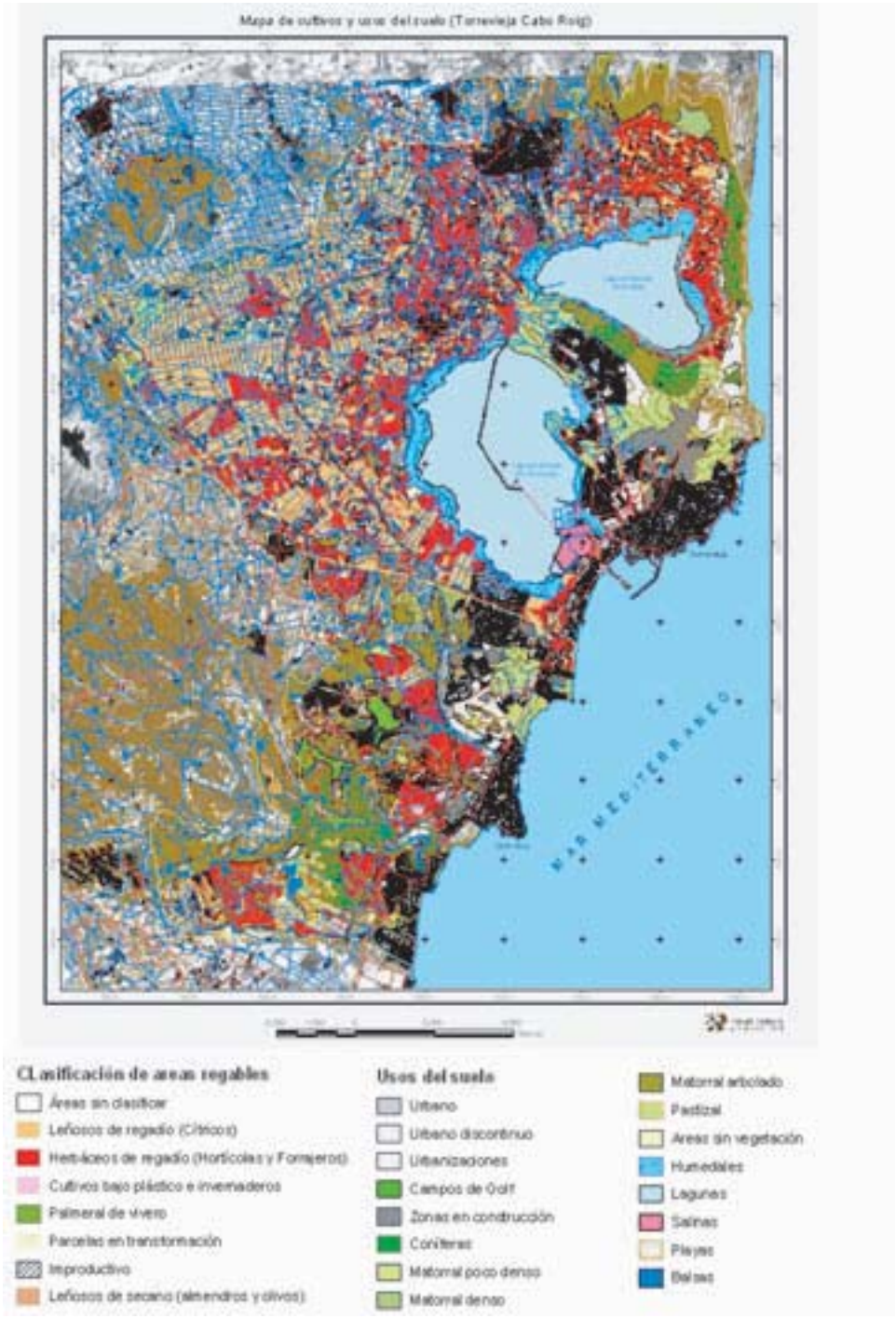


Figura 6. Mapa de usos del suelo y clasificación digital de áreas regables en los acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig en el año 2000.

corresponde en su mayor parte a zonas urbanas, áreas forestales y campos de cultivo que han sido abandonados durante los últimos años debido a la expansión urbanística de esta zona turística.

Mediante fotointerpretación de las dos imágenes de fechas distintas (primavera y verano del año 2000), se han podido diferenciar los distintos usos de suelos no agrícolas. A lo largo del poco tiempo entre la adquisición de las imágenes (5 meses), se pone de manifiesto un aumento de áreas urbanas en detrimento de zonas agrícolas y de vegetación natural. Este aumento es mayor en la zona de Cabo Roig debido a la construcción de la autovía durante estas fechas.

REFERENCIAS

Caselles, V. y López, M.J.(1989): "An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies". *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1127-1134.

Gumiel, J.C., Fabregat, V., Antón-Pacheco, C., Ramos, G. y Sánchez, E. (1999): "Clasificación de imágenes Landsat TM para la estimación de superficies de regadío en la Vega Baja y Campo de Elche. Unidad Hidrogeológica 07.24 (Alicante)". *Teledetección. Avances y Aplicaciones (Asociación Española de Teledetección)*, 135-138 (ISBN: 84-89659-62-1).

Gumiel, J.C., Fabregat, V., Antón-Pacheco, C., Ramos, G. y Sánchez, E. (2000): "Clasificación de imágenes Landsat TM para la estimación de superficies de regadío en la Vega Baja y Campo de Elche. Unidad Hidrogeológica 07.24 (Alicante)". *Revista de Teledetección*, Numero Especial Dic-1999 (publicada en dic-2000), 43-48 (ISNN 1133-0953).

Gumiel, J.C., García-Aróstegui, J.L., Hornero, J., Aragón, R., Fabregat, V., Fernández, A.I. y Moreno, M.T. (2001): "Evaluación mediante teledetección de superficies agricolas y estimación de demandas de agua en la Vega Media del Segura (Murcia)". *VII Simposio de Hidrogeología* (Murcia).

Pinilla, C. (1995): *Elementos de Teledetección*. Editorial Rama. 311 p.

Gestión de recursos pascícolas en la Región de Murcia: delimitación de distritos ganaderos en el término de Totana

M. Erena [1], P. García [1], A. Robledo [2], M. Vicente [3], F. Alcaraz [4] y E. Correal [1]

(1) Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario. C/ Mayor, s/n, 30150 La Alberca, Murcia.
(2) Consultor Ambiental. La Alberca, Murcia.
(3) SIGA. D. G. Medio Natural. Murcia.
(4) Departamento de Biología Vegetal, Facultad de Biología, Universidad de Murcia.

RESUMEN

A partir de la cartografía de recursos pastables de la Región de Murcia, realizada en el ámbito del proyecto SEEP-INIA sobre "Tipificación, Cartografía y Evaluación de los Pastos Españoles", se ha realizado un estudio de detalle del término de Totana. A partir de las unidades cartografiadas se han obtenido mapas mensuales de la energía aportada por las diferentes unidades y su equivalente en carga ovina que pueden sustentar mensualmente. Como la biomasa aportada por las diferentes unidades varía con los meses del año y piso bioclimático en que se encuentran, se han estimado calendarios productivos mensuales para los principales recursos pastables (forestales y agrícolas). El objetivo final de esta cartografía es planificar el pastoreo de los recursos, de forma que pueda mantenerse una ganadería extensiva en equilibrio con los recursos disponibles, así como delimitar áreas de exclusión de pastoreo en zonas de alto interés biológico o elevado riesgo de desertificación. Dada la complejidad del problema suscitado, se presenta un primer intento de ordenación y utilización racional de recursos pastables en el término de Totana mediante un S.I.G., delimitando distritos ganaderos (superficies de pastoreo) en zonas agrícolas y forestales de gran diversidad.

***Palabras Clave**: Sistemas de Información Geográfica, pastos forestales, pastos agrícolas, gestión de recursos, cargas ganaderas sustentables, distritos ganaderos.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

On the basis of a preliminary cartography of pasture resources of the Murcia region made in the context of a national SEEP-INIA project "Characterisation, cartography and evaluation of Spanish pastures", a more detailed study has been made for the municipality of Totana. For each of the mapped units, the mean energy available per year was calculated, and from it, the mean stocking rate it could sustain during an average climatic year. Because the biomass produced by the different mapped units varies along the year and with the altitud they are located (bioclimatic stage), monthly forage calendars were calculated for the main pastoral resources (forest-rangeland units, irrigated agriculture units and dryland agriculture units). The final purpose of this cartography is to produce sustainable grazing calendars for the livestock of the municipality of Totana, adjusting livestock census (sheep and goats) and herds to the available fodder resources, what will oblige to move livestock along the year according to when and were pasture resources are produced; in other words, the objective is to have an extensive livestock activity, mantaining resources and livestock in equilibrium. Due to the complexity of the problem arised, it is presented a first approach of a GIS to map forage resources and sustainable stoking rates in the municipality of Totana, where forest areas of high biological interest coexist with intensive irrigated agriculture and dryland cropping areas. The GIS will permit to elaborate pastoral districts and fodder calendars for the average flocks present in Totana, including restrictions as delimitation of exclussion areas (eg., habitats of high biological interest, areas with high erosion problems, etc) or adjustments to different scenarios (stoking rates during dry or wet years).

***Key Words**: Geographic Information System, forest pastures, forage resources from agriculture crops, management of pasture resources, sustainable stocking rates, livestock districts.*

INTRODUCCIÓN

Los trabajos realizados para elaborar esta comunicación se enmarcan dentro del proyecto de la SEEP sobre "Tipificación, Cartografía y Evaluación de los Pastos Españoles" financiado por el INIA, en colaboración con las CCAA, para elaborar en el ámbito nacional una cartografía de los pastos españoles y determinar su producción, calidad y estacionalidad, con el fin último de optimizar la gestión de una ganadería extensiva en equilibrio con los recursos pascícolas disponibles ("sostenible").

A partir de la cartografía de recursos pastables de la Región de Murcia, realizada en el ámbito del citado proyecto SEEP-INIA, se ha realizado un estudio de detalle del término de Totana, con objeto de: a) delimitar a escala mas detallada, la distribución espacial y temporal de los recursos forrajeros producidos en este municipio; b) calcular las cargas ganaderas y censo de rumiantes, que, de forma sostenible, pueden mantenerse en las distintas unidades cartogra-

fiadas durante cada uno de los doce meses del año; c) delimitar áreas de exclusión de pastoreo (elevado interés biológico, erosión, etc.) y d) delimitar distritos ganaderos (superficies de pastoreo que cubran las necesidades nutritivas de los rebaños durante cada uno de los meses del año) y vías pecuarias, por las cuales pueda transitar el ganado para el aprovechamiento integral de los distintos recursos pastorales (forestales y agrícolas) presentes en el municipio.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para la elaboración de la cartografía se ha seguido la metodología general desarrollada en el trabajo de *Broca et al.* (2001). Para delimitar las grandes unidades de uso forestal, agrícola e improductivo, se utilizó el campo nivel-1 de la cobertura IFN330 del Mapa de Vegetación del III Inventario Forestal Nacional (IFN), a escala 1:200.000, de la Dirección General para la Conservación de la Naturaleza (DGCONA).

El proceso de trabajo realizado se puede resumir en las siguientes fases.

Fase 1. Delimitación de unidades directamente del III IFN

La primera fase consistió en la selección de la información del III Inventario Forestal Nacional, que directamente podría utilizarse en el mapa. De esta forma se determinaron las siguientes unidades: Improductivo, Superficie agrícola, Humedal y agua, Pasto con arbolado denso (cobertura de copa de árboles mayor del 20 %), y Pasto con arbolado ralo (unidades con cobertura de copa de árboles entre 5-20 %).

Fase 2. Delimitación de unidades de pastos arbustivos y pastos herbáceos

Para el análisis de la superficie forestal no arbolada se ha tenido en cuenta la información aportada por el Mapa de Vegetación Actual (*Alcaraz et al*., 2000) y la Cartografía Nacional de Hábitat, ya que no fue posible obtener los datos básicos del Inventario Forestal Nacional (especies acompañantes y grado de cobertura). Para la determinación de algunas unidades (ej., espartizales) se ha utilizado el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos. Toda esta cartografía se revisó con ortofotos del SIG oleícola del MAPA (obtenidos a partir de un vuelo realizado entre octubre de 1997 y enero de 1998), y con una escena Landsat 7, de julio del 2.001, que cubre toda la Región de Murcia, procesada con una composición de color RGB de las bandas 453. Adicionalmente, se aplicaron criterios biogeográficos y bioclimáticos, para obtener una delimitación precisa de los grandes tipos de pastos en la Región. Las unidades de pastos arbustivos y herbáceos obtenidas han sido las siguientes:

- Pastos arbustivos de alta montaña: incluye los matorrales espinosos dominados por *Erinacea anthyllis* y *Ptilotrichum spinosum*.
- Pastos arbustivos permanentes de zonas subdesérticas: incluyen comunidades poco degradadas en zonas semiáridas o áridas, dominadas por Per*iploca angustifolia, Maytenus senegalensis, Tetraclinis articulata, Ziziphus lotus*.

- Pastos azonales: incluyen las comunidades ligadas a sustratos especiales. En nuestra zona se ha cartografiado solamente matorral halófilo y nitrohalófilo, con dominio de quenopodiciáceas.
- Pastos seriales de alto nivel evolutivo: matorrales que sustituyen a comunidades arboladas, que corresponden a etapas evolucionadas dentro de sus series de vegetación. También se incluyen matorrales climácicos de las zonas semiáridas mesomediterráneas.
- Pastos seriales de bajo nivel evolutivo: incluye las etapas de degradación de los matorrales seriales de alto nivel evolutivo. La diversidad de estas formaciones en la Región es muy alta debido al gran número de endemismos existente. Se agrupan aquí romerales, tomillares, aliagares, salviares, albaidares. En la Región todos estos matorrales se encuentran incluidos en la clase Rosmarinetea.
- Pastos xero-mesofíticos de vivaces y anuales: abarcan los espartizales, albardinales y lastonares. Debido a su pequeña extensión no se han tenido en cuenta otro tipo de pastizales.

Para la adscripción de los pastos analizados a cada uno de los tipos descritos, se utilizó la cobertura estimada de las formaciones, de acuerdo con los siguientes criterios:

Cobertura arbórea > 20%	Pasto con arbolado denso
Cobertura arbórea 5-20%	Pasto con arbolado ralo
Cobertura arbórea < 5%	Pasto no arbolado
Cobertura matorral tipo x > 20%	Pasto arbustivo tipo X
Cobertura matorral tipo x 10-20%	Pasto arbustivo tipo X (si cobertura leñosas > cobertura herbáceas)
Cobertura matorral tipo x 10-20%	Pasto herbáceo tipo X (si cobertura leñosas < cobertura herbáceas)
Cobertura general < 10%	Improductivo

Fase 3. Delimitación de unidades agrícolas (derivadas de los cultivos)

Se realizó a partir del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos (MCA) 1:50.000 del MAPA correspondiente al año 2.001.

Para el detalle de los cultivos se tomó como referencia la Estadística Agraria del año 2000.

Fase 4. Depuración de la cartografía obtenida

Para la elaboración definitiva de la cartografía se realizó un laborioso proceso de depuración, con el fin de corregir los problemas encontrados al unir las diferentes capas de información, y que de forma resumida fueron: diferencias de contactos entre el III IFN y el MCA, errores de codificación de algunos polígonos, eliminación de polígonos con superficie inferior a 10 ha, y eliminación de las líneas de corte de las hojas del MCA.

Fase 5. Asignación del piso bioclimático a cada unidad

La productividad de las unidades cartografiadas está condicionada en sus periodos de crecimiento, reproducción y reposo por parámetros climáticos como la altimetría, precipitación y temperaturas, todos ellos relacionados con el piso bioclimático en el que se encuentran. Asimismo, la estacionalidad de la biomasa producida está condicionada por el piso bioclimático al que pertenece la unidad.

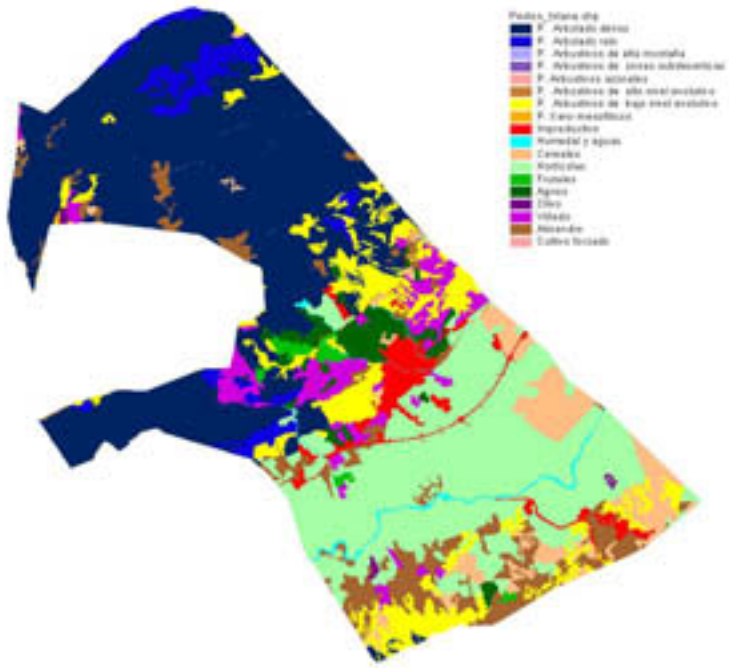


Figura 1. Unidades delimitadas en la cartografía de pastos en el municipio de Totana.

Fase 6. Cálculo de la energía metabolizable producida por las unidades cartografiadas

El cálculo de la producción potencial de energía metabolizable en cada polígono se ha realizado en función del piso bioclimático, la formación pascícola, la precipitación media y las ecuaciones determinadas por *Passera et al.* (2000). Dado el elevado número de polígonos que constituyen la cartografía base, se ha desarrollado un *script* en *Avenue*, que realiza estos cálculos automáticamente. Para los datos de precipitación se han utilizado los datos de series históricas de 30 años de las estaciones del INM (1960-90), mediante la extensión *Spatial Analyst*.

Las ecuaciones utilizadas para estimar la producción de energía metabolizable en pastos forestales son del tipo lineal múltiple ($y = a + bx + cz$), donde **y** es la energía en MJ/ha/año de

cada unidad en cada piso bioclimático, **a**, **b** y **c** son constantes obtenidas mediante técnicas de regresión, **x** es la precipitación media anual de la unidad y **z** la cobertura media de la unidad (*Passera et al.*, 2000).

La biomasa y energía aportada por los recursos derivados de la agricultura se han tomado de distintos trabajos.

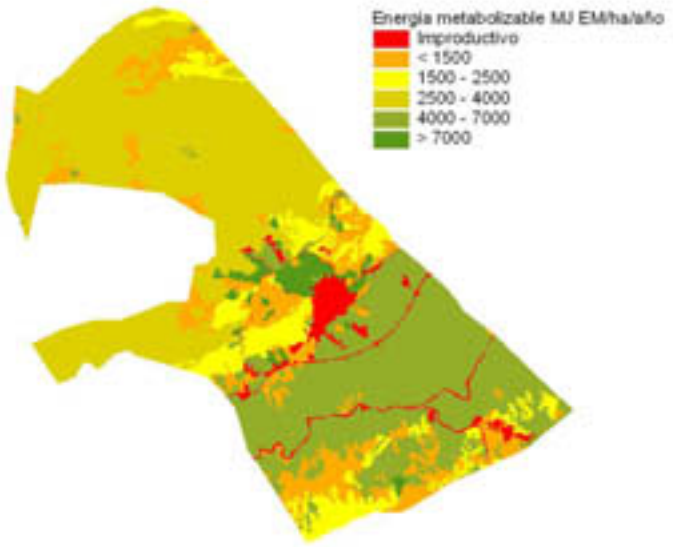


Figura 2. Producción potencial de energía metabolizable.

Fase 7. Estimación de la estacionalidad de la producción de biomasa según piso bioclimático

Asumiendo que el frío y la sequía paralizan el crecimiento (meses invernales con temperaturas medias inferiores a 7,5ºC, y meses secos con déficit hídrico superior al 20%) se han obtenido gráficos de estacionalidad productiva de los recursos pascícolas presentes en el medio natural; asimismo, teniendo en cuenta la experiencia de campo respecto al periodo productivo de los principales cultivos, se ha determinado la estacionalidad de los recursos del medio agrícola.

Fase 8. Determinación de la carga potencial de ganado

Una vez se conoce la energía que puede generar de forma sostenible cada una de las unidades, ésta se puede expresar en carga ganadera de ovino o caprino, para lo que se ha empleado un script que realiza dichos cálculos. Para esta equivalencia se ha tenido en cuenta que una oveja segureña en producción de unos 45 kg de peso vivo necesita 5033 MJ EM/año, y una ca-

bra serrana en producción necesita 5189 MJ EM/año; aplicando dicha equivalencia se obtienen cargas potenciales para cada una de las unidades productivas consideradas.

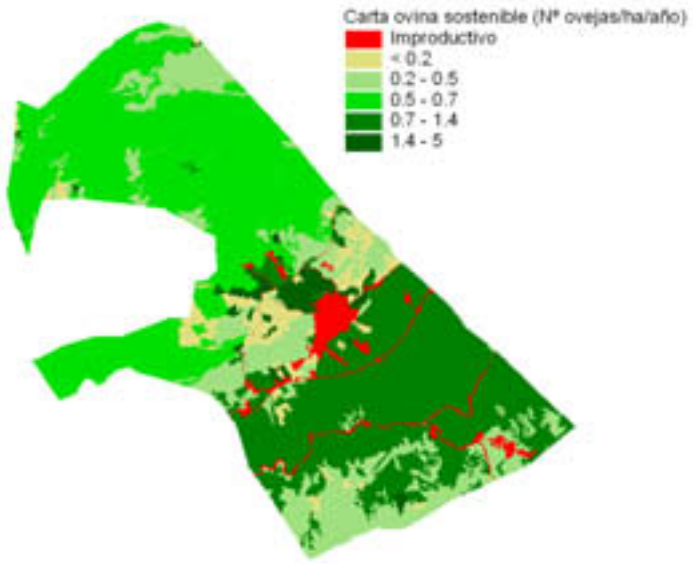


Figura 3. Carga ganadera sostenible expresada en cabezas de ganado ovino/ha/año.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

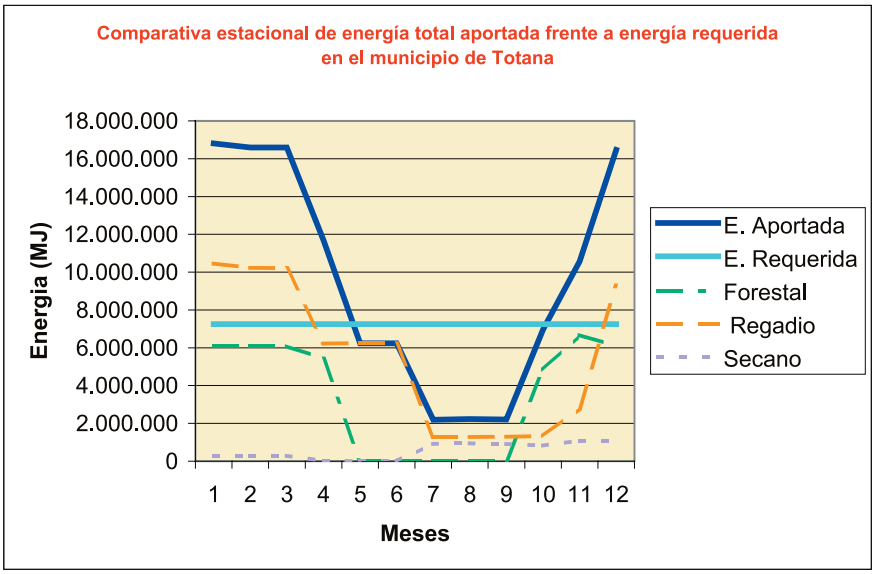
Distribución estacional de los recursos

A lo largo del año hay una variación importante en la disponibilidad de los recursos pastables. Durante siete meses al año (de octubre a abril) los recursos son capaces de cubrir con creces las necesidades alimenticias del ganado, no ocurriendo así el resto del año (de mayo a septiembre), coincidiendo con el largo verano de esta parte del Mediterráneo. Las variaciones a lo largo del año son muy significativas, desde los casi 17 mill. MJ EM en el mes de enero a los poco más de 2 mill. MJ EM en agosto.

Las necesidades energéticas del censo ganadero ascienden a una media mensual de 7'24 mill. MJ EM. De acuerdo con esto, la carga ganadera sostenible mensualmente con los recursos brutos existentes variaría entre 40.091 y 5.221 ovejas, con una media de 22.810 ovejas.

El conjunto del territorio produce una energía bruta de 114'8 mill. MJ EM, que serían capaces de sostener 22.810 ovejas, mientras que las teóricas necesidades de energía de la cabaña existente (15.222 ovejas y 1.990 cabras) es de 86'9 mill. MJ EM. Existe, por lo tanto, una infrautilización teórica de los recursos. Sin embargo, hay que tener en cuenta una serie de

factores que reducen la disponibilidad de los mismos; estos factores se analizan en el apartado siguiente.



Unidades cartogr. (MJ)	E	F	M	A	M	J
E. Aportada	16.814.702	16.598.190	16.587.006	11.672.928	6.242.683	6.242.677
E. Requerida	7.244.870	7.244.870	7.244.870	7.244.870	7.244.870	7.244.870
Diferencia	9.569.833	9.353.320	9.342.137	4.428.059	-1.002.187	-1.002.193
Ovejas sostenibles	40.091	39.574	39.548	27.831	14.884	14.884
Cabras sostenibles.	38.885	38.385	38.359	26.995	14.437	14.437

Unidades cartogr. (MJ)	J	A	S	O	N	D
E. Aportada	2.189.680	2.233.112	2.200.857	6.977.711	10.576.491	16.465.920
E. Requerida	7.244.870	7.244.870	7.244.870	7.244.870	7.244.870	7.244.870
Diferencia	-5.055.190	-5.011.757	-5.044.013	-267.159	3.331.621	9.221.050
Ovejas sostenibles	5.221	5.324	5.247	16.637	25.217	39.259
Cabras sostenibles	5.064	5.164	5.090	16.137	24.459	38.079

Restricciones en la utilización de los recursos

Hasta ahora se han considerado los recursos brutos producidos en el municipio, pero no toda la superficie municipal es susceptible de ser pastoreada, ya que pueden existir condicionantes ambientales, entre las que cabe destacar la protección de espacios naturales, las zonas con elevado riesgo de erosión y la interacción con especies de fauna.

Una superficie significativa del municipio de Totana está bajo figuras de protección ambiental. Entre ellas destaca el Parque Regional de Sierra Espuña, que ocupa 8.608 ha de la mitad Norte del término municipal, lo que supone un 30% del total municipal (27.787 ha). Además, este Parque Regional es considerado como Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) y ha sido propuesto como Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) para formar parte de la futura Red Natura 2000. También han sido propuestos como LIC la Sierra de la Tercia, de las que 1.832 ha pertenecen a Totana, y los Saladares del Guadalentín, con 302 ha municipales. Este último espacio está ya considerado como Reserva Natural. En todos los LICs propuestos se encuentran hábitats de interés comunitario de conservación prioritaria y especies raras o amenazadas en el ámbito local y regional. Algunas de estas especies son utilizadas habitualmente por la ganadería y podrían verse afectadas en caso de un pastoreo no controlado.

Otras áreas donde podría establecerse una restricción de pastoreo son aquellas donde existen problemas graves de erosión, en los que el pastoreo podría actuar como un elemento acelerador de dichos procesos. En estas zonas, de escasa cubierta vegetal y de bajo valor pastoral, el esfuerzo ramoneador del ganado es a veces superior a la energía recolectada, con lo que hay un balance negativo que debe ser compensado con suplementos. En esta situación se encuentran las pequeñas elevaciones que se disponen al Este y Oeste del núcleo de Totana, como el Alto de los Secanos y Las Cabezuelas.

En Sierra Espuña se introdujo en la década de los setenta un ungulado autóctono, el arrui (*Ammotragus lervia*), con fines cinegéticos. Esta especie ha proliferado sin control preciso, ejerciendo una presión sobre las especies forrajeras, especialmente en las zonas de cumbres, por las que estos animales tienen cierta querencia, y donde se concentran la mayor parte de flora de interés. Por ello, además del control de esta especie, debe evitarse por ahora la superposición del arrui con los rebaños domésticos, lo que multiplicaría el efecto de degradación de los hábitats, algunos de ellos de interés comunitario para la Directiva Hábitat. La presencia de jabalíes en Sierra Espuña es otro elemento importante de la fauna silvestre que habrá que considerar a la hora de estimar la presión total de herbívoros sobre las unidades pascícolas cartografiadas.

Finalmente, es necesario detallar la no-disponibilidad de recursos procedentes de las superficies forestales durante los meses de mayo a septiembre. Durante los meses de mayo a finales de junio existe una importante biomasa aprovechable, pero desde el punto de vista de la sostenibilidad se considera necesario permitir un buen desarrollo de la floración, fructificación y dispersión de diásporas, que aseguren una regeneración de la flora y los hábitats. En los meses de julio a septiembre, la mayor parte de los pastizales se encuentran agostados o no presentan crecimiento positivo.

Infraestructuras y ganados

Un aspecto de enorme interés es la existencia de infraestructuras que permitan el movimiento del ganado y el aprovechamiento del conjunto del territorio. La ausencia de estas infraestructuras puede suponer un factor limitante de primer orden.

Para el movimiento del ganado es necesaria una red de caminos que permitan el tránsito libre por ellos; esta red está formada por las vías pecuarias clasificadas del término municipal. Estas vías se desarrollan de Norte a Sur, uniendo la sierra y el valle, y de Este a Oeste, uniendo las comarcas de la Vega del Segura con el Valle del Guadalentín y del Noroeste. Dentro de Sierra Espuña existe un importante número de vías pecuarias, que permiten un movimiento entre los distintos sectores serranos. Por el Sur del término discurre la Cañada Real de Granada a Cartagena, que da idea de los antiguos movimientos que se producían a larga distancia.

Un elemento de enorme importancia es la existencia de puntos de agua, sin los cuales no es posible un buen aprovechamiento de la biomasa forrajera. A pesar de la bajas precipitaciones que se presentan en el territorio, existen numerosos puntos de agua disponibles para el ganado, aunque se detecta el deterioro de algunas de las numerosas fuentes y abrevaderos dispersos por Sierra Espuña.

Finalmente, la localización de apriscos, donde el ganado es encerrado habitualmente cada noche, va a determinar la posibilidad de aprovechamiento de determinadas zonas. En el caso de pastos que se encuentran lejos del aprisco, el ganado tiende a hacer un aprovechamiento escaso de ellos, debido al esfuerzo necesario para alcanzarlos. Por el contrario, en las inmediaciones de los apriscos se produce un aprovechamiento excesivo de la vegetación, pues los animales pasan casi a diario para alcanzar otros pastos.

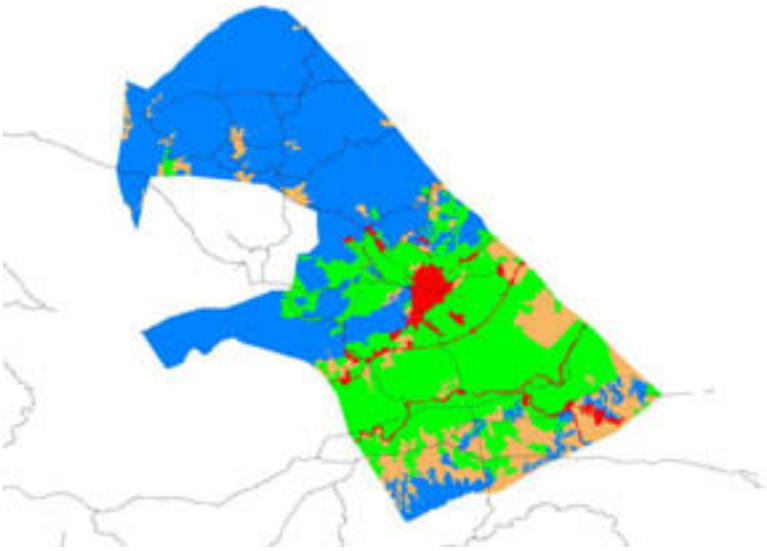


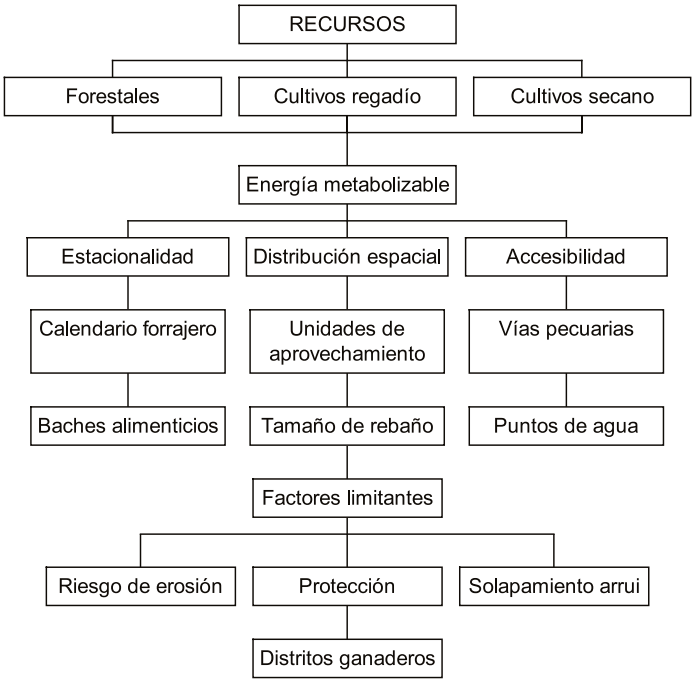
Figura 4. Red de vías pecuarias (en negro). Colores: azul-pastos forestales, verde-cultivos de regadío, anaranjado-cultivos de secano, rojo-improductivo (Anexo de figuras, color).

Escenarios según variaciones interanuales de precipitación

El procedimiento metodológico seguido para calcular la energía metabolizable producida por los pastos forestales incluía como una de sus variables la precipitación, en nuestra cartografía la precipitación media del periodo 1960-90. Sin embargo, dado que el modelo permite estimar la biomasa o energía producida en años significativamente "diferentes", como es el caso de los años "secos" y años "húmedos", las cargas sustentables en años "extremos" variarán significativamente y deberán tenerse en cuenta en la gestión del territorio, para evitar el sobrepastoreo y degradación en los años secos, y el infrapastoreo y acumulación de biomasa (con el consiguiente riesgo de incendios) durante los años húmedos. Así mismo, el uso de una red automática de estaciones climáticas como la existente en el IMIDA, permitiría realizar estimaciones más reales de la biomasa y energía producidas por cada una de las unidades y polígonos cartografiados.

Delimitación de distritos ganaderos

Para la delimitación de los distritos ganaderos se deben tener presentes todas las variables anteriormente mencionadas, siguiendo el presente esquema:



CONCLUSIONES

Mediante la integración de modelos de producción de biomasa en herramientas SIG, se

pueden desarrollar aplicaciones para gestionar de forma sostenible los recursos pascícolas de una región, comarca o municipio, donde la ganadería extensiva debe mantenerse en equilibrio con los recursos disponibles, haciendo ajustes que tengan en cuenta las variaciones espaciales y temporales de los recursos pastables, así como la existencia de zonas de alto valor ecológico sometidas a planes de ordenación y conservación.

Del análisis de los recursos pastables presentes en el municipio de Totana se pueden sacar algunas conclusiones preliminares: a) que las producciones mensuales de energía metabolizable varían de 17 a 2 millones de MJ, con máximos en los meses de Diciembre a Marzo, y mínimos en los meses de Julio a Septiembre, b) que durante siete meses del año (Octubre a Abril) la producción de recursos pastables resulta suficiente, e incluso excedentaria, como para cubrir las necesidades nutritivas del censo ganadero existente, c) que durante cinco meses del año (Mayo a Septiembre) el ganado necesita de suplementación o de forrajes de reserva (henos, pastoreo diferido de algunas zonas, etc.), y d) que para mejorar el buen aprovechamiento de los recursos pastables mas alejados de las zonas tradicionales en donde se encuentran localizados los apriscos y rebaños, será necesario utilizar las antiguas vías pecuarias, fuentes, y abrevaderos, así como la construcción de nuevos apriscos, abrevaderos y algunos cercados que permitan mantener al ganado pastando en las zonas mas alejadas de sus lugares de procedencia.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Tecnología Agraria y Alimentaria (Proyecto OT00-037-C17) y al Banco de datos de la Dirección General de Conservación de la Naturaleza.

REFERENCIAS

Alcaraz et al. (2000): *Mapa de vegetación actual. Mapa digital de Suelos de la región de Murcia*. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente. Murcia

Broca A.; Ferrer C.; Maestro M. (2001): Cartografía preliminar de recursos pascícolas en Aragón. La provincia de Huesca como ejemplo. Universitat de Lleida. *Actas XLII Reunión Científica de la SEEP*, pp. 237-243.

Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente (2000): *Estadística agraria de Murcia*. Secretaría General Técnica. Murcia

Dirección General de Conservación de la Naturaleza (2000): *Tercer inventario forestal nacional de Murcia*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid

Dirección General de Conservación de la Naturaleza (2002): *Cartografía Nacional de Hábitat*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid

Ferrer, C.; San Miguel, A.; Olea, l. (2001): Nomenclátor básico de Pastos en España. *Pastos* 31(1), pp. 7-44.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2001): *Mapa de cultivos y aprovechamientos 1:50 000*. Secretaría General Técnica. Madrid.

Passera, C. B; González, J. L.; Robles A. B. ; Allegretti, L. I. (2000): Determinación de la capacidad sustentadora de pastos de zonas áridas y semiáridas del sureste ibérico, a partir de algoritmos. I Foro Iberoamericano de Pastos. CIBIO, Universidad de Alicante. *Actas XLI Reunión Científica de la SEEP*, pp. 611-617.

Aplicación de SIG para seleccionar campos abandonados recuperables como áreas de pastoreo en el Pirineo Aragonés

M.P. Errea, D. Carbajo y T. Lasanta

Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Campus de Aula Dei. Apdo. 202. 50080 - Zaragoza.

RESUMEN

Uno de los factores limitantes para el desarrollo de la ganadería extensiva en el Pirineo es el desequilibrio estacional en la oferta de pastos. Tradicionalmente se resolvió con la trashumancia. Las dificultades recientes (sociales, económicas y de usos del suelo) para recuperar los sistemas trashumantes plantea la necesidad de buscar soluciones en el propio Pirineo. En este trabajo se analizan tres escenarios de cambio de usos del suelo (basados en la sustitución de los mejores campos abandonados por prados) con el apoyo metodológico de un SIG. En el valle de Aísa se han cartografiado los usos del suelo a partir de fotografía aérea; el mapa se ha implementado en un SIG (ArcInfo y ArcGis, v 8.3), lo que permitió delimitar las áreas de campos abandonados que podrían desbrozarse para formar prados de siega o diente. Se tuvieron en cuenta variables físicas (pendiente y forma de la ladera) y de accesibilidad.

Los resultados demuestran que hasta el 41,5% de los campos abandonados podrían recuperarse como prados, lo que reduciría el desequilibrio estacional de pastos en el 24,9%. Con ello, se apoyaría el desarrollo de la ganadería extensiva, con sus ventajas asociadas: mayor control del riesgo de incendios y mejora de la estética y estructura del paisaje, sin incrementar las tasas de erosión del suelo.

***Palabras Clave**: Ganadería extensiva, usos del suelo, campos abandonados, SIG, áreas de montaña, Pirineo.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

GIS application to select abandoned fields as new grazing meadows in the Aragonese Pyrenees. One of the main factors hindering extensive cattle farming in the Pyrenees is the unbalance in seasonal availability of grazing pastures. Traditionally, trashumance solved this problem. Nowadays, new solutions are needed because of the social, economic and land use difficulties involved in the recovery of the old transhumance system. In this paper, three scenarios of land uses changes based on the substitution of abandoned field for grazing meadows in the Aisa Valley are analyzed using GIS methodologies. Land uses maps based on aerial photos were implemented using a GIS (ArcInfo and ArcGis v.8.3). Areas of abandoned fields suitable for grazing meadows use were defined using physical variables (steepness and slope morphology) and accesibility criteria.

Results show that up to 41.5% of abandoned fields could be reclaimed as grazing meadows, and the seasonal unbalance of pasture availability could be reduced up to 24.9%. Besides, extensive cattle farming would develop and, as a consequence, wildfire risk would decrease and landscape aesthetic and structure would improve without any increase in soil erosion rates.

Key Words: *Livestock extensive, land-uses, abandoned fields, GIS, mountain areas, Pyrenees.*

INTRODUCCIÓN

A nadie escapa la importancia que la ganadería extensiva ha tenido en el Pirineo (en su vida económica y social, en la ordenación del territorio, en la configuración de sus paisajes y en su riqueza ecológica); importancia que en gran parte ha perdido desde mediados del siglo XX, como consecuencia de la crisis del llamado sistema de gestión tradicional (*García-Ruiz y Balcells*, 1978). Sus elevados censos se justificaron por la abundancia y riqueza de los pastos supraforestales ("puertos") y por la trashumancia de los rebaños, lo que permitía, por un lado, desviar la presión invernal del ganado hacia las estepas y espacios cerealistas de la Depresión del Ebro y, por otro lado, liberar a las laderas bajas del uso ganadero para alimentación a la población (*Fillat,* 1980; *Lasanta,* 1989).

La crisis del sistema trashumante, larvada desde mediados del siglo XIX (*Pinilla,* 1995) y materializada de forma casi definitiva en los años sesenta del siglo XX, puso de manifiesto uno de los grandes limitantes que tiene el Pirineo para la ganadería extensiva: el desequilibrio estacional entre recursos pastorales de verano y del resto del año. *Ferrer* (1988) evaluó que los puertos del Pirineo Aragonés tienen capacidad suficiente para alimentar a 68.330 UGM durante 120 días, mientras que con los recursos forrajeros de fondo de valle (los actuales prados) sólo se pueden alimentar 21.899 UGM durante los ocho meses restantes.

La solución que los ganaderos adoptaron para adaptarse al desequilibrio estacional de pastos fue reducir los censos ganaderos a la capacidad de alimentación del espacio agrícola, es decir al recurso limitante (*García-Ruiz y Lasanta*, 1990). Pero ello supone: i) no aprovechar una proporción importante de los pastos supraforestales, por lo que se degradan progresivamente (*Remón*, 1997); ii) adaptar el tamaño de las explotaciones a los propios recursos forrajeros para evitar la compra de piensos y mantener la competitividad, aunque a medio plazo su pequeño tamaño plantee grandes dudas de continuidad (*Manrique et al*., 1999), iii) no pastar las laderas bajas, favoreciendo un intenso proceso de matorralización (*Vicente et al.,* 2003), el incremento del riesgo de incendios (*Vicente et al,* 2000), la homogeneización y pérdida de calidad estética del paisaje (*Vicente et al.,* 2000a) y el descenso de la biodiversidad (*Nogués y Martínez Rica*, 2004).

Una de las alternativas para controlar los efectos negativos del subpastoreo es incrementar los censos ganaderos, para lo que parece apropiado recuperar campos abandonados como áreas de prado. Otros escenarios, como la revitalización de los sistemas trashumantes o la importación de piensos, son hoy menos factibles social y económicamente, además de incrementar la dependencia del exterior.

La recuperación de campos abandonados se fundamenta en la amplia extensión que ocupan en laderas bajas y medias (*Lasanta, 1989*) y, sobre todo, en el potencial pascícola que tiene la cubierta herbácea que permanece debajo del matorral (*Molinillo et al.,* 1997), que podría aprovecharse con el simple desbroce del matorral. *Lasanta et al.* (1996) evaluaron que los campos abandonados transformados en prados de diente (sólo pastados) podrían alimentar como media a 2 UGM/ha en primavera y a 1,6 UGM/ha en otoño. Algunos de los mejores campos abandonados admitirían una siega al año, incrementando su interés pastoral.

El problema radica en ¿cómo delimitar los campos abandonados que pueden transformarse en prados (de siega o diente), y cuáles deben seguir su evolución natural para evitar el incremento de las tasas de erosión, lo que llevaría a medio plazo a la pérdida del suelo?. Para este fin los SIG se revelan como una herramienta de gestión imprescindible, por su capacidad para superponer diferentes capas de información (topográficas, de usos del suelo, de accesibilidad,…), que deben tenerse en cuenta si se quiere compaginar el aprovechamiento y la conservación de los recursos (*Errea,* 1999; *Lee et al.,* 2002; *Burnside et al.,* 2002).

Desde esta perspectiva, el objetivo de este trabajo es proponer áreas de campos abandonados que podrían transformarse en prados de siega o diente, sin incrementar los riesgos de erosión. Para ello, a partir de fotografía aérea, se han cartografiado los campos abandonados en un valle representativo (el de Aísa), y mediante un SIG se han seleccionado los que podrían cambiar de uso. Un segundo objetivo trata de evaluar qué supondría en el balance estacional de pastos su recuperación como áreas de pastoreo.

El interés del tema no deriva sólo del incremento de la producción o de garantizar la viabilidad económica de las explotaciones, e incluso puede que estos fines no sean los fundamentales. Se trata también de un problema de mantenimiento de los ecosistemas, de utilización de recursos vegetales sin otra alternativa de uso posible, de controlar la propagación de incendios, de la ocupación de un territorio casi despoblado, y de la conservación de un paisaje natural y cultural creado durante milenios. Se trata, en definitiva, de mantener vivo el Pirineo.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se ha desarrollado en el valle de Aísa, Pirineo Aragonés Occidental (Figura 1); un valle que ejemplifica el proceso de descoordinación territorial que ha sufrido el Pirineo Central: despoblación y desestructuración demográfica, abandono de la mayor parte del espacio cultivado y fuerte retroceso de los censos ganaderos (*Ruiz Flaño,* 1993).

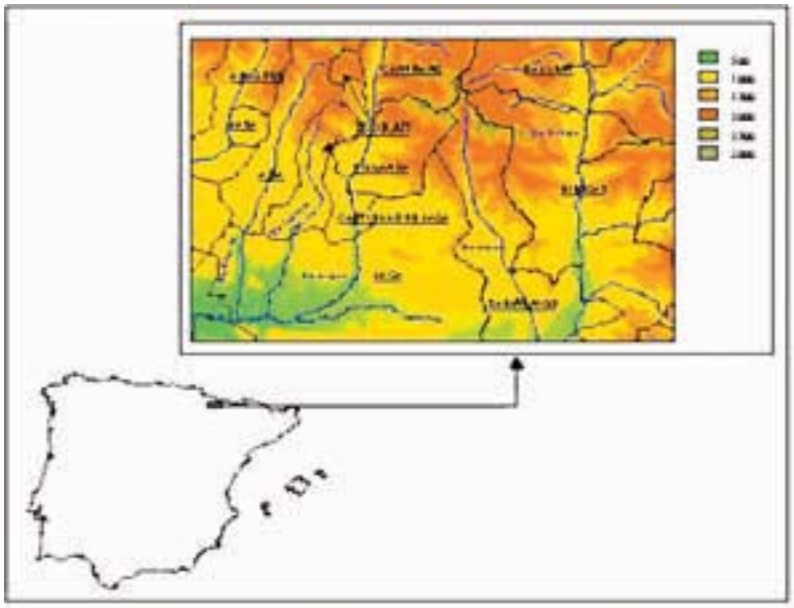


Figura 1. Localización del área de estudio.

El Valle de Aísa tiene una superficie de 8.154 ha (Figura 1), incluyendo cuatro núcleos de población (Aísa, Esposa, Sinués y Candanchú). El 23,4% del territorio se cultivaba a principios de siglo. Al igual que en el resto de los valles pirenaicos, y conforme se reducían los efectivos demográficos, se ha asistido a lo largo del presente siglo a una notable contracción del espacio cultivado. El 75% del área agrícola tradicional ha sido abandonada y hoy sólo permanece en cultivo el 5,9% del espacio total, coincidiendo con los fondos de valle y los pies de vertiente. La mayor parte de los campos abandonados responden a la morfología de campos en pendiente. Se sitúan en exposiciones solanas, en pendientes del 20 al 40% y en altitudes entre 1.000 y 1.400 m (Lasanta, 1989). Hasta finales de los años cuarenta, según datos del archivo municipal, más de 6000 ovejas trashumaban a los eriales y campos de cereal de la Depresión del Ebro, y alrededor de 1000 permanecían en el Valle; la cabaña de vacuno ascendía a 345 vacas. El censo ganadero a mediados de siglo superaba, pues, las 1000 UGM. En el año 2000, las estadísticas oficiales señalaban un censo de 89 vacas, 1648 ovejas y 50 cabras, lo que equivale a una carga de 304 UGM.

El valle tiene una disposición meridiana, cortando transversalmente las Sierras Interiores, de litología calcárea, y las Sierras del Flysch, que se desarrollan inmediatamente al Sur. El último sector es el que ocupa mayor amplitud, constituyendo un área homogénea de cumbres redondeadas y vertientes regularizadas con desniveles del 20 al 60%, solamente interrumpidas por el desarrollo de barras calcáreas, que dan lugar a formas de relieve más abruptas (*Soler y Puigdefábregas,* 1972).

El clima es submediterráneo de montaña con matices de continentalidad. En la estación de Esposa (979 m. de altitud) las precipitaciones anuales son de 1086 mm y la temperatura media de 9,9 °C. El ombrotermograma muestra una distribución estacional relativamente homogénea de las precipitaciones, aunque con débiles máximos otoñales e invernales, y un mínimo estival, única estación con ligero déficit hídrico.

Los suelos de los campos abandonados son pardos, poco profundos y de elevada pedregosidad (cercana al 30%). Su textura es franca y franco-arcillosa, con un contenido bastante equilibrado entre las distintas fracciones. Son ricos en carbonatos y deficitarios en fósforo y potasio, aunque poseen una fertilidad nada desdeñable (*Lasanta*, 1989; *Ruiz Flaño*, 1993).

La vegetación actual es el más claro exponente de la intensa presión humana a que ha sido sometido el territorio del valle. Las laderas solanas fueron deforestadas para la instalación de campos de cultivo. En la actualidad, se encuentran ocupadas por comunidades degradadas de matorral (aliagares, bujedos y espinales). A partir de los 1.700-1.800 y hasta los 2.200-2.300 m se desarrolla un ecosistema supraforestal que se corresponde con el piso vegetal subalpino, fruto de talas masivas del bosque desde el siglo XI para ampliar la superficie de pastos de verano. (*Montserrat,* 1992; *García-Ruiz y Valero*, 1998). En las cumbres más altas aparece el piso alpino y la roca desnuda. Las masas forestales (de pino y roble, sobre todo) se refugian en los enclaves menos favorables para el uso agropecuario: umbrías, fuertes pendientes y sectores alejados de los pueblos.

MÉTODOS

Elaboración del mapa de usos del suelo

A partir de las fotografías aéreas de los años 1956, 1977, 1981 y 1997 se cartografiaron los usos del suelo. Se dedicó especial atención, por un lado, a la relación entre usos del suelo y aprovechamiento ganadero estacional. Por otro lado, se procuró delimitar el espacio abandonado, para lo que resultaron especialmente interesantes los fotogramas más antiguos. La información se digitalizó a escala 1: 50.000 en Auto Cad v. 12 para tratarla en el GIS ArcInfo v.7.02. De esta forma pudimos conocer la superficie ocupada por cada uso y su distribución espacial en relación con las variables topográficas. Estas últimas se generaron a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) desde la cartografía digital del Servicio Geográfico del Ejército (E. 1: 50.000, equidistancia de 20 m).

Definición de escenarios de cambio y selección de campos abandonados recuperables para uso ganadero

Se plantearon tres escenarios de cambio que tratan de transformar campos abandonados en áreas de pastoreo, diferenciando entre prados de siega y prados de diente, en función de factores topográficos y de accesibilidad. La transformación sólo requiere desbrozar el matorral para aprovechar la cubierta herbácea que se mantiene debajo del matorral, una cubierta densa y compuesta por gramíneas y leguminosas de alto valor pastoral (*Molinillo et al.,* 1997). Los prados de diente serían aprovechados en pastoreo exclusivamente, mientras que los de siega admiten una dalla al año

El cuadro 1 anota las condiciones que deben cumplir los campos abandonados para su transformación en prados de siega en los tres escenarios. Las condiciones más restrictivas corresponden al escenario 1, debido a que necesitan suelos más fértiles (localizados preferentemente en vertientes cóncavas) y laderas más suaves para favorecer el laboreo con maquinaria agrícola (siega y transporte). En los tres escenarios se exige que haya acceso con tractor para evitar el impacto ambiental de la apertura de nuevas pistas (*Arnáez y Larrea*, 1994). Las exigencias para los prados de diente son menores, ya que no se necesita el uso de tractores, ni que las laderas tengan suelos potentes y fértiles; el único limitante se encuentra en el desnivel. La pendiente máxima se establece para ambas alternativas en el 30%, con el fin de garantizar la conservación del suelo, un capital muy importante en montaña. Para determinar este límite nos apoyamos en la información de la Estación Experimental "Valle de Aísa", donde se controla el comportamiento de varios usos del suelo a partir de parcelas experimentales (*Lasanta y García-Ruiz,* en prensa). La Estación Experimental "Valle de Aísa" se sitúa en una ladera recta del 35% de pendiente, que se cultivó con cereal hasta los años sesenta del siglo XX. Tras el abandono fue colonizada por *Genista scorpius* y *Rosa sp.*, como especies dominantes. En 1991 parte del matorral se desbrozó para reproducir varios usos del suelo, entre los que se incluyen parcelas de matorral denso y de prado. Cada parcela está dotada de un sistema automático para medir de forma continua la escorrentía y el transporte de sedimento en solución y suspensión. En el periodo 1992-2003 el coeficiente de escorrentía medio anual fue de 4,5% para la parcela de matorral y de 6,8% para el prado. En el mismo periodo, las pérdidas de suelo medias anuales fueron de 10,9 g/m^2 y de 15,9 g/m^2, respectivamente; pérdidas muy inferiores a las registradas, por ejemplo, en la parcela de barbecho (93,2 g/m^2) y en la de cereal de artigueo (137 g/m^2). Estos resultados demuestran que la transformación de campos abandonados (ahora cubiertos por matorral) en prados implica un ligero incremento de la erosión del suelo, perfectamente asumible por el sistema si a cambio se incrementa la producción de pasto en época deficitaria.

Cuadro 1. Condiciones que deben cumplir los campos abandonados para su transformación en prados de siega.

	Uso del suelo	Forma de la ladera	Pendiente	Accesibilidad
Escenario 1	Prados de siega	Cóncava	< 15%	Con tractor
Escenario 2	Prados de siega	Cóncava y recta	< 20%	Con tractor
Escenario 3	Prados de siega	Todas	<30%	Con tractor

La cartografía de los campos abandonados recuperables en los tres escenarios se realizó en ArcGis 8.2 a partir de la digitalización de las fotos aéreas realizada previamente. Variables topográficas derivadas del MDT como forma de la ladera y pendientes se obtuvieron con la extensión *Spatial Analyst* de análisis ráster y el módulo Grid de ArcInfo.

Cálculo del potencial pastoral previo y posterior a los nuevos escenarios

La bibliografía sobre la valoración pastoral de los distintos usos del suelo es muy abundante, especialmente para el Pirineo donde diferentes equipos del Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza y del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria del Gobierno de Aragón vienen trabajando desde hace más de 30 años. Para este trabajo nos servimos de dicha información, utilizando las valoraciones dadas por *Ferrer* (1988), por permitir una estimación sencilla y rápida, pero suficiente para los objetivos aquí perseguidos. *Ferrer* (1988) establece unos valores medios de capacidad de carga para los usos del suelo del Pirineo. La valoración de los que interesan en este estudio es: Los pastos alpinos admiten 0,6 UGM durante 4 meses; los subapinos, 1,3 UGM durante 4 meses; los prados de secano cultivados, 2,5 UGM durante 8 meses; los prados naturales (prados de diente, para nosotros) sólo aprovechables en pastoreo, 1,2 UGM durante 8 meses y los prados naturales (prados de siega) que admiten una dalla al año y el pastoreo, 1,8 UGM durante 8 meses.

RESULTADOS

La distribución espacial de los usos del suelo

La figura 2 representa un esquema sencillo de los usos del suelo del valle de Aísa. Los pastos supraforestales constituyen el uso de mayor superficie (3270 ha), de las que 1936 ha corresponden a pastos subalpinos y 1333 ha a pastos alpinos y de roca desnuda. Los "puertos" se desarrollan por encima de los 1600/1700 m de altitud, con predominio de la comunidad de *Nardion* y *Mesobromion*, y abundancia de *Nardus stricta* (cerrillo), acompañado por *Trifolium alpinum, Plantado alpina*, *Carex sempervirens*, *Festuca rubra*, *Agrostis capilares*, *Gallium verum,* y otras especies resistentes a la innivación prolongada (*Remón y Gómez*, 1989). Estos pastos son de aprovechamiento estival (de principios de julio a finales de octubre), si bien los más altos sólo son pastados en agosto (*García-González et al*, 1990).

El espacio forestal alcanza una superficie de 2896 ha (el 35,5% del territorio). Al norte del pueblo de Aísa dominan *Pinus sylvestris* y *Fagus silvatica*, mientras que al sur se desarrollan bosques de pino silvestre en las umbrías con otros de *Quercus gr. Faginea*. Alternando con los bosques aparecen laderas de matorral, cubiertas predominantemente por *Echinospartum horridum*, *Buxus semprevirens*, *Genista scorpius*, *Grataegus monogyna*, *Rosa sp*. y *Juniperus communis*, como especies más importantes. Tanto los bosques como los matorrales poseen cierto interés pastoral (*Ascaso*, 1988; *Valderrábano y Torrano*, 2000; *Marinas et al*, 2004, entre

otros), si bien en la actualidad apenas aportan nada a la alimentación del ganado, utilizándose tan sólo en los itinerarios de ascenso y descenso a los puertos (*García-Ruiz y Lasanta*, 1993).

El espacio cultivado tradicionalmente ocupaba 1907 ha (el 23,4% de la superficie total), estando dedicado exclusivamente a la alimentación de la población, con predominio de los cereales panificables, patatas y hortalizas (*Lasanta,* 1989). En la actualidad, se mantienen en cultivo 346 ha, destinadas a prados y alfalfares. El resto (1561 ha) son campos abandonados. El proceso de abandono muestra que entre 1940 y 1957 se habían abandonado 1217 ha, 218 ha entre 1957 y 1978-81, y 81 ha después de 1981. Aparecen sobre todo en laderas con desniveles superiores al 20% (730 ha entre el 20 y 40%, y 446 ha con más del 40%), mientras que con menos del 10% sólo hay 178 ha, y 162 ha entre el 10 y el 20% de pendiente. Dominan las exposiciones Este (522 ha) y Sur (433 ha), y las altitudes de 900 a 1300 m (73%).

La mayor parte de los campos abandonados presentan un estrato de matorral de *Genista scorpius* y *Rosa sp*. Debajo permanece una cubierta vegetal densa, donde aparecen *Brachypodium pinnatum*, *Carex flacca* y *Bromus erectus*, como especies dominates. Y Junto a ellas, otras de mayor calidad forrajera: *Dactylis glomerata*, *Medicago sativa*, *Convulvulus arvensis*, *Medicago lupulina* (un listado más completo puede consultarse en *Lasanta et al.,* 1996 y *Molinillo et al.,* 1997). A pesar de su interés pastoral, su contribución a la alimentación del ganado es muy escasa (contribuyen con el 5% de las necesidades alimentarias totales, según *García-Ruiz y Lasanta,* 1993), ya que tan sólo los campos abandonados más recientemente se pastan a finales de primavera y principios de otoño, porque el estrato arbustivo impide el acceso del ganado al resto.

Los núcleos de población y el río con su cauce, barras y vegetación ocupan las 81 ha restantes.

Selección de campos abandonados en los tres escenarios y balance estacional de pastos

Un balance sencillo del potencial pascícola entre la estación cálida y la fría demuestra el claro desequilibrio existente. Teniendo en cuenta las equivalencias señaladas en el apartado de métodos, los puertos tienen una capacidad para alimentar a 3.318 UGM durante 120 días, mientras que los prados cultivados sólo a 865 UGM durante los 8 meses restantes.

La figura 3 incluye los campos abandonados recuperables en los tres escenarios, el espacio agrícola actual y las laderas abandonadas que deben seguir la sucesión natural. En los escenarios 1 y 2 las áreas de transformación en prados de siega son muy escasas (7,5 ha y 13,5 ha, respectivamente), localizándose próximas al cauce del Estarrún, coincidiendo con pies de vertiente de pendientes suaves En el escenario 3, los prados de siega se incrementan considerablemente (hasta 83,9 ha) distribuyéndose por diferentes laderas del Valle. Los prados de diente presentan, lógicamente, la misma superficie (564,1 ha) y distribución en los tres escenarios.

La recuperación de campos abandonados para uso ganadero representaría incrementar la oferta pastoral durante la estación fría en 690 UGM en el escenario 1, en 701 UGM en el escenario 2 y en 828 UGM en el escenario 3. El balance estacional de recursos forrajeros en la situación actual y en los tres escenarios analizados tendería a ajustarse, de forma casi similar

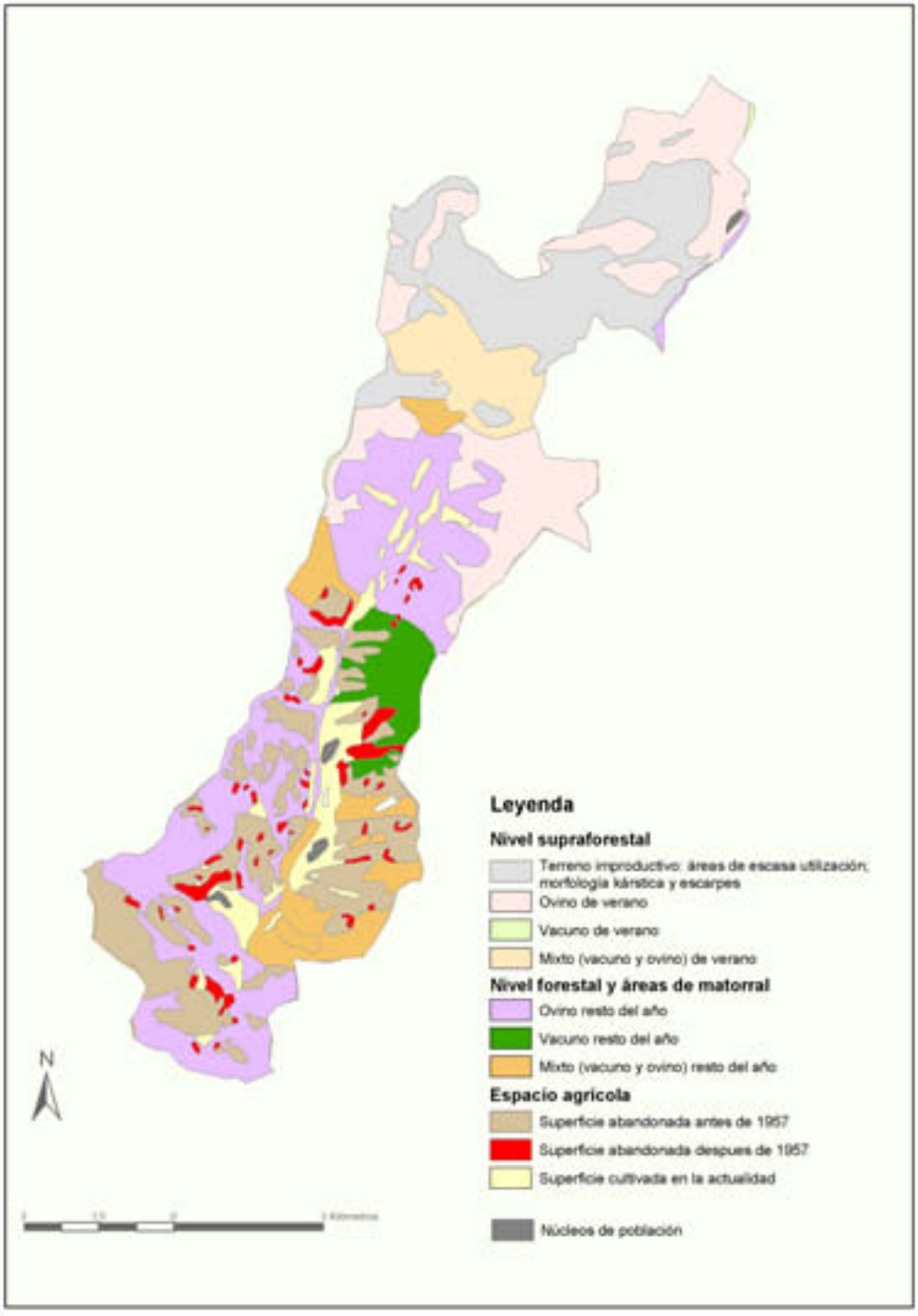


Figura 2. Mapa de usos del suelo del valle de Aísa

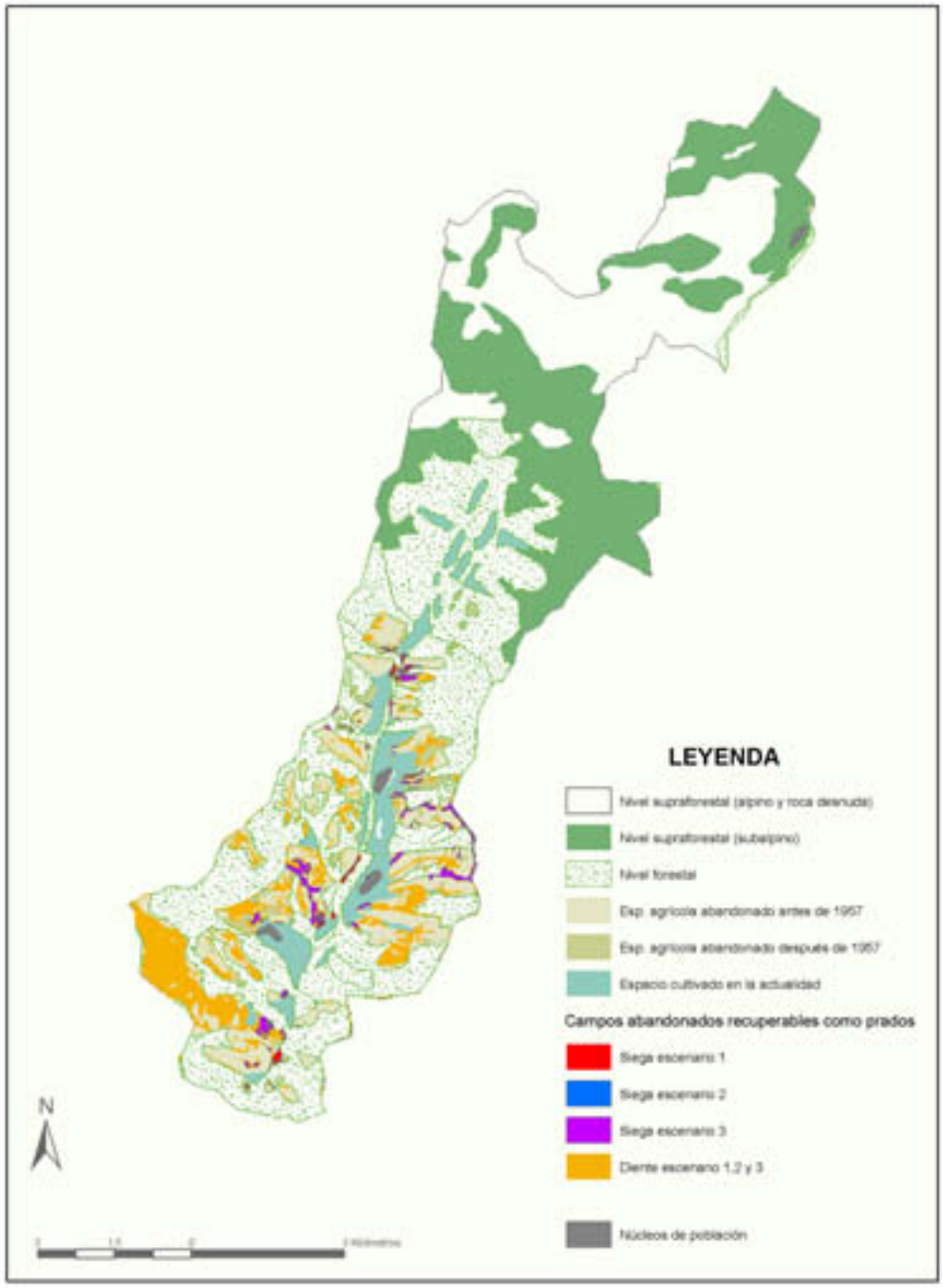


Figura 3. Campos abandonados que podrían transformarse en prados.

en los dos primeros escenarios y de forma más manifiesta en el escenario 3 (ver figura 4), que quizá debería ser la alternativa preferida, dado que tampoco representa una amenaza para la conservación del suelo. Aún con todo, se mantendría un desequilibrio entre la estación cálida y la fría de 1625 UGM. Este hecho plantea la posibilidad de alquilar puertos a rebaños de otros municipios, en el caso de que se quisieran apurar todos los pastos de verano.

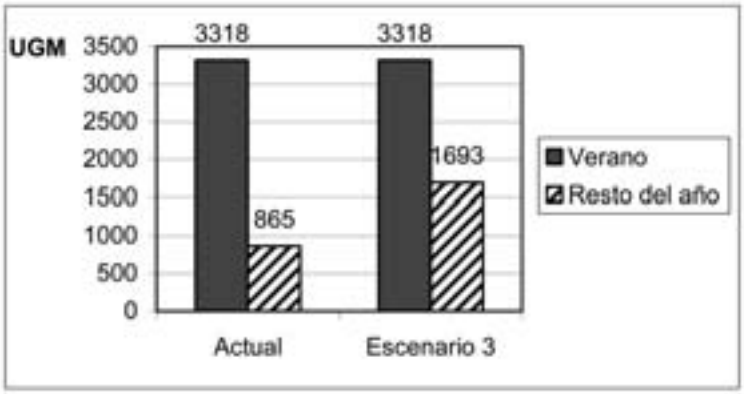


Figura 4. Balance estacional de recursos forrajeros en la actualidad y con la recuperación de campos abandonados.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La ganadería extensiva debería ser una de las actividades económicas fundamentales para la reactivación de áreas de montaña deprimidas, como el Pirineo. Conviene tener presente que esta montaña cuenta con abundancia de pastos comunales (prácticamente gratuitos), de elevada calidad, que han sido aprovechados durante milenios con ganadería extensiva. Esta ha constituido tradicionalmente la base económica de la sociedad y uno de los factores determinantes en la creación de un paisaje de gran diversidad, que sólo puede mantenerse con la presencia permanente de rebaños (*Vicente et al.,* 2000 a; *Canals y Sebastià,* 2000). Sin embargo, desde mediados del siglo XX, la ganadería pirenaica sufre una profunda crisis, en parte ligada al desequilibrio estacional de pastos (*García-Ruiz y Lasanta,* 1993).

En este trabajo se ha tratado de presentar tres posibles escenarios de cambio que pretenden recuperar los mejores campos abandonados para su transformación en prados. Ello supondría en el escenario más optimista reducir el desequilibrio en la oferta de pastos en un 24,9%, pasando de un déficit actual durante la estación fría del 73,9% a un 49%. Disminuir el actual desequilibrio contribuiría a la formación de explotaciones de mayor tamaño, más rentables y con mayores garantías de continuidad (*Manrique et al.,* 1999) y, por otro lado, a un mejor aprovechamiento de los pastos de verano, que en la actualidad sufren un proceso intenso de degradación por la baja carga ganadera que soportan (*Camarero y Gutiérrez,* 2002). Desde una perspectiva ambiental, la sustitución de áreas de matorral por prados crearía una estructura vegetal más compleja y fragmentada, que favorecería el control de posibles fuegos (*Vicente et*

al, 2000 a) y mejoraría la estructura y calidad estética del paisaje, otro recurso básico para el desarrollo del Pirineo y para el mantenimiento de la biodiversidad (*Lasanta et al.,* en preparación).

En el proceso de selección de campos abandonados recuperables el apoyo de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica parece imprescindible, por su capacidad para almacenar, gestionar y jerarquizar grandes volúmenes de datos espaciales (*Cook y Norman,* 1996), para visualizar los escenarios resultantes (*Richter y Mendler,* 1995), y por sus posibilidades para calcular los efectos de las medidas de planificación territorial (*Herrmann y Osinski,* 1999). La planificación territorial exige cada vez más integrar variables físicas y humanas, para poder discriminar espacialmente áreas y corredores de distinta capacidad de acogida de usos del suelo y actividades socioeconómicas, de calidad ambiental muy diversa y de respuesta a posibles actuaciones humanas, mucho más en áreas de montaña por su alta fragilidad y vulnerabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con el apoyo financiero del proyecto de investigación: *"Efectos erosivos del fuego a lo largo de un gradiente climático. Aportaciones para la gestión de áreas quemadas"* (REN2002-00133/GLO), financiado por la CICYT.

REFERENCIAS:

Arnáez, J. y Larrea, V. (1994): "Erosion models and hydromorphological functioning on hill-roads (Iberian System, La Rioja, Spain)". *Zeitschrift Für Geomorphologie*, Vol 38 (3), pp. 343-354.

Ascaso, J. (1988): "Pastos arbustivos y forestales del Prepirineo aragonés occidental. Aportaciones a su conocimiento y tipificación", *XXVIII Reunión Científica de la SEEP*, Almería, pp. 51-55.

Burnside, N.G., Smith, R.F. y Waite, S. (2002). "Habitat suitability modelling for calcareous grassland restoration on the South Downs, United Kingdom". *Journal of Environmental Management*, Vol. 65, pp. 209-221.

Camarero, J. y Gutiérrez, E. (2002): "Plant species distribution across two contrasting treeline ecotones in the Spanish Pyrenee" *S. Pant Ecology*, Vol. 162, pp. 247-257.

Canals, R.M. y Sebastià, M.T. (2000): "Analyzing mechanisms regulating diversity in rangelands through comparative studies: a case in the southwestern Pyrenees". *Biodiversity and Conservation*, Vol 9, pp. 965-984.

Cook, H.F. y Norman, C. (1996): "Targeting agri-environmental policy. An analysis relating to the use of Geographical Information Systems". *Land Use Policy*, Vol. 13(3), pp. 217-228.

Errea, M.P. (1999): "Gestión territorial e investigación científica con Sistemas de Información Geográfica en el Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). En: L. Lain (Ed.), *Los Sistemas de Información Geográfica en los riesgos naturales y en el medio ambiente*, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp.176-189.

Ferrer, C. (1988): "Los recursos pascícolas del Pirineo Aragonés", *XXVIII reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos*, Jaca, 23-65.

Fillat, F. (1980). *De la trashumancia a las nuevas formas de ganadería extensiva. Estudio de los valles de Ansó, Hecho y Benasque*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

García-González, R., Hidalgo, R. y Montserrat, C. (1990): "Patterns of livestock use in time and space in the summer ranges of western Pyrenees: A case study in the Aragon Valley. Mountain Research and *Development*, Vol 10(3), pp. 241-255.

García-Ruiz, J.M. y Balcells, E. (1978): "Tendencias actuales de la ganadería en el Alto Aragón". *Estudios Geográficos*, Vol 153, pp. 519-528.

García-Ruiz, J.M. y Lasanta, T. (1990): "Land-use changes in the Spanish Pyrenees". *Mountain Research and Development*, Vol 10(3), pp.267-279.

García-Ruiz, J.M. y Valero, B. (1997): "Procesos geomorfológicos históricos y su relación con la actividad humana en el Pirineo central español". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, Vol. 22-23, pp. 33-56.

Herrmann, S. y Osinski, E. (1999): "Planning sustainable land use in rural areas at different spatial levels using GIS and modelling tools". *Landscape and Urban Planning*, Vol. 46, pp. 93-101.

Lasanta, T. (1989): *Evolución reciente de la agricultura de montaña: El Pirineo aragonés*. Geoforma Ediciones, Logroño, 220 pp.

Lasanta, T., Errea, M.P., García-Ruiz, J.M. y Molinillo, M. (1996): "Recuperación de antiguos campos agrícolas para el desarrollo de la ganadería extensiva: Primeros resultados en el valle de Aísa (Pirineo Aragonés)", *VIII Coloquio de Geografía Rural*, Jaca, pp. 223-236.

Lasanta, T. y García-Ruiz, J.M. (en prensa): *La Estación Experimental Valle de Aísa: Escorrentía y erosión en diferentes usos del suelo del Pirineo Central Español*. MAPA, Madrid.

Lasanta, T., Vicente, S.M. y Cuadrat, J.M. (2000): "Marginación productiva y recuperación de la cubierta vegetal en el Pirineo: un caso de estudio en el valle de Borau". *Boletín de la AGE*, Vol. 29, pp. 5-28.

Lasanta, T., Vicente, S.M., González-Hidalgo, J.C. y Sferi, E. (en preparación): *Consequences of alternative management strategies on landscape structure and diversity: Evaluation in the Central Spanish Pyrenees using Geographical Information Systems*.

Lee, J.T., Baley, N. y Thompson, S. (2002): "Using Geographical Information Systems to identify and target sites for creation and restoration of native woodlands: a case study of the Chiltern Hills, UK". *Journal of Environmental Management*, Vol. 65, pp. 25-34.

Manrique, E., Olaizola, A.M., Bernués, A., Maza, M.T. y Sáez, A. (1999): "Economic diversity of farmland systems and posibilitéis for structural adjustment in mountain livestock farms". *Options Méditerranénnes*, Vol.25 (B), pp.81-94

Marinas, A., García-González, R., Aldezábal, A., Palacio, S. y Gómez García, D. (2004): "Interés ecológico y pastoral del erizón (Echinospartum horridum)", *XLIV Reunión de la SEEP*, Salamanca, pp. 117-122.

Molinillo, M., Lasanta, T. y García-Ruiz, J.M. (1997): "Managing degraded landscape after farmland abandonment in the Central Spanish Pyrenees". *Environmental Management*, Vol. 21, pp. 587-598.

Montserrat, J. (1992): *Evolución glaciar y postglaciar del clima y la vegetación en la vertiente sur del Pirineo:* Estudio palinológico. Instituto Pirenaico de Ecología, Jaca, 147 p.

Nogués, D. y Martínez-Rica, J.P. (2004): "Factors controllig the spatial species richneess pattern of tour groups of territorial vertebrates in an area between two different biogeographic regions in northern Spain". *Journal of Biogeography*, Vol. 31,pp. 629-640.

Pinilla, V. (1995): *Entre la inercia y el cambio. El sector agrario aragonés*: 1850.1935. MAPA, Madrid 456 p.

Remón, J.L. (1997): *Estructura y producción de pastos en el Alto Aragón Occidental*. Tesis Doctoral. Universidad de Navarra.

Remón, J.L. y Gómez, D. (1989): "Comunidades vegetales y su distribución altitudinal del puerto de Aísa (Pirineo Occidental)". *Acta Biológica Montana*, Vol. 9, pp. 283-290.

Richter, C. y Mendler, S. (1995): "Multimedia for the landscape". *Garten + Landschaff*, Vol. 11, pp. 14-17.

Ruiz Flaño, P. (1993): *Procesos de erosión en campos abandonados del Pirineo*. Geoforma Ediciones, Logroño, 191 p.

Soler, M. y Puigdefábregas, C. (1972): "Esquema litológico del Alto Aragón Occidental". *Pirineos*, Vol.96, pp. 5-15.

Valderrábano y Torrano, (2000):" The potencial for using goats to control Genista scorpius shrubs in European black pine stands". *Forest Ecology and Management*, Vol. 126, pp. 377-383.

Vicente, S.M., Lasanta, T. y Cuadrat, J.M. (2000): "Influencia de la ganadería en la evolución del riesgo de incendio en función de la vegetación en un área de montaña: El ejemplo del valle de Borau". *Geographicalia*, Vol. 38, pp. 33-57.

Vicente, S.M., Lasanta, T. y Cuadrat, J.M. (2000 a): "Transformaciones en el paisaje del Pirineo como consecuencia del abandono de las actividades económicas tradicionales". *Pirineos*, Vol. 155, pp. 111-133.

Vicente, S.M., Lasanta, T. y Romo, A. (2003): "Variabilidad espacial y diferencias estacionales en la producción vegetal de los usos del suelo en el Pirineo Central español. *Ería*, Vol. 62, pp. 325-339.

Relaciones entre NDVI, variables topográficas y vegetación en pastos supraforestales del Pirineo

A. Campo, A. Marinas, R. García-González, D. Gómez y M. Gartzia

Instituto Pirenaico de Ecología CSIC, Apdo. 64, 22700 Jaca (Huesca).

RESUMEN

Numerosos trabajos han mostrado la utilidad de los índices de vegetación espectrales como estimadores de la productividad vegetal en diferentes tipos de ecosistemas. Sin embargo, en medios de alta montaña han sido menos utilizados, quizás por las alteraciones que produce la mayor rugosidad del relieve. En este trabajo preliminar evaluamos la utilidad de uno de estos índices (NDVI) para caracterizar las diferentes comunidades de pastos supraforestales pirenaicos y la posible influencia de los factores topográficos en su variabilidad. Se ha dispuesto de tres imágenes procedentes de los satélites Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM correspondientes al inicio (junio), mitad (agosto) y final (octubre) del período vegetativo. Se han confeccionado dos modelos digitales de elevaciones a partir de mapas de escala 1: 25.000 y 10.000 y se ha dispuesto también de un mapa de vegetación digitalizado. Hemos trabajado a dos escalas espaciales distintas. Las relaciones entre NDVI y variables topográficas se han estudiado principalmente en una zona de pastos estivales de 778 km² en el Pirineo occidental español, y las relaciones con la vegetación, en un área más reducida de 1320 ha incluida en la anterior. Los NDVI mostraron relaciones significativas con todas las variables ensayadas (altitud, orientación, pendiente e insolación), pero la que mejor determina su variabilidad es la altitud, con la que presentó una alta correlación inversa. Los NDVI fueron capaces de distinguir entre diferentes tipos de pasto, siendo el NDVI de octubre el que mostró mayor capacidad discriminatoria. Sin embargo los NDVI de junio y agosto son los que presentaron mejores relaciones con la producción vegetal.

***Palabras Clave**: Índices espectrales, altitud, producción vegetal, pastos de puerto.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

Many works have shown the usefulness of spectral vegetation indices to estimate vegetation productivity in different ecosystems. Nevertheless, in high mountain plant communities, that index has been scarcely used, perhaps due to the difficulty caused by the usual rugged terrain and vegetation heterogeneity of these environments. In this preliminary work, we evaluate the usefulness of one of these indices (NDVI) to characterize the different Pyrenean supraforestal plant communities as well as the possible influence of the topographical factors in its variability. We have used three satellite Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM images, corresponding to the beginning (June), the middle (August) and the ending (October) of the vegetative period. Two elevation digital models has been made from topographic maps (scale 1: 25.000 and 10.000) and a digitalized vegetation map has been also used. We have worked at two to different spatial scales. Relationships between NDVI and topographic variables has been studied mainly in a 778 km^2 supraforestal pastures area of the Spanish western Pyrenees, while the relationships between NDVI and vegetation has been determined in a smaller area (1320 ha) included in the former. The NDVI values have shown significant relationships with all the considered variables (altitude, aspect, slope and exposure), but altitude has appeared as the best indicator of variability, showing a negative correlation with the index. The NDVI seem to be capable to discriminate different pastures communities, NDVI of October showing the best capacity to discriminate. However, June and August NDVI values showed the highest correlation with the above-ground vegetal production.

***Key Words**: Spectral indices, altitude, plant production, mountain pastures.*

INTRODUCCIÓN

Los pastos supraforestales ocupan una considerable extensión en los Pirineos y en otros sistemas montañosos de la Península ibérica. Constituyen un importante recurso forrajero para el ganado y los herbívoros silvestres durante el verano, alcanzando producciones notables de hierba de buena calidad (*Montserrat y Fillat*, 1990). Este tipo de pastos han conformado la base de los sistemas ganaderos tradicionales y en la actualidad constituyen también un importante recurso estratégico para sistemas basados en la ganadería ecológica y el desarrollo sostenible. Sin embargo, la información disponible sobre las características productivas de estas comunidades herbáceas es bastante escasa. Una posible causa, además de su gran heterogeneidad estructural, es la necesidad de realizar muestreos suficientemente representativos de grandes superficies poco accesibles. La creciente utilización de diversos índices de vegetación para la estimación de la productividad vegetal, podrían constituir una técnica interesante para paliar este problema. De hecho ha sido aplicada satisfactoriamente en grandes áreas pastorales ("rangelands") de diversas partes de mundo: pradera norteamericana (*Paruelo et al.,* 1997), Pampa argentina (*Paruelo and Golluscio,* 1994) o estepas de Mongolia (*Christensen et al.,* 2003).

En este trabajo preliminar estudiamos la posible utilidad de uno de estos índices (NDVI) para el reconocimiento y estimación productiva de los pastos pirenaicos. Un problema adicional es que el relieve abrupto, en donde se encuentran los pastos de alta montaña, puede ser causa de errores de los parámetros estimados a partir de imágenes de satélite (*Roderick et al.,* 2000). Por ello hemos explorado también las relaciones entre NDVI y variables topográficas en nuestra área de estudio.

Trabajamos a dos escalas espaciales distintas. Las relaciones entre comunidades vegetales y NDVI se han estudiado principalmente en un área pastoral reducida (1320 ha), de la cual se dispone de un detallado mapa de vegetación digitalizado. Sin embargo, para obtener una mayor representatividad de las variables topográficas se ha preferido trabajar en una zona más amplia (los puertos estivales de la mitad occidental del Pirineo aragonés), en la cual se encuentra incluida la anterior.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de los puertos estivales del Pirineo occidental (PEPO) tiene una extensión de 778 km^2 y un gradiente altitudinal de 950 a 3146 m, con orientación sur dominante (Figura 1). Se trata de un área de pastos de alta montaña, en donde el uso principal es el pastoreo estival

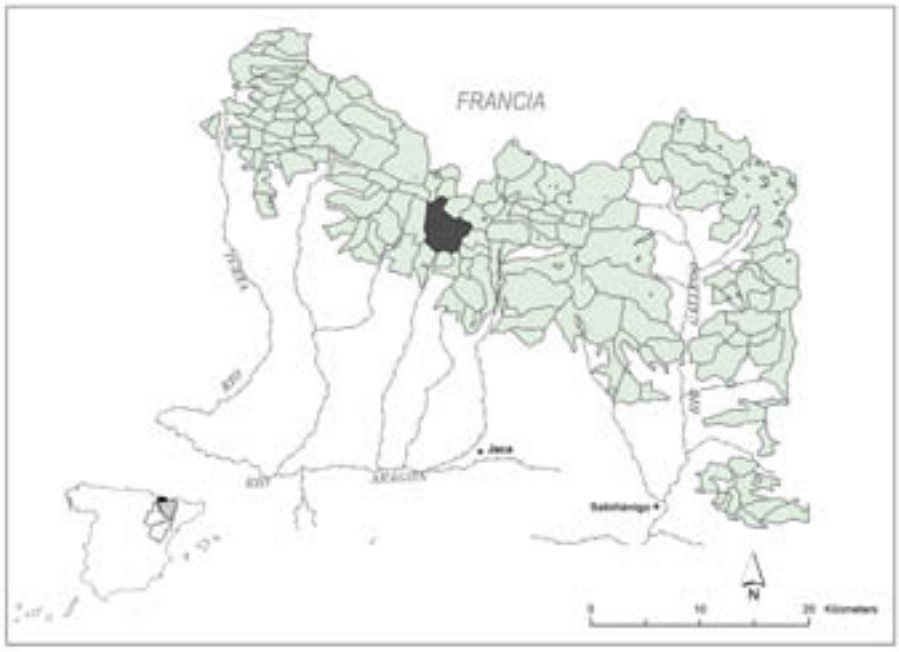


Figura 1. Mapa de situación de las áreas de estudio. En sombrado claro, área de los Puertos estivales del Pirineo Occidental (PEPO). En sombreado oscuro área del Puerto de Aisa (PA).

de ganado local y trashumante, aunque en la actualidad adquieren una importancia creciente las actividades lúdicas. Administrativamente está constituida por cerca de 100 unidades pastorales (puertos) de tamaño variable (*Latorre et al.,* 1978), una de las cuales (Puerto de Aisa, PA) se ha tomado como área reducida para el estudio de la vegetación. Su superficie es de 1320 ha y el gradiente altitudinal de 1550 a 2680 m. Puede considerarse un puerto representativo del área ampliada (PEPO) en su sector calizo. En ambas áreas el tipo de vegetación principal son los pastos supraforestales, en los que pueden distinguirse una gran variedad de comunidades diferentes (*Remón y Gómez*, 1989). En las partes altas la cobertura vegetal es muy escasa y predominan los pedregales, los cantiles y el suelo desnudo. En las partes bajas es posible encontrar una pequeña proporción de especies leñosas, en donde predominan *Juniperus comunis*, *Buxus sempervirens*, *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica*.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se han calculado tres valores de NDVI correspondientes al inicio del período vegetativo (NDVI-Jun), a la fase de madurez (NDVI-Ago) y al período de senescencia (NDVI-Oct). Para ello hemos utilizado dos escenas 199/30 del satélite Landsat 5 TM correspondientes al 26 de junio de 1993 y al 24 de agosto de 1991, y una escena 199/30 del satélite Landsat 7 ETM con fecha 15 de octubre de 1999. Aunque las imágenes pertenecen a años diferentes, hemos considerado que la diferencia de dos meses entre ellas puede ser suficiente como para paliar las posibles diferencias fonológicas interanuales.

Las escenas se corrigieron radiométricamente mediante una corrección atmosférica realizada por los métodos basados en el objeto oscuro (*Chavez*, 1988), asumiendo que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (agua, zonas en sombra) deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero, y el hecho de que no lo sea es debido a la dispersión atmosférica. Para ello se restaron a todos los niveles digitales (ND) de cada banda el mínimo de esa misma banda. Además, se convirtieron los ND originales de la imagen en valores de reflectancia (*Chuvieco*, 2002). Esta última, al tratarse de una variable física, nos permite comparar valores de un mismo o distinto sensor a lo largo del tiempo

Como trabajamos en dos áreas de escalas diferentes, previamente a la normalización topográfica se procedió al recorte de las imágenes de las zonas de estudio. Las correcciones geométricas se aplicaron en todas las subescenas que incluían cada área de estudio. Se tomaron de 20 a 25 puntos de control y se aplicó una función de transformación polinomial de segundo grado. La imagen correspondiente a junio se corrigió sobre hojas del Mapa Topográfico Nacional de escala 1:25.000 en los dos recortes. Las dos restantes imágenes se corrigieron geométricamente sobre la primera imagen buscando puntos comunes, siempre los mismos. El error cuadrático medio del ajuste polinómico no superó el píxel en ninguno de los casos. El remuestreo de los números digitales a su nueva posición corregida se realizó a partir del método del vecino más cercano. Posteriormente se remuestrearon las imágenes en píxeles de 20 m haciéndolos coincidir con los del modelo digital de elevaciones (MDE), siendo éste una imagen raster obtenida del mapa topográfico a escala 1: 25.000 y equidistancia de 20 m, con un tamaño de píxel de

20 m. La corrección topográfica se ha hecho a partir del MDE según el modelo de superficies no lambertianas de Minnaert (*Minnaert,* 1941).

Las variables topográficas extraídas del MDE fueron la altitud (Alt), expresada en metros, la pendiente (Pend) y la orientación (ORT), expresadas en grados. La orientación fue desglosada en dos componentes (Ort N-S y Ort E-W) para transformarlas en variables continuas con valores de 0 a 180, haciendo coincidir el 0 con el N y el E, y el valor 180 con el S y el W (*Pereira et al.,* 1990; *Gross et al.,* 2002).

En ambientes fríos la radiación solar puede ser un limitante de la producción vegetal (*Fridrikksson*, 1986); por ello hemos considerado interesante explorar también las relaciones de un estimador de la insolación con el NDVI, para diferentes periodos del año. El índice de exposición solar proporciona una relación entre la radiación solar incidente sobre un lugar del terreno y una superficie de referencia horizontal y libre de sombras. Se han estimado los índices de exposición para cinco fechas del año: para las declinaciones de 23º y -23º el 21 de junio (Ins-Jun) y el 21 de diciembre (Ins-Dic) respectivamente, para la declinación de 12º y -12º el 23 de agosto (Ins-Ago) y el 22 de noviembre (Ins-Nov) respectivamente, y para declinación 0º (Ins-0) en los equinoccios de marzo y septiembre (*Felicisimo*, 1994).

Para el área de estudio del Puerto de Aisa se ha dispuesto además de un mapa de vegetación digitalizado a escala 1:10.000, basado en unidades fitosociológicas (*García-González et al.*, 1991a). Posteriormente, los polígonos de dicho mapa se han reajustado mediante una ortoimagen pancromática a escala 1:5000. Las unidades de vegetación se han reagrupado en categorías más amplias, bien como alianzas fitosociológicas (*Nardion*, *Bromion*, etc) o como unidades fisionómicas (gleras o pedrizas, majadas). La categoría "Sin vegetación" agrupa en realidad a comunidades con vegetación muy escasa (cantiles, fisuras y rellanos de roquedos) y la categoría leñosas agrupa principalmente a enebrales y masas aclaradas de *Pinus sylvestris*. Los datos de producción de las diferentes comunidades de pasto pirenaicas se han extraído a partir de datos propios y de revisión bibliográfica (*García-González et al.,* 2002). Para la categoría "Leñosas" los datos de producción se han tomado de *Puigdefábregas* (1981). A partir de los formatos dgn con curvas de nivel de equidistancia 5 m que acompañaban la ortoimagen 1:5000, se ha elaborado un MDE más detallado para esta zona, del cual se han extraído las variables Altitud, Pendiente, Orientación N-S y Orientación E-W para el Puerto de Aisa. Los datos de insolación corresponden al MDE de la escala 1:25.000.

Para el área de estudio PEPO se seleccionaron 1000 puntos (píxeles) al azar y para cada uno de ellos se calcularon los valores de NDVI y de las variables topográficas. Los datos negativos de orientación (zonas llanas) y los de NDVI igual a cero se eliminaron. En el área PA se tomaron 100 puntos para cada una de las 10 unidades de vegetación y se calcularon los valores de NDVI y variables topográficas para cada píxel. El tratamiento estadístico de los datos se ha realizado mediante el cálculo de correlaciones lineales y un análisis de componentes principales (ACP) para analizar las relaciones entre el NDVI y las variables topográficas. Las variables se tipificaron restando la media y dividiendo por la desviación típica. Los valores de NDVI y de las variables topográficas entre comunidades vegetales se han comparado mediante pruebas de Kruskal-Wallis. Posteriormente se compararon las comunidades por parejas para las variables NDVI mediante pruebas de Kolmogorov-Smirnov. Las medias de todas las variables para

cada comunidad se han correlacionado con los valores de producción y de NDVI para estudiar su grado de relación con las mismas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Área de estudio de los Valles Occidentales (PEPO)

El análisis de componentes principales (Figura 2) acumula en sus dos primeros ejes un 66,3% de la varianza total. El eje II podría interpretarse como un gradiente de cobertura vegetal y agrupa en el extremo positivo a todos los valores de NDVI y los contrapone a los de la altitud. El eje I no representa ningún gradiente concreto, pero agrupa en un extremo a todos los valores de insolación y los asocia a la componente N-S de la orientación. De ellas se destaca la insolación en junio, que queda segregada del resto. La pendiente y la orientación E-W no quedan asociadas a ninguna variable ni gradiente en particular.

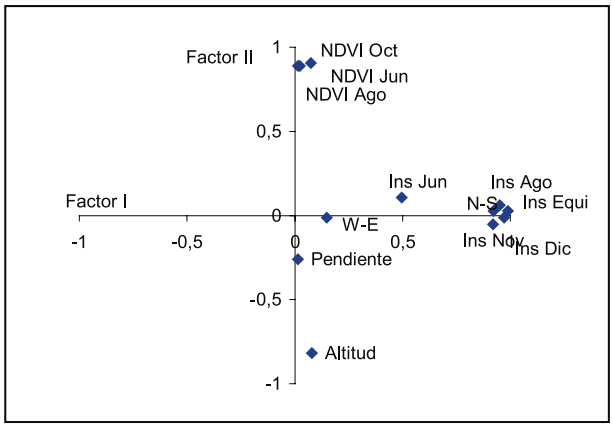


Figura 2. Representación gráfica del ACP realizado con los NDVI de las tres imágenes de satélite y las variables topográficas. Para las abreviaciones véase el apartado de Métodos.

En el Cuadro 1 se exponen los coeficientes de correlación entre los NDVI y las variables topográficas. Los NDVI de los tres períodos vegetativos están muy correlacionados entre sí. La variable que más se correlaciona con ellos es la altitud, especialmente con el NDVI del mes de octubre. La relación entre los NDVI y la altitud es inversa. La pendiente muestra también una correlación negativa con los NDVI, aunque con valores de *r* menores que la altitud. En el caso de la pendiente, el NDVI que más se relaciona negativamente con ella es el del mes de junio. Las insolaciones potenciales se asocian positivamente con los valores de NDVI, aunque con valores muy bajos de *r*. La proximidad de la fecha de insolación con la del NDVI es la que parece afectar más positivamente en la relación entre ambas variables. La componente Norte-

Sur de la orientación también muestra una débil correlación con los índices de vegetación, pero no la componente Este-Oeste. En el primer caso, cuanto más hacia el sur es la orientación mayor sería el NDVI.

Cuadro 1. Coeficientes de correlación (*r*) entre los NDVI de los diferentes períodos vegetativos y diversas variables topográficas. En negrita valores significativos (p < 0,001). (N oscila entre 872 y 982).

	NDVI Junio	**NDVI Agosto**	**NDVI Octubre**
NDVI Agosto	**0,76**		
NDVI Octubre	**0,75**	**0,78**	
Insolación-Junio	**0,15**	**0,11**	0,02
Insolación-Agosto	**0,13**	**0,14**	**0,08**
Insolación-Equinoccios	**0,10**	**0,12**	**0,10**
Insolación-Noviembre	**0,06**	**0,09**	**0,09**
Insolación-Diciembre	0,01	0,04	**0,08**
Altitud (m)	**-0,63**	**-0,63**	**-0,71**
Pendiente (º)	**-0,25**	**-0,17**	**-0,09**
Orientación N-S (º)	**0,07**	**0,08**	**0,11**
Orientación E-W(º)	-0,03	-0,03	0,02

Las relaciones encontradas coinciden relativamente bien con lo que se conoce de las características productivas de la vegetación en la alta montaña. En este ambiente la altitud es el principal factor ecológico que determina los cambios cualitativos y cuantitativos de la vegetación (*Vigo,* 1987). La altitud impone un gradiente decreciente de temperatura y creciente de pluviometría, con el consiguiente acortamiento del período vegetativo (*Del Barrio et al.,* 1990) y de la producción primaria neta (*Menzi et al.,* 1990). Así pues, es esperable que los NDVI, como estimadores de la biomasa fotosintéticamente activa (*Roderick et al.,* 2000), varíen inversamente con la altitud. A mayor altitud la pendiente suele ser más pronunciada, de ahí que esta última también se asocie negativamente con la biomasa. La insolación y consiguiente aumento de la radiación solar, también parece influir positivamente en el aumento de la productividad (*Menzi et al.,* 1990), lo cual explicaría las relaciones positivas con el NDVI en montaña.

Área de estudio del Puerto de Aisa

En el Cuadro 2 figuran los datos estadísticos básicos de las diferentes variables para cada comunidad vegetal y en la Figura 3 se representan los valores medios junto con los límites de confianza al 95%, para los NDVI de las tres imágenes. Los test de Kruskal-Wallis pusieron de manifiesto que existen diferencias significativas entre comunidades para todas las variables (p < 0,001). En general las comunidades que poseen mayor cobertura vegetal (por ej. majadas,

Bromion, higrófilas, *Nardion*) son las que presentan mayores valores del NDVI. Algunas comunidades presentan una respuesta espectral diferente a la de otras (Figura 3), pero en muchos casos no es posible diferenciar estadísticamente entre los NDVI de algunas comunidades. Mediante tests de Kolmogorov-Smirnov aplicados entre diferentes comunidades por parejas, hemos podido comparar sus valores de NDVI. Así por ejemplo, para el NDVI de junio cinco pares de comunidades no se diferencian significativamente: *Bromion*-majadas, *Bromion*-higrófilas, higrófilas-*Nardion*, *Nardion-Festucion eskiae* y *Festucion gautieri-Primulion*. Para el NDVI de agosto siete pares de comunidades no muestran diferencias significativas: *Bromion*-majadas, *Bromion-Nardion*, *Bromion*-leñosas, *Festucion eskiae*-majadas, *Festucion eskiae*-leñosas, *Festucion eskiae*-higrófilas y majadas-*Nardion*. Por último, para el NDVI de octubre sólo tres pares de comunidades no muestran diferencias significativas: majadas-*Bromion*, majadas-leñosas y *Primulion-Festucion gautieri*. El valor más alto del NDVI en octubre corresponde a las leñosas, que en su mayoría están compuestas por especies perennifolias (enebros y pinos). Al final del período vegetativo las herbáceas se han secado parcialmente y suelen tener menor biomasa fotosintéticamente activa, por lo que su NDVI podría ser menor.

Cuadro 2. Valores medios y desviación típica (entre paréntesis) de los NDVI y variables topográficas para cada comunidad. *Supf* indica el porcentaje en superficie que ocupa cada comunidad. Los datos de producción se han tomado de *García-González et al. (2002*). El tamaño muestral (N) oscila entre 79 y 100, excepto para la producción cuyos datos figuran en la referencia citada.

	Sin ve	**Gleras**	**Brom**	**F.eski**	**F.gaut**	**Higrof**	**Leños**	**Majad**	**Nard**	**Primul**
Supf (%)	32,5	13,2	9,5	0,8	17,0	0,6	6,7	2,1	11,5	6,0
Produc.	0	27	483 (148)	658 (405)	116 (49)	356 (65)	203	392 (142)	378 (129)	297 (122)
NDVI-J	0,28 (0,15)	0,33 (0,17)	0,66 (0,13)	0,60 (0,16)	0,45 (0,15)	0,62 (0,16)	0,59 (0,12)	0,69 (0,10)	0,61 (0,15)	0,44 (0,15)
NDVI-A	0,26 (0,10)	0,32 (0,12)	0,49 (0,08)	0,49 (0,10)	0,37 (0,09)	0,50 (0,10)	0,51 (0,09)	0,47 (0,09)	0,48 (0,08)	0,44 (0,12)
NDVI-O	0,20 (0,14)	0,26 (0,13)	0,55 (0,08)	0,40 (0,08)	0,37 (0,11)	0,51 (0,13)	0,57 (0,10)	0,55 (0,09)	0,47 (0,11)	0,37 (0,11)
Ins-Jun	0,84 (0,10)	0,86 (0,08)	0,90 (0,04)	0,95 (0,03)	0,87 (0,08)	0,90 (0,04)	0,89 (0,04)	0,90 (0,08)	0,88 (0,05)	0,86 (0,10)
Ins-Ago	0,89 (0,14)	0,91 (0,13)	0,93 (0,09)	1,01 (0,04)	0,90 (0,14)	0,93 (0,06)	0,98 (0,07)	0,94 (0,07)	0,88 (0,12)	0,93 (0,11)
Ins-Equ	0,89 (0,25)	0,91 (0,26)	0,91 (0,19)	1,01 (0,11)	0,89 (0,26)	0,86 (0,14)	1,14 (0,42)	0,93 (0,13)	0,81 (0,22)	0,98 (0,21)
Ins-Nov	1,09 (0,41)	1,08 (0,44)	1,03 (0,31)	1,25 (0,18)	1,03 (0,44)	0,98 (0,22)	1,14 (0,42)	1,08 (0,22)	0,87 (0,36)	1,19 (0,37)
Ins-Dic	1,31 (0,75)	1,27 (0,80)	1,09 (0,51)	1,43 (0,33)	1,22 (0,77)	1,01 (0,30)	1,14 (0,42)	1,14 (0,42)	0,89 (0,62)	1,47 (0,69)

Altitud	2144 (215)	2086 (202)	1713 (93)	2109 (118)	1998 (192)	1779 (251)	1652 (117)	1715 (109)	1934 (141)	2198 (157)
Pend	31,5 (13,7)	29,6 (8,9)	21,4 (9,3)	24,7 (7,1)	29,0 (9,9)	13,0 (10,1)	29,0 (7,2)	17,9 (10,9)	24,6 (8,5)	28,3 (15,2)
Ort N-S	114 (43,7)	110 (46,9)	111 (41,9)	116 (22,6)	105 (44,5)	127 (33,5)	142 (33,5)	125 (32,6)	86 (40,6)	122 (44,7)
Ort E-W	104 (52,2)	116 (48,2)	113 (49,3)	132 (48,3)	91 (56,7)	80 (50,6)	91 (42,3)	117 (47,4)	82 (61,0)	93 (48,1)

El NDVI de octubre es el que presenta mayor número de diferencias significativas entre comunidades, lo cual significa que las diferencias en la cubierta verde o la biomasa fotosintéticamente activa entre comunidades son más evidentes en ese mes. Ello podría ser debido a que, al final del periodo vegetativo, la proporción de materia seca es más diferente entre las distintas comunidades, como consecuencia de una estructura específica diferente (por ejemplo, mayor relación dicotiledóneas/gramíneas) (*García-González et al*. 1991b), o por la preferencia diferencial de los herbívoros hacia las distintas comunidades (comunidades más pastadas acumulan menos materia seca, *Aldezaba*l, 2001), o de ambos efectos a la vez. *Clark et al.* (2001) también encontraron que las características espectrales de las plantas al final del período vegetativo podrían ser más útiles para fines de clasificación de la vegetación, ya que el mosaico de plantas verdes y senescentes es mayor en esa época. La posible mayor capacidad discriminatoria del NDVI de octubre, para las diferentes comunidades de pastos supraforestales, podría ser de utilidad en sistemas de clasificación a partir de imágenes de satélite. Las comunidades que no han mostrado diferencias significativas con el NDVI de octubre en este trabajo (majadas, *Bromion*, leñosas, *Primulion* y *Festucion gautieri*) podrían ser discriminadas mediante otras variables topográficas o espectrales (*Friedl et al.,* 1994).

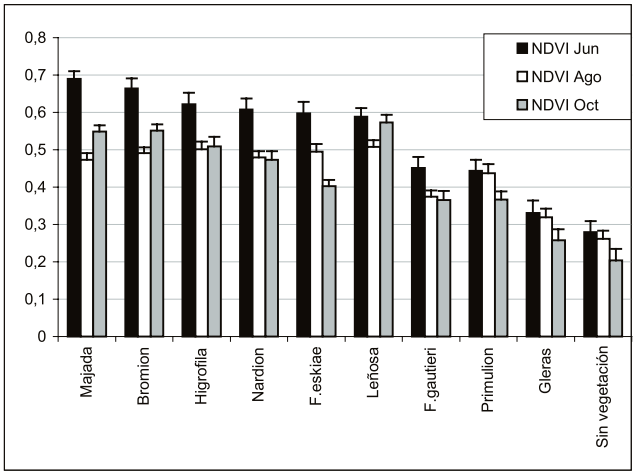


Figura 3. Valores medios de los NDVI de junio, agosto y octubre para las diferentes comunidades de pasto consideradas. Las barras indican los límites de confianza al 95%. (excepto las Leñosas, las comunidades están aproximadamente dispuestas en orden altitudinal creciente).

Si comparamos los NDVI de diferentes fechas para las mismas comunidades, puede observarse que en general los valores del NDVI de junio son más altos y presentan mayores diferencias con los de agosto y octubre (Cuadro 2, Figura 3). Esto podría estar relacionado con el hecho de que durante el período de crecimiento la actividad fotosintética es mayor (*Thoma et al.,* 2002). Las diferencias entre los NDVI de junio y los demás disminuyen a medida que las comunidades se encuentran a mayor altitud (Figura 3).

Los valores medios del NDVI de agosto suelen ser menores que los de octubre en las comunidades de altitud más baja (majadas, *Bromion*, higrófilas, leñosas), y mayores en las comunidades de mayor altitud (*F. eskiae, F. gautieri, Primulion*, gleras), lo cual podría estar relacionado con el hecho de que a mitad de verano en los puertos y a altitudes bajas, la temperatura es más alta que en las cumbres (se admite que en general el gradiente térmico desciende 0,5º por cada 100 m de elevación (*Del Barrio et al.,* 1990). De hecho algunos veranos puede producirse cierta sequía estival en agosto en los puertos calizos. En esas condiciones, las comunidades de baja altitud suelen secarse parcialmente, mientras que las altas se mantienen más verdes, haciendo que el promedio de NDVI-Ago fuera menor en las comunidades bajas (*Gómez et al.,* 1997).

En el Cuadro 3 se muestran los coeficientes de correlación entre los valores medios de los NDVI y de producción de cada comunidad y el resto de variables consideradas. Puede observarse que los valores de NDVI están muy correlacionados entre sí. También se correlacionan positivamente con la insolación de junio, y negativamente con la altitud y la pendiente, tal como sucedía en el área PEPO. En esta ocasión los coeficientes de correlación son más altos, probablemente debido a que, al tomar valores promedio, la dispersión de los datos se reduce. En cuanto a los valores de producción, han mostrado correlación significativa con los NDVI de Junio y Agosto y es casi significativo con el de octubre ($p = 0,06$). Además la producción muestra una alta relación con la insolación de junio y casi significativa con la de agosto. También parece mostrar una cierta relación inversa con la pendiente ($p = 0,07$). Por tanto, considerando los NDVI como predictores de la producción primaria aérea, parece que los mejores estimadores serían los de inicio y mitad del período vegetativo. En un estudio realizado en pastos del área de Montana (USA) para valorar la utilidad del NDVI como predictor de la biomasa y calidad de los mismos, *Thoma et al.,* (2002) también encontraron que el período de junio o principios de julio era el más idóneo para estimar del crecimiento total de la vegetación.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación (*r*) entre la producción primaria aérea y el NDVI con el resto de las variables estudiadas. En negrita valores significativos ($p<0,05$). N = 10 en todos los casos.

	Producción ($g_*m^{-2}{}_*año^{-1}$)	**NDVI Junio**	**NDVI Agosto**	**NDVI Octubre**
NDVI Junio	**0,80**			
NDVI Agosto	**0,81**	**0,93**		
NDVI Octubre	0,60	**0,94**	**0,91**	
Insolación-Junio	**0,88**	**0,72**	**0,73**	0,54

Insolación-Agosto	0,60	0,43	0,56	0,39
Insolación-Equinocio	0,09	0,10	0,29	0,25
Insolación-Noviembre	0,15	-0,18	-0,02	-0,20
Insolación-Diciembre	-0,09	-0,52	-0,38	-0,57
Altitud (m)	-0,25	**-0,75**	**-0,62**	**-0,87**
Pendiente (°)	-0,59	**-0,75**	**-0,63**	**-0,65**
Orientación N-S	0,01	0,16	0,27	0,33
Orientación E-W	0,32	0,01	-0,11	-0,17

CONCLUSIÓN

Los NDVI calculados a partir de imágenes de satélite, al inicio, mitad y final del período vegetativo de los pastos supraforestales pirenaicos, han mostrado relaciones significativas, tanto con factores físicos como de la vegetación, por lo que podrían representar un instrumento interesante para estimar las características estructurales y productivas de estos pastos.

Respecto a los factores físicos, la altitud es la variable que ha mostrado una mayor asociación con la variación de los índices espectrales. Otras variables que también parecen influir en dicha variación, aunque en menor grado, son la pendiente, la insolación (especialmente en junio y agosto), y la orientación en su componente N-S. La altitud y la pendiente influyen negativamente, mientras que el resto de las variables lo hace positivamente.

Las diferentes comunidades de pastos han mostrado diferencias significativas en cuanto a sus valores de NDVI, sin embargo en las comunidades pertenecientes a pastos densos las diferencias son menores. Por otra parte, estos pastos densos pueden ser separados integrando variables topográficas (altitud), u otras capas relacionadas con propiedades del suelo (profundidad, acidez).

El NDVI que parece mostrar mejor capacidad para discriminar entre pastos es el correspondiente al mes de octubre, cuando comienza la senescencia de muchas especies vegetales y el mosaico (heterogeneidad) de materia verde y seca es mayor. Sin embargo, como predictores de la producción primaria aérea, los NDVI de junio y agosto podrían resultar más convenientes.

REFERENCIAS

Aldezabal, A. (2001): *El sistema de pastoreo del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Pirineo Central, Aragón). Interacción entre la vegetación supraforestal y los grandes herbívoros*. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza, pp. 91-94.

Chavez, P.S.J. (1988): "An improved dark-object subtraction techinique for atmospheric scattering correction of multispectral data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, pp. 459-479.

Christensen, L., Coughenour, M.B., Ellis, J.E. and Chen, Z. (2003): "Sustainability of Inner Mongolian grasslands: application of the Savanna model". *Journal of Range Management*, Vol. 56, pp. 319-327.

Chuvieco, E. (2002): Teledetección ambiental. Barcelona, pp. 259-278.

Clark, P.E., Seyfried, M.S. and Harris, B. (2001): "Intermountain plant community classification using Landsat TM and SPOT HRV data". *Journal of Range Management*, Vol. 54, pp. 152-160.

Del Barrio, G., Creus, J. and Puigdefabregas, J. (1990): "Thermal seasonality of the high mountain belts of the Pyrenees". *Mountain Research and Development*, Vol. 10, pp. 227-233.

Felicísimo, A.M. (1994): *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo, pp. 173-199.

Fridrikson, S. (1986): "Factors affecting production and stability of Northern ecosystems". En O. Gudmundsson (Eds.), *Grazing Research at Northern Latitudes*, Plenum Press, NATO Series, New York & London. pp. 27-43.

Friedl, M.A., Michaelsen, J., Davis, F.W., Walker, H. and Schimel, D.S. (1994): "Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite datos". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, pp. 1401-1420.

García-González, R., Gomez, D. and Remón, J.L. (1991a): "Application of vegetation maps to the study of grazing utilization: a case in the Western Pyrenees." *Phytocoenology*, Vol. 3, pp. 251-256.

García-González, R., Gómez, D. and Remón, J.L. (1991b): "Structural changes in supraforestal pastures due to current annual growth and grazing in the Western Pyrenees (Spain)." *Proceedings of the IV th Int Rangeland Congress. 22-26 April 1991*, Association Française de Pastoralisme, Montpellier. pp. 122-126.

García-González, R., Marinas, A., Gómez-García, D., Aldezabal, A. and Remón, J.L. (2002): "Revisión bibliográfica de la producción primaria neta aérea de las principales comunidades pascícolas pirenaicas". En C. Chocarro, F. Santiveri, R. Fanlo, I. Bovet and J. Lloveras (Eds.), *Producción de pastos, forrajes y céspedes*, Universitat de Lleida, Lleida. pp. 245-250.

Gómez, D., Castro, P. and Aldezabal, A. (1997): *Species richness, biomass and plant production in subalpine plant communities in the Spanish Pyrenees*. Universidad de La Laguna. Tenerife, pp. 101-111.

Gross, J.E., Kneeland, M.C., Reed, D.F. and Reich, R.M. (2002): "GIS-based habitat models for mountain goats". *Journal of Mammalogy*, Vol. 83, pp. 218-228.

Latorre, S., Maza, E., Laliena, L. and Sanclemente, F.J. (1978): *Estudio agronómico de la Jacetania. Informe inédito*. Delegación Provincial de Agricultura. Huesca, pp. 63-77.

Menzi, H., Blum, H. and Nösberger, J. (1991): "Relationship between climatic factors and the day matter production of swards of different composition at two altitudes". *Grass and Forage Science*, Vol. 46, pp. 223-230.

Minnaert, M. (1941): "The reciprocity principle in lunar photometry." *Astrophysics Journal*, Vol. 93, pp. 403-410.

Montserrat, P. and Fillat, F. (1990): "The systems of grassland management in Spain". En A. Breymeyer (Ed.), *Managed Grasslands*, Elsevier, Amsterdam. pp. 37-70.

Paruelo, J.M., Epstein, H.E., Lauenroth, W.K. and Burke, I.C. (1997): "ANPP estimates from NDVI for the Central Grasslands region of the United States". *Ecology*, Vol. 78, pp. 953-958.

Paruelo, J.M. and Golluscio, R.A. (1994): "Range assessment using remote sensing in Northwest Patagonia (Argentina)". *Journal of Range Management*, Vol. 47, pp. 498-502.

Pereira, J.M.C. and Itami, R.M. (1991): "GIS- Based Habitat Modeling Using Logistic Multiple Regression: A Study of the Mt. Graham Red Squirrel". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 57, pp. 1475-1486.

Puigdefábregas, J. (1981): *El pinar altoaragonés de Pinus sylvestris; estructura y producción primaria neta*. Tesis doctoral. Universidad de Navarra.

Remón, J.L. and Gómez, D. (1989): "Comunidades vegetales y su distribución altitudinal del Puerto de Aisa". *Acta Biologica Montana*, Vol. 9, pp. 283-290.

Roderick, M.L., Chewings, V. and Smith, R.C.G. (2000): "Remote sensing in vegetation and animal studies". En L. 't Mannetje and R.M. Jones (Eds.), *Field and laboratory methods for grassland and animal production research*, CABI Publising, Wallingford. pp. 205-226.

Thoma, D.P., Bailey, D.W., Long, D.S., Nielsen, G.A., Henry, M.P., Breneman, M.C. and Montagne, C. (2002): "Short-term monitoring of rangeland forage conditions with AVHRR imagery". *Journal of Range Management*, Vol. 55, pp. 383-389.

Vigo, J. and Ninot, J.M. (1987): "Los Pirineos". En M. Peinado-Lorca y S. Rivas-Martinez (Eds.), *La vegetación de España*, Alcalá de Henares Univ, Madrid. pp. 351-384.

Interacción sociedad-medio: predicción del potencial arqueológico de Andalucía

S. Fernández Cacho

Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Dirección General de Bienes Culturales. Consejería de Cultura. Junta de Andalucía. Paseo de los Descubrimientos, 1. 41092-Sevilla.

RESUMEN

El Proyecto "Modelo Andaluz de Predicción Arqueológica" (MAPA) se orienta hacia la elaboración de un mapa del potencial arqueológico de la comunidad autónoma en permanente actualización. Los objetivos principales del MAPA se concretan en el acrecentamiento de la capacidad predictiva para desarrollar una planificación más eficaz de las políticas culturales (estimación de riesgos potenciales en proyectos de ejecución de obras, líneas prioritarias de investigación, medidas preventivas en la ordenación del territorio, etc.)
Entendiendo que el Patrimonio Arqueológico forma parte indisociable del Medio Ambiente, y que el propio medio ha condicionado en gran medida la elección de lugares de asentamiento humano y su preservación hasta el presente, se han agrupado las variables de análisis en torno a tres grupos de indicadores: Indicadores selectivos, de perdurabilidad y de conocimiento.
Este proyecto se desarrolla en colaboración con el Departamento de Geografía Física y Análisis Regional y el de Estadística e Investigación operativa de la Universidad de Sevilla.

Palabras Clave: *Métodos Cuantitativos, SIG, Modelos predictivos, Patrimonio Arqueológico.*

ABSTRACT

The Project "Andalusian Model of Archaeological Prediction" (MAPA in its Spanish acronym) is aimed at the elaboration of a permanently-updated cartography of the Andalusian

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

archaeological potential. Generally speaking, this project seeks to make regional cultural and archaeological policies more robust, incorporating some predictive capacity in them. Specific aspects of this project involve assessment of risk potential in major public works, definition of priorities in lines of research and work, preventive measures to be included as part of land-planning documents, etc.

We depart from the assumption that the archaeological heritage is an inextricable part of the environment: to a large extent, prevailing natural conditions have historically shaped human settlement throughout the landscape. Three sets of variables have been defined for this project, namely selective indicators, durability indicators, and knowledge indicators.

This project has been carried out in collaboration with two departments of the University of Sevilla: Physical Geography and Regional Analysis and Statistics and Operative Research.

***Key Words**: Quantitative Methods. GIS, Predictive Modelling, Archaeological Heritage Management.*

INTRODUCCIÓN

Hasta que el ser humano fue capaz de moldear el medio físico en su propio beneficio, las condiciones naturales del entorno fueron básicas en la elección de determinados lugares para el asentamiento de poblaciones antiguas: la cercanía de recursos hídricos, la riqueza agrícola del suelo, la altitud, el clima, etc.

Las huellas arqueológicas de dichos asentamientos y de otros usos y aprovechamientos del medio a lo largo del tiempo forman parte de la configuración de los territorios y paisajes actuales, y su análisis contribuye a interpretar su historia y a explicarlos desde el punto de vista de su materialización contemporánea.

El estudio de las variables ambientales y culturales adecuadas permitirá, por una parte, avanzar en el conocimiento de los factores que inciden en la distribución de las entidades arqueológicas (EA) registradas en el Sistema de Información del Patrimonio Histórico de Andalucía (SIPHA) y, por otra, delimitar zonas de alto potencial arqueológico como apoyo a la planificación territorial.

Este paso, desde los proyectos de desarrollo de bancos de datos a su tratamiento y análisis espacial, descansa en el convencimiento de que la información patrimonial interesa en relación con el territorio. Las bases de datos se conciben ya no sólo como un terreno activo para el depósito de la información, sino también para la investigación, para el uso en las actividades que se desarrollan en el espacio, cuando éste se ordena en el ámbito del urbanismo, las infraestructuras, la agricultura, etc.

La predicción en Arqueología es algo novedoso en el contexto nacional, aunque ya se ha experimentado en países como Estados Unidos, Canadá, Holanda, Bélgica, Alemania, Croacia o el Reino Unido. El proyecto MAPA se encuentra en una fase inicial en el IAPH y aún no

funciona hacia el exterior. Sin embargo, su planteamiento y posibilidades están en la línea de los que se están poniendo en marcha en sistemas de información avanzados.

Pero no se debe magnificar el instrumento en sí mismo, ya que éste depende de la óptima organización de las bases de datos y de la calidad de la información. En caso contrario, la formulación de hipótesis para investigar o intervenir en el territorio serán inconsistentes. Si esta base no se presenta como un sustento firme, la metodología de trabajo debe adaptarse a los condicionantes que cada caso.

En este trabajo se expone el estado de la cuestión y se incide en aquellos aspectos que se deben tener en consideración a la hora de desarrollar y aplicar en la actualidad un modelo probabilístico, basado en los datos disponibles, ensayando la fiabilidad de la herramienta que se está creando y comparándola con otras existentes en nuestro entorno.

JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En el SIPHA se encuentran registradas algo más de 12000 entidades arqueológicas, que se distribuyen heterogéneamente por el territorio de la comunidad autónoma. Este número representa una densidad de EA de 0.137 EA/km^2 frente a las 3.48 de Dinamarca, y muy por debajo también de Holanda (1.77), Irlanda (1.70), Polonia (1.43) o Escocia (1.39) (*Wheatley y García*, 2002: 158). Presuponiendo que el potencial arqueológico andaluz se situara en niveles semejantes a los de Dinamarca, en el SIPHA se deberían tener registradas más de 300.000 EA. Más realista es quizá la comparación con aquellos otros países que registran densidades en torno a las 1.5/ km^2 y que se acercan a las obtenidas en prospecciones arqueológicas intensivas recientes (*García Sanjuán*, 2004: 189-190), situando la estimación final en torno a las 150.000 EA.

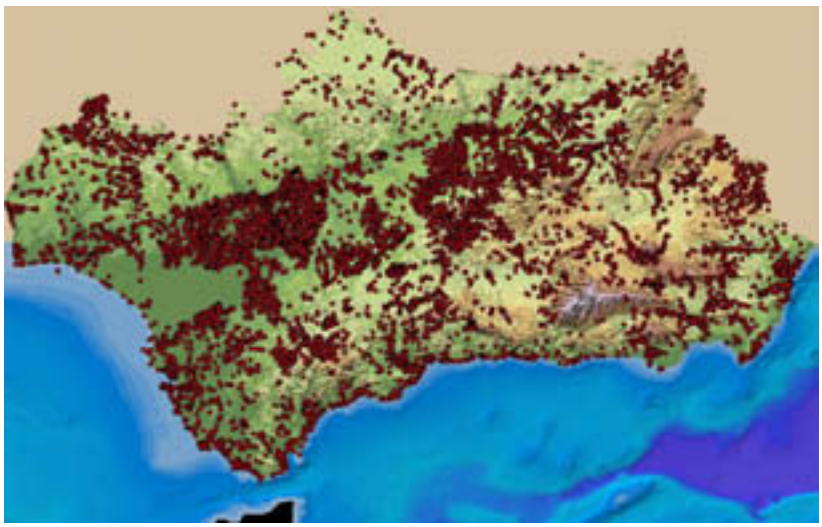


Figura 1. Distribución de entidades arqueológicas en Andalucía (2003).

Entre los años 1985 y 2002 se realizaron campañas de inventario de yacimientos arqueológicos de forma más o menos sistemática, pero con posterioridad a esta fecha la Dirección General de Bienes Culturales ha dado prioridad a la protección legal de todos los que ya se encontraban registrados antes que realizar nuevas campañas.

Además, mantener un inventario exhaustivo del Patrimonio Arqueológico de un territorio de 87.000 kms^2 y con una riqueza patrimonial como la andaluza, es extraordinariamente costoso, tanto en recursos económicos como en tiempo, no sólo para obtener la información sino también para mantenerla actualizada.

Para reducir los riesgos que esta situación de desconocimiento real del potencial arqueológico puede producir en la preservación de las EA, el objetivo fundamental planteado a través del proyecto MAPA es la zonificación del territorio en función de su potencial arqueológico, para apoyar la incorporación de las medidas preventivas necesarias en la planificación territorial o en la ejecución de obras con importante impacto en el territorio.

BASE TEÓRICA Y METODOLÓGICA

La base teórica que subyace en este proyecto puede resumirse en los tres aspectos siguientes:

1. Los seres humanos han elegido lugares para su uso y aprovechamiento en función de unas determinadas características ambientales (*Duncan y Beckman*, 2000: 33; *Dalla Bona*, 2000: 75). Son las variables medioambientales las que hacen posible el asentamiento y el desarrollo de las actividades humanas o, al menos, las hace más probables en unos lugares que en otros.
2. La influencia de los factores medioambientales es inversamente proporcional a la escala espacial de análisis. Ello supone que a menor escala espacial mayor es su incidencia (*Sydoriak*, 2000: 102).
3. Así mismo, la influencia de los factores medioambientales es mayor cuanto menor es el desarrollo tecnológico (*Church et al*., 2000: 149). Los avances tecnológicos han permitido paulatinamente la *domesticación* del medio y la adaptación de los seres humanos a condiciones medioambientales previamente insospechadas.

Esta base teórica incide sustancialmente en la metodología de trabajo propuesta en el proyecto, fundamentalmente en la elección de la escala de análisis que se extiende al conjunto de la comunidad autónoma. Esta elección se encuentra también condicionada por la información arqueológica y geográfica disponible.

En algunos trabajos recientes se cuestiona la validez del uso de los datos provenientes de inventarios generales de yacimientos arqueológicos en este tipo de proyectos, ya que requieren una buena calidad de la información de partida (*Church* et al., 2000; *Wheatley*, 2004; *Ebert*, 2000; *Wiemer*, 2002). Esta exigencia se basa en la naturaleza de los análisis realizados, en la mayoría de los casos correlaciones estadísticas establecidas entre variables ambientales y localizaciones arqueológicas conocidas. Los errores en las localizaciones o su distribución espacial derivada de factores no arqueológicos, pueden producir distorsiones graves en los resultados obtenidos y, en consecuencia, la inviabilidad del modelo.

Los datos arqueológicos disponibles para el MAPA proceden también, en gran parte, del Inventario de Yacimientos Arqueológicos de Andalucía, que adolece de los citados errores y otras imprecisiones en la información, tanto de la propia localización espacial como de las adscripciones crono-tipológicas. Sin embargo, a escala regional, el grado de definición de la información parece suficiente tal y como se desprende de los análisis realizados en una primera fase de valoración general de la información (*Fernández Cacho et al.*, 2002).

En cualquier caso, los efectos de las posibles incorrecciones de los datos de partida quedarán mitigados por el esquema metodológico empleado, que se basa en un modelo mixto correlación-explicación, que no descansa exclusivamente en las correlaciones estadísticas, sino también en las hipótesis explicativas previas, que luego quedarán o no contrastadas por la información existente. Del mismo modo, la información almacenada en las bases de datos ya existentes también se empleará a la hora de ponderar los valores relativos a la incidencia de cada variable en la distribución de las EA. En cada caso, un exhaustivo análisis de los datos determinará la decisión sobre su utilidad y las posibilidades de su incorporación en el modelo final (*Muñoz Reyes*, 2003; *Muñoz Reyes et al.*, 2004).

Por otra parte, la cartografía de carácter geográfico producida por distintos organismos de la Comunidad Autónoma que sirven para la consecución de los objetivos del MAPA, se han generado para la totalidad del territorio andaluz a una escala de 1:100.000 (para casos concretos 1:50.000 y 1:400.000), con una buena resolución por proceder en gran parte de la generalización de la cartografía a 1:10.000 (*Márquez y Vallejo*, 2003).

VARIABLES SELECCIONADAS Y ANÁLISIS REALIZADOS

Variables ambientales de carácter selectivo

Este grupo de variables son las que hipotéticamente inciden en mayor medida en la elección de un determinado lugar para el uso y aprovechamiento humanos (*Fernández Cacho y otros*, 2002; *Fernández Cacho*, 2004).

Las primeras aproximaciones al análisis de estas variables se realizaron mediante la aplicación de procedimientos estadístico-descriptivos básicos para explicar la naturaleza de las relaciones entre algunas variables ambientales (hidrografía, litología y altimetría) y la distribución de EA en el territorio andaluz (*Fernández Cacho y otros*, 2002).

Estos análisis preliminares permitieron establecer una serie de conclusiones tanto metodológicas como conceptuales, que pueden concretarse en un aspecto básico para la viabilidad del proyecto: a escala regional, el análisis de los datos disponibles ofrecen unos resultados coherentes desde el punto de vista histórico-arqueológico.

Posteriormente se localizó e inventarió el resto de la cartografía disponible referida a este grupo de variables, seleccionando aquéllas que *a priori* pueden tener mayor influencia en la distribución de las entidades arqueológicas en el territorio y registrando su ubicación, procedimiento de elaboración, escala, año, etc. Las variables primarias de las que se derivarán variables secundarias son la altitud, litología, modelado 3D, tipo de suelo, capacidad de uso

del suelo, vegetación potencial, asentamientos arqueológicos, vías pecuarias, usos del suelo y explotaciones mineras.

Variables de perdurabilidad

En la mayor parte de los modelos predictivos, el objetivo perseguido es la detección de áreas de alto potencial arqueológico por ofrecer las características más apropiadas para el uso y aprovechamiento humanos. Sin embargo, con mucha frecuencia se obvian otros aspectos muy importantes desde el punto de vista de la gestión de patrimonio, como es el análisis de los factores que han podido incidir en la conservación de las EA hasta la actualidad[1]. Por ello, después de realizar una primera aproximación a las variables selectivas, se ha abordado el análisis de las variables de perdurabilidad.

La importancia de tener en cuenta estos últimos factores estriba en la necesidad de aplicar políticas preventivas eficaces en lugares donde realmente hay razones objetivas para pensar que existen mayores probabilidades de registrar EA, eliminando aquellos otros que, aunque tuvieran en origen condiciones favorables similares, han sufrido a lo largo del tiempo alteraciones que pueden haber afectado gravemente a su preservación.

Ésta es la razón de la elaboración de un primer Índice de Perdurabilidad Arqueológica (IPA), a través del cual se ha procedido a delimitar zonas en las que se presupone un menor riesgo de deterioro, frente a otras en las que, independientemente de su potencial arqueológico original, es más probable que las EA hayan desaparecido o se encuentren en un peor estado de conservación.

El IPA ha sido calculado a partir de la información ofrecida por la serie de *Mapas de Usos y Coberturas Vegetales del Suelo* (1987-1991-1995-1999), elaborada periódicamente por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y la serie de Mapas de Pérdidas de Suelo de Andalucía (1992-2002) elaborados por la misma consejería con carácter anual a partir de los parámetros de erosividad (agresividad de la lluvia), erodibilidad (resistencia del suelo), pendiente y grado de protección ofrecido por la vegetación (*Márquez-Vallejo*, 2004).

Tras una serie de experimentos previos, la propuesta de fórmula final se ha establecido en función de los siguientes criterios:

1. Se han clasificado un total de 146 usos del suelo en función de su potencial agresividad sobre los restos arqueológicos, con valores situados entre 1 (menor agresividad) y 4 (mayor agresividad). De esta clasificación se ha eliminado el uso urbano por entender que la perdurabilidad de los sitios arqueológicos en suelo urbano obedece a causas de naturaleza distinta y que requiere un análisis singularizado.
2. Junto a la agresividad de los usos del suelo se ha introducido el factor "variabilidad" de los mismos, es decir, se entiende que a mayor variabilidad en los usos, mayor posibilidad de deterioro del Patrimonio Arqueológico.

---

[1] "Not only will it define those environmental variables or combinations of variables that would attract human use and thus predict site location, but also it will address post-site formation processes that could obscure or destroy these sites" (*Church et al*., 2000: 146).

3. Se ha ponderado al alza la influencia de los usos del suelo y su variabilidad frente a la derivada de la erosión, que en puntuales ocasiones llega a ser la causa de la desaparición de sitios arqueológicos.

La fórmula final propuesta se presenta en la Figura 2, donde se muestra la zonificación de Andalucía en función de la perdurabilidad arqueológica del subsuelo, apareciendo en tonalidades más claras las áreas que presentan una menor perdurabilidad (*Márquez-Vallejo*, 2004):

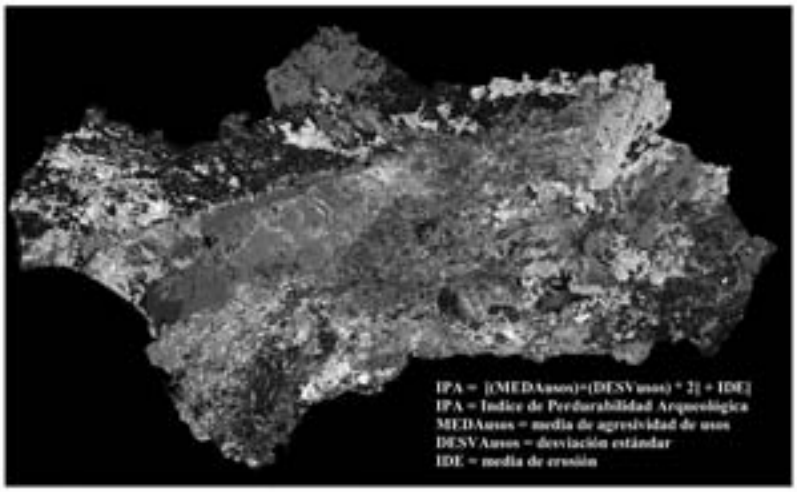


Figura 2: Perdurabilidad Arqueológica en Andalucía

Al mismo tiempo que se trabaja en la primera formulación del IPA, aplicando métodos deductivos, se realizaban los primeros análisis estadísticos sobre los datos contenidos en las bases de datos del IAPH, para determinar las posibilidades de su incorporación en el modelo para ajustar el IPA (*Muñoz et al*., 2004).

Tras realizar diversos test estadísticos para valorar las medidas de asociación entre la información relativa al grado de conservación de las EA y el nivel de agresividad de los usos del suelo se obtuvieron los siguientes resultados:

1. En líneas generales, la información almacenada en el SIPHA es demasiado imprecisa en el apartado de conservación. No existe correlación estadística significativa entre el grado de conservación asociado a las EA registradas (destruido/desaparecido, parcialmente destruido/bajo, medio y alto) y el nivel de agresividad de los usos del suelo.
2. La última comprobación de la viabilidad de uso de los datos disponibles, referidos al estado de conservación de las EA, ha sido distinguir aquéllos que proceden de la primera fase del inventario (1986-1991), realizado con una ficha poco detallada, con los registrados en la segunda fase del inventario, con información y normas de cumplimentación más precisas (1992-2000). Tampoco en este caso se han observado diferencias significativas en la relación entre el grado de conservación asociado a cada EA y el índice de perdurabilidad asignado.

3. La asociación más significativa se establece entre las causas de deterioro de las EA y el nivel de agresividad[2] del suelo.
4. Sí existe relación entre el número de EA registradas y el IPA. Se constata la coherencia entre la distribución de localizaciones arqueológicas y la zonificación realizada en función del IPA (*Márquez y Vallejo*, 2004), aunque los datos asociados a cada EA relativos a su estado de conservación no ofrezca la calidad requerida para su tratamiento estadístico.
5. Se apuesta por una aproximación deductiva al IPA y a una contrastación de los resultados mediante un muestreo específico sobre el terreno.

En próximos trabajos se procederá a la inclusión de otras variables en el IPA, como pueden ser la delimitación de espacios naturales protegidos, las infraestructuras viarias o los tipos de cultivo.

Variables culturales y de conocimiento

No sólo las variables medioambientales influyen en la distribución observable de sitios arqueológicos. Otros factores, culturales y de conocimiento, tienen que ser tenidos en cuenta, tal y como expresan los más críticos con el determinismo ambiental inherente a la sobrevaloración de las variables del medio físico en la explicación del comportamiento humano(*van Leusen y otros*, 2002; Stančič-Kvamme, 1999; Kamermans-Wansleeben, 1999). Entre los primeros se analizarán los patrones de asentamiento conocidos en función de los periodos históricos y las zonas geográficas, las características geográficas más idóneas para la localización de sitios arqueológicos asociados a tipologías concretas (alfarerías, complejos extractivos, explotaciones agropecuarias, etc.), la distancia entre asentamientos, etc.

En algunos modelos predictivos, las correlaciones estadísticas para establecer los patrones de comportamiento humano se establecen también a partir de datos procedentes de los inventarios arqueológicos o de los recopilados en prospecciones intensivas de porciones de terreno a modo de muestra. En el caso del MAPA, se utilizarán los dos tipos de información, cuyos resultados serán contrastados.

Sin embargo, la distribución de EA, que muestra el mapa de localizaciones arqueológicas de Andalucía, está condicionada también por otro grupo de variables: las de conocimiento (Fernández Cacho *et al*., 2002; Fernández Cacho, 2004). Entre ellas se encuentran las preferencias de los arqueólogos por determinados contextos territoriales o periodos históricos, el distinto grado de profundización en la información de algunos apartados de registro, los diversos criterios establecidos por cada Delegación Provincial de Cultura, la dificultad de algunas áreas para su prospección intensiva, etc. Una valoración de la incidencia de estas variables ayudará a establecer la representatividad real de la información arqueológica de partida.

---

[2] Las pruebas de chi-cuadrado arrojan una medida de asociación del 0.23, frente al 0,007 entre grado de conservación y la agresividad de los usos del suelo.

CONCLUSIONES

Los primeros análisis realizados en el marco del proyecto MAPA han permitido avanzar en distintos aspectos relacionados con la tutela del Patrimonio Arqueológico andaluz. A modo de conclusión se destacan los siguientes:

1. Elaboración de un primer Índice de Perdurabilidad Arqueológica de la Comunidad Autónoma, que ha permitido visualizar la zonificación de la totalidad del territorio en función de criterios estrictamente patrimoniales.
2. Realización de diversos procesos de depuración de la información arqueológica contenida en el SIPHA para su posterior tratamiento estadístico, lo que ha redundado en la cualificación de las tablas de datos fuente.
3. Evaluación de la calidad de la información referida al estado de conservación del Patrimonio Arqueológico de Andalucía, que contiene las bases de datos patrimoniales del IAPH, su potencial uso en proyectos semejantes y las consecuentes propuestas de mejora.
4. Tratamiento avanzado de la información cartográfica y alfanumérica disponible como apoyo a las políticas de planificación territorial.

La construcción de un sistema de información en arqueología basado en evidencias que no solamente se descubren a simple vista o a través de fotografía aérea, sino a través de procesos complejos, como los perseguidos en este proyecto, es un reto al que se le puede dar una dimensión en coste y en tiempo, y con unos beneficios evidentes derivados de su implementación.

REFERENCIAS

Church, T.; Brandon, J. y Burgett, R. (2000): "GIS applications in Archaeology. Methods in search of theory". En K. L. Wescott y R. J. Brandon: *Practical Applications of GIS for Archaeologist. A predictive modelling kit.* Taylor & Francis. Londres. Pgs.: 135-155.

Dalla Bona, L. (2000): "Protecting cultural resources through forest management planning in Ontario using archaeological predictive modelling" En K. L. Wescott y R. J. Brandon: *Practical Applications of GIS for Archaeologist. A predictive modelling kit.* Taylor & Francis. Londres. Pgs.: 73-99.

Duncan, R. B. y Beckman, K. A. (2000): "The application of GIS predictive site location models within Pensylvania and West Virgina" En K. L. Wescott y R. J. Brandon: *Practical Applications of GIS for Archaeologist. A predictive modelling kit*. Taylor & Francis. Londres. Pgs.: 33-58.

Ebert, J. T. (2000): The state of the art in 'Inductive' predictive modelling: seven big mistakes (and a lots of smaller ones)" En K. L. Wescott y R. J. Brandon: *Practical Applications of GIS for Archaeologist. A predictive modelling kit.* Taylor & Francis. Londres. Pgs.: 129-134.

Fernández Cacho, S. (2004): "Modelo Andaluz de Predicción Arqueológica. Líneas básicas para el desarrollo del proyecto MAPA". *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 50. Pgs.: 57-63.

Fernández Cacho, S.; Mondéjar Fernández de Quinconces, P. y Díaz Iglesias, J.M. (2002): "La Información de Patrimonio Arqueológico de Andalucía. Valoración general." En Fernández Cacho, S. (Ed): *ARQUEOS. Sistema de Información del Patrimonio Arqueológico de Andalucía. Serie Cuadernos Técnicos del IAPH* nº 6. Junta de Andalucía. Granada. Pgs.: 143-165

García Sanjuán, L. (2004): "La prospección arqueológica de superficie y los SIG". En J.C. Martín de la

Cruz y A.M. Lucena Martín (Ed.): *Actas del I Encuentro Internacional de Informática Aplicaada a la Investigación y la Gestión Arqueológicas (Córdoba, 5-7 de Mayo de 2003)*. Pgs.: 185-210. Córdoba.

Kamermans, H. y Wansleeben, M. (1999): "Predictive modelling in Dutch archaeology, joining forces". En J.A. Barceló; I. Briz; A. Vila (Eds.): *New technique for old times. CAA98. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. BAR International Series 757*. Archaeopress. Oxford. Pgs.: 225-230.

Márquez Pérez, J. y Vallejo Villalta, I. (2003): *Disponibilidad, características y posibilidades de utilización de la información geográfica en modelos de predicción y gestión del Patrimonio Arqueológico en Andalucía*. IAPH. Informe inédito.

Márquez Pérez, J. y Vallejo Villalta, I. (2004): "Aproximaciones a la elaboración y cartografía de un índice de perdurabilidad de sitios arqueológicos en Andalucía". *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 50. Pgs.: 64-70.

Muñoz Reyes, A. M. (2003): *Dictamen sobre la calidad de la información disponible para la ejecución del proyecto 'Modelo Andaluz de Predicción Arqueológica' desde el punto de vista de su tratamiento estadístico*. IAPH. Informe inédito.

Muñoz Reyes, A.M.; Rodrigo Cámara, J. M. y Fernández Cacho, S.(2004): "Los datos a examen: estadística e indicadores de perdurabilidad de los sitios arqueológicos andaluces". *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 50. Pgs.: 71-79.

Stančič, Z. y Kvamme, K. (1999): "Settlement patterns modelling through Boolean overlays of social and environmental variables" En J.A. Barceló; I. Briz; A. Vila (Eds.): *New technique for old times. CAA98. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. BAR International Series 757*. Archaeopress. Oxford. pp. 231-237.

Sydoriak Allen, K. M. (2000): "Consideration of scale in modelling settlement patterns using GIS: an Iroquois example" En K. L. Wescott y R. J. Brandon: *Practical Applications of GIS for Archaeologist. A predictive modelling kit*. Taylor & Francis. Londres. Pgs.: 101-112.

van Leusen, M.; Deeben, J.; Kammermans, H. y Verhagen, P. (2002): Predictive Modelling for Achaeological Heritage Management in the Netherlands. Baseline Report. (*http://www.archeologie.leidenuniv.nl/index.php3?c=92*).

Wheatley, D. y García Sanjuán, L. (2002): "Managing the Spatial Dimension of the European Archaeological Resource. Trends and Perspectives" En, L. García Sanjuán y D. Wheatley (Eds.): *Mapping the Future of the Past. Managing the Spatial Dimension of the European Arcaheological Resource*. Universidad de Southammpton, Universidad de Sevilla e Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Sevilla, pp. 151-166.

Wheatley, D. (2004): "Making space for an archaeology of place". *Internet Archaeology*, 15 (*http://www.inarch.ac.uk/*).

Wiemer, R. (2002): "Standardisation: the key to Archaeological data quality". En L. García Sanjuán y D. Wheatley (Eds.): *Mapping the Future of the Past. Managing the Spatial Dimension of the European Arcaheological Resource*. Universidad de Southammpton, Universidad de Sevilla e Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Sevilla, pp. 103-108.

El SIG del casco histórico de Santiago de Compostela

J.R. Chantada Acosta [1] y E.A. Abad Vidal [2]

(1) Departamento de Geografía, Universidad de Santiago, Plaza de la Universidad, 1, 15072 Santiago de Compostela.
(2) CESGA, Centro de Supercomputación de Galicia, Avda. de Vigo s/n, 150706 Santiago de Compostela.

RESUMEN

Para gestionar el ámbito del plan especial de la ciudad histórica de Santiago de Compostela, como SIG específico, se ha elaborado con el CESGA la primera versión en uso desde marzo de 2003. En él se integra toda la información original de las fichas contenidas en diez volúmenes, de difícil consulta, sobre una base cartográfica digital actualizada del Ayuntamiento.

Con un interfaz gráfico del usuario en gallego se accede mediante su barra de herramientas a opciones y capas de información (mobiliario urbano, manzanas, identificación dinámica de calles, parcelas catastrales, unidades edificatorias o fotografía aérea) de mayor uso en la unidad de arquitectura municipal. La ventana principal permite visualizar simultáneamente cualquier sector de la ciudad con una leyenda, un localizador y una barra de escala modificables opcionalmente. Los comandos incorporados en el menú son: clasificación de las unidades arquitectónicas, búsqueda de éstas por diferentes criterios, eliminación de elementos identificados, modificación de propiedades visuales de las capas activas e impresión. A las unidades clasificadas en cinco tipos se puede acceder por diferentes procedimientos de búsqueda, tanto para visualizarlas como para observar las ventanas de sus bases de datos, donde se pormenorizan contenidos de cada edificio, con estructuras ad hoc para cada categoría. También es posible cualquier selección múltiple de la diversidad de elementos de cada unidad edificatoria. Submenús como el de propiedades presentan comandos que permiten controlar las propiedades de las capas activas.

***Palabras Clave**: SIG, gestión, recursos arquitectónicos, protección, rehabilitación, ciudad histórica, patrimonio de la Humanidad.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

To manage the scope of the "Plan Especial" of the historic city of Santiago de Compostela has been made a specific GIS working with the CESGA as a partner. The first version of this GIS began running on March 2003. In this tool has been integrated all the original information include in each record of the ten volumes. This information is connected with a digital actualised cartographic base of the township. With a toolbar in the graphic interface of the user can get access to options and layers. The interface displays only the language of Galicia. Among the most frequently used layers are included streets as polylines, building units and cadastral parcels as polygons and an aerial photography. The main window allows display at the same time different parts of the old city with a legend, an overviewer and a scale bar to modify optionally. Commands of the menu are: classification of building units, search with a certain approach, removal of identified elements, modify visual properties of active layers and print. The five types of classified units can be reached by different ways when the user displays the plot of the unit or associated database screen. The database window shows contents of each building and category structure. It is possible also any multiselection of a fan of elements in each building unit. Other menus included shows commands to control properties of active layers.

***Key Words**: GIS, management, architectural resources, protection, rehabilitation, historic town.*

INTRODUCCIÓN

En este proyecto han participado un total de nueve personas. José Ramón Chantada Acosta (investigador principal) y Emilio Ángel Abad Vidal acometieron los planteamientos, verificación y acabado completo del proyecto, la coordinación y supervisión con los representantes del Ayuntamiento y con el resto de los miembros del equipo. Es de destacar también la aportación técnica de Pablo Rey Mayo y de Francisco Landeira Vega del CESGA, y la colaboración de Pablo García Pérez y Alberto Miguez Iglesias, así como la de Pablo Courel Repiso, Irene Torrado Pérez y Alejandro Traveso Valiño, estudiantes de la Licenciatura de Geografía e Historia de la Universidad de Santiago durante la ejecución del Proyecto.

El objetivo de este proyecto era la creación de un sistema de información geográfica específico para gestionar el patrimonio, fundamentalmente el arquitectónico, afectado por el plan especial de la ciudad histórica de Santiago de Compostela. Se inició el trabajo en febrero de 2003 y se finalizó en sólo dos meses.

Funciona en intranet en el Ayuntamiento, desde abril de 2003, cumpliendo su cometido de evitar la tediosa consulta de los diez volúmenes de fichas de los más de 2.000 edificios en ellas incluidos, y los planos correspondientes, que hasta esa fecha eran consultados en papel.

A partir de entonces se siguen en la base cartográfica digital actualizada del Ayuntamiento, que hemos incorporado.

DESARROLLO DEL TRABAJO

Tras la plasmación específica de objetivos, y el planteamiento de procedimientos, actividades y agenda, se inició el trabajo programado con el diseño de la base de datos de la ficha de las Unidades Edificatorias y la preparación de un interfaz para la posterior digitalización de los datos de las fichas. En paralelo, se empezaron otras dos labores que exigieron una gran dedicación de tiempo, como escanear las fotografías o vistas de los edificios, y, por otra parte, la corrección de la base cartográfica digital actualizada del Ayuntamiento, no coincidente con la originaria recogida en el plan.

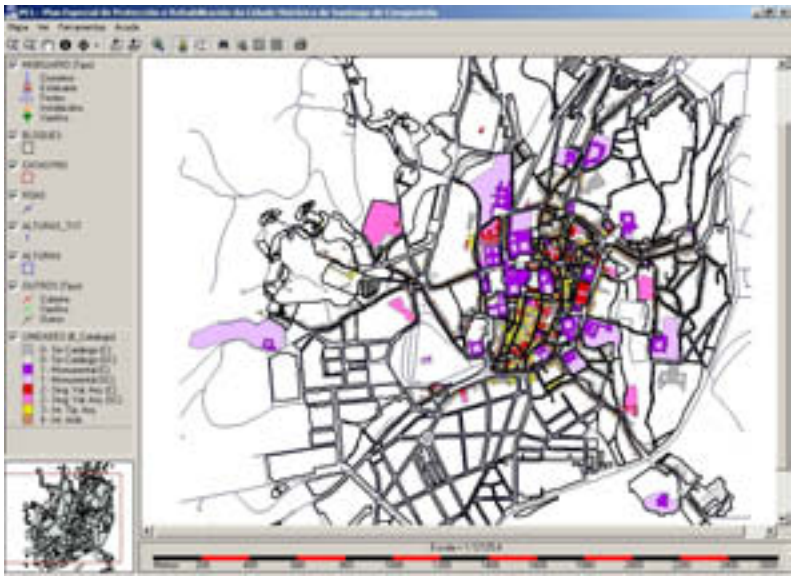


Figura 1. Vista general de la página principal de la aplicación PE1.

Se escaneó individualmente cada una de las diversas imágenes que habían sido incorporadas a las fichas mediante fotocopias en los diez volúmenes en los que se recoge el plan. La falta de calidad de esas fotocopias de las fichas es el motivo de que se aprecie una visualización deficiente de las imágenes en blanco y negro correspondientes a los 3.006 archivos de formato JPG incluidos en el directorio "Imágenes" y que ocupan en conjunto más de 300 MB. El nombre de cada uno de estos archivos se asignó de acuerdo con el código que identifica a cada una de las unidades edificatorias, seguido de una indicación ordinal añadida en los casos de los edificios en los que se dispone de varias vistas diferentes.

Tras la conversión de los archivos de la información cartográfica de formato DWG del

Ayuntamiento a los SHAPE de Arcview, sobre el que se efectuó su transformación, no fueron pocos los problemas que surgieron en el proceso de corrección. Estas dificultades se debieron a la dificultad de ajustar en una base cartográfica uniforme criterios distintos, cuales son el catastral, que deseaban usar actualizado en el Ayuntamiento, y el diferente a éste, considerado en las referencias cartográficas del plan, donde sería necesario identificar cada unidad edificatoria con la codificación catastral. El inconveniente estriba en que las dos codificaciones no son coincidentes y no hacen referencia a elementos urbanos asimilables en su totalidad.

Una vez elaborado el interfaz para la digitalización de las fichas de las unidades edificatorias, se introdujo a través del teclado el contenido de las fichas en las bases de datos relacionales, tal como constaba en éstas en castellano, aunque el resultado tenía que ser presentado en gallego. Por ello, fue necesario traducir y unificar la totalidad de los textos a la vez, ya finalizada la introducción de los datos.

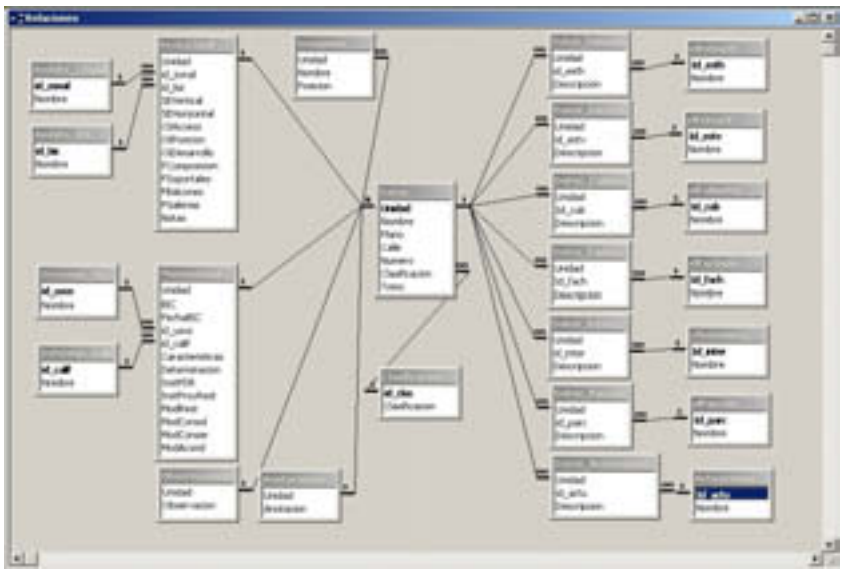


Figura 2. Estructura de la base de datos relacional.

El último eslabón más importante del desarrollo metodológico lo constituyó la programación de la aplicación de consulta del Plan de Protección, integrando la información cartográfica y la base de datos relacional.

Entre los resultados obtenidos destaca la simplificación que supone el disponer de una base de datos y una información cartográfica nuevas y homogéneas, así como la aplicación que en esta primera versión hemos llamado PE1 por ser la primera de plan especial.

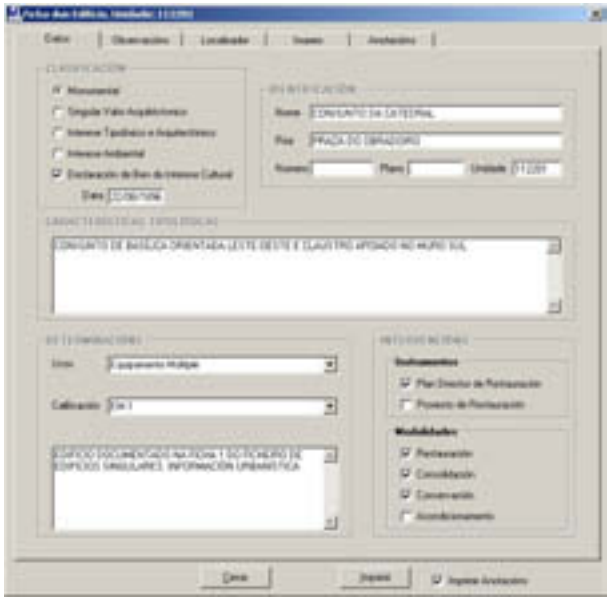


Figura 3. Vista de una ficha modelo del Catálogo.

Con un interfaz gráfico del usuario en gallego se accede, mediante su barra de herramientas, a opciones y capas de información (mobiliario urbano, manzanas, identificación dinámica de calles, parcelas catastrales, unidades edificatorias o fotografía aérea), de mayor uso en la unidad de arquitectura municipal.

La ventana principal permite visualizar simultáneamente cualquier sector de la ciudad con una leyenda, un localizador y una barra de escala modificables opcionalmente.

Los comandos incorporados en el menú son: clasificación de las unidades arquitectónicas, búsqueda de éstas por diferentes criterios, eliminación de elementos identificados, modificación de propiedades visuales de las capas activas e impresión.

A las unidades clasificadas en cinco tipos se puede acceder por diferentes procedimientos de búsqueda, tanto para visualizarlas como para observar las ventanas de sus bases de datos, donde se pormenorizan contenidos de cada edificio, con estructuras ad hoc para cada categoría. También es posible cualquier selección múltiple de la diversidad de elementos de cada unidad edificatoria. Submenús como el de "propiedades" presentan comandos, que permiten controlar las propiedades de las capas activas.

Funcionalidades de la aplicación.

Herramientas de navegación y visualización. Zoom dinámico, zoom de desplazamiento, zoom a capa activa y zoom total.

Herramientas de identificación

Identificación de cada elemento en cada una de las capas de información.

Identificación de cada una de las UE, que da acceso a la ficha individual. Datos alfanuméricos y de imagen.

Herramientas de consulta

Localización de UE mediante su código, su dirección postal o su nombre en el caso de la clasificación monumental. Las opciones, una vez realizada la localización, son las de "resaltar" en el mapa, hacer un zoom a su extensión, desplazarse sobre el elemento a la escala de visualización del mapa, añadir una marca en el mapa o acceder a la ficha.

Selección de UE en función del catálogo de elementos, pudiendo hacer combinaciones de todos y cada uno de ellos.

Herramientas de impresión

Impresión de los mapas generados a una escala elegida por el usuario o a la existente en pantalla.

Impresión de una reproducción exacta de la ficha originaria del catálogo.

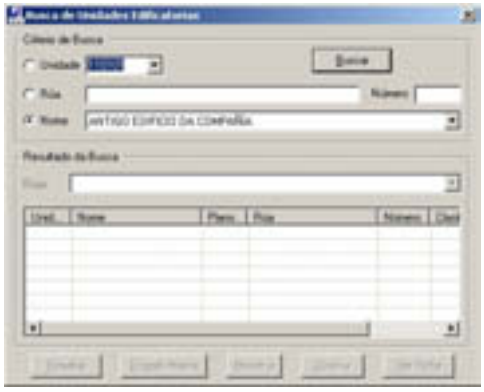


Figura 4. Formulario de búsqueda de una Unidad Edificatoria.

Herramientas de configuración

Con una serie de herramientas podremos configurar la aplicación según las necesidades del usuario. Estas configuraciones afectan tanto a la visualización de los elementos de la aplicación (escala, leyenda o localizador) como a los colores de cada uno de los elementos, así como a rutas por defecto donde se encuentran instalados los datos.

CONCLUSIONES

De las ventajas conseguidas por los usuarios podría considerarse que, desde el primer momento, ha mejorado la gestión de esta Unidad municipal bajo la supervisión de uno de sus arquitectos, al evitar desplazamientos entre diversos despachos de diferentes plantas del consistorio, donde que se encontraba la información en papel. Este arquitecto, a cargo del patrimonio de la ciudad monumental, es el único que dispone de la opción de introducir observaciones a este documento, cerrado en su conjunto desde su aprobación. El resto de los funcionarios del Ayuntamiento puede acceder en red desde sus puestos respectivos, pero sin posibilidad de

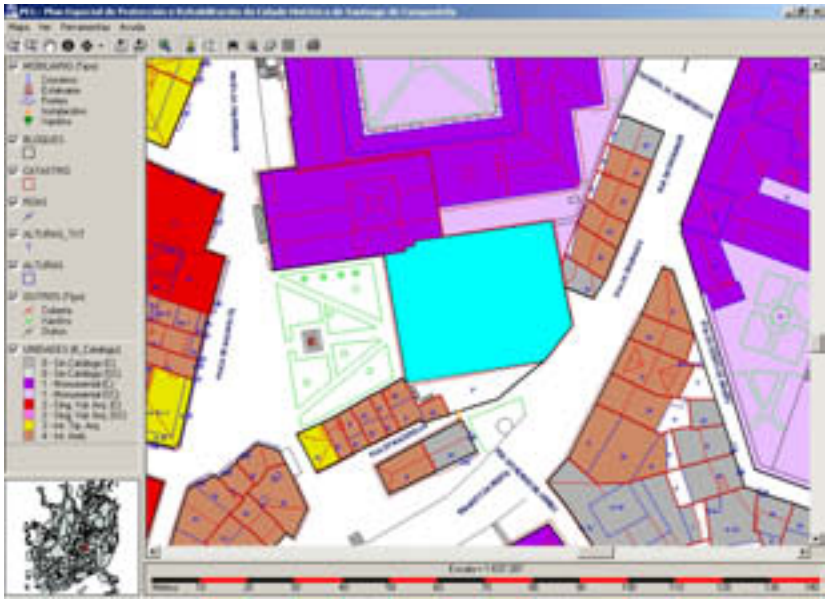


Figura 6. Resultado de la búsqueda de una Unidad Edificatoria.

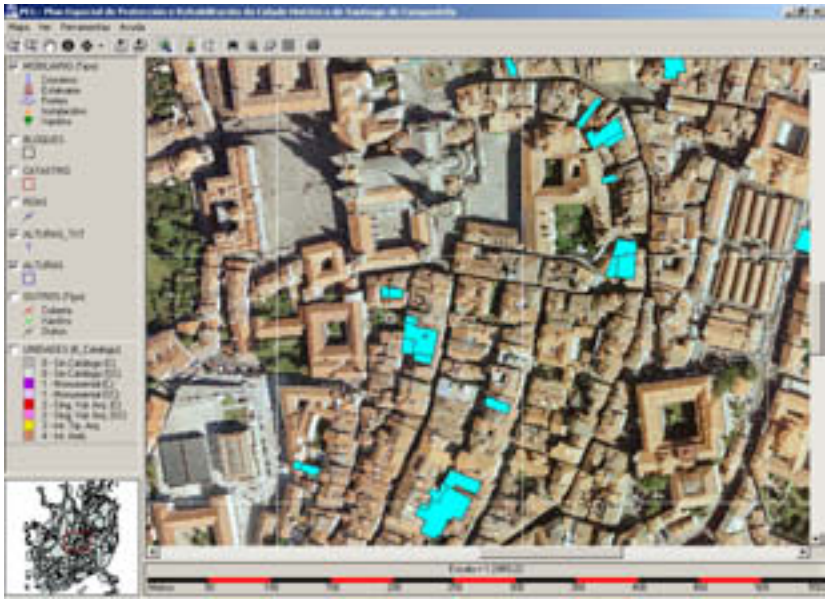


Figura 7. Resultado de la selección de UE en función del catálogo de elementos.

alterar los contenidos documentales, aunque sí podrían modificar en su consola las opciones de las vistas del menú de usuario.

Esta aplicación de consulta del catálogo puede utilizarse desde diferentes puestos de trabajo y cabe esperar que, en adelante, puedan llegar a acceder directamente a ella los ciudadanos, pues se trata de documentación pública, en la que resulta del máximo interés la transparencia informativa. Ella podría contribuir todavía más a la mejor protección de este casco histórico, que es patrimonio de la Humanidad, pero también uno de los marcos urbanos monumentales de mayor actividad social, cultural y económica, en donde son permanentes las interacciones (no exentas de tensiones) entre diferentes agentes de actuación.

REFERENCIAS

FOTHERINGHAM, S. & ROGERSON, P. (1994): *Spatial Analysis and GIS*. London & Bristol (PA, USA), Taylor & Francis.

KRAAK, MJ. & ORMELING, F. (2003): *Cartography. Visualization of Geospatial Data*. Harlow (U.K.), Prentice Hall.

MAGUIRE, DJ. et al. (1991): *Geographical Information Systems*. Volume 2: Applications. Harlow (Essex, UK) & New York, LONGMAN Scientific & Technical.

MARTIN, D. (1991): *Geographic Information Systems and their Socioeconomic Applications*. London, Routledge.

MOLDES TEO, FJ. (1995): *Tecnología de los sistemas de información geográfica*. Madrid, Rama.

PAREDES, E.A. (1994): *Sistemas de informaçao geográfica. (Geoprocessamento). Princípios e aplicaçoes*. Sao Paulo, Editora Érica Ltd.

SLOCUM, TA (1999): *Thematic cartography and visualization*. Upper Saddle River (New Jersey), Prentice Hall.

WORRAL, Les. (1990): *Geographic Information Systems*. Developments & Applications. London, Belhaven Press.

Incertidumbres en la determinación de la susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en Alcoy (Alicante)

J. Delgado[1], J.A. Peláez[2], R. Tomás[3], C. López Casado[4], A. Estévez[1], C. Doménech[5] y A. Cuenca[6]

(1) Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, Ap. Correos 99, 03080 Alicante.
(2) Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Jaén, C/ Virgen de la Cabeza 2, 23071 Jaén.
(3) Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, Ap. Correos 99, 03080 Alicante.
(4) Departamento de Física Teórica y del Cosmos, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Av. Severo Ochoa s/n, 18003 Granada.
(5) Instituto Técnico de la Construcción S.A., Av. Elche 164, 03006 Alicante.
(6) Laboratorio de Carreteras, Generalitat Valenciana, Ctra. Ocaña s/n, 03005 Alicante.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología desarrollada para determinar la susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en el área geográfica de Alcoy (Alicante) a partir de un Sistema de Información Geográfica. Para ello se ha combinado un análisis de peligrosidad sísmica de la región con los parámetros geotécnicos que caracterizan los materiales de las laderas a través del modelo de desplazamiento de Newmark. Este modelo, de amplio uso en el análisis de estabilidad de taludes en condiciones dinámicas, no tiene en cuenta, sin embargo, las incertidumbres y errores en los datos geotécnicos utilizados como parámetros de entrada. Para contemplar tales incertidumbres se ha realizado una simulación empleando el método de Montecarlo, resultando funciones de distribución de probabilidad de los parámetros geotécnicos. La combinación de estas funciones con la peligrosidad sísmica ha permitido delimitar áreas con diferente probabilidad de que la resistencia del terreno sea superada por la acción sísmica (expresada como aceleración pico) para determinados periodos de exposición.

***Palabras Clave**: Movimientos de ladera, susceptibilidad, análisis de Newmark, Simulación de Monte Carlo, SIG, Alcoy.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

In this paper we present a methodology developed to estimate the susceptibility to seismic-induced landslides in the Alcoy, Alicante province, area from a GIS. We have combined a seismic hazard analysis with the geotechnical properties of soils through the Newmark's displacement model. This model, very common in studies of dynamic stability of slopes, doesn't take into account either uncertainties nor errors in the geotechnical data used as input in the analysis. A Montacarlo model has been developed to consider such uncertainties, resulting a probability distribution function for each geotechnical parameter considered. The combined use of these functions with seismic hazard data has allowed to delineate areas of different probability of that ground strength be exceeded by the seismic action (defined as peak ground acceleration) for several return periods.

Key Words: *Landslides, seismic hazard, susceptibility, Newmark analysis, Monte Carlo Simulation, GIS, Alcoy.*

INTRODUCCIÓN

Los movimientos de ladera constituyen un riesgo geológico frecuente, que es causa de innumerables daños a la sociedad. En fechas recientes se ha comenzado a prestar especial atención a la ocurrencia de movimientos de ladera inducidos por terremotos (estabilidad en condiciones dinámicas), por cuanto se ha comprobado que este fenómeno, cuando sucede, puede generar muchos más daños (pérdidas de vidas humanas y económicas) que los efectos directos de la sacudida.

Se han desarrollado diversas técnicas para valorar la estabilidad de las laderas en condiciones dinámicas, aplicables tanto al análisis de problemas puntuales como regionales. Para este último caso, los métodos más empleados se pueden clasificar en dos categorías: aquéllos basados en criterios puramente empíricos y aquéllos otros que consideran el estado de esfuerzos en el terreno y, en consecuencia, contemplan las propiedades de los materiales, la morfología de las laderas y la sismicidad del territorio. Los primeros utilizan relaciones entre la magnitud del terremoto e indicadores espaciales del potencial de movimientos de ladera (distancia al epicentro, pendiente, precipitación acumulada, etc.), que se pueden emplear en estudios de zonación preliminares (*Rodríguez et al.*, 1999). Este tipo de análisis es de limitada utilidad, debido a que asumen, de forma implícita, que la peligrosidad es uniforme con la distancia y a que no tienen en cuenta la propia estabilidad de las laderas (*Murphy et al.*, 2002).

El otro tipo de análisis regional se basa en considerar la estabilidad en condiciones estáticas de las laderas y añadir el efecto desestabilizador que implica la sacudida (*Newmark*, 1965; *Jibson et al.*, 2000). Para ello se parte un modelo simplificado del problema (talud infinito) y se calcula la aceleración crítica (*Ac*) necesaria para que las fuerzas desestabilizadoras de

la ladera igualen la resistencia al corte del terreno, e inicien así el movimiento del material. Posteriormente se determina el desplazamiento acumulado producido cada vez que la aceleración del terremoto excede *Ac*. Dado el mayor volumen de información requerido, así como la mayor complejidad de este análisis, no ha sido hasta la popularización del uso de los Sistemas de Información Geográfica (*SIG*) cuando se han comenzado a utilizar este tipo de análisis dinámico regional.

En esta metodología, *Ac* se puede considerar una medida cuantitativa de la susceptibilidad de la ladera a sufrir inestabilidades en condiciones dinámicas (*Wilson y Keefer*, 1985). Ello es consecuencia de que dicha aceleración depende exclusivamente de las propiedades geotécnicas del terreno y de la pendiente de la ladera. En concreto, *Ac* viene dada por:

$$A_c = (FS - 1)g \sin\alpha \qquad (1)$$

Donde *FS* es el factor de seguridad de la ladera en condiciones estáticas, *g* la aceleración de la gravedad y α la pendiente de la ladera. Los grados de susceptibilidad se definen en función de diversos valores umbral de *Ac*.

Murphy et al. (2002) han analizado cuantitativamente varios ejemplos de movimientos de ladera desencadenados por terremotos, empleando esta metodología. Sus resultados presentan una gran dispersión en los factores de seguridad obtenidos, alguno de los cuales indicaban estabilidad cuando realmente había ocurrido ruptura (y viceversa). El trabajo de estos autores pone de manifiesto las limitaciones de los métodos determinísticos, es decir, aquéllos desarrollados con valores constantes de las variables involucradas en el cálculo, y la necesidad de realizar análisis que contemplen las incertidumbres asociadas a cada parámetro (propiedad geotécnica).

En el presente trabajo se presenta la metodología y los resultados obtenidos en el estudio de la incertidumbre asociada a la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos en un área piloto, Alcoy (Alicante) y áreas adyacentes, caracterizada por haber sufrido este fenómeno en el pasado (*Ayala Carcedo et al.*, 1990). El trabajo se basa en resultados previos obtenidos por este equipo mediante un análisis determinístico de la susceptibilidad (*Delgado et al.*, 2004). Estos resultados son parte de una investigación en curso, cuyo objetivo es determinar la peligrosidad debida a movimientos de ladera sismo-inducidos en tal área. Todos los elementos que intervienen en el análisis han sido integrados en un SIG en forma de atributos de elementos vectoriales (polígonos), como los parámetros geotécnicos, litológicos o usos del suelo, o bien como propiedades a nivel de píxel (topografía, pendiente).

MÉTODOS PROBABILISTAS EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LADERAS

El método de Newmark requiere como primer paso calcular la estabilidad en condiciones estáticas de la ladera. Para tal cálculo se considera el modelo del talud infinito y rotura plana. En éste, *FS* viene dado por la expresión:

$$FS = \frac{c' + \left[(\gamma - m\gamma_w) z \cos^2 \alpha\right] \tan \phi'}{\gamma \, z \sin \alpha \cos \alpha} \qquad (2)$$

Donde *c'*, ϕ' y γ son, respectivamente, la cohesión, el ángulo de rozamiento y el peso específico del terreno, *z* es la profundidad a la que se encuentra la superficie de rotura, *m* la proporción de la columna inestable de terreno situada bajo el nivel freático, γ_w es el peso específico del agua y α la pendiente del talud.

Al realizar este análisis a través de un *SIG*, el procedimiento de trabajo consiste en determinar para cada litología (polígono) sus parámetros geotécnicos, los cuales se asignan como atributos del polígono. Posteriormente se rasteriza el mapa con cada uno de los parámetros geotécnicos (mapas de cohesión, ángulo de rozamiento, etc.). Un mapa adicional es la pendiente, que se calcula a partir de un modelo digital del terreno de la región.

El problema de esta metodología es que las propiedades geotécnicas se obtienen a partir de ensayos de campo o de laboratorio realizados sobre muestras puntuales, las cuales luego caracterizarán a la totalidad de la litología (un elemento puntual o, en el mejor de los casos, una nube de puntos pasa a caracterizar un polígono). Por otra parte, la determinación precisa del valor de estas propiedades es compleja, porque depende del estado del terreno, de la habilidad del operario en campo y en laboratorio, así como de la modalidad de ensayo utilizada para estimarla. Por todo ello resulta conveniente tratar las propiedades geotécnicas como muestras con una distribución probabilística, más que un valor determinístico.

Existen diversas funciones de distribución de probabilidad. Entre ellas, la función β resulta muy apropiada para modelizar la distribución de las propiedades geotécnicas por su sencillez y, además, porque es una distribución acotada (superior e inferiormente), lo cual impide la aparición de valores sin sentido físico (negativos o extremadamente elevados), que pueden resultar del uso de otras funciones de distribución (como la normal) en procesos de modelización (*Hammond et al.*, 1992; *Refice y Capolongo*, 2002).

Para contemplar la incertidumbre asociada a cada propiedad geotécnica que interviene en la ecuación 2 resulta muy útil realizar una modelización por el método de Monte Carlo. En la figura 1 se presenta la metodología empleada en este trabajo, la cual está basada en la propuesta por *Refice y Capolongo* (2002).

Para cada parámetro geotécnico de cada unidad litológica se generan *n* muestras aleatorias que sirven de entrada a la inversa de la función de distribución de probabilidades β. Las *n* muestras resultantes, junto con la pendiente calculada en cada píxel en que se divide la región estudiada, se utilizan para calcular *FS* mediante la ecuación 2. Los *n* valores se pueden utilizar para calcular la probabilidad de que *FS* sea menor que un determinado umbral (probabilidad de rotura o análisis en condiciones estáticas) o bien la población de *Ac* de cada píxel (mediante la ecuación 1, o análisis en condiciones dinámicas). Estos *n* valores de *Ac* permiten, a su vez, determinar la probabilidad de que ésta sea menor que un valor umbral de aceleración. Es de señalar que el análisis retiene, para cada píxel los *n* valores que constituyen la distribución del parámetro en cuestión.

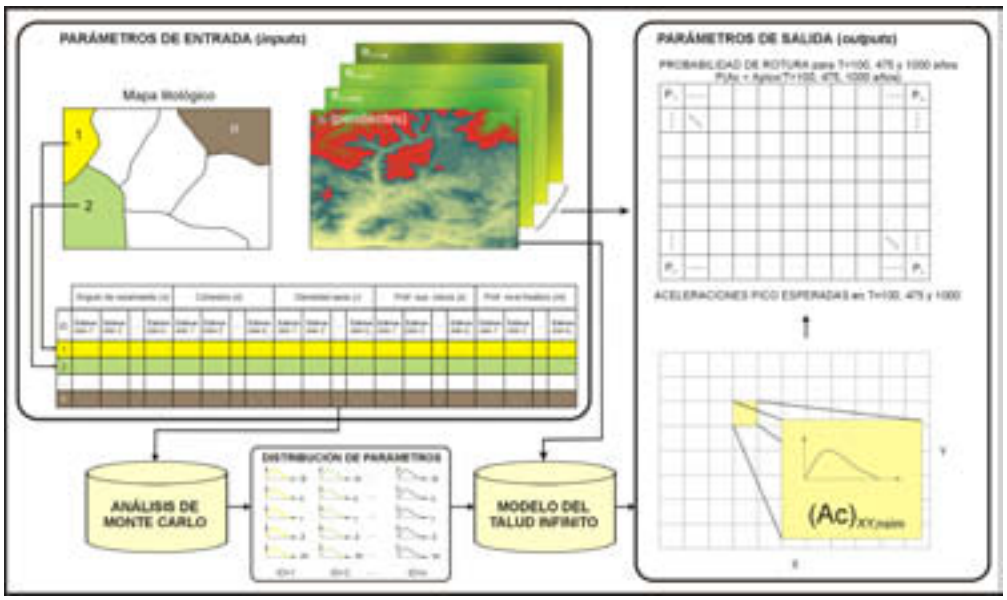


Figura 1. Esquema de la metodología empleada en la modelización de Monte Carlo utilizada para determinar la incertidumbre asociada a las propiedades geotécnicas.

Esta metodología es la que se ha aplicado para estudiar la susceptibilidad de las laderas en Alcoy (Alicante) y áreas adyacentes, a sufrir inestabilidades en condiciones dinámicas.

APLICACIÓN PRÁCTICA DEL ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES

Marco geológico y geotécnico del área de estudio

El área de estudio (Figura 2) corresponde a la hoja 821-III del Mapa Topográfico Nacional de España a escala 1:25.000. El sector considerado es parte de la cuenca neógena de Alcoy. De ella sólo se han estudiado aquellos materiales que geotécnicamente se pueden describir como suelos, concretamente las margas del Mioceno Medio-Superior (*Tap*), los sedimentos cuaternarios acumulados por varias generaciones de abanicos aluviales, que parten de los relieves que rodean la cuenca, así como los sedimentos actuales acumulados por los ríos.

El relieve se caracteriza por pendientes moderadas, generalmente inferiores a 10º. La elevación de los macizos que rodean la cuenca durante el Plioceno y Cuaternario (*Goy et al.*, 1989), así como la comunicación de la misma con el Mediterráneo a través del barranco del Infierno en el Pleistoceno (*IGME*, 1985), ha dado lugar a un rejuvenecimiento del relieve. Como consecuencia, los valles excavados por los ríos son profundos y con fuertes pendientes, siendo en ellos frecuentes los episodios de inestabilidad.

Para introducir la información geológica y topográfica en un SIG se ha digitalizado la cartografía geológica de la zona de estudio (*Almela et al.*, 1975), definiendo polígonos para cada formación cartografiada. Para simplificar el análisis, las diversas unidades geológicas se han agrupado en dos: margas del Mioceno y sedimentos del Cuaternario. Asociada a cada polígono se ha desarrollado una base de datos, con información acerca de atributos del material que son de interés para el análisis (p.e. sus propiedades geotécnicas). Al objeto de realizar una posterior manipulación de los atributos (ecuaciones 1 y 2), éstos se han rasterizado según una cuadrícula (píxel) de 25 m de lado. Adicionalmente se ha elaborado un modelo digital del terreno con el cual se ha obtenido un mapa de pendientes.

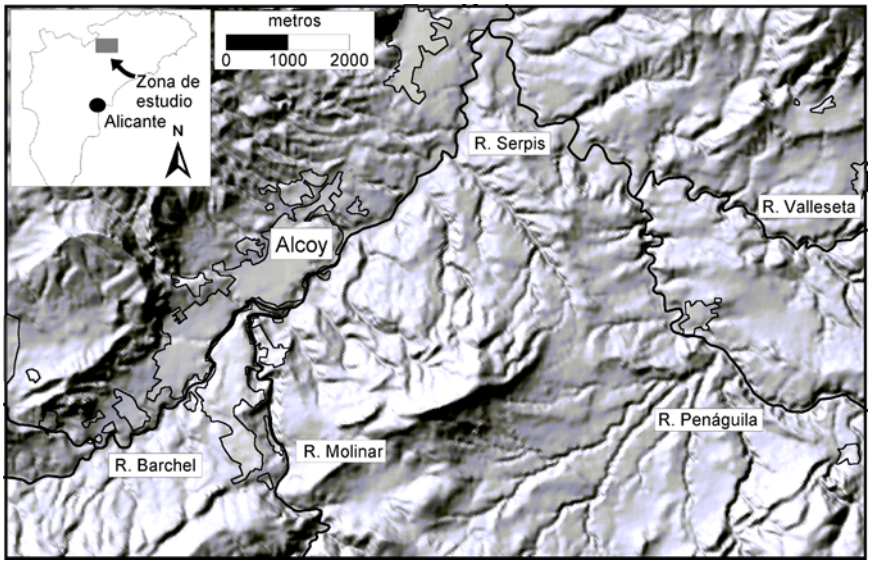


Figura 2. Localización del área de estudio.

Las propiedades geotécnicas de los materiales se han obtenido a partir de más de un centenar de informes geotécnicos. Para cada unidad litológica se han determinado los valores medio, desviación típica, máximo y mínimo de la cohesión efectiva, ángulo de rozamiento efectivo y peso específico (Cuadro 1).

Cuadro 1. Resumen de las propiedades geotécnicas de los materiales en la cuenca de Alcoy.

	Margas				**Abanicos aluviales**			
	Media	**Desv.**	**Mín.**	**Máx.**	**Media**	**Desv.**	**Mín.**	**Máx.**
c' (KPa)	31.4	9.8	2	58.8	17.7	8.8	0	35.3
$\phi'(^o)$	27	5	21.4	38.5	31.4	2.3	28	38.5
γ (KN/m^3)	19.4	1.9	15.6	23.3	19.1	1.5	14.3	22.3

Análisis determinístico de la susceptibilidad de las laderas

A partir de los datos geotécnicos disponibles para la región, *Delgado et al.* (2004) clasificaron la susceptibilidad a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos en cuatro categorías. Para ello, inicialmente, los parámetros que intervienen en las ecuaciones 1 y 2 fueron rasterizados a partir del correspondiente mapa litológico. Las operaciones entre mapas se realizaron con IDRISI, resultando el mapa de *Ac* (Figura 3).

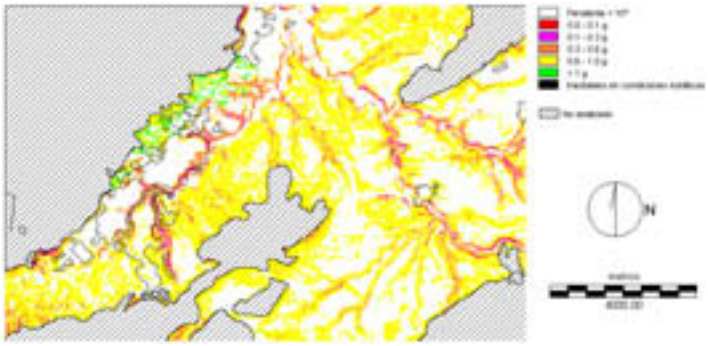


Figura 3. Aceleración crítica obtenida a partir del modelo de Newmark (análisis determinístico).

Para definir las categorías de susceptibilidad se tuvo en cuenta la peligrosidad sísmica de la región, expresada como aceleración máxima (*PGA*) esperada en 100, 475 y 1000 años, datos que se rasterizaron e incluyeron en el SIG. Las categorías de susceptibilidad se definieron según el criterio: susceptibilidad Baja cuando $Ac \leq PGA(1000$ años), Media cuando $Ac \leq PGA(475)$ y Alta cuando $Ac \leq PGA(100)$. Las categorías se obtuvieron mediante el operador RECLASS de IDRISI. El mapa resultante, Figura 4, pone de manifiesto que es sólo en las proximidades a los valles de los ríos donde la susceptibilidad es moderada a alta. Ello es consecuencia de las mayores pendientes de las laderas en estas zonas, que hace que las mismas se encuentren próximas a un estado de equilibrio límite (*FS* próximo a 1), requiriéndose entonces sólo pequeñas aceleraciones para romper el equilibrio.

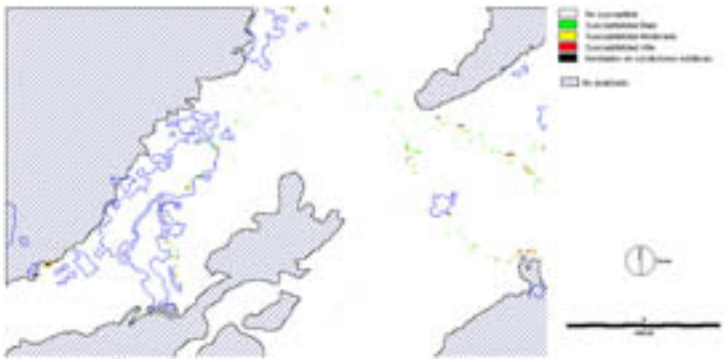


Figura 4. Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos (análisis determinista).

Análisis probabilístico de la susceptibilidad: Incertidumbres en las propiedades geotécnicas

Los resultados anteriores se obtuvieron considerando que cada propiedad geotécnica toma un valor constante dentro de cada polígono (litología). Como se ha comentado anteriormente, esto no es real. La experiencia en la práctica de la Geotecnia indica que se pueden producir variaciones en las propiedades (si bien dentro de un cierto rango), incluso para pequeñas distancias (pocos metros).

Para poder incorporar en nuestra investigación esta incertidumbre en las propiedades geotécnicas de los materiales, se ha realizado una modelización basada en el método de Monte Carlo, según la metodología descrita previamente (Figura 1). Para ello se ha generado una serie de 20.000 números aleatorios, comprendidos entre 0 y 1, que han servido de *input* a la función inversa de distribución de probabilidades β. Estos valores sirven para determinar igual número de valores de las diversas propiedades analizadas (Cuadro 1), así como de las resultantes de operar con ellas (*FS* y *Ac*). Dado el ingente volumen de datos que resulta, para cada píxel sólo se han retenido los valores correspondientes a *Ac*.

Los mapas de la figura 5 presentan la probabilidad P(*Ac* ≤ *PGA*(T)) para T = 100, 475 y 1000 años, respectivamente. A grandes rasgos, los tres mapas son bastante parecidos, en tanto en cuanto la mayor parte del territorio evaluado se caracteriza por probabilidades bajas (entre

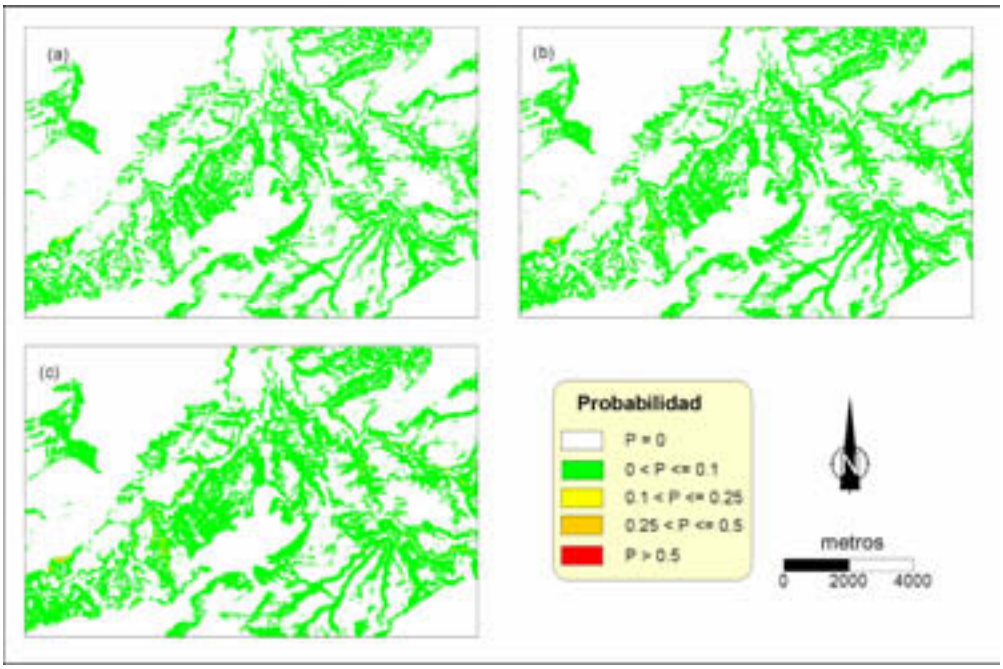


Figura 5. Probabilidad de que *Ac* ≤ *PGA* esperada para 100 (a), 475 (b) y 1000 años (c).

0 y 0,1). Para T = 100 años, Figura 5a, *PGA* es inferior a 0,09 *g* en cualquier punto del área de estudio. Como consecuencia, para que un píxel tenga una probabilidad elevada (p.e. superior al 25%) de que *Ac* sea inferior a tales umbrales de *PGA* es necesario que el mismo se encuentre, prácticamente, en situación de equilibrio inestable ($FS \cong 1$). Es por ello que sólo aparecen algunos píxeles con esta condición en todo el mapa (zonas de El Salt o El Molinar, al W y SE de Alcoy, respectivamente).

Al aumentar el periodo de exposición considerado, las áreas de probabilidad superior al 25% son algo más frecuentes. Estas zonas corresponden, aproximadamente, a áreas donde la *Ac* (determinista) es inferior a 0,3 *g* (Figura 3). Si se comparan estos mapas con el de susceptibilidad determinista (Figura 4), se comprueba que las diferencias son notables, consecuencia lógica de las diferencias de criterio con que se ha confeccionado cada mapa (determinista vs probabilista).

A partir de los datos de probabilidad se ha confeccionado un nuevo mapa de susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos (Figura 6). Para ello se ha tomado como base el mapa elaborado para periodos de retorno de 475 años (Figura 5b), periodo de exposición comúnmente utilizado en estudios de riesgo sísmico. Las categorías de susceptibilidad se han definido a partir de los mismos intervalos de probabilidad con que se ha confeccionado la figura 5b. Así, por ejemplo, la clase Susceptibilidad Muy Alta corresponde a probabilidades $P(Ac \leq PGA(475 \text{ años})) > 0{,}5$ (50%).

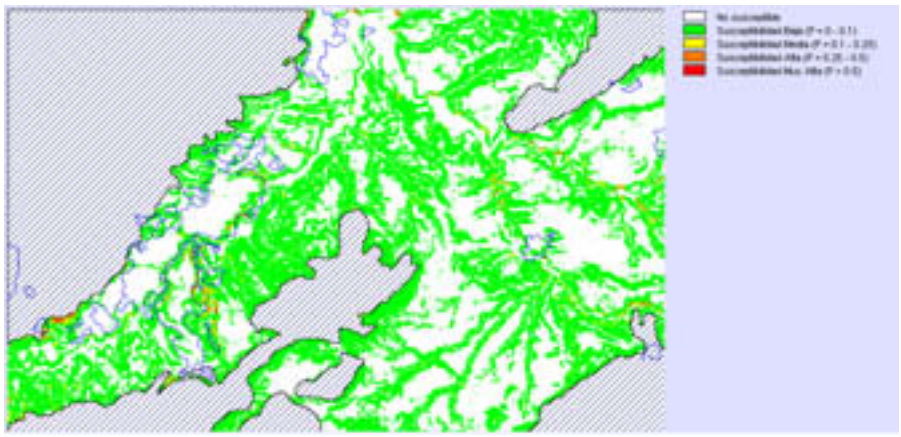


Figura 6. Mapa de susceptibilidad (probabilista) de las laderas a sufrir inestabilidades causadas por terremotos.

La distribución de las clases de susceptibilidad Muy Alta y Alta presentan la misma distribución que las obtenidas mediante métodos deterministas (Figura 4), si bien en este tipo de análisis no se llegó a definir la clase Muy Alta. Las mismas se concentran en las zonas de El Salt, río Molinar, y ciertas márgenes de los ríos que discurren por la zona. Si se tiene en cuenta la distribución de estas zonas y las áreas urbanas (o afectadas por actividad económica del hombre), se comprueba que el mayor *Riesgo* se concentra en las proximidades de Alcoy ciudad, ya que parte de su casco urbano (barrio Casco Antiguo y polígonos industriales de Cotes Baixes y Sembenet) se encuentran sobre áreas de susceptibilidad Alta a Muy alta.

La principal novedad que aporta este mapa respecto del mapa de susceptibilidad determinista es que aumenta notablemente las zonas afectadas por una susceptibilidad Media y Baja. Esto es importante por cuanto ahora aparecen afectadas otras zonas urbanas. Ello hace que el *Riesgo* de la región sea mayor de lo que se podría deducir a partir del mapa determinista.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado los resultados obtenidos del análisis de incertidumbres en las propiedades geotécnicas de los materiales de un área piloto. La metodología utilizada se caracteriza por su flexibilidad, pudiéndose aplicar al análisis de otros problemas, y porque los resultados se integran con facilidad en un SIG, en el cual se realiza el análisis espacial de los datos.

La aplicación de esta metodología ha permitido mejorar el conocimiento de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades de ladera inducidas por terremotos en Alcoy y áreas adyacentes, mejorando la capacidad para delimitar áreas potencialmente peligrosas, en comparación con métodos tradicionales deterministas, aumentando notablemente el territorio cuya probabilidad de sufrir este problema (> 10% en 475 años) no puede despreciarse, si se pretende realizar una correcta planificación del territorio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CTIDIB/2002/177 y es la publicación 05/2004 de la *Unidad de Ingeniería Geológica* del grupo de investigación GRUPOS04/085 de la Generalitat Valenciana. Se agradece la colaboración de las empresas ITC S.A., INTERALCOY, S.A. y GEOSCAN S.A., así como la disponibilidad del Excelentísimo Ayuntamiento de Alcoy para facilitar cuantos datos han sido precisos para la presente investigación.

REFERENCIAS

Almela, A., Gómez, E., Quintero, I. y Mansilla, H. (1975): "*Mapa geológico de España E:1/50.000, Hoja 821 – Alcoy*". 2ª serie. Servicio de Publicaciones. IGME, Ministerio de Industria. Madrid.

Ayala Carcedo, F.J., Barettino, D., Mulas Peña, J., Laín, L., Burillo, J., Soria, J., Conconi, G.O., Gracia, A., Pérez, M.A., Grao, J.A. y Rico, J. (1990): *Estudio de riesgos naturales en la ciudad de Alcoy. Riesgo de avenidas. Vulnerabilidad y riesgo sísmico*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Serie: Ingeniería GeoAmbiental. Madrid. 214 p.

Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás, R., López Casado, C., Doménech, C., Estévez, A., Cuenca, A. y Henares, J. (2004): "Susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en Alcoy (Alicante) y sectores adyacentes". *Geotemas*, en prensa.

Goy, J.L., Zazo, C., Silva, P. y Bardají, T. (1989): Actividad neotectónica cuaternaria en la cuenca neógena de Alcoy (España). Aplicación de criterios geomorfológicos. *2ª Reunión sobre el Cuaternario Ibérico* (Resúmenes). Madrid.

Hammond, C., Hall, D., Miller, S. y Swetik, P. (1992): *Level I Stability Analysis (LISA) documentation for versión 2.0*. Gen. Tech. Rep. INT-285. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 190 p.

IGME (1985). *Mapa geotécnico y de riesgos geológicos para la ordenación urbana de Alcoy. Mapa de riesgos geológicos E:1/25.000, 1/2.500 y 1/1.000*. Memoria. Ministerio de Industria y Energía. Madrid. 165 p.

Jibson, R.W., Harp, E.L., y Michael, J.A. (2000): "A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps". *Engineering Geology*, 58, 271-289.

Murphy, W., Petley, D.N., Bommer, J. y Mankelow, J.M. (2002): "Uncertainty in ground motion estimates for the evaluation of slope stability during earthquakes". *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35, 71-78.

Newmark, N.M. (1965): "Effects of earthquakes on dams and embankments". *Géotechnique*, 15, 139-160.

Refice, A. y Capolongo, D. (2002): "Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment". *Computer & Geosciences*, 28, 735-749.

Rodríguez, C.E., Bommer, J. y Chandler, R.J. (1999): Earthquake-induced landslides: 1980-1997. Soil *Dynamics & Earthquake Engineering*, 18, 325-346.

Wilson, R.C. y Keefer, D.K. (1985): "Predicting areal limits of earthquake-induced landslides". En: J.I. Ziony (Ed.), *Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An Earth Science Perspective*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1360, pp. 317-345.

Análisis de la evolución de las superficies de deflación eólica en la Playa de El Inglés (Gran Canaria, Islas Canarias) mediante técnicas de fotointerpretación y teledetección (1960-2002)

G. Díaz Guelmez y L. Hernández Calvento

Departamento de Geografía, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, C/ Pérez del Toro, 1, 35003 Las Palmas de Gran Canaria.

RESUMEN

El campo de dunas de Maspalomas, situado en el extremo sur de la isla de Gran Canaria, constituye el único sistema de dunas móviles activo de este territorio insular. Su atractivo, como lugar de destino turístico, ha supuesto que, desde los años sesenta, se produjera en sus alrededores un amplio desarrollo urbanístico y de servicios, proceso que lo ha convertido en uno de los principales activos económicos de la isla.

Desde hace algunos años, un equipo de trabajo, coordinado desde el Grupo de Geografía Física y Medio Ambiente de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, ha venido estudiando las transformaciones producidas en este sistema como consecuencia de aquel desarrollo turístico. Pero de igual manera, se ha identificado una problemática de mayor alcance: una carencia progresiva de sedimentos en su área de entrada al sistema, la playa de El Inglés. Este hecho se comprueba por varias vías para el período que transcurre entre los años sesenta y el año 2000: aumento de la distancia entre la playa alta y la primera línea de dunas móviles, disminución de la altura de las dunas y aparición de grandes superficies de deflación eólica.

El objetivo de este trabajo es analizar con precisión la evolución de esas áreas de deflación en la playa de El Inglés desde los años 60 hasta la actualidad, mediante la interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

***Palabras Clave**: Playa de El Inglés, Maspalomas, Gran Canaria, sistema de dunas, entrada de sedimentos, superficies de deflación eólica, fotografía aérea, imágenes de satélite.*

ABSTRACT

The dune field of Maspalomas, placed in the south of the island of Gran Canaria, constitutes the only active system of mobile dunes of this insular territory. Its attraction as place of tourist destiny, has supposed that, from the sixties, was producing surroundings a wide urban development and of services, process that has turned it into one of the principal economic assets of the island.

For some years, an team of work, coordinated from the Group of Geografía Física y Medio Ambiente of the University of Las Palmas of Gran Canaria, has come studying the transformations produced in this system as con-sequence of that tourist development. But of equal way, there has been identified a problematic of major scope: a progressive lack of sediments in its area of entry to the system, the beach of El Inglés. This fact has been verified for several ways for the period that passes between the sixties and the year 2000: increase of the distance between the back-shore and the foredune; decrease of the height of the dunes; and appearance of big surfaces of wind deflation.

The aim of this work is to analyze the evolution of these areas of deflation in the beach of El Inglés from the 60s up to the present time, by means of the interpretation of aerial photographies and images of satellite.

***Key Words**: Beach of El Inglés, Maspalomas, Gran Canaria, system of dunes, entry of sediments, surfaces of wind deflation, aerial photography, images of satellite.*

INTRODUCCIÓN

Los espacios de dunas litorales, caracterizados por su complejidad y fragilidad, se han constituido en las últimas décadas en lugares idóneos para el desarrollo de amplios proyectos turísticos, en los que no ha faltado la implantación de infraestructuras urbanísticas destinadas a acoger al turismo de masas (*Nonn*, 1987). Este proceso de ocupación ha tenido serias consecuencias ambientales, produciendo modificaciones en la dinámica de los sedimentos, y transformaciones ecológicas (*Nordstrom*, 1994).

El campo de dunas de Maspalomas, situado en el vértice sur de la isla de Gran Canaria (Figura 1), se caracteriza por presentar una gran complejidad, al ser un área de confluencia de una gran variedad de sistemas (marino, eólico, lacustre y, de forma ocasional, fluvial). Desde mediados de los años sesenta del pasado siglo se desarrolla en sus alrededores un proyecto urbanístico de grandes dimensiones, destinado a acoger la mayor parte de la demanda turística de la isla y, por ello, del archipiélago canario. En 1994 fue declarado Reserva Natural Especial

por Ley autonómica. Desde 1996, un equipo multidisciplinar vinculado al Grupo de Geografía Física y Medio Ambiente de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria desarrolla estudios, con el propósito de analizar las consecuencias que el desarrollo turístico ha tenido en este sistema.

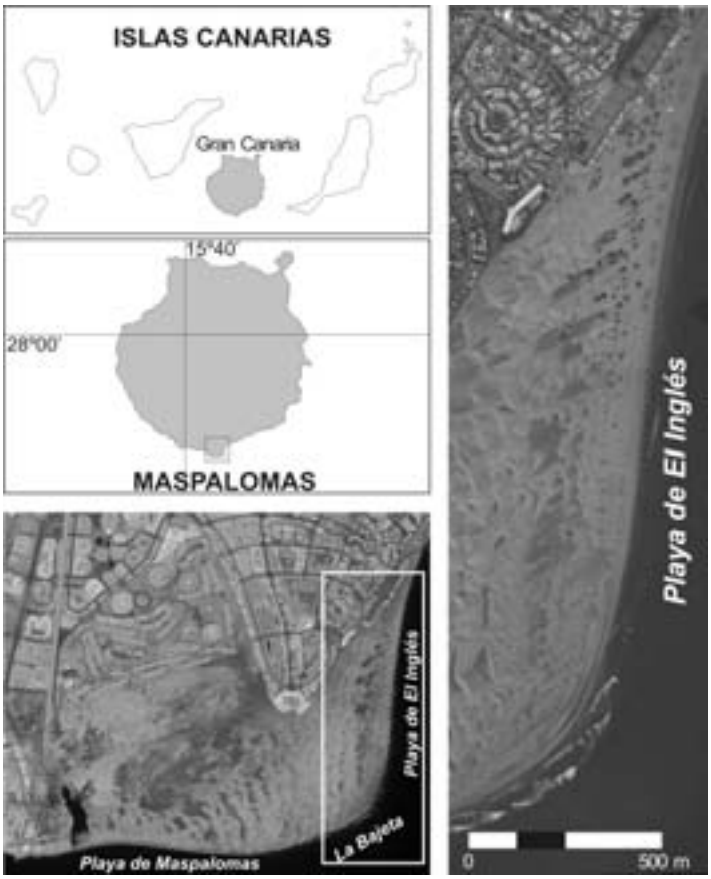


Figura 1. Croquis de localización y vista general del área de estudio en el año 2000.

Los análisis realizados hasta ahora ponen de relieve que este sistema ha experimentado un importante proceso de transformación en las cuatro últimas décadas, inducido por el amplio desarrollo turístico que se ha producido en sus alrededores. Los principales procesos identificados han sido el bloqueo del tránsito de arenas en las áreas ubicadas a sotavento de la principal urbanización (*Hernández et al.*, 2003b), la aparición del sustrato subyacente en las áreas intermedias del sistema (*Hernández y Mangas*, 2003), el amplio desarrollo de la cobertura vegetal, que ha incidido en la paralización de la dinámica sedimentaria (*Hernández et al.*, 2003a), y la generación de pasillos de sombra eólica a sotavento de los equipamientos de playa (*Hernández et al.*, 2002a).

Pero además de estos cambios, se ha identificado una carencia progresiva de aportes de arenas en su área de entrada al sistema, la playa de El Inglés (*Hernández et al*., 2002b). En consecuencia, la salida de los sedimentos por la playa de Maspalomas, después de haber conformado el campo de dunas, no es compensada por las entradas de nuevos materiales por la playa de El Inglés. Este bloqueo se materializa en un déficit progresivo de arenas, que se manifiesta de forma exponencial desde los años sesenta. Los elementos que permiten considerar este déficit son, por un lado, la menor altura que presentan las dunas y, por otro, la mayor distancia que existe cada año entre la playa alta y la primera línea de dunas transversales, en la playa de El Inglés. El contacto entre la playa alta y esa primera línea de dunas se resuelve hoy mediante una amplia superficie llana, sobre la que progresan las áreas de deflación, por lo que la playa corre el riesgo de inestabilizarse y perderse.

Este hecho ha generado una indudable controversia sobre el papel que el desarrollo turístico puede haber jugado en este espacio. Aun sin conocer las causas que propician este proceso, la preocupación sobre un desenlace fatal para el campo de dunas ha hecho saltar las alarmas en la sociedad grancanaria, debido al papel de sostén económico que este sistema juega en la isla (este sector del litoral recibe a unos 3.000.000 de visitantes anuales).

El trabajo que aquí se expone pretende profundizar en la evolución de las superficies de deflación de la playa de El Inglés desde principios de los años sesenta hasta el año 2002.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se ha realizado en una franja de unos 500 metros, de Este a Oeste, medidos desde la línea de costa, en la playa de El Inglés, hasta el vértice sur de la terraza sedimentaria que recibe el mismo nombre, y sobre la que se ha desarrollado, desde los años sesenta del pasado siglo una amplia urbanización turística. Este espacio, que conforma el margen oriental del campo de dunas de Maspalomas, constituye al área de entrada de los sedimentos al sistema de dunas (*Martínez et al.*, 1986). Presenta una longitud de dos kilómetros de norte a sur, y limita en su vértice meridional con la punta de la Bajeta, zona de intercambio de sedimentos entre las dos playas que configuran el sistema de dunas (*Martínez et al.*, 1989; *Alonso et al*., 2001). Las arenas ocupan en este espacio una superficie total de 73,45 hectáreas.

Las geoformas dominantes son dunas barjanas y cordones transversales (*Martínez et al*., 1986), localizándose las primeras en las áreas próximas a la línea de costa, donde se forman a partir de las dunas embrionarias, generadas por retenciones a sotavento de la vegetación. Los cordones transversales representan un mayor volumen sedimentario en tránsito, por lo que se generan en las áreas interiores de esta franja costera, al acumularse las arenas provenientes de la línea de costa. Estas últimas geoformas presentan alturas considerables (entre 6 y 12 metros), si bien en los últimos decenios su altura ha disminuido significativamente. En la actualidad muchos de estos cordones transversales presentan rasgos barjanoides, y puntualmente patrón en *aclé* (*Hernández*, 2002).

Las características climáticas en el área de estudio están determinadas principalmente por la influencia de los vientos alisios, que presentan una dirección NE-SO y una velocidad media

en torno a los 24 - 28 km/h (*Naranjo*, 1999). La nubosidad en este sector de la isla es escaso, debido al efecto "pantalla" que ejerce el relieve de la isla, por lo que presenta un alto porcentaje de días soleados. Estas características, junto con unas precipitaciones muy irregulares, que no superan en la mayoría de los años los 100 mm, determinan un clima cálido y seco (*Marzol*, 1987). La vegetación está compuesta por especies psammófilas y halófilas, siendo *Traganum moquinii* la única especie significativa en el área de estudio, en el que juega un papel importante: genera acumulaciones a sotavento, y estabiliza la primera línea de dunas (*foredune*), que protege al sistema de la erosión marina.

Esta playa constituye, conjuntamente con la de Maspalomas, el principal destino turístico de la isla de Gran Canaria, razón por la cual soporta una ocupación permanente a lo largo del año, tanto por parte de visitantes extranjeros, como peninsulares, aunque no hay que desechar la presencia de usuarios locales, principalmente durante los períodos vacacionales.

METODOLOGÍA

La metodología empleada se ha basado en la interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, además del seguimiento directo de la evolución de las geoformas, mediante trabajo de campo.

Con relación al primer aspecto, se ha trabajado a una escala interanual, considerada como una mesoescala temporal en estudios relativos a ambientes eólicos costeros actuales (*Alcántara-Carrió y Alonso*, 2000). De esta forma se han caracterizado y cartografiado las geoformas objeto de estudio, haciendo una distinción entre áreas humedecidas por capilaridad correspondientes a espacios interdunares, y áreas de deflación eólica. La interpretación de los documentos fuente nos permite describir la evolución de estas geoformas desde los primeros años de la década de los 60 hasta la actualidad.

Por su parte las campañas de campo, que se vienen realizando de forma sistemática desde el año 1998, nos permiten conocer el funcionamiento del sistema, conforme a la entrada de sedimentos que se produce mensualmente, así como a las geoformas que se generan. De esta manera es posible valorar de forma efectiva la génesis de las áreas humedecidas, cuestión que resulta necesaria de cara a la interpretación de los documentos fuente.

Estos documentos han sido fotografías áreas e imágenes de satélite. Con respecto a los primeros, se han considerado los vuelos correspondientes a los años 1961, 1977, 1989, 1995, 1998, 2000 y 2002. Por su parte, las imágenes digitales utilizadas fueron captadas por el satélite IKONOS, en el año 2000. Sobre los documentos aéreos se realizaron trabajos de fotointerpretación, haciendo uso de un estereoscopio de alta precisión, con el fin de diferenciar las áreas de deflación de los espacios interdunares. Para ello, se fueron reconociendo sistemáticamente, en cada documento, los siguientes elementos:

- Geoformas y espacios interdunares: permiten realizar una aproximación al funcionamiento geomorfológico del sistema. Puesto que las formas que adquieren los depósitos de arena se derivan de la disponibilidad de sedimentos a ser movilizados, y de la existencia de vientos efectivos, una alteración en éstas, tanto en cuanto a su acumulación,

como en cuanto a su avance, estaría indicando un cambio en alguno de los parámetros mencionados. Por su parte, la disposición espacial, la forma y el tamaño de los espacios interdunares son indicadores de la existencia de carencia o exceso de sedimentos.

- Pasillos de sombra eólica y áreas de deflación: la existencia de pasillos de sombra eólica, fácilmente identificables mediante técnicas de fotointerpretación, permite localizar obstáculos que funcionan como pantallas al paso de los sedimentos, alterando su recorrido y generando áreas de sombra eólica. En estas áreas, las partículas se frenan y quedan acumuladas a sotavento de los escollos. Por otro lado, principalmente en los laterales de los obstáculos, el viento presenta una mayor aceleración, originando áreas de deflación eólica. Éstas pueden llegar a configurar amplias superficies cuando se produce un claro déficit sedimentario.

A la hora de cartografiar los resultados fue necesario considerar una serie de requisitos previos, con el fin de que los análisis previstos fueran correctos (*Moore*, 2000). Entre éstos resultaba imprescindible la corrección geométrica de los documentos, ajustándolos a un sistema de georreferencia común, cuestión que se abordó mediante la digitalización de los documentos originales, y la transformación geométrica de los centros útiles de las fotografías aéreas. Una vez georreferenciados los documentos, se procedió al volcado de los resultados de la interpretación.

La consideración conjunta de estos elementos aporta la información necesaria para abordar el análisis del estado del área de estudio en cada uno de los documentos considerados. La comparación entre cada uno de ellos permite conocer la evolución experimentada en los últimos cuarenta años y realizar un seguimiento de las variaciones del sistema.

RESULTADOS

Atendiendo a la serie de cambios temporales (figura 2), se observa como resultado un aumento progresivo de las áreas de deflación en este sistema de entrada de los sedimentos arenosos al campo de dunas de Maspalomas. Así, podemos observar cómo en el año 1961 no existían áreas de deflación en todo el área de estudio. La entrada de sedimentos en esta época era muy significativa, cuestión que explica la disposición de las principales geoformas: las dunas barjanas dominaban los primeros tramos, desde la línea de costa, mientras que los primeros cordones transversales se localizaban a una distancia de unos 70 metros de la playa alta. El principal uso que soportaba la playa era la pesca por parte de las poblaciones locales que se ubicaban en los sectores septentrionales de la terraza de El Inglés.

Es a partir de este momento cuando se produce el desarrollo turístico en este ámbito costero insular, por lo que la fisonomía de la franja estudiada cambia de forma significativa (figura 3): a finales de los años setenta ya se ha producido en gran parte el desarrollo urbanístico de la terraza de El Inglés, y la presencia de equipamientos turísticos es notable a lo largo de toda la playa. Las principales instalaciones ubicadas en la playa alta son conjuntos de hamacas y sombrillas, y kioscos de playa, que llegan a alcanzar 100 m^2 de superficie. Estas instalaciones inducen la generación de un efecto de aceleración lateral del viento (y por ello de las arenas),

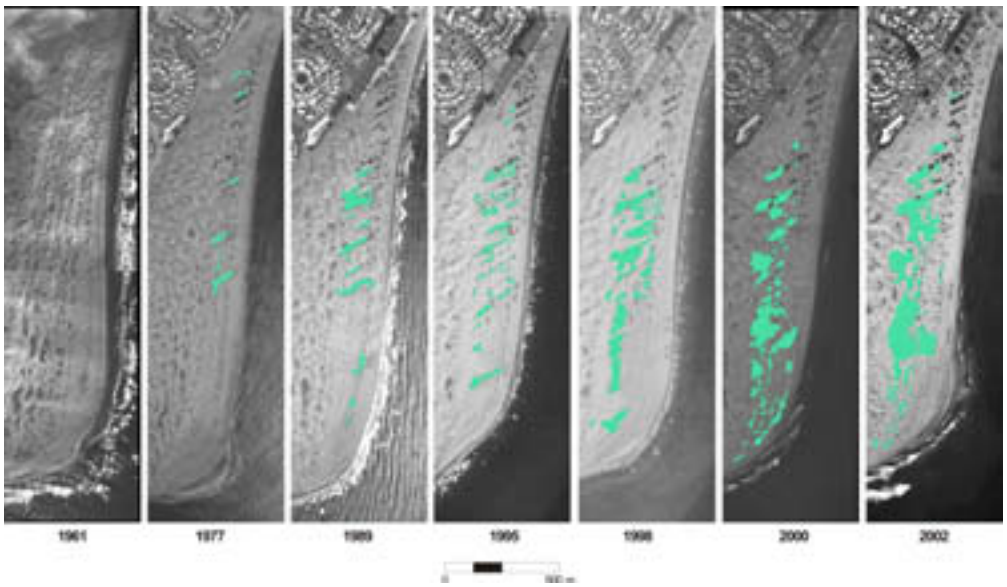


Figura 2. Evolución de la playa de El Inglés (1961-2002) y cartografía de las superficies de deflación.

y frenado en la parte frontal, expuesta directamente a los vientos dominantes, por lo que se generan pasillos de sombra eólica a sotavento de estos obstáculos (*ITGE*, 1990; *Hernández et al*., 2002a). Estas primeras "huellas", que permiten estimar un proceso de deflación en el área, siguen la dirección marcada por los vientos dominantes (NE-SO), y se localizan principalmente en el sector norte del área de estudio, toda vez que fue en esta área donde se centró el principal desarrollo turístico en esta primera época. La superficie total ocupada por estas áreas de deflación es de 0,8 hectáreas. En este momento, y conforme a lo estudiado mediante fotografía aérea, se observa una disminución de la entrada de arenas en el sistema: las dunas barjanas disminuyen en altura, al igual que los cordones transversales; estos últimos se alejan hacia el interior del sistema, con respecto a la fecha anterior, situándose a una distancia de 105 metros de la playa alta.

A finales de los años ochenta el panorama ha cambiado en lo que se refiere a los equipamientos que se localizan en la playa alta, disminuyendo en número y en superficie (los kioscos de playa, desde 1987, presentan unas dimensiones mucho más reducida, ocupando unos 10 m^2). Sin embargo, los pasillos de sombra eólica aumentan en número y dimensiones, para terminar configurando áreas de deflación eólica, que se generalizan a todo el ámbito de la playa, localizándose especialmente en los sectores medio y sur de la franja estudiada. Así, para 1989 hemos constatado una superficie total de 2,42 hectáreas ocupadas por estas áreas de deflación. En este momento la distancia entre los cordones transversales y la playa alta ha aumentado significativamente, situándose en 140 metros.

A partir de los años noventa, la problemática erosiva parece haberse trasladado de forma definitiva al sector meridional del sistema: la génesis de pasillos de sombra eólica en este ámbito está relacionada inicialmente con la presencia de kioscos de playa y estructuras protec-

Figura 3. Equipamiento turístico en la terraza y en la playa de El Inglés a finales de los años setenta.

toras contra el viento, que crean los propios usuarios en la playa. La consecuencia directa son largos pasillos (en algunos casos superan los 150 metros de longitud) que finalizan en áreas distales de deflación, que presentan formas redondeadas. Para esta fecha la superficie total de estas geoformas es de 3,2 hectáreas, y la distancia entre la playa alta y los cordones transversales ha aumentado a 194 metros.

Estas áreas distales son el origen de la amplia superficie continua que se localiza al sur de la playa alta de El Inglés en 1998, y que alcanza los 500 metros de longitud, medida de Norte a Sur. En consecuencia, se explica que el aumento significativo que experimenta la distancia entre los cordones transversales y la playa alta, que calculamos en 220 metros, genera una amplia superficie llana, que no es ocupada por acumulaciones sedimentarias de envergadura, sino por pequeñas dunas barjanas, de escasas dimensiones (alrededor de 1,5 metros de altura), delgadas láminas de arena, y mayoritariamente por esta área de deflación, cuestión que ya será una constante hasta la actualidad. Mientras, en los sectores septentrionales, también han aumentado considerablemente sus dimensiones las áreas de deflación. En conjunto, para este año se ha calculado una superficie total de 6,46 hectáreas, doblándose la medición realizada para tres años atrás.

Los dos años estudiados de la primera década del siglo XXI no hacen sino ratificar la tendencia observada para las fechas anteriores, y especialmente para los últimos años de la década de los noventa: las áreas de deflación del norte y del sur aumentan sus dimensiones considerablemente, para dar unas cifras totales de 7,63 hectáreas y 10,07 hectáreas, respectivamente, para 2000 y 2002. Sólo algunas dunas barjanas y láminas de arena se interponen entre las grandes áreas de deflación del norte y del sur del sistema. Al tiempo, la distancia entre la playa alta y los cordones de dunas móviles supera los 250 metros.

La evolución de las medidas realizadas sobre estas áreas, en su conjunto (figura 4), nos permiten demostrar una hipótesis establecida con anterioridad: el crecimiento de las superficies de deflación en la playa de El Inglés se ha producido de forma exponencial en los últimos cuarenta años, cuestión que ya fue demostrada con respecto a la distancia entre la playa alta y el primer cordón de dunas móviles (*Hernández*, 2002), adaptando los métodos utilizados para el seguimiento de la erosión litoral en espacios arenosos, mediante el seguimiento de la distancia entre la primera línea de dunas transversales y la playa alta (distancia *foredune-backshore*) (*Ojeda*, 2000).

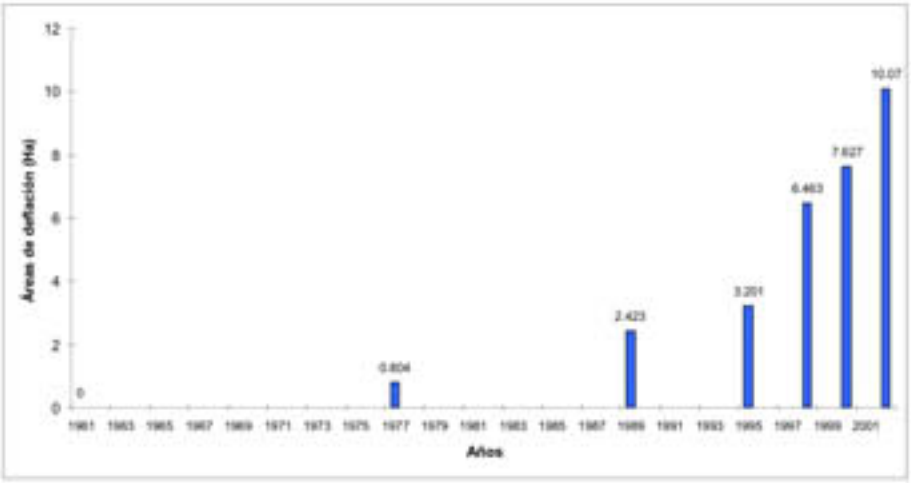


Figura 4. Evolución de las superficies de deflación en la playa de El Inglés (en hectáreas).

CONCLUSIONES

Los resultados anteriores permiten establecer las siguientes conclusiones:

- Se ratifica la existencia de un proceso de deflación generalizado en la playa de El Inglés. Este proceso es producido por la existencia de un déficit de sedimentos en esta playa, y por tanto, en todo el sistema de dunas de Maspalomas, dado que este sector funciona como área de entrada de las arenas al campo de dunas.
- Este proceso de deflación parece estar asociado, durante los primeros años (finales de las décadas de los setenta y ochenta del pasado siglo) a la presencia de equipamientos de playa (especialmente kioscos) que inducían la generación de áreas de deflación a sotavento. Sin embargo, considerando el progresivo aumento de la distancia entre la playa alta y los cordones transversales, así como la evolución de las geoformas, todo indica que el proceso de deflación se hubiese producido igualmente, debido a la carencia progresiva de arenas en tránsito que manifiesta el sistema en los últimos cuarenta años. En este sentido, los equipamientos turísticos ubicados en la playa alta parecen haber acelerado el proceso, pero no ser la clave de su génesis.

- El proceso de deflación se produce de forma exponencial, tal y como ocurre con el aumento de la distancia entre la playa alta y la primera línea de dunas transversales. Este hecho indica que cada vez las áreas de deflación adquieren mayores dimensiones, y que el déficit de arenas secas, en tránsito, es mayor.
- Desde un punto de vista aplicado, y de acuerdo con el interés que esta temática tiene para la sociedad canaria, es necesario reconocer dos áreas donde son previsibles las mayores transformaciones en el futuro: por un lado el campo de dunas, que en la actualidad adolece de los aportes necesarios para sostener su equilibrio sedimentario; así, estimamos que la disminución de los sedimentos en tránsito implicará un desgaste progresivo de las dunas actuales, y por ello la pérdida de una de las principales imágenes turísticas de la isla. Por otro lado, la playa de El Inglés, que queda expuesta en mayor medida a posibles procesos erosivos marinos, aun cuando estos no tuvieran una gran incidencia erosiva potencial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por una beca INNOVA, de la Fundación Universitaria de Las Palmas, así como por un proyecto de investigación, en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo e Innovación Tecnológica, del Ministerio de Ciencia y Tecnología (REN2003-05947).

REFERENCIAS

Alcántara-Carrió, J. y Alonso, I. (2000): "Propuestas metodológicas para el estudio de los ambientes eólicos costeros actuales". En J.R. Andrés, y F.S. Gracia (Eds.), *Geomorfología Litoral. Procesos activos*, Monografías de la S.E.G, Madrid, Vol. 7, pp. 81-92.

Alonso, I.; Montesdeoca, I.; Vivares, A. y Alcántara-Carrió, J. (2001): "Aproximación a la modelización de la dinámica litoral de las playas de El Inglés y Maspalomas (Gran Canaria)". *Vector Plus*, Vol. 18, pp. 17-27.

Hernández, L. (2002): *Análisis de la evolución del sistema de dunas de Maspalomas, Gran Canaria, Islas Canarias (1960-2000)*. Tesis Doctoral (Inédita), Departamento de Geografía de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 408 p.

Hernández, L.; Ruiz, P.; Pérez-Chacón, E.; Suárez, C.; Alonso, I. y Alcántara, J. (2002a): "Pasillos de sombra eólica generados por los kioscos de Playa de El Inglés (Gran Canaria). Resultados preliminares". En E. Serrano, A. García De Celis, J.C. Guerra, C.G. Morales, y M.T. Ortega (Eds.), *Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, montaña y dinámica territorial*, Sociedad Española de Geomorfología y Departamento de Geografía de la Universidad de Valladolid, Valladolid, pp. 141- 148.

Hernández, L.; Alonso, I.; Ruiz, P.; Pérez-Chacón, E.; Suárez, C.; y Alcántara, J. (2002b): "Decadal environmental changes on the dune field of Maspalomas (Canary Islands): evidences of an erosive tendency". En F. Veloso-Gomes, F. Taveira-Pinto & L. Das Neves, L. (Eds.), Littoral 2002. *The Changing Coast, Eurocoast*, Oporto, pp. 519-527.

Hernández, L. y Mangas, J. (2003): "Caracterización de los materiales sedimentarios aflorantes en el sistema de dunas de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias)", *II Reunión de Geomorfología Litoral*, Departamento de Geografía de la Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.

Hernández, L.; Pérez-Chacón, E.; Suárez, C.; Ruiz, P. y Romero, L. (2003a): "Alteraciones de la vegetación inducidas por la actividad humana en la Reserva Natural Especial de las Dunas de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias)". En M.A. Arozena, E. Beltrán y P. Dorta (Eds.), *La Biogeografía, Ciencia Geográfica y Ciencia Biológica*, Servicio de publicaciones de la Universidad de La Laguna, La Laguna, pp. 264-275.

Hernández, L.; Ruiz P.; Alonso, I.; Alcántara-Carrió, J.; Pérez-Chacón, E. y Suárez, C. (2003b): "Transformaciones inducidas por el desarrollo turístico en el Campo de Dunas de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias)". *Geofocus*, Vol. 3, pp. 127-142.

Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) (1990): *Mapa geológico de España escala 1:25.000. 1114-III (83-86; 83-87): Maspalomas*. Madrid, 93 p. (tomo memoria) y cartografía.

Martínez, J.; Carpio, P.; Gómez, M.; Hernández, T. y Mena, A. (1986): *Las Dunas de Maspalomas: Geología e impacto del entorno*. Excmo. Cabildo Insular de Gran Canaria y Universidad Politécnica de Canarias, Las Palmas de Gran Canaria, 151 p.

Martínez, J.; Rosario, M. y Cárdenes, M. (1989): "La evolución geomorfológica de la Punta de la Bajeta, en la playa de Maspalomas (Isla de Gran Canaria, España)", *Actas de la IX Bienal de la R.S.E.H.N.*, pp. 235-243.

Marzol, M. (1987): *Las precipitaciones en las Islas Canarias*. Secretariado de publicaciones de la Universidad de La Laguna, La Laguna, 220 p.

Moore, L.J. (2000): "Shoreline mapping techniques". *Journal of Coastal Research*, Vol. 16 (1), pp. 111-124.

Naranjo, R. (1999): *Maspalomas espacio natural*. Consejalía de Turismo del Ayuntamiento de San Bartolomé de Tirajana, Las Palmas de Gran Canaria, 365 p.

Nonn, H. (1987): Geografía de los litorales. Akal, Madrid, 199 p.

Nordstrom, K. (1994): "Beaches and dunes of human-altered coasts". *Progress in Physical Geography*, Vol. 18 (4), pp. 497-516.

Ojeda, J. (2000): "Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta". *Boletín de la A.G.E.*, Vol. 30, pp. 103-118.

Estimación de profundidades en la Bahía de Santander y en las Marismas de Santoña a partir del sensor aerotransportado CASI

E. Castillo López y V. Bayarri Cayón

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Avda. Los Castros s/n, 39005 Santander.

RESUMEN

La búsqueda de algoritmos batimétricos precisos utilizando imágenes de sensores pasivos se viene realizando desde hace más de 30 años. Los modelos existentes pueden clasificarse principalmente en dos tipos: cocientes espectrales y modelos de transferencia de radiación. Cada modelo tiene un nivel de complejidad variable en función del algoritmo y sensor utilizado. Se han empleado imágenes del sensor aerotransportado CASI (Compact Airborne Spectrographic Imagery) con una disposición espectral de 36 bandas cubriendo el rango comprendido entre los 400 y 950 nm; del mismo modo se dispuso de una batimetría realizada con GPS-Ecosonda para la calibración y validación de los datos. En la presente comunicación se analizarán diversos métodos existentes con el objetivo de estimar la precisión alcanzada, valorando hasta qué punto este tipo de trabajos se presentan como una alternativa válida y más rentable que las metodologías clásicas de toma de profundidades. Las zonas de trabajo serán La Bahía de Santander y las Marismas de Santoña.

La Bahía de Santander, situada en la Comunidad Autónoma de Cantabria, viene acusando desde los años ochenta importantes cambios morfodinámicos como consecuencia de la actividad antropogénica. Esto ha generado un continuo relleno que puede llegar a ser peligroso para la circulación dentro de la zona. Como consecuencia, se vienen realizando dragados anuales con el coste que ello implica. Se hace necesario, por lo tanto, un seguimiento continuo de las profundidades con cierta precisión.

La Reserva Natural de las Marismas de Santoña y Noja se localiza en el sector oriental de la franja costera de la Comunidad Autónoma de Cantabria, España. El conjunto total de la

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

zona tiene una extensión aproximada de 4.341 hectáreas y constituye el conjunto de humedales más importantes para las aves acuáticas del norte de la península Ibérica por lo que es necesario llevar a cabo una gestión apropiada de los mismos.

Palabras Clave: *CASI, Batimetría, sensores aerotransportados, GPS, ecosonda, Teledetección, estimación de profundidades.*

ABSTRACT

For 30 years it has been searched precise bathymetric algorithms from passive sensors imagery. The existing models can be mainly classified in two types: spectral rationing and radiative transfer models. Each model has a variable complexity level depending on the algorithm and the sensor used. On one hand, airborne sensor CASI (Compact Airborne Spectrographic Imagery) imagery has been employed with 36 spectral bands within the range from 400 to 950 nm; on the other side a GPS-Echo sounder was used to calibrate and validate the data. In the current communication several existing methods will be analyzed with the objective of estimating the reached accuracy and assessing to some extend this type of products can be a valid alternative to the classical bathymetric methodologies. The working areas were the Santoña's marsh.

The Santander Bay is located in the north of the Cantabrian Community, and it has been suffering morphodynamc changes from the eighties due to the anthropogenic activity. This fact has produced a continuous filling that can become dangerous for the safety navigation within the area. Dredgins have to be made every year and the depth must be monitored with enough accuracy for this purpose.

The "Reserva Natural de las Marismas de Santoña y Noja" is a natural Reservoir in the eastern sector of the coastal fringe in the Cantabria community, Spain. The total extension is about 4341 hectares and it is the most important wetland's group for the aquatic poultries in the north of the Iberian Peninsula, so it is necessary to carry out an adequate management of them.

Keywords: *CASI, Bathymetry, airborne Sensorss, GPS, echo sounding, remote sensing, depth estimation.*

INTRODUCCIÓN

Los entornos litorales suelen caracterizarse por sus elevados valores naturales, como es el caso de las marismas, dunas o estuarios, por lo que la realización de obras en estos espacios deben basarse en unas técnicas y unos enfoques propios.

La gestión práctica del medio natural, y de los humedales en particular, se ve afectada por una falta de medios tanto de aplicación como de criterios de decisión. Diversos estudios y tra-

bajos han puesto de manifiesto la cantidad de limitaciones y carencias comunes que se repiten en la mayoría de las actuaciones, con independencia de su magnitud o escala.

En muchos de los trabajos llevados a cabo en dichas zonas era necesario disponer de una buena cartografía y de un mapa de profundidades lo suficientemente preciso para determinar la rugosidad del medio marino, calcular el volumen de agua que ha ido ganando o perdiendo el estuario, ….

En el caso de los humedales de la *Reserva Natural de las Marismas de Santoña y Noja* se viene comprobando que la correcta determinación de los distintos nichos ecológicos exige, desde un punto de vista cartográfico, la elaboración de una cartografía temática a escala 1/500.

Es posible encontrar múltiples modelos, que han sido empleados tradicionalmente para estimar profundidades a partir de datos provenientes de sensores pasivos, desde que a finales de la década de los 70 se comenzasen a investigar. El objetivo del presente trabajo es, en primer lugar, revisar dichos modelos para posteriormente realizar una valoración de la precisión alcanzada por cada uno de los mismos. En una segunda fase se analizarán posibles mejoras que permitan incrementar la precisión.

MARCO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN

El trabajo se centra en dos zonas situadas en el norte de la Península Ibérica, más concretamente en la Comunidad Autónoma de Cantabria.

En primer lugar se hace referencia a la Bahía de Santander. Se trata de una depresión y de un ecosistema de gran riqueza tanto desde el punto de vista biológico como socioeconómico. En su entorno se concentran unos 250.000 habitantes, el 50% de la población de la comunidad autónoma de Cantabria. Dicha bahía vienen formándose desde el Mesozoico y es importante para una población que desarrolla diversas actividades, todas ellas generadoras de vertidos de aguas residuales.

Este ecosistema, muy sensible y de alta fragilidad ecológica, presenta en su mayoría sedimentos tales como limos, arcillas y otras partículas procedentes del río Miera. Son numerosos los puntos que recogen los vertidos de los términos municipales que rodean la bahía (Santander, Camargo, Astillero, Marina de Cudeyo, Ribamontan al Mar y Villaescusa) y que desembocan en ella, ya sea directamente o a través de rías cercanas. Se recogen aguas fluviales, fecales e incluso residuales de muchas industrias. Se estima que aproximadamente hay veintidos puntos de vertido industrial, seis hospitales, una finca ganadera y tres depuradoras y el correspondiente a las poblaciones cercanas (*Viguri*, 1996-2000).

En Santander los vertidos son principalmente de aguas urbanas, y en Camargo y Astillero proceden de varios polígonos industriales (industria dedicada a la transformación de metales, fabricación de equipos mecánicos y maquinaria, extracción y transformación de minerales, industria química y fabricación de material de transporte). Las poblaciones de Ribamontán al Mar y Medio Cudeyo, dada la escasa actividad industrial, realizan escasos vertidos. Por último el puerto es un elemento fundamental, ya que en él se llevan a cabo tareas de almacenaje de hidrocarburos, carga y descarga, limpieza de buques,…

Figura 1. Plano de situación.

El estuario de las Marismas de Santoña pertenece a la Reserva Natural de las Marismas de Santoña y Noja, constituyendo su núcleo principal, y se encuentra ubicado en la Comunidad Autónoma de Cantabria. En dicho estuario confluyen distintas aguas continentales, como las rías de Límpias y Rada. La primera de ellas se encuentra en la desembocadura del río Asón y la segunda en la del río Clarín. Por el oeste vierten sus aguas pequeños arroyos como los de Pozeirun (Escalante), Cantijos (Gama) y de Carrenque (Treto), y por el Canal de San Martín penetran en el estuario las aguas marinas procedentes del Mar Cantábrico, y por el efecto de las mareas, cada seis horas y cuarto aproximadamente, vuelven a salir, repitiéndose este fenómeno de llenado y vaciado del estuario de forma periódica. El estuario es el único punto de comunicación con el mar y comprende la zona situada entre el Puntal de Laredo y el Fuerte de San Martín. Este espacio protegido consta de casi 48 km de perímetro total (humedal) y la zona correspondiente a la Reserva se desarrolla sobre algo más de 4000 Has.

La zona de trabajo se caracteriza por tratarse de un agua clara poco profunda (hasta 20 m); puesto que la luz que recibe el sensor depende mayoritariamente de la profundidad del agua, del coeficiente de atenuación para cada longitud de onda y del coeficiente de reflexión del fondo (*Benny - Dawson*, 1982). En aquellas zonas en las que exista sedimento en suspensión u otro material que pueda dispersar la luz, la situación dependerá de la concentración de dichos materiales.

MATERIAL DISPONIBLE

El material que se ha elegido como base de este trabajo es el que proporciona el sensor aerotransportado CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager). Se trata de un sensor

óptico de barrido multiespectral basado en un dispositivo CCD bidimensional, con una dimensión espacial y otra espectral. Este sensor electroóptico ofrece una alta resolución espacial y espectral, pero los datos que registra dependen de la altitud y movimiento del avión. Para que el trabajo sea consistente es necesario tener en cuenta todos estos factores, así como los cambios medioambientales y los centelleos que puedan producirse. Para minimizar estos efectos es necesario planificar las trayectorias de vuelo.

El rango de longitudes de onda sobre el que opera va desde los 400 nm hasta los 950 nm y el CCD está constituido por 288 hileras espectrales y por 612 columnas espaciales (512 de las cuales se utilizan para la captura de información y las restantes para el calibrado radiométrico). La resolución espacial típica transversal respecto a la línea de vuelo va desde los 2 m hasta los 17 m dependiendo de la altura de vuelo. El sistema óptico es el que relaciona dicha altura de vuelo con las dimensiones y utiliza una lente de 9,35 mm, proporcionando un campo de visión (FOV) de 44,64º. El sensor ha sido integrado en un sistema SISA/CASI desarrollado por el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC), encargado de la realización del vuelo, en el que se integran todos los elementos necesarios para proporcionar orientación a las imágenes captadas.

El SISA es un sistema que integra todos los elementos necesarios para proporcionar orientación a las imágenes tomadas por el sensor CASI. En concreto consta de un subsistema de adquisición de actitud y un subsistema de posicionamiento (un interficie a un receptor GPS), así como un interficie robusto de sincronización para todos los sistemas que lo forman. El sistema proporciona orientación y sincronización al sensor CASI. La orientación calculada mediante técnicas GPS está referida al elipsoide WGS-84 con alturas elipsoidales.

Cuadro 1. Características del vuelo (*Flight Parameters*).

Sensor	**CASI-501**
Campo de visión	42º
Tamaño de píxel	2m x 2m
Número de bandas	36
Modo	Espectral
Radiometría	16 bits
Ancho de pasada	1024
Número de pixels	512

El software de teledetección utilizado ha sido el ENVI 4.0 y el ERDAS 8.6 así como el IDL 6.0 para implementar los distintos algoritmos. El SPLUS ha permitido realizar los ajustes por mínimos cuadrados y las regresiones utilizadas en el ajuste, así como el estudio de errores.

Como material auxiliar y de contraste se dispone de cartografía a escala 1/500 del núcleo urbano, una batimetría a escala 1/500 de la zona con mayor influencia antropogénica (zona del puerto) y otra a escala 1/1000 de una segunda zona más profunda (datos de la Ecosonda de doble frecuencia en modo RTK-GPS).

DESARROLLO DEL TRABAJO

Se ha realizado un análisis de los métodos más clásicos desarrollados a partir de los años setenta, con el objetivo de determinar profundidades a partir de sensores satelitales o aerotransportadas. Caben destacar los clásicos:

- *Polcyn y Lyzenga (1975):* El modelo aplica la siguiente expresión, que relaciona la intensidad y la profundidad:

$$I - A_1 + A_2\, e^{(A_3\, Z)}$$

$$z = \left[\ln(A_2) - \ln(I - A_1)\right] A_3$$

A_1 → describe el efecto debido a la atmósfera, que en la mayoría de los casos contribuye al 50-80% del total de la señal recibida por el sensor

$$z = \left[\ln(A_2) - \ln(I_{corregido_atmosf})\right] A_3$$

$A_{2,}A_3 =$ constantes derivadas

- *Lyzenga* (1978): emplea un modelo regresional usando el logaritmo natural del índice entre dos bandas espectrales (las de 555 nm y 670 nm)

$$\log(z) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$$

$$x = \log\left[\frac{L_{(555\,nm)}}{L_{(679\,nm)}}\right]$$

donde:
z = profundidad
$a_{0,}a_{1,}a_2 =$ constantes derivadas
L = radiancia recibida por el sensor
Es un modelo sencillo y fácil de usar, que tiene bien en cuenta la variación de la profundidad de agua. Para obtener buenos resultados es necesario un fondo homogéneo.
En la Figura 2 se observa la función cuadrática de ajuste empleada para determinar profundidades con este método.

- *Stone*(1985): emplea una relación de la profundidad basándose en un parámetro unitario, que relaciona las aguas profundas y poco profundas desde el punto de vista óptico.

$$PU = \frac{65535\ (Vd)^2}{(Vx)^2}$$

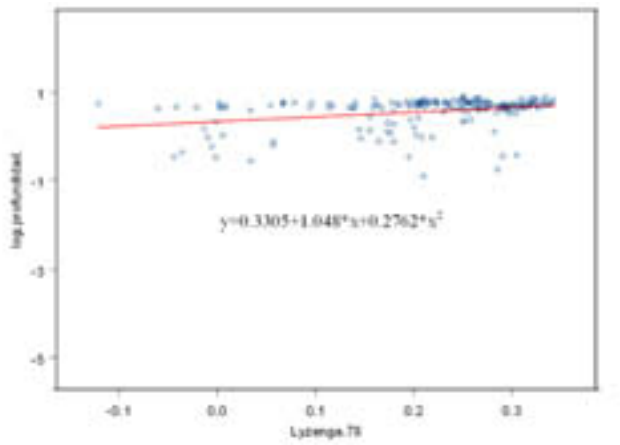


Figura 2. Función de ajuste obtenida con el SPLUS.

siendo:
PU= Parámetro unitario para una profundidad z.
Vd= Nivel digital de agua profunda desde el punto de vista óptico.
Vx= Nivel digital de un píxel a profundidad z.
Una vez determinado el parámetro unitario, se calcula una regresión entre él y las profundidades. El valor de 65535 se debe a que el sensor tiene una resolución radiométrica de 16-bit.

- *Philpot* (1989): La radiancia L_s medida por un sensor sobre agua de profundidad z puede escribirse como

$$L_s(z) = CE_d(0-)(A_B - \rho_\infty)\, e^{(-gz)} + CE_d(0-)\rho_\infty + L_{SG} + L_{PATH}$$

- *Análisis de Componentes Principales* (36 bandas):
El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística que transforma los datos de las bandas de radiancia multivariados, consistentes en variables intercorreladas, en un conjunto de datos consistente de variables que fueron combinaciones lineales no correladas de las variables originales.
El propósito de este método es ver si las dos o tres primeras componentes principales reúnen la mayor parte de la variación producida por las variables originales. Considerando sólo estas dos o tres primeras se reduciría la dimensionalidad de los datos y se perdería muy poca información relevante.
Uno de los principales problemas que se pueden observar en este método es que no siempre las dos o tres primeras componentes son las de interés, ya que en ocasiones en un conjunto de datos multivariantes pueden observarse datos anómalos.

En el Cuadro 2 y Cuadro 3 aparecen respectivamente los distintos algoritmos desarrollados en IDL Versión 6.0.1 y las estadísticas correspondientes a los mismos.

Cuadro 2. Algoritmos clásicos desarrollados con IDL 6.0.

ALGORITMO	RESULTADOS
Polcyn y Lyzenga (1975)	Banda 4 → z=-14.6435+3.0396·P.L.B4 Banda 10 → z=-14.5218+3.0408·P.L.B10 Banda 17 → z=-12.3177+2.5415·P.L.B17
Lyzenga (1978)	$\log(z)=0.3305+1.048x+0.2762x^2$
Philpot (1989)	Banda 4 → $z=-4.2343-0.0354\cdot(B4+c_4)$ Banda 10 → $z=-4.3194-0.1830\cdot(B7+c_{10})$ Banda 17 → $z=-5.1219-0.5153\cdot(B4+c_{17})$
Análisis de componentes principales	PCA.36.1 → z=-4.3227-0.0001·ACP1 PCA.24.1 → z=-4.3164-0.0001·ACP1
Regresión simple	Z=4.7358-1.0197·P.L.B4

Cuadro 3. Estadísticas de las distintas bandas empleadas.

Min	Max	Media	Stdev	Método
-4.8416	0	-2.159151	2.336315	Regresion simple
-5.023327	0	-2.133495	2.309864	Polcyn-B4
-9.018414	0	-2.869148	3.149593	Philpot-B17
-5.297765	0	-2.083153	2.258204	Polcyn-B10
-5.161909	0	-2.126769	2.308861	Polcyn-B17
-6.460107	0	-2.329506	2.555531	Philpot-B10_AP2
-4.636176	0	-1.778352	2.021825	Philpot-B10
-4.320034	0	-1.923417	2.094183	Philpot-B14
-8.295447	0	-2.173169	2.35275	24-ACP1
-8.425039	0	-2.179701	2.359984	36-ACP1

Como puede observarse en el Cuadro 3, existe una variabilidad de la profundidad máxima, como consecuencia de la función de regresión empleada en cada método. Del mismo modo en el Cuadro 4 pueden apreciarse los errores calculados tras realizar el contraste en 55 puntos de validación tomados aleatoriamente de la batimetría realizada con ecosonda de doble frecuencia y GPS y las profundidades estimadas con cada método en los mismos puntos.

Cuadro 4. Errores calculados al contrastar los resultados estimados por teledetección y los obtenidos con la Ecosonda-GPS.

	Medio	Desv típica	Max	Min
Regresión simple	1.12837594	1.19665392	4.03739988	0.00850024
Polcyn-B4	1.13	1.19198049	4.13	0.00
Philpot-B17	1.12326259	1.18793194	4.26977932	0.00238292
Polcyn-B10	1.0452748	1.15591466	4.00414955	0.00411846
Polcyn-B17	1.21713961	1.00316704	3.58114607	0.05071632
Philpot-B10_AP2	1.26486198	0.9028675	3.66504651	0.0146214
Philpot-B10	1.17407558	1.31927435	4.74659373	0.00817981
Philpot-B14	2.24542623	1.30886448	5.69536125	0.08852301
24-ACP1	1.17722754	1.195569	3.90598495	0.00808065
36-ACP1	1.17834467	1.20514204	3.93212516	0.00385268

Análogamente en la Figura 3 y la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos empleando respectivamente el método de Polcyn y el de Análisis de Componentes Principales a modo de ejemplo.

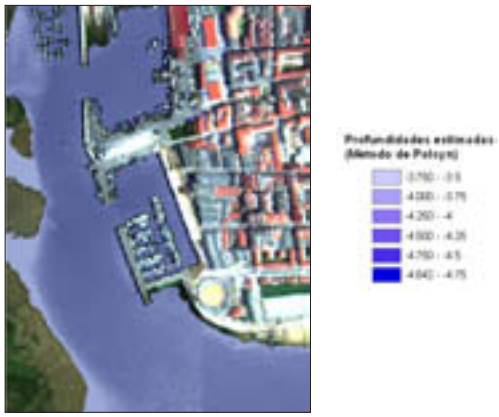


Figura 3. Estimación de profundidades empleando el método de Polcyn.

Figura 4. Estimación de profundidades empleando el método de ACP.

CONCLUSIONES

En los modelos de índices espectrales, se han de tener en cuenta las siguientes asumciones:

- La heterogeneidad de los sedimentos del fondo añade errores en los datos.
- La profundidad del agua limita la cantidad de energía que es recibida por el sensor, por lo que se debe registrar una señal desde el fondo antes de estimar la profundidad.
- Existen diferentes coeficientes de atenuación para cada longitud de onda sobre cada tipo de fondo marino; al emplear una media para todos se genera una fuente de error.

- La turbidez limita el retorno de la señal desde el fondo.
- La absorción de energía debido a las concentraciones de clorofila, normalmente varía dentro de la escena, por lo que asumir un mismo valor para toda la escena añadirá error a los modelos.
- La cantidad de carbono orgánico disuelto influye en la precisión de estos modelos.

Los métodos clásicos de índices espectrales son rápidos de calcular pero necesitan de las asumciones anteriormente descritas. Los modelos de índices espectrales dan unos resultados bastante precisos con imágenes de alta precisión espacial, aunque esta solución se mejora con modelos hiperespectrales, que actualmente se están analizando y que aprovechan la naturaleza continua n-dimensional de los datos hiperespectrales para producir un modelo más preciso. Análogamente, es necesario aplicar técnicas estadísticas que tengan en cuenta posibles anomalías y que generen resultados más ajustados.

REFERENCIAS

Anger, C.D., Mah, S and, Babey, S.K (1994): Technological enhancements to the compact airborne spectrographic imager (CASI). *Proceedings of the First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Strasbourg, France. Vol. II, pp.205-213.

Bagheri, S., Stein, M. and Dios, R (1998): Utility of hyperspectral data for bathymetric mapping in a turbid estuary. *International Journal of Remote Sensing*,Vol 19., Nº 6, pp. 1179-1188.

Benny, A.H. and Dawson, G.J.(1983): Satellite Imagery as an aid to bathymetric charting in the Red Sea. *The Cartographic Journal*. Vol. 20. Nº 1, June 1983. pp. 5-16.

Jupp, D.L.B.,(1988): Background and extensions to depth of penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters. *Proceedings of the Symposium on Remote Sensing of the Coastal Zone, Gold Coast, Queensland, September 1988*, IV.2.1-IV.2.19.

Herzfeld, U.C. (1997): Geostatistical methods for evaluation of Seabeam bathymetric surveys: Case studies of Wegener Canyon, Antarctica, *Marine Geology*, 88. pp:83-95.

Lyzenga, D.R. (1978): Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, Vol 17. pp. 379-383.

Melsheimer, L. (2001): Extracting Bathymetry from Multi-Temporal Spot Images.Center for Remote Imaging, Sensing and Processing. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November 2001.

Mobley, C.M. (1994): *Light and Water, Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press, Inc., San Diego, CA, pp.592.

Philpot, W.D. (1987): *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press. New York, 592 pgs.

Philpot, W.D. (1989): Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. *Applied Optics*, Vol.28, Nº 8,pp. 1569-1578.

Polcyn, F.C. and Sattinger,I.J.(1978): *Water depth determinations using remote sensing techniques*. The University of Michigan Ann Arbor, Michigan. pp. 1017-1028.

Polcyn, F.C. and Lyzenga, D.R. (1975): Calculations of water depth from ERTS-MSS DATA. *Applied Optics*. pp. 1433-1441.

Respuesta de la cubierta vegetal a la ola de calor del verano 2003 en Europa Sur Occidental y Noroeste de África: un estudio mediante imágenes Spot-Vegetation

A. Lobo [1], Ph. Maisongrande [2] y L. Coret [2]

(1) Institut de Ciències de la Terra "Jaime Almera" (CSIC), Lluis Solé Sabarís s/n, 08028 Barcelona. *Agustin.Lobo@ija.csic.es*
(2) Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO), bpi 2801-18, avenue Edouard Belin - 31401 Toulouse Cedex 9-France.

RESUMEN

Las condiciones meteorológicas del verano 2003 fueron particularmente atípicas en Europa Sur-Occidental. Las anomalías de temperatura fueron de 0ºC a 6ºC en la región estudiada, con valores entre 2ºC y 6ºC en Francia. A esta anomalía de temperatura se sumó, en el SE de Francia y a lo largo de los Pirineos, una anomalía de precipitación entre -25 mm/mes y -50 mm/mes. En nuestro trabajo presentamos un estudio del impacto de estas condiciones en la superficie tal y como se observa mediante imágenes de 1 km² de resolución captadas por el instrumento VEGETATION de SPOT-4. Nuestros resultados indican que las zonas más afectadas corresponden a superficies de herbáceas y a bosques caducifolios en áreas que normalmente tienen un ligero déficit hídrico estival pero que se vieron sometidas a condiciones más propias del verano mediterráneo.

Palabras Clave: *Aridez, vegetación, SPOT, ola de calor.*

ABSTRACT

Meteorological conditions during summer 2003 were very atypical in W Europe. Temperature anomalies ranged from 0ºC to 6ºC in the region, and 2ºC to 6ºC in France. In addition, a negative anomaly of precipitation (-25 mm/month to -50 mm/month) occurred in SE Fran-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ce and along the Pyrenean range. In this contribution we present results of our work on the impact of such atmospheric conditions of vegetation cover using time series of satellite imagery with 1 km² and acquired by the VEGETATION instrument onboard SPOT4. We observe the greatest impact in Southern and Eastern parts of France, zones that are normally until slightly dry summers and covered by herbaceous and deciduous vegetation, but that were under more Mediterranean summer conditions in 2003.

***Key Words**: Aridity, vegetation, heat wave.*

INTRODUCCIÓN

La situación meteorológica del verano de 2003 fue particularmente atípica en Europa occidental, en particular sobre Francia y la Península Ibérica. Según los datos recopilados por el *Deutscher Wetterdienst*, las anomalías de temperaturas entre junio y agosto se situaron entre 0ºC y +6ºC, con valores más elevados (+2ºC y +6ºC) en Francia. En España, estudios recientes indican mínimas diarias excepcionalmente elevadas para el mismo período (*Rodríguez- Ba-*

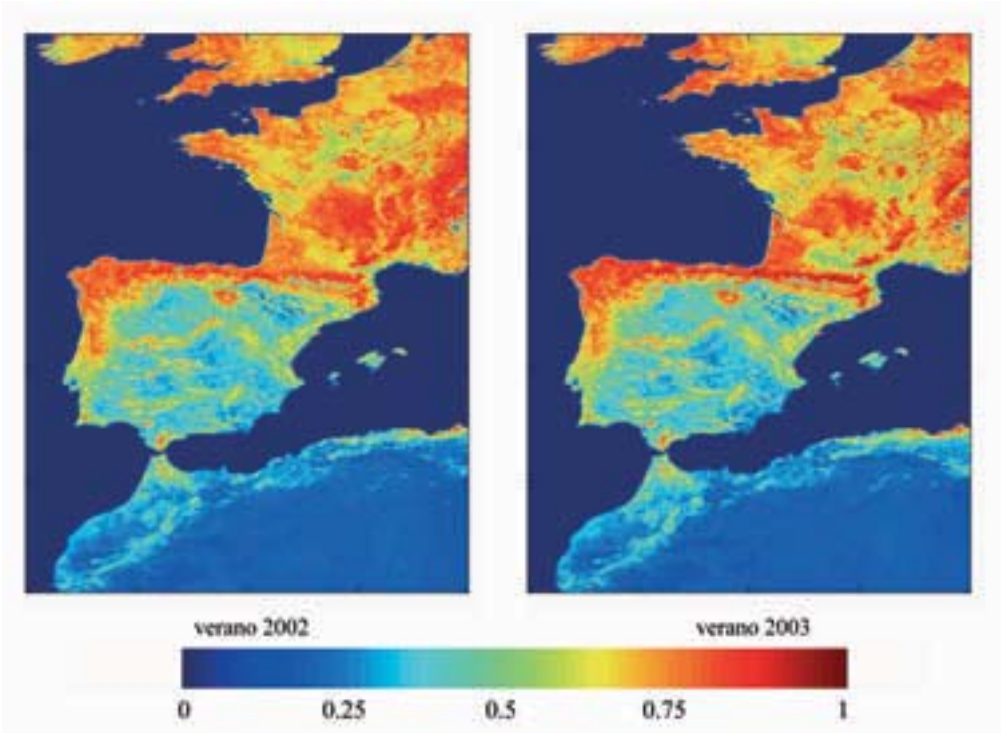


Figura 1. Imágenes de NDVI medio estival (junio - agosto) para los años 2002 y 2003.

llesteros 2003). En el caso del sur y sureste de Francia, así como en toda la región Pirenaica, a estas anomalías de temperaturas se sumaron anomalías negativas de precipitación (-25mm/mes - -50 mm/mes). El contraste entre el verano del 2003 y el verano del 2002 es además pronunciado porque en el 2002, las anomalías térmicas y de precipitaciones, aunque moderadas, fueron en sentido opuesto: 0 - -2ºC y 0 - 25 mm/mes.

En esta contribución presentamos resultados de nuestro estudio sobre el impacto de las condiciones extraordinarias del verano 2003 sobre la cubierta vegetal en la zona comprendida desde el norte de Francia hasta el norte del Sahara occidental (Figura 1). La región de estudio presenta un notable gradiente en términos del balance hídrico entre precipitaciones y evapotranspiración potencial: de los -1000 mm/año en el norte del Sahara occidental a los 1300 mm/año comunes en zonas de Galicia. El déficit estival es generalizado en la región, aunque particularmente pronunciado al sur del tercio norte de la península, marcando la discontinuidad entre la vegetación eurosiberiana y la mediterránea.

DESARROLLO DEL TRABAJO

Hemos utilizado imágenes S10 del índice de vegetación normalizado NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) derivadas de imágenes captadas por el instrumento VEGETATION a bordo del satélite SPOT4, con 1 km^2 de resolución. El NDVI es un contraste normalizado entre las reflectancias infrarroja y roja, y se uso se basa en la discontinuidad que típicamente presenta la respuesta espectral de las cubiertas vegetales verdes entre esas longitudes de onda. El valor del NDVI es proporcional a la capacidad de intercepción de la radiación fotosintéticamente activa que tiene la cubierta vegetal contenida en el píxel. Las series temporales de NDVI permiten trazar la dinámica de la cubierta vegetal en esta importante propiedad y su utilidad en esta región ha sido ya demostrada en numerosos estudios (p.e., *Lobo et al.* 1997).

Las imágenes S10 de NDVI son un producto estándar de la cadena de proceso de VEGETATION y su propósito es minimizar el impacto de la nubosidad mediante la integración de imágenes diarias durante un período de 10 días. Las S10 son producidas mediante el método de *Holben* (1986): para cada píxel, se selecciona el valor máximo de NDVI durante el período. Ello presupone que se considera despreciable el cambio real que pueda experimentar la cubierta durante el período de 10 días y que cualquier interferencia atmosférica redunda en un descenso del NDVI. Aunque ya existen métodos de integración temporal mejores (*Maisongrande et al.*, 2004; *Hagolle et al.* 2004), las S10 son las únicas que cubren todo el período desde el lanzamiento.

Hemos calculado el NDVI medio de todas las imágenes S10 de junio a agosto de 2003 y 2002 (Figura 1), a las que denominaremos, respectivamente, SNDVI2003 y SNDVI2002. Asimismo, hemos calculado las diferencias normalizadas entre SNDVI2002 y SNDVI2003 (Figura 2). De esta figura podemos derivar las siguientes observaciones:

- La zona de mayor impacto negativo se sitúa en el sur de Francia, al NE de Toulouse y al NO de Lyon.

- Otros núcleos de impacto negativo aparecen en España, en el Norte de Castilla, Murcia y Cataluña.
- Aparece una zona de impacto positivo en el norte de Argelia y otras pequeñas zonas en los Pirineos.

En las secciones siguientes pasamos a discutir estas observaciones. Debido a la dificultad para obtener registros meteorológicos para toda la zona de estudio, en algunos casos los párrafos siguientes son todavía más bien conjeturas razonadas que conclusiones.

Zonas de impacto negativo

Las dos grandes zonas que aparecen en azul en Francia tienen normalmente un balance hídrico anual positivo y un balance hídrico estival sólo ligeramente negativo. Para estas zonas, las condiciones del verano 2003 supusieron estar sometidas a condiciones más típicas del verano de la región mediterránea, lo cual fue muy estresante para la vegetación herbácea y los árboles caducifolios. Según el mapa de cubiertas *Global Land Cover 2000*, esta zona está cubierta esencialmente por prados, cultivos herbáceos y bosques caducifolios. Las zonas detectadas coinciden también con las observaciones del terreno de la oficina francesa de salud forestal sobre marchitamiento precoz de las hojas de los caducifolios en el verano 2003.

Es interesante notar que en los límites de estas zonas, allí donde se produce el paso a vegetación natural mediterránea, el impacto es mucho menor. Precisamente, la capacidad de la vegetación mediterránea perennifolia para mantener las hojas, a pesar de los períodos de sequía estival, la hace más resistentes a este tipo de episodios. Sin embargo, eso no quiere decir que la vegetación mediterránea no haya sido afectada, ya que el NDVI es un mal trazador de estrés en las plantas de hoja perenne.

Otra observación importante es que los polígonos irrigados dentro de estas dos zonas tampoco fueron severamente afectados, lo que implica que se utilizó una gran cantidad de agua para mantener niveles de producción similares a los de 2002.

Es probable que la zona de impacto negativo del norte de Castilla pueda ser interpretada de la misma forma. Aunque el balance hídrico estival es normalmente más negativo que en el sur de Francia, la vegetación natural de esta zona es una transición entre bosques caducifolios y perennifolios (con *Quercus faginea* como especie típica). Por tanto, incluso si la anomalía meteorológica fue menor, es probable que esta zona responda siempre con intensidad y que su variabilidad interanual sea más la regla que la excepción.

Zonas de impacto positivo

Estas zonas aparecen en rojo en la Figura 2 (Anexo figuras, color). Exceptuando el caso del norte de Argelia, la mayor parte de estas zonas están situadas en cordilleras montañosas, como se aprecia en la Figura 3 para el caso de los Pirineos. En estas zonas, en las que el descenso de las precipitaciones no llegó a causar un déficit hídrico y cuya vegetación, en cambio, está normalmente limitada por bajas temperaturas, el aumento de ésta redundó en un incremento de la actividad vegetativa.

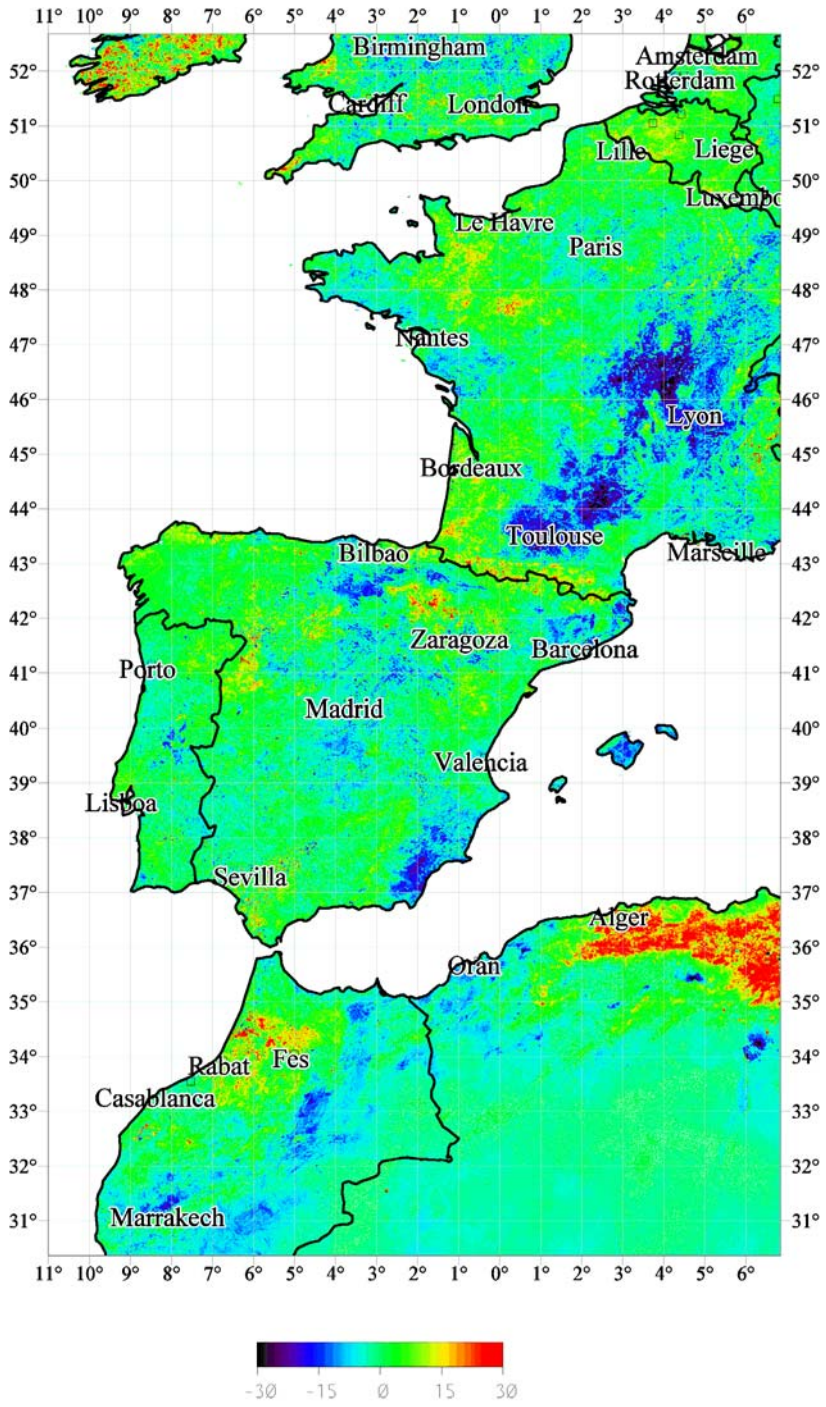


Figura 2. Variación porcentual entre los NDVI medios del verano 2002 y 2003.

Muy notable es el caso del norte de Argelia, aunque muy insuficiente, la información meteorológica de que disponemos indica que en esta zona el año 2002 fue mucho más seco que el 2003.

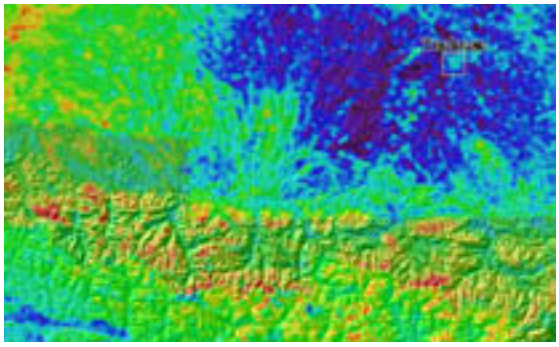


Figura 3. Detalle de la Figura 2. Zona al SO de Toulouse (sombreado del modelo de elevaciones).

CONCLUSIONES

Este estudio preliminar demuestra la gran cantidad de información que las series temporales de imágenes de índice de vegetación captadas desde satélite proporcionan para analizar la dinámica de la cubierta vegetal a escala regional y su respuesta a las variaciones atmosféricas. Nuestro estudio continúa comparando el atípico verano 2003 con el comportamiento medio de la cubierta tal y como es observable mediante la integración de todas las observaciones disponibles desde el lanzamiento del primer instrumento VEGETATION. Hay que resaltar, además, la gran dificultad en conseguir la información meteorológica para un área de estudio que incluye múltiples administraciones.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio es parte del trabajo desarrollado por A. Lobo en el CESBIO (Toulouse) gracias a su estancia como profesor invitado del *Observatoire des Midi-Pyrinées*. Agradecemos al Instituto Nacional de Meteorología de España, y, en particular a Carlos Almarza, su inestimable colaboración.

REFERENCIAS

Hagolle, O., Lobo, A., Cabot, F., Duchemin, B. y De Pereyra, A. (2004): Quality assessment and improvement of SPOT/VEGETATION level 3temporally composited products of remotely sensed imagery by combination of VEGETATION 1 & 2 images. *Remote Sensing of Environment*, in review.

Holben, B.-N., (1986): Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1435-1445.

Lobo, A., Ibáñez, J.J. and Carrera, C., (1997): Regional Scale Hierarchical Classification of Temporal Series of AVHRR Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*, 18: 3167-3193.

Maisongrande, P., Duchemin,B. y Dedieu,G. (2004): "VEGETATION/SPOT - An Operational Mission for the Earth Monitoring : Presentation of New Standard Products." *International Journal of Remote Sensing*, 10, January 2004, Vol. 25 No 1, p 9 -14.

Rodríguez Ballesteros, C.(2003): Carácter extremo del verano de 2003 en España peninsular e Islas Baleares. *Actas de las XXVIII Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española "La meteorología y el clima atlánticos"*. Badajoz, 11-13 de febrero de 2004.

Cartografía de las inundaciones del río Ebro en febrero de 2003: trabajos de fotointerpretación, teledetección y análisis SIG en el GIS-Ebro

J. A. Losada García [1], S. Montesinos Aranda [2], M. Omedas Margelí [1], M.A. García Vera [1] y R. Galván Plaza [1]

(1) Oficina de Planificación Hidrológica, Confederación Hidrográfica del Ebro, Pº de Sagasta 24-28, 50071 Zaragoza.
(2) GEOSYS, S.L.; Sector Foresta 23, locales 7 y 8, 28760 Tres Cantos - Madrid.

RESUMEN

Durante los primeros días de febrero de 2003 se produjo una importante avenida en el Eje del Ebro como consecuencia de las abundantes escorrentías ocasionadas por la acción combinada de una intensa lluvia y la subsiguiente y rápida fusión de la nieve acumulada en cabecera durante los temporales de finales de enero; se alcanzaron caudales punta de 3.320 m^3/s la madrugada del 6 de febrero en Castejón (Navarra) y de 2.988 m^3/s la madrugada del día 9 en la ciudad de Zaragoza.

La Confederación Hidrográfica del Ebro (C.H.E.) realizó un intenso seguimiento del episodio de avenida, cuya evolución espacio-temporal pudo estudiarse gracias al concurso de diversas técnicas de medición/observación terrestre (Sistema Automático de Información Hidrológica, SAIH; observación directa en campo) y aérea; el análisis combinado de la fotointerpretación realizada en vuelo en días sucesivos a lo largo del episodio de avenida y de imágenes de satélite Landsat 7 y SPOT 2 y 5 correspondientes a diferentes momentos de las inundaciones, posibilitaron, una vez transcurrido el máximo de la crecida, la estimación de la superficie anegada, así como la generación de una importante base de datos georreferenciada específicamente aplicada al conocimiento y gestión de la evolución de la avenida, que ha sido integrada en el repositorio de datos del GIS-Ebro, el Sistema de Información Geográfica de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

En esta comunicación, que contiene un amplio resumen de los trabajos cartográficos generados, se presenta un análisis de estimación comparativa de superficies anegadas a través de fotointerpretación en vuelo y de imágenes teledetectadas; además, para estas últimas, se realiza una valoración de superficies inundadas en función de dos diferentes aproximaciones metodológicas que proporcionan las técnicas de tratamiento digital: consideración de superficies cubiertas por lámina de agua, de un lado, y cuantificación de áreas con alto contenido en humedad, por otro.

***Palabras Clave**: Inundaciones, teledetección, cartografía, GIS-Ebro, fotointerpretación.*

ABSTRACT

During the first days of February 2003 there were an important flood in the Ebro River, because of the high run-offs during the first days of February due to the combination of heavy rains and the quick snow melting in its tributaries upstream catchments. Maximum peak flows of 3.320 m^3/s in the early morning of the 6^{th} of February in Castejón (Navarra) and 2.988 m^3/s in the early morning of the ninth in Zaragoza, were registered.

The Ebro River Basin Authority carried out an intensive follow-up of this event. The spatial and time evolution of this event could be studied thank to the combined use of various monitoring techniques on the ground (data provided by the Automatic Hydrologic Information System, observation on the ground) and from the air. After the event, it was carried out a combined analysis, taking into account both the photographs available from a flight during the flood event and the satellite images taken by Landsat 7 and SPOT 2 and 5. It made possible to estimate the flooding area, and to generate an important georeferenced database useful for the knowledge and management of the flood evolution, added to the GIS-Ebro, the Geographical Information System of the River Ebro Basin Authority.

This paper, besides containing a summary of the diverse cartography produced, shows an analysis of the compared estimation of the flood area both through flight photographs and satellite images. Moreover, for the latter, it was carried out a double methodological approach to determine the flood area: on one hand, the surface covered by the water sheet, on the other, the surface with high contents of humidity.

***Key Words**: Floods, remote sensing, cartography, GIS-Ebro, aerial photography.*

INTRODUCCIÓN

Los episodios de crecida del río Ebro constituyen uno de los fenómenos de mayor interés (ambiental, territorial y socioeconómico) a la hora de caracterizar el régimen hidrológico del gran río ibérico y plantear estrategias de ordenación y gestión del paisaje fluvial. Ciñéndonos, únicamente, al ámbito del Ebro Medio y por sólo citar las avenidas extraordinarias que epi-

sódicamente han venido jalonando el discurrir del pasado siglo XX y principios del presente, habría que referirse a la de marzo de 1930, a la muy considerable de 1961 (4.950 m^3/s de caudal punta en Castejón, 4.130 m^3/s en Zaragoza –formación del Galacho de Juslibol e inundación de buena parte de la margen izquierda de la ciudad, actualmente urbanizada: barrio del Actur– y 4.160 m^3/s en Sástago), a la de noviembre de 1966, febrero de 1978, diciembre de 1980, enero de 1981 y, finalmente, febrero de 2003 (caudales punta de 3.320 m^3/s en Castejón y de 2.988 m^3/s en Zaragoza), que constituye el objeto de estudio de la presente comunicación (Figura 1).

Los destacables caudales de avenida que a principios de febrero de 2003 circularon por el Ebro y principales afluentes en cabecera fueron producto de la acción combinada de unas cuantiosas precipitaciones (en forma de nieve, en amplios sectores montañosos de la cabecera del Ebro) y una subsiguiente y rápida fusión –provocada por la entrada de vientos cálidos y húmedos de componente SO– de la cubierta nival, que incrementó notablemente el caudal de numerosos afluentes en la cuenca semialta del Ebro, especialmente por su margen izquierda (Zadorra, Ega, Arga y la práctica totalidad de la cuenca del Aragón).

Todos los dispositivos de previsión y alerta funcionaron conforme a lo previsto, minimizándose el riesgo de pérdidas en vidas humanas y daños materiales, y el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Ebro (C.H.E.) gestionó el episodio de avenida y proporcionó, en todo momento, información de la evolución del mismo en tiempo real, que pudo consultarse públicamente a través de la página Web del Organismo de cuenca (*www.chebro.es*).

Complementariamente a la recepción y procesamiento desde el SAIH de un gran volumen de información relativa a los caudales y tiempos de avenida, la Oficina de Planificación Hidrológica de la C.H.E. estimó como muy oportuna la posibilidad de disponer, además, de una visión cartográfica del territorio afectado por la inundación en el tramo medio del Ebro, entre Haro (La Rioja) y la cola del Embalse de Mequinenza (Zaragoza). En este sentido, conviene señalar la importancia que una buena cartografía de inundaciones –especialmente si ésta es reflejo de una base de datos georreferenciada de carácter diacrónico, que almacene cartografías de inundación pertenecientes a distintas fechas– puede tener como base fundamental para la elaboración de una cada vez más necesaria cartografia de riesgos por inundación, tal y como se prevé en la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (Resolución de 31 de enero de 1995; BOE, 14/2/95), que sea, además, fiel y sintética expresión de una mucho más compleja matriz de variables ambientales, territoriales y socioeconómicas y que coadyuve, por tanto, a una adecuada gestión para la ordenación y planificación territorial y ambiental de los espacios ribereños. De la importancia que estos mapas de riesgo de inundación pueden presentar en la gestión de los espacios fluviales, baste señalar su consideración y definición en el marco del –actualmente en fase de licitación– *Plan Medioambiental del Ebro*, promovido desde el Gobierno de Aragón, o su objeto detallado de estudio –y por referirnos tan sólo a algunas relevantes referencias actuales circunscritas al ámbito territorial que nos ocupa– en tesis doctorales de carácter aplicado (desde una perspectiva *ecogeográfica* en *Ollero,* 1996; con un enfoque *hidrogeomorfológico* en *Bescós,* 2003) y en artículos y reuniones técnicas en que se han analizado y debatido, con un sentido muy

multidisciplinar e integrador, las inundaciones de febrero de 2003 *(Ollero, Pellicer y Sánchez, 2003; Ollero,* 2003). Finalmente, es importante señalar que una buena cartografía de las inundaciones de 2003 puede constituirse en un elemento muy valioso para la calibración de los modelos hidrológicos, que permiten la definición de las zonas inundables y su clasificación según la ya referida Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones.

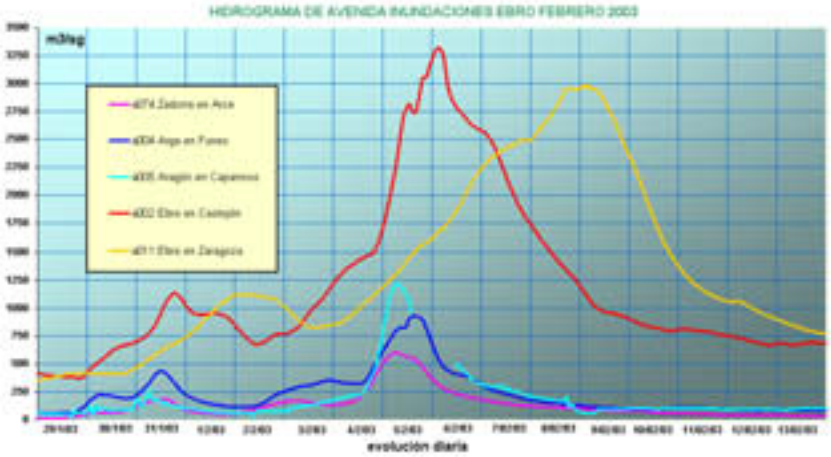


Figura 1. Hidrograma de avenida inundaciones Ebro en febrero de 2003. Caudales quinceminutales registrados por el Servicio Automático de Información Hidrológica (SAIH).

Para la obtención de esta cartografía de las inundaciones del río Ebro, que quedaría inmediatamente integrada en el repositorio de información georreferenciada del Sistema de Información Geográfica GIS-Ebro (*Arqued y Losada,* 1999), se planteó la utilización de dos diferentes aproximaciones metodológicas y tecnológicas:

- Fotointerpretación visual directa, sobre el territorio, a partir de composiciones en papel con las ortofotos del "SIG Oleícola Español" (M.A.P.A., 1997), a bordo de distintos vuelos tripulados, efectuados en sucesivas jornadas del episodio de avenida, sobrevolando amplios sectores de la llanura de inundación del Ebro medio. Se trata de una variante (fotointerpretación "en vuelo") del método más tradicional de seguimiento de la evolución de una avenida.
- Aplicación de técnicas de teledetección espacial para la obtención de una cartografía de la superficie anegada; se adquirieron y analizaron al efecto distintas imágenes de satélite Landsat ETM 7 y Spot 2 y 5 correspondientes a diferentes fechas durante y después del máximo de crecida. Es una técnica en rápido proceso de aplicación y desarrollo, aunque aún en fase experimental, en el estudio de inundaciones, que presenta una interesante alternativa –cobertura global del fenómeno, visión diacrónica, etc.– al empleo de técnicas más tradicionales.

CARTOGRAFÍA DE LAS INUNDACIONES: FOTOINTERPRETACIÓN VISUAL DIRECTA

A lo largo del episodio de avenida se contrataron varios vuelos tripulados con la empresa de aviación *Mac Aviation*, de Zaragoza; estos vuelos, realizados los días 10, 11 y 14 de febrero de 2003, en jornada de mañana y a bordo de una avioneta tipo *Cessna*, tuvieron una duración conjunta de permanencia en el aire de 5 horas. El punto de partida fue, en todos los casos, el aeropuerto de Zaragoza, desde el que se concretaban los itinerarios más convenientes a seguir en cada caso, así como los tiempos y circunstancias de vuelo.

En los sucesivos itinerarios se sobrevoló un amplio sector territorial del Ebro medio que, siguiendo el eje del río, abarca desde Haro (La Rioja), aguas abajo de la confluencia del Zadorra con el Ebro, hasta las proximidades de Velilla de Ebro (Zaragoza), aguas abajo, punto en el que la onda de la avenida apenas dejó sentir ya sus efectos (proximidad del Embalse de Mequinenza, que laminó parte de los caudales de avenida).

En todos los casos, el sistema de obtención de una primera cartografía de las inundaciones por este método fue sumamente sencillo. Se prepararon, al efecto, unos manuscritos en soporte papel y formato manejable que consistían en composiciones temáticas con la representación de las ortofotos del "SIG Oleícola Español" (M.A.P.A., 1997) y la toponimia de los núcleos de población; se procuró, en todo caso, que la escala de estas cartografías de vuelo se ajustase lo más posible al tamaño real del mosaico paisajístico que presumiblemente se observaría desde el aire, a bordo de la avioneta.

Sobre esta base cartográfica, a mano alzada y en vuelo, se ensayó la delimitación del área máxima cubierta por las inundaciones, estimando, para ello, no sólo las superficies anegadas en el día/hora preciso del vuelo, sino también aquellas otras teselas sobre las que se percibían signos evidentes de inundación (existencia de embolsamientos de agua, barro, presencia de humedad…) y que habían sido cubiertas por el agua en las jornadas previas en las que no se pudo volar.

La fotointerpretación de los territorios anegados que se sobrevolaban se realizaba, simultáneamente, por dos intérpretes, cada uno de los cuales fijaba su atención en una de las márgenes del río; un tercer tripulante realizaba fotografías a lo largo de todo el itinerario. Posteriormente, ya en gabinete, se procedía a terminar de perfilar las líneas de inundación observadas en vuelo, valiéndose, para ello, del apoyo suministrado por las fotografías en perspectiva adquiridas en cada uno de los vuelos.

Finalmente, se obtuvo una síntesis cartográfica del área afectada por las inundaciones –en soporte papel–, que constituyó el documento fuente para proceder a la digitalización de la información obtenida en vuelo, que se realizó sobre pantalla, en ArcGIS 8.1 (ESRI), sobre el mosaico de ortofotos del "SIG Oleícola Español" –ahora en formato digital– almacenadas en el Servidor de datos del GIS-Ebro (Figura 2).

Se obtuvo, de este modo, una cobertura georreferenciada con la delimitación general del territorio anegado por las inundaciones. En algunos tramos de especial interés (Comunidad Autónoma de Aragón) se procedió a digitalizar, también sobre las ortofotos del "SIG Oleícola Español", el cauce actual del río Ebro, de modo que sirviese a modo de

máscara con la que poder sustraer la superficie no afectada directamente por la avenida y pudiese estimarse, de manera más precisa, la superficie agraria directamente afectada por inundación.

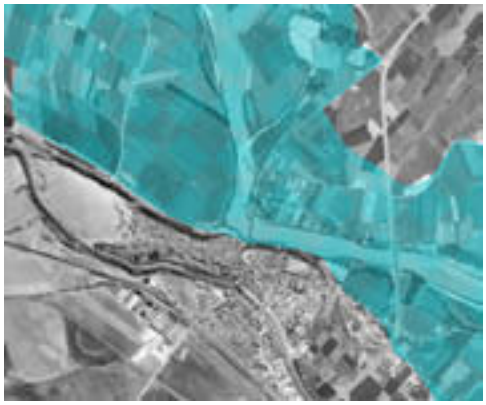


Figura 2. Ejemplo de los trabajos de fotointerpretación de la avenida del Ebro, sobre las ortoimágenes del "SIG Oleícola Español" en las proximidades de Gallur (Zaragoza). Escala 1:15.000).

ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES INUNDADAS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

Complementariamente a la obtención de una cartografía de las inundaciones del Ebro mediante técnicas de fotointerpretación, se consideró de gran interés ensayar una delimitación de las superficies anegadas a través del análisis digital de un conjunto representativo –espacial y temporalmente– de imágenes de satélite. Estos trabajos, dirigidos desde la Oficina de Planificación Hidrológica de la C.H.E., fueron realizados por la empresa Geosys, S.L., que cuenta con una dilatada experiencia en el campo de las Tecnologías de Información Geográfica.

Tras un minucioso estudio de disponibilidad (búsqueda de fechas próximas al periodo de máxima inundación, escasa cubierta de nubes…) se seleccionaron un total de cuatro imágenes procedentes de las plataformas Landsat y SPOT (Figura 3), que cubren la totalidad del ámbito de estudio. Se valoraron, para ello, los siguientes criterios:

- Alta resolución espectral. La existencia de varias bandas espectrales en el rango infrarrojo del espectro electromagnético facilita la discriminación de las superficies cubiertas por lámina de agua.
- Alta frecuencia en las observaciones (resolución temporal). Los satélites de ambas misiones toman periódicamente imágenes de una misma zona de la superficie terrestre.
- Continuidad en el registro de datos. Los programas Landsat y SPOT mantienen operativa una recogida continua de datos terrestres.
- Operatividad en el tratamiento de las imágenes (proceso de imágenes ópticas más sencillo, robusto y fiable que las procedentes de sensores radar).

FECHA	SATÉLITE	SENSOR	ESCENA (Path-Row)
6 de febrero de 2003	Landsat 7	Enhansed Thematic Mapper (ETM+)	199-31
13 de febrero de 2003	Landsat 7	Enhansed Thematic Mapper (ETM+)	200-31
8 de febrero de 2003	SPOT 2	High Resolution Visible (HRV)	039-266
10 de febrero de 2003	SPOT 5	High Resolution Geometric (HRG)	040-267

Figura 3. Imágenes de satélite adquiridas en el estudio (Landsat 7 y SPOT 2 y 5)

Todas las imágenes fueron sometidas a un proceso de control de calidad, para inmediatamente después proceder a su corrección geométrica.

En el análisis espectral para la identificación de las zonas inundadas se han empleado, fundamentalmente, las bandas que recogen información del territorio en las siguientes regiones del espectro electromagnético (*Chuvieco, 2002*)*:*

- **Rojo visible** *(banda* 3 Landsat ETM+, banda 2 SPOT 2 y SPOT 5). Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación óptica que reciben. La mayor reflectividad del agua clara se produce en la banda azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio, donde ya es prácticamente nula (es por ello que la frontera tierra-agua es muy nítida en esta región del espectro).
- **Infrarrojo reflejado próximo** (banda 4 Landsat ETM+, banda 3 SPOT 2 y SPOT 5). El agua absorbe en esta región la práctica totalidad de la radiación que recibe; esta banda puede ser empleada para discriminar zonas con diferente profundidad de agua y diferenciarlas del suelo húmedo. Los sólidos en suspensión presentan una disminución de su reflectividad en este intervalo.
- **Infrarrojo reflejado onda corta** (banda 5 Landsat ETM+ y banda 4 de SPOT 5). Es una región muy sensible al contenido de agua del terreno: El agua encharcada o embalsada con una profundidad suficiente absorbe toda la radiación del infrarrojo reflejado que le llega, por lo que estas superficies toman valores radiométricos muy cercanos a 0; es por ello que se discriminan muy bien fondos húmedos del entorno seco que los rodea.
- **Infrarrojo reflejado medio** (banda 7 de Landsat ETM+). Las características espectrales de esta banda para la discriminación de zonas húmedas resultan similares a las de la banda 5, aunque la reflexión en zonas de lámina de agua es algo mayor.

El comportamiento general (signatura espectral) de las cubiertas de agua en las diferentes regiones del espectro queda reflejado en la Figura 4.

Para la estimación de la superficie total anegada por la crecida a través de técnicas de teledetección, se han seguido dos diferentes aproximaciones metodológicas que se complementan entre sí:

- Determinación de superficies cubiertas por lámina de agua
- Estimación de zonas que han podido estar cubiertas por aguas de avenida y que presentan, por consiguiente, mayor grado de humedad que el territorio circundante.

Se han empleado, para ello, dos técnicas complementarias de tratamiento digital de imágenes: **análisis visual** (composiciones en falso color –mejoradas tras la aplicación de técnicas de realce geométrico y radiométrico y transformación HSI– para cada una de las imágenes adquiridas, lo que posibilita su fotointerpretación y análisis visual de los diferentes elementos

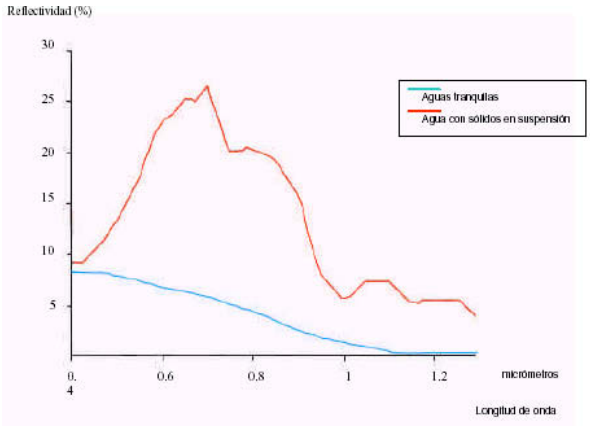


Figura 4. Signaturas espectrales de distintas tipologías de masas de agua.

y tipos de cubiertas presentes) y **análisis digital** (desarrollo de diferentes aproximaciones metodológicas para la discriminación espectral de las superficies ocupadas –o que lo han sido recientemente– por agua).

Aplicación de índices para la detección de zonas inundadas

Para la detección de superficies cubiertas por agua se ha ensayado la aplicación específica de diferentes índices en función de cada una de las imágenes/día analizados.

En el caso concreto de la imagen correspondiente al **día 6/2/03** (landsat 7 ETM+), se han utilizado dos índices distintos, ya que existe una gran variación en la respuesta espectral del agua según su grado de turbulencia y concentración de materia en suspensión:

1. Índice para la identificación de aguas turbulentas:

$$\left[\frac{\text{Banda 3} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 3} + \text{Banda 4}} * 100\right] + \left[\frac{100}{\text{Banda 5} + \text{Banda 7}}\right]$$

2. Índice para la identificación de aguas en calma:

$$\left[\frac{\text{Banda 4}}{\text{Banda 3}} - \frac{\text{Banda 4}}{\text{Banda 5}}\right]$$

El primer índice discrimina la presencia de aguas cargadas de sólidos disueltos y en suspensión, en tanto que el segundo se basa en la respuesta espectral del agua conforme aumentan los valores de longitud de onda; en ambos casos, y después de discriminar las áreas ocupadas por agua, se ha procedido a unir las dos clasificaciones temáticas resultantes en un único

documento de imagen-mapa. En este mapa resultante, además de zonas inundadas aparecen representados píxeles pertenecientes a otros tipos de cubiertas con similar valor de respuesta espectral: nubes y sombras orográficas; las primeras han podido ser eliminadas gracias al análisis de la banda 6, en tanto que las superficies en sombra han podido descartarse a partir de su respuesta espectral en la banda 3, de valores inferiores a los del agua.

Para la detección de superficies inundadas en la imagen del **día 13/02/03** (Landsat 7 ETM+) se ha aplicado el índice de aguas turbulentas; en un proceso análogo al de la imagen anterior, han sido eliminadas las cubiertas de sombras pertenecientes a la presencia de nubes y al efecto del relieve.

En el caso de la imagen correspondiente al **día 8/2/03** (SPOT 2), se ha aplicado un índice análogo al primer término del índice de aguas turbulentas ensayado sobre las imágenes Landsat:

$$\frac{\text{Banda 2} - \text{Banda 3}}{\text{Banda 2} + \text{Banda 3}}$$

Para eliminar el sombreado orográfico se empleó la banda 1, en la que el agua presenta valores más altos; más difícil resultó eliminar otras cubiertas que se confunden con el valor del agua (áreas urbanas e industriales y sombras de nubes); se identificaron sobre la composición temática obtenida y se eliminaron manualmente –interpretación visual– estas zonas de confusión.

Figura 5. Mapa de superficie inundada sobre composición en falso color (SPOT 5, 10/2/03) (Anexo figuras, color).

Finalmente, en la detección del territorio anegado en la imagen correspondiente al **día 10/2/03** (Figura 5), se optó por la aplicación del siguiente índice:

$$\frac{\text{Banda 3} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 3} + \text{Banda 4}}$$

Al igual que en el caso anterior, se hizo necesaria la eliminación de sombras provocadas por el relieve, para lo que se utilizó la banda 2 del satélite.

Aplicación de índices para la detección de zonas inundadas

Como comentábamos anteriormente, además de la discriminación de superficies cubiertas por el agua, el análisis de la información contenida en las imágenes de satélite posibilita también el cartografiado de áreas con un alto contenido en humedad: La elevada absorción de la radiación infrarroja por parte de superficies con alto contenido en agua, permite apreciar las variaciones de humedad del territorio, y estimar, una vez que el pico de crecida ha transitado por esa zona, cuáles son las áreas que han podido estar cubiertas por el agua.

La imagen Landsat 7 ETM+ del **día 13/02/03**, que cubre el ámbito de estudio entre Lodosa (Navarra) y Zaragoza, resulta especialmente apropiada para ensayar esta técnica, ya que los caudales máximos de avenida se produjeron en este tramo del Ebro entre los días 5 y 9 de febrero.

Con este propósito, se ha elaborado una composición en falso color (RGB) con las bandas 4, 5 y 7; sobre ella se ha digitalizado el contorno de áreas con un alto contenido en humedad (contraste de la imagen, técnicas de asociación espacial). Evidentemente, la aplicación de este método está subordinada a la percepción subjetiva de un intérprete, y a la clara existencia de un contraste entre las zonas que han sido encharcadas y aquellas otras que no han sido afectadas por la crecida; este contraste es muy dependiente de la fecha de adquisición de la imagen.

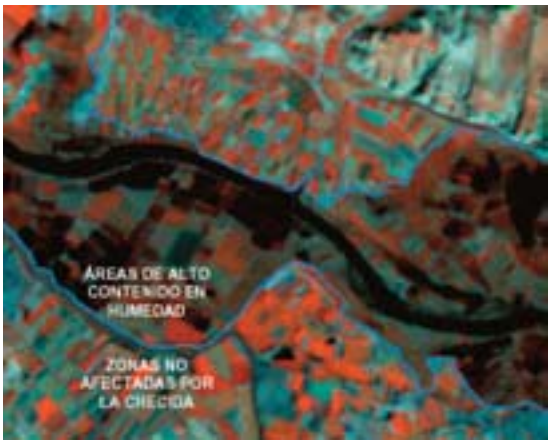


Figura 6. Discriminación visual entre áreas con alto contenido en humedad (en tonos oscuros) y otras posiblemente no afectadas por la crecida.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se ha ensayado una delimitación de la superficie de inundación (y la creación de una primera cartografía temática de las inundaciones del Ebro en febrero de 2003) siguiendo dos diferentes metodologías: fotointerpretación desde vuelo tripulado, de un lado, y tratamiento digital

de imágenes de satélite, por otro; en ambos casos, la imposibilidad de detectar, a tiempo real, la *imagen* exacta con la situación de máxima crecida en cada tramo fluvial, impide que la cartografía obtenida incluya con rigurosa exactitud el total de la superficie inundada; no obstante, consideramos que esta cartografía generada sí recoge fielmente la distribución y evolución general de la crecida en superficie en tiempos relativamente cercanos a los de su máxima extensión, proporcionando información global y bastante fiable acerca de las superficies y tipos de cubierta del suelo inundadas, con posibilidad de ofrecer datos de estadísticas de superficies afectadas a escala de término municipal.

En cuanto a la estimación de superficies inundadas durante la crecida y refiriéndonos, en primer lugar, al análisis de las imágenes de satélite, hay que señalar que la superficie diacrónica (días 6, 8, 10 y 13 de febrero), resultante de la unión de las superficies ocupadas por el agua en las cuatro escenas consideradas, se estima en 15.226,79 hectáreas; por su parte, la superficie planimetrada sobre la fotointerpretación realizada en vuelo los días 10, 11 y 14 de febrero asciende a 28.106,22 has (se incluye, en ambos casos, el cauce actual del Ebro).

Esta evidente diferencia se debe, fundamentalmente, a la asincronía entre las fechas de las imágenes utilizadas (en especial, la de fecha de 13 de febrero) y los momentos de máximo caudal del Ebro en diferentes zonas; sin embargo, se produce una mejor y evidente coincidencia de las superficies calculadas por ambos métodos cuando la fecha de adquisición de las imágenes de satélite se aproxima a la de la máxima crecida en ese tramo, como es el caso de la imagen SPOT del día 10: la superficie inundada discriminada a partir del análisis digital de la imagen de satélite es de 4.581 has, bastante similar a la estimada por fotointerepretación para esta misma zona, 5.498 has.

Debido a ese desajuste temporal, y con objeto de reducir el sesgo de una posible estimación a la baja en el cómputo de la superficie anegada discriminable desde las imágenes de satélite, se desarrolló una metodología, complementaria a la aplicación de índices de detección de agua, consistente en la discriminación de áreas con alto contenido en humedad días después (una semana, aproximadamente) del paso de máximo caudal; este método pudo aplicarse al análisis del ámbito cubierto por la imagen Landsat del día 13 de febrero. En este caso, la estimación de superficies resulta bastante coincidente: en el territorio común a ambas coberturas (áreas fotointerpretadas en vuelo y ámbito cubierto por la imagen de satélite) la superficie estimada que quedó anegada es de 22.606 has según las imágenes de satélite, y de 19.849 has según la planimetría realizada sobre la fotografía aérea (para estas superficies, se considera que 18.279 has son de cobertura coincidente). En el cuadro 1 se ofrece una síntesis general de estimación de superficies.

Finalmente, consideramos que la utilización combinada de ambas tecnologías y de sus métodos de trabajo asociados han revelado –con sus posibilidades y sus limitaciones– un gran interés para la estimación de la superficie afectada por una inundación; esta cartografía de zonas inundadas (de carácter diacrónico y multitemporal) debiera ser una pieza fundamental a la hora de sentar las bases de una gestión y ordenación de los paisajes y territorios ribereños, en consonancia con los postulados de la Directiva Marco del Agua.

En el póster que acompaña esta comunicación se muestra una representación visual, necesariamente sintética, de todos los trabajos de cartografía realizados, y se aportan datos

estimativos de las superficies de inundación obtenidas a través de los dos métodos aplicados, fotointerpretación en vuelo y análisis digital de imágenes de satélite.

Cuadro 1. Análisis comparativo de estimación de superficies anegadas según método (fotointerpretación/teledetección) en función de considerar sólo áreas inundadas o también aquellas otras con alto contenido en humedad.

A) Superficies estimadas mediante delimitación de áreas cubiertas por agua (en hectáreas)			
	Imagen de satélite	**Fotografía aérea**	**% diferencia**
Ámbito total del estudio	15.226,83	28.106,22	-45,82%
Sectores en los que se dispone de imágenes temporalmente coincidentes con el máximo de la crecida	4.581,40	5.498,17	-16,67%
B) Superficies estimadas mediante delimitación de áreas con alto contenido en humedad (en hectáreas)			
	Imagen de satélite	**Fotografía aérea**	**% diferencia**
Sectores para los que se dispone de una imagen (13/02/03) Landsat adquirida una semana después del paso del máximo de la crecida	22.605,94	19.849,13	12,20

Nota: Todas las superficies incluyen el cauce actual del Ebro.

REFERENCIAS

Arqued Esquía, V. y Losada García, J.A. (1999): "El GIS-Ebro. Un Sistema de Información Geográfica para la cuenca del Ebro". *Conferencia de Usuarios de ESRI*, Madrid, 8 p. [CD-ROM].

Bescós Atin, A. (2003): *Las inundaciones en el río Arga: Estudio hidrogeomorfológico*. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá, Madrid,. 407 p.

Boletín Oficial del Estado (BOE) de 14/02/1995: *Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de Interior, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones.*

Chuvieco, E. (2002): *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia, Barcelona, 568 pp.

Ollero, A. (1996): *El curso medio del Ebro: geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*. Tesis doctoral. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza, 311 p.

Ollero, A. (2003): Comunicación al Seminario *"El problema de las inundaciones: claves, razones y soluciones"*, Fundación Nueva Cultura del Agua-Universidad de Zaragoza.

Ollero, A.; Pellicer, F. y Sánchez, M. (2003): La crecida del Ebro de febrero de 2003. Artículo en la *Web de la Asociación de Geógrafos Españoles* desde el 19 de febrero.

Análisis del riesgo de inundación en zonas afectadas por avenidas de cuencas hidrográficas en régimen natural en la Región de Murcia

F. Alonso Sarria [1], F. Gomariz Castillo [2] y P. Pérez Cutillas [2]

(1) Departamento de Geografía Física, Humana y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Murcia, C/ Santo Cristo 1, 30001 Murcia.
(2) Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

RESUMEN

Este trabajo expone parte de la metodología y algunos de los resultados alcanzados en un Proyecto de zonificación territorial del riesgo de inundación en la Región de Murcia. El trabajo se desarrolló en el seno de un convenio de colaboración entre el Instituto Universitario del Agua y del Medio Ambiente (INUAMA) de la Universidad de Murcia y la Consejería de Presidencia (Dirección General de Protección Civil) de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

El modelo hidrológico se basa en la teoría del Hidrograma Unitario Geomorfológico. Para la conversión lluvia-escorrentía se utiliza el modelo del Numero de Curva a partir de un mapa de clases texturales, generado mediante el mapa de usos del suelo y las bases de datos asociadas, y el mapa de usos del suelo.

El resultado final del proyecto son diversos mapas de zonas inundables en los núcleos de población de mayor importancia en la Región de Murcia. Como conclusión fundamental de este trabajo cabe destacar la idoneidad de las herramientas de código abierto para trabajos científico-técnicos de este tipo.

Palabras clave: *SIG, GRASS, modelización hidrológica, inundaciones, Región de Murcia.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

This work shows part of the methodology and some results of the project Territorial zoning of flood risk in Murcia Region. The work is the result of the colaboration between the Water and Environment Institute of the University of Murcia and the Civil Proteccion authority of Murcia Region.
The Hyrologic model is based on the Geomorphological Unit Hydrograph model, curve number model Is used to model the effective rainfall from land use and soil maps.
The final result are several maps of flooding zones around urban polygons in Murcia Region. As main conclusion of the project, the accuracy of open source tools to achieve this sort of scientific-technic works.

Key words: *GIS, GRASS, hydrologic modelling, floods, Murcia Region.*

INTRODUCCIÓN

El trabajo que se presenta expone parte de la metodología desarrollada y algunos de los resultados alcanzados en el marco de un convenio de colaboración firmado entre la Dirección General de Protección Civil de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia y el Instituto Universitario del Agua y el Medio Ambiente (INUAMA) de la Universidad de Murcia. Este convenio se denominó *Análisis de riesgo y zonificación territorial ante el riesgo de inundaciones en la Región de Murcia: Zonas afectadas por avenidas de cuencas hidrográficas en régimen natural*.

El objetivo es la delimitación de las zonas de la Región de Murcia con riesgo de inundación apreciable, de manera que se obtenga tanto un análisis puntual, en aquellos puntos afectados, como una visión general de la distribución territorial del riesgo. Aunque el análisis se centra en el territorio de la Comunidad autónoma de la Región de Murcia, en algunos casos fue necesario incorporar cuencas con origen en comunidades vecinas. Se acordó centrar el análisis en:

1. El territorio de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
2. Los núcleos de población de acuerdo con la definición de riesgo mencionada posteriormente.
3. Cuencas no reguladas, ya que las cuencas reguladas presentan la importante dificultad añadida de que las estrategias de gestión de presas en caso de riesgo pueden alterar considerablemente los resultados de cualquier modelización.

APLICACIONES UTILIZADAS

Existe una gran variedad de programas de simulación hidrológica. En los últimos años éstos tienden a integrar diferentes procesos que antes se estudiaban por separado y a integrar,

además, la modelización hidrológica con los Sistemas de Información Geográfica (*Olaya Ferrero*, 2004). Ambos tipos de programas, SIG y modelos hidrológicos, tienen, por tanto, una fuerte dependencia de los datos espaciales, por lo que resulta obvia la conveniencia de integrarlos en una sola herramienta. La gran capacidad de los SIG para manejar y analizar la información espacial ha llevado a su consolidación como las herramientas más adecuadas para afrontar de forma eficiente la modelización hidrológica. Existen tres grandes niveles de integración de modelos de distinto tipo con SIG (*Fedra*, 1993):

- Tradicionalmente, los SIG se han utilizado en modelización como simple herramienta de preprocesado de los datos de entrada y para hacer representaciones cartográficas de los resultados. El SIG y el programa de modelización son sistemas separados, que comparten un mismo formato de fichero de importación/exportación de datos. Es la aproximación más común (*Goodchild*, 1993). El resultado es la implementación de diferentes modelos en un SIG, como ArcInfo (*Martínez et al.*, 2000) o ArcView, o la creación de programas específicos (*Garbrecht & Martz*, 1999). Olivera & Maidment (2000) proponen un conjunto de *scripts* para el programa ArcView que generan los ficheros de entrada que necesita HEC-HMS.
- Integración de dos sistemas separados, que comparten una interfaz de usuario, los formatos de fichero y el espacio de memoria. Este tipo de integración se está desarrollando entre sistemas abiertos como GRASS y R (*Bivand & Neteler*, 2000)
- Integración total. El modelo se incorpora como módulo del programa de SIG, como en el caso del módulo *r.watershed* que realiza algunas tareas de modelización hidrológica en GRASS (*Larson*, 1993), o bien se incorporan potencialidades de SIG a un sistema de modelización como en el programa MODULUS (*Engelen et al.*, 2000).

Para aprovechar al máximo las posibilidades de integración de un SIG con modelos hidrológicos, es necesario un SIG modular y abierto, que permita integrar las diferentes piezas y con una arquitectura lo suficientemente abierta para permitir el intercambio de información (*Fedra*, 1993). Ésta es la estrategia que se adopta en este trabajo.

En parte, el problema del desarrollo de modelos en los SIG comerciales es que éste debe hacerse mediante lenguajes de macros (como *ARC Macro Language* o *Avenue*) o lenguajes de reducida potencia como *Visual Basic*. El enfoque adoptado en este proyecto es diferente. Al trabajar con un SIG abierto (*open source*) se dispone, no sólo de los códigos fuente de todos los módulos del programa, sino también del conjunto de librerías con el que éstos se desarrollan. Por tanto resulta sencillo programar modelos integrados con el SIG a un nivel mucho más íntimo y más eficientes, al estar programados en lenguaje C.

Para este proyecto se ha utilizado el programa GRASS, ya que permite una integración total de diferentes tipos de modelos en un SIG y programar modelos a varios niveles:

- Dispone de un módulo, *r.mapcalc*, que actúa como interprete de un lenguaje de álgebra de mapas de alto nivel, que permite utilizar una representación simbólica de los mapas. La combinación simbólica de estos mapas (R=P-E) significa que la recarga es igual a la precipitación menos la evapotranspiración), ocultando los aspectos relativos a la codificación de los datos.
- Por otro lado el elevado número de módulos que incorpora permite utilizar las herramientas de programación de la *shell* que ofrece Unix para crear *scripts*.

- Puesto que es un programa abierto, se incluyen en la distribución las librerías con las funciones utilizadas para el desarrollo del programa. Estas funciones actúan en la práctica como herramientas de SIG de bajo nivel que permiten desarrollar nuevos módulos.

METODOLOGÍA

La metodología presentada se articula en 4 fases, dejando aparte el proceso inicial de selección de los núcleos urbanos a los que se aplica, el diseño de episodios de precipitación de período de retorno y la modelización hidráulica posterior para determinar las alturas de agua.

1. Obtención de las grandes cuencas no reguladas y sus redes de drenaje. La metodología para la obtención de los límites de las cuencas y la red de drenaje ha llegado a estandarizarse bastante (*Garbrecht & Matz*, 1999; *Olivera & Maidment*, 2000).
2. Evaluación de la capacidad de infiltración del suelo a partir de mapas de número de curva, a partir de mapas de suelo y de usos del suelo obtenidos mediante teledetección.
3. Modelización hidrológica.

Obtención de las grandes cuencas no reguladas y sus redes de drenaje

La información de partida para generar los MDE son los mapas topográficos escala 1: 25000 del Instituto Geográfico Nacional. La elevada densidad de drenaje en gran parte del área de estudio obliga a emplear esta escala como mínimo para evitar que la mayor generalización de las curvas de nivel en mapas de escala inferior impida la reconstrucción, manual o automática, de las redes de drenaje al nivel de detalle requerido. Por otra parte la falta de cartografía digital a escala 1:5000, para todo el área de trabajo, impidió considerar la utilización de datos más detallados. La resolución (tamaño de celdilla) adoptada ha sido de 10 metros. Se ha señalado (*Bosque Sendra*, 1992) que, como norma general, la resolución adecuada para un MDE es el doble de la equidistancia de curvas de nivel. Sin embargo esta consideración es sólo válida en terrenos llanos para evitar una ratio demasiado baja entre resolución vertical y horizontal (que generaría áreas llanas ficticias). De hecho en la mayor parte de la Región de Murcia, las curvas de nivel muestran importantes áreas de solapamiento si se rasterizan con resoluciones de más de 10 metros. El problema de la baja relación entre resolución vertical y horizontal se ha resuelto multiplicando las curvas de nivel por 100 para obtener un MDE en centímetros en lugar de en metros.

EL método más utilizado para determinar la dirección de drenaje de una céldilla es el llamado *algoritmo D-8* (*O'Callaghan & Mark*, 1984), que aplica un operador de vecindad de álgebra de mapas, para asignar a cada celdilla la vecina (con una cota menor) respecto a la que tiene mayor pendiente. A pesar de plantear una serie de problemas (*Garbrecht & Martz*, 2000):

- No representa adecuadamente los flujos divergentes en pendientes convexas.
- Puede dar lugar a orientaciones de flujo preferenciales.
- No permite asignar direcciones de drenaje en depresiones, áreas llanas o bloqueos al flujo.

es el más utilizado debido a la sencillez de su implementación.

El módulo *r.watershed* de GRASS permite eliminar las depresiones ficticias presentes en un MDE y generar mapas con la dirección de flujo a partir del algoritmo D-8. Solventa los problemas del método, eliminado las depresiones del MDE y asignando direcciones a las áreas llanas resultantes, de forma que el flujo salga del área llana por el punto con menor elevación.

Los métodos tradicionales asumen que las depresiones observadas en un MDE se deben a la presencias de valores demasiado bajos en el centro de las depresiones (*O'Callaghan & Mark*, 1984). Sin embargo en algunos casos pueden deberse al cerramiento artificial de cauces encajados debido a la forma adoptada por las curvas de nivel. Las depresiones presentes en los DEM suelen situarse en cauces, con lo que cualquier error en los valores de altitud generará errores en la pendiente y a su vez en cualquier estimación de velocidad de flujo. En el programa TOPAZ se incluyen ya métodos para la resolución de depresiones *atravesando* los posibles cerramientos artificiales y dirigiendo el flujo aguas abajo sin necesidad de alterar los valores de elevación (*Garbrecht & Martz*, 1999).

Una vez obtenido el mapa de direcciones de drenaje, puede generarse la cuenca vertiente a cualquier punto del MDE aplicando un procedimiento recursivo, que parte de la celdilla desembocadura. En primer lugar se determinan qué celdillas drenan a ella y se añaden a la cuenca; a partir de éstas se determinan sus celdillas vertientes y se añaden a la cuenca y así sucesivamente.

Una vez obtenida la cuenca, un procedimiento similar permite calcular un mapa de drenaje acumulado para cada celdilla. Basta con determinar, para cada celdilla, cuál sería la trayectoria de un volumen de agua que cayera en ella y asignar a cada celdilla de esta trayectoria el número de celdillas que la han drenado. Si se alcanza una celdilla ya *visitada* se suma el valor presente y se continúa el proceso.

Los procedimientos automáticos para obtener la red de drenaje de una cuenca a partir de estos mapas de drenaje acumulado, son:

- Aplicar un umbral de área drenada, de forma que todas las celdillas que lo superen serán consideradas como pertenecientes a un cauce.
- Utilizar la pendiente para complementar este método.
- Utilizar las curvas de nivel rasterizadas para detectar la curvatura de las mismas junto con sus direcciones de drenaje.

En este último procedimiento, aquellas celdillas donde una curva de nivel presenta curvatura hacia la dirección de drenaje se consideran parte de un cauce. A continuación, y utilizando el mapa de las direcciones de drenaje, puede generarse la red de drenaje completa como el conjunto de celdillas que recogerían el drenaje de las celdillas definidas anteriormente.

Todos estos métodos son especialmente adecuados en zonas con un cierto relieve. En zonas llanas, la gran separación entre curvas de nivel impide la estimación adecuada de la localización de la red de drenaje.

El módulo *r.watershed* de GRASS utiliza un procedimiento de umbral de área drenada para determinar qué celdillas constituyen un cauce y cuáles no. Para este trabajo se ha considerado que este método no es del todo apropiado, ya que distintas litologías y distintos usos del suelo van a condicionar el umbral de área drenada necesario para mantener un cauce (*Dietrich & Dunne*, 1993).

La red de drenaje obtenida de este modo aparece como un conjunto de celdillas concatenadas que, en algunos casos, aparecen sobreensanchadas. Es necesario por tanto transformar estas cadenas de celdillas en un conjunto de líneas vectorizando la capa raster. Esta operación esta implementada en GRASS mediante el módulo *r.thin*. El resultado será una línea independiente por cada tramo, caracterizada por un conjunto de vértices a la que se asigna un identificador único.

Para solventar algunos de los problemas que presentan las redes de drenaje extraídas automáticamente de un MDE, especialmente la indeterminación de las direcciones de flujo en zonas llanas, se ha optado en algunos casos por forzar el MDE, para que concuerde con la red de drenaje digitalizada de un mapa (*Saunders*, 2000). Este procedimiento implica disponer de un mapa de redes de drenaje a una escala similar a la del MDE. En el caso de este trabajo no se disponía de dicho mapa, optándose por emplear un método de extracción de red de drenaje que tiene en cuenta la forma de las curvas de nivel de manera que la red resultante se asemeja a la que se obtendría digitalizándola a mano a partir de las curvas. En todo caso el procedimiento de Saunders no ofrece resultados totalmente satisfactorios, ya que se han observado distorsiones relevantes al forzar un MDE a la red de drenaje (*Saunders*, 2000).

En este trabajo se ha utilizado un procedimiento alternativo a los habituales, consistente en aplicar una versión computerizada del método tradicional de generación de redes de drenaje basado en la forma de las curvas de nivel.

Para ello se parte de las curvas de nivel rasterizadas y de la capa de direcciones de drenaje generada a partir del Modelo Digital de Elevaciones. Aquellas celdillas ocupadas por curvas de nivel y cuya dirección de flujo coincida con la de las celdillas vecinas también ocupadas por la misma curva de nivel, se consideran parte de una red de drenaje. Estos puntos inician un tramo que se propaga por la capa, en función de las direcciones de drenaje. El resultado final es una capa con una red de drenaje rasterizada.

Esta capa debe vectorizarse y corregirse. En esta primera etapa los tramos, que forman la red, pueden dividirse en aquéllos de magnitud 1 (sin tributarios) y tramos de magnitud mayor de uno. Los pasos de corrección son:

- Eliminación de tramos de magnitud uno de dimensión inferior al tamaño del píxel; se trata de artefactos generados en el proceso de vectorización.
- Eliminación de tramos de magnitud uno excesivamente rectos; se generan en laderas con curvas de nivel de forma irregular en la cumbre.
- Reordenación de la red de drenaje.
- Eliminación de todos los tramos de magnitud uno.

La última etapa del proceso de conversión se justifica debido a la dificultad de ubicar correctamente el nacimiento de los tramos de magnitud uno, especialmente utilizando un procedimiento automático. El método del Hidrograma Unitario Geomorfológico (Rodríguez Iturbe, 1993) parte de parámetros de naturaleza fractal (razón de bifurcación, razón de longitud y razón de áreas) que se obtienen mediante el ajuste de modelos de regresión entre el número de orden y el número de tramos, longitud de los mismos y tamaños de las áreas vertientes. Por tanto la eliminación de los tramos de orden uno no sólo no va en detrimento de la exactitud del parámetro sino que, al ser los más dudosos, va a mejorar su estimación.

Cada tramo tiene dos nodos, uno inicial y otro final, de manera que la topología de la red de drenaje se organiza asignando a cada tramo sus dos tramos afluentes y el tramo al que desagüa. Casos especiales son los tramos de cabecera, sin afluentes, y el tramo de desembocadura. Se han desarrollado módulos específicos para aplicar la ordenación de Horton a las redes de drenaje obtenidas.

Evaluación de la capacidad de infiltración

Para evaluar la conversión lluvia escorrentía en los diferentes puntos de la Región se va a construir un mapa de capacidad de infiltración del suelo mediante el método del número de curva (Tragsa-Tragsatec, 1998). Para ello se necesita un mapa de clases texturales y otro de usos del suelo.

Los datos de partida para la realización de este mapa es el mapa de suelos en formato digital de la Región de Murcia (Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente, Región de Murcia, 1999) y las tablas de datos de campo que lo acompañan. Se trata de un mapa realizado a escala 1:5.000, aunque en su primera versión en papel (mapas del proyecto LUCDEME) se publicaron a escala 1:100.000. Entre las tablas destaca una de muestras de capa arable georreferenciadas. Entre las propiedades que se obtuvieron en estas muestras esta la granulometría.

El contenido de este mapa digital se integró en la base de datos espacial del SIG desarrollado para dicho proyecto. Con las tablas de datos se creó una base de datos gestionada por el programa *PostgreSQL*. Se desarrolló un *script (s.in.sql)* capaz de generar mapas de puntos a partir de consultas a la base de datos, que obtienen las coordenadas y los datos de cada punto y los datos requeridos para dicho punto, en este caso los porcentajes de diferentes clases granulométricas. El cruce de este mapa de medidas puntuales con el mapa de tipos de suelo permitió, mediante un procedimiento de interpolación por clasificación (Burrough y McDonnell, 1998), crear:

- Mapas de valores medios de cada clase para cada mancha de suelo con valores de granulometría.
- Mapas de valores medios de cada clase para cada tipo de suelos.
- Combinación de los anteriores para obtener mapas completos.

La recombinación de todos estos mapas, siguiendo los criterios que utiliza la USDA en su conocido triángulo de clases texturales (Porta *et al.*, 1994), permite la obtención de un mapa final de clases texturales. Por otra parte se ha utilizado un mapa de usos de suelo obtenido a partir de teledetección en el Instituto Universitario del Agua y el Medio Ambiente de la Universidad de Murcia. Con ambos mapas se ha obtenido finalmente un mapa de número de curva siguiendo la metodología aportada por *Tragsa-Tragsatec* (1998).

Modelización Hidrológica

Para llevar a cabo la modelización del caudal esperado en un punto de una red de drenaje, se utiliza el modelo del Hidrograma Unitario Geomorfológico. Se trata de un modelo desa-

rrollado por *Rodríguez Iturbe* (1993), que emplea el método del Hidrograma Unitario, pero con un conjunto de índices geomorfológicos para calibrarlo. De esta manera, no es necesario disponer de datos de aforos para su aplicación.

El Hidrograma Unitario es la respuesta de una cuenca a una precipitación uniforme, efectiva (es decir lluvia que cae con igual intensidad en toda la cuenca y produce sólo escorrentía rápida) y que además es de valor unitario. (Tragsa-Tragsatec, 1998). Esta respuesta se prolonga más o menos en el tiempo, en función de las características de la cuenca.

La hipótesis del Hidrograma Unitario Geomorfológico permite estimar los parámetros de $h(t)$ a parir de una serie de parámetros geomorfológicos extraídos de las relaciones de Horton y de la velocidad en el cauce principal.

Debido a la dificultad de estimar la velocidad de flujo en situación de avenida, Rosso (1984) propone utilizar un método alternativo basado en el tiempo de retardo. Para estimar el tiempo de retardo se utiliza la aproximación de *Olivera & Maidment* (1999).

Se ha realizado un módulo específico para GRASS **v.GUHs** que muestra en pantalla la red de drenaje requerida. El usuario, tras pinchar en uno de sus tramos, obtiene (utilizando los algoritmos detallados anteriormente) la reconstrucción de la cuenca y de la red de drenaje tributaria de este tramo, su ordenación por los criterios de Strahler y los parámetros necesarios para aplicar el método del Hidrograma Unitario Geomorfológico. Al mismo tiempo se obtiene un valor de número de curva y valores de precipitación máxima en la cuenca para los períodos de retorno considerados. Estos valores se calculan a partir de los valores medios registrados en las celdillas pertenecientes a las cuencas.

Con estos valores se entra en otro módulo programado para **R**. R es un entorno para el análisis estadístico, que proporciona un gran número de técnicas estadísticas y gráficas, así como un lenguaje con el que resulta sencillo programar modelos matemáticos.

Este programa es el encargado de llevar a cabo:

- La creación del yetograma de la tormenta de diseño
- El cálculo de la precipitación efectiva
- La estimación de los parámetros del Hidrograma Unitario Geomorfológico.
- La convolución y obtención de los caudales máximos para 50, 100 y 500 años.

Seleccionando los tramos que afectan a cada uno de los núcleos de población considerados se obtiene un hidrograma de avenida para cada uno de ellos.

RESULTADOS

Se han seleccionado un total de 48 cuencas. Éstas desembocan directamente al mar, a un embalse o a uno de los ríos mayores de la Cuencas del Segura (Segura, Guadalentín, Mula, etc.) aguas abajo de un embalse. En la figura 1 aparece un mapa de las cuencas junto a los términos municipales y al conjunto de núcleos de población estudiados.

Las figuras 2 y 3 reflejan el mapa de clases texturales y el mapa final de número de curva respectivamente.

Las redes de drenaje han sido extraídas por el procedimiento automático expuesto ante-

riormente. Este procedimiento funciona muy bien en las zonas con pendientes elevadas, pero tiende a causar problemas de indeterminación de la dirección de flujo en las zonas llanas apareciendo, fundamentalmente, una disposición artificial en bayoneta de las redes. Por ello ha sido necesario llevar a cabo una tarea manual de revisión y rectificación de la red drenaje.

Figura 1. Cuencas analizadas y núcleos de población.

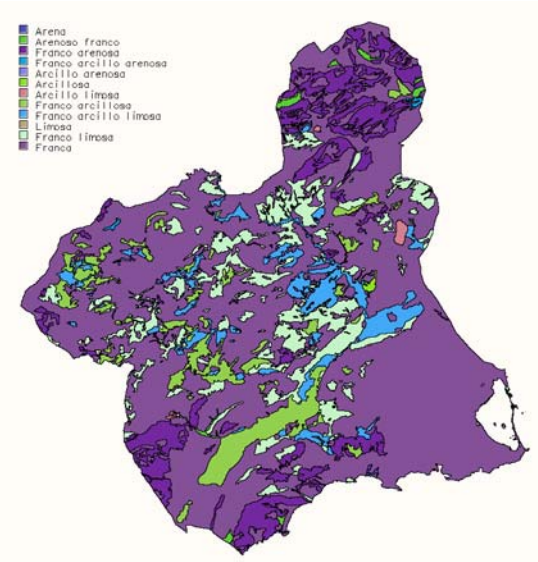


Figura 2. Mapa de clases texturales de la Región de Murcia.

El procedimiento ha dado resultados positivos. La comparación con el mapa de red de drenaje del IGN muestra una coincidencia importante (figura 4). El mapa del IGN se caracteriza por incluir solamente los cauces de mayor orden y sólo en aquellos casos en que su presencia es evidente a partir de las curvas de nivel. En este sentido, el mapa de redes de drenaje, que se presenta aquí, es mucho más completo. Los cauces de mayor orden siguen un trazado muy similar al del mapa del IGN, lo que avala su corrección planimétrica.

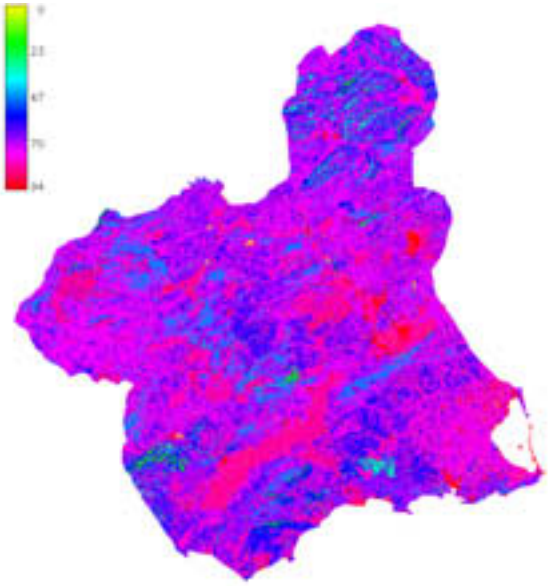


Figura 3. Mapa de número de curva de la Región de Murcia.

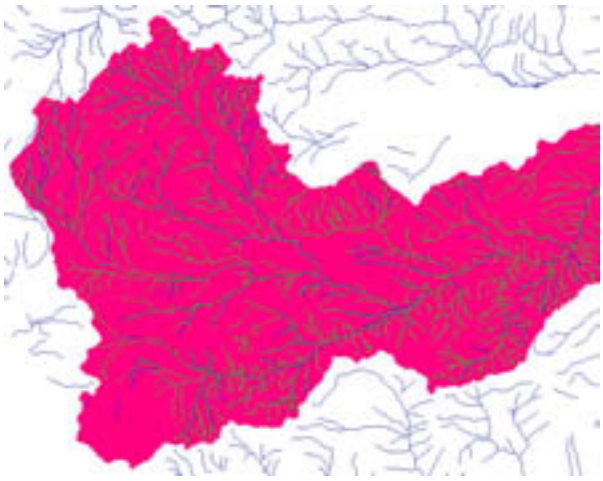


Figura 4. Red de drenaje del Río Quipar en la cabecera de la cuenca en comparación con la red de drenaje del IGN.

Como se ha mencionado anteriormente, el procedimiento de corrección de la red de drenaje implica también la eliminación de los cauces de orden uno, tal como se aprecia en la figura 5. Ésta muestra también la asignación de áreas drenadas a cada cauce, que permiten calcular la razón de áreas, necesaria para el modelo del Hidrograma Unitario Geomorfológico.

Finalmente, en la figura 4 aparecen los resultados de la modelización hidrológica en el núcleo urbano de El Sabinar (Moratalla). Este procedimiento se utilizó para 360 núcleos de población de la Región de Murcia.

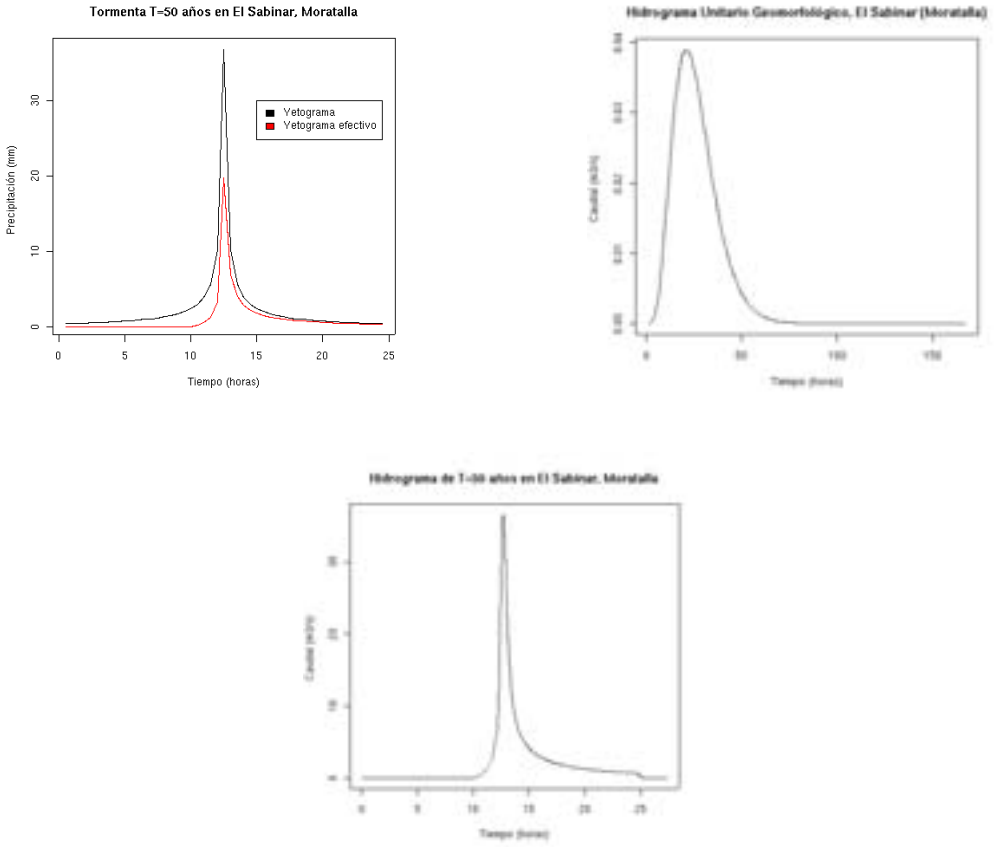


Figura 5. Hidrograma Unitario Geomorfológico e Hidrograma resultado en El Sabinar (Moratalla).

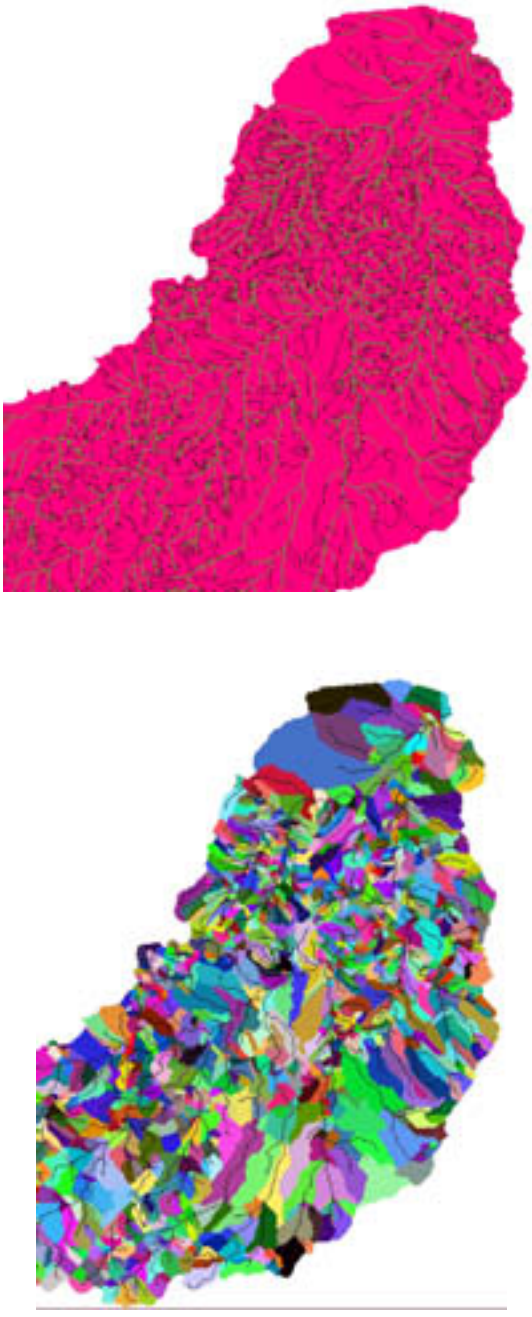


Figura 6. Corrección y eliminación de cauces de orden uno en la red de drenaje del Río Quipar. Asignación de áreas drenadas por cada cauce.

CONCLUSIONES

El trabajo que se ha presentado es más la metodología desarrollada para llevar a cabo un proyecto de carácter técnico que un trabajo de investigación propiamente. Sin embargo esta metodología puede considerarse suficientemente innovadora en el sentido de la utilización conjunta de programas de SIG, Sistemas de Gestión de Bases de Datos y programas de análisis de datos en un entorno abierto.

Cabe destacar la versatilidad de un sistema así construido para programar diversas herramientas que aprovechan, de forma integrada, las capacidades de todos los programas utilizados.

REFERENCIAS

Bivand, R. & Neteler,M., 2000: *Open Source geocomputation: using the R data analysis language integrated with GRASS GIS and PostgreSQL data base systems in Geocomputation 2000 http://reclus.nhh.no/gc00/gc009.htm*

Bosque Sendra,J., 1992: *Sistemas de Información Geográfica*, Ed. Rialp. 451 pp.

Burrough, P.A. and McDonnell,R.A., 1998: *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, Oxford, 2nd edition.

Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente, Región de Murcia, 1999: *Mapa Digital de Suelos de la Región de Murcia*, Murcia 78 pp + CDROM

Dietrich, W.E. & Dunne,T., 1993: The Channel Head, in K.Beven & M.J. Kirkby (Eds.), *Channel Network Hydrology* John Wiley & Sons 175-219

Engelen, G.; van der Meulen,M.; Hahn,B.; Ujee,I. (coords.), 2000: Modulus: *A spatrial modelling tool for integrated environmental decision-making*, Project ENV4-CT97-0685 Final Report. *ftp://ftp.riks.nl/modulus/Report_Vol1.pdf*

Fedra, K., 1993: GIS and Environmental Modeling in M.F. Goodchild, B.O. Parks & L.T. Steyaert (Eds.) *Environmental Modeling with GIS,* Oxford University Press. 35-50,

Garbrecht, J. & Martz,L.W., 1999: *TOPAZ: An Automated Digital Landscape Analysis Tool for Topographic Evaluation, Drainage Identification, Watershed Segmentation and Subcatchment Parametrization;* TOPAZ Overview. USDA-ARD Publication NºGRL 99-1. 26 pp.

Garbrecht, J. & Martz,L.W., 2003: Assesing the Performance of Automated Watershed Segmentation from Digital Elevation Models, en J.G.Lyon (Ed.), *GIS for Water Resources and Watershed Management*, Taylor & Francis, London, 17-24.

Garbrecht, J.; Martz,L.W. & Starks,P.J., 2003: Technological Advances in Automated Land Surface Parametrization from Digital Elevation Models, en J.G.Lyon (Ed.), *GIS for Water Resources and Watershed Management*, Taylor & Francis, London, 207-217.

Goodchild,M.F., 1993: The state of GIS for Environmental Problem-Solving in M.F. Goodchild, B.O. Parks & L.T. Steyaert (Eds.), *Environmental Modeling with GIS,* Oxford University Press. 8-15,

Kraus, R.A., 2000: Floodplain Determination using ArcView GIS and HEC-RAS, in D.Maidment & D.Djokic (Eds.), *Hydrologic and Hydraulic modeling support with Geographic Information Systems*, ESRI press. 177-189.

Larson.M, 1993: GRASS Tutorial. r.watershed, *http://grass.itc.it/gdp/raster/r.watershed.ps*

Martínez, V.; Dal-Ré,R.; García,A.I. y Ayuga,F., 2000: Modelación distribuida de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas mediante S.I.G. *Evaluación experimental Ingeniería Civil*, 104, 141-146.

O'Callaghan, J.F. & Mark,D.M., 1984: The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 28:323-44.

Olaya Ferrer,V., 2004: Hidrología Computacional y Modelos Digitales de Terreno (*http://heart.sf.net/textos*).

Olivera, F. & Maidment,D.R., 1999: GIS Tools for HMS Modeling Support. in D.Maidment & D.Djokic (Eds.), *Hydrologic and Hydraulic modeling support with Geographic Information Systems*, ESRI press. 85-112.

Porta, J.; López Acevedo,M. y Roquero, C., 1994: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*, MundiPrensa, Madrid, 807 pp.

Rosso, R., 1984: Nash model relation to Horton order ratios, *Water Resources Research* 20(7), 914-920.

Saunders, W., 2000: Preparation of DEMs for Use in Environmental Modeling Analysis in D.Maidment & D.Djokic (Eds.), *Hydrologic and Hydraulic modeling support with Geographic Information Systems*, ESRI press. 29-51.

Rodríguez Iturbe, I., 1993: The Geomorphological Unit Hydrograph, in K.Beven & M.J. Kirkby (Eds.) *Channel Network Hydrology*, John Wiley & sons 43-68

Tragsa, Tragsatec, 1998: *Restauración Hidrológico-Forestal de Cuencas y Control de la Erosión*, Mundi Prensa, Madrid, 945 pp.

Análisis, mediante tecnología SIG, de la vulnerabilidad del sector comercial de la ciudad de Girona a las inundaciones del río Onyar

L. Ribera Masgrau

Departamento de Geografía, Historia e Historia del Arte, Facultad de Letras, Universitat de Girona, Pl/ Ferrater Mora, 1, 17071 Girona.

RESUMEN

En esta comunicación se analiza el riesgo de impacto por inundaciones del río Onyar a partir de la caracterización de la vulnerabilidad del comercio de la ciudad de Girona. Se trata de valorar el riesgo que este sector económico presenta a una posible inundación, desde la perspectiva de los elementos expuestos, a diferencia de la mayoría de estudios realizados hasta el momento en nuestro país, que concentran su atención en el fenómeno físico. Numerosos trabajos consideran que las características y la propia percepción de los elementos expuestos son tan determinantes como las del propio riesgo natural en la generación del impacto. Así, pues, se han encuestado más de 560 establecimientos comerciales de las zonas inundables de Girona correspondientes a períodos de retorno de 25 y 50 años. La encuesta solicita, entre otras cuestiones, si se dispone de algún sistema para evitar la entrada del agua en caso de inundación, si se posee algún espacio superior donde salvaguardar la mercancía o si se ha vivido alguna inundación anteriormente. Los datos se han procesado estadísticamente y se han analizado en un SIG con el objetivo de estudiar las variables que definen la vulnerabilidad de estos establecimientos y construir una metodología que las integre, así como descubrir las diferencias entre la vulnerabilidad real y la percibida. Combinando la cartografía de inundabilidad con la de vulnerabilidad, se obtiene un mapa que muestra el riesgo de daños por inundación de cada establecimiento. Además, se elabora un segundo mapa, que permite mostrar las diferencias entre el riesgo físico (área inundable), la vulnerabilidad (características de cada comer-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

cio) y la percepción de riesgo. En definitiva, se trata de construir una metodología SIG de análisis y evaluación del riesgo de sufrir pérdidas por inundaciones, extrapolable a otros ámbitos geográficos.

***Palabras Clave**: Inundaciones, vulnerabilidad, riesgo, SIG, Girona, Cataluña.*

ABSTRACT

This paper analyzes the potential socioeconomic impact of flooding by the Onyar River, in the city of Girona, from the standpoint of the vulnerability of the retail sector. Most of the studies about urban flooding in Spain focus on the natural phenomenon and pay little attention to equally important determinants of vulnerability such as the socioeconomic characteristics of the areas exposed and the human perception of this hazard. In this study, a survey of 560 retail establishments located in the 25 and 50 year flood areas has been carried out. Data have been statistically processed and incorporated in to a GIS in order to calculate the factors that influence the vulnerability of these establishments. Combining maps of physical exposure with vulnerability maps we obtain the potential loss for each establishment. Moreover, we present also a second map that shows the differences between physical exposure (flooded area); vulnerability (according to the characteristics of each establishment), and hazard perception. This integrative approach can then be used for other geographical contexts.

***Key words:** Flooding, vulnerability, risk, GIS, Girona, Catalonia.*

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, para prevenir y mitigar los impactos de las inundaciones en España, todos los esfuerzos se han concentrado en combatir el fenómeno físico en sí mismo, es decir en intentar evitar las inundaciones, por ejemplo, con la construcción de obras hidráulicas, tales como los pantanos, o la modificación de los cursos fluviales. El paso de los años ha demostrado que si bien éstas pueden ser medidas eficaces, sin duda no son suficientes, al menos por lo que se deduce de los daños crecientes, que las inundaciones provocan año tras año.

Existe ya una numerosa literatura científica en el ámbito de estudio de los riesgos desde la geografía, que aboga por la necesidad de incorporar la dimensión social al estudio de los impactos derivados de las inundaciones y de otros fenómenos naturales extremos. Desde este punto de vista, se considera que las características de los elementos expuestos son tan determinantes como las características del riesgo natural en sí mismo en el momento de generar el impacto negativo final. Con el conocimiento de estos rasgos, a los que podríamos agrupar bajo el término de vulnerabilidad, surge la posibilidad de pensar medidas alternativas para minimizar los impactos negativos de las inundaciones.

Aquí, pues, se presenta una aplicación en el caso concreto de Girona, ciudad históricamente castigada por la inundaciones. Se trata de elaborar una cartografía que represente el riesgo de sufrir daños en el sector comercial, sector éste que tradicionalmente ha sufrido más el impacto de las inundaciones, desde la perspectiva de los elementos expuestos, es decir, poniendo el acento en la caracterización de la vulnerabilidad de cada uno de los establecimientos que lo componen. Uno de los aspectos novedosos es la escala de detalle del estudio, que intenta caracterizar la vulnerabilidad, y el cálculo de riesgo, de y para cada uno de los elementos expuestos. Así pues, se pretenden descubrir algunos de los factores clave que explican la vulnerabilidad ante el riesgo de sufrir daños por una inundación del río Onyar. En definitiva, se intenta contribuir a la construcción de un instrumento metodológico de análisis y representación cartográfica que incorpore la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el objetivo de elaborar un mapa de riesgos por inundación que, además, permita su traslación a otros ámbitos geográficos.

LA CARTOGRAFÍA DE RIESGO DE DAÑOS POR INUNDACIÓN Y LA VULNERABILIDAD

Sin presencia humana (personas, bienes o actividades) no se genera una situación de riesgo puesto que ningún elemento está bajo peligro. Solamente con la presencia humana, en su sentido amplio, puede considerarse una situación de riesgo. Por ello, el riesgo de impacto potencial de una inundación debe ser valorado a partir de la interrelación existente entre los aspectos físicos y los aspectos sociales. Así pues, éste puede ser expresado como una situación susceptible de causar daños, como consecuencia de un suceso que ocurre en un medio vulnerable.

Es preciso puntualizar que las personas, bienes y actividades de un determinado lugar pueden encontrarse expuestas físicamente a las inundaciones, pero no ser vulnerables a las mismas, o que, contrariamente, la exposición física puede ser muy baja, o incluso nula, y la vulnerabilidad elevada por las características de estas personas, bienes y actividades (*Blaikie, 1994*).

En consecuencia, el cálculo del riesgo de daños por inundación para cada elemento a analizar debe contemplar, por una parte, la exposición o no del elemento a la inundación y las características de ésta (peligrosidad); y por otra, las características del elemento considerado (vulnerabilidad). Así pues, el riesgo de daños por inundación puede ser expresado como el producto de la *Exposición* (*E*) (con un valor 1 si el elemento se encuentra dentro del área inundable y un valor 0 si se encuentra fuera), la *Peligrosidad* del suceso (*P*) y su *Vulnerabilidad* (*V*):

$$R=E\times P\times V$$

Parece existir un amplio consenso en el que la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad son factores imprescindibles para el cálculo de riesgo de daños (*Calvo, 2001; Ayala-Carcedo, 2002*) y, por tanto, a tener en cuenta en la elaboración de la cartografía de riesgo. Aun así, los supuestos mapas de riesgo de inundación se han limitado mayoritariamente a la descripción física del fenómeno, olvidando el componente de vulnerabilidad de los elementos expuestos,

implícito en cualquier situación de riesgo o, incluso, olvidando los propios elementos. En la mayoría de las ocasiones se trataba tan sólo de mapas de áreas inundables, que se limitaban a determinar el área potencialmente afectada por las inundaciones, y que se han confundido con los verdaderos mapas de riesgo de daños por inundación (*Díez Herrero, 2002*).

Así como la elaboración de mapas de áreas inundables dispone de metodologías más o menos estandarizadas, se puede afirmar que hoy por hoy no se dispone de una propuesta metodológica integradora aplicable a diferentes contextos territoriales para la elaboración de mapas de riesgos por inundación. Una de las dificultades mayores para cartografiar el riesgo es el conocimiento de la vulnerabilidad y su representación, es decir, el descubrimiento de las diversas variables que aportan información valiosa sobre los elementos que se desea proteger. Hay que entender también cómo estas variables se combinan y integran en el espacio, y el tiempo para aplicarlas correctamente. Estos mapas integrados de riesgo serían, sin embargo, las herramientas más valiosas para la planificación y gestión de los territorios afectados (*Díez Herrero y Pujades, 2002).*

LA VULNERABILIDAD DEL SECTOR COMERCIAL DE GIRONA A LAS INUNDACIONES DEL RÍO ONYAR

Presentación

La ciudad de Girona está considerada una de las 11 zonas de alto riesgo de inundación de Cataluña, es decir, un territorio que puede ser afectado por avenidas frecuentes con posibilidades de daños graves en zonas urbanas. Esta población se encuentra en la confluencia de cuatro ríos: el Ter, el Onyar, el Güell y el Galligans. En la actualidad, el río Onyar cruza el área urbana de sur a norte, dividiendo la ciudad en dos partes, y es el más problemático en lo que respecta a las inundaciones. Este curso fluvial se extiende a lo largo de 24 km hasta desembocar en el río Ter al norte del núcleo urbano, presenta un caudal medio de 1,66 m^3/s y una superficie de cuenca de unos 300 km^2. Su cauce ha sido repetidamente modificado con dragados, canalizaciones y construcción de muros de contención con el objetivo principal de evitar las inundaciones que, sin embargo, se han ido sucediendo a lo largo de los años. El límite de la capacidad que puede soportar el cauce del río, 600 m^3/s, corresponde a un período de retorno de 20 años (*Ayuntamiento de Girona, 2000*).

Por otra parte, el sector comercial es, seguramente, la actividad económica más vulnerable a las inundaciones en Girona, debido a su gran expansión y también a la coincidencia entre su localización y el área inundable. Algunas de las calles con más presencia de comercios se sitúan en los antiguos meandros del río, hoy transformados en calles. La última gran inundación ocurrida en 1970 supuso para el sector comercial unas pérdidas de 85.000.000 de pesetas, cantidad que representó el 66% de las pérdidas económicas totales de la ciudad. Por otra parte, es bueno precisar que las inundaciones en Girona, han ocasionado pocas pérdidas en vidas humanas en los últimos decenios. Por todo ello, parece razonable centrarse en el sector comercial para ensayar esta metodología de análisis de vulnerabilidad y cálculo de riesgo de daños por inundación (*Ribas, 1994*).

Metodología: recogida de datos

Se han definido como área de estudio el conjunto de las zonas inundables del río Onyar en la ciudad de Girona para un período de retorno de 25 y 50 años. Estas capas de información han sido proporcionadas por la *Unitat Municipal d'Anàlisi Territorial* del Ayuntamiento de Girona a partir del Plan Especial de Emergencia de Inundaciones de la ciudad de 1994 y de la revisión posterior de delimitación de la zona inundable del casco viejo, los dos elaborados por el Ayuntamiento de Girona. Esta cartografía contempla también el período de retorno de 100 años, el cual no se ha tomado en consideración en este estudio, al referirse a acontecimientos de excepcional ocurrencia y por afectar a un área demasiado extensa como para desarrollar un estudio de detalle como el que aquí se presenta.

Por otra parte, con la ayuda de los mapas anteriormente mencionados y la base topográfica digital E/1:500 elaborada por el Ayuntamiento de Girona, se han localizado todos los establecimientos comerciales incluidos en las zonas inundables, es decir los elementos potencialmente expuestos. Para ello, se ha partido del padrón de licencias del Impuesto de Actividades Económicas (IAE) de la ciudad de Girona para el año 2002 facilitado por el Ayuntamiento de Girona que dispone de una base georeferenciada para estos registros. Del conjunto de registros existentes, se han seleccionado solamente los correspondientes a la división "*1.6 Comercio, restaurantes y hospedaje. Reparaciones*" por ser éste el único que contiene establecimientos comerciales. De esta división, se han eliminado 2 de las 9 agrupaciones: la "*1.67 Servicio de alimentación*" y la "*1.68 Servicio de hospedaje*", que incluyen restaurantes, bares, hoteles, hostales y similares. Estas agrupaciones están formadas por tipologías de establecimientos comerciales lo suficientemente diferentes del resto como para reservarlos para un estudio pos-

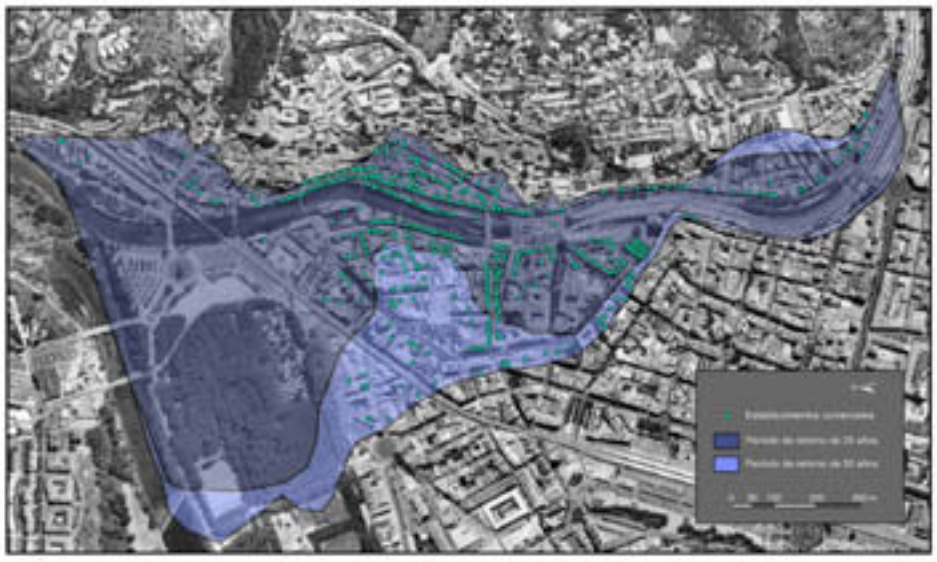


Figura 1. Delimitación del área de estudio.

terior. La idea era analizar los establecimientos con mercancía a la venta o en reparación, la amplia mayoría tiendas o talleres.

Ha sido necesario depurar y completar esta primera relación de comercios con un pormenorizado trabajo de campo. Por una parte, se han eliminado aquellos registros localizados en pisos superiores, por no estar afectados por una posible inundación. Cabe puntualizar que la declaración de la dirección postal del establecimiento en los registros IAE no es obligatoria en la mayoría de los casos, puesto que se trata de información de carácter fiscal asociada, tan sólo, al titular del negocio. También, se han eliminado aquellos establecimientos inexistentes, es decir, que ya habían cesado su actividad comercial en el momento de recopilar los datos (140 casos). Por otra parte, se han incorporado los establecimientos de nueva apertura posteriores al censo de 2002 o aquéllos que por un motivo u otro no estuvieran contemplados hasta el momento (91 casos). También se contabilizaron aquellos comercios registrados, pero que habían modificado la tipología del IAE (47), probablemente debido a un cambio de orientación del comercio.

Finalmente, 590 establecimientos han estado incluidos en el estudio, que corresponden a todos los establecimientos comerciales en planta baja de Girona (exceptuado los ya mencionados restaurantes, bares, hoteles, hostales y similares) incluidos en las zonas inundables para un período de retorno de 25 o 50 años y que suponen, aproximadamente, una cuarta parte del total de licencias del IAE de las mismas categorías en todo el municipio de Girona. Para cada uno de ellos se realizó una encuesta con 11 preguntas relacionadas con características humanas y físicas del establecimiento en relación a la capacidad de hacer frente a una posible inundación así como a su percepción en relación a este tipo de episodios. Del total de establecimientos, 22 rehuyeron contestar la encuesta, que se realizó entre septiembre de 2003 y febrero de 2004, quedando finalmente 568 de computables.

Cuadro 1. Modelo de encuesta sobre inundaciones a los comercios del área de estudio.

Pregunta	Opciones de respuesta
1) ¿Ha vivido alguna inundación en Girona?	Sí, no, ns/nc
2) ¿Cree que en un futuro se producirán inundaciones que puedan afectar a su establecimiento?	Sí, no, ns/nc
3) En su caso, ¿Cómo valoraría el posible impacto de una inundación en su establecimiento?	Muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto
4) ¿Desde su establecimiento se ve el río?	Sí, no, ns/nc
5) ¿El propietario del negocio o el encargado vive cerca del establecimiento?	En el mismo edificio, en la misma calle, en el mismo barrio, en la ciudad, fuera de la ciudad de Girona
6) Año de apertura del comercio	18xx, 19xx o 20xx
7) ¿De qué tipo de comercio se trata?	Familiar, franquicia, S.A., cadena comercial
8) ¿Dispone de algún sótano que se utilice como almacén?	Sí, no, ns/nc

9) ¿Dispone de espacio vacío en un altillo o planta superior donde trasladar el género del establecimiento en caso de inundación?	Sí, no, ns/nc
10) ¿Dispone de algún sistema para evitar la entrada del agua en el establecimiento, en caso de inundación?	Sí, no, ns/nc
11) ¿Dispone de seguro para inundaciones?	Sí, no, ns/nc

Las preguntas 1, 2, 3, 4 y 6 hacen referencia a la percepción que los encuestados tienen sobre las inundaciones. Se trata de valorar el sentimiento y la experiencia adquiridos a lo largo de los años, los cuales ayudan a crear una percepción del riesgo. La comprensión o no de la amenaza así como el sentimiento o no de riesgo son aspectos fundamentales ya que influyen en las acciones que los elementos expuestos desarrollan en relación a un posible suceso catastrófico y, por tanto, contribuyen a moderar o acentuar su vulnerabilidad (*Chardon, 1997*).

El resto de preguntas van encaminadas a determinar las características de vulnerabilidad estructurales, es decir aquéllas que minimizan o maximizan el impacto de la inundación, bien por las propias características del inmueble, bien por actuaciones de prevención, de defensa durante el suceso o como ayudas postcatástrofe.

Los datos han sido asociados a cada establecimiento comercial previamente georeferenciado y procesados con la ayuda del Sistema de Información Geográfica, ArcView.

Metodología: cálculo del riesgo de daños

Para calcular el riesgo de sufrir daños por inundación del río Onyar para cada uno de los comercios analizados se han contemplado 10 variables diferentes que han servido para aplicar la expresión matemática expuesta en el apartado anterior. Recordemos, que el riesgo depende de la *Exposición*, la *Peligrosidad*, y la *Vulnerabilidad*. El primero de estos factores ha sido implícitamente aplicado en el momento de discriminar los elementos localizados en el área inundable (*Exposición* = 1) respecto a los que se situaban fuera (*Exposición* = 0, es decir un riesgo nulo), a partir de los mapas de áreas inundables y la localización de los establecimientos comerciales.

La *Peligrosidad* se ha limitado a la frecuencia de la inundación para cada área con dos valores posibles: período de retorno de 50 años = +1; período de retorno de 25 años = +2. El cálculo de la peligrosidad podría enriquecerse enormemente considerando la velocidad del agua, la profundidad, la carga de transporte, etc., pero este tipo de información no está disponible ni para el área de estudio, ni a la escala de detalle que requeriría esta investigación. Estudios posteriores permitirán, sin duda, perfeccionar el cálculo del riesgo en este sentido.

La Vulnerabilidad se ha calculado a partir de la suma de las tres variables referidas a la percepción (extraídas de las preguntas 1, 2 y 6) y de las seis variables referidas a la vulnerabilidad estructural (extraídas de las preguntas 5, 7, 8, 9 y 10, y del IAE). Por lo que respecta al IAE, se han separado las agrupaciones en dos conjuntos: aquéllas, cuya mercancía a la venta podría ser parcialmente recuperada, y aquéllas absolutamente irrecuperables en caso de entrar

en contacto con el agua. Cada una de estas seis últimas variables presentan un valor +1, cuando no influye o mejora el riesgo, y un valor +2 (incremento de la vulnerabilidad), cuando esa variable aumenta el riesgo de sufrir daños. El valor total de la vulnerabilidad estructural se ha obtenido a partir de la suma de los valores de estas seis variables, siendo +6 el valor mínimo y +12 el valor máximo.

Tal como se ha dicho, a partir de las preguntas 1, 2 y 6 se ha caracterizado la percepción, entendida como un componente de la vulnerabilidad. En este caso, los valores mínimo y máximo, que puede alcanzar cada variable, son de -1 a +1, respectivamente. Aquí los valores negativos representan una buena percepción del riesgo (ayudan a disminuir el valor total de vulnerabilidad) y los valores positivos, una mala percepción (incrementan la vulnerabilidad). El valor total de la percepción se ha obtenido a partir de la suma de los valores de estas tres variables, siendo -3 el valor máximo y +3 el mínimo. Estas tres variables de percepción pueden modificar en un 25%, en sentido positivo o negativo, el valor máximo de la vulnerabilidad estructural. El valor total de *Vulnerabilidad* se ha obtenido a partir de la suma del valor de la vulnerabilidad estructural y del valor de la percepción, pudiendo fluctuar entre 3 y 15 para cada establecimiento.

Las preguntas 3, 4 y 11 no se han incluido en el cálculo del riesgo. Las dos primeras, porque no se han considerado variables, que aporten información para el cálculo del riesgo final, y se han reservado para análisis complementarios, y la última por el gran número de respuestas en blanco que ha proporcionado.

El valor final de riesgo de daños por inundación para cada establecimiento (de un mínimo de 3 a un máximo de 30) se ha obtenido a partir del producto del valor total de *Peligrosidad* y el valor total de *Vulnerabilidad*. Los valores del conjunto de los comercios han sido distribuidos en tres intervalos regulares correspondientes a las categorías de riesgo bajo, medio y alto, respectivamente. Para complementar el análisis de los resultados, idéntico procedimiento se ha aplicado al conjunto de los valores totales de *Vulnerabilidad,* así como también a la vulnerabilidad estructural y a la percepción, desagregadamente.

RESULTADOS

El primer resultado no, por obvio, es menos importante y es que 590 establecimientos comerciales de Girona, correspondientes a la división del IAE “1.6 Comercio, restaurantes y hospedaje. Reparaciones” (exceptuando bares, hoteles, hostales y similares) se encuentran en una área inundable con un período de retorno de 25 o 50 años y tienen el local a nivel de la calle, o sea son susceptibles de ser afectados por una inundación. Esto representa casi una cuarta parte de los registros para las mismas agrupaciones del IAE de todo el municipio de Girona. De los 568 comercios analizados, 462 (81,3 %) se localizan en la zona con un período de retorno de 25 años y 106 (18,7%) lo hacen con un período de retorno de 50 años.

Según los datos analizados, 255 establecimientos (44,9%) poseen un riesgo alto de sufrir daños por una inundación del río Onyar; 236 (41,5%) un riesgo medio y solamente 77 (13,6%) un riesgo bajo. Es decir, casi un 87% de los comercios del área de estudio presentan un riesgo medio o alto de sufrir daños. Se ha elaborado un mapa con esta información, en el que cada

comercio se representa como un punto coloreado según el nivel de riesgo. Se aprecia en este mapa una clara distribución del riesgo asociada a los diferentes períodos de retorno. Este hecho es lógico y incluso previsible teniendo en cuenta que la *Peligrosidad*, en nuestro caso identificada con el período de retorno, actúa como multiplicador de la *Vulnerabilidad*. En aquellos establecimientos situados en el área con período de retorno de 25 años, el valor de *Vulnerabilidad* queda duplicado por este factor. Concretamente, en el área con un período de retorno de 25 años, son 255 los comercios que presentan un valor de riesgo alto mientras que no hay ninguno en el área con un período de retorno de 50.

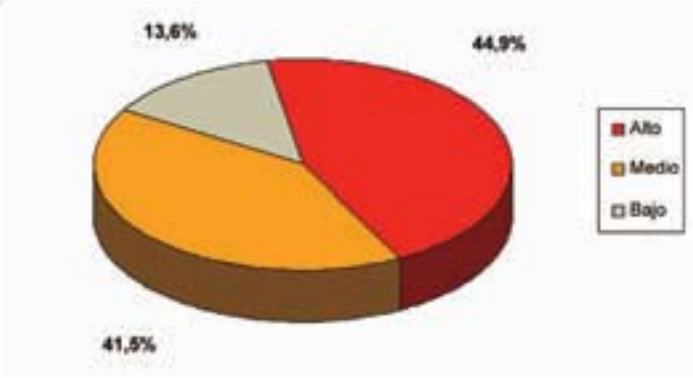


Figura 2. Porcentaje de establecimientos según el riesgo de sufrir daños por inundación.

Figura 3. Mapa de riesgo de los establecimientos comerciales (detalle) (Anexo figuras, color).

Es posible analizar la *Vulnerabilidad,* independientemente de la *Peligrosidad,* para apreciar si se reproduce para aquel factor también una distribución espacial relacionada con los períodos de retorno. Para ello, se ha elaborado un mapa donde los puntos se representan también en tres colores según el nivel de vulnerabilidad de los establecimientos. Son 286 (50,3%) los comercios con un nivel de vulnerabilidad alto; 261 (46,0%) con un nivel medio; y solamente 21 (3,7%) con un nivel bajo. Los mismos datos desagregados por períodos de retorno demuestran, y no es de extrañar, una lógica propia al margen de la dinámica del fenómeno físico. Esto se puede apreciar, por ejemplo, en el hecho de que el número de establecimientos con una vulnerabilidad alta es menor en el área con un período de retorno de 25 años (49%) que en la de 50 años (57%). Se aprecia en el mapa de vulnerabilidad una distribución más o menos regular de los valores.

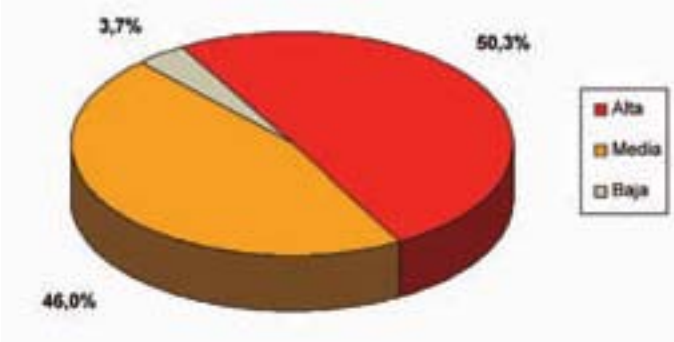


Figura 4. Porcentaje de establecimientos según el nivel de vulnerabilidad.

Figura 5. Mapa de vulnerabilidad de los establecimientos comerciales (detalle).

Finalmente, se ha confeccionado también un tercer mapa de riesgo de daños pero que presenta la peculiaridad de ofrecer los valores de vulnerabilidad estructural y percepción desagregadamente. La *Peligrosidad* sigue representada en las áreas correspondientes a los dos períodos de retorno. Se trata de un mapa de lectura más difícil, pero interesante, para visualizar el comportamiento paralelo de estos dos factores y donde el color de cada elemento representa la vulnerabilidad estructural y su forma la percepción. Se aprecia en el mapa un predominio claro de los valores medios de la vulnerabilidad estructural (70,6%) así como una mayoría de los valores de mala percepción (45,1%).

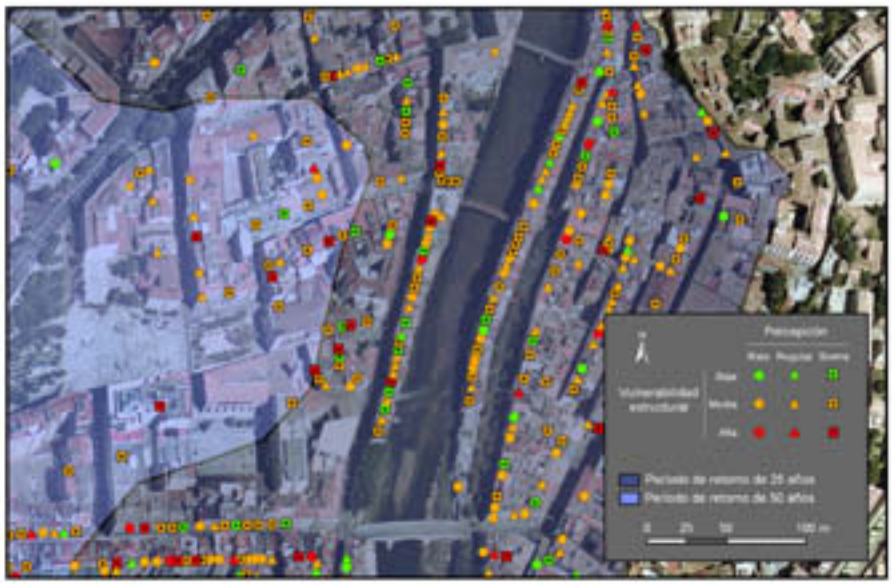


Figura 6. Mapa de vulnerabilidad estructural y percepción de los establecimientos comerciales (detalle).

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran que, según el análisis desarrollado, los establecimientos comerciales de la ciudad de Girona, que ocupan las áreas inundables correspondientes a los períodos de retorno de 25 y 50 años, presentan un riesgo elevado en caso de inundación: un 44,9% un riesgo alto y casi un 87% medio o alto. Además, la mitad de los establecimientos posee un nivel alto de vulnerabilidad y un 96,4% un nivel medio o alto.

El sector comercial de Girona ha sufrido una gran transformación en los últimos decenios: por una parte una gran expansión de establecimientos y de actividad; por la otra, una pérdida de la memoria histórica que ha afectado a la conciencia de riesgo y, en consecuencia, a la adaptación. Por ello, aunque la variable física, la inundación, se ha mantenido imperturbable hasta nuestros días, el riesgo de daños se ha incrementado, debido a estos cambios en la variable

humana, es decir el comercio de la ciudad. Esta afirmación se basa en la gran volatilidad que presenta el sector, ya que, para el área de estudio, el censo del IAE de 2002 había sufrido en menos de un año la desaparición de 140 licencias y la aparición de 91 más. Además, el 75% de los establecimientos no disponen de una experiencia sólida, puesto que no conocieron la última gran inundación que vivió la ciudad, ya que abrieron sus puertas después de 1970 y más de un 25% de los comercios lo hizo tan sólo en los últimos 5 años. De hecho, casi un 60% declara no haber vivido ni una sola inundación en la ciudad. Por ello, no es de extrañar que más del 95% de los establecimientos confiesa no disponer de ningún sistema para evitar la entrada del agua.

Son muy significativos los resultados de la pregunta 2 (¿Cree que en un futuro se producirán inundaciones que puedan afectar a su establecimiento?) puesto que más de la mitad de los encuestados ha contestado negativamente y cerca de un 75% cree que no o lo desconoce. En cambio, cuando se interroga sobre la valoración de un posible impacto de una inundación en el establecimiento encuestado (pregunta 3), más del 70% considera que sería alto o muy alto. Además, casi el 80% de los establecimientos es de estructura familiar, es decir, mucho más vulnerable a las pérdidas potenciales de una inundación que una gran cadena comercial.

Todo ello parece dibujar un perfil de establecimiento poco adaptado y propenso al impacto negativo de un desbordamiento del río Onyar, en consonancia con los valores de riesgo y vulnerabilidad obtenidos. La cuestión central aquí es si los beneficios obtenidos en las zonas inundables compensan las pérdidas periódicas ocasionadas por las inundaciones. En todo caso, una primera actuación es diagnosticar los niveles de vulnerabilidad, para seguidamente mejorarla con las actuaciones que se consideren oportunas. Un ejemplo de ello sería difundir la conveniencia de contar con una póliza de seguro contra inundaciones (casi un 77% de los establecimientos encuestados declara no disponer o no saber si dispone de una póliza de este tipo).

Este estudio, en definitiva, pretende avanzar en la comprensión de la vulnerabilidad y ensaya su incorporación efectiva en el análisis del riesgo, para ayudar al desarrollo de una metodología integrada y a la creación de una cartografía, que superen la identificación del riesgo con la mera expresión del fenómeno físico y responda a las necesidades actuales. Sin duda alguna, éste es un reto para mejorar la gestión del riesgo de inundación en un futuro.

REFERENCIAS

Ayala-Carcedo, F. J. (2002): Introducción al análisis y gestión de riesgos. En Ayala-Carcedo, F. J. y Olcina, J. (Coords.), *Riesgos Naturales*, Ariel Ciencia, Barcelona, pp. 133-145.

Ayuntamiento de Girona (1994): *Pla Especial d'Emergència d'Inundacions de Girona.*

Ayuntamiento de Girona (2002): *Revisió de la delimitació de la zona inundable del Barri Vell, E/1:500.*

Ayuntamiento de Girona (2003): *Base topográfica digital del municipio de Girona, E/1:500.*

Institut Cartogràfic de Catalunya (2002): *Ortofotomapa de Catalunya, E/1:5000, hojas 305-097 y 305-098.*

Blaikie, P, et al. (1994): *At risk. Natural hazards, people's vulnerability and disasters*, Chapman & Hall, London, pp. 1-71.

Chardon, A. C. (1997): "La percepción del riesgo y los factores socioculturales de vulnerabilidad". *Desastres y sociedad,* Vol. 18, pp. 3-34.

Calvo, F. (2001): *Sociedades y territorios en riesgo*, Ediciones del Serbal, Barcelona.

Díez Herrero, A. (2002): "Utilización de los SIGs en el análisis del riesgo de inundación en el Alto Alberche (cuenca del Tajo)". En Laín Huerta, L. (Ed.), *Los Sistemas de Información Geográfica en los riesgos naturales y el medio ambiente*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 49-68.

Díez Herrero, A. y Pujades Ferrer, J. (2002): "Los mapas de riesgos de inundaciones". En Ayala-Carcedo, F. J. y Olcina, J. (Coords.), *Riesgos Naturales*, Ariel Ciencia, Barcelona, pp. 997-1012.

Ribas, A. (1994): *Natura, societat i calamitat. Una aproximació a les inundacions històriques de la ciutat de Girona*, tesis doctoral, Universitat de Girona, pp. 318-320.

Ribas Palom, A.; Ribera Masgrau, L. y Saurí Pujol, D. (2001): "Flood mapping in Catalonia: a preliminary analysis of vulnerability for the city of Girona", *Colloque International Risques et Territoires, 16-18 de mayo, ENTPE*, Vaulx-en-Velin, Francia.

Evaluación de métodos de composición multitemporal para la cartografía de área quemada con imágenes Terra-MODIS

I. Gómez Nieto [1], P. Martín Isabel [1], E. Chuvieco Salinero [2] y G. Ventura Parra [2]

(1) Departamento de Geografía, Instituto de Economía y Geografía, CSIC, C/ Pinar 25, 28006, Madrid.
(2) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, C/ Colegios 2, 28801, Alcalá de Henares.

RESUMEN

Las imágenes diarias resultan adecuadas para la discriminación de áreas quemadas en la medida en que presentan un buen contraste espectral entre las zonas afectadas y la vegetación circundante. Sin embargo estas imágenes presentan frecuentemente diversos artefactos (nubes, sombras, problemas de recepción), así como deficiencias geométricas que dificultan su interpretación. Los métodos de composición multitemporal solucionan o, al menos, atenúan estos problemas, por lo que, en principio, parecen más efectivos para este tipo de aplicaciones. En el presente trabajo hemos elaborado a partir de imágenes MODIS nueve compuestos multitemporales atendiendo a diversos criterios, con el propósito de evaluar su idoneidad para producir cartografía de área quemada. La calidad de los diversos compuestos se ha verificado utilizando cuatro criterios: separabilidad espectral entre zonas quemadas y otras cubiertas de la imagen, coherencia espacial, presencia de artefactos y ángulo cenital del sensor. En el estudio comparativo incluimos, además, el compuesto multitemporal de ocho días elaborado por la NASA, distribuido a través de su servidor de productos MODIS.

***Palabras Clave**: Área quemada, composición multitemporal, MODIS.*

ABSTRACT

Daily images are suitable for burnt area discriminability because of their high contrast between affected areas and vegetation around; however, frequently remain different artefacts

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

(clouds, shadows, reception problems) and geometry deficiencies which hinder a right interpretation. Multitemporal composite methods solve or, at least, minimize these problems, so become more effective for these applications. In this work we have produced nine different composites generated from MODIS daily images with different criteria, and analyse their aptitude for burnt land mapping. Multitemporal composites´ quality has been verified using four criteria: spectral separability between burnt and non-burn areas, spatial coherence, artefacts and sensor zenith angle. We have also analysed the NASA 8-day composite downloaded from MODIS data server.

***Key Words**: Burnt land mapping, multitemporal composite, MODIS*

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen uno de los factores de alteración de la cubierta vegetal más importantes en el ámbito mediterráneo, con importantes consecuencias sobre elementos tales como la vegetación, atmósfera y suelos. De su frecuencia, intensidad y extensión dependerán en buena medida sus efectos, por lo que resulta esencial conseguir analizar con precisión estos factores. La Teledetección se ha convertido en una herramienta frecuente en el análisis de los incendios forestales; la facilidad de obtener imágenes de diferentes resoluciones (temporal, espacial y espectral) la hace adecuada para este tipo de estudios.

De este modo, se han venido desarrollando toda un serie de técnicas encaminadas a detectar la superficie quemada, discriminándola de aquella parte de la superficie no afectada por el fuego. Desde el simple análisis visual, como punto de partida, se han ido aportando diferentes soluciones con distintos grados de complejidad: aplicación de umbrales simples y compuestos sobre bandas e índices, métodos de clasificación supervisada y no supervisada, redes neuronales, análisis de regresión, etc.

Los datos proporcionados por los satélites pueden ser una herramienta muy útil para elaborar la cartografía de áreas forestales recientemente quemadas (*Patterson y Yool*, 1998) a una escala regional y/o local. A nivel regional, la mayoría de los estudios se han apoyado en imágenes de baja resolución, siendo las proporcionadas por el sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), a bordo del satélite NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration Satellite*), las que se han convertido en la base de la mayoría de los trabajos realizados hasta el momento (*Kasischke et al.*, 1993; *Cahoon et al.*, 1994; *Illera et al.*, 1995a; *Dasischke y French*, 1995; *Fernández et al.*,1997; *Martín*, 1998; *Martín y Chuvieco*, 1998).

No obstante, tras el lanzamiento en diciembre de 1999 del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), instalado sobre la plataforma *Terra*, se ha puesto a disposición de la comunidad científica un nuevo conjunto de imágenes que presentan características mejoradas frente a NOAA-AVHRR, tanto en lo que se refiere a resolución espacial,

como espectral y radiométrica. Entre las mejoras destacan un incremento del número de bandas espectrales y de la región del espectro en el que operan (desde el visible hasta el térmico, con un total de 36 bandas), una mejora de la resolución espacial en las bandas del visible e infrarrojo cercano (250 y 500 metros, respectivamente), y una distribución totalmente gratuita a través de diversos servidores (la información necesaria para este trabajo se obtuvo en: *http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/*). Como aspecto negativo podría señalarse el menor número de imágenes diarias disponibles respecto a NOAA-AVHRR (reduciéndose en el ámbito mediterráneo a una imagen diaria). Sin embargo, en el año 2002 se puso en órbita el satélite *Aqua*, que cuenta con otro sensor MODIS de idénticas características a las de su homónimo lanzado en 1999, y que toma otra imagen del mismo ámbito tres horas después que *Terra*.

Cuando se aborda la elaboración de cartografía de área quemada puede hacerse utilizando imágenes unitemporales o multitemporales, es decir, imágenes diarias, que tendrán un elevado contraste entre zonas quemadas y no quemadas, al poder trabajar con escenas muy cercanas al momento de producirse el incendio; o compuestos de varios días, que aportarán una mayor consistencia radiométrica, aunque, presumiblemente, menor contraste espectral (*Martín,* 1998).

Uno de los principales problemas que tiene que afrontar la cartografía de incendios es la existencia de imágenes diarias que no presentan las características adecuadas para su análisis e interpretación. La presencia de artefactos, nubes y sombras de nubes principalmente, y los problemas ligados a una geometría deficiente, hacen necesario elaborar productos derivados de imágenes diarias que solventen estos inconvenientes.

Dichos compuestos son imágenes que retienen, en función de una serie de criterios establecidos previamente, aquellos *pixels* con mejores condiciones radiométricas y geométricas de una serie de imágenes diarias.

En la presente comunicación se analizan diversos métodos para la obtención de compuestos multitemporales a partir de imágenes *Terra*-MODIS. Además del tradicional MVC (*Maximum Value Composite*), basado en la selección de los *pixels* con mayor valor en el NDVI (*Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*), se proponen otros 8 métodos y se estudia su adecuación para la cartografía de área quemada.

OBJETIVOS

El principal objetivo que pretende el siguiente estudio es determinar la idoneidad de una serie de compuestos multitemporales, para ser usados como base en la discriminación de superficies quemadas a una escala regional, a partir de imágenes *Terra*-MODIS.

Adicionalmente, se incluirá en el análisis el compuesto de ocho días elaborado por el programa EOS (*Earth Observing System*), de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) cuya denominación es: *MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V004 (MOD09A1)*. Más información sobre este producto se puede consultar en: *http://edcdaac.usgs.gov/modis/dataproducts.asp*

DATOS DE PARTIDA

Se han utilizado imágenes procedentes del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), lanzado al espacio en la plataforma *Terra* el 18 de diciembre de 1999. Este sensor capta escenas de 2330 Km de ancho, tomando imágenes del mismo lugar cada uno o dos días, dependiendo de la latitud (una diaria en el caso de la Península Ibérica). Adquiere información en 36 bandas del espectro electromagnético, que van de los 405 hasta los 14385 nm, por lo que es muy adecuado para estudiar los cambios globales sufridos por la biosfera.

El programa EOS elabora a partir de las mediciones de MODIS un total de 44 productos estándar diferentes, que se ofrecen gratuitamente en Internet a través de diversos servidores, como por ejemplo: *http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome.*

Los tres productos que se han utilizado en este trabajo son:

- *MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 500m SIN Grid V004*. Contiene mediciones diarias de la reflectividad de la superficie en 7 bandas, desde los 459 nm hasta los 2155 nm, además de otros canales adicionales con información sobre la calidad de los datos registrados, la órbita, la cobertura y el número de observaciones.
- *MODIS/Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily L3 Global 1Km SIN Grid V004.* Proporciona valores diarios de temperatura superficial (diurna y nocturna) y emisividad en grados Kelvin, así como información sobre la calidad y características de adquisición (hora y ángulo cenital de observación).
- *MODIS/Terra Geolocation Angles Daily L2G Global 1km Sin Grid Day V004.* Ofrece información sobre los ángulos, cenital y azimutal, solar y del sensor en el momento de realizar cada medición.

Además se utilizó, como acabamos de mencionar, el producto *MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V004,* elaborado a partir de las mediciones de reflectividad en 7 bandas para una serie temporal de 8 días.

La plataforma *Terra* lleva a bordo un completo equipo de sistemas de calibración, que proporcionan una corrección espectral, radiométrica y geométrica de los datos captados por el sensor MODIS.

Los datos utilizados en este estudio corresponden a la versión 4 de los productos facilitados por NASA; son datos validados, adecuados para su utilización en proyectos científicos.

METODOLOGÍA

Antes de iniciar el procesamiento de las imágenes MODIS es necesario llevar a cabo sobre ellas una serie de operaciones previas.

El primer paso, una vez descargadas las imágenes desde el servidor de NASA, es el cambio de formato, desde el .hdf (un tipo de formato estándar de intercambio de información utilizado por NASA) hasta el .pix (propio del software *PCI Geomatica V8.2* que se ha utilizado para el tratamiento de las imágenes).

Los productos que NASA facilita a través de su servidor tienen, habitualmente, un tamaño inferior al de la escena completa de MODIS para reducir su volumen, facilitando el acceso directo a la información. De esta forma, son necesarias cuatro imágenes MODIS para cubrir toda la superficie de la Península Ibérica. Por esta razón fue preciso elaborar un mosaico con dichas imágenes, reproyectándose posteriormente la imagen completa (que abarca toda la Península Ibérica) a la proyección UTM 30T D050, con un tamaño de píxel de 500 m, utilizando el método de remuestreo del vecino más próximo.

Por último, fusionamos en un único archivo aquellas bandas de los tres productos originales que nos interesaban en el estudio. Para ello fue preciso remuestrear las bandas de temperatura y ángulos, dado que presentaban distintos tamaños de píxel que las bandas reflectivas. Las bandas seleccionadas y fusionadas en un único archivo de imagen .pix aparecen recogidas en el cuadro 1 (la banda número 13 es el resultado del cálculo del *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*).

Como se ha señalado, en la discriminación entre *pixels* quemados y no quemados, las imágenes diarias presentan con frecuencia artefactos, como nubes y sombras de nubes, una geometría deficiente, y otros inconvenientes que merman su calidad. Por este motivo se han venido aplicando los compuestos multitemporales de acuerdo a diferentes criterios.

Tradicionalmente la técnica más usada ha sido la del *Maximum Value Composite* (MVC), basada en la selección de los máximos valores del índice de vegetación NDVI de una serie de imágenes diarias.

Cuadro 1. Bandas utilizadas en el trabajo.

Banda 1	Banda 1 de MOD09	620-670 nm
Banda 2	Banda 2 de MOD09	841-876 nm
Banda 3	Banda 3 de MOD09	459-479 nm
Banda 4	Banda 4 de MOD09	545-565 nm
Banda 5	Banda 5 de MOD09	1230-1250 nm
Banda 6	Banda 6 de MOD09	1628-1652 nm
Banda 7	Banda 7 de MOD09	2105-2155 nm
Banda 8	Banda 1 de MOD11A1	Temperatura diaria de la superficie terrestre
Banda 9	Banda 1 de MODMGGA	Azimut solar
Banda 10	Banda 2 de MODMGGA	Cenit solar
Banda 11	Banda 3 de MODMGGA	Azimut sensor
Banda 12	Banda 4 de MODMGGA	Cenit sensor
Banda 13	NDVI	NDVI

Otras propuestas han llevado a utilizar el *Minimum Value Composite* de los canales 1 o 2 del citado sensor (*Chilar et al.*, 1994; *Qui y Kerr*, 1994; *Barbosa et al.,* 1998), por presentar las superficies recién afectadas por un incendio valores muy bajos en ambos canales. No obstante,

este criterio puede provocar confusiones con sombras de nubes, pues éstas también presentan valores muy bajos de albedo similares a los que presentan las zonas quemadas. Para evitar este problema se ha usado el MVC del canal 4 de NOAA-AVHRR (*Chilar et al.,* 1994; *Qui y Kerr*, 1994; *Martín*, 1998), correspondiente a la temperatura de brillo, dado que una superficie recientemente quemada ofrece unos valores de temperatura superiores a su entorno, al mismo tiempo que evita la captura de nubes y sombras, con valores de temperatura más bajos (*López y Caselles*, 1991; *Pereira y Setzer*, 1993) que las zonas despejadas.

Por otro lado, cuanto más cercana al cenit sea la adquisición de la imagen, menores efectos angulares y atmosféricos presentará (*Van Leeuwen et al.*, 1999), por lo que otro de los métodos diseñados recogerá los valores del conjunto multitemporal para aquellos *pixels* que presenten el ángulo cenital del sensor más alto. De igual modo, a ángulos solares más bajos el efecto de sombras es más evidente (*Chuvieco, 2002)*, lo que tratará de evitarse con otro compuesto.

Con estos precedentes metodológicos y algunas experiencias de radiometría en campo, nos proponemos analizar el comportamiento de un total de nueve métodos de composición multitemporal:

1. Mínimo de la banda 1 (MinB1)
2. Mínimo de la banda 2 (MinB2)
3. Máximo de la temperatura de superficie diurna (MaxTs)
4. Mínimo del ángulo cenital solar (MinACS)
5. Máximo del NDVI (MaxNDVI)
6. Valor mínimo del ángulo cenital del sensor para los tres máximos de temperatura de superficie de la banda 8 (MinAZMaxTs)
7. Valor mínimo de la banda 2 para los tres máximos de temperatura de superficie de la banda 8 (MinB2MaxTs)
8. Valor máximo de temperatura de superficie de la banda 8 para los tres mínimos de la banda 2 (MaxTsMinB2)
9. Valor máximo de temperatura de superficie de la banda 8 para los tres mínimos de la banda 1 (MaxTsMinB1)

Para la selección de la serie diaria con la que producir los compuestos se optó por la segunda quincena de agosto de 2001, por ser un mes en plena temporada de incendios y contar con datos fiables para su validación. Antes de elaborar el compuesto se realizó un primer análisis visual de las imágenes descartándose aquéllas que presentaban mayores problemas, principalmente gran número de artefactos (nubes y sombras de nubes) y defectos en la adquisición (líneas perdidas, imágenes incompletas, etc.). Finalmente, la serie estuvo integrada por las imágenes de los días 21-22-23-24-27-28-30-31 de agosto de 2001.

Los nueve compuestos multitemporales se elaboraron a través de tres rutinas diferentes creadas *ad hoc* para este tipo de productos, e implementadas en el módulo Xpace del programa PCI Geomatica V8.2 (*Bastarrika,* 2000).

Para evaluar la idoneidad de cada uno de estos métodos de composición multitemporal en la cartografía de área quemada, se han utilizado cuatro criterios aplicados anteriormente para imágenes NOAA-AVHRR (*Ventura*, 2003):

Criterio I. Capacidad para discriminar entre áreas quemadas y no quemadas

Con el fin evaluar la capacidad de discriminación entre áreas quemadas y otro tipo de coberturas (las más representativas en la Península), en cada uno de los compuestos se extrajeron los valores de reflectividad de 2176 *píxels* (los mismos para todos los compuestos), que incluían tanto áreas recientemente quemadas como diversos tipos de ocupación del suelo. El listado de categorías y número de puntos muestreados en cada una de ellas es el siguiente:

1. Áreas quemadas, 97.
2. Áreas no quemadas, 160.
3. Terrenos regados permanentemente, 157.
4. Viñedos, 179.
5. Olivares, 125.
6. Pastizales naturales, 155.
7. Tierras de labor en secano, 161.
8. Terrenos fundamentalmente agrícolas con vegetación natural, 137.
9. Bosques de coníferas, 140.
10. Bosques de frondosas, 188.
11. Tejido urbano continuo, 91.
12. Láminas de agua, 52.
13. Árboles frutales, 171.
14. Vegetación esclerófila, 118.
15. Rocas desnudas, 121.
16. Áreas de vegetación dispersa, 124.

La selección de los *pixels* de la categoría quemado se realizó usando como referencia una imagen Landsat-7 ETM+, correspondiente al día 23 de agosto de 2001 (escena 203/031), adquirida para validar los resultados del trabajo. Para identificar en la imagen los puntos de las restantes categorías de cobertura usamos el mapa CORINE *(http://reports.eea.eu.int/COR0-part1/en/land_coverPart1.pdf).*

Se puede observar en la relación anterior, que existe una categoría genérica para las áreas no quemadas, representada por 160 puntos ubicados en distintos tipos de cobertura, con la única condición de no haber sido afectados por incendios. Esta categoría "mezcla" facilitó una parte del análisis de separabilidad en el que se compararon las clases *quemado* y *no quemado* exclusivamente. Para realizar dicho análisis de separabilidad utilizamos el criterio de las distancias normalizadas (*Kaufman y Remer*, 1994):

$$D = \frac{\left|\overline{x}_1 - \overline{x}_2\right|}{s_1 + s_2}$$

donde $\overline{x}_1$ y $\overline{x}_2$ son las medias de las clases quemado y el resto de cubiertas respectivamente, y s_1 y s_2 son las desviaciones típicas de las mismas clases. La distancia D se calculó para los 7 canales reflectivos y para el canal de temperatura de superficie terrestre diurna, exceptuando al compuesto *MODIS09A1,* que no tiene información de temperaturas. Según este criterio, el

mejor compuesto sería aquel que presentara el máximo valor promedio de D, es decir, la mayor separablidad, para las áreas quemadas respecto al resto de categorías.

Criterio II. Presencia de artefactos

El objetivo en este caso, era comprobar cuál de los nueve métodos retenía el menor número de artefactos. Sobre cada una de las imágenes diarias utilizadas en la generación de los compuestos multitemporales, se localizaron un total de 44 *pixels* diseminados por la Península que correspondían a nubes y sombras de nubes. Consideramos pertinente estimar por separado la presencia de nubes y sombras de nubes, ya que sus características radiométricas difieren, así como las posibles confusiones que provocan en la cartografía de áreas quemadas.

Criterio III. Coherencia espacial

Uno de los problemas encontrados en la elaboración de compuestos multitemporales es el efecto del mosaico producido por la heterogeneidad de los *pixels* vecinos, que son el resultado de una adquisición en diferentes fechas y, por tanto, posiblemente, con ángulos de observación también diferentes. Esto ocasiona problemas a la hora de cartografiar un área quemada especialmente en la determinación de umbrales. De acuerdo con este test, el compuesto más adecuado sería aquél que minimizara la heterogeneidad espacial, preservando una mayor homogeneidad en la vecindad inmediata de los *pixels* seleccionados. Para aplicar este criterio, calculamos la textura de cada compuesto a partir de la desviación típica en una ventana móvil de $3 \cdot 3$ *pixels*, siendo el mejor compuesto el que cuente con el promedio más bajo en esa imagen de texturas.

Para verificar la variación de la textura a lo largo de la imagen, se definieron unas parcelas de verificación en forma de mapas de bits en zonas quemadas y en el resto de categorías establecidas con anterioridad. Sobre estas áreas se extrajeron datos de media y desviaciones típicas de la imagen de textura.

Criterio IV. Visión cenital

El último criterio trataba de evaluar la calidad del compuesto en términos de geometría de observación, así, cuanto más cercana sea la adquisición al cenit, menores los efectos angulares y atmosféricos (*Van Leeuwen et al.*, 1999). Por lo tanto, el mejor compuesto sería aquél que seleccionara los *pixels* con ángulos cenitales del sensor más bajos (observaciones más próximas a la vertical). Para realizar esta valoración se han usado los mismos mapas de bits que utilizamos en el análisis de coherencia espacial, extrayendo en este caso, los datos de media y desviación típica de la banda de ángulos cenitales del sensor (banda 12 de la imagen de fusión).

En definitiva, el método de composición multitemporal más adecuado en la producción de cartografía de área quemada será aquel que presente un grado de separabilidad más alto entre superficie quemada y no quemada, que retenga un menor número de artefactos, presentando una textura más homogénea y unos ángulos de observación más elevados. No obstante, el ba-

lance final de la valoración no fue la suma equiponderada del resultado de cada uno de los cuatro procesos, sino que se dio un peso mayor al primer criterio por ser el que informa realmente sobre la capacidad de discriminación entre *pixels* quemados y no quemados; mientras que el resto aportan datos sobre la calidad radiométrica y geométrica del producto final.

RESULTADOS

En un primer análisis visual de los compuestos (figura 1), estos parecen aportar una mejora cualitativa sobre las imágenes diarias, al desaparecer completamente los problemas relacionados con la falta de datos (*pixels* o líneas con valor 0) que se apreciaban en algunas imágenes diarias, y reducirse notablemente otros ligados a la existencia de artefactos (nubes y sombras de nubes principalmente) y al bandeado por causa de la yuxtaposición de escenas.

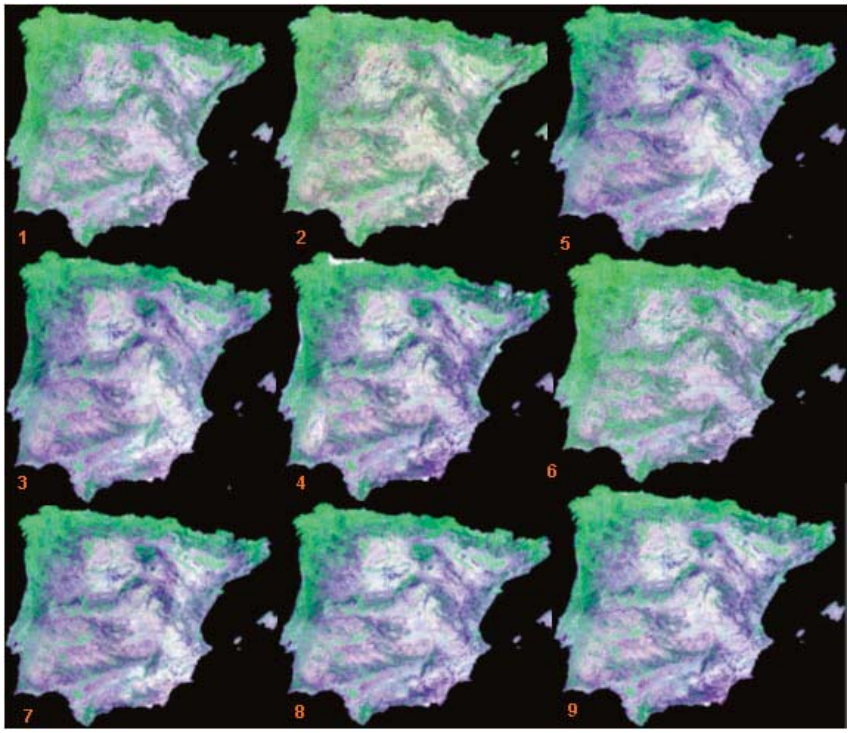


Figura 1. Composiciones en color de las bandas 1,2,3 para los compuestos MODIS: (1) MinB1, (2) MinB2, (3) MaxTs, (4) MinACS, (5) MaxNDVI, (6) MinAZMaxTs, (7) MinB2MaxTs, (8) MaxTsMinB2, (9) MaxTsMinB1 (Anexo figuras, color).

No obstante, analizando visualmente cada uno de los compuestos por separado se aprecian algunas diferencias entre ellos (figura 1).

El compuesto 6 (MinAZMaxTs) evidencia un claro contraste tonal entre el tercio oriental de la imagen y el resto, debido muy probablemente a un ángulo de observación del sensor muy distinto en cada escena; a esto se une bastante nubosidad en el sureste peninsular, y *pixels* con nubes y sombras en el centro de Portugal, costa cantábrica y pirenaica.

El compuesto 7 (MinB2MaxTs) retiene pequeñas nubes y sombras de nubes en la costa cantábrica y portuguesa, así como sobre los ejes de las principales cadenas montañosas.

Los compuestos MaxTsMinB1 y MaxTsMinB2 apenas retienen nubes presentando un aspecto muy similar al MaxTs.

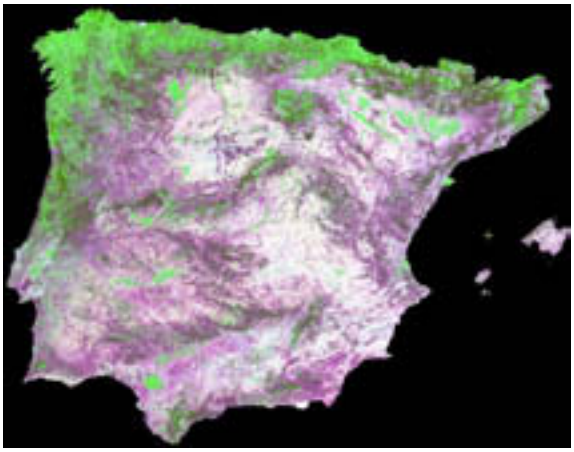


Figura 2. Compuesto Multitemporal MODIS09A1, bandas 1,2,3.

El compuesto multitemporal elaborado por la NASA (figura 2) presenta una buena calidad visual, si bien se observa algún resto de nubosidad sobre los ejes de los principales conjuntos montañosos.

En resumen, podemos decir que tras una interpretación estrictamente visual de las imágenes resultantes del proceso de composición, existen algunos métodos con importantes problemas derivados de la presencia de nubes y sombras, tal es el caso del MaxNDVI, MinB1, MinB2, MinAZMaxTs y MinACS, mientras que el resto parecen de mejor calidad a simple vista.

Habiendo identificado estos problemas visualmente, a continuación se presentan los resultados obtenidos tras aplicar los cuatro criterios de calidad descritos anteriormente.

Criterio I. Capacidad para discriminar entre áreas quemadas y no quemadas.

Evaluamos con este criterio el compuesto que presenta el mayor valor de separabilidad de áreas quemadas con respecto a otras coberturas. Es el criterio más importante, ya que, en último término, buscamos el compuesto que mejor discrimine las áreas quemadas frente al resto.

Cuadro 2. Separabilidad entre las clases quemado y no quemado.

Compuestos	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	T_s
MinB1	0.11	1.27	0.04	0.25	0.89	0.14	0.30	0.04
MinB2	0.02	1.32	0.10	0.32	0.91	0.20	0.28	0.13
MaxTs	0.17	1.77	0.06	0.35	1.30	0.25	0.40	0.94
MinACS	0.25	1.35	0.25	0.38	0.88	0.16	0.27	0.43
MaxNDVI	0.08	0.82	0.22	0.00	0.37	0.20	0.55	0.29
MinAZMaxTs	0.15	1.62	0.09	0.31	1.22	0.21	0.42	0.93
MinB2MaxTs	0.16	1.75	0.07	0.32	1.29	0.24	0.36	0.87
MaxTsMinB2	0.15	1.58	0.08	0.30	1.14	0.21	0.37	0.85
MaxTsMinB1	0.14	1.64	0.08	0.31	1.20	0.23	0.36	0.79
MODIS09A1	0.15	1.58	0.08	0.30	1.10	0.19	0.38	-

Como puede observarse en el cuadro 2, la banda que ofrece la mayor separabilidad entre las categorías *quemado* y *no quemado* es la correspondiente al infrarrojo cercano; en esta banda es el compuesto MaxTs el que presenta el valor más alto, seguido inmediatamente del MinB2MaxTs. El compuesto MODIS09A1 ocupa posiciones intermedias según bandas, pero en ningún caso llega a superar al MaxTs. El MaxNDVI posee, con diferencia, los valores más bajos.

Posteriormente, aplicamos el mismo criterio a la clase quemado frente al resto de tipos de cobertura del suelo. El resultado final puede observarse en el cuadro 3, en el que aparecen el número total de veces que un compuesto presentó la primera o segunda máxima separabilidad para cada una de las 14 categorías diferentes de cobertura del suelo contempladas.

Los compuestos multitemporales de MaxTs, MinAZMaxTs y MinB2MaxTs, han sido los que mejor resultado han obtenido. Por lo que podemos concluir que aquéllos que maximizan los valores espectrales de temperatura, bien de modo simple, bien en combinación con otro canal, presentan mayor capacidad de discriminación para las áreas quemadas.

Cuadro 3. Número de veces que cada compuesto presenta la primera o segunda máxima separabilidad.

Compuestos	Total máximas separabilidades
MinB1	0
MinB2	4
MinACS	6
MaxTs	51
MaxNDVI	9
MinB2MaxTs	43
MinAZMaxTs	50
MaxTsMinB1	17
MaxTsMinB2	27
MODIS09A1	17

Criterio II. Presencia de artefactos.

Según este criterio, analizamos el método de composición que menor número de artefactos retenga (nubes y sombras de nubes). La cubierta nubosa produce el enmascaramiento de la superficie que cubre; por otro lado, las sombras de nubes resultan de igual modo un inconveniente al presentar valores de reflectividad muy similares a los de las áreas quemadas.

Cuadro 4. Resultado del análisis de artefactos.

Compuestos	nº artefactos (nubes/sombras)	Nubes (%)	Sombras de nubes (%)
MinB1	10 (2/8)	4.55	18.18
MinB2	12 (2/10)	4.55	22.73
MaxTs	0 (0/0)	0.00	0.00
MinACS	4 (3/1)	6.82	2.27
MaxNDVI	7 (1/6)	2.27	13.64
MinAZMaxTs	0 (0/0)	0.00	0.00
MinB2MaxTs	1 (0/1)	0.00	2.27
MaxTsMinB2	0 (0/0)	0.00	0.00
MaxTsMinB1	1 (0/1)	0.00	2.27
MODIS09A1	1 (0/1)	0.00	2.27
Total artefactos	44		

Como puede observarse en el cuadro 4, tres de los compuestos no retienen ningún artefacto (MaxTs, MaxTsMinB1 y MinAZMaxTs); en el extremo opuesto encontramos el MinB1, con 12 artefactos, y el MinB1, con 10, quedando el resto entre ambos extremos.

Criterio III. Coherencia espacial

Observamos el compuesto que presenta mayor autocorrelación espacial, es decir, aquel cuyos *pixels* adyacentes muestran mayor homogeneidad.

Usaremos los datos resultantes del análisis de textura aplicado sobre cada uno de los compuestos en la banda del infrarrojo cercano (IRC), por ser la que presenta mayor separabilidad espectral entre zonas quemadas y no quemadas; por este motivo, se usa habitualmente para discriminar el área quemada y establecer niveles de daño. Para facilitar la comparación utilizamos una imagen diaria como referencia (libre de nubes y otros artefactos); en concreto la del 22 de agosto de 2001. Con el objetivo de visualizar fácilmente las diferencias se han normalizado los resultados, aplicando valor 1 a la imagen del 22 de agosto.

Cuadro 5. Datos de textura en el IRC.

COMPUESTOS	**Media aritmética valores textura**
MinB1	0.98
MinB2	0.81
MinACS	0.83
MaxTs	1.00
MaxNDVI	1.82
MinB2MaxTs	0.82
MinAZMaxTs	0.96
MaxTsMinB1	0.89
MaxTsMinB2	0.87
MODIS09A1	1.05
22 de agosto	1.00

En este caso, es el método basado en el máximo valor de la temperatura de superficie el que tiene una textura más homogénea, coincidiendo con el de la imagen diaria tomada como referencia.

Criterio IV. Visión cenital

Finalmente, medimos los ángulos de observación de cada uno de los compuestos (ángulo centital del sensor). En este caso los valores más bajos indican una observación más próxima a la vertical, la que nosotros buscamos.

Cuadro 6. Ángulo cenital del sensor.

COMPUESTOS	Ángulo (grados sexagesimales)
MinB1	33.62
MinB2	33.37
MinACS	34.72
MaxTs	16.81
MaxNDVI	43.68
MinB2MaxTs	27.93
MinAZMaxTs	29.18
MaxTsMinB1	20.97
MaxTsMinB2	20.51
MODIS09A1	31.86

Los compuestos de MaxTs, MaxTsMinB2 y MaxTsMinB1 (en este orden) son los que mejor visión cenital mostraron y, por tanto, son los que menor probabilidad tienen de ser afectados por distorsiones atmosféricas y angulares.

De este modo, teniendo en cuenta que el peso otorgado al criterio de separabilidad es el doble que el de la coherencia espacial y la visión cenital, y el cuádruplo que el de la presencia de nubes y sombras de nubes, resumimos los resultados de los cuatro criterios en el cuadro 7, donde la columna final contiene la suma ponderada, y la última fila los pesos aplicados a cada criterio.

Comprobamos que el compuesto de mayor calidad es el de MaxTs, con los valores más altos en tres de los cuatro criterios, especialmente en el apartado de separabilidad; aunque también cabe destacar que no retiene nubes, ni sombras de nubes, y que los ángulos de observación son los más próximos al cenit. A continuación, los compuestos de MaxTsMinB1 y de MaxTsMinB2, que, aunque presentan valores de textura superiores al de MaxTs, no alcanzan niveles de discriminación tan altos, además de retener sombras de nubes, en el caso del segundo de ellos.

Cuadro 7: Resumen criterios.

	Separabilidad	Nubes	Sombras nubes	Textura	Ángulo cenital sensor	Total
MinB1	29.26	95.45	81.82	79.67	37.45	264.28
MinB2	36.86	95.45	77.27	54.81	38.40	253.29
MinACS	60.71	93.18	97.73	100.00	33.36	350.23
MaxTs	78.28	100.00	100.00	63.55	100.00	420.11
MaxNDVI	36.75	97.73	86.36	9.64	0.00	175.19

MinB2MaxTs	73.33	100.00	97.73	78.22	58.63	382.37
MinAZMaxTs	70.66	100.00	100.00	73.62	53.98	368.91
MaxTsMinB1	67.06	100.00	97.73	82.44	84.54	399.96
MaxTsMinB2	65.51	100.00	100.00	72.80	86.23	390.05
MODIS09A1	50.64	100.00	97.73	77.08	44	321.22
Pesos	2.00	0.50	0.50	1.00	1.00	

En los compuestos MinB2MaxTs y MinSZMaxTs, con valores más bajos que todos los anteriores, destacan los problemas con el ángulo de observación. Por su lado, el MODIS09A1 ocupa una posición intermedia, sin mejorar los resultados de los compuestos que incorporan datos de temperatura, debido a su peor comportamiento en los criterios de separabilidad y ángulo cenital del sensor.

Se puede afirmar en este punto que, precisamente, son los compuestos que incorporan información de la banda térmica (simples, como en el caso del MaxTs; o compuestos, como en el resto) los que muestran mejores resultados.

CONCLUSIONES

Podemos concluir que el método de composición multitemporal, basado en la selección de los valores máximos de temperatura superficial diurna, es el más adecuado para ser utilizado en la producción de cartografía de área quemada, al solventar con eficacia muchos de los problemas presentes en las imágenes diarias y mantener un buen contraste espectral entre zonas quemadas y no quemadas. De igual forma, hemos comprobado que el compuesto MaxNDVI ofrece los peores resultados a pesar de que ha venido usándose con frecuencia en la discriminación de las superficies afectadas por incendios a partir de imágenes NOAA-AVHRR. No obstante, hay que indicar aquí que los pobres resultados que ofrece este compuesto se deben, en parte, a los problemas de radiometría que se han detectado en las bandas rojo e infrarrojo cercano de MODIS, en aquellas zonas correspondientes a sombras de nubes, y que influyen en la calidad final del compuesto, al presentar valores anormalmente altos de NDVI.[1] Entre ambos queda el resto de compuestos, destacando positivamente aquéllos que incorporan a su proceso de elaboración la maximización de los datos de temperatura superficial diurna. Estos resultados confirman los obtenidos por *Ventura* (2003) con imágenes NOAA-AVHRR y, por tanto, demuestran la idoneidad del método basado en la maximización de la temperatura para la generación de los compuestos multitemporales aplicados a la cartografía de incendios a escala regional. La sencillez del método lo hace especialmente idóneo de cara a su aplicación operativa.

[1] Este problema se ha identificado en los productos *MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 500m SIN Grid V004* y está en fase de investigación.

REFERENCIAS

Barbosa, P.M., Pereira, J.M.C. y Grégoire, J.M. (1998): "Compositing criteria for burned area assessment using multitemporal low resolution satellite data". *Remote Sensing of Environment*, 65, pp. 38-49.

Bastarrika, A. (2000): *Desarrollo de rutinas de pre-procesamiento de imágenes AVHRR*. Proyecto fin de carrera. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares. 106 pp.

Cahoon, D.R., Stocks, B.J., Levine, J.S., Cofer, W.R. y Pierson, J.M. (1994): "Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in Northern China and Southeastern Siberia". *Journal of Geophysical Research*, 9, pp. 18627-18638

Cihlar, J., Manak, D., and Voisin, N. (1994): "AVHRR bi-directional reflectance effects and compositing". *Remote Sensing of Environment*, 48, pp. 77-88.

Fernández, A., Illera, P., and Casanova, J. L. (1997): "Automatic mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR-NDVI composite image data". *Remote Sensing of Environment*, 60, 153-162.

Holben, B.N. (1986). "Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data". *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1417-1434.

Illera, P., Fernández, A., and Delgado, J. A. (1995): "FIRE monitoring in Spain using NOAA thermal data and NDVI". In *Sensors and Environmental Applications of Remote Sensing*, edited by J. Askne (Rotterdam: Balkema), pp. 377-383.

Kasischke, E. S., and French, N. H. F. (1995): "Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forest using multiple-season AVHRR-NDVI composite data". *Journal of Remote Sensing Environment*, 45, pp. 61-71.

Kasischke, E.S. et al. (1993): "Monitoring of wildfires in Boreal Forests using large area AVHRR NDVI composite image data". *Remote Sensing of Environment*, 45, pp. 61-71.

Kaufman, Y. (1989): "The atmospheric effect on remote sensing and its correction". En *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (Asrar, G., (Ed.)) Wiley. New York. pp. 336-428.

Kaufman, Y.J. y Remer, L.A. (1994): "Detection of forests using Mid-IR reflectance: an application for aerosol studies". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 32 (3)*: 672-683.

López García, M.J. y Caselles, V. (1991): "Mapping Burns and Natural Reforestation Using Thematic Mapper Data". *Geocarto International*,1, pp. 31-37.

Martín, M.P. y Chuvieco, E. (1998): "Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR". *Serie Geográfica*, 7, pp. 109-128.

Martín, M.P. (1998): *Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR*. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares.

Patterson, M.W. y Yool, S.R. (1998): "Mapping Fire-Induced Vegetation Mortality Using Landsat Thematic Mapper Data: A Comparison of Linear Transformation Techniques". *Remote Sensing of Environment*, 65, pp. 132-142.

Pereira, M. C., and Setzer, A. W. (1993a). "Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA-AVHRR images". *International Journal of Remote Sensing*, 14, pp. 583-597.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, R., Kerr, Y. H., Sorooshian, S. (1994). "A modified soil adjusted vegetation index". Remote Sensing of Environment, 47, pp. 1-25.

Van Leeuwen, W.J.D., Huete, A.R. y Laing, T.W. (1999): "MODIS Vegetation Index Compositing approach: a prototype with AVHRR data". *Remote Sensing of Environment*, 69, pp. 264-280.

Ventura, G. (2003): *Detección y cartografía de incendios forestales en España mediante imágenes*

NOAA-AVHRR. Trabajo de Investigación Tutelado, Universidad de Alcalá de Henares, Alcalá de Henares, 116 pp.

http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/

http://reports.eea.eu.int/COR0-part1/en/land_coverPart1.pdf

http://edcdaac.usgs.gov/modis/dataproducts.asp

Índice de riesgo de incendio forestal a través de datos de satélite con relación a condiciones meteorológicas previas

J. A. Valiente, M. J. Estrela y M. J. Barberá

Fundación CEAM (Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo), C/ Charles R. Darwin, 14, Parque Tecnológico, 46980 Paterna, Valencia.

RESUMEN

El estado hídrico de la cubierta forestal es un factor clave en la elaboración de índices de riesgo de incendio, puesto que determina en gran medida la composición y el estado del combustible vegetal. Este estado viene caracterizado tanto por el contenido en agua de la vegetación como por el estrés hídrico de la misma, y es durante el período estival cuando más necesario se hace su conocimiento en el análisis de riesgo de incendios forestales. Con esta finalidad, se han analizado diferentes índices de vegetación a partir de datos procedentes de los satélites NOAA para el período comprendido entre marzo y septiembre del 2003 sobre una selección de superficies forestales arboladas de la Comunidad Valenciana. Los índices de vegetación que se consideran en el estudio son el Índice Global del Contenido en Agua de la Vegetación (GVMI), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la Temperatura Superficial (ST) de la cubierta forestal. Los dos últimos índices son fácilmente calculables mediante el uso de datos procedentes del sensor AVHRR a bordo de los satélites NOAA. Sin embargo, el primer índice necesita de una adaptación a las bandas espectrales del sensor AVHRR, haciendo uso del nuevo canal en la región del infrarrojo cercano entorno a 1.6 μm que ya incorporan los satélites NOAA-16 y -17. El período estival seleccionado corresponde al año 2003, época en la que se registró una de las más importantes olas de calor de forma generalizada. En este estudio preliminar se pone de manifiesto que, en superficies forestales densamente arboladas, el contenido en agua de la vegetación se mantiene prácticamente constante o sufre mínimas disminuciones, pese al período estival analizado, no así es el caso del estrés hí-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

drico calculado a través de la Temperatura Superficial y que muestra fuertes variaciones durante este período.

***Palabras Clave**: datos de satélite, índice de vegetación, incendio forestal, NOAA-AVHRR, condiciones meteorológicas, Comunidad Valenciana.*

ABSTRACT

The moisture status of the forest canopy is a determining parameter in the outline of a fire risk index since it largely determines conditions and composition of vegetation fuel. This state is characterised by both plant water content and water stress, and it is during the summer period when a good knowledge of these parameters is needed in order to produce an appropriate forest fire risk index. Within this scope, several vegetation indices have been calculated from AVHRR data of the 2003 march-September period for a selection of dense forest areas that belong to the Valencian Region of Spain. The vegetation indices that were considered for this study are the Global Vegetation Moisture Index, GVMI, the Normalised Differential Vegetation Index, NDVI, and the Canopy Surface Temperature, ST. The two latter indices can be easily calculated by means of AVHRR data from NOAA satellites. The former index needs to be accommodated to the specific spectral bands of the AVHRR sensor by means of the new channel in the shortwave infrared region around 1.6 microns on board of satellites NOAA-16 and –17. The summer period that has been selected belongs to year 2003, characterised by a steady heat wave, which spread all over Europe. This is a preliminary study to show how the selected dense forest areas keep an almost constant water content with a minimal decline even though the strong summer period, while water stress calculated by means of the Surface Temperature largely increases during this period.

***Keywords**: satellite data, vegetation index, forest fire, NOAA-AVHRR, Valencian Region.*

INTRODUCCIÓN

Son numerosos los métodos que se han ideado para evaluar de forma cuantitativa el riesgo de que se origine un incendio forestal (*Camia et al.,* 1999; *Chuvieco et al.,* 1999b). Un índice funcional de riesgo de incendio debe contemplar un amplio número de factores, tales como parámetros climáticos, condiciones de la vegetación, características orográficas del terreno, así como las actividades humanas que se desarrollen en las inmediaciones. Dentro del factor al que contribuye la vegetación, podemos encontrar diferentes variables que lo determinan, como son el tipo de combustible, el cociente entre la altura y la superficie ocupada, la cantidad de combustible por superficie y el contenido en humedad del mismo.

De todas las variables que contribuyen al factor vegetación, es la humedad presente en la misma la que mayor variabilidad temporal presenta, puesto que es la variable más directamente afectada por el factor climático. De esta manera, la humedad contenida tanto en el combustible vivo como en el muerto variará en sintonía con la precipitación, la evaporación y el intercambio de vapor de agua. El combustible muerto cambia su contenido en humedad de forma continua, ajustándose a las variaciones meteorológicas presentes en su entorno. Los índices de riesgo de incendio forestal que tratan de evaluar el estado del combustible muerto se denominan meteorológicos, pues incorporan factores acumulativos que tienen en cuenta las condiciones meteorológicas de los días previos. Entre éstos destaca el índice canadiense *Forest Fire Weather Index* o *FWI* (*Van Wagner,* 1987). Por otro lado el combustible vivo regula su contenido en humedad no sólo como consecuencia de las condiciones meteorológicas, sino también en relación con el estado fisiológico de la vegetación y la disponibilidad de agua a nivel de las raíces (*Camia et al.,* 1999). Por esta razón, su estimación es mucho más dificultosa y en principio debe seguir un comportamiento estacional, que podría verse parcialmente afectado por variaciones a muy largo plazo de déficits de agua en el subsuelo.

La aportación que puede hacerse mediante el uso de datos de satélite a la elaboración de un índice de incendio forestal estará orientada hacia el seguimiento del estado de la vegetación. Las variables como el tipo de combustible o cantidad del mismo pueden determinarse mediante el uso de la teledetección, aunque se necesitan muy altas resoluciones espaciales. Por otro lado estas variables poseen un grado de variación muy lento y pueden encontrarse catalogadas en inventarios. Son, por lo tanto, el contenido en humedad de la vegetación, así como el estrés hídrico, los parámetros que más variabilidad temporal mostrarán, con lo que su seguimiento es más factible con el empleo de satélites de alta resolución temporal del tipo NOAA. Es el follaje de la vegetación la parte más relacionada con los parámetros de reflectividad y emisividad que pueden ser medidos por los sensores a bordo de los satélites. Se han realizado muchos estudios encaminados a poner en relación las variables de humedad de la vegetación con los parámetros medidos desde los distintos satélites (*Chuvieco et al.,* 1999a). La mayor parte de estos estudios hacen referencia al contenido de humedad del follaje (FMC) como la proporción del peso en vivo respecto al peso en seco. Sin embargo, desde un punto de vista más estricto de la teledetección, es más factible correlacionar las variables medidas con el espesor de agua equivalente (EWT), definido como el contenido en agua por unidad de superficie de hoja, es decir el espesor de la lámina de agua equivalente promediada sobre toda el área de la hoja (*Danson et al.,* 1992).

Verstraete y Pinty (1996) expusieron una metodología aplicable a datos de satélite, por la cual es posible diseñar índices espectrales, de forma que se anulen factores perturbadores tales como efectos atmosféricos o de contaminación por suelo. Esto es especialmente útil para el diseño de índices de vegetación óptimos que hagan uso de dos o más canales espectrales y que puedan dar una indicación directa e independiente de la magnitud de la vegetación que se desea estimar. Recientemente, *Ceccato et al*. (2002a) han puesto en práctica esta metodología para el diseño de un índice espectral, que es capaz de estimar el contenido de agua de la vegetación utilizando información proporcionada por el sensor SPOT-VEGETATION. Este nuevo índice, Índice Global del Contenido en Agua de la Vegetación (GVMI), es función exclusiva de la cantidad de agua por unidad de área a nivel de la cubierta vegetal, es decir representa una

medida de EWT y por ello no es función directa del FMC. La optimización del índice es tal que se minimizan los efectos perturbadores causados por parte de la atmósfera, de la estructura interna de las hojas, del contenido en materia seca, así como del contenido de clorofila de las mismas. Los canales espectrales que utiliza se hallan dentro de los dominios del espectro solar y son los canales SWIR (infrarrojo de onda corta) y NIR (infrarrojo cercano). Ambos canales son muy similares espectralmente a los utilizados por el nuevo sensor AVHRR a bordo de los últimos satélites NOAA-16 y -17.

Uno de los objetivos de este estudio preliminar es la incorporación de la metodología en el cálculo del índice GVMI para el caso del sensor NOAA-AVHRR. Otros índices espectrales serán tenidos también en cuenta como son el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada (NDII) y la Temperatura Superficial (ST) de la cubierta vegetal. Finalmente la aplicación de tales índices se realiza sobre los datos procedentes de una serie de pases del satélite NOAA-17 sobre la Comunidad Valenciana. Las magnitudes de estos índices nos permitirán interpretar el estado de la vegetación, particularmente de una selección de superficies forestales arboladas que pertenecen a regiones del interior de Castellón, Valencia y Alicante.

METODOLOGÍA

Los datos del satélite NOAA-17 fueron recogidos por una estación receptora HRPT existente en las instalaciones de la Fundación CEAM. Adicionalmente, fueron almacenados los pases correspondientes a los satélites NOAA-12 y -16 que serán utilizados en las siguientes fases del estudio. Se seleccionaron únicamente los datos diurnos que correspondieran a un pase con gran dominio de la zona ocupada por la Comunidad Valenciana y en el que la nubosidad observada al mostrar las imágenes en pantalla no ocupase más de 2/3 de la escena. Con estas condiciones, para el periodo de marzo a septiembre del año 2003, pudo disponerse de 54 días para los que existe un pase del satélite NOAA-17 en torno a las 10:30 GMT. Los resultados de esta selección indicaron que el rango correspondiente al ángulo solar zenital fue de 18° a 52°, que el rango de valores asociado al ángulo zenital de visión fue de 0° a 54°, mientras que el ángulo azimutal relativo entre el sol y el satélite tomó valores entre 12° y 90°.

Las superficies forestales sobre las que se ha realizado este primer seguimiento fueron seleccionadas del Segundo Inventario Forestal de la Comunidad Valenciana (*Generalitat Valenciana,* 1996) y aparecen representadas en la Figura 1. Todas ellas corresponden a superficies forestales arboladas con una cubierta arbórea importante, a excepción de cuatro casos en los que hay presencia de matorral. Se desestimaron las superficies forestales con arbolado ralo y desarbolado con matorral para este estudio preliminar, en el que se pondrá sólo atención a las superficies con mayor masa arbórea. Durante la continuación del estudio se pretende incorporar todas las superficies forestales dentro del análisis. Los criterios de la selección se basaron en la homogeneidad de la vegetación arbórea desde el punto de vista de la resolución espacial de los satélites NOAA que se sitúa en torno a 1,1x1,1 Km sobre la vertical del pase. De este modo, las superficies forestales arboladas debían cumplir la condición de ser suficientemente extensas y

homogéneas como para permitir al menos el emplazamiento de 3 pixeles en el caso de un vuelo vertical sobre la zona. No se han tenido en cuenta las posibles especies vegetales que pueden ser dominantes en las zonas seleccionadas, ni tampoco se han llevado a cabo trabajos de campo dirigidos a muestreos del contenido de agua en la vegetación. El rango de altitudes en las que se emplazan las zonas forestales seleccionadas va desde los 300 m hasta los 1550 m.

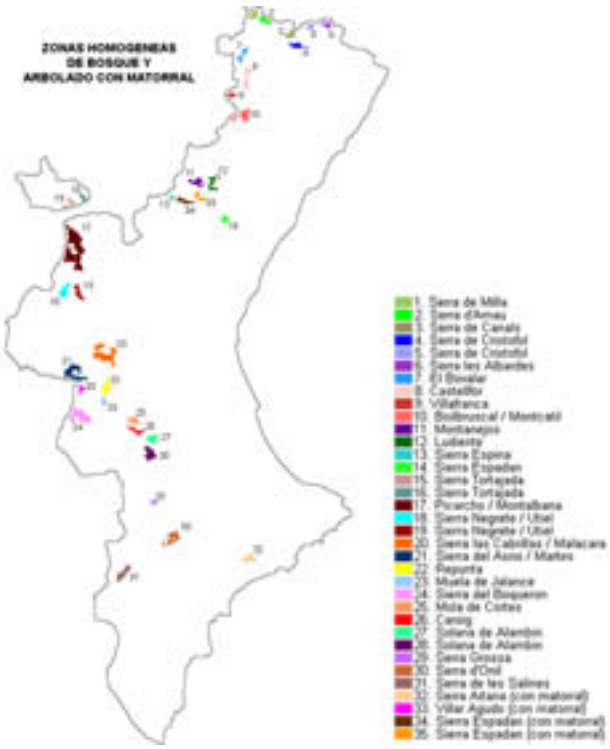


Figura 1. Zonas forestales seleccionadas por su cubierta arbórea y homogeneidad de vegetación, de acuerdo al inventario forestal de la Comunidad Valenciana.

Los datos HRPT correspondientes a los pases seleccionados del satélite NOAA-17 fueron procesados de acuerdo con la metodología expuesta en *Badenas et al.* (1997). De esta manera, se separó la información correspondiente al sensor AVHRR en sus distintos canales, se calibraron los dos canales térmicos en consonancia con los datos de telemetría y la radiancia del espacio exterior, se calibraron los tres canales del espectro solar de acuerdo a los coeficientes previos al lanzamiento, proporcionados por NOAA, y se efectuó una corrección geométrica en base a los parámetros orbitales específicos para el día seleccionado, que pueden obtenerse de NORAD. La georreferenciación se realizó a través de puntos de control tomados mediante la superposición de la línea de costa sobre la imagen deformada. Se obtuvieron de esta forma precisiones por debajo del tamaño del pixel del satélite y finalmente imágenes perfectamente referenciadas en coordenadas UTM y en perfecta correspondencia con el mapa de superficies forestales utilizado.

Para la eliminación de nubes de las escenas seleccionadas se desarrollaron los algoritmos expuestos en *Derrien et al.* (1993) y *Saunders y Kriebel* (1988) para condiciones terrestres y diurnas. Se aplicaron tres tests distintos para discernir el tipo de nubosidad según un valor umbral para la temperatura radiativa a 11 micras, otro para la reflectividad a 0,6 micras y un tercer valor para la diferencia entre los canales térmicos. Los valores umbrales en el caso del primer test de 11 micras están basados en datos reales procedentes de la red de estaciones meteorológicas de la Fundación CEAM. Con estos datos, pueden construirse mapas de temperaturas en toda la Comunidad Valenciana por medio de técnicas interpolativas tanto en distancia como en altura. Mediante estos filtros es posible eliminar de la escena aquellos pixeles afectados por nubes suficientemente frías, nubes reflectivas y cirros. Para la detección de la nubosidad de tamaño pequeño y en los bordes de masas de nubes compactas, es decir, nubosidad que sólo ocupa una fracción del pixel, se desarrolló un cuarto test basado en el trabajo de *Derrien et al.* (1993). Este test utiliza los gradientes en los alrededores de cada pixel del índice de vegetación NDVI y de la temperatura en uno de los canales térmicos y determina si el pixel se halla afectado por nubosidad fraccional en función de unos valores umbrales. Un ejemplo del resultado de la aplicación de los diferentes tests de nubosidad para una escena correspondiente a uno de los días seleccionados en el estudio se halla expuesto en la Figura 2.

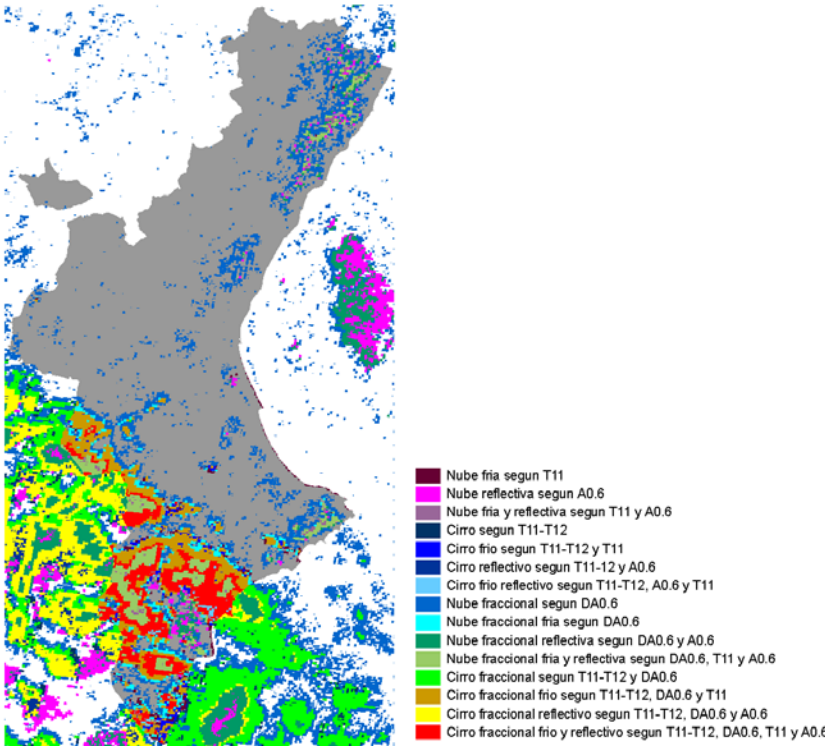


Figura 2. Resultado tras la aplicación de los algoritmos de detección de nubes en una de las 54 escenas seleccionadas para la realización del estudio.

Tras la aplicación de los algoritmos de detección de nubes sobre la toda la Comunidad Valenciana y su correspondencia en las zonas forestales escogidas, se obtuvieron para el total de escenas seleccionadas un conjunto de 7990 píxeles, que no se hallaron afectados por nubosidad. El número total de píxeles afectados por nubosidad de diversos tipos fue de 4086, siendo éstos descartados para la continuación del estudio.

Con los píxeles resultantes se llevó a cabo el cálculo de los siguientes índices:

– índice de vegetación de diferencia normalizada ó NDVI (*Goward et al.,* 1991):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \qquad (1)$$

donde ρ_{NIR} y ρ_{red} representan la reflectividad en el techo de la atmósfera (TOA) en los canales 2 y 1 del sensor AVHRR, correspondientes al infrarrojo próximo y al rojo respectivamente.

– índice infrarrojo de diferencia normalizada ó NDII (*Hunt y Rock*, 1989):

$$NDII = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \qquad (2)$$

donde ρ_{SWIR} representa la reflectividad TOA en el canal 3 del sensor AVHRR a bordo de los satélites NOAA-16 y –17, correspondiente al infrarrojo de onda corta que se encuentra alrededor de 1,6 micras.

– temperatura superficial ó ST (*Vidal*, 1991; *Meliá et al.,* 1991):

$$ST = T_{11} + A(T_{11} - T_{12}) + B \qquad (3)$$

donde T_{11} y T_{12} representan las temperaturas radiativas observadas en el techo de la atmósfera de los canales 4 y 5 del sensor AVHRR correspondientes a longitudes de onda de alrededor de 11 y 12 micras respectivamente. Se trata de una ecuación split-window para el calculo de la temperatura superficial a nivel del suelo y que corrige la atenuación de la atmósfera y los efectos de emisividad. Los coeficientes son $A = 1{,}31+0{,}27(T_{11}-T_{12})$ y $B = 1{,}16$ K.

– índice global del contenido en agua de la vegetación ó GVMI (*Ceccato et al*., 2002a):

$$GVMI = \frac{(\rho_{NIRrect} + 0.10) - (\rho_{SWIR} + 0.02)}{(\rho_{NIRrect} + 0.10) + (\rho_{SWIR} + 0.02)} \quad (4)$$

donde $\rho_{NIRrect}$ representa la reflectividad TOA en el canal 2 del sensor AVHRR una vez que ha sido rectificada por efectos atmosféricos y angulares según la metodología expuesta por *Gobron et al.* (2000). El índice GVMI se halla directamente relacionado con el contenido de agua de la vegetación, expresado éste como la cantidad de agua que se encuentra en la cubierta vegetal por unidad de área. Ha sido especialmente diseñado para minimizar los efectos perturbadores, tanto atmosféricos como los producidos por la estructura y naturaleza de la propia cubierta vegetal. Su validación y aplicación se detallan en *Ceccato et al*. (2002b).

La rectificación del canal del infrarrojo próximo en la formulación del índice GVMI surge de la sensibilidad de este canal a las variaciones en la concentración de aerosoles en la atmósfera. La respuesta del canal sin rectificar puede llegar a cambiar en un 12% si la concentración de aerosoles es grande (*Ceccato et al.,* 2002a). Sin embargo, la respuesta en el canal del infrarrojo de onda corta es casi independiente a la concentración de aerosoles, por lo que no hay motivo por el que tenga que ser rectificado. Desafortunadamente, la rectificación del canal NIR está formulada en la literatura sólo para el caso del sensor SPOT-VEGETATION y hace uso de la información proporcionada por un canal en el azul, entorno a 0,45 micras, que no tiene su correspondencia en el caso del sensor NOAA-AVHRR.

La correspondencia entre los canales en los dominios del espectro solar del sensor SPOT-VEGETATION y NOAA-AVHRR es bastante buena, a excepción del canal azul del primero, que no existe en el segundo. Salvo esta diferencia, el canal rojo es prácticamente el mismo, el canal NIR es algo más ancho en el caso del AVHRR, mientras que el canal SWIR es algo más ancho también en el caso del sensor VEGETATION. Teniendo en cuenta este paralelismo, se interpretó que los métodos que se aplican para un sensor pueden también servir para el otro. De este modo, se repitió el procedimiento expuesto por *Gobron et al*. (2000) con la finalidad de encontrar una relación matemática que nos permita rectificar el canal NIR del AVHRR, utilizando para ello la información que se tiene del canal rojo. Se generó así un conjunto de puntos teóricos que después fueron ajustados a la ecuación de un paraboloide, obteniéndose un coeficiente de regresión de $r^2 = 0{,}917$. La relación que se encontró tras el ajuste es la siguiente:

$$\rho_{NIRrect} = -0.103 - 0.193\rho'_{red} + 1.530\rho'_{NIR} + 5.215\rho'^{2}_{red} - 0.388\rho'^{2}_{NIR} + 1.072\rho'_{red}\rho'_{NIR} \quad (5)$$

donde

$$\rho'_{red} = \frac{\rho_{red}}{F(\Omega, \kappa_{red}, \Theta_{red}, \eta_{red})} \quad (6)$$

$$\rho'_{NIR} = \frac{\rho_{NIR}}{F(\Omega, \kappa_{NIR}, \Theta_{NIR}, \eta_{NIR})} \quad (7)$$

y donde ρ_{red} y ρ_{NIR} son, como siempre, las reflectividades TOA medidas por el satélite, mientras que ρ'_{red} y ρ'_{NIR} denotan las reflectividades TOA normalizadas por la función de reflectividad anisotrópica *F* del modelo RPV (*Gobron et al.*, 1999; *Rahman et al.,* 1993). La función *F* depende de la geometría de la escena por medio de Ω, más concretamente de los ángulos solar zenital, de observación zenital y azimutal relativo. Los valores de los parámetros κ, Θ y η, correspondientes a los canales utilizados, se recogen en *Gobron et al.* (2000) y vienen expresados en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores para los parámetros de los que depende la función de reflectividad anisotrópica *F* de acuerdo con *Gobron et al.* (2000).

Canal	**Valores para los parámetros de la función F**		
	κ	Θ	η
red	+0.77449	+0.10338	-0.53764
NIR	+0.88468	-0.00219	+0.62335

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Todos los resultados obtenidos se agruparon de acuerdo con las zonas forestales seleccionadas, de modo que por cada zona se obtuvo una serie temporal de datos. En cada una de estas agrupaciones se calculó la media y la desviación estándar de los datos que correspondieran al mismo día. Las Figuras 3, 4 y 5 contienen las series temporales que se obtuvieron para las zonas forestales 1 al norte de la provincia de Castellón, 18 en el interior de la provincia de Valencia y 32 en la provincia de Alicante. El resto de zonas forestales presentan comportamientos similares.

Se observa que apenas hay variación a lo largo del período estival del 2003 en los índices GVMI y NDII. Puede distinguirse no obstante una pequeña vaguada a la mitad del periodo para ambos índices, lo que indicaría una leve pérdida de agua en la cubierta vegetal. Cabe señalar que en el caso de la zona 32 (forestal con matorral) sí se aprecia una tendencia decreciente en el índice NDII. Estos resultados tenderían a concluir que la cubierta vegetal de zonas forestales suficientemente arboladas es capaz de mantener un nivel constante de contenido en agua, pese a atravesar por un periodo estival fuerte. Es de suponer que, dado el gran tamaño de los árboles que componen las zonas seleccionadas, las raíces tengan suficiente profundidad como para alcanzar zonas húmedas del suelo y permitir así una autoregulación de su contenido en agua. En el caso de zonas forestales con matorral con raíces menos profundas, es factible

que haya una respuesta temporal mucho más rápida a los periodos estivales. La continuación de este estudio se dirigirá hacia el seguimiento de zonas forestales con arbolado ralo y desarbolado con matorral para comprobar este efecto.

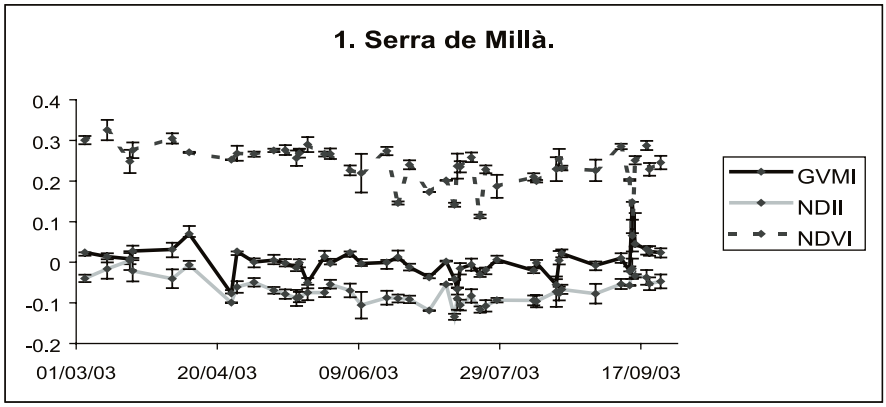


Figura 3. Serie temporal de índices NDVI, NDII y GVMI para la zona 1 (Serra de Millà).

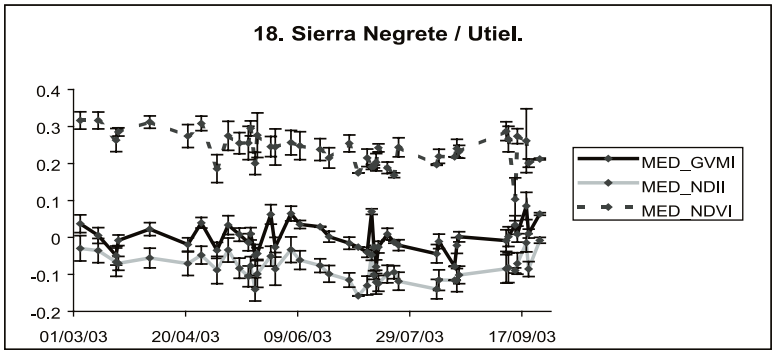


Figura 4. Serie temporal de índices NDVI, NDII y GVMI para la zona 18 (Sierra Negrete/Utiel).

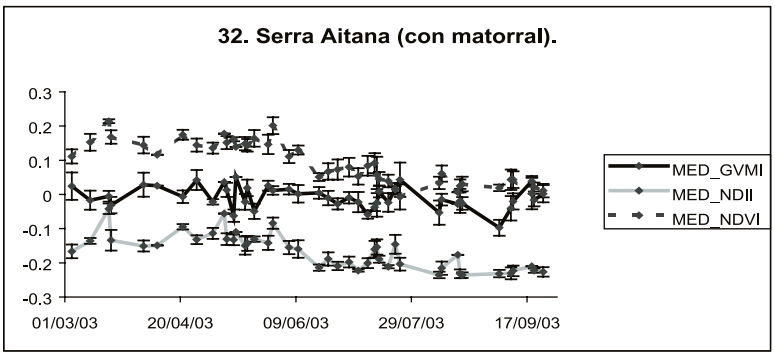


Figura 5. Serie temporal de índices NDVI, NDII y GVMI para la zona 32 (Serra Aitana).

En todos los casos se observa una vaguada o incluso un decrecimiento del índice NDVI. Es posible que la pérdida de humedad de la cubierta vegetal provoque cambios pigmentarios y estructurales, que afecten al valor de este índice. Sin embargo no hay una relación directa entre el NDVI y el contenido de agua de la cubierta vegetal, como así es en el caso del índice GVMI. Llama la atención que el valor obtenido preferentemente para este índice sea cero, es decir, como si el contenido en agua fuese nulo. La explicación de este efecto puede deberse al hecho de haber utilizado una metodología que no fue diseñada explícitamente para el sensor NOAA-AVHRR. Es posible que fuese necesario algún factor corrector para llevar el índice hacia valores más apropiados. En la Figura 6 se han superpuesto todos nuestros datos con una gráfica que aparece en la metodología expuesta por *Ceccato et al.* (2000a) para el diseño del índice GVMI. Se trata del espacio espectral SWIR frente a NIR rectificado, en el que aparecen isolíneas de GVMI. Destaca la dispersión de puntos únicamente en sentido de una sola isolínea y no abarcando varias de ellas. Según los resultados de los anteriores autores, la dispersión de puntos en el sentido de la isolínea indica el efecto atmosférico causado por diferentes condiciones de la atmósfera, las cuales no repercuten en el valor del índice como consecuencia de la optimización en su diseño. Por ello, una dispersión a lo largo de una de las isolíneas sólo indica un valor en la cantidad de agua de la cubierta vegetal constante para todos los casos.

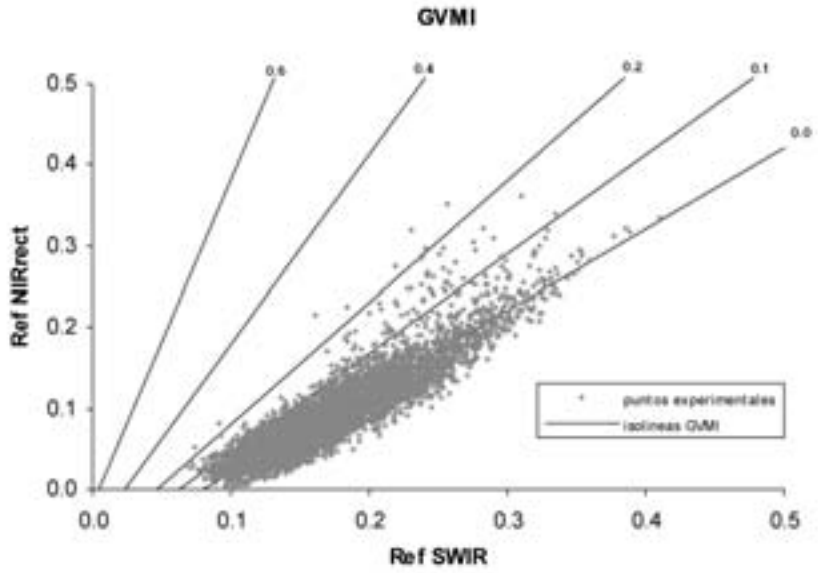


Figura 6. Superposición de los puntos experimentales con la representación del índice GVMI en un espacio espectral de reflectividad SWIR frente a NIR rectificada.

Los resultados preliminares obtenidos indican que la cantidad de agua contenida en la cubierta vegetal en una zona forestal suficientemente arbolada debe mantenerse constante. No obstante, otro factor importante en el estado de la vegetación es el debido al estrés hídrico. La

temperatura superficial (ST) ha sido utilizada con bastante éxito en el cálculo de la evapotranspiración, por lo que también se halla relacionada con el estrés hídrico (*Chuvieco et al.,* 1999a). En la Figura 7 se han representado las tres series temporales de las zonas 1, 18 y 32 para la temperatura superficial obtenida mediante la aplicación de la ecuación 3. Se puede observar como ésta presenta una variación muy importante durante el transcurso del periodo estival, adquiriendo su máximo entre los meses de julio y agosto de 2003. Entre julio y marzo llegan a observarse diferencias entorno a los 20 °C. El cociente entre el índice NDVI y la temperatura superficial (ST) es un indicador así mismo del estrés hídrico, por cuanto representa un contraste entre la actividad fotosintética y la temperatura a la que debe adaptarse la vegetación. En la Figura 8 puede observarse la serie temporal correspondiente del cociente NDVI/ST. Se observa cómo el cociente decrece según avanza el periodo estival, por lo que el estrés hídrico al que se ve sometida la cubierta vegetal es mayor.

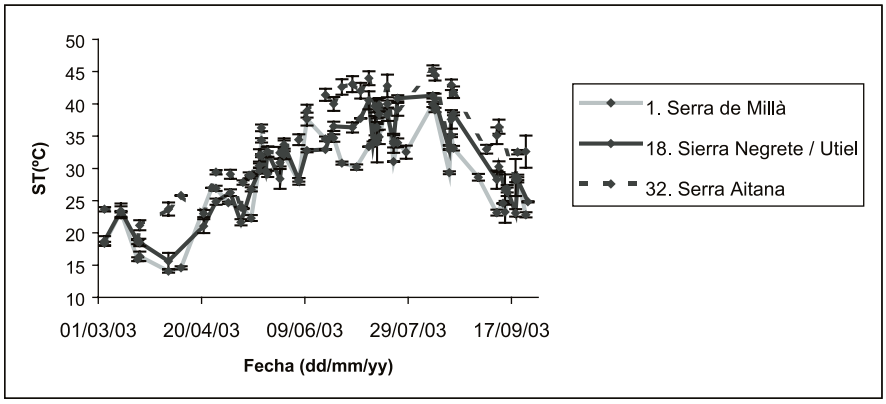


Figura 7. Series temporales de la temperatura superficial de la cubierta vegetal para las zonas 1, 18 y 32.

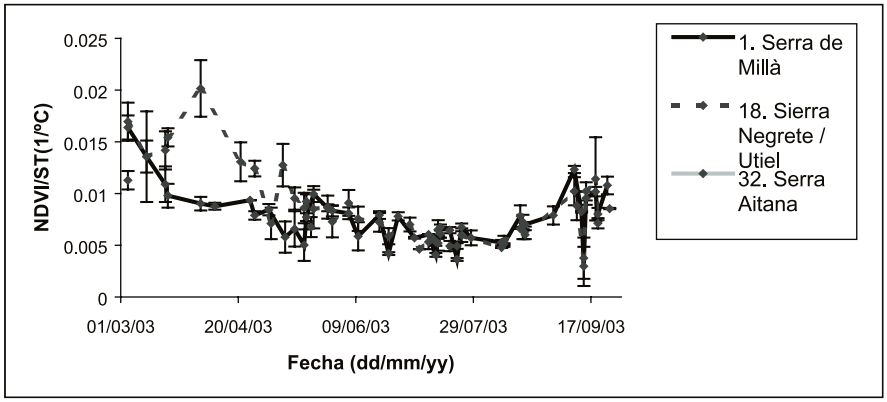


Figura 8. Series temporales del cociente NDVI/SST de la cubierta vegetal para las zonas 1, 18 y 32.

CONCLUSIONES

Este estudio preliminar ha tratado de analizar en una primera aproximación qué tipo de índices relativos a la vegetación puede dar una mayor cantidad de información a la hora de efectuar un seguimiento del estado de las superficies forestales durante el periodo estival. Se ha puesto de manifiesto que para zonas forestales suficientemente arboladas, la cantidad de agua presente en la cubierta vegetal es prácticamente la misma a lo largo del periodo estival. No ocurre lo mismo con el estrés hídrico relacionado con la temperatura superficial de la cubierta vegetal. Se ha observado cómo esta magnitud debe ser el factor más importante a la hora de determinar el estado de la vegetación forestal a través del uso de datos de satélite. Debe ser esta magnitud sobre la que recaiga el énfasis en el diseño de un índice de riesgo de incendio forestal en zonas forestales arboladas. El estudio abarcará en un futuro próximo otras zonas forestales, con arbolado ralo y desarbolado con matorral.

REFERENCIAS

Badenas C., Caselles V., Estrela M.J., Marchuet R., 1997: Some improvements on the processes to obtain accurate maps of sea surface temperature from AVHRR raw data transmitted in real time. Part 1: HRPT images. *International Journal of Remote Sensing*, 18(8), 1743-1767.

Camia A., Bovio G., Aguado I., Stach N., 1999: *Meteorological fire danger indices and remote sensing*. In: *Remote Sensing of Large Wildfires*. Chuvieco Ed. Springer, Berlin. 39-59 pp.

Ceccato P., Flasse S., Grégoire J.M., 2002b: Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2 Validation and applications. *Remote Sensing of Environment*, 82, 198-207.

Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B., Tarantola S., 2002a: Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*, 82, 188-197.

Chuvieco E., Deshayes M., Stach N., Cocero D., Riaño D., 1999a: Short-terrm fire risk: foliage moisture content estimation from satellite data. In: *Remote Sensing of Large Wildfires*. Chuvieco Ed. Springer, Berlin. 17-38 pp.

Chuvieco E., Salas F.J., Carvacho L., Rodríguez-Silva F., 1999b: Integrated fire risk mapping. In: *Remote Sensing of Large Wildfires*. Chuvieco Ed. Springer, Berlin. 61-84 pp.

Danson F.M., Steven M.D., Malthus T.J., Clark J.A., 1992: High-spectral resolution data for determining leaf water content. *International Journal of Remote Sensing*, 13(3), 461-470.

Derriren M., Farki B., Harang L., LeGéau H., Noyalet A., Pochic D., Sairouni A., 1993: Automatic Cloud Detection Applied to NOAA-11/AVHRR Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 46, 246-267.

Generalitat Valenciana, 1996: *Segundo Inventario Forestal de la Comunidad Valenciana*. Consellería de Agricultura y Medio Ambiente.

Gobron N., Pinty B., Verstraete M.M., Govaerts Y., 1999: The MERIS Global Vegetation Index (MGVI): description and preliminary application. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9), 1917-1927.

Gobron N., Pinty B., Verstraete M.M., Widlowski J.L., 2000: Advanced Vegetation Indices Optimized for Up-Coming Sensors: Design, Performance, and Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6), 2489-2505.

Goward S.N., Markham B., Dye D.G., Dulaney W., Yang J., 1991: Normalized Difference Vegetation Index Measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing of the Environment*, 35, 257-277.

Hunt E.R., Rock B.N., 1989: Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30, 43-54.

Melia J., Lopez-Baeza E., Caselles V., et al., 1991: *EFEDA Annual Report, EPOC-CT90-0030 (LNBE)*, University of Valencia, Spain.

Rahman H., Pinty B., Verstraete M.M., 1993: Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model2. Semiempirical surface model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysical Research*, 98, 791-801.

Saunders R.W., Kriebel K.T., 1988: An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 9(1), 123-150.

Van Wagner C.E.,1987: *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Technical Report 35. Canadian Forestry Service, Ottawa. 1-37 pp.

Verstraete M.M., Pinty B., 1996: Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5), 1254-1265.

Vidal A., 1991: Atmospheric and emissivity corrections of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 12(12), 2449-2460.

La modelización aplicada a la prevención y gestión de riesgos catastróficos: cartografía de viento en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana

M. J. Estrela , F. Pastor , J. A. Valiente y J. A. Alloza

Fundación CEAM (Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo), C/ Charles R. Darwin, 14, Parque Tecnológico, 46980 Paterna, Valencia.

RESUMEN

Las condiciones meteorológicas constituyen un factor decisivo para la dinámica y evolución de los incendios forestales, por lo que se hace necesario conocer y cuantificar su influencia. Se han analizado las condiciones meteorológicas (sinópticas) propicias para el desarrollo y, principalmente, la propagación de incendios forestales en la Comunidad Valenciana. Tres situaciones son las que cubren la mayor cantidad de interacciones entre las condiciones sinópticas y los vientos regionales: 1) ciclo de brisas con desarrollo de Baja Térmica; 2) vientos de poniente o del Oeste con efecto Föhn cuando un sistema de Baja presión atraviesa la Península; 3) ciclo combinado, cuando el ciclo diurno de la brisa es seguido por un acoplamiento de la brisa de tierra con la circulación del Oeste por la noche. Una vez caracterizadas las situaciones sinópticas se ha utilizado un modelo mesoescalar (RAMS, Regional Atmospheric Modelling System) para simular el flujo de viento en estos diferentes tipos sinópticos, obteniéndose una cartografía de vientos "tipo" con la evolución del viento a gran resolución y desagregada por cuencas. Los resultados se han integrado en un SIG, lo cual permite efectuar análisis cartográficos con una aplicación directa en la gestión forestal, tanto en la prevención como en la extinción de incendios.

***Palabras Clave**: modelos meteorológicos, incendio forestal, viento, SIG.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

Meteorological conditions are a key factor on wildfire dynamics; there is, therefore, a need to determine their influence on wildfires. In the Valencian Region, three synoptic situations have been found to be closely related to forest fires. These are: 1) sea breeze cycle combined with Iberian thermal low; 2) synoptic westerlies; and 3) combined cycle, namely diurnal breeze cycle combining the nocturnal return flow with synoptic westerlies at middle and upper levels. Selected meteorological events representing those three types have been simulated with a mesoscale numerical model (RAMS) to study wind regimes in each situation at high spatial resolution. A representative wind cartography has been developed showing the "typical" daily wind regimes at the three synoptic situations related to forest fires. These data have been incorporated into a GIS, together with orography and vegetation data, in order to perform geographical analysis that can be applied in forestry policies, both in fire prevention and extinction.

Keywords: *meteorological model, forest fires, wind, GIS.*

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son un fenómeno tristemente familiar a lo largo de la historia de la cuenca mediterránea. Estos incendios se han visto favorecidos tanto por las condiciones climáticas mediterráneas como por las prácticas tradicionales de explotación del suelo. Como es sabido, la Comunidad Valenciana es una de las regiones españolas que en la última parte del siglo pasado experimentó un notable incremento tanto en el número de incendios forestales como en la superficie quemada (*Pausas y Vallejo,* 1999; *Vallejo y Alloza,* 1998). Un análisis de los datos correspondientes a los incendios de los últimos 30 años indican que los accidentes con pérdidas humanas son, en su mayoría, resultado de cambios repentinos en la dinámica del fuego. Por tanto, un buen conocimiento de las condiciones meteorológicas y su evolución podría contribuir a evitar catástrofes y la pérdida de vidas humanas.

Una revisión de la literatura científica en incendios forestales indica que muchos estudios se centran en los efectos del fuego en el ecosistema, en los cambios en las propiedades del suelo y en los procesos de regeneración de los ecosistemas (*Trabaud,* 1982; *Moreno y Oechel,* 1994). Sin embargo, no son muchos los trabajos relativos al papel de la meteorología en el desarrollo o dinámica del fuego (*Brotak y Reifsnyder,* 1976; *Rothermel,* 1983), y los existentes son muy generales (*Chandler et al.,* 1991; *Carrega,* 1991; *Johnson,* 1992). Resultados de diversos proyectos europeos realizados en la cuenca occidental del Mediterráneo muestran que muchos de los procesos atmosféricos estivales en esta región están regidos por circulaciones mesoescalares con marcado ciclo diurno (*Millán et al,* 1991, 1992, 1996a, 1996b, 1998). Por tanto, un buen conocimiento de las condiciones atmosféricas de la cuenca occidental del Medi-

terráneo, profundizando en los procesos a escala local y regional, es fundamental para la labor de prevención y/o extinción de los incendios forestales.

El objetivo general de este trabajo es la obtención, a partir del modelo meteorológico RAMS, de una cartografía de vientos "tipo" de alta resolución para cada una de las situaciones sinópticas relacionadas con la propagación de incendios forestales en la Comunidad Valenciana, cuyos resultados se integran en un Sistema de Información Geográfica (SIG) a fin de realizar análisis cartográficos con aplicación directa en la gestión forestal.

Este objetivo general se concreta en varios objetivos específicos; primero, el análisis de las situaciones meteorológicas de riesgo para la propagación de los incendios forestales (período 1980-2000). Este tipo de análisis sinóptico no se ha incluido hasta la fecha en los índices utilizados habitualmente y constituye una clara mejora en el aspecto meteorológico. Las situaciones definidas son: 1) ciclos de brisa mar-tierra con baja térmica sobre la Península; 2) vientos de poniente (efecto Föhn); 3) ciclos combinados (ciclo diurno de brisa de mar con acoplamiento de flujos de tierra-mar con el viento de altura durante la noche).

En segundo lugar se ha seleccionado, para los tres tipos sinópticos definidos, un episodio considerado tipo o estándar para simular con el modelo meteorológico RAMS, con el objetivo de elaborar una cartografía de vientos de alta resolución. En esta fase, parte de los esfuerzos se han dirigido a la adaptación del modelo a las condiciones de la cuenca occidental del mediterráneo, sobre todo mejorando la topografía, usos del suelo y temperatura superficial del mar.

En tercer y último lugar, los resultados del modelo se han cruzado en un SIG con datos de la cubierta vegetal y la orografía de la Comunidad Valenciana para elaborar mapas de peligrosidad asociada a la propagación de incendios forestales. Estos mapas de riesgo permiten incidir en la prevención al definir áreas de máximo riesgo según las situaciones meteorológicas.

METODOLOGÍA

En este estudio se ha trabajado en tres ámbitos: análisis sinóptico, modelización y análisis estadístico de las bases de datos meteorológicas (dirección y velocidad de viento) así como la de incendios forestales y de la cubierta vegetal de la Comunidad Valenciana. Los resultados de cada uno de estos análisis han sido adaptados para su posterior tratamiento y explotación conjunta en el SIG. El período de estudio comprende los veranos de 1980 a 2000. Se ha utilizado datos de viento provenientes del INM de las estaciones primarias Manises, Almassora y Alicante (El Altet). La base de datos que se ha utilizado para los incendios forestales es la del *ICONA* (1988).

El modelo de simulación meteorológica utilizado es el RAMS (*Regional Atmospheric Modelling System*). Se trata de un modelo de mesoescala, especialmente diseñado para la resolución de fenómenos de mesoescala y circulaciones locales. Este modelo presenta la característica de trabajar con mallas anidadas, lo cual permite simular a muy alta resolución el área de interés, mientras áreas circundantes se simulan con menor resolución. Al modelo se le han introducido datos relativos a la topografía y la vegetación de la Comunidad Valenciana, a

fin de adaptarlo a las características específicas de nuestra región. También se ha mejorado la calidad de los datos de entrada de temperatura superficial del mar.

Para la modelización se ha dividido la Comunidad Valenciana en 17 áreas en las que han prevalecido criterios geográficos, sobre todo teniendo presente la disposición orográfica que pueda condicionar la canalización de flujos. Para cada episodio se ha realizado una simulación comprendiendo los días centrales del evento, así como dos días previos y uno posterior al mismo, con el objeto de evitar inestabilidades de cálculo en la resolución de las ecuaciones diferenciales que caracterizan a la atmósfera.

ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES

Marco climático-meteorológico

Si se analiza la frecuencia y el tamaño de los incendios forestales para el período 1968-2000 se observa que el mayor número de fuegos tiene lugar en verano, especialmente julio y agosto (*Millán et al.,* 1998, *Pausas y Vallejo,* 1999). En esta época del año se combinan una serie de factores que favorecen una mayor ocurrencia de los incendios. Es la estación más seca del año y también es la más turística, por lo que existe mayor peligro de ignición de la masa forestal por el uso mayoritario del bosque (camping, picnic, etc). Sin embargo, las situaciones meteorológicas que favorecen la ignición o propagación de los incendios no es la misma en todos los casos.

Los resultados del análisis de frecuencia de vientos apoyan los resultados del estudio sinóptico que se resumen en el cuadro 1. Para todas las estaciones analizadas hay un predominio de los vientos de componente Este en el verano. Obviamente las brisas de mar están incluidas dentro de este grupo, mientras que los terrales quedan contabilizados dentro de los vientos de componente Oeste. En el cuadro se resume el porcentaje que representa cada una de las situaciones sinópticas. Para la Comunidad Valenciana, y dentro del período analizado, puede afirmarse que la situación predominante es el régimen de brisas, con un 70% de los días analizados.

Cuadro 1. Número de incendios y porcentaje asociados a las situaciones sinópticas y número de días y porcentaje de ocurrencia de las situaciones sinópticas.

1980-2001	Incendios		junio		julio		agosto		septiembre		Total	
	Nº	%	Días	%	Días	%	Días	%	Días	%	Días	%
Brisas	4193	69.4	408	61.8	513	75.2	527	77.2	426	64.5	1874	69.8
C. Combi	992	16.4	177	26.8	132	19.3	103	15.1	119	18.0	531	19.7
Ponientes	859	14.2	75	11.3	37	5.4	52	7.6	115	17.4	279	10.3

Cabe destacar, no obstante, que se aprecia una cierta tendencia descendente en la última década a favor de las situaciones de ciclo combinado y de ponientes, aunque se mantiene la

distancia respecto al valor de brisas. En el mismo cuadro se ha incluido para el período de análisis el número de incendios así como el porcentaje que suponen sobre el total. Lo más destacable es la correlación tan elevada (69%) entre ciclo de brisas y número de incendios forestales. Por detrás y bastante lejos de este valor se encuentran el ciclo combinado (16%) y los ponientes (14%). Para el caso de la superficie afectada por incendios, la brisa es la situación que presenta más hectáreas quemadas seguida, aunque a gran distancia, por los ponientes y el ciclo combinado. En este caso, los ponientes superan ligeramente en hectáreas quemadas al ciclo combinado.

Según lo anterior, podemos afirmar que una de las ideas más extendidas, que los fuegos en la Comunidad Valenciana están producidos por los vientos de poniente, no parece estar justificada. Es evidente, por tanto, que son útiles los estudios que tengan por objeto el análisis de las situaciones sinópticas relacionadas con la propagación y/o ignición de los incendios forestales, y que sirvan, por tanto, de apoyo para la prevención y extinción de los incendios forestales.

ANÁLISIS SINÓPTICO: TIPOLOGÍA DE SITUACIONES

El análisis sinóptico ha permitido identificar y definir tres tipos de situaciones sinópticas durante la época estival, que cubren las interacciones más probables entre las condiciones sinópticas y los vientos locales, así como sus implicaciones para la dinámica de los incendios en la Comunidad Valenciana.

Ciclos diurnos de brisas de mar-tierra con formación de baja térmica

Tiene lugar cuando las condiciones sinópticas favorecen el total desarrollo de las circulaciones locales y regionales. Los gradientes de presión son muy débiles a todos los niveles y las circulaciones locales-regionales se desarrollan durante el día con el calentamiento solar.

En la costa mediterránea española las brisas de mar se presentan a lo largo de todo el año, con menor frecuencia en los meses invernales. Éstas alcanzan su máxima penetración en el interior durante el verano, cuando forman parte del sistema de Baja Térmica Ibérica. En años muy secos estos procesos pueden iniciarse a principios de marzo, obteniéndose las máximas velocidades hacia el final de mayo o principio de junio, cuando el contraste de temperatura entre tierra y mar es máximo. Sin embargo, su máxima frecuencia (casi siempre diaria), duración (hasta 12 horas al día) y penetración hacia el interior (hasta 80-100 km) ocurre en pleno verano, debido a las favorables condiciones sinópticas, la mayor cantidad de horas de sol y la mayor sequedad del terreno. En la costa mediterránea española la orientación de las laderas favorece la combinación de la brisa de mar con los vientos anabáticos. Su evolución diurna presenta las siguientes características:

- Están fuertemente canalizados a lo largo de los valles que conectan la costa con la Meseta. Se han registrado velocidades de viento de 8 a 10 m s^{-1} durante varias horas.
- En los valles, los vientos más intensos están confinados en un núcleo localizado a lo largo del eje del valle, con vientos máximos desde 100 a 200 m sobre el suelo.

- Los vientos anabáticos también se desarrollan a lo largo de laderas orientadas al Sur.
- Como consecuencia de ello, podría esperarse un flujo en forma de espiral a lo largo de los valles orientados Este-Oeste con subsidencia compensatoria en las laderas orientadas al Norte.
- Como resultado de lo anterior, algunas de las cumbres de las cadenas montañosas, que bordean el valle, pueden estar localizadas en los flujos de retorno de la combinación de brisas de mar y vientos anabáticos durante la totalidad o parte del día. Esta situación puede variar en cada valle, debido a diferencias en el aspecto y altura de las sierras, la orientación de las laderas y momento del día.

En cuanto a las interacciones con los incendios, el periodo más peligroso en este ciclo sucede durante las horas diurnas, pues las brisas de mar tienden a canalizarse hacia el interior a lo largo de los pasajes naturales que conectan la costa con la Meseta. En esos valles los núcleos de vientos fuertes del Este se refuerzan con, o refuerzan a, los vientos anabáticos a lo largo de las laderas orientadas al Sur, las cuales experimentan vientos que cambian de Este a Sudeste al avanzar hacia el interior del valle.

Durante la tarde-noche, intervalo de cambio de brisas marinas a terrales, hay un periodo de calma antes de que las brisas de tierra y los vientos de drenaje se establezcan. Éstos están fundamentalmente confinados en los valles y alcanzan su máxima intensidad antes de la salida del sol, llegando raramente a profundidades mayores de 150 a 200 m. Además, y debido a que el mar puede estar muy caliente en esta época del año (de 25 a 27ºC), los vientos de drenaje pueden resultar bloqueados al llegar al mar. Durante este periodo las cadenas montañosas pueden permanecer inmersas en un flujo sinóptico débil (en el caso de que se desarrolle alguno por la noche). Algunas veces se ha observado un flujo de tipo inercial tratando de llenar todo lo que queda de la baja térmica durante la noche. Esto significa que un flujo semejante a una brisa de mar continúa hasta que se establece el flujo de drenaje. Un proceso similar, aunque de forma más suave, rige el tránsito de terrales a brisas marinas a primeras horas cuando se inicia el calentamiento solar.

Ponientes: Vientos del Oeste con sistemas de bajas presiones migratorios

Representan el caso opuesto a la situación de baja térmica, al anular las condiciones sinópticas la formación de circulaciones regionales, y son también el caso más fuerte de acoplamiento del flujo sinóptico con la superficie. Se producen al migrar las depresiones atlánticas hacia latitudes más bajas y moverse entre las Islas Británicas y el Golfo de Vizcaya-Sur de Francia. Este periodo puede extenderse desde mediados de agosto hasta últimos de junio. Bajo estas condiciones, las depresiones y sus frentes barren la Península Ibérica y las lluvias se producen sobre la mayor parte del territorio con importantes efectos orográficos. En general, la componente Oeste de los vientos se extiende desde la superficie hasta niveles altos a todos los niveles; los eventos de mayor intensidad ocurren con situaciones de bajas frías.

En la Comunidad Valenciana, el último obstáculo encontrado por las masas de aire antes de llegar al Mar Mediterráneo es el Sistema Ibérico. Esta barrera entre la parte más baja de la Meseta Central y los llanos costeros potencia la precipitación, inducida orográficamente, en el lado de barlovento. A sotavento, por otra parte, se produce un efecto *Föhn* que provoca vientos

fuertes del Oeste (ponientes) sobre la mayor parte de la costa mediterránea. Los ponientes pueden considerarse cuasi-sinópticos y, como todos los vientos del tipo *Föhn*, son fuertes, racheados, cálidos y muy secos.

El ciclo de vida típico de los ponientes dura de uno a varios días. Durante este periodo la dirección del viento puede cambiar del Sur o Suroeste, al principio del ciclo, hasta Oeste o Noroeste tras el paso del frente frío. Esta última etapa puede venir acompañada de un aumento significativo de la velocidad del viento. Estos vientos producen convergencia a sotavento de las montañas y una fuerte subsidencia sobre los llanos costeros.

En la franja costera se ha detectado que la llegada de los ponientes sucede preferentemente durante la noche. Esto puede explicarse considerando que las condiciones meteorológicas que conducen a su desarrollo provocan tiempo soleado sobre la costa mediterránea, y las laderas orientadas al Este potencian el desarrollo temprano de la brisa de mar reforzada por los vientos anabáticos. Así pues, si el ciclo de ponientes comienza durante el día y la celda de la brisa ya está bien establecida, los vientos del Este que soplan hacia el interior tienden a bloquear o desviar los ponientes para que no alcancen la superficie. En estos casos se desarrolla una línea de fuerte convergencia a cierta distancia tierra adentro. Este tipo de situación ha sido documentado en varias ocasiones en los llanos costeros de Castellón y Valencia.

Sin embargo, durante la tarde la circulación de brisa de mar termina y los vientos de superficie cambian a flujos de drenaje del Oeste. Este proceso ayuda a acoplar los ponientes cuasi-sinópticos (del Oeste) con el flujo en superficie (también del Oeste). Una vez acoplados a tierra, los ponientes se establecen a todos los niveles y tienden a bloquear la formación de la brisa de mar el(los) día(s) siguiente(s). Mientras perdura esta situación, los ponientes normalmente anulan la circulación de los vientos mesoescalares, incluyendo brisas de mar y vientos anabáticos, y afectan simultáneamente tanto a las zonas elevadas (cumbre de cadenas montañosas) como a los valles orientados al Este-Oeste, donde pueden estar fuertemente canalizados. En relación con los grandes incendios forestales, cabe destacar como características:

- capacidad para secar muy rápidamente la superficie y la vegetación;
- potencial para activar fuegos latentes y/o propagar cualquier pequeño fuego;
- capacidad para propagar los fuegos gracias a su persistencia e intensidad.

Ciclos combinados: brisas de mar con acoplamiento de ponientes en altura por la noche

En esta situación sinóptica los gradientes de presión desde la superficie hasta los 850 hPa son débiles y favorecen el desarrollo de la baja térmica y/o las circulaciones costeras. En o sobre la superficie de 700 hPa, y asociado con el nivel generalizado de subsidencia anticiclónica en altura, hay un flujo del Oeste bien definido.

Este tipo de situación se desarrolla durante la transición de las condiciones de verano a las de otoño e invierno. Empieza a ocurrir con mayor frecuencia hacia el final del verano, alternando con periodos donde las brisas de mar y las condiciones de baja térmica se desarrollan totalmente o con condiciones para la formación de ponientes. Sin embargo, el desarrollo de los ponientes a lo largo de la costa Este se asocia con lluvias generalizadas sobre la Meseta Cen-

tral. El suelo húmedo inhibe el desarrollo de la baja térmica, la cual puede no formarse hasta la siguiente primavera. En esta situación las principales circulaciones mesoescalares en la costa Este son las brisas de mar, que todavía pueden alcanzar la cima de las cadenas montañosas costeras y alargarse durante aproximadamente otro mes. A final de septiembre la frecuencia de aparición y el alcance de las brisas de mar descienden significativamente.

Su desarrollo inicial es similar al de las brisas de mar-tierra con formación de baja térmica. De todas formas, el final de la combinación de las brisas de mar-vientos anabáticos y la transición al flujo de drenaje y brisas de tierra pueden verse modificados por la presencia de vientos del Oeste en altura. El acoplamiento con los flujos en superficie está causado por: (1) ambos vientos, de superficie y altura, tienen la misma dirección, (2) el inicio de los flujos de drenaje "ayudados por subsidencia", conduce los vientos de altura hacia la superficie, y (3) el inicio de la subsidencia provoca un chorro nocturno, justo por debajo de la nueva inversión, también en la misma dirección general. La combinación de estos procesos podría inhibir el desarrollo de la inversión de subsidencia durante la noche, y producir un tipo de "ponientes por medio de acoplamiento ayudado por subsidencia".

A la mañana siguiente en la costa Este se desarrollan de nuevo las brisas de mar, aunque un poco más tarde, así como la baja térmica sobre la meseta central, y el ciclo se inicia de nuevo. Esta situación se ha observado que dura de uno a varios días, tras los cuales normalmente pasa a convertirse en un ciclo completo de baja térmica. Los aspectos principales de estos vientos son:

- Los "ponientes ayudados por acoplamiento" se desarrollan a últimas horas de la tarde alrededor de la puesta de sol, o incluso una o dos horas antes.
- El cambio en la dirección del viento y el colapso de la brisa de mar tiene lugar casi a la vez en toda el área costera, desde las cadenas montañosas hasta el mar.
- Los vientos en superficie pueden estar, como en el caso de los ponientes, fuertemente canalizados a lo largo de los valles que fluyen hacia el mar, es decir, los alineados de Este a Oeste.
- Las zonas más elevadas de los valles pueden no tener vientos tan fuertes como en los "ponientes clásicos".
- Su duración se limita al periodo nocturno y de madrugada. Al día siguiente el flujo cambia a brisa de mar y vientos anabáticos como en el caso de la baja térmica, aunque de menor intensidad y extensión hacia el interior.

El cambio súbito en la dirección del viento, que puede producirse en cualquier punto del valle, puede ser extremadamente peligroso para las brigadas de extinción que trabajan cerca del frente de llamas. También existe la posibilidad de que el fuego se desdoble y una parte ascienda la ladera, mientras que el frente de llamas se mueva por el valle siguiendo el nuevo flujo. Esto significa que el inicio de estos vientos puede provocar el avance y la propagación del fuego durante la noche.

MODELIZACIÓN: CARTOGRAFÍA DE CAMPOS DE VIENTO

Se ha realizado una simulación para cada tipo de situación sinóptica en cada una de las 17

áreas en las que se ha dividido la Comunidad Valenciana, centrando la malla de mayor resolución del modelo en el área de interés. Para la inicialización del modelo se han usado datos de reanálisis correspondientes a los días de la simulación. Estos datos también se utilizan para hacer converger los resultados del modelo a los datos reales durante la simulación. Los resultados del modelo se guardan en archivos horarios, disponiendo por tanto de todas las variables meteorológicas en cada punto de la malla para cada hora del día. Los campos que se han trabajado son la intensidad y la dirección del viento en cada punto de la malla.

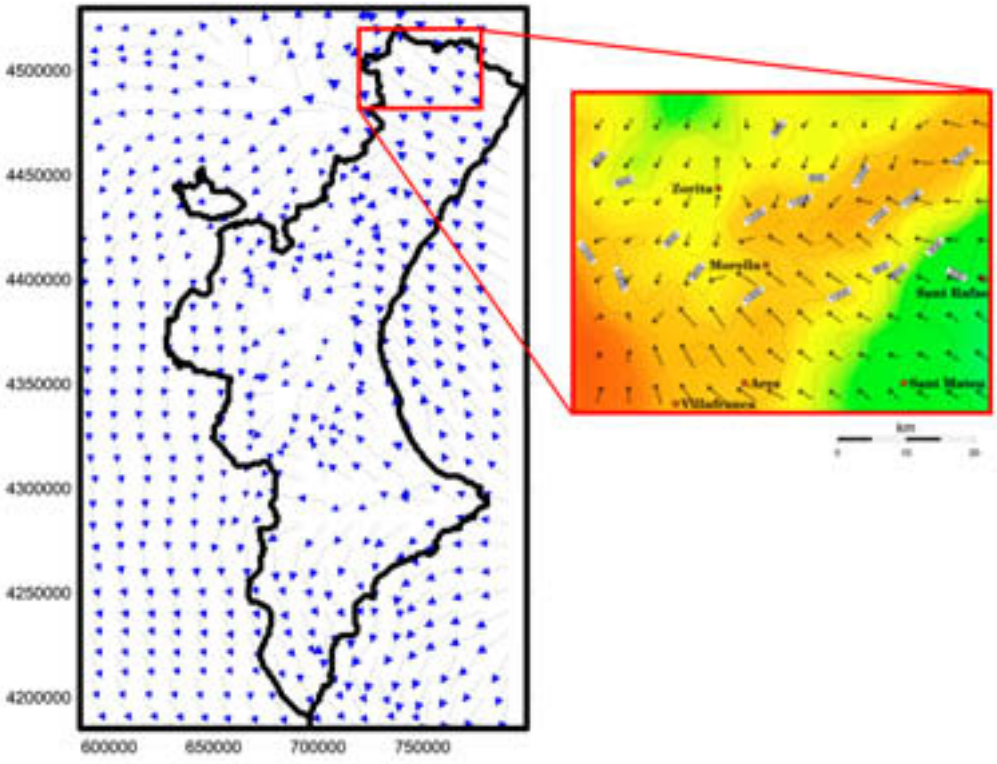


Figura 1. Campos de viento resultantes de la modelización con el RAMS para toda la Comunidad Valenciana y detalle de área del Norte de la Comunidad.

En la situación de poniente se ha trabajado con los valores máximos diarios de viento, comparando los 24 valores diarios en cada punto de la malla para encontrar la mayor intensidad del viento. Posteriormente se normalizan todos los valores máximos respecto al máximo absoluto en todos los puntos de la malla. Para el caso de las situaciones de brisa y ciclo combinado, no se realizan los cálculos de los valores máximos, debido a que se trata de ciclos marcados por la variabilidad tanto de velocidad como de dirección. En estos casos se obtienen los datos horarios de velocidad y dirección.

La figura 1 muestra uno de los campos de viento resultantes para una situación tipo de

las definidas como de riesgo, en una de las áreas descritas. Con estas simulaciones se ha obtenido la evolución horaria de los campos de viento en las 17 zonas en que se ha dividido la Comunidad Valenciana para las tres situaciones sinópticas. Estos resultados se presentan en mallas que cubren las distintas áreas, y su combinación para todo el territorio de la Comunidad Valenciana, con una resolución de 1,5 km en cada brazo de malla, siendo esta resolución muy superior a la utilizada habitualmente en los modelos de previsión meteorológica.

Esta cartografía puede resultar útil en la prevención de los incendios, ya que al cruzar los datos de vientos máximos previsibles con datos de biomasa y de topografía se pueden determinar índices de peligrosidad que muestren las áreas susceptibles de mayor riesgo en la propagación de incendios.

INTEGRACIÓN EN UN SIG: RIESGO DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

La cartografía de campos de viento resultante de la modelización se ha incluido en un SIG, tanto para su representación como para su posterior cruce con datos provenientes del estado de la cubierta vegetal. La figura 2 muestra el índice promedio de viento para cada una de las situaciones meteorológicas de riesgo. Los resultados del análisis se han comparado y correlacionado con datos provenientes de estudios realizados en la Fundación CEAM relativos a dispersión de contaminantes y climatología para su validación. Del análisis de los mapas resultantes podemos extraer algunas conclusiones:

- Este material se revela como una herramienta de gran utilidad en el apoyo a la planificación de la lucha contra incendios forestales.
- El ciclo combinado destaca como la situación meteorológica más peligrosa para la propagación de incendios en la Comunidad Valenciana, debido a que la mayor parte del territorio presenta valores de viento en el rango del 60-100% del promedio del máximo de la situación.
- Por provincias los resultados del análisis muestran diferencias destacables; así, mientras para la provincia de Castellón la situación meteorológica más peligrosa para la propagación de los incendios forestales es la brisa (concretamente la diurna de componente marítima), para las provincias de Valencia y Alicante es el ciclo combinado.
- La creencia, bastante extendida, de relación estrecha entre ponientes e incendios forestales parece no cumplirse para la provincia de Castellón, dado que es el área donde menores valores de riesgo se registran.

La cartografía de vientos también presenta un gran potencial como herramienta de apoyo para la gestión forestal y podría incorporarse en los SIG para la Prevención de Incendios Forestales operativos en algunas comunidades autónomas (*Gómez,* 2002). Como ejemplo de esta aplicabilidad se ha generado un mapa de riesgo de propagación de incendios forestales para identificar, en función de cada situación sinóptica, las situaciones de mayor riesgo.

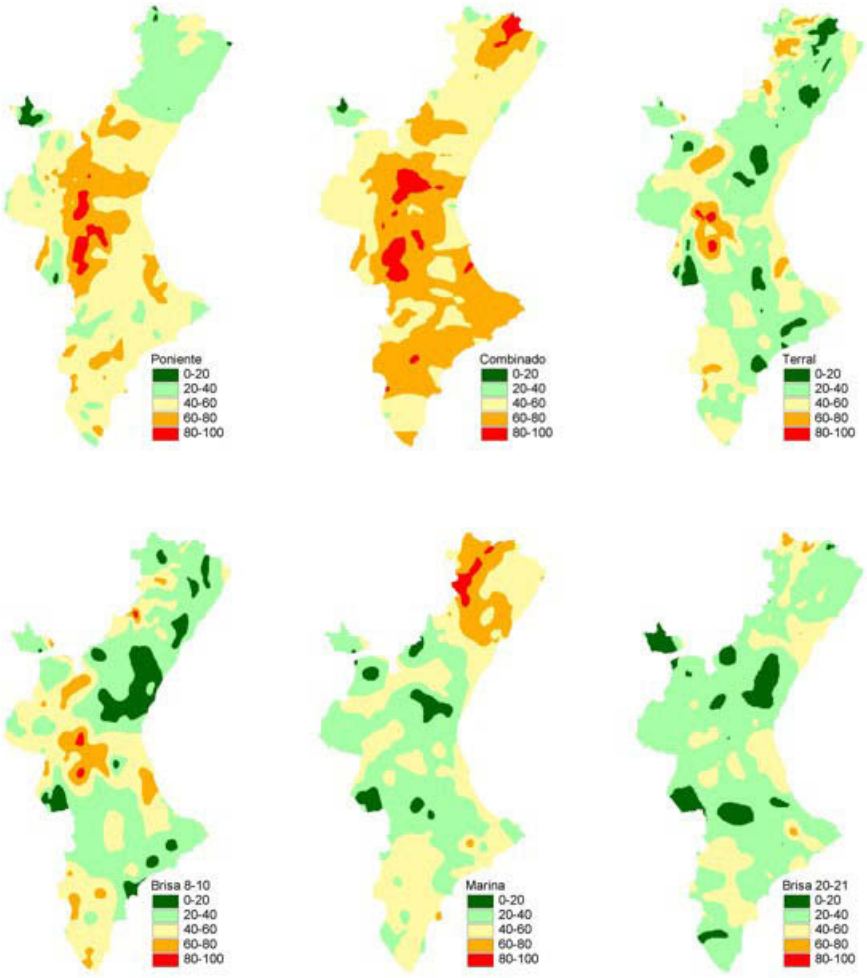


Figura 2. Mapas de índice de vientos promediados para poniente, ciclo combinado, brisa terral, brisa 08-10h, brisa marina y brisa 20-21h.

Las metodologías y aproximaciones para elaborar cartografía asociada al riesgo de incendios son múltiples, (*Velasco,* 2001). La inflamabilidad de la vegetación, o facilidad de producir llamas bajo la acción de un foco de calor, depende de dos tipos de factores, intrínsecos y extrínsecos (*Vélez,* 2000); dentro de los primeros se encuentran la composición, especie vegetal, estado selvícola, etc.; dentro de los factores extrínsecos figuran el relieve y los factores meteorológicos, ambos con una gran influencia en la propagación. Se ha aplicado un procedimiento similar al descrito por *Chuvieco et al.* (1999), siguiendo el método de selección de variables e integración. Por un lado hemos considerado la pendiente del territorio (obtenido a partir del Modelo Digital del Terreno) y, por otro, las características de la vegetación que inciden en la propagación de un incendio (altura, continuidad vertical y horizontal, carga de combustible); dicha información

queda sintetizada en los modelos de combustible, para lo cual se ha utilizado la correspondiente cobertura del Plan de Selvicultura Preventiva de la Comunidad Valenciana de la Conselleria de Territorio y Vivienda (1995). La integración de ambas variables, topografía y modelos de combustible, se ha realizado por medio de una tabla de riesgo (cuadro 2). Los resultados indican que más del 53% de la superficie forestal presenta alto riesgo de propagación (figura 3).

Cuadro 2. Riesgo de propagación de incendios según combustible y pendiente

Pendiente	**Modelo de combustible**		
	1, 2	8	4,5,6 y7
< 12%	Bajo	Bajo	Medio
12-35%	Bajo	Bajo	Alto
>=35%	Medio	Medio	Alto

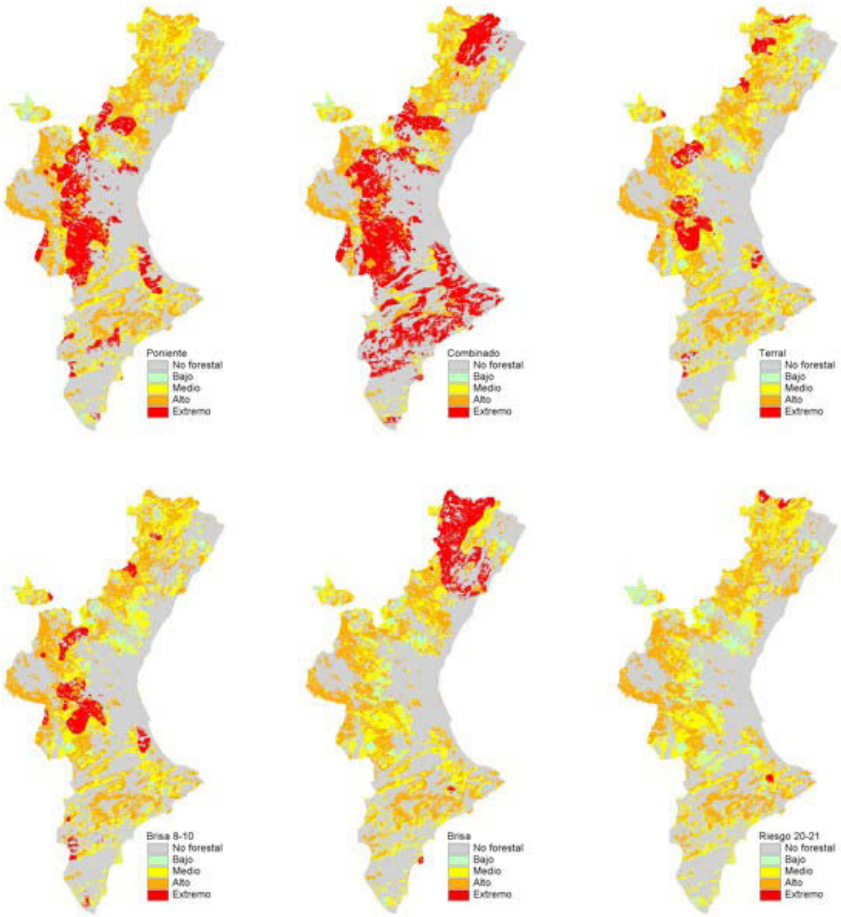


Figura 3. Mapas de riesgo de propagación para poniente, ciclo combinado, brisa terral, brisa 08-10h, brisa marina y brisa 20-21h.

Para identificar las situaciones sinópticas con mayor riesgo de propagación, el índice de riesgo se ha combinado con el respectivo índice de la velocidad del viento por medio de una tabla de doble entrada (cuadro 3).

Cuadro 3. Integración del índice de velocidad de viento con el riesgo de propagación por medio físico.

	Índice velocidad viento				
Riesgo propagación	0-20%	20-40 %	40-60%	60-80 %	80-100%
Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto
Medio	Bajo	Medio	Medio	Extremo	Extremo
Alto	Medio	Alto	Alto	Extremo	Extremo

Los resultados indican una estrecha relación entre el índice promedio de velocidad del viento para las distintas direcciones y las áreas de riesgo de propagación. De hecho, se confirma que la situación sinóptica de ciclo combinado se revela como la más peligrosa para la propagación de incendios forestales en la Comunidad Valenciana (con un 57% de la superficie forestal con riesgo extremo), seguida, aunque a distancia, por la de poniente (24%) o brisas. Por zonas, el índice de riesgo es extremo en el interior de Valencia en las situaciones de ciclo combinado y poniente, el círculo montañoso que circunda el óvalo de Valencia, lo cual está en consonancia con la gran incidencia de incendios en estas zonas; el Norte de la Comunidad Valenciana tiene un índice extremo de propagación bajo la situación de brisa y de ciclo combinado y, en la provincia de Alicante, los índices de propagación extremos se presentan con las situaciones de ciclo combinado, quedando el poniente con un índice mayoritariamente medio-alto. Durante el cambio de dirección entre la brisa terral y la brisa marina (de 8 a 10h UTC) el mapa de riesgo muestra un esquema similar al de la brisa terral, aunque con disminución de la zona de riesgo extremo. En la transición de brisa marina a terral se observa una disminución de las zonas de riesgo extremo, que se reducen a dos pequeñas áreas en el Norte de Castellón y prelitoral Norte de Alicante.

CONCLUSIONES

A tenor de los resultados obtenidos de los diversos análisis realizados podemos afirmar:

1. Se han podido determinar las situaciones sinópticas de mayor riesgo asociadas a los incendios forestales en la región de estudio, en nuestro caso la Comunidad Valenciana.
2. Se han definido e identificado las áreas de mayor riesgo de propagación de incendios forestales para cada una de las situaciones meteorológicas definidas.
3. Queda patente la necesidad/utilidad de un buen conocimiento de las situaciones meteorológicas favorables a la ignición y/o propagación de incendios forestales.
4. La cartografía de vientos de alta resolución para situaciones sinópticas de riesgo es un instrumento novedoso y con un gran potencial para apoyo en la planificación por parte de los poderes públicos en la lucha contra el fuego.

5. Esta herramienta permite mejorar los índices de riesgo de incendio basados solamente en modelos de combustible, condicionantes orográficos u otros parámetros meteorológicos como la humedad (o incluso el viento), que no contemplan la evolución de la situación sinóptica. Los índices de riesgo de ignición se pueden combinar con los que muestran el riesgo de propagación y la evolución posterior de las zonas donde se haya producido la ignición.
6. Por último, los autores consideran que el uso de esta técnica de combinación de cartografía de viento de alta resolución con modelos de combustible presenta un gran potencial para su aplicación en tiempo real a la extinción de incendios forestales.

REFERENCIAS

Brotak, E.A., and Reifsnyder, W.E, 1976: Synoptic study of the meteorological conditions associated with extreme wildland fire behaviour. *Proceedings of the Fourth National Conference on Fire and Forest Meteorology, November 16-18, St Louis, Missouri,* US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report RM-32.

Carrega, P., 1991: A meteorological index of forest fire hazard in Mediterranean France. *Int. Jour. Wildland Fire*, 1, 79-86.

Chandler, C., P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud, and D. Williams, 1991: *Fire in forestry. Volume I. Forest Fire Behaviour and Effects*. Krieger Publishing Company, 450 pp.

Chuvieco E., Salas F., Carvacho L., Rodríguez F., 1999: Integrated fire risk mapping. In: *Remote Sensing of Large Wildfires*. Chuvieco Ed. Springer, Berlin. 61-84 pp.

Gómez, J., 2000: La experiencia de la Comunidad Valenciana: el proyecto de implantación de un sistema integrado de gestión de las actuaciones de prevención de incendios forestales. In: *I Jornada técnica sobre prevención de incendios forestales*, 15 p.

ICONA, 1988: *Experimentación de un nuevo sistema para la determinación del peligro de incendios forestales derivados de los combustibles: Instrucciones de cálculo*. ICONA, Ministerio de Agricultura, Madrid.

Johnson, E. A, 1992: *Fire and vegetation dynamics: Studies from the North American boreal forest*. Cambridge University Press, Cambridge, 129 p.

Millán, M. M., B. Artíñano, L. Alonso, M. Navazo, and M. Castro, 1991: The effect of mesoscale flows the regional and long-range atmospheric transport in the western Mediterranean area. *Atmos. Environ*. 25A, 949-963.

Millán, M. M., B. Artíñano, L. Alonso, M. Castro, R. Fernandez-Patier, and J. Goberna, 1992: *Meso-meteorological Cycles of Air Pollution in the Iberian Peninsula, (MECAPIP)*, Contract EV4V-0097-E, Air Pollution Research Report 44, (EUR Nº 14834) CEC-DG XII/E-1, Rue de la Loi, 200, B-1040, Brussels, 219 pp.

Millán, M. M., R. Salvador, E. Mantilla, and B. Artíñano, 1996a: Meteorology and photochemical air pollution in southern europe: experimental results from EC research projects. *Atmos. Environ.*, 30, 1909-1924.

Millán, M. M., R. Salvador, E. Mantilla, and G. Kallos, 1996b: Photo-oxidant dynamics in the Western Mediterranean in Summer: Results from European Research Projects.To be Published in *J. Geophys. Res.*

Moreno, J. M., and W. C. Oechel, Eds., 1994: *The Role of Fire in Mediterranean type Ecosystems*. Springer Verlag, 201 pp.

Pausas J., Vallejo R., 1999: The role of fire in European Mediterranean. In: *Remote Sensing of Large Wildfires*. Chuvieco Ed. Springer, Berlin. 4-16 pp.

Rothermel, R.C., 1983: *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Repot INT-143.

Trabaud, L., 1982: Effects of past and present fire on the vegetation of the French Mediterranean region. *Symp. Dynamics, Manage. Medit. Type Ecosyst*. USDA Forest Serv. Gen. Tech. Rep. PSW -58: 450-457. Pacific Southwest Forest and Range Exp. Stn.

Vallejo V.R. and Alloza J.A. 1998. The restoration of burned lands: the case of Eastern Spain. In: Moreno J.M. (ed), *Large Forest Fires*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp. 91–108

Vélez, R.., 2000: *La defensa contra incendios forestales*. Ed. Mundi Prensa. Madrid, cap. 22.

Velasco, L., 2001. Planificación de redes de áreas cortafuegos para la defensa del monte frente al riesgo de incendios forestales. In: *Foresta* nº 13, 128-132.

Cartografia del riesgo de incendios forestales en el área de Sierra Espuña - Gebas (Murcia)

Y. Alvarez Rogel

Departamento de Geografía Física, Humana y Análisis Regional. Universidad de Murcia, C/Santo Cristo 1, 30.001 Murcia.

RESUMEN

En este trabajo se muestra la elaboración de una cartografía del riesgo de incendios forestales a partir de la integración en un SIG de diversos factores atmosféricos, topográficos, biológicos y humanos que confluyen en el territorio y que resultan determinantes en el inicio y posterior desarrollo del incendio. La zona de estudio abarca la totalidad del Parque Regional de Sierra Espuña y el Espacio Natural Protegido de los Barrancos de Gebas ubicado al Este.

Los mapas de riesgo se elaboran para diversas situaciones hipotéticas promedio de agosto, mes en que se registran las máximas temperaturas en todos lo observatorios meteorológicos de la zona, y que es además, el que presenta un mayor número de incendios para el periodo analizado.

Las variables consideradas en la determinación del riesgo son: la probabilidad de ignición (que contempla el grado de sombreado y humedad del combustible y la temperatura), el riesgo asociado a la vegetación (dependiente de la velocidad de propagación de las llamas en función del modelo combustible y bajo las condiciones meteorológicas y topográficas particulares de la zona) y el factor de riesgo antrópico (que tiene en cuenta la localización preferente del inicio del fuego y su incidencia histórica sobre el territorio).

Palabras Clave: *Incendio forestal, riesgo de incendio, Probabilidad de Ignición, Modelo combustible, SIG.*

ABSTRACT

This papers shows the methodology to create a cartography of forest fires risk using GIS.

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

This method takes into account topography, biology, atmospheric and human factors. The study area is Regional Park Sierra Espuña and Gebas.
Using GIS and different termical situation has been created maps of forest fire risk. Several factor such as ignition probability (in relation with humidity, shady vegetation, and temperature), combustible models (including velocity of burning with topographic and meteological conditions) and historical and human influence have been considered in order to create maps of forest fire risk.

Key Words: *Forest fire, fire risk,Ignition probability, combustible model, GIS.*

INTRODUCCIÓN

El Parque Regional de Sierra Espuña se encuentra ubicado en la zona centro-occidental de la provincia de Murcia. Junto a él y anexionado por el noreste se encuentra el área de los Barrancos de Gebas, declarada en 1995 paisaje protegido. Los antecedentes históricos legales destinados a proteger y conservar este territorio, los primeros estudios datan de 1889, ponen de manifiesto su importancia en el contexto regional.

La superficie considerada, 23.366,4 hectáreas, es superior a la contemplada en el Plan de Ordenación, ya que los límites se establecen aprovechando la presencia de infraestructuras (carreteras, caminos, conducciones artificiales de agua), cauces naturales, etc., que puedan comportarse como obstáculos o barreras que retardan o frenan la propagación del fuego.

Aprovechando las posibilidades que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica para el estudio de variables regionalizadas, se elabora una cartografía del riesgo de incendio forestales a partir de la propuesta desarrollada para un sector de la Sierra de Gredos por *Salas Rey* (1994), que considera los factores atmosféricos, topográficos biológicos y humanos particulares del territorio, basándose para su formulación en una serie de modificaciones sobre el esquema general del Grado Actual de Peligro de Incendios de ICONA.

Los ensayos se realizan para dos situaciones hipotéticas promedio de agosto, mes de máximas temperaturas en todos los observatorios meteorológicos del área de estudio. La metodología es la misma en ambos supuestos, que difieren únicamente en los parámetros térmicos empleados: temperaturas máximas absolutas mensuales y media de medias mensuales, siempre referidas al mes de agosto, con el objetivo de valorar la influencia de esta variable en la zonación del riesgo.

Las variables que intervienen en el modelo se representan espacialmente como imágenes en formato digital, georreferenciadas mediante coordenadas UTM. La cartografía base se encuentra a escala 1:25.000 y se ha optado por emplear una resolución espacial de 15 x 15 metros, es decir, 225 m^2 por píxel (*Goodchild*, 1993). Se trata de una serie de ficheros raster, en formato *.IMG de IDRISI, todos de idéntico tamaño (1.855 filas y 2.591 columnas) cuyas coordenadas extremas son: *x mínima* = 609803,6, *x máxima* = 648678*,5; y mínima = 4179296, y máxima = 4207129*.

El documento básico para conocer la evolución histórica de los incendios forestales en un

área determinada es el Parte de Incendio Forestal. Estos documentos, que aportan una información esencial aunque limitada (*Alvarez Rogel,* 2001), son cumplimentados por el personal de los servicios de extinción cada vez que intervienen en el control y extinción de un incendio. Se analizan un total de 2820 partes de incendios correspondientes al periodo 1985-2003.

El índice de riesgo *(Rl)* considera tres subíndices: Probabilidad de Ignición *(PI)*, Índice de Riesgo derivado de la vegetación *(V)* y Factor de Riesgo Humano *(RH)*, integrando los resultados de forma cuantitativa mediante la expresión $Rl = (PI/10) \times V + RH$.

DESARROLLO DEL TRABAJO

Temperaturas máximas absolutas de agosto

La probabilidad de ignición *(PI)* se extrae de una tabla creada por ICONA, que requiere conocer previamente la humedad básica del combustible *(HBC)*, deducida a partir de los datos de temperatura y humedad relativa, sobre la que se aplican una serie de coeficientes correctores en función de la pendiente, orientación y sombreado de las formaciones vegetales.

La distribución espacial de las temperaturas máximas absolutas de agosto se obtiene mediante una ecuación de regresión simple entre los registros térmicos extremos de las estaciones meteorológicas de la zona que cuentan con este tipo de información (Alhama Huerta Espuña, Librilla, Totana Alquerías, Totana IL, Totana Sr. Muñoz y Zarpadilla de Totana, para el periodo 1968-2002). A partir de estos valores puntuales se elabora el mapa de temperaturas de máximas absolutas de agosto, mediante una regresión desarrollada con el método *Stepwise*, que contempla únicamente la influencia de la altitud, y excluye del modelo la longitud y latitud debido a su escasa significación.

La recta y = 39,87 - 0,007 x altitud, con un coeficiente de correlación r = - 0,98, se aplica al modelo digital de terreno generando una nueva imagen donde el valor de los píxeles representa la temperatura máxima absoluta de agosto. Este fichero se reclasifica determinando la superficie ocupada por cada uno de los rangos térmicos contemplados en las tablas de doble entrada, temperatura y humedad relativa, elaboradas por ICONA para distinta franja horaria, y que se utilizan para determinar la humedad básica del combustible. Se utiliza el intervalo de 8:00 a 20:00 hora solar (cuadro 1), ya que sólo el 16,7 por ciento de los incendios documentados en Sierra Espuña se producen fuera de este intervalo horario

Para corregir esta humedad se emplean otras tablas también de ICONA en función del mes, donde se contempla la influencia de la pendiente, orientación, grado de exposición de los combustibles e intervalo horario de mayor incidencia de incendios. En el cuadro 2 se reproduce el fragmento correspondiente al mes de agosto, el más crítico para la zona de estudio. Su aplicación a Sierra Espuña y Gebas requiere disponer de una imagen raster de las orientaciones considerando únicamente los cuatro puntos cardinales. El software Idrisi genera automáticamente la imagen de orientaciones a partir del modelo digital del terreno y mediante reclasificación se integran en la categoría sur las orientaciones sureste, suroeste y llano mientras que los píxeles orientados al noreste y noroeste se incluyen en la categoría norte.

Cuadro1. Obtención de la humedad básica del combustible (HBC) (Día, 8:00 a 20:00 hora solar)

T ºC	Humedad relativa (%)																				
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	4	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84	89	94	99	
< 0	1	2	2	3	4	5	5	6	7	8	8	8	8	9	10	11	12	12	13	13	14
0-9	1	2	2	3	4	5	5	6	7	7	7	8	9	9	10	10	11	12	13	13	13
10-20	1	2	2	3	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	11	12	12	12	13
21-31	1	1	2	2	3	4	5	5	6	7	7	8	8	8	9	10	10	11	12	12	13
32-42	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	7	8	8	8	9	10	10	11	12	12	13
> 43	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	7	8	8	8	9	10	10	11	12	12	12

Cuadro 2. Factor de corrección del contenido en humedad del combustible para el mes de agosto

Expuesto (menos del 50 % de los combustibles en sombra)							
		Hora Solar					
Orient	Pend.%	8:00 10:00	10:00 12:00	12:00 14:00	14:00 16:00	16:00 18:00	18:00 20:00
Norte	0-30	3	1	0	0	1	3
	>30	4	2	1	1	1	4
Sur	0-30	3	1	0	0	1	3
	>30	3	1	1	1	1	3
Este	0-30	2	1	0	0	1	4
	>30	2	0	0	1	3	5
Oeste	0-30	3	1	0	0	1	3
	>30	5	3	1	0	0	2
Sombreado (más del 50 % de los combustibles en sombra o nublado)							
Norte	>0	5	4	3	3	4	5
Sur	>0	4	4	3	3	4	5
Este	>0	4	4	3	4	4	5
Oeste	>0	5	4	3	3	4	4

La corrección de la humedad requiere considerar también el tipo de combustible y su grado de exposición al sol para, a partir de estos datos, establecer una valoración según la pendiente de los píxeles que presentan las orientaciones básicas. Desestimando la presencia de nubosi-

dad, poco probable en el mes de agosto, la exposición se vincula directamente a las características de las formaciones vegetales.

El paisaje vegetal de Sierra Espuña se compone básicamente de pinares heredados de las repoblaciones del siglo XIX. Su conservación ha sido mejor en las umbrías, donde presentan un sotobosque bien desarrollado formado por especies características del matorral mediterráneo como la coscoja *(Quercus coccifera)*, enebro *(Juniperus oxycedrus)* o lentisco *(Pistacea lentiscus)*, dando paso en las zonas más secas a matorrales de menor porte como el esparto *(Stipa tenacissima)*, romero *(Rosmarinus officinalis)* y tomillo *(Thymus s.p.)*, entre otros. En las cumbres más elevadas aparecen sabinares de sabina negra *(Juniperus phoenicea)* y formaciones almohadilladas destacando la tollaga o "cojín de monja" *(Erinacea anthyllis)*. El carrascal o encinar *(Quercus rotundifolia),* que siglos atrás debió cubrir buena parte de la sierra, se encuentra hoy reducido a pequeños retazos muy localizados y aparece formando bosquetes mixtos con pinar. En el área de Gebas, el sustrato margoso con abundantes sales, condiciona un escaso desarrollo de la cobertura vegetal en este sector. La presencia de individuos aislados de ciprés, fresno o cedro, son testimonio de la acción humana sobre el medio (*M.A.P.A*, 1996).

La cartografía más completa disponible sobre la vegetación de Sierra Espuña y su entorno forma parte de los estudios previos llevados a cabo por la *Agencia Regional para el Medio Ambiente y la Naturaleza* (1993) para la elaboración del Plan de Ordenación de Recursos Naturales de la sierra. Partiendo de esta información, que se completa con los datos procedentes del Catastro de Rústica de la Comunidad Autónoma de Murcia, trabajos de campo e información adicional extraída de publicaciones específicas, se elabora el mapa de vegetación que constituye la base para la cartografía de modelos combustibles.

Basándose en el elemento responsable de la propagación del fuego (pasto, hojarasca, restos de cortas, etc.) *Rothermel* (1972, 1983*)* establece trece modelos, definidos por la presencia de una serie de combustibles-tipo, que son incorporados por los programas de simulación y combate de incendios forestales BEHAVE (*Andrews*, 1986), CARDÍN (*Martínez-Millán et al.,*1997) y FARSITE (*Finney*, 1997) para analizar el comportamiento del fuego en incendios de superficie.

El mapa de modelos combustibles se genera a partir de la reclasificación de la imagen de vegetación de manera que la superficie forestal, que constituye el 85,3 por ciento del total, presenta un claro predominio en el grupo de arbolado, modelos 8 (pinar bajo, carrascal y pinar con matorral bajo) y 9 (pinar alto y pinar alto con carrascal). Ocupan la mayor parte de la vertiente meridional y se extienden de oeste a noreste (de forma paralela al límite norte), separando las zonas agrícolas más septentrionales respecto del grupo de matorrales que ocupa una posición central. Este último, donde se integran los modelos 4 (repoblaciones recientes), 5 (matorral bajo), 6 (matorral alto) y 7 (matorral de alta montaña), representa el 33,5 por ciento de la superficie forestal, aunque casi la mitad corresponde exclusivamente al modelo 6. La presencia del modelo 1 (matorral de margas y cultivos abandonados) no alcanza el 10 por ciento, y se localiza mayoritariamente sobre las margas del paraje de los Barrancos de Gebas, además de algunos puntos concretos del sur y sureste y un pequeño enclave rodeado de pinares en el noroeste.

El grado de exposición al sol de los combustibles se utiliza para corregir su contenido en humedad. Se considera el grupo de bosques o arbolado como áreas con más del 50 por ciento del combustible en sombra frente al conjunto de matorrales y pastizal donde el menor porte facilita una acción directa de los rayos del sol (menos del 50 por ciento en sombra). Manteniendo esta dualidad y mediante operaciones de reclasificación y superposición en IDRISI, se obtiene la superficie de cada intervalo de pendiente (menor y mayor del 30 por ciento) para cada una de las orientaciones básicas: norte, sur, este y oeste.

El factor de corrección de la humedad del combustible depende del intervalo horario con mayor número de incendios, deducible de los Partes de Incendios. Esta información que permite conocer la franja horaria en la que se produce el mayor número de sucesos, está siempre referida a la hora local del lugar del incendio. En la zona de estudio y para el mes de agosto presenta un desfase de dos horas respecto a la solar (cuadro 3). Aquellos eventos cuya hora de detección coincide con la frontera entre dos intervalos consecutivos, se consideran incluidos siempre en el primero, ya que se asume un margen mínimo de cinco minutos desde que se inicia el fuego hasta que éste es detectado.

Cuadro 3. Frecuencia horaria de los incendios forestales en Sierra Espuña-Gebas (1985-2003).

Detección (hora local)	**Número incendios**	**Intervalo (hora solar)**
03:15	1	
05:00	1	
09:30	2	
10:00	1	
11:30	2	
12:00	2	08:00-10:00
12:30	1	
13:00	5	
13:30	1	
13:45	2	10:00-12:00
14:00	4	
15:00	2	
15:15	2	12:00-14:00
16:00	1	
16:45	1	
17:00	5	14:00-16:00
18:00	1	
18:15	1	
19:45	1	16:00-18:00
20:00	3	
21:00	2	18:00-20:00
23:00	1	

De acuerdo con este criterio, se utiliza el intervalo de 10:00 a 12:00 hora solar, para corregir la humedad del combustible. Mediante adición y superposición de imágenes se obtiene un fichero *raster* que refleja la distribución espacial de este coeficiente. Los valores oscilan entre 0 y 3 para el conjunto formado por los modelos de pastizal y matorral según su orientación y pendiente, situándose en 4 para el grupo de bosques.

El contenido total de humedad del combustible *(HC)* se estima mediante la adición de la humedad básica *(HBC)*, que tiene un valor de 8 para toda la zona, deducido a partir del cuadro 1 y el factor de corrección que se acaba de obtener. Su distribución espacial presenta los valores más altos (HC=12) en las laderas arboladas de Espuña, disminuyendo ligeramente hacia las cumbres más elevadas ocupadas por matorrales de alta montaña. Al Este, la presencia de formaciones poco desarrolladas, propias del sustrato margoso, condiciona el predominio de humedades entre 9 y 10. Los valores más bajos, HC=8, corresponden a enclaves aislados y desprovistos de vegetación, distribuidos de manera irregular por todo el territorio, aunque son especialmente significativos en el área de Gebas.

A partir de la humedad del combustible, y dependiendo del sombreado y la temperatura, se obtiene la probabilidad de ignición en porcentajes, mediante los valores tabulados por ICONA (anexo 1), donde la exposición al sol se agrupa en cuatro categorías: 0-10 por ciento, 10-60 por ciento, 60-90 por ciento y 90-100 por ciento. Manteniendo el criterio anterior, se obvia la posibilidad de nubosidad y se consideran en el tercer intervalo los modelos combustibles del grupo de bosques (8 y 9). Aunque algunos matorrales pueden presentar porcentajes de sombreado superiores al 10 por ciento, los modelos 1, 4, 5, 6 y 7 se incluyen en el primer intervalo, suponiendo las condiciones más extremas, con un escaso desarrollo de la cubierta como consecuencia las exiguas precipitaciones y rigores térmicos estivales.

Teniendo en cuenta la distribución de temperaturas absolutas del mes de agosto y los datos de humedad, se calcula la *probabilidad de ignición*, cuya distribución espacial se obtiene mediante procesos de *overlay* y álgebra de mapas. Los resultados ofrecen un rango de variación para el primer componente del índice entre 20 y 50 por ciento. El predominio de temperaturas máximas absolutas para el mes de agosto por encima de los 30 ºC en buena parte del territorio hace que la superficie ocupada por la probabilidad de ignición entre 20 y 40 por ciento sea similar. Los valores extremos, PI = 50, sólo afectan al 2,9 por ciento del territorio, y aparecen dispersos en el interior de las zonas con probabilidad de ignición inmediatamente inferior (PI = 40).

Prácticamente la totalidad de los matorrales de margas del área de Gebas y del matorral bajo que integra el modelo combustible 5 presenta una probabilidad de ignición mayor o igual al 40 por ciento, el mismo rango que afecta a más del 80 y 70 por ciento de las repoblaciones y el matorral alto respectivamente. El intervalo del 30 por ciento de ignición es el más extenso, representando el 34,3 por ciento del área de estudio. Afecta a las repoblaciones y matorrales altos y bajos que ocupan las posiciones más elevadas dentro del territorio, así como a los modelos combustibles 8 y 9 que aparecen por debajo de los 750 metros de altitud.

El segundo elemento del índice de riesgo de incendios, $Rl = (PI/10) \times V + RH$, es el *Riesgo Asociado a la Vegetación*, *V*, deducible de los coeficientes de peligrosidad establecidos por ICONA para cada uno de los modelos combustibles, aunque estos valores son demasiado

generales para utilizarlos en estudios de detalle. Para el área de estudio resulta más adecuado manejar programas como BEHAVE (*Green,* 1983), que permiten determinar la velocidad de propagación de las llamas bajo las condiciones meteorológicas, topográficas y de vegetación particulares de este espacio.

Dado que este software ha sido diseñado para situaciones y momentos concretos, se ha estimado conveniente aplicarlo a condiciones específicas de alto riesgo. Con dicha finalidad se ha seleccionado el día 5 de agosto, considerado el día con mayor número de incendios del mes más crítico. La hora elegida son las 11:00 (hora solar) coincidiendo con el centro del intervalo horario de máximo riesgo diario (10:00-12:00 hora solar). También se contempla la altitud y pendiente media, 749,3 metros y 36,6 por ciento respectivamente, extraídas del modelo digital del terreno.

Las variables meteorológicas consideradas son la humedad relativa (56,3 por ciento) y la temperatura media de máximas absolutas de agosto 34,8 ºC (valor deducido a partir de la imagen de temperaturas máximas absolutas obtenidas por regresión). La velocidad media del viento para el mes analizado es de 6,7 km/h en Alcantarilla y 6,3 km/h en Lorca Cerealicultura, observando en ambas estaciones un predominio de los vientos del primer cuadrante que suponen el 83,3 por ciento y el 100 por cien respectivamente del total de situaciones mensuales. La dirección del viento utilizada en el ensayo es la noreste y la velocidad media 7 km/h, valor ligeramente superior al de Alcantarilla aunque sin duda, por debajo de los datos reales, debido, entre otros factores, al efecto ejercido por los valles que se convierten en auténticos "túneles" que canalizan las corrientes. Como premisa inicial se admite un día soleado, con ausencia de nubes y una situación meteorológica estable sin cambios previsibles de tiempo.

El programa requiere también el porcentaje de cubierta de copas de la vegetación, suponiendo la presencia de un follaje maduro. Manteniendo el criterio anterior, se establece una cobertura del 60 y 70 por ciento para los modelos 8 y 9 respectivamente; 10 por ciento para las repoblaciones llevadas a cabo en los últimos veinte años y coberturas del 6 por ciento y 4 por ciento para matorrales altos y matorrales bajos. El modelo 1 y el matorral de alta montaña se consideran totalmente desprotegidos.

Los resultados de propagación se utilizan para ponderar la importancia de cada uno de los modelos combustibles analizados, asignando un valor de 10 al que presenta una mayor velocidad y determinando, mediante una regla de tres, el grado de riesgo de los demás (cuadro 4). La valoración del riesgo para cada modelo combustible se realiza a partir de la adaptación de los umbrales establecidos por *Correia*, 1996, que clasifica los incendios según la velocidad de progresión del fuego.

El mayor riesgo corresponde al modelo 4, coincidiendo con aplicaciones del programa realizadas para otros escenarios por *Anderson* (1982, 1983), *AMA y Tragsatec* (1993) y *Salas Rey* (1994). El mismo paralelismo se observa en el modelo 9, confirmándose como el de menor riesgo. Las diferencias entre los demás modelos pueden atribuirse a las particulares condiciones topográficas, y sobre todo meteorológicas, que intervienen en cada uno de los ensayos.

La distribución espacial del riesgo asociado a la vegetación, *V*, deriva de la imagen de modelos combustibles, asignando a cada uno de ellos el grado de riesgo correspondiente.

El último parámetro del índice, introducido con carácter aditivo, es el *Factor de Riesgo*

Cuadro 4. Grado de riesgo de los modelos combustibles en Sierra Espuña-Gebas, resultante de la aplicación de BEHAVE. Estimación a partir de las temperaturas máximas absolutas de agosto

modelo combustible	velocidad propagación (metros/minuto)	grado de riesgo	valoración del riesgo*
1	22,1	8,5	extremo
4	26,0	10,0	extremo
5	10,2	3,9	alto
6	8,4	3,2	moderado
7	10,2	3,9	alto
8	5,5	2,1	moderado
9	3,2	1,2	bajo

* < 1,5 bajo; 1,5 - 3,5 moderado; 3,5 - 7,5 alto; > 7,5 extremo

Antrópico. Los Partes de Incendio de los cuarenta y dos sucesos ocurridos en la zona en el periodo considerado evidencian que un alto porcentaje de sucesos comienzan junto a carreteras, caminos o sendas, por lo que la cartografía del riesgo asociado al hombre se centra en las vías de comunicación. Se establece un corredor de proximidad de 150 m a partir del eje central de cada una de las vías, estableciendo tres categorías: a) carreteras principales y su corredor de proximidad, b) caminos y sendas con su corredor de proximidad y c) resto del territorio forestal.

A partir de esta cartografía y teniendo en cuenta la información sobre la localización preferente del inicio del fuego y el número total de incendios ocurridos, se deducen los incendios esperados para cada categoría (IEi= Itotal x(%Sup.i/100)) (cuadro 5). Partiendo de estos resultados se utiliza la categoría "otros", asignándole valor 1, para obtener un coeficiente que pondere la importancia de los demás. Éste se obtiene de dividir el número de incendios observados y esperados en ésta categoría (a). El riesgo para cada categoría, excepto la base "otros", viene determinado por el cociente entre los incendios registrados y los esperados corregidos por el factor que se acaba de obtener. Los cálculos se detallan en el cuadro 6.

Con esta categorización se genera la imagen correspondiente al riesgo antrópico mediante reclasificación de la imagen original resultante de la digitalización de las vías de comunicación y su zona de influencia.

Cuadro 5. Localización preferente del inicio del fuego en Sierra Espuña-Gebas (1985-2003).

	Categorías (i)			
	carreteras	**caminos**	**otros**	**total**
nº incendios observados (IO)	12	9	21	42
% superficie ocupada (Sup.)	11,4	35	53,6	100
nº incendios esperados (IE)	4,8	14,7	22,5	42

Cuadro 6. Cálculo del índice de riesgo asociado al hombre.

Categorías	IOi	IEi	(IOi/IEi) x a	Grado de riesgo
Carreteras	12	4,8	2,5	2,3
Caminos	9	14,7	0,6	0,6
otros	21	22,5	---	1,0

IOi: número de incendios registrados en cada categoría; IEi: número de incendios esperados en cada categoría
a: coeficiente de ponderación del riesgo (22,5/21=0,93)

Finalmente el índice de riesgo Rl=((PI/10) x V + RH)), se obtiene mediante operaciones de álgebra de mapas. El resultado es un fichero donde los píxeles pueden presentar un valor extremo para *Rl* de 102,3 y que corresponde a una situación donde todos los parámetros que interviene alcanzan su máximo: PI=100, V=10 y RH=2,3. A partir de estos valores y manteniendo las proporciones del Índice de Riesgo Local de Incendios de ICONA donde el máximo posible es 1000, se establecen cuatro intervalos para catalogar el riesgo en Sierra Espuña-Gebas (cuadro 7).

Cuadro 7. Valoración del riesgo local de incendio en Sierra Espuña - Gebas.

Valores de Rl	Grado de riesgo
< 2,56	Bajo
2,56 – 10,23	Moderado
10,23 – 30,69	Alto
> 30,69	Grave

En función de estos resultados se reclasifica la imagen resultante del proceso anterior elaborando así el mapa de riesgos del área (figura 1).Uno de los rasgos más destacados del mapa es la ausencia de zonas catalogadas como de riesgo bajo, hecho que puede deberse a que se trabaja con la situación más desfavorable, considerando las temperaturas máximas absolutas del mes más cálido. No obstante, casi el 60 por ciento del territorio queda dentro de la categoría de moderado, coincidiendo con la presencia mayoritaria en el área de estudio de los modelos combustibles 8 y 9 que son los que ofrecen mayor resistencia a ser atacados por el fuego. La influencia del factor antrópico, especialmente en la vertiente meridional donde aparecen vías de comunicación catalogadas como de máximo riesgo, queda atenuada por los valores de probabilidad de ignición, que son los más bajos de todo el territorio.

Las zonas consideradas con riesgo alto abarcan la totalidad de la superficie ocupada por

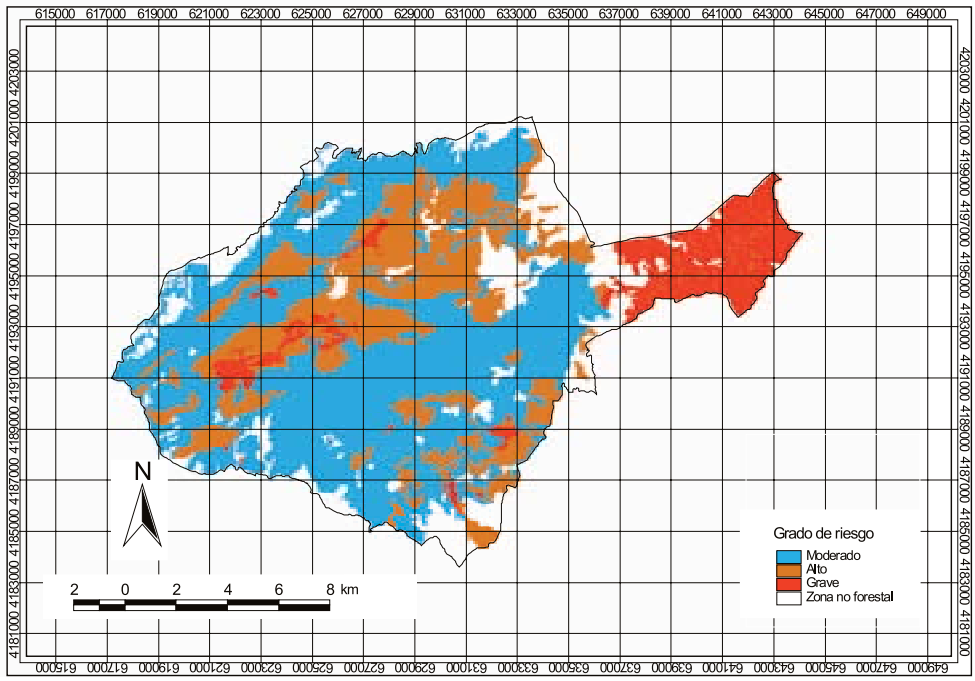


Figura 1. Cartografía del riesgo de incendios a partir de las temperaturas máximas absolutas de agosto.

los modelos combustibles 5, 6 y 7, donde la velocidad de propagación de las llamas se sitúa en torno a los 0,6 km/h. También incluye retazos dispersos de matorral de margas con la menor probabilidad de ignición del área de Gebas y algunas repoblaciones que corresponden en su mayor parte al interior de la sierra, donde, pese al descenso térmico que acompaña a la altitud, prevalece la influencia de la máxima velocidad de avance de las llamas para el modelo combustible 4. Tampoco se observa en este caso, una especial incidencia del factor antrópico frente a los otros dos componentes del índice que resultan determinantes en la zonación del riesgo. Al considerar los registros térmicos extremos se acentúa la importancia de la probabilidad de ignición y con ello el peso ejercido por el primer término de la ecuación, que contrarresta el carácter aditivo del riesgo antrópico.

El riesgo grave se limita a los modelos combustibles 1 y 4, afectando por tanto a matorrales de margas, cultivos abandonados y repoblaciones recientes. El 80 por ciento de estas formaciones se localizan en el área de los barrancos de Gebas, donde se registran temperaturas máximas absolutas para el mes de agosto por encima de los 35 ºC. También se incluye aquí más del 90 por ciento de las repoblaciones que aparecen en el interior de la sierra. Pese a encontrarse por encima de los 1.100 metros, donde las temperaturas descienden hasta los 27 ºC, las llamas se desplazan a través del modelo 4 a una velocidad de 1,6 km/h, que maximiza la influencia del segundo elemento del índice de riesgo y condiciona el riesgo grave de este sector.

Situación estival promedio: temperaturas medias de agosto

El proceso para la obtención de la probabilidad de ignición es el mismo que para los valores extremos. La ecuación de ajuste cuya expresión es y = 26,782 + 0,0034 x altitud, excluye longitud y latitud, presentando un coeficiente de correlación de -0,79 y las temperaturas medias de agosto presentan valores entre 21,3 y 26,1 ºC.

La cuantía y distribución espacial de la humedad del combustible (HC) es la misma que en el ensayo anterior, ya que también lo son los factores que intervienen en su determinación. Por un lado, la humedad básica del combustible (HBC) se eleva a 8, independientemente de la temperatura, pues la humedad relativa estimada es 56,3 por ciento, y por otro, al utilizar la misma serie de incendios, el factor de corrección dependiente del intervalo horario con mayor número de sucesos permanece constante. Los valores de ignición se obtienen a partir la tabla de doble entrada (anexo 1), donde se contemplan los nuevos intervalos térmicos correspondientes a cada grupo de sombreado.

El comportamiento de la probabilidad de ignición es similar al del ensayo anterior, correspondiendo los valores más bajos, 20 por ciento, a las zonas ocupadas por los modelos combustibles 8 y 9. El descenso térmico derivado de la utilización de valores medios mensuales implica una ignición máxima del 40 por ciento, frente al 50 por ciento que presentaban las temperaturas extremas. El mismo paralelismo se observa en las zonas con probabilidad de ignición del 30 por ciento, mientras que los matorrales de margas del área de Gebas, donde las máximas de agosto superaban los 30 ºC implicando una ignición del 50 por ciento, pasan al intervalo inmediatamente inferior. El resultado es el aumento de las zonas que presentan probabilidades de ignición del 40 por ciento, en el que se integran más de la mitad de los modelos combustibles 6 y 7, y casi las dos terceras partes de los cultivos abandonados, matorrales de margas y matorrales altos y bajos que forman parte de los modelos 1, 4 y 5.

El proceso para generar el mapa de riesgo asociado a la vegetación y la cuantificación del parámetro *V* de la ecuación del índice requieren de nuevo el empleo de BEHAVE, manteniendo invariables todos los parámetros excepto la temperatura, que en este caso corresponde al valor medio de las medias de agosto (24,2ºC). La velocidad de propagación de las llamas para cada modelo combustible se utiliza para cuantificar su riesgo (cuadro 8) y generar el fichero *raster* correspondiente.

Al disminuir la temperatura se produce una ralentización general del desplazamiento de las llamas a través de los combustibles, haciendo que en éste caso la peligrosidad del modelo 1 disminuya ligeramente pasando a clasificarse como de riesgo alto. Lo mismo sucede con los modelos 5 y 7, que entran a formar parte del grupo considerado como moderado.

El factor antrópico permanece constante, por lo que se utiliza la imagen generada en el ensayo anterior.

Cuadro 8. Grado de riesgo de los modelos combustibles en Sierra Espuña-Gebas, resultante de la aplicación de BEHAVE. Estimación a partir de las temperaturas medias de agosto

modelo combustible	velocidad propagación (metros/minuto)	grado de riesgo	valoración del riesgo*
1	10,2	6,8	alto
4	15,0	10,0	extremo
5	5,3	3,5	moderado
6	4,8	3,2	moderado
7	5,3	3,5	moderado
8	2,5	1,6	moderado
9	0,5	0,3	bajo

* < 1,5 bajo; 1,5 - 3,5 moderado; 3,5 - 7,5 alto; > 7,5 extremo

Una de las diferencias más significativas del mapa de riesgo de incendios confeccionado a partir de las temperaturas medias de agosto (figura 2) es la constatación de la presencia de zonas que poseen la categoría de riesgo bajo, ausente al considerar los valores térmicos extremos. Esta superficie, que representa el 41,4 por ciento del total, corresponde a las zonas ocupadas exclusivamente por el modelo combustible 9. La influencia del factor antrópico, anteriormente contrarrestada por los otros dos componentes del índice, queda patente sobre estas formaciones pasando a la categoría de moderado las zonas que se sitúan en los corredores de proximidad establecidos para las vías de comunicación asfaltadas, donde el riesgo antrópico se consideraba máximo.

El riesgo moderado, que abarca el 16,7 por ciento del área de estudio, queda integrado por la totalidad del modelo combustible 8 y el 14,3 por ciento de la extensión global del modelo 9 correspondiente a las zonas situadas a menos de 150 metros del eje central de las carreteras que discurren por el interior de la sierra. Todos los modelos del grupo de matorrales quedan dentro de la categoría de riesgo alto. Entre ellos destaca la inclusión de la totalidad de la superficie ocupada por el matorral de margas del área de Gebas. Las repoblaciones recientes, modelo 4, son las únicas zonas que conservan la categoría de riesgo grave.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para los diferentes ensayos muestran una relación directa entre el aumento de las temperaturas y el incremento del grado de riesgo de incendios forestales en Sierra Espuña y su entorno.

Se ha constatado que el carácter aditivo con que se introduce el factor antrópico resta protagonismo a este parámetro en situaciones donde el primer componente del índice es determinante en la zonación del riesgo. Al multiplicar la probabilidad de ignición y el factor

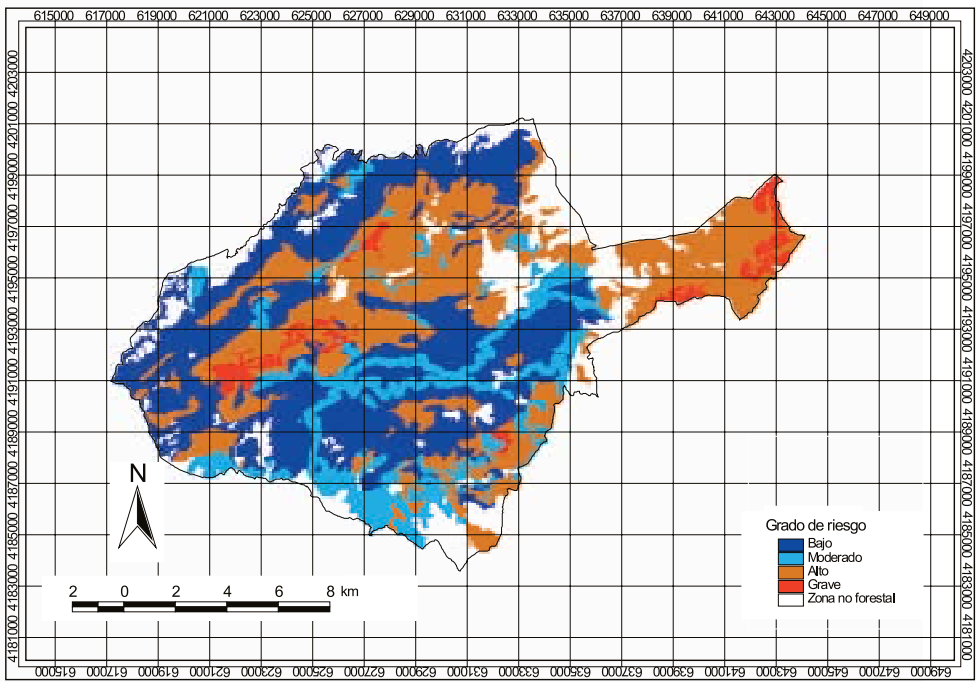


Figura 2. Cartografía del riesgo de incendios a partir de las temperaturas medias de agosto.

derivado de la vegetación se está primando las condiciones medioambientales dominantes en el territorio en el momento de realizar la estimación del riesgo, ya que en definitiva, el factor humano deriva del análisis de la incidencia histórica del fuego sobre el área de estudio. Por otra parte, la disponibilidad de medidas directas sobre el terreno, especialmente en relación a la humedad de los combustibles, o un ajuste más detallado de las tablas de ICONA utilizadas para su estimación y corrección a partir de la humedad relativa, permitiría mejorar la cartografía de la probabilidad de ignición, y con ello también los resultados obtenidos.

No obstante, el interés de este índice radica en la posibilidad de conocer la distribución espacial del riesgo sobre el territorio, frente a la propuesta de ICONA de realizar una estimación global. La aplicación del método de Salas Rey (1994) pone de manifiesto la conveniencia de considerar este paraje de la geografía murciana como de riesgo alto, al menos para los meses de julio y agosto, tal y como se recoge las memorias del Plan Infomur.

Por otra parte disponer de una cartografía que contemple la zonación del riesgo de incendio resulta de gran interés para planificar adecuadamente las tareas de prevención, cuyo análisis espacial puede verse facilitado en gran medida al integrar en un SIG las variables que intervienen en la ocurrencia de estos sucesos.

REFERENCIAS

Agencia Regional para el Medio Ambiente y la Naturaleza (1993): *Estudios Básicos para el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de Sierra Espuña*. Murcia. 2 Tomos, 690 p.

Alvarez Rogel, Y.; (2001): *Aplicación de tecnología SIG al estudio del riesgo y prevención de incendios forestales en el Área de Sierra Espuña-Gebas (Región de Murcia). Asociación Murciana de Ciencia* Regional, pp. 18-19.

AMA (C.A.M.): Agencia de Medio Ambiente, Comunidad Autónoma de Madrid y TRASATEC (1993): *Plan de protección contra incendios de los ecosistemas forestales de la Comunidad de Madrid.* Inédito

Anderson, H.E. (1982): *Aids to determininig fuel models for estimating fire behaviour,* USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep.INT - 122.

Anderson, H.E. (1983): *Predicting wind-driven wildland fire size and shape*. USDA For. Ser. Res. Rap. Note INT- 305.

Andrews, P.L. (1986): *BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system-Burn subsystem*, Part 1. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-194.

Correia, S. (1996): *Nociôins básicas de defesa de floresta contra incendios*. Direçâo geral de florestas. Portugal, 55 p.

Finney, M.A. (1997): *FARSITE: Fire Area Simulator. Users Guide and Technical Documentation*. Missoula, 119 p.

Goodchild, M.F.; 1993): "Data models and data quality: problems and prospects" En Goodchild, Parks y Steyaert (ed.), *Environmental modeling with GIS*. Oxford University Press, pp. 94-103.

Green. D.G. (1983): Shapes of simulated fires in discrete fuels. *Ecol. Mod*. nº 20, pp. 21-32.

M.A.P.A.: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (1996): *II Inventario forestal nacional, 1986-1995. Región de Murcia* - ICONA. Madrid. 160p.

Martínez Millán, J.; Saura, J.; Condés, S. (1997): Simulador de incendios forestales: CARDIN, *Ponencias del I Seminario Nacional sobre el Estado de la Investigación y el Desarrollo en Protección contra Incendios Forestales en España,* Lugo, pp. 27-34.

Rothermel, R.C; (1972): *A mathematical model for predicting fire sperad in wildland fuels*. USDA Forest Service, Res. Pap. INT- 115.

Rothermel, R.C; (1983): *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. USDA Forest Service, Gen. Tech. Rep. INT- 143.

Salas Rey, F.J. (1994): *Detección de áreas de riesgo de incendio forestal a partir de lo sistemas de información geográfica y la teledetección.* Tesis doctoral, Universidad de Alcalá de Henares. 613 P.

El empleo de clasificadores de contexto para la obtención de cartografía en la interfase urbano forestal

L. A. Arroyo Méndez[1], D. Cocero Matesanz[2], J. A. Manzanera de la Vega[3], L.G. García Montero[3] y C. Pascual Castaño[4]

(1) Departamento de Desarrollo Rural, Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria (IMIA), Finca El Encín, Autovía A-II Km. 38, 28800 Alcalá de Henares.
(2) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, C/ Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares.
(3) E.T.S.I. Montes, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, s.n., 28040 Madrid.
(4) Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales, Universidad Rey Juan Carlos, C/ Tulipán s.n., 28933 Móstoles.

RESUMEN

La obtención de clasificaciones digitales de la interfase urbano forestal (IUF) que puedan ser empleadas por los servicios contra incendios forestales en caso de necesidad es una tarea compleja, debido a la gran diversidad de elementos que componen estas áreas. Las técnicas de clasificación tradicionales, basadas en rasgos de la imagen a nivel de píxel, presentan ciertas limitaciones, como son la aparición de un característico efecto "sal y pimienta" o su reducida capacidad para extraer objetos de interés. Éstas resultan especialmente problemáticas al aplicarse en imágenes de moderada o alta resolución espacial, como ASTER, Spot, Ikonos o QuickBird. Una alternativa a dichos sistemas de clasificación pasa por un proceso previo de segmentación de la imagen. De esta forma, se permite el trabajo con la imagen a nivel de objeto, lo que amplía notablemente la cantidad de información que se puede extraer de la misma. En este trabajo hemos realizado una clasificación orientada a objetos para la cartografia de áreas de IUF. Para ello, se ha segmentado y clasificado una imagen QuickBird empleando el software eCognition, en el que la formación de objetos tiene lugar de forma que la homogeneidad interna se mantiene constante. Los objetos resultantes sirven de base para la posterior clasificación. La segmentación de la imagen y su posterior clasificación orientada a objetos permite superar las limitaciones inherentes a los sistemas de clasificación tradicionales, lográndose resultados positivos en el cartografiado de una urbanización situada en una zona de IUF.

***Palabras Clave**: Clasificación orientada a objetos, QuickBird, interfase urbano forestal.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

Obtaining digital classifications of Wildland-Urban Interface (WUI) areas which can be used by the fire management services in case it is needed is complex due to the large diversity of elements that constitute these areas. Traditional classification techniques, basically pixel-based approaches, are limited. Typically they produce a characteristic "salt and pepper" effect, and they are unable to extract objects of interest. These techniques have considerable difficulties dealing with the rich information content of medium and high resolution imagery, like ASTER, Spot, Ikonos or QuickBird images. One alternative to these classification systems can be a previous segmentation of the image to classify. This way, object-based work can be developed, and the amount of information that can be extracted increases. In this research, we have carried out an object-based classification within a WUI area. Therefore, a QuickBird image was segmentated and classified using eCognition software, which allows homogeneous image object extraction. The meaningful image object obtained were next used for the classification. Segmentation before classification worked out as an efficient image analysis technique, overcoming traditional approaches limitations. The WUI cartography obtained demonstrated positive results.

Key Words: *Object-based classification, QuickBird, Wildland-Urband interface.*

INTRODUCCIÓN

La teledetección ha tenido un progreso enorme en los últimos años, hallándose operativos en la actualidad una gran variedad de sensores que proporcionan datos a resoluciones media y alta. En la mayoría de los casos la información necesaria para el análisis de las imágenes de satélite no se encuentra en los píxeles en los que se divide la imagen, sino en los objetos significativos de la misma y en sus relaciones mutuas. Sin embargo, una inmensa mayoría de las aplicaciones basadas en datos procedentes de teledetección todavía utiliza los conceptos básicos de procesamiento de las imágenes desarrollados a principios de los años setenta, realizándose la clasificación de los píxeles de manera individual en un espacio multi-dimensional. Es decir, el contexto espacial juega un papel modesto en los análisis basados en píxeles individuales (*Antunes*, 2003).

Según este mismo autor, los algoritmos clásicos de análisis de imágenes basados en píxeles no son demasiado adecuados para la clasificación de imágenes de alta resolución. A pesar de que las técnicas están bien desarrolladas y se han producido avances sofisticados como el clasificador bayesiano, la regla de decisión de incertidumbre y la evaluación multi-criterio, estos algoritmos no hacen uso de conceptos espaciales (*Antunes*, 2003).

Actualmente se están desarrollando alternativas a la clasificación de las imágenes basada en píxeles, como, por ejemplo, la clasificación orientada a objetos, que tiene en cuenta, entre

otros aspectos, las formas, las texturas y la información espectral presentes en la imagen. Recientes estudios (*Leukert et al*., 2003) han demostrado la superioridad del nuevo concepto sobre los clasificadores tradicionales. Su principio esencial es hacer uso de información importante (forma, textura, información contextual…) que sólo está presente en los objetos significativos de la imagen y en sus relaciones mutuas.

En definitiva, dividir las imágenes en toda una serie de objetos es un procedimiento fundamental para llevar a cabo con éxito un análisis de la imagen o para realizar una interpretación automática de la misma (*Gorte,* 1998; *Baatz y Schäpe,* 2000; *Blaschke et al*., 2000). En este sentido, la segmentación de la imagen es un paso crítico para su posterior análisis, e incluso para un entendimiento futuro de la misma, y uno de los principales motivos para llevarla a cabo es que la mayor parte de los datos de la imagen presentan una textura característica, que es siempre obviada en las clasificaciones tradicionales realizadas píxel a píxel (*Chen et al*., 2003).

Sin embargo, la segmentación no significa un nuevo campo de investigación científica, puesto que ha sido un tema de investigación ampliamente tratado por científicos y especialistas de diferentes campos. Por lo que respecta a la teledetección, las investigaciones en este apartado aún son pocas en comparación con otros dominios, por lo que todavía existen muchos campos de aplicación potenciales de la segmentación aplicada a las imágenes de satélite.

En el año 2001 se habían desarrollado más de mil tipos diferentes de segmentaciones (*Zhang*, 2001). Sin embargo, no todas ellas pueden aplicarse al campo de la teledetección, debido a varios motivos (*Chen et al*., 2003): a) las imágenes procedentes de los satélites son de carácter multi-espectral y multi-escala, y ambos hechos aumentan, obviamente, la complejidad y la redundancia de las mismas; b) en contraste con otras aplicaciones, en una imagen de satélite hay que considerar diferentes objetos con propiedades heterogéneas en cuanto a su tamaño, forma, comportamiento espectral, etc.; c) la interpretación en modelos es mucho más difícil que en otros campos debido a la heterogeneidad inherente a las diferentes clases de objetos; y d) las denominadas "soluciones sub-óptimas" no se pueden aplicar a la teledetección porque no hay necesidad de evaluaciones en tiempo real o dinámicas (*Blaschke y Strobl,* 2001). Por todo ello, los algoritmos de segmentación se han introducido relativamente tarde para el análisis de los datos procedentes de teledetección (*Ryherd y Woodcock*, 1996).

En teledetección, el proceso de segmentación de la imagen se define como "la búsqueda de regiones homogéneas en una imagen y después la clasificación de estas regiones" (*Mather*, 1999). Las aproximaciones disponibles pueden agruparse en tres categorías (*Jähne*, 1993): las basadas en puntos (por ejemplo los umbrales de niveles de gris), las basadas en bordes (por ejemplo las técnicas de detección de bordes) y las basadas en la región. En esta última categoría, los objetos de la imagen se generan según un cierto criterio de homogeneidad (*Haralick y Shapiro*, 1992).

En el presente estudio utilizamos la segmentación de imágenes procedentes de teledetección para llevar a cabo una clasificación que nos permita estudiar en detalle las zonas de interfase urbano forestal.

OBJETIVOS

El trabajo que aquí presentamos tiene por objeto mejorar las metodologías de análisis de riesgo de incendio en zonas de interfase urbano-forestal (IUF). Más en concreto, pretendíamos evaluar la posibilidad de desarrollar una metodología semi-automática para poder cartografiar el riesgo de incendio en este tipo de zonas. Para ello se realizó una clasificación orientada a objetos de una imagen de satélite de alta resolución.

En el marco del proyecto WARM (*Wildland Urban Interface Area Risk Management*) se elaboró una metodología de análisis de riesgo de incendio en zonas de IUF, desarrollada sobre la base de un amplio inventario de urbanizaciones situadas en la Comunidad de Madrid. Los resultados obtenidos indicaron que el nivel de riesgo de una urbanización se puede estimar en función de los siguientes parámetros: porcentaje de parcelas en contacto con vegetación natural, tipo de vegetación en los alrededores de las casas, presencia de parcelas vulnerables y presencia de sistemas de autoprotección. Por tanto, se elaboró un catálogo con descripciones precisas de las distintas situaciones encontradas y el modo de evaluar el nivel de riesgo. Sin embargo, nos encontramos con el problema de que la estimación del riesgo resultaba muy laboriosa, siendo necesario un considerable trabajo de campo. Debido a ello se ha realizado en los últimos meses este estudio, que busca evaluar en qué medida el empleo de técnicas de teledetección puede facilitar dicho análisis.

MATERIAL Y MÉTODOS

El area de estudio (figura 1) es la Urbanización Molino de la Hoz. Situada en el término municipal de Galapagar, al noroeste de la ciudad de Madrid, se trata de una *urbanización en interfaz*, es decir, sin presencia destacable de vegetación natural en su interior, y que ocupa una superficie aproximada de 270 hectáreas. Las viviendas y el resto de infraestructuras se encuentran formando una red más o menos densa que sólo entra en contacto con la vegetación natural en el perímetro de la urbanización y en las escasas parcelas vacías que quedan en su interior. El motivo para elegir esta urbanización fue el gran conocimiento que se tiene de la misma, ya que fue ampliamente estudiada a lo largo del proyecto WARM y utilizada para analizar y validar la metodología de estimación de riesgo de incendio.

En este trabajo se ha empleado una imagen proporcionada por el satélite QuickBird. Esta elección se debe, básicamente, a la elevada resolución espacial de este tipo de imágenes, imprescindible para trabajar con escalas de trabajo grandes, siendo QuickBird la imagen comercializada con mayor resolución espacial.

El satélite se lanzó desde California el 18 de octubre de 2001. Orbita a 450 Km de altitud y tarda en recorrer una órbita completa 93,4 minutos. Ofrece una cobertura terrestre global, con una anchura de área cubierta de 16,5 Km en el nadir, por lo que al cubrir 10 franjas en cada pasada ofrece un área cubierta total de 165 Km en cada una de ellas. Cruza el Ecuador en su paso descendente a las 10:30 a.m.

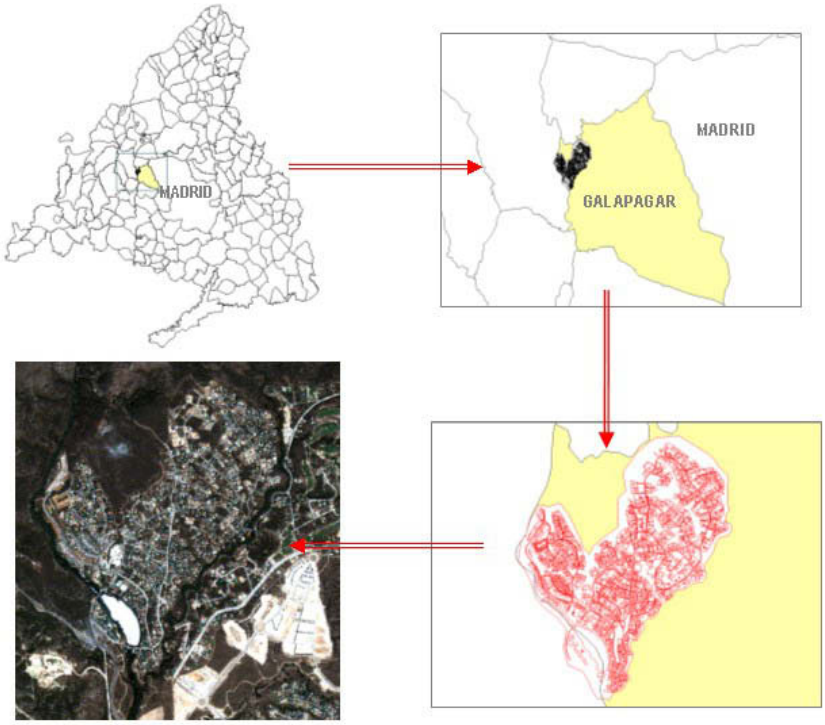


Figura 1. Área de estudio

Su resolución radiométrica es de 11 bits por píxel, y en cuanto a su resolución espectral el satélite QuickBird recoge información simultáneamente en modo multi-espectral y pancromático (figura 2). Para este estudio se seleccionó una imagen del 2 de julio de 2002. El producto adquirido comprende una imagen pancromática (situada en el espectro entre los 450 y los 900 nm y con 70 cm de resolución espacial) y una imagen multiespectral formada por cuatro bandas: azul (450-520 nm), verde (520-600 nm), rojo (630-690 nm) e infrarrojo cercano (790-900 nm), con 2,80 m de resolución espacial. El procesado estándar incluía correcciones del sensor, radiométrica, geométrica y su proyección a un sistema cartográfico.

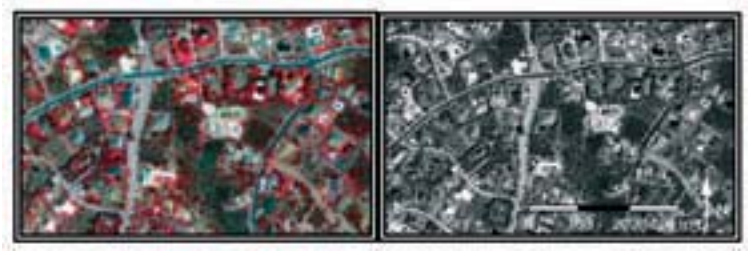


Figura 2. Imagen pancromática (izquierda) y multiespectral (derecha) de un área de la urbanización Molino de la Hoz

La elevada resolución espacial de las imágenes QuickBird conlleva, en cambio, problemas en la respuesta espectral recibida, como pueden ser la aparición de zonas de sombras o la alta texturización y contraste de la imagen. En nuestro caso los problemas se maximizaban al tratarse de una zona urbanizada, por lo que se consideró apropiado el uso de clasificadores de contexto.

Con estas premisas, se optó por emplear el software eCognition, comercializado desde el año 2000 y desarrollado por la empresa Definiens Imaging GmbH (*Definiens Imaging GmbH*, 2002), para llevar a cabo la segmentación y clasificación de la imagen. Los resultados obtenidos hasta la fecha son, en general, más precisos que los obtenidos con otro tipo de programas, si bien es una técnica relativamente nueva, que está actualmente en desarrollo (*Benz et al.*, 2004; *Flanders et al*., 2003).

Como ya señalamos anteriormente, la particularidad de este tipo de análisis es que la clasificación se realiza en base a objetos y no a píxeles. Al estar la imagen formada por píxeles, el primer paso en el análisis orientado a objetos es agrupar los píxeles adyacentes mediante técnicas de regiones crecientes, para posteriormente clasificar los objetos extraídos. Con ello el número de parámetros que se pueden valorar aumenta notablemente, permitiendo considerar criterios como el tamaño, la forma, medias de color, máximos y mínimos, proximidad a otros objetos, textura, etc. Al mismo tiempo, la segmentación reduce el número de objetos a clasificar, con lo que el tiempo de procesado también disminuye.

La segmentación se inicia con un píxel que forma un objeto o una región en la imagen y continúa hasta que el criterio especificado por el usuario se alcanza. La primera decisión se basa en el criterio de homogeneidad local. El algoritmo garantiza una distribución espacial regular de los objetos de la imagen. El algoritmo subyacente es esencialmente un procedimiento de optimización heurístico que minimiza la heterogeneidad media de los objetos de la imagen para una resolución dada para toda la escena. La propia heterogeneidad no sólo está basada en la desviación típica de los objetos de la imagen sino también en su forma (*Antunes*, 2003). La relación entre heterogeneidad espectral y forma hace que se logre un ajuste en los resultados de la segmentación (*Willhauck*, 2000; *Baaatz y Schäpe*, 2000).

El criterio de parada en el proceso de la fusión de regiones se produce gracias al parámetro denominado “escala” y puede definirse por el usuario. Determina el máximo permitido en la heterogeneidad global de los segmentos. Cuanto más grandes son los parámetros de la escala para una base de datos, más grandes son los objetos de la imagen, y puesto que el parámetro de la escala puede modificarse, podemos obtener diferentes tipos de imágenes segmentadas. Así, los objetos generados en una segmentación más grosera heredarán la información de los objetos más pequeños generados con unos parámetros de escala más finos (*Antunes*, 2003).

En nuestro caso, la imagen se segmentó empleando una capa temática vectorial con los límites parcelarios de toda la urbanización, realizada en fases anteriores del proyecto (figura 3). En ellas se había digitalizado y caracterizado sobre ortofoto y con trabajo de campo los elementos de la urbanización. Se fijó una escala elevada (1:500), de tal modo que la segmentación obtenida se correspondía exactamente con los polígonos digitalizados en la capa temática. Esto nos permitió emplear la información administrativa disponible y además facilitaba la posterior validación de los resultados.

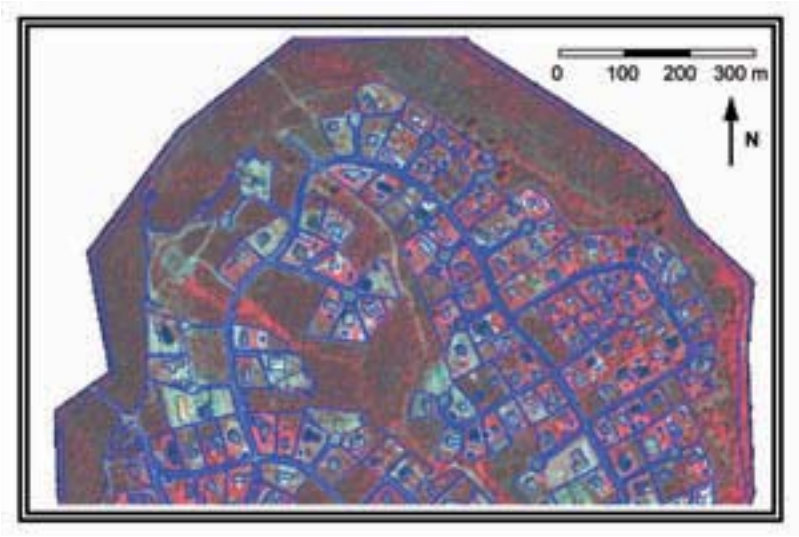


Figura 3. Detalle de la capa vectorial empleada en la segmentación

Dentro de las posibilidades que ofrece eCognition, se ensayaron distintas opciones. Puesto que se pretendía buscar la metodología más precisa para cartografiar las zonas de interfase urbano forestal, se ensayaron distintos criterios de asignación y el uso de diferentes variables intrínsecas de los objetos. Posteriormente, todas las clasificaciones se entrenaron usando las mismas parcelas de entrenamiento y fueron validadas usando las mismas parcelas de validación (figura 4). En definitiva, se evaluaron distintos criterios de asignación (vecino más próximo, límites máximos y mínimos, funciones lógicas...), así como distintos parámetros relacionados con los objetos (área, longitud, media del color, brillo, textura...).

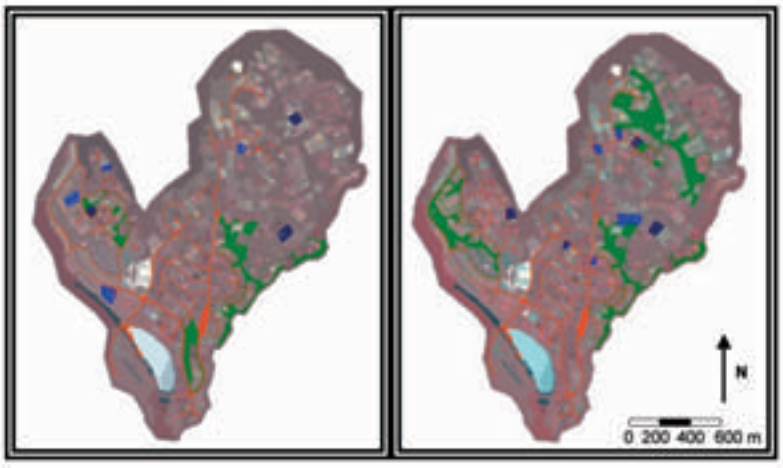


Figura 4. Parcelas de entrenamiento (izquierda) y de validación (derecha) usadas en la clasificación.

Finalmente, se seleccionó la metodología de clasificación que mejores resultados proporcionaba. Se trata de una clasificación jerarquizada, en la que la asignación de clases se realiza en dos etapas, llevándose a cabo por clases de mayor a menor jerarquía. En un primer paso empleamos la información administrativa de la capa temática para clasificar los objetos correspondientes a parcelas, construcciones y límites. El resultado de esta primera clasificación se presenta en la figura 5.

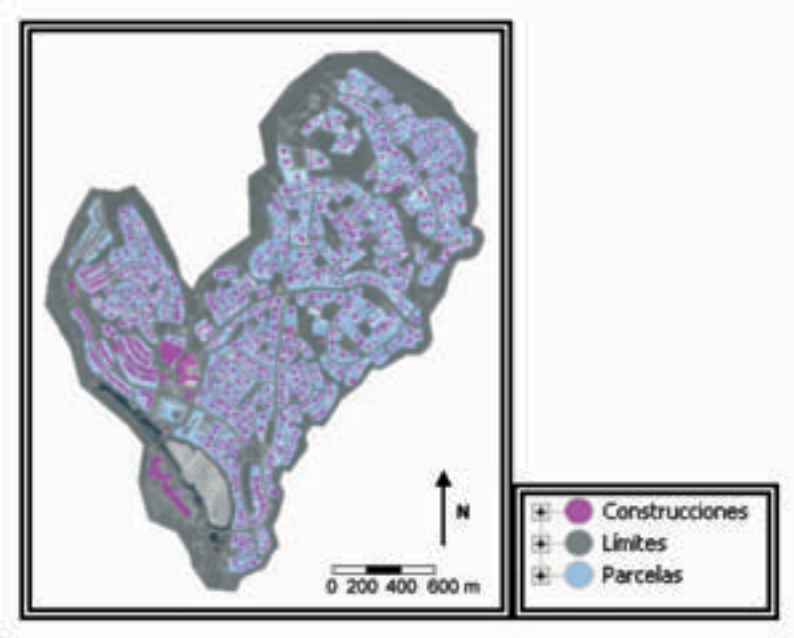


Figura 5. Resultado de la primera clasificación.

A continuación procedimos a clasificar los objetos correspondientes a cada una de las clases anteriores. Dentro de la clase "construcciones" distinguimos entre las edificaciones y las piscinas. A su vez, dentro de las edificaciones, diferenciamos entre edificios con tejado negro de pizarra o con teja árabe de color rojo. Respecto a la clase "parcelas", separamos las que presentan vegetación natural de las que poseen jardines cuidados o vegetación irrigada. Por último, la clase "limites" se subdividió en nuevas construcciones, vegetación natural y vías.

RESULTADOS

La metodología propuesta se aplicó en nuestra área de estudio obteniendo la clasificación final que se muestra en la figura 6.

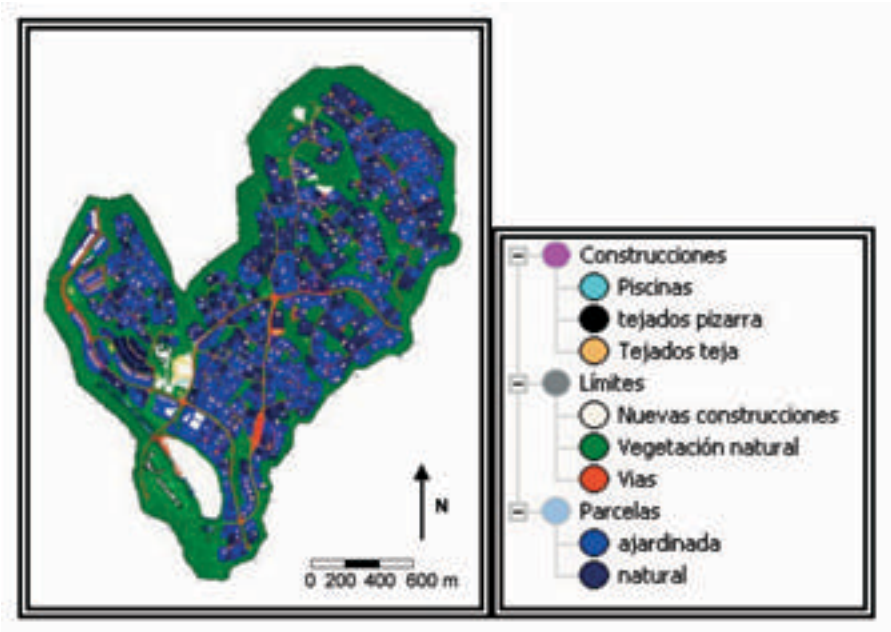


Figura 6. Clasificación final de la urbanización Molino de la Hoz

Los criterios de asignación empleados en eCognition no son de tipo rígido, pueden presentar valores entre 0 y 1, y las clasificaciones resultantes son de tipo borroso (*fuzzy*). Así, durante la clasificación el programa calcula el grado de asignación de cada objeto para cada clase, asignando el objeto a aquella clase para la que el grado de asignación resulta mayor. En el cuadro 1 se presentan resumidos los niveles de asignación encontrados para nuestra zona de estudio. Las clases que quedan mejor definidas son los dos tipos de parcelas (clases "natural" y "ajardinado") y la clase con menor nivel de asignación medio es la denominada "nuevas construcciones". Este hecho podría deberse a la heterogeneidad intrínseca de esta clase en concreto, que incluye obras en edificios, nuevas zonas recreativas o piscinas, terrenos removidos, etc.

Cuadro 1. Resumen de los niveles de asignación para la clasificación.

Clase	Objetos	Media	SD	Mínimo	Máximo
Vías	10	0.790	0.152	0.542	1
Vegetación natural	173	0.472	0.219	0.106	1
Piscinas	225	0.595	0.278	0.103	1
Tejados pizarra	442	0.767	0.200	0.106	1
Tejados teja	449	0.720	0.238	0.101	1
Ajardinado	607	0.908	0.195	0.114	1
Natural	418	0.940	0.145	0.120	1
Nuevas construcciones	143	0.331	0.287	0.100	1

No obstante, para poder analizar la bondad de la descripción de las clases es importante considerar también lo que se conoce como estabilidad de la clasificación, es decir, la diferencia entre el mejor y el segundo mejor nivel de asignación. El siguiente cuadro (cuadro 2) resume estos valores para la clasificación de la urbanización Molino de la Hoz. El hecho de encontrar niveles de asignación altos unidos a valores de estabilidad bajos indica un alto grado de similitud de los objetos con la descripción de su clase, siendo al mismo tiempo bajo su grado de similitud con el resto de clases. En consecuencia, según se refleja en los dos cuadros, las clases que mejor se clasifican son las correspondientes a los diferentes tipos de parcela presentes en la urbanización (clases "ajardinado" y "natural"), mientras que la clase "nuevas construcciones" presenta niveles de asignación bajos. Las clases "piscinas" y "tejados de pizarra" pueden confundirse con relativa facilidad con otras clases.

Cuadro 2. Estabilidad de la clasificación

Clase	Objetos	Media	SD	Mínimo	Máximo
Vías	10	0.335	0.210	0.002	0.643
Vegetación natural	173	0.399	0.205	0.022	1
Piscinas	225	0.500	0.318	0.004	1
Tejados pizarra	442	0.513	0.290	0.002	1
Tejados teja	449	0.478	0.267	0.001	1
Ajardinado	607	0.293	0.188	0.000	0.578
Natural	418	0.257	0.194	0.000	0.581
Nuevas construcciones	143	0.291	0.272	0.000	1

Por último, respecto al análisis de la bondad de la clasificación, el cuadro 3 muestra la matriz de confusión correspondiente a la clasificación de la urbanización. Las confusiones que se observan en la matriz son el solapamiento entre las piscinas y los tejados de pizarra y entre los dos tipos de parcelas. No obstante, el nivel de confusión no es muy elevado, siendo en todos los casos la fiabilidad del usuario y la del productor mayor del 75%. En consecuencia, la fiabilidad global del mapa obtenido es muy elevada, situándose en el 91%. Por último, el estadístico Kappa presenta un valor de 0,90, lo que indica que la clasificación es un 90% mejor de lo esperable al azar.

Cuadro 3. Matriz de confusión para la clasificación

Clasif.\Referen.	Vías	Veg. nat.	Pisc.	Tejados pizarra	Tejados teja	Ajard.	Natural	Nuevas construc.	Suma
Vías	2	0	0	0	0	0	0	0	2
Veg. Natural	0	3	0	0	0	0	0	0	3
Piscinas	0	0	5	0	0	0	0	0	5
Tejados pizarra	0	0	2	6	0	0	0	0	8
Tejados teja	0	0	0	0	5	0	0	0	5

Clasif.\Referen.	Vías	Veg. nat.	Pisc.	Tejados pizarra	Tejados teja	Ajard.	Natural	Nuevas construc.	Suma
Ajardinado	0	0	0	0	0	4	1	0	5
Natural	0	0	0	0	0	0	3	0	3
Nuevas constr.	0	0	0	0	0	0	0	3	3
Sin clasificar	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Suma	2	3	7	6	5	4	4	3	

Productor	1	1	0.714	1	1	1	0.75	1
Usuario	1	1	1	0.75	1	0.800	1	1
Kappa por clase	1	1	0.665	1	1	1	0.72625	1
Precisión	0.912							
Kappa	0.897							

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los recursos que ofrece hoy en día la teledetección permiten analizar con rapidez y precisión los factores de riesgo en la IUF a nivel de urbanización. No obstante, su uso a escalas mayores, a nivel de parcelas o casas, queda todavía muy limitado.

En cuanto a las imágenes QuickBird empleadas en este trabajo, hay que señalar que resultan apropiadas para el estudio de la IUF, presentando una resolución tanto espacial como espectral adecuada para este tipo de trabajos.

Respecto a los sistemas de clasificación orientada a objetos, nos parece que reducen en gran medida los problemas asociados al empleo de imágenes de alta resolución y mejoran, en general, los niveles de precisión. No obstante, el empleo de este tipo de metodologías está todavía en sus albores, por lo que no se han establecido hasta la fecha metodologías estándar. Por tanto, se espera en un futuro próximo un gran desarrollo de esta tecnología, así como un aumento de sus aplicaciones prácticas.

Finalmente, cabe señalar que en próximas fases de la investigación se proyecta desarrollar protocolos para estimar otros parámetros de interés en la asignación de niveles de riesgo de las parcelas (longitud de la parcela en contacto con vegetación natural, superficie relativa de las distintas clases encontradas, etc.) y validar la metodología obtenida en otras zonas de IUF. Ello nos permitiría proporcionar a los organismos encargados de la lucha contra incendios en este tipo de áreas toda una serie de datos que mejorarían la eficacia de su trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión de la Unión Europea a través del proyecto WARM (*Wildland Urban Interface Area Risk Management*).

REFERENCIAS

Antunes, A.F.B.; Lingnau, C. y Centeno da Silva, J. (2003): "Object oriented analysis and semantic network for high resolution image classification". *Anais XI SBSR, Belo Horizonte*, Brasil, 5-10 abril 2003, INPE, pp. 273-279.

Baatz, M. y Schäpe, A. (2000): "Multi-resolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation". En J. Strobl, T. Blaschke y G. Griesebner (Eds.), *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*,Wichmann, Heidelberg, pp. 12-23.

Benz, U.; Hofmann, P.; Willhauck, G.; Lingenfelder, I. y Heynen, M. (2004): "Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, pp. 239-258.

Blaschke, T. y Strobl, J. (2001): "What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS". *GIS – Zeitschrift für Geoinformationssysteme*, No. 6, pp.12-17, 2001.

Blaschke, T.; Lang, S. y Lorup, E. (2000): "Object-oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications". En A. Cremers y K. Greve (Eds.), *Environmental Information for Planning, Politics and the Public*. Marburg, Metropolis-Verlag, pp.555-570.

Chen, Q.; Luo, J. y Zhou, C. (2003): "A geo-statistic based segmentation approach for remotely sensed images". *Proceedings of the 24th Asian Conference on Remote Sensing*, Busan, South Korea. 3 p. Disponible en: http://www.definiens.com/documents/publications/acrs030620.pdf

Definiens Imaging GmbH (2002): eCognition user guide. Definiens Imaging GmbH, Munich, Alemania. Disponible en: *http://www.definiens-imaging.com*

Flanders, D.; Hall-Beyer, M. y Pereverzoff, J. (2003): "Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction". *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 29, No. 4, pp. 441-451.

Gorte, B. (1998): *Probabilistic segmentation of remotely sensed images*. PhD thesis. ITC Publication Series No. 63, Enschede.

Haralick, R. y Shapiro, L. (1992): *Computer and robot vision*, vol. 1. Boston, Massachusetts, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.

Jähne, B. (1993): *Digital Image Processing*. Berlin, Springer Verlag. 585 p.

Leukert, K.; Darwish, A. y Reinhardt, W. (2003): "Urban land-cover classification: an object-based perspective". *2nd Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas, URBAN 2003, Mayo 2003,* Berlín. pp. 278-282.

Mather, P. (1999): *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction.* Chichester, John Wiley and Sons. 306 p.

Ryherd, S. y Woodcock, C. (1996): "Combining spectral and texture data in the segmentation of remotely sensed images". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 62, No. 2, pp. 181–194.

Willhauck, G. (2000): "Semiautomatic classification procedures for fire monitoring using multitemporal SAR Images and NOAA-AVHRR hotspot data". Disponible en: *http://www.definiens.com/publication.pdf*

Zhang, Y.J. (2001): *Image segmentation*. Peking, Since Press. p. 2.

Empleo de la cartografía CORINE Land Cover para el desarrollo de modelos de análisis de incendios en áreas periurbanas (IU-F) (Proyecto WARM)

C. Pascual[1], L.G. García-Montero[2], S. Martín[3], L. Arroyo[4], D. Cocero[5] y J.A. Manzanera[6]

(1) Departamento de Tecnología Química, Ambiental y de los Materiales, Universidad Rey Juan Carlos, C/ Tulipán, s/n, 28933 Móstoles.
(2) Departamento de Planificación y Proyectos, E.T.S.I. de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid.
(3) Departamento de Economía y Gestión Forestal, E.T.S.I. de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid.
(4) Departamento de Desarrollo Rural, Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria (IMIA), Finca El Encín, Autovía A-II KM. 38, 28800 Alcalá de Henares.
(5) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, C/ Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares.
(6) Departamento de Silvopascicultura. E.T.S.I. Montes, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid.

RESUMEN

Se ha desarrollado un análisis comparativo de los usos del suelo en un área de la sierra en la Comunidad de Madrid entre los años 1988 y 2001. Este estudio se basa en los cambios de distribución territorial que han experimentado 11 unidades tomadas de la cartografía CORINE Land Cover (1988). Estas formaciones vegetales se han comparado con un mapa que ha sido obtenido mediante clasificación supervisada de una imagen Landsat de 2001. Los cambios de uso que han tenido lugar se han valorado atendiendo a su incremento del riesgo de incendio. Por otra parte, se ha estudiado la relación espacial entre las áreas quemadas en el período 2001-2003 y las zonas de interfaz urbano – forestal establecidas en el proyecto de investigación europeo WARM (Wild Urban Interface Area Risk Management).

Palabras Clave: *Corine Land Cover, interfaz urbano-forestal, SIG, teledetección, riesgo de incendios*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

A comparative analysis of land use was developed in an area in Madrid Community between 1988 and 2001. The spatial distribution of 11 CORINE Land Cover units was analized. They were compared with a vegetation map which was obtained from supervised classification of a Landsat image of 2001. The land use changes were assessed according to their contribution to increase fire risk. On the other hand, the spatial relationship among burned land between 2001-2003 and WARM Project Wild Urban Interface areas were studied.

***Key Words**: Corine Land Cover, wildland-urban interfac, GIS; Remote Sensing, fire risk.*

INTRODUCCIÓN

El interfaz urbano forestal (UI-F) se define como el área geográfica donde las casas y estructuras urbanas se construyen muy próximas a los combustibles forestales inflamables (*Summerfelt,* 2001). Por su parte, el "National Interagency Fire Center" propone que el interfaz son aquellas líneas o superficies donde las estructuras y otros asentamientos humanos se entremezclan con zonas naturales y combustibles vegetales (*http://www.nifc.gov/fireinfo/glossary.html*).

Los incendios forestales son eventos naturales inevitables, pero cuando tienen lugar en las inmediaciones de áreas habitadas por personas y sus estructuras pueden ocasionar grandes daños y sufrimientos (*Cleaves,* 2001). Australia y Estados Unidos (*Cohen*, 2004) acumulan una experiencia de largos años en este tipo de catástrofes. Sin embargo, en el entorno mediterráneo los incendios de interfaz urbano forestal empiezan a convertirse en una amenaza creciente, como se puso de manifiesto en el verano de 2003 en Extremadura, Cataluña y Portugal (*Barroso*, 2004; *Castellnou*, 2004; *Vélez*, 2004).

El interfaz urbano forestal representa un nuevo escenario para los Servicios de Extinción de incendios forestales. La particularidad de los fuegos en los UI-F hace necesario desarrollar nuevas estrategias de lucha que abarquen la protección de las vidas humanas y sus propiedades, sin dejar de lado la extinción del incendio (*Goldammer*, 1992; *Nicolás*, 2004).

Por todo ello, para los gestores responsables de estas labores, disponer del máximo de información y de herramientas de ayuda a la toma de decisiones representa un interés de primer orden (*Nicolás*, com. pers., 2004). A pesar ello, se constata una notable falta de información en relación a la extensión y caracterización de las áreas de interfaz urbano forestal (UI-F) en Europa (*Camia et al*., 2002).

Para tratar de subsanar esta carencia, en Europa se están incrementando los recursos y esfuerzos dirigidos al conocimiento del comportamiento del fuego en IU-F. En esta línea se han financiado varios proyectos de investigación como WARM, acrónimo de "*Wildland-Urban Area Fire Risk Management"* y FIRE STAR. Este tipo de estudios precisan de una información

territorial actualizada, de fácil acceso y con unidades comparables y normalizadas, para su incorporación al análisis de las zonas de interfaz. El proyecto europeo Land Cover CORINE y las imágenes Landsat cubren estos requisitos.

CORINE Land Cover es un mapa de vegetación y usos del suelo realizado a nivel europeo con una leyenda jerarquizada en 5 niveles y que contempla 44 clases diferenciadas. Este proyecto cartográfico se actualiza con una periodicidad aproximada de 10 años. En esta misma línea se enmarca el programa *Landsat*, que a lo largo de sus distintas misiones han desempeñado un papel fundamental en la caracterización y estudio de los ecosistemas naturales. El gran volumen de información disponible, su resolución espacial, su carácter global y una acertada política de comercialización, han facilitado la gran profusión y utilización de estas imágenes por expertos de muy variados campos en todo el mundo (*Chuvieco*, 2002; *Cohen y Goward*, (en prensa)).

En el presente trabajo se han utilizado estas fuentes de información para evaluar la incidencia que el cambio de uso del suelo tiene sobre el riesgo de incendios en el interfaz. Además se ha realizado un análisis de la distribución espacial de las áreas quemadas y la frecuencia de incendios en el período 2001-2003 fuera y dentro de las zonas IU-F.

DESARROLLO DEL TRABAJO

Material y métodos

El área de estudio constituye un cuadrado de 30 x30 km situado en el sector Noroccidental de la Sierra de Madrid entre El Escorial y Manzanares El Real. Abarca un área de gran expansión urbanística y con abundante superficie de interfaz urbano-forestal, tanto de ocupación temporal como permanente. En esta zona se concentran además, los mayores valores de frecuencia histórica de incendios forestales de la Comunidad de Madrid (*García-Montero,* 2004).

Las fuentes de información, que se han empleado en el análisis de cambios de uso, han sido por un lado la cartografía de vegetación y usos CORINE Land Cover (1988), Escala 1: 100000 y 100 m de píxel con sistema de proyección UTM (Datum ED50) y por otro, la escena (Path/Row: 201/32) del sensor Landsat ETM$^+$ de septiembre de 2001. Además se ha dispuesto del perímetro digitalizado de los incendios forestales que han tenido lugar en Madrid para el intervalo 2001-2003, cuya información ha sido proporcionada por la Dirección General del Medio Natural de la Comunidad de Madrid.

Para la caracterización de los incendios de las zonas IU-F, se ha utilizado un modelo digital de elevaciones de la zona de estudio de celdilla de 20 m, y un mapa de combustibles forestales en formato vectorial. Ambos conjuntos de datos forman parte de la información disponible en el proyecto WARM. Todo el tratamiento de las capas de información raster se ha realizado con el software ArcView 3.2. Así mismo, para el análisis digital de imágenes se ha empleado el programa ERDAS 8.5 y el estudio estadístico se ha llevado a cabo con el paquete *Statgraphics 5.1*.

Con objeto de estudiar la evolución de la vegetación y usos del territorio entre 1988 y 2001, se han comparado las clases de la cartografía CORINE y la información del satélite. Previamente a esta comparativa, ha sido necesario clasificar la imagen Landsat en 11 categorías que se han tomado de la leyenda *CORINE Land Cover*. El primer paso de la clasificación supervisada ha sido el reconocimiento de estas formaciones vegetales en el área de estudio, para lo cual se han efectuado 10 salidas de campo durante los meses de junio y julio de 2003. Este trabajo sobre el terreno ha servido para revisar la denominación inicial de las unidades de vegetación y definir las 11 que finalmente se han adoptado (cuadro 1).

Cuadro 1. Unidades de vegetación definidas para el presente estudio (están adaptadas de la leyenda CORINE Land Cover).

Unidades de vegetación
Urbano continuo
Urbano discontinuo
Suelo desnudo y cultivos de secano
Pastizal con arbolado disperso
Sistemas agroforestales (dehesas)
Bosques melojos y caducifolias
Bosques de coníferas
pastizales de monta a o permanentes
Mosaico matorral encinas, jaras, piornos
Roquedos y piornales de monta a
Láminas de agua

Por otra parte, los recorridos de campo han sido la base para establecer las áreas de entrenamiento de la clasificación supervisada. Se ha realizado un "semillado" de aproximadamente 500 píxeles por categoría de vegetación. La separabilidad de las áreas de entrenamiento se ha evaluado mediante la divergencia transformada. La combinación de bandas 2/4/5 ha proporcionado el mejor valor de separabilidad, con un media de la divergencia transformada de 1996, por lo que la clasificación se ha realizado empleando las tres bandas mencionadas. Para la asignación de los píxeles en las distintas categorías establecidas se ha utilizado el algoritmo de máxima probabilidad. Por último se ha aplicado un filtro de mediana 3x3 sobre el resultado de la clasificación, para disminuir el efecto "sal y pimienta".

El mapa resultado de la clasificación se ha verificado mediante un muestreo aleatorio en 256 puntos. Para cada uno de ellos, se han enfrentado los valores de las unidades de la "verdad-terreno" con los proporcionados por la imagen clasificada. Los valores "verdad-terreno" se han obtenido mediante trabajo de campo y análisis sobre ortofoto.

El resultado de la clasificación se ha combinado con la cartografía *CORINE Land Cover* con objeto de estudiar los cambios de uso del suelo que han tenido lugar durante el citado

periodo 1988-2001. Previamente se ha comprobado el grado de solape de ambas coberturas de información en varios puntos fácilmente identificables (carreteras, embalses, etc.) y se ha aceptado como válido. Así mismo, el mapa CORINE de celdilla de 100 m, se ha transformado a 30 m de píxel.

Las celdillas que han registrado un cambio de cobertura vegetal se han valorado en un doble aspecto. Por un lado, se han considerado los posibles incrementos de biomasa, y por otro, si la nueva formación vegetal corresponde a un modelo de combustible con mayor riesgo de incendio. Para ello, a cada píxel de cambio se le ha asignado un vector de dos componentes. La primera componente vale 1 cuando el cambio de uso implica un aumento de la biomasa vegetal y 0 en caso contrario. Por otra parte, a la segunda componente se le asigna el valor 1 cuando el nuevo combustible es más peligroso y 0 en caso contrario (p. ej.: se asigna 1 al cambio de pastizal a matorral alto). Por último, el vector se ha transformado en un único valor final para cada celdilla que ha oscilado entre 0 y 2 conforme a la matriz de ponderación que se presenta en el cuadro 2.

Cuadro 2. Matriz de ponderación de los vectores de cambio de uso a un valor final de cambio.

Componente 1: Incremento de biomasa	Componente 2: Modelo de combustible que incrementa riesgo	Valor final
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	2

Por otra parte se ha realizado un análisis estadístico de la incidencia del interfaz urbano forestal en los incendios. En primer lugar, se han establecido las zonas IU-F dentro del área de estudio. Para ello se han seleccionado las categorías *entramado urbano continuo y discontinuo* del mapa *CORINE Land cover* y se ha definido un anillo de 500 m alrededor de cada elemento.

Estas zonas de interfaz así definidas se han se ha combinado con la superficie quemada de los incendios digitalizados entre los años 2001 - 2003. Además, el perímetro de áreas quemadas y zonas IU-F se han relacionado con los modelos de combustible y con las pendientes, obtenidas a partir del modelo digital de elevaciones. Con todas estas combinaciones se han aplicado diversos test estadísticos para establecer posibles relaciones entre las variables.

Resultados

El proceso de verificación de la clasificación supervisada ha dado lugar a un mapa, cuya fiabilidad media se ha estimado en un 76,6%. El índice Kappa ha resultado ser de 0,71, por lo que la cartografía de 11 categorías de vegetación y usos así obtenida se ha considerado aceptable para los objetivos del presente estudio (Figura 1).

Las formaciones vegetales de mayor representación territorial en el área de estudio han sido la unidad *Mosaico de matorral encinas, jaras, piornos*, los *Pastizales con arbolado disperso* y los ecosistemas de D*ehesa* que en conjunto representan el 70% de la superficie (Cuadro 3).

Cuadro 3. Distribución en % de superficie de las distintas unidades de vegetación que se han obtenido en la clasificación digital.

Uso del suelo /Ud. vegetación	**% de superficie en zona estudio**
UD. 1. Urbano continuo	6.17
UD. 2. Urbano discontinuo	7.54
U.D. 3. Suelo desnudo y cultivo de secano	2.24
U.D.4. Pastizal y pastizal con arbolado disperso	21.17
U.D. 5. Sistemas agroforestales (dehesas)	17.57
U.D.6. Bosques melojos y caducifolias	1.67
U.D.7. Bosques de con feras	9.31
U.D. 8 Pastizales de monta a o permanentes	1.67
U.D. 9 Mosaico matorral encinas, jaras, piornos	30.97
U.D. 10 Roquedos y piornales de montaña	0.88
U.D. 11 Láminas de agua	0.79

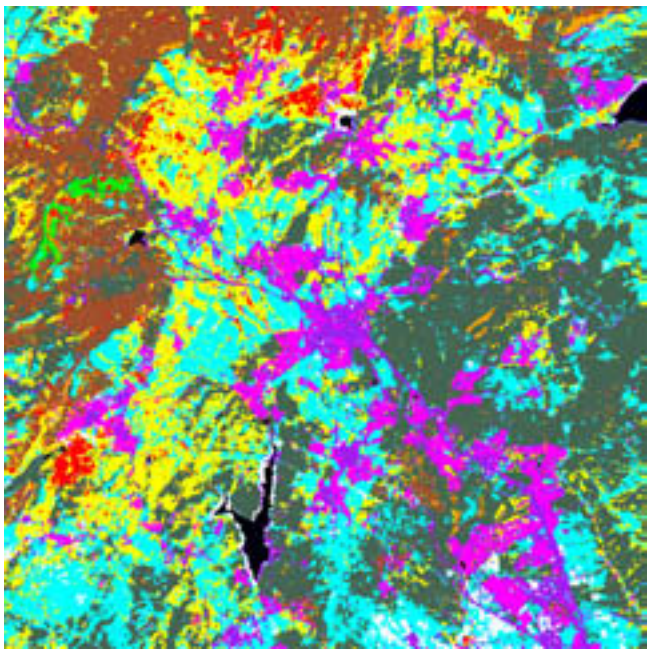


Figura 1. Mapa resultado de la clasificación supervisada.

En relación a la distribución de la superficie quemada (2001- 2003) entre las 11 categorías de vegetación detectadas, se ha encontrado que la formación de *Pastizales con arbolado disperso* ha registrado el mayor porcentaje de área quemada (25.14%). En las unidades de *Dehesa* y *Mosaico de matorrales, encinas, jaras y piornos* se ha quemado un 22.3 y 20.3% de superficie respectivamente en esos mismos años.

Así mismo se ha analizado la posible influencia que las zonas de interfaz han tenido en el desarrollo de los incendios durante el período 2001-2003. Para ello, se han enfrentado en una tabla de contingencia el número de incendios y la superficie quemada, que han caído dentro y fuera de las zonas IU-F. Se ha constatado que, durante esos tres años, proporcionalmente se ha quemado el doble de superficie en el interior de las áreas de interfaz que fuera de las mismas. También el número de incendios por unidad de superficie ha resultado ser doble en el IU-F que en el resto del territorio (Cuadros 4 y 5).

Cuadro 4. Distribución de la superficie quemada (2001-2003) dentro y fuera de las zonas IU-F.

Zona Estudio	**IU-F**	**Resto territorio**	**Total**
Superficie (ha)	19539	63903	83442
Superficie quemada (ha)	256	454	709
Relación IU-F / Territorio	0,013	0,007	-

Cuadro 5. Distribución del número de incendios (2001-2003) dentro y fuera de las zonas IU-F.

Zona Estudio	**IU-F**	**Resto territorio**	**Total**
Nº de incendios	113	96	209
Nº de incendios / ha.	0,006	0,002	0,003
Relación IU-F / Territorio	2	1	-

A partir de las citadas tablas de contingencia (Cuadro 5) se ha aplicado un test de la χ^2 para comprobar si el número de incendios guarda relación con la presencia de interfaz. El resultado del contraste estadístico ha indicado que existe una relación de dependencia muy significativa entre la frecuencia de incendios forestales y las zonas de UI-F (χ^2, p=0,000) (Figura 2).

Contraste de Chi-cuadrado

Chi-cuadrado	GL	P-Valor
707,69	1	0,0000

Figura 2. Resultado del contraste de χ2

Por otra parte, el estudio comparativo entre la cartografía CORINE y el mapa obtenido por clasificación supervisada, ha permitido establecer que un 47.4% de la superficie de estudio ha modificado sus unidades de vegetación entre los años 1988 y 2001. Todos estos cambios de uso se han catalogado como zonas con cambios a uso sin riesgo, zonas con cambios a uso de riesgo y zonas con cambios a usos de mucho riesgo de acuerdo a los valores del cuadro 2. Se ha obtenido que en un 13.6 % de la superficie del área de estudio, las nuevas formaciones vegetales que han aparecido, implican un incremento del riesgo desde el punto de vista de los incendios forestales (cuadro 6).

Cuadro 6. Resultado del análisis de uso del suelo (1990-2001).

Análisis de cambios de uso (1988 - 2001) en la zona de estudio	**TIPO**	**ha**	**%**
Superficie sin cambio de uso		43875	52.6
Superficie con cambio de uso que no implica riesgo		28176	33.8
Superficie con cambios a uso de riesgo	1	4929	5.9
Superficie con cambios a uso de mucho riesgo	2	6462	7.7
Total	-	83442	-

Finalmente, con el objeto de averiguar que factores pueden incidir en la superficie quemada de las zonas de interfaz, se ha llevado a cabo un ANOVA multifactorial de la superficie quemada dentro de los IU-F considerando los factores “pendiente”, “combustible” y “uso de suelo”. El resultado del test ha señalado que los “usos del suelo” tienen un efecto significativo sobre las áreas incendiadas del interfaz (ANOVA, p=0.0128) (Figura 3).

Análisis de la Varianza paraCOUNT - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:COMBULANDS	1814,12	5	362,823	1,56	0,1717
B:PENDLANDSA	1351,71	4	337,928	1,45	0,2169
C:USOLANDSCO	4628,77	8	578,596	2,49	0,0128
RESIDUOS	63736,9	274	232,616		
TOTAL (CORREGIDO)	71536,1	291			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Figura 3. Resultados del ANOVA.

CONCLUSIONES

La cartografía CORINE y las imágenes Landsat representan una potente herramienta en los estudios territoriales para toma de decisiones, por su información homogénea para toda Europa, su actualización periódica y fácil acceso. Es conveniente profundizar en el análisis de

ambas fuentes de información para los estudios de caracterización de los incendios forestales en las zonas de interfaz.

Se ha encontrado que existe una relación de dependencia entre la frecuencia de incendios forestales y las zonas de interfaz. En concreto, se ha establecido que el número de incendios por unidad de superficie, que han tenido lugar en las áreas IU-F, es el doble que en el resto del territorio de estudio para el período 2001-2003. Para el mismo intervalo de tiempo, en proporción se ha quemado el doble de superficie en el interior de las áreas de interfaz urbano forestal que fuera de las mismas.

Por otra parte, el análisis de cambio de usos entre los años 1988-2001 muestra que el 13% de la superficie de estudio ha evolucionado hacia formaciones vegetales que implican mayor riesgo en relación con los incendios. El seguimiento y detección de cambios en la vegetación reviste particular interés en las zonas IU-F, dado que en esas áreas los usos del suelo son un factor, que influye de forma significativa en la superficie quemada.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección General del Medio Natural de la Comunidad de Madrid la información facilitada y al proyecto WARM (EVG1-CT-2001-00044) la financiación para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Barroso, J.C. (2004): "Los incendios forestales de 2003 en Extremadura afectando a poblaciones". *Tercer Seminario Internacional Interfaz Urbano Forestal (IU-F) en Europa, 26-27 de mayo de 2004*, Madrid.

Camia, A.; Marzano, R. y Bobio, G. (2002): "Preliminary analysis of wildland-urban interface fire prone areas in Italy". En D. Viegas (Eds.), *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Millpress, Rotterdam, pp.174

Castellnou, M. (2004): "Los incendios en el interfaz en Cataluña 2003: experiencias y lecciones aprendidas". *Tercer Seminario Internacional Interfaz Urbano Forestal (IU-F) en Europa, 26-27 de mayo de 2004*, Madrid.

Chuvieco, E. (2002): Teledetección Ambiental. Ariel Ciencia, Barcelona, 586 p.

Cleaves, D. (2001): "Fires in the Wildland Urban Interface: Dilemmas of Duality and the Role of the National Science Lleadership", *Forum on Urban and Wildland Fire, 26 de enero de 2001*, Washington, D.C.

Cohen, J. (2004): "Preventing Residential Fire Disasters During Wildfires" en G. Xanthopoulos (Ed.), *Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: An integral planning and management challenge*, Athens, pp. 5-11.

Cohen, W. y Godward D (en prensa)

García-Montero, L.G. (2004): "Elementos y técnicas para el análisis espacial del Interfaz Urbano Forestal". *Tercer Seminario Internacional Interfaz Urbano Forestal (IU-F) en Europa, 26-27 de mayo de 2004*, Madrid.

Goldammer, J. (1992): "Land use and fire risk: the interface of forest, agricultural land, wildlands and residential areas", *Seminar on forest Fire Prevention, Land Use & People*, Ministry of Agriculture of Greece, Atenas.

Nicolás, J.M. (2004): "Los incendios forestales y el IU-F en la Comunidad de Madrid". *Tercer Seminario Internacional Interfaz Urbano Forestal (IU-F) en Europa, 26-27 de mayo de 2004*, Madrid.

Summerfelt, P. (2001): "The wild urban interface. What's really at risk?". Greater Flagstaff Forest Parnetship. Disponible en http://www.gffp.org/pine/risk/default.htm

Vélez, R. (2004): "Los incendios en el IU-F en España: una visión global". *Tercer Seminario Internacional Interfaz Urbano Forestal (IU-F) en Europa, 26-27 de mayo de 2004*, Madrid.

Aplicación de un SIG en el estudio y análisis de los problemas derivados de la salinidad de las aguas de riego en la Vega Baja del río Segura

J. Cordero Gracia[1] y G. Parra Galant[2]

(1) Departamento de Economía Agroambiental, Ingeniería Cartográfica y Expresión Gráfica en la Ingeniería, Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. de Beniel, km 3,200 – 03312 Orihuela (Alicante) .

(2) Departamento de Ingeniería, Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. de Beniel, km 3,200 – 03312 Orihuela (Alicante).

RESUMEN

En el presente trabajo se aplica la tecnología SIG a la gestión y análisis de los efectos de la salinidad del agua de riego sobre el rendimiento de los cultivos, empleando como área de estudio la Vega Baja del Segura.

En primer lugar se ha abordado el análisis de los SIG como herramientas de análisis espacial, resaltando las características más relevantes de las bases de datos que pueden potenciar su empleo como variables explicativas del rendimiento de los cultivos afectados por la salinidad.

Sobre la base de la información espacial, el SIG permite incorporar a la base de datos una amplia gama de información técnico-económica relevante para completar el análisis y gestión de las parcelas de cultivo. Esta aplicación se ha realizado a partir de la información obtenida de los análisis de suelos y del agua de riego en zonas de regadío de la Vega Baja del río Segura, donde la salinización de las aguas es un problema de creciente magnitud. El efecto principal de la salinidad sobre los cultivos es el descenso de sus rendimientos y calidad, que se traducen en importantes pérdidas económicas, haciendo las tierras improductivas y proclives a procesos de desertificación por el abandono de las mismas. Con este trabajo se pretende, pues, realizar una primera aproximación al estudio espacial de los efectos

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

de la salinidad sobre el rendimiento de los cultivos en la Vega Baja del Segura, y así poder cuantificar las pérdidas económicas que provocan.

Palabras Clave: *salinización, SIG, rendimiento, Vega Baja del Segura.*

ABSTRACT

In this work it's applicated the GIS technology to the management and analysis of water salinity effects over plants yield, using the Vega Baja del Segura as study area.

In this project the GIS technology is applied to the process an analysis of the effects on crop production of the salinity in the irrigation water, using as a study area the low plains of the Segura.

Firstly the GIS analysis has been approached as an implement for outer space analysis, underlining the most relevant characteristics of the data base which can reinforce its use as explanatory options on the crop production affected by salinity.

Based on outer space information a wide range of relevant technical and economical facts can be incorporated by the SIG into the data base to complete the analysis and administration of agricultural land. This use has been taken from information obtained from the tests made on the soil and irrigation water in areas of irrigated land on the low plains of the Segura river, where the level of salinity in the water is a growing problem of great importance. The main effect of salinity is the drop in production and quality of crops leading to great economic loss, unproductive, barren, abandoned fields. Henceforth the object of this project is to make a first approach to the outer- space studies of the effects of salinity on crop production on the low plains of the Segura and, therefore, be able to estimate the economic losses brought about.

Key Words: *salinity, GIS, Remote Sensing, paper, style, lower Segura.*

INTRODUCCIÓN

La salinización de las aguas y suelos en zonas de regadío de la Vega Baja del río Segura es un problema de creciente magnitud. El efecto principal de la salinidad sobre los cultivos es el descenso de sus rendimientos y calidad, que se traducen en importantes pérdidas económicas, haciendo las tierras improductivas con su desertización posterior debido al abandono de las mismas.

Para minimizar el efecto de la salinidad se pueden seguir diversas estrategias. La recuperación de suelos a través del lavado en profundidad de sus sales es la alternativa más recomendada, pero no siempre viable desde el punto de vista técnico y/o económico. El manejo agronómico adecuado puede resolver de manera parcial el problema de la salinidad, pero con frecuencia la utilización de cultivos tolerantes es la única opción posible u obligada si la salinidad se presenta en el agua de riego.

TOLERANCIA DE LOS CULTIVOS A LA SALINIDAD

La tolerancia a la salinidad es un término que no está claramente definido debido a los diferentes enfoques conceptuales que pueden realizarse.

Bernstein (1963), lo define como el grado con el que una planta ajusta su potencial osmótico con un sacrificio mínimo de su crecimiento.

Para *Shannon* (1979) es la medida de la capacidad de una planta para soportar los efectos de una solución salina concentrada en la zona radicular.

Mientras que *Levitt* (1980) asocia la tolerancia con la ausencia de efectos negativos sobre el crecimiento de las plantas que acumulan la sal en sus tejidos.

Por otro lado, *Maas* (1986) considera que la tolerancia se puede analizar desde tres puntos de vista diferentes:

Por la aptitud a sobrevivir en suelos salinos.

El crecimiento o producción absoluta en suelos salinos.

El crecimiento o producción en un suelo salino relativo al que tiene en un suelo no salino.

La aptitud a sobrevivir puede ser relevante desde un punto de vista ecológico, pero es un criterio limitado como valor agronómico, puesto que la supervivencia va acompañada a menudo con reducciones de producción hasta límites inaceptables comercialmente.

El criterio de la producción absoluta permite realizar estimaciones económicas bajo condiciones de salinidad, pero limita las comparaciones entre cultivos, ya que las producciones no se expresan en términos comparables.

Por último, el tercer criterio permite comparar cultivos diferentes cuyas producciones se expresan en unidades diferentes, permitiendo analizar los niveles relativos de salinidad que pueden tolerar tanto los cultivos como sus cultivares (*Nieman y Shannon,* 1977).

Estos dos últimos criterios para estimar la tolerancia son de utilidad para el agricultor, ya que un agricultor deseará cultivares con tolerancia absoluta o vigor altos, pues aunque la salinidad afecte drásticamente al rendimiento, pueden seguir produciendo más que otros cultivares con tolerancia relativa alta, pero con baja capacidad productiva o peor calidad aun en condiciones no salinas. Por otro lado, los cultivares con tolerancia relativa alta deben ser de interés para los mejoradores, ya que pueden transferir el carácter de tolerancia a cultivares de alta capacidad productiva y calidad, pero sensibles a la salinidad.

Generalmente, el rendimiento de los cultivos sólo disminuye de una forma significativa si la salinidad de la solución del suelo supera un cierto valor umbral, que es específico para cada cultivo. Por encima de este valor, el descenso puede seguir diferentes puntos, tal y como indica la Figura 1.

Para muchos cultivos se sigue una relación lineal decreciente, como ocurre en la mayoría de los cultivos destinados a la alimentación o a la producción de fibra textil; otros se aproximan asintóticamente a rendimientos nulos; por último, en algunos casos el descenso es muy brusco a partir de un cierto valor, aunque antes sigan una disminución de rendimiento gradual.

Por otra parte, los síntomas aparentes del perjuicio por salinidad en las plantas no aparece hasta que el daño ya se ha producido (descenso en los rendimientos) y, entonces, poco se puede hacer para mejorar la situación. La medida de la CE del extracto saturado, considerado como

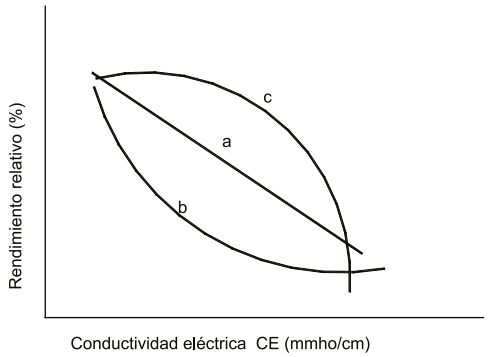


Figura 1. Diversas respuestas de los rendimientos de los cultivos con la salinidad.

referencia, supone una advertencia anticipada de los posibles daños, sin esperar la aparición de los signos externos de afección por la salinidad.

Mass y Hoffman (1977) proponen definir la tolerancia mediante una regresión lineal simple e introduciendo el concepto de *conductividad umbral*, que es aquélla a partir de la cual se inicia el descenso de producción.

$$\begin{aligned} Y &= Y_m && para\ CE_u < CE \le CE_0 \\ Y_r &= Y_m - Y_m \cdot s \cdot (CE - CE_u) && para\ CE_u < CE \le CE_0 \\ Y &= 0 && para\ CE > CE_0 \end{aligned}$$

donde:

Y = valor absoluto del carácter en estudio para una determinada CE.

Ym = valor máximo de Y que se obtiene para valores de CE inferiores al umbral CE_u.

CE_u = conductividad eléctrica umbral a partir de la cual disminuye el valor del carácter en estudio.

CE_o = conductividad eléctrica a la que se hace cero el valor del carácter.

s = reducción, en tanto por uno, del carácter en estudio por unidad de incremento de la salinidad por encima del valor CE_u y por debajo del valor de CE_o.

Estas ecuaciones se presentan también en forma relativa:

$$\begin{aligned} Y &= 100 \\ Y_r &= 100 - s \cdot (CE - CE_u) \\ Y_r &= 0 \end{aligned}$$

siendo:

$Y_r = (Y/Ym) \cdot 100$

s = porcentaje de reducción por unidad de incremento de la salinidad.

Además, es útil definir el parámetro CE_{50}, que es la conductividad en torno a la cual el valor máximo Y_m se reduce un 50% (Figura 2).

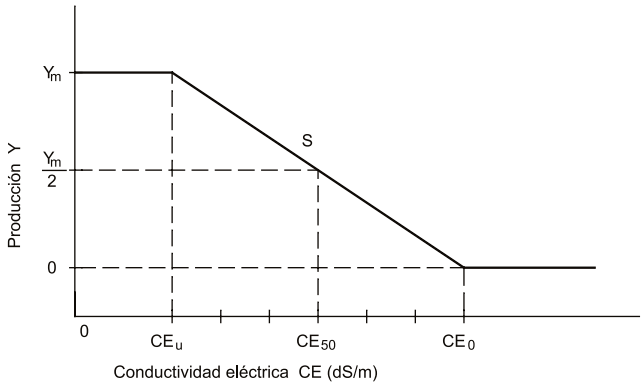


Figura 2. Representación gráfica del modelo de *Maas y Hoffman* (1977) de respuesta de los cultivos a la salinidad.

Así pues, los parámetros CE_u, CE_{50} y s definen la tolerancia, pero son necesarias condiciones muy bien controladas para obtener valores significativos de los mismos ya que, especialmente, el umbral es muy sensible a interacciones con otros factores ambientales (*Shannon,* 1985).

La definición de tolerancia de un cultivo dado se ve complicada por ser muchos los factores que la modifican.

METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

El panorama hidrológico de la Cuenca del Segura, desde el punto de vista de la calidad de las aguas utilizadas para el riego, es del mayor interés, ya que al estar clasificada en su mayor parte como zona árida y semiárida, sin auxilio del riego no es posible una agricultura económicamente rentable.

El uso continuado de algunas aguas de riego de elevada concentración salina podría desembocar en el abandono de suelos altamente productivos.

En consecuencia, el estudio de la calidad de las aguas de riego, reviste una gran importancia, pues a pesar de ser una zona con unas condiciones climáticas excelentes, excepto por su elevado desequilibrio hídrico, presenta suelos con una muy buena aptitud para el cultivo de especies de gran rentabilidad.

Selección de la zona de estudio

Los estudios y análisis de las aguas de riego del Segura realizados por diferentes organismos coinciden en la existencia de contaminación por salinidad, materia orgánica y oligoelementos. Sin embargo, los estudios de contaminación de los suelos en la Vega Baja, además de ser escasos, no se han llevado a cabo al menos en los últimos cinco años. La contaminación

de las aguas de riego puede afectar en distinta medida, según las características de los suelos y de los cultivos.

Los ciclos de sequía que periódicamente sufre la cuenca llevan consigo un aumento de la salinidad en las aguas de riego, provocando importantes pérdidas en la producción agrícola.

Cabe mencionar el estudio realizado sobre la salinidad del agua de riego de los suelos de la Vega Baja del Segura por *Nieves* (1995), donde se obtuvieron valores límite a los que puede llegar este tipo de contaminación.

A inicios de la década de los 80, se produjo en la Comunidad de Murcia un notable incremento de la actividad industrial y ganadera que no fue acompañada de la correspondiente depuración de las aguas utilizadas, así como un importante retraso en la depuración de las aguas urbanas. El déficit hídrico de la cuenca del Segura obliga a que en la Vega Baja se utilicen los vertidos al cauce como agua de riego, con el consiguiente aporte de lodos a los suelos agrícolas. Dichos materiales poseen unas propiedades perjudiciales para la fertilidad de los suelos, entre las que se encuentra su alto contenido en metales pesados.

A su paso por la Vega Baja del Segura existe una red de Acequias Madres o Mayores que, tomando las aguas directamente del río, se encargan de distribuirlas a los cultivos a través de sus Acequias Menores, Arrobas y Brazales.

Así, por la Margen Izquierda se encuentra el Merancho, que lleva agua de los avenamientos de Murcia y las conduce al río Segura a través de la Acequia Mayor Puertas de Murcia. Por la Margen Derecha, en los límites de las provincias de Alicante y Murcia, nacen en las Norias Gemelas de Beniel, las Acequias Mayores de Molina y Alquibla. Poco después y antes de entrar a Orihuela, nace también del Segura la Acequia Mayor de Los Huertos. Ya en el azud de la ciudad de Orihuela, nacen del río las cuatro Acequias Mayores de Almoravit, Escorratel, Almoradí y Callosa.

Por la Margen Derecha del río está el antiguo Reguerón o Azarbe Mayor de Hurchillo, que recoge las aguas de drenaje de los suelos agrícolas y las devuelve al río Segura una vez pasado Orihuela. Estas aguas tienen una elevada salinidad, ya que contienen el exceso de fertilizantes utilizados por los agricultores, así como las sales lavadas de los suelos agrícolas; estas sales son, junto con los vertidos, los principales causantes del aumento de la salinidad del agua del río en su descenso.

La selección de la zona de estudio se realizó atendiendo a la posibilidad de obtener análisis recientes de agua y suelo de un número determinado de parcelas, susceptibles de contaminación y en las que se dan, a priori, una cierta homogeneidad en cuanto al origen del agua de riego y al conjunto de problemas que afectan a los cultivos.

Planteamiento metodológico

Se plantea el estudio y análisis del rendimiento de los cultivos en aquellas parcelas de uso agrícola regadas con la red de acequia del río Segura en la zona de la Vega Baja.

Este estudio supone la realización de los siguientes pasos:

– Obtener una amplia información de campo y de análisis, lo más representativa posible de las parcelas que se pretenden estudiar.

– Establecer los parámetros de los análisis de suelo de las parcelas que se consideran variables independientes.
– Depurar la información, hasta obtener una información realmente fiable.
– Aplicación del SIG, con incorporación de los datos obtenidos en campo, y obtención de nuevas variables mediante análisis espacial.
– Con la obtención de nuevos datos de campo, que amplíen el estudio a lo largo de la zona estudiada, diseñar un modelo matemático, que, basándose en técnicas estadísticas, permita estimar nuevos datos a partir de los conocidos y disponibles.
– Analizar el peso de las variables independientes, pudiendo eliminar aquéllas que tengan una escasa influencia en la formación del precio.

En definitiva, poder llegar a establecer un sistema de gestión y análisis de los efectos de la salinidad en los cultivos, apoyado con herramientas SIG.

Obtención de datos de campo

El estudio tiene como base el trabajo Fin de Carrera "Salinidad y metales pesados en la Vega Baja" del Ingeniero Técnico Agrícola Diego Joaquín Lafuente Tarí, de enero de 2003, y dirigido por el Doctor D. Manuel Nieves Ruiz. Este trabajo analiza la contaminación por salinidad y metales pesados en los suelos regables de la Vega Baja a lo largo de las principales acequias del río Segura.

En dicho trabajo se analizó el agua del río Segura en los siguientes puntos de muestreo, en su recorrido a través del final de la provincia de Murcia: Merancho; y parte de la de Alicante: Norias gemelas, Sifón Trasvase Tajo-Segura y Orihuela.

Se tomaron muestras de suelos, regados con las acequias Alquibla, Molina, Los Huertos, Puertas de Murcia, Almoravit, del Escorratel, de Almoradí y Comuna (Alcudia y Los Huertos). También con los canales del Merancho, Reguerón y Trasvase Tajo Segura por la Margen Izquierda en Elche.

Parte de los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 1, donde se recogen los valores de la conductividad eléctrica y de los elementos potencialmente tóxicos como son cloruros, sodio y boro.

Cuadro 1. Resultados de la salinidad total y elementos potencialmente tóxicos.

Muestra nº	Origen del agua	Situación	CE_e (dS/m)	Cl^- (mmol/l)	Na^+ (mmol/l)	B (mmol/l)
1	Puertas de Murcia	Orihuela	3,28	13,80	16,78	1,21
2	Puertas de Murcia	Orihuela	2,53	9,60	12,00	1,29
3	Molina	Hurchillo	6,00	26,00	25,74	1,10
4	Molina	Orihuela	5,72	23,00	24,96	1,45
5	Callosa	Orihuela	3,92	14,30	15,91	1,31
6	Almoravit	Orihuela	5,45	30,90	27,22	1,22
7	Los Huertos	Molins	3,77	17,30	16,52	1,14
8	Callosa	Callosa del Segura	4,32	19,20	19,13	1,01
9	Escorratel	Orihuela	3,47	16,50	17,57	1,07
10	Los Huertos	Rojales	2,70	10,00	10,00	0,99
11	Alcudia	Rojales	4,67	13,40	17,74	1,62
12	Merancho	El Raal	2,56	7,40	8,26	1,51
13	Río Segura	Desamparados	3,41	12,20	12,87	1,39
14	Río Segura	Benejúzar	1,21	3,00	4,35	0,68
15	Alquibla	Benejúzar	1,60	4,80	6,26	0,54
16	Vieja de Almoravit	Benejúzar	1,54	4,80	6,17	0,58
17	Mayayo	Benejúzar	1,75	5,60	8,61	0,96
18	Trasvase Tajo-Segura	Elche	1,92	5,50	5,74	0,63
Medias			**3,32**	**13,18**	**14,21**	**1,09**

Figura 3. Puntos de análisis de muestras a lo largo del Río Segura.

Cuadro 2.a. Rendimientos máximos de algunos cultivos de la Vega Baja del Segura, según los valores de salinidad analizados en cada muestra.

	Nº								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	CE (dS/m)								
CULTIVO	**3,28**	**2,53**	**6,00**	**5,72**	**3,92**	**5,45**	**3,77**	**4,32**	**3,47**
Tomate	92,57	92,57	66,67	69,33	86,48	71,90	87,90	82,67	90,76
Pepino	89,60	89,60	53,33	57,07	81,07	60,67	83,07	75,73	87,07
Espinaca	90,15	90,15	69,23	71,38	85,23	73,46	86,38	82,15	88,69
Apio	90,86	90,86	74,07	75,80	86,91	77,47	87,84	84,44	89,69
Col	85,49	85,49	58,82	61,57	79,22	64,22	80,69	75,29	83,63
Patata	80,96	80,96	48,19	51,57	73,25	54,82	75,06	68,43	78,67
Maíz	80,96	80,96	48,19	51,57	73,25	54,82	75,06	68,43	78,67
Pimiento	74,93	74,93	36,62	40,56	65,92	44,37	68,03	60,28	72,25
Lechuga	74,29	74,29	38,96	42,60	65,97	46,10	67,92	60,78	71,82
Rábano	72,99	72,99	37,66	41,30	64,68	44,81	66,62	59,48	70,52
Cebolla	66,45	66,45	22,58	27,10	56,13	31,45	58,55	49,68	63,39
Zanahoria	67,89	67,89	29,58	33,52	58,87	37,32	60,99	53,24	65,21
Nabo	78,56	78,56	54,05	56,58	72,79	59,01	74,14	69,19	76,85
Palmera	100,00	100,00	92,86	93,86	100,00	94,82	100,00	98,86	100,00
Pomelo	76,13	76,13	32,26	36,77	65,81	41,13	68,23	59,35	73,06
Naranjo	74,92	74,92	31,75	36,19	64,76	40,48	67,14	58,41	71,90
Almendro	66,42	66,42	15,09	20,38	54,34	25,47	57,17	46,79	62,83
Limonero N.Amargo	81,63	89,46	53,24	56,16	74,95	58,98	76,51	70,77	79,65
Limonero M.Cleopatra	83,61	93,85	46,45	50,27	74,86	53,96	76,91	69,40	81,01
Limonero C.Macrophylla	70,13	82,31	25,97	30,52	59,74	34,90	62,18	53,25	67,05

Cuadro 2.b. Rendimientos de algunos cultivos de la Vega Baja del Segura, según los valores de salinidad analizados.

	Nº								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	CE (dS/m)								
CULTIVO	**2,70**	**4,67**	**2,56**	**3,41**	**1,21**	**1,60**	**1,54**	**1,75**	**1,92**
Tomate	98,10	79,33	99,43	91,33	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Pepino	97,33	71,07	99,20	87,87	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Espinaca	94,62	79,46	95,69	89,15	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Apio	94,44	82,28	95,31	90,06	100,00	100,00	100,00	100,00	99,26
Col	91,18	71,86	92,55	84,22	100,00	100,00	100,00	100,00	98,82
Patata	87,95	64,22	89,64	79,40	100,00	100,00	100,00	99,40	97,35
Maiz	87,95	64,22	89,64	79,40	100,00	100,00	100,00	99,40	97,35
Pimiento	83,10	55,35	85,07	73,10	100,00	98,59	99,44	96,48	94,08
Lechuga	81,82	56,23	83,64	72,60	100,00	96,10	96,88	94,16	91,95
Rábano	80,52	54,94	82,34	71,30	99,87	94,81	95,58	92,86	90,65
Cebolla	75,81	44,03	78,06	64,35	99,84	93,55	94,52	91,13	88,39
Zanahoria	76,06	48,31	78,03	66,06	97,04	91,55	92,39	89,44	87,04
Nabo	83,78	66,04	85,05	77,39	97,21	93,69	94,23	92,34	90,81
Palmera	100,00	97,61	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Pomelo	85,48	53,71	87,74	74,03	100,00	100,00	100,00	100,00	98,06
Naranjo	84,13	52,86	86,35	72,86	100,00	100,00	100,00	99,21	96,51
Almendro	77,36	40,19	80,00	63,96	100,00	98,11	99,25	95,28	92,08
Limonero N.Amargo	87,68	67,12	89,14	80,27	100,00	99,16	99,79	97,60	95,82
Limonero M.Cleopatra	91,53	64,62	93,44	81,83	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Limonero C.Macrophylla	79,55	47,56	81,82	68,02	100,00	97,40	98,38	94,97	92,21

Figura 4. Mapa temático de la conductividad eléctrica del suelo CE (dS/m).

Figura 5. Rangos de disminución del rendimiento en lechuga, según la conductividad eléctrica del suelo.

Figura 6. Rangos de disminución del rendimiento en limonero, según la conductividad eléctrica del suelo.

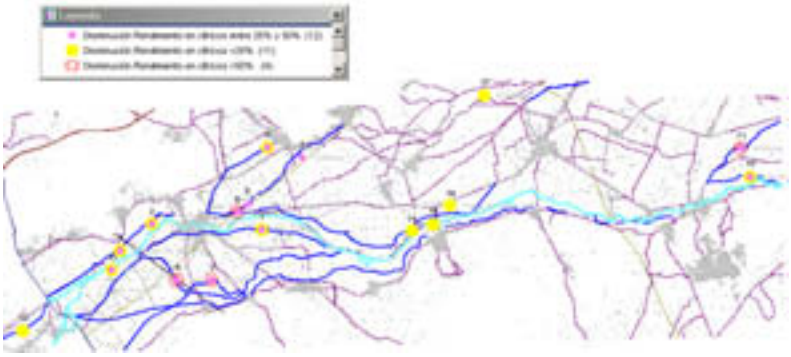


Figura 7. Rangos de disminución del rendimiento en cítricos, según la conductividad eléctrica del suelo.

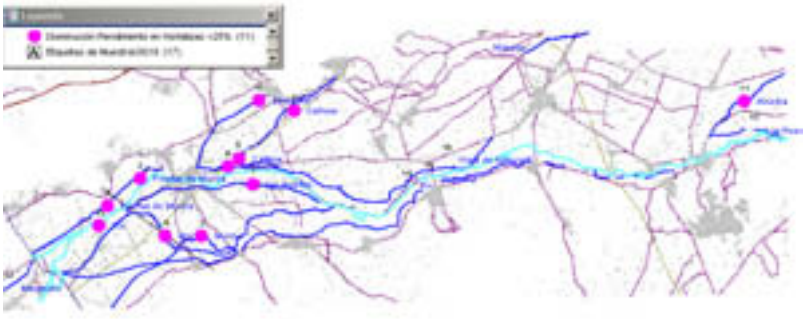


Figura 8. Disminución del rendimiento en hortalizas (brócoli, espinaca, apio, col y lechuga, etc) según la conductividad eléctrica del suelo.

CONCLUSIONES

La utilización de los SIG no sólo ha revolucionado el mundo de la cartografía, sino que sus aplicaciones sucesivas a otros campos ha ido provocando importantes cambios en la manera de trabajar de aquellas materias que tratan de alguna manera con datos geográficos, como lo es, claramente, el análisis de los problemas derivados de la salinidad del agua de riego en los cultivos.

El estudio y gestión de los rendimientos de los cultivos en las parcelas analizadas no es una operación aislada, sino que supone un proceso donde, por una parte, deben ser localizadas cartográficamente con precisión para su análisis espacial y, por otra, asociarle sus características agronómicas y los resultados de los análisis realizados. Los SIG son una potente herramienta para la captura, almacenamiento, manipulación y análisis de los datos, no sólo geográficos, sino también, como es nuestro caso, técnicos y económicos. Su capacidad para gestionar e

integrar información de múltiples orígenes nos permite realizar análisis, que en la práctica resultarían inasequibles por los métodos convencionales. Se obtiene así un mejor conocimiento de los efectos de la salinidad sobre las parcelas de cultivo en la zona de estudio y nos conduce de forma más fácil a la mejor explotación de las mismas

Para una zona concreta de regadío sobre la que se han analizado los suelos de determinadas parcelas de cultivo, se han establecido una serie de rangos sobre la disminución de los rendimientos de los diferentes cultivos, que permiten conocer los efectos que produce la salinidad del agua de riego.

Este análisis espacial permite establecer relaciones entre una variable económica fundamental, la rentabilidad de un cultivo, con otras variables con las siguientes características:

- *Geográficas:* superficie, situación, procedencia del agua de riego, etc.
- *Técnicas:* tipo de cultivo, sistema de riego, marco de plantación, fertilización, etc.

De esta forma se consigue analizar geográficamente, mediante la relación entre todas las variables, los efectos provocados por la salinidad, permitiendo identificar los problemas, tanto en una extensa zona regable, como en parcelas puntuales.

De la información aportada por el SIG, se puede llegar de forma más fácil, y sobre todo con una visión geográfica, a intentar paliar los efectos negativos de la salinidad mediante diversas estrategias relacionadas con el manejo agronómico de las parcelas (tipo de cultivo, densidad de plantación, control de la salinidad en la zona radicular y abonado) e incluso como herramienta de ayuda con la mejora genética.

Por ultimo, y como una extensión de cara al futuro, se apunta la posibilidad de mantener y actualizar la aplicación SIG creada en el presente trabajo, con la obtención de nuevos datos (análisis de suelo y agua, tipos de cultivo, producciones reales, etc). También está previsto disponer en breve plazo de la cartografía catastral de la zona de estudio. Se obtendría así una completa base de datos que ayudaría a estudiar la evolución de la salinidad y su influencia sobre los rendimientos de los cultivos en la Vega Baja del Segura.

REFERENCIAS

Bernstein, L.,(1963):" Osmotic adjustment of plants to saline media: II. Dynamic phase". *American Journal of Botany* 50:360-370.

Lafuente Tarí, D.J. (2003): *Salinidad y metales pesados en los suelos de la Vega Baja del Segura*. Trabajo Fin de Carrera. UMH.

Levit,J. (1980): *Responses of plants to environmental stresses. II. Water, radiation, salt and others stresses*.

Maas, E.V. (1986): "Salt tolerance of plants". *Applied Agricultural Research* 1:12-26.

Maas, E.V., Hoffman, G.J. (1977): "Crop salt tolerance: current assessment". *Journal of the Irrigation and Drainage Division*.

Nieman, R.H., Shannon, M.C. (1977): "Screening for salt tolerance". *AID Joint Invitational Workshow Adaptation of plants to Mineral Stress in Problem Soils.*

Nieves Ruiz,, M. (1990): *Tolerancia del limonero a la salinidad*. Tesis doctoral. Universidad de Murcia.

Nieves Ruiz,, M. (1995): *Estudio de la Contaminación por Salinidad de las Aguas de Riego y los Suelos de la Vega Baja del Segura*. Universidad Politécnica de Valencia; E.U.I.T.A., Orihuela.

Shannon, M.C. (1979): “In quest of rapid screening techniques for plant salt tolerance”. *HortScience* 14: 587-589.

Shannon, M.C. (1985): “Principles and strategies in breeding for higher salt tolerance”. *Plant and Soil 89*:227-241.

Cartografía de peligrosidad de contaminación de las aguas subterráneas mediante un SIG. Aplicación al acuífero de la Sierra de Mijas (Málaga)

J.M. Vías Martínez[1], M.J. Perles Roselló[1] y B. Andreo Navarro[2]

(1) Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, s/n, 29071 Málaga.
(2) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, s/n, 29071 Málaga.

RESUMEN

El peligro de contaminación del acuífero de la Sierra de Mijas ha sido evaluado y cartografiado mediante un método desarrollado recientemente por el programa europeo COST Action 620. Este método tiene en cuenta la toxicidad de la fuente contaminante y la intensidad y probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación. La estimación y posterior superposición cartográfica se ha realizado en el SIG Arcview 3.2. Según el factor nocividad, las actividades que causan mayor peligro en la zona de estudio tienen un carácter puntual y muy localizado de forma que se asocian a gasolineras y urbanizaciones sin alcantarillado. El factor intensidad, indicativo de la concentración de contaminantes, es máximo allí donde se localizan los sectores de mayor concurrencia de personas y vehículos, principalmente, núcleos turísticos-costeros y la carretera N-340, ambos en la parte oriental de la sierra. El factor probabilidad muestra valores máximos debido a la falta de medidas que controlen el riesgo de vertido o fuga. El mapa final de peligrosidad en la zona de estudio no muestra un elevado potencial contaminante de las actividades humanas, debido a la ausencia de elementos considerados por el método con una peligrosidad muy elevada, tales como refinerías o centrales energéticas. La Sierra de Mijas es un espacio muy turístico y urbanizado donde la actividad industrial es muy escasa.

Palabras Clave: *peligro, contaminación, actividad humana, aguas subterráneas, SIG, Sierra de Mijas, Málaga.*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

ABSTRACT

Pollution potencial hazards in Sierra Mijas have been assessed and mapping by a method develop in the European program COST Action 620. This method takes into account the toxicity of harmful substances furthermore the likelihood and quantity of a contamination event. Its assessment and overlay have been made in Arcview 3.2 GIS. According toxicity factor, the human activities most dangerous in sierra de Mijas are points related with gasoline station and urbanisation without sewer systems. Quantity factor shows the most important concentration of harmful activities in oriental sector by both touristy villages and the N340 highway. The likelihood factor indicates the unsecured of the human activities on the aquifer and maximum values are obtained. The final map in test site shows a low degree of the harmfulness because the industrial activities are the most toxic and in the test site there is not this kind of hazard. In Sierra de Mijas the human activities main are related with the infrastructural development and its toxicity is lower according the authors of the method.

Keywords: *hazard, contamination, human activities, groundwater, GIS, Sierra de Mijas, Málaga.*

INTRODUCCIÓN

El peligro es el componente del riesgo que con mayor frecuencia y exahustividad ha sido estudiado en los trabajos de riesgo. La amplia tradición en este tipo de estudios ha motivado que exista un elevado número de definiciones de peligro y peligrosidad, en ocasiones sinónimos de riesgo y peligro, respectivamente *(Kates,* 1979*; Varnes,* 1984*; Rahn,* 1986*; Cendrero,* 1987*; Ayala,* 1988*; Smith,* 1992*; Pita,* 1999*).*

Warner (1992) define un peligro como un evento o proceso continuo susceptible de degradar, directa o indirectamente, la calidad del medio ambiente. La peligrosidad es función de la probabilidad y severidad con que un determinado peligro se manifiesta en el territorio.

En el caso concreto de contaminación de las aguas subterráneas, los peligros pueden ser definidos como fuentes potenciales de contaminación procedentes de la actividad humana en el territorio (*De Keteleare et al.,* 2004). Estas fuentes pueden ser tanto puntuales o concentradas como difusas o dispersas en el espacio.

Históricamente, los estudios de contaminación de aguas subterráneas han estado relacionados, hasta finales del siglo XIX y principios del XX, con la presencia de bacterias patógenas en los pozos, mientras que tras la segunda guerra mundial el peligro de contaminación tiene su principal foco en las sustancias procedentes de la industria química (*Breeuwsma y Duijvenbooden,* 1987). En la actualidad, se considera como peligro potencial de contaminación a la actividad humana susceptible de producir sustancias contaminantes en su funcionamiento.

Las principales sustancias nocivas son los metales pesados, compuestos orgánicos químicos, fluidos orgánicos inmiscibles, bacterias y virus. La cantidad necesaria para considerar cada uno de estos elementos como contaminante del agua varía en función de la toxicidad del mismo, por lo que no es posible establecer un umbral universal para todos los tipos de contaminantes. De esta manera, se considera contaminante a toda sustancia cuya cantidad sobrepasa los límites establecidos por ley.

Respecto a la peligrosidad de la actividad humana, las principales fuentes de contaminación se asocian con el manejo de sustancias peligrosas en distintas fases del engranaje socioeconómico, donde destaca la producción, almacenaje, distribución y su aplicación en un amplio rango de actividades productivas, que dan lugar a la emisión de efluentes gaseosos, descarga de aguas residuales y líquidos orgánicos, almacenaje y depósito de residuos sólidos, excavaciones mineras o distribución de fertilizantes y pesticidas.

La contaminación del agua subterránea se relaciona con la pérdida de su calidad (en su composición química), que, a su vez, está directa o indirectamente relacionada con procesos naturales y, principalmente, procesos sociales. Las variaciones que se producen en la calidad de las aguas pueden perjudicar la utilidad del agua como recurso natural pero no necesariamente afectar a la salud (*Matthess y Miller*, 1994). Este hecho tiene especial trascendencia en la estimación de las medidas de mitigación del riesgo, ya que induce a un análisis de la vulnerabilidad humana desde un punto de vista de las pérdidas económicas además de la afectación sobre la calidad de vida de las personas y su salud.

El objetivo de este trabajo es identificar y cartografiar los peligros potenciales de contaminación derivados de la actividad humana en la Sierra de Mijas y evaluar su grado de peligrosidad a través de la aplicación de un método desarrollado recientemente por el programa europeo COST Action 620 sobre cartografía de riesgo y vulnerabilidad de acuíferos carbonatados a la contaminación.

La Sierra de Mijas constituye un acuífero carbonatado formado por mármoles triásicos de elevada transmisividad, que almacena un importante volumen de agua subterránea. La importancia de este acuífero se incrementa por el alto volumen de población dependiente de sus recursos hídricos, sobre todo en temporada turística alta. Los principales núcleos de población que abastece son las localidades de Torremolinos, Benalmádena y Alhaurín de la Torre los cuales forman parte del área metropolitana de Málaga. Estos municipios, junto con el de Mijas, son los que ejercen mayor presión sobre el acuífero tanto, en lo referente a su explotación como, por la ocupación urbanística de su superficie y actividades potencialmente contaminantes, que implican un riesgo de contaminación.

En términos generales, el acuífero de la Sierra de Mijas tiene capacidad de autoprotección debido al elevado espesor de la zona no saturada que atenúa la carga contaminante de las sustancias tóxicas, aunque el desarrollo urbanístico tiene lugar allí donde el espesor de la zona no saturada es menor, en las proximidades de los manantiales y sondeos de abastecimiento. Por otra parte, el borde septentrional y oriental del acuífero está cubierto por margas del Plioceno que reducen la infiltración y aumentan la protección natural de las aguas subterráneas.

MÉTODO DE EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LA PELIGROSIDAD Y SU APLICACIÓN A LA SIERRA DE MIJAS

La evaluación y cartografía de los peligros de contaminación de las aguas subterráneas como un componente determinante en la estimación del riesgo es una temática que se está desarrollando desde mediados de la década de los 90. En esta línea se pueden citar los trabajos de *Civita y De Maio* (1997) y *Darmendrail* (2001) que abordan el análisis de la peligrosidad de las fuentes potencialmente contaminantes en función de la toxicidad e intensidad del contaminante, respectivamente. La escasez de métodos de evaluación y cartografía de la peligrosidad conlleva paralelamente una carencia en el uso de técnicas de superposición y representación cartográfica mediante SIG.

En este trabajo, la evaluación y análisis de la peligrosidad de las actividades humanas que se desarrollan en el acuífero de la Sierra de Mijas se ha llevado a cabo a partir de la aplicación del método Hazard Index (HI) desarrollado por *De Keteleare et al. (*2004*) en el marco del programa europeo COST Action 620*.

El método HI para cartografía de los peligros potenciales de contaminación tiene en cuenta factores relacionados con la nocividad, intensidad y probabilidad de ocurrencia de un evento contaminación. La estimación del peligro mediante este método se puede resumir en tres puntos:

1. Inventario y cartografía de peligros.
2. Obtención de los factores de peligro: nocividad, intensidad y probabilidad.
3. Cálculo del índice HI y elaboración del mapa de peligrosidad.

Inventario de peligros

La evaluación y cartografía de los peligros se inicia con la recopilación de las actividades y elementos potenciales de contaminación de las aguas subterráneas. El cuadro 1 recoge las categorías y subcategorías en que se agrupan los distintos peligros potenciales de contaminación.

El inventario de puntos se ha realizado a partir de trabajo de campo y utilizando como base cartográfica el Mapa Topográfico de Andalucía, la Ortofotografía Digital de Andalucía (Color) a escala 1/10.000 y el mapa de cultivos y aprovechamientos a escala 1/50.000.

Para la expresión cartográfica se han utilizado distintas formas de expresión cartográfica: polígonos, líneas y puntos, variables en función de la representatividad a la escala de salida (1/50.000 en origen).

Obtención de los factores nocividad, intensidad y probabilidad

De acuerdo con *Drew y Hötzl* (1999), el impacto de un peligro potencial sobre acuíferos carbonatados queda definido por su toxicidad, extensión y duración.

El método HI define el impacto sobre la calidad del agua subterránea mediante el factor H (nocividad de un contaminante). Este factor es función de la carga contaminante, solubilidad y movilidad de las sustancias perjudiciales, propiedades que determinan tanto la toxicidad del contaminante como la duración del mismo.

En total, se diferencian 96 peligros potenciales de contaminación, de los cuales 42 están ligados a infraestructuras urbanas, 41 a actividades industriales y 13 con la agricultura y ganadería. La nocividad de cada peligro se indica mediante valores ordinales que varían entre 10, mínima nocividad y 100, máxima nocividad (cuadro 1).

Cuadro 1. Categorías y subcategorías de las actividades potencialmente peligrosas y las puntuaciones posibles de su nocividad (Elaborado a partir de *De Keteleare et al.*, 2004).

Categoría	Subcategoría	Nocividad
Infraestructuras de desarrollo (A)	Aguas residuales (A1)	85-25
	Residuos municipales (A2)	50-35
	Combustibles (A3)	65-50
	Transporte y tráfico (A4)	60-30
	Instalaciones recreativas (A5)	35-25
	Varios (A6)	35-25
Actividades industriales (B)	Minería (activa o abandonada) (B1)	85-60
	Canteras (B2)	30-10
	Explotación de gas y petróleo (B3)	70-40
	Plantas industriales (B4)	85-40
	Plantas energéticas (B5)	65-50
	Almacenaje industrial (B6)	100-45
	Desvío y tratamiento de aguas residuales (B7)	85-40
Actividades agropecuarias (C)	Ganadería (C1)	45-20
	Agricultura (C2)	60-15

El factor intensidad (Q_n) indica la cantidad de sustancia que puede ser vertida en caso de accidente y se relaciona con la dimensión de la fuente contaminante. El método HI estima en un 20% el porcentaje de variación máximo de la nocividad inicial de un contaminante potencial según la dimensión de la fuente. Con ello, este factor permite diferenciar la peligrosidad de las fuentes contaminantes no sólo en origen sino dentro de una misma tipología de acuerdo con la magnitud de la misma.

Para evaluar la intensidad se ha empleado la dimensión de cada actividad o la cantidad de la fuente contaminante. Este factor se ha calculado para las gasolineras a partir de la cantidad de combustible que pueden almacenar los tanques que abastecen a los surtidores mediante entrevistas con los responsables de las estaciones de servicio. En el caso de las urbanizaciones se ha obtenido la densidad de vivienda mediante un muestreo aleatorio con una cuadrícula de 1 Ha de superficie sobre la ortofotografía digital 1/10.000. Para las carreteras se ha utilizado el

índice medio diario de circulación de la Consejería de Obras Públicas y Transportes. (*COPT*, 2001). Por último, en el caso de los establos según el número de unidades de un conjunto.

El factor R_f considera la probabilidad de que ocurra un evento de contaminación y su valor varía entre 0 y 1. Para evaluar la probabilidad de ocurrencia, se puede utilizar el estado de conservación o mantenimiento de las actividades productivas y la seguridad de las instalaciones o de la actividad.

En el cálculo de la probabilidad se ha utilizado como criterio de estimación las medidas de protección inherentes a la actividad desarrollada. Respecto a las gasolineras se ha estimado un valor de reducción del 15 % de la probabilidad de ocurrencia debido a las fuertes medidas de seguridad contra incendios que indirectamente reducen el riesgo de fugas. En los cementerios se ha utilizado como criterio el tipo de enterramiento. De este modo, a los cementerios con enterramiento tipo nicho se les ha reducido la nocividad un 80%.

En cuanto al resto de los peligros no se ha realizado ninguna aproximación para gradar la probabilidad o la intensidad por lo que se les ha asignado un valor 1.

Elaboración del índice de peligrosidad HI

El índice de peligrosidad HI se obtiene del producto de los tres factores anteriores (1),

$$HI = H \cdot Q_n \cdot R_f \qquad (1)$$

El índice final de peligro de contaminación puede variar entre un valor mínimo de 0 y un máximo de 120 y se agrupa en cinco clases en función de la peligrosidad final (cuadro 2).

Cuadro 2. Clases del índice de peligro (*De Keteleare et al.*, 2004).

Intervalos del índice HI	Clase de peligrosidad
(0 – 24)	Muy Baja
(24 – 48)	Baja
(48 – 72)	Moderada
(72 – 96)	Alta
(96 – 120)	Muy Alta

El mapa de peligrosidad, mediante el índice HI, se obtiene a partir de la superposición espacial de los factores nocividad, intensidad y probabilidad mediante el empleo del SIG Arcview 3.2. La superposición se ha llevado a cabo a partir de la intersección de capas de información, de manera que se obtienen todos los posibles casos de peligrosidad en la zona de estudio. Posteriormente, y mediante el empleo de operadores aritméticos de las bases de datos, se calcula el índice HI para cada uno de los casos obtenidos. A partir de este índice se han elaborado unidades homogéneas en función de la clase de peligrosidad.

RESULTADOS

Inventario de peligros en la Sierra de Mijas

Las fuentes potenciales de peligro localizadas en el área de estudio se corresponden con 22 tipos ligados a procesos urbanísticos, industriales y agropecuarios. En el mapa de la figura 1 aparecen localizadas las distintas fuentes potenciales de contaminación. La importancia que adquieren los procesos urbanísticos en la Sierra de Mijas tiene su reflejo en la relación de peligros inventariados, donde más de dos tercios están relacionados con el grupo de infraestructuras de desarrollo urbano.

Los peligros están localizados, mayoritariamente, en los bordes de la sierra donde la accesibilidad de la población es mayor y, a su vez, en el sector oriental donde están presentes más de la mitad de las fuentes potenciales de contaminación.

En el interior de la sierra, la presencia de peligros es menor y está relacionada con la actividad extractiva de las canteras y los caminos de acceso a las mismas. Puntualmente, se han localizado escombreras, vertederos de RSU y un centro turístico en la cima del monte Calamorro con diversas infraestructuras de ocio: cafeterías, cuadras y jardines regados con aguas depuradas.

Las actividades potencialmente peligrosas para la calidad de las aguas subterráneas, localizadas en el área de estudio, ocupan un 18% de su superficie, aproximadamente 19 km². En función de la superficie que ocupan los distintos peligros, se han extraído los siguientes datos:

Los núcleos urbanos localizados en la Sierra de Mijas representan el 57% de los peligros observados. El 35% de los peligros detectados en el área de estudio se localizan sobre materiales de elevada permeabilidad (mármoles), mientras que el resto está sobre rocas de baja permeabilidad (margas del Plioceno).

Factores de peligro en la Sierra de Mijas

En la Sierra de Mijas es escasa la presencia de peligros con una elevada nocividad, como son las actividades industriales. Sin embargo, sí abundan los peligros relacionados con las infraestructuras urbanas de elevada nocividad. Las fuentes de peligro con mayor grado de nocividad localizadas en la Sierra de Mijas son las urbanizaciones sin sistema de alcantarillado y las gasolineras (cuadro 3).

Cuadro 3. Fuentes de contaminación detectadas en la Sierra de Mijas y su valor de nocividad según *De Keteleare et al.* (2004).

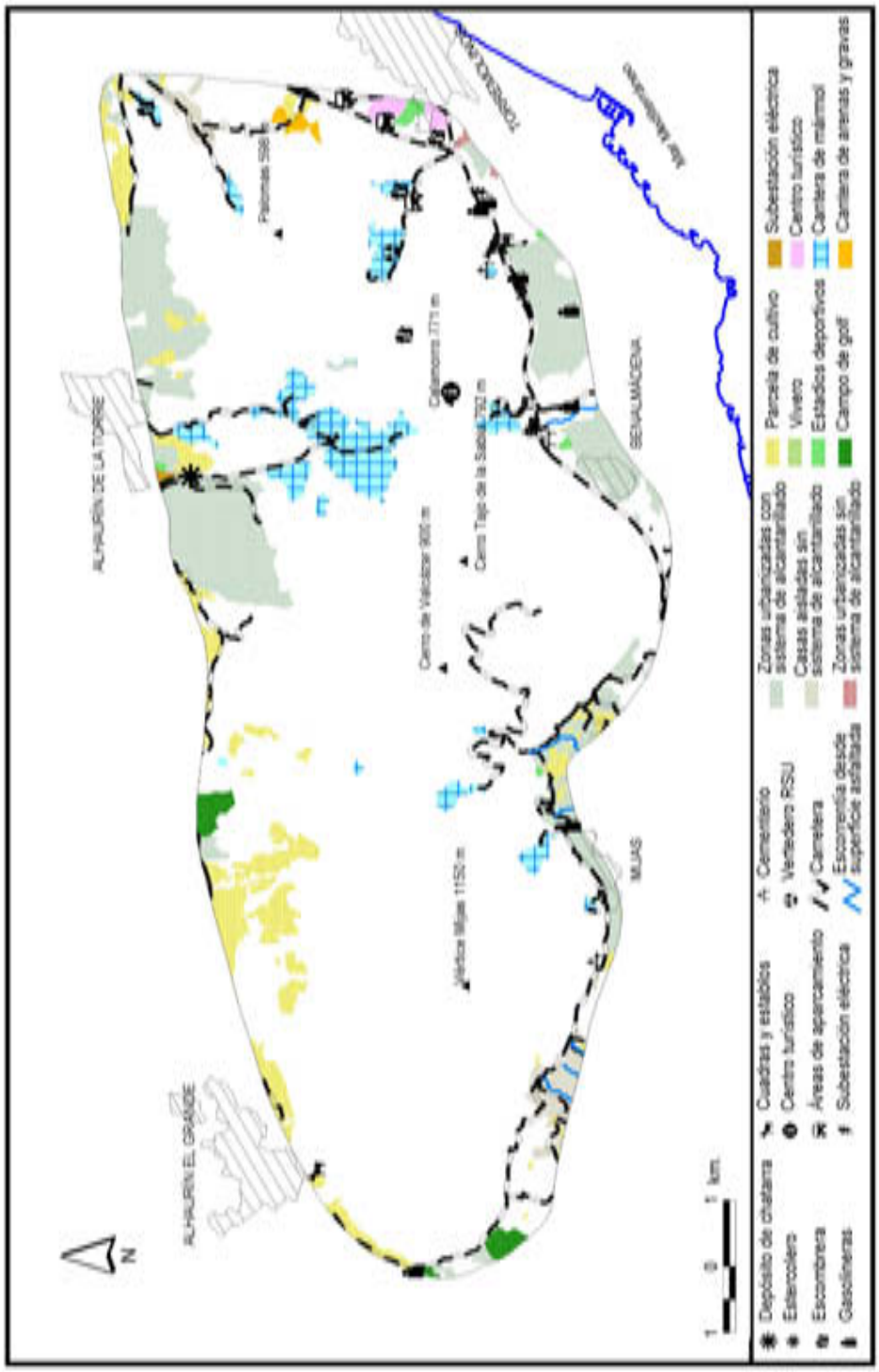


Figura 1. Localización de los peligros potenciales de contaminación en el acuífero de la Sierra de Mijas

Categoría	Subcategoría	Tipos de peligros	Nocividad
A	A1	Urbanizaciones sin sistema de alcantarillado	70
	A3	Gasolineras	60
	A1	Casas sin alcantarillado	45
C	C1	Estercolero	45
A	A4	Carreteras	40
	A2	Vertedero de residuos sólidos urbanos	40
	A2	Depósito de chatarra	40
	A1	Urbanizaciones con sistema de alcantarillado	35
	A2	Depósito de escombros	35
	A4	Aparcamiento-depósito de vehículos	35
	A5	Campo de golf	35
	A5	Centro turístico	30
	A6	Estación de transformación	30
B	B2	Canteras de gravas y arenas	30
C	C1	Establos	30
A	A1	Escorrentía desde superficie asfaltada	25
	A6	Cementerio	25
	A5	Estadios deportivos	25
B	B2	Canteras	25
C	C2	Viveros	20
	C2	Campos agrícolas cerrados	20
B	B2	Excavación y terraplenes	10

Respecto a los factores intensidad y probabilidad predominan los valores cercanos a uno, de manera que la intensidad es de clase intermedia y la probabilidad máxima.

Mapa de peligrosidad de la Sierra de Mijas. Índice HI

El mapa del índice HI obtenido para la Sierra de Mijas (figura 2) muestra, en general, que la peligrosidad de las fuentes potenciales de contaminación es poco importante. Hay un claro predominio de las clases "Baja" y "Muy Baja" y sólo se han localizado peligros con un grado "Moderado" de forma puntual, asociados a las gasolineras y a un pequeño sector en el borde suroriental de la sierra, donde se ha detectado alguna urbanización sin sistema de alcantarillado. Los elementos con un grado de peligrosidad "Muy Bajo" son las actividades ligadas al sector agropecuario, mientras que el resto tiene un valor "Bajo".

El sector con mayor grado de peligrosidad está localizado en la mitad oriental de la sierra

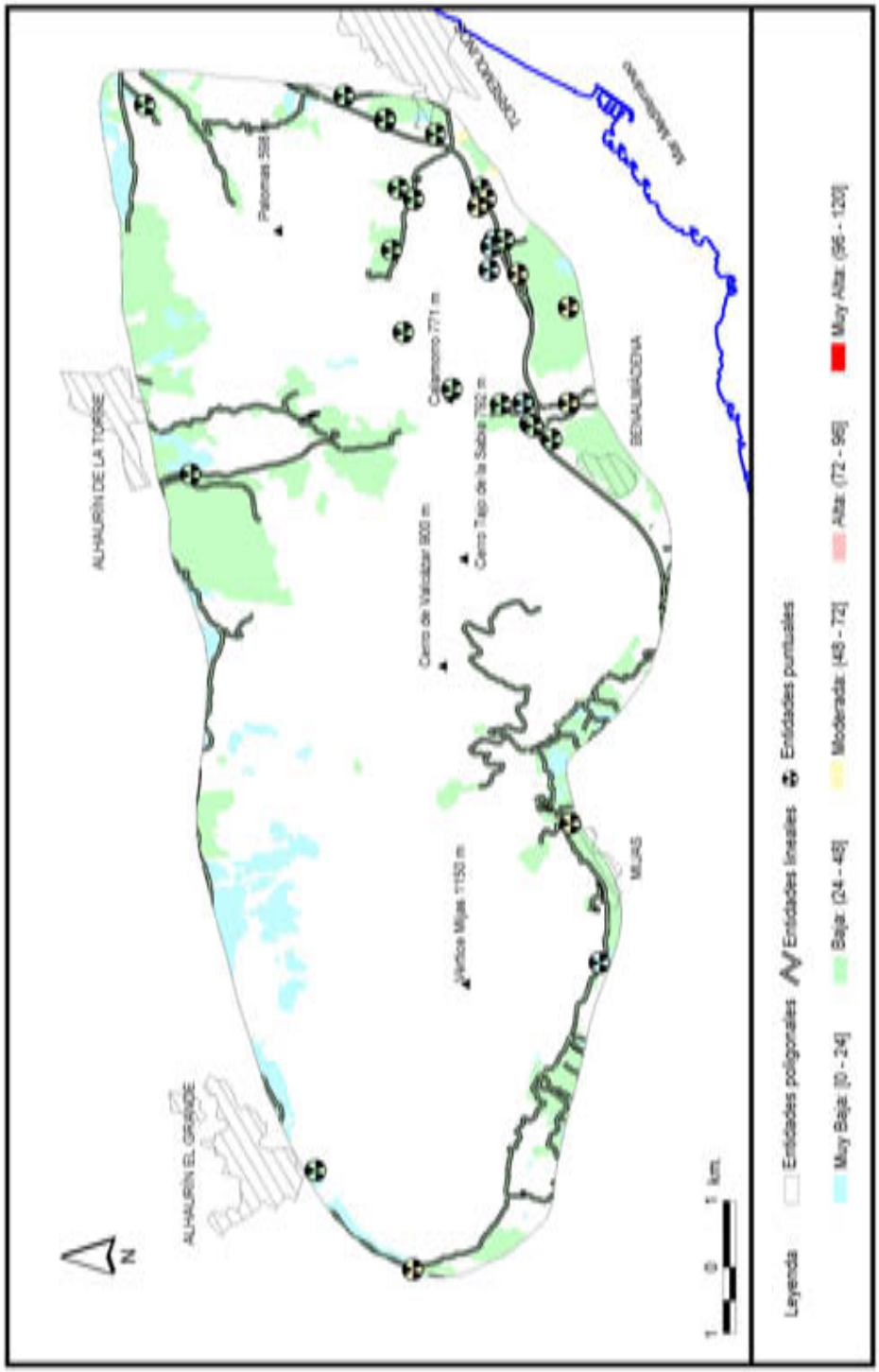


Figura 2. Mapa de peligrosidad de las fuentes potenciales de contaminación en la Sierra de Mijas.

y más concretamente en el sector suroriental debido a la presencia de gasolineras, vertederos RSU, escombreras y establos. La zona con menor nivel de peligrosidad está en el extremo noroccidental de la sierra, en el municipio de Alhaurín el Grande, donde han sido detectados peligros de baja nocividad relacionados básicamente con actividades agropecuarias.

El análisis de la peligrosidad de las fuentes potenciales de contaminación en el conjunto de la zona de estudio, se ha realizado a partir del porcentaje de clases de peligrosidad. En el caso de las entidades poligonales se ha calculado el porcentaje de superficie respecto de la superficie total con peligros en la Sierra de Mijas. Para los elementos puntuales se han calculado el porcentaje en función del número de elementos potenciales de contaminación. En cuanto a las entidades lineales se ha utilizado la longitud de los tramos potencialmente peligrosos (cuadro 4).

Cuadro 4. Porcentaje de las clases de peligrosidad en el acuífero de la Sierra de Mijas.

Índice HI	Entidades puntuales (%)	Entidades lineales (%)	Entidades poligonales (%)
Muy Bajo	15,15	4,42	21,69
Bajo	57,58	95,58	78,06
Moderado	27,27	0,00	0,25
Alto	0,00	0,00	0,00
Muy Alto	0,00	0,00	0,00

Los peligros representados mediante polígonos tienen una clase de peligrosidad, principalmente, "Baja" y sólo un 0'25 % es de clase "Moderada", mientras que en el resto es "Muy Baja". El sector oriental del acuífero aglutina más superficie con mayor peligrosidad y, a su vez, es en el único sector donde se han localizado zonas con peligrosidad "Moderada".

El grado de peligrosidad de las entidades lineales es "Bajo" y "Muy Bajo" y cada grado está asociado a un tipo de peligro. Así, los peligros lineales con un grado "Bajo" se corresponden con las carreteras, mientras que los de grado "Muy Bajo" son las zonas con escorrentía desde superficies pavimentadas.

En cuanto a los peligros puntuales, en general, predomina la clase "Baja". Un grado "Bajo" tiene más de la mitad del total, mientras que con un grado "Moderado" hay a una cuarta parte. Los puntos con mayor peligrosidad, clase "Moderada", se relacionan con las gasolineras, las cuales están presentes en todo el borde meridional de la sierra.

Indistintamente de la forma de cartografiar el peligro y analizar su peligrosidad (polígonos, líneas o puntos medidos en m^2, m y número de casos, respectivamente) se deduce que el grado de peligrosidad predominante en la zona de estudio es "Bajo" y que el sector oriental es el más afectado por los peligros de contaminación. Los núcleos urbanos de este sector forman parte de los procesos turísticos de la Costa del Sol, de los cuales se deriva un excesivo desarrollo urbanístico y una intensa explotación de los recursos hídricos.

La baja peligrosidad que tienen las fuentes potenciales de contaminación, en la zona de estudio puede tener su origen en el baremo utilizado para evaluar la peligrosidad de las fuentes de contaminación, dado que se ha utilizado un marco de referencia mayor como es el conti-

nente europeo. En las áreas turísticas, a la cual se circunscribe la zona de estudio, las fuentes potenciales de contaminación no están ligadas principalmente a las actividades industriales, mientras que en otros ámbitos como Europa central hay un fuerte predominio de industrias y actividades muy contaminantes. Por tanto, en los espacios turísticos, difícilmente se pueden localizar actividades con una peligrosidad elevada según los valores aportados por *De Keteleare et al*. (2004).

CONCLUSIONES

Los intervalos del índice HI con los que se elabora el mapa de peligrosidad indican que solamente los peligros con una nocividad superior a 60 y 80 (valor del factor H) pueden alcanzar una clase de peligrosidad "Alta" o "Muy Alta", respectivamente. Con un valor de nocividad superior a 60 hay 25 actividades, todas ellas relacionadas con la industria excepto tres (3 % del total de actividades humanas recopiladas por el método), que se corresponden con actividades ligadas al ámbito urbano. En este grupo de actividades urbanas no se incluyen por ejemplo elementos a priori peligrosos como vertederos de residuos sólidos urbanos o gasolineras. En el caso de los vertederos sólidos urbanos es muy llamativo que no puedan tener un grado de peligro "Alto" o "Muy Alto", cuando se ha comprobado que en acuíferos de similares características hidrogeológicas cercanos a la zona de estudio, como el de Marbella, la presencia de un vertedero RSU ha producido la contaminación de los recursos hídricos del acuífero por el lixiviado procedente del mismo (*Vadillo*, 2003).

El método aplicado en este trabajo muestra un elevado sesgo en la peligrosidad de las actividades y elementos del medio humano. La peligrosidad asociada al sector industrial es mucho más elevada que la relacionada con las actividades agropecuarias y urbanísticas y, solamente las actividades relacionadas con el manejo de residuos industriales muy peligrosos, como residuos nucleares o aguas residuales, pueden tener una peligrosidad "Muy Alta". Éste es un hecho que sugiere una reflexión sobre la necesidad de calibración y/o adaptación de una metodología diseñada recientemente para su aplicación en todo el ámbito europeo. En Europa Central la actividad industrial está muy difundida y la presencia de peligros extremos no es un hecho aislado. En cambio, el ámbito de la Costa del Sol es un espacio netamente turístico donde las actividades potenciales de contaminación tienen una peligrosidad menor en relación con la actividad industrial. Indirectamente, se asocia una baja peligrosidad a la actividad urbana que no está exenta de sucesos catastróficos, como el del acuífero carbonatado de Marbella.

Por otra parte, se deduce que el método evalúa al alza los accidentes por causa mayor, según la terminología de *Pita* (1999), mientras que disminuye la importancia de aquellas fuentes que tienen un carácter difuso o penetrante como pudiera ser el caso de las urbanizaciones sin sistemas de alcantarillado, zonas agrícolas, estercoleros o vertederos RSU.

También se constata que los factores de intensidad y probabilidad, Q_n y R_f respectivamente, se tienen en cuenta de manera indirecta en el factor H de nocividad. El hecho de diferenciar tipologías urbanísticas en función de la concentración de viviendas (urbanizaciones o casas aisladas) y del tipo de saneamiento (si están conectadas o no a la red de alcantarillado) son

aspectos relacionados con la intensidad y la probabilidad de vertidos contaminantes y no atañen directamente al tipo de contaminante, puesto que es el mismo. Por tanto, la ponderación posterior del factor H con los factores Q_n y R_f es redundante en esos casos. Las edificaciones tienen un tratamiento diferencial respecto de otros elementos antrópicos, como pudieran ser las carreteras. Las carreteras no se diferencian en función de la tipología (p.e. autopistas y caminos secundarios), ni tampoco en función de las medidas de seguridad que tienen (p.e. presencia o ausencia de canales de desagüe), aspectos ambos relacionados con la intensidad y la probabilidad, mientras que sí son tenidos en cuenta para las urbanizaciones.

En cualquier caso, la concentración que se ha observado de diferentes peligros de contaminación sobre el acuífero induce a pensar que no se está haciendo un correcto uso del territorio. En la medida en que los recursos hídricos subterráneos, sobre todo en caso de sequía, pueden marcar el devenir de acontecimientos medioambientales futuros, se hace indispensable la consideración del problema de la contaminación y una utilización racional y equilibrada del territorio y sus recursos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto REN2002-01797/HID de la Direción General de Investigación y es una contribución a los grupos de investigación RNM 308 y HUM 776 de la Junta de Andalucía.

BIBLIOGRAFÍA

Ayala, F.J. (1988): *Introducción a los riesgos geológicos. I curso riesgos geológicos*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp 3-20.

Breeuwsma, A. y Duijvenbooden, W. (1987): Mapping of groundwater vulnerability to pollutants in the Netherlands. Vulnerability of soil and groundwater to pollulants. En W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegeningh (Eds), *Proceedings and information nº 38, TNO Committee on hydrological research*, The Hague, pp 309-320.

Cendrero, A. (1987): *Riesgos geológicos, ordenación del territorio y protección del medio ambiente. I Curso de riesgos geológicos*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, pp 327-333.

Civita, M. y De Maio, M. (1997): Assessing groundwater contamination risk using Arcinfo via grid function. *Proceedings of ESRI conference*, San Diego, 33 p.

COPT (2001): *Plan general de aforos 2001*. Dirección General de Carreteras. Consejería de Obras Públicas y Transporte. Junta de Andalucía. CD-ROM.

Darmendrail, D. (2001): *The French approach to contaminated-land management*. BRGM/RP-51098-FR, 150 p.

Drew, D. y Hötzl, H. (1999): Conservation of karst terrains and kart waters: The future. En D. Drew y Hötzl, H. (eds) *Karst Hydrogeology and human activities. Impacts consequences and implications. International contributions to Hydrogeology nº 20*. Balkema/Rotterdam/Brookfield. pp 275-281.

De Ketelaere, D., Hötzl, H., Neukum, C., Civitta, M. y Sappa, G. (2004): Hazard analysis and mapping. En F. Zwahlen (ed), *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aqui-*

fers. Informe final de la Acción COST 620, eur 20912, European Commission, Directorate General for Research, Luxembourg, pp 86-105.

Kates, R. (1979): *Risk asessment of environmental hazard*, John Wiley & Sons, New York, 122 p.

Matthess, G. y Miller, J. (1994): Chemical and biological contaminants and their subsurface behavoir. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. En Vrba, J. y Zaporozec, A. (Eds), *International contributions to hydrogeology*, Vol 16, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp 9-20.

Pita, M. F. (coord.) (1999): *Riesgos catastróficos y ordenación del territorio en Andalucía.* Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía, Sevilla, 225 p.

Rahn (1986): *Engineering Geology. An environmental approach*. Elsevier, New York, 589 p.

Smith, K. (1992): *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster*. London and New York Routledge, 324 p.

Vadillo, I. (2003): *La contaminación por lixiviados de vertederos de residuos sólidos urbanos en acuíferos carbonatados*. El vertedero de la Mina (Marbella, Málaga). Tesis Doctoral, Universidad de Málaga, Inédita, 120 p.

Varnes, D.J. (1984): "Landslide hazard zonation: a review of principles and practice". *Natural Hazards*, nº 3, UNESCO, 63 p.

Warner, F. (1992): *Risk análisis, perception and managment: Introduction.* Royal Society (London), Study Group, 12 p.

Obtencion del mapa de riego utilizando SIG e imagenes satelitales. Caso Hantavirus en la Cordillera Neuquina, Patagonia Argentina

A. Dufilho[1], M. Rodilla[2], A. Argente Mena[2], M. Scavuzzo[3] y M. Lamfri[3]

(1) Departamento de Recursos Naturales, Asentamiento Universitario San Martín de los Andes, Universidad Nacional del Comahue, Pasaje La Paz s/n, San Martín de los Andes, Neuquén, Patagonia Argentina.
(2) Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46018 Valencia.
(3) Instituto Gulich, Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Ruta 645, km 8, Falda del Carmen, Córdoba, Argentina.

RESUMEN

Este trabajo presenta la metodología desarrollada y recomendada para realizar mapas de riesgo epidemiológico, utilizando como herramientas sistemas de información geográfica e imágenes satelitales. Se desarrolla el modelo de riesgo que considera variables de amenaza (aquéllas asociadas a la ocurrencia del agente trasmisor de la epidemia, principalmente ambientales), variables de vulnerabilidad (relacionadas a demografía e infraestructuras básicamente) y un factor epidemiológico que pondera el riesgo de contacto según el grado de infestación. Las variables ambientales se obtienen mediante clasificación supervisada de imágenes Landsat, diferencia de imágenes en las bandas 3 y 4 y análisis multitemporal. Sobre estos mapas se realizaron búfer para considerar la influencia areal de cada variable. El resultado final es un mapa zonificado en cuatro niveles de riesgo de contagio. La verificación de la metodología se realizó aplicándola al estudio del Hantavirus, enfermedad transmitida por el roedor ***Oligoryzomis longicaudatus*** *(colilargo) en su relación con la distribución y los períodos fenológicos de la especie* ***Chusquea culeou*** *(caña colihue) en la Provincia de Neuquén, Patagonia Argentina. Se utilizó información de casos de enfermedad ocurridos en el área de estudio, ubicados geográficamente por paraje y año, en total 20 casos. La comparación del mapa de riesgo con los casos permite estimar la bondad de la metodología e inferir algunos datos acerca de las predicciones de áreas de riesgo. Según esta comparación, el mapa obtenido explica aproximadamente un setenta y cinco por ciento*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

(75%) de estos casos, ya que se produjeron en áreas del mapa señaladas como de alto riesgo. La aplicación de esta metodología en la región patagónica se constituye en una propuesta innovadora que la convierte en un importante instrumento para la prevención (indicando áreas de mayor riesgo) y control de enfermedades trasmisibles.

***Palabras Clave**: Métodos Cuantitativos, SIG, Teledetección, comunicación, estilo.*

ABSTRACT

The risk model contains threat variables (associated al the occurrence of epidemic transmitter, mainly environmental variables), vulnerability variables (relate mainly with demography and infrastructure) and a epidemiological factor that measure the contact risk according to the infestation grade. The environmental variables are obtained through supervisated classification, images difference in bands 3 and 4 and multitemporal analysis. The result is a zonificated map into four levels of contagion risk. The verification of the map is made applying it at the Hantavirus study, disease transmitted by the rodent Oligoryzomis longicaudatus (colilarge) in its relationship with the distribution and the fenological periods of the plant Chusquea culeou in the province of Neuquén, Patagonia Argentina. It was used information about disease cases occurred in the study area, geographically localized by place and age (total 20 cases). The comparison risk maps with the cases, allows estimate the goodness of the methodology and infer about the predictions of risk areas. According to the comparison, the map obtained, explains about seventeen five per cent (75 %) of these cases, because they were occurred in high risk areas according to the map predictions. The application of this methodology in the patagonic region is an innovate proposition and it would be an important instrument for the prevention (indicating risk areas) and the transmissible diseases control.

***Key Words**: Quantitative Methods. GIS, Remote Sensing, paper, style.*

INTRODUCCIÓN

El modelo general de riesgo (R) planteado surge de la interacción entre factores de amenaza (A) por un lado y de vulnerabilidad (V) por el otro, quedando expresado por:

$$R = A \cdot V$$

Ecuación 1. Expresión general de riesgo.

En el caso que nos ocupa, estudio del riesgo de Hantavirus, la amenaza está representada por los ratones colilargos que son los que transmiten la enfermedad al hombre y la vulnera-

bilidad está referida a las personas, ya que son éstas los objetos susceptibles de contraer la enfermedad.

Una manera de cuantificar la amenaza sería disponiendo de información espacial y temporal de la ocurrencia de ratones colilargos. Dado que esta información no está disponible, se decidió elaborar la amenaza considerando los aspectos ambientales que caracterizan el hábitat de estos roedores para poder determinar de manera indirecta la posibilidad de ocurrencia de roedores. A través de los antecedentes existentes y del conocimiento de la dinámica de estos grupos poblacionales, se pudieron seleccionar aquellas variables ambientales que más favorecen las condiciones de vida y supervivencia.

Respecto a la vulnerabilidad es claro que se requiere información de la localización de las personas (ciudades, pueblos, establecimientos rurales, etc) y deberíamos disponer de información de actividades, educación, hábitos y de datos que puedan contribuir a caracterizar la movilidad de la gente, recorridos, tiempos de permanencia. Se recurre a información secundaria o indirecta sobre los posibles recorridos que realizarán las personas según actividades bien diferenciadas: vías de comunicación principales, caminos vecinales, senderos turísticos.

La metodología desarrollada permite obtener estas variables, incorporarlas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y aplicar el modelo de riesgo para obtener una zonificación de áreas de riesgo. Esto requiere trabajar con variables distribuidas en el espacio y en el tiempo por lo que las imágenes satelitales son un instrumento adecuado, sobretodo en estas zonas donde la información es escasa o inexistente. Esta condición impide en este trabajo incorporar todas las variables relevadas que son importantes en la caracterización epidemiológica, pero la estructura propuesta permite incorporar nuevas variables a medida que se vayan estudiando.

DESARROLLO DEL TRABAJO

Revisión de antecedentes

Para la caracterización de la amenaza y de la vulnerabilidad se han recopilado antecedentes de estudios epidemiológicos basados en información espacial, estudios de ratones (reservorio, abundancia, distribución), poblaciones e infraestructuras y casos de enfermedad registrados en la zona donde se aplicará el modelo.

En relación con el ratón colilargo (*Oligoryzomis longicaudatus*) se encontró un primer antecedente de interés en relación con la floración de la caña colihue (*Chusquea culeau) y* los brotes epidemiológicos de Hantavirus. Esto se debería a la aparición abrupta y abundante de semillas que permitirían el aumento de la población de estos ratones (son los únicos exclusivamente granívoros) que viven en el bosque andino-patagónico. El colilargo aumenta su población rápidamente durante el otoño-invierno, cuando la disponibilidad de semillas crece considerablemente. Además se reproduce y presenta sus máximos de abundancia más tardíamente que las otras especies, cuando se produce la mayor oferta de semillas (Guthmann, *1996*). Esta

especie es seguramente la candidata por excelencia a responder al fenómeno de la floración de la caña con mayor intensidad (*Sanguinetti,* 2001*).*

No son muy numerosos los estudios realizados sobre la caña colihue y menos todavía sobre floraciones, ya que ésta se produce cada 40 o 60 años (varía según autores). En 1939 se registró una floración masiva en el Parque Nacional Nahuel Huapi y hasta el año 2001 que se produzco la floración masiva en gran parte del Parque Nacional del Lanín (ubicado al norte del anterior) no se habían detectado ninguna otra floración.

Respecto a otras variables que influyen en la dinámica poblacional, algunos autores como *Monjeau* (1997), indican que los gradientes de precipitación y elevación tienen un papel importante en la determinación de la composición de roedores en la Patagonia. La influencia de la precipitación en estas comunidades es más fuerte en la transición entre el bosque y el semidesierto y la elevación parece ser más importante en regiones semidesiertas de la Patagonia.

Respecto a la temperatura, un estudio elaborado por *Folgarait et al.* (1998) establece que un alto rango termal está asociado con altos niveles de granívoros.

En 1998, se realizó el primer estudio sobre la prevalencia de Hantavirus en ratones (*Cantoni et al*., 1998), tras la aparición de 38 casos humanos de S.P.H en el periodo 1993-1997 en las provincias de Chubut, Río Negro y en menor medida en Neuquén (sólo 2 casos). Tras el análisis de los resultados no se encontró relación alguna entre aumento de las poblaciones de roedores y porcentaje de roedores infestados y se encontró correlación positiva entre el porcentaje de roedores infestados y la ocurrencia de casos humanos de Hantavirus, aunque esta correlación no fue estadísticamente significativa.

Estudios con colilargos determinaron una seroprevalencia entre el 5 - 10% de muestras desde 1997 hasta el año 2000 (*Elder*, 2002).

En relación con la enfermedad, los casos de Hantavirus en la provincia de Neuquén suman 30 desde su aparición en 1997 hasta comienzos del 2004. La tasa de letalidad ha sido del 41,38%.

Respecto a las técnicas empleadas en la predicción del riesgo que utilizan sensores remotos y SIG, *Glass et al*. (2000), investigaron la relación entre el riesgo de Hantavirus al año siguiente de la ocurrencia del fenómeno meteorológico de El Niño. Si bien el aumento de precipitación produce mayor crecimiento de la vegetación (y disponibilidad de comida para los ratones) los resultados no apoyaron la hipótesis de que El Niño incrementa la probabilidad de un brote de la enfermedad.

Boone et al. (2000) trabajaron con estas herramientas para conseguir un mapa de estratos ambientales, en el que cada color representa una única combinación del índice de vegetación, pendiente, elevación y distancia a un curso de agua. Este mapa se relacionó con el mapa del estado de infestación para clasificar lugares retroactivamente según el estado de infestación esperado.

VARIABLES EPIDEMIOLÓGICAS SELECCIONADAS

En función de los antecedentes recopilados se seleccionaron las variables más relevantes en el modelo conceptual de ocurrencia de la enfermedad.

Las variables asociadas a la comunidad de roedores (amenaza) son las que hacen a su hábitat (bosque andino patagónico, variable "veg"), alimentación extraordinaria (floración de caña colihue, variable "sec") y disponibilidad de agua (variable "rio").

Las variables asociadas a la población (vulnerabilidad) son las referidas a su localización en centros urbanos (variable "loc") y en asentamientos rurales (variable "pob") para considerar la población estable de la región. Siendo la zona de fuerte atracción turística se considera la ubicación de centros turísticos, atractivos y senderos (variable "tur"). La posibilidad de desplazamientos se considera factible a través de caminos pavimentados y caminos secundarios y huellas de tierra (variable "cam").

Todas estas variables contribuyen más al riesgo mientras más próximo se está de ese lugar, o dicho de otra manera, mientras más alejado se esté de la variable menor será su contribución al riesgo.

De esta manera el modelo de riesgo se expresa de la siguiente manera:

$$\Re = \alpha\left(\frac{a}{veg} + \frac{b}{\text{sec}} + \frac{c}{rio}\right) \cdot \left(\frac{d}{cam} + \frac{e}{loc} + \frac{f}{tur} + \frac{g}{pob}\right)$$

Ecuación 2. Modelo de Riesgo.

Siendo a,b,c,d,e,f,g, coeficientes que ponderan las variables según el peso o la importancia de cada una de ellas en la ocurrencia del riesgo.

El coeficiente epidemiológico α se incorpora para tener en cuenta el grado de infestación de los ratones.

OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES Y ALMACENAMIENTO EN SIG

Las variables consideradas requieren ser caracterizadas en valor del atributo y ubicación en el espacio, para lo cual debe trabajarse con información georreferenciada. Algunas variables tienen formato vectorial: caminos, sendas, ríos y otros raster: vegetación, centros urbanos, por lo que para su obtención se requerirá información resultante de la interpretación de imágenes satélite con otras variables geográficas para obtener una visión sintética de las características del territorio. En este sentido los SIG son utilizados por su capacidad para almacenar, manipular e interrelacionar espacialmente muchos tipos de información a partir de variedad de fuentes (*Lillesand et al.*, 1999).

En general, la información requerida ha sido obtenida de cartas IGM escala 1:100.000, información catastral y SIGOTA (2003). En algunos casos se requirió digitalizar información (senderos turísticos) y extraer información de capas de archivos en formato de Autocad.

En el caso particular de la vegetación se realizó una clasificación digital supervisada con imágenes Landsat. Para el mapeo de la caña seca se realizó un análisis multitemporal previo a la floración y posterior a la floración. Es necesario separar la caña del resto de vegetación del

bosque andino-patagónico (ñire, coihue, lenga, raulí y roble pellín fundamentalmente) con la que se encuentra asociada. El Análisis Multianual se realiza por diferencia de imágenes comparando píxel a píxel los niveles digitales en las bandas espectrales del rojo y del infrarojo. La vegetación sana se caracteriza por presentar una baja reflectancia en la banda del rojo y un pico muy acusado en la banda del infrarrojo, sin embargo la vegetación seca presenta mayor reflectividad en la banda del rojo y menor en la del infrarrojo respecto al comportamiento de la vegetación sana.

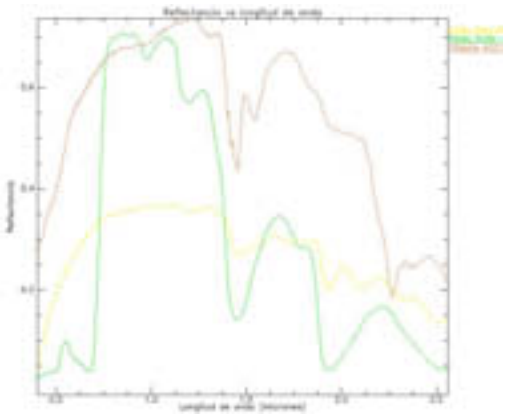


Figura 1. Firmas espectrales de la vegetación.

Por lo tanto en la imagen correspondiente al periodo postfloración se buscará, en los lugares que la clasificación haya detectado presencia de caña colihue, los píxeles que hayan visto aumentado su nivel digital en la banda del rojo y disminuido en la banda del infrarrojo.

APLICACIÓN DEL MODELO DE RIESGO

El área seleccionada se encuentra en la región cordillerana de la provincia de Neuquén, donde se han registrado casos de Hantavirus a partir de 1997. El estudio se realizará para la provincia de Neuquén, en el interior de un cuadrado con las siguientes coordenadas según la proyección UTM:

Límite superior izquierdo: latitud: 38º 35´ 18´´ longitud: 71º 54´40´´

Límite inferior derecho: latitud: 41º 3´28´´ longitud: 69º 53´26´´

Las variables necesarias para el modelo fueron almacenadas en base de datos georreferenciada utilizando Envi 3.6.

Para realizar el análisis temporal de la caña se utilizaron imágenes Landsat, año 1997 (época previa a la floración), año 2001 (época post-floración de la zona del lago Hermoso) y 2003 (época post-floración de la zona centro-sur del Parque Nacional del Lanín).

El efecto de las variables epidemiológicas sobre el riesgo es considerado linealmente decreciente con la distancia, debiendo estimarse el alcance o distancia de esta influencia. De acuerdo a los antecedentes y conocimiento del fenómeno se establecieron las siguientes distancias de influencia: caminos 570 m, ríos 710 m, localidades 1425 m, lugares turísticos 570 m, pobladores 570 m. Estas áreas de influencia se representan con mapas de buffer que contienen las distancias. Utilizando Envi 3.6 se obtuvieron estos mapas a partir de las variables almacenadas, permitiendo realizar operaciones matemáticas entre bandas.

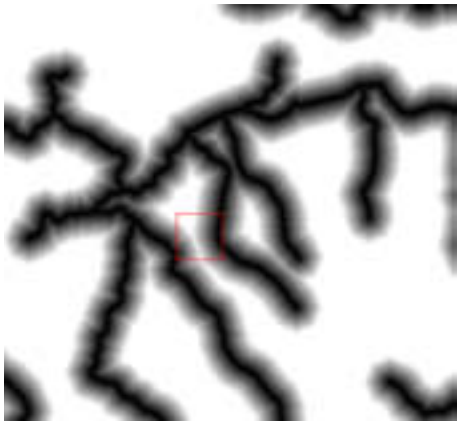


Figura 2. Detalle de un buffer de río.

Los coeficientes de la ecuación de riesgo toman un valor inicial dado por el peso de la variable en la determinación del riesgo y luego son ajustados en un proceso de calibración para obtener un buen ajuste entre el valor del mapa estimado por el modelo y los casos de enfermedad observados. Los casos ocurridos están representados en una capa temática a efecto de realizar la comparación y análisis.

El modelo riesgo en el caso estudiado queda definido con la siguiente ecuación:

$$\Re = 0.3 \cdot \left(\frac{0.7}{veg} + \frac{1}{\sec} + \frac{0.5}{rio} \right) \cdot \left(\frac{0.4}{cam} + \frac{0.4}{loc} + \frac{0.4}{tur} + \frac{0.4}{pob} \right)$$

Ecuación 3. Modelo de Riesgo Calibrado.

El resultado es un mapa de colores clasificado en 4 categorías de riesgo. Se obtuvo un mapa de riesgo para 1997 previo a la floración (en este caso la variable caña seca se anula) y para 2001, contrastando la información de este mapa con los casos registrados en las fechas dadas.

Figura 3. Riesgo Hantavirus previo floración.

De los doce casos detectados en la zona centro-sur del Parque Nacional del Lanín, todos se han registrado en lugares donde en mayor o menor medida había alto riesgo de contagio. Analizando cómo ha evolucionado el riesgo en las zonas de contagio antes y después de la floración, se puede decir que ha aumentado en un 0,013 el valor de riesgo, siendo lo más significativo que el valor máximo de riesgo ha aumentado un 0,3 en el mejor de los casos.

Al comparar las zonas de lago Hermoso y Centro-Sur del Parque Nacional del Lanín antes y después de la floración, se puede observar a simple vista que el riesgo ha aumentado. La presencia del color rojo correspondiente a riesgo alto de contagio de la enfermedad es más abundante en mapas posteriores a la floración.

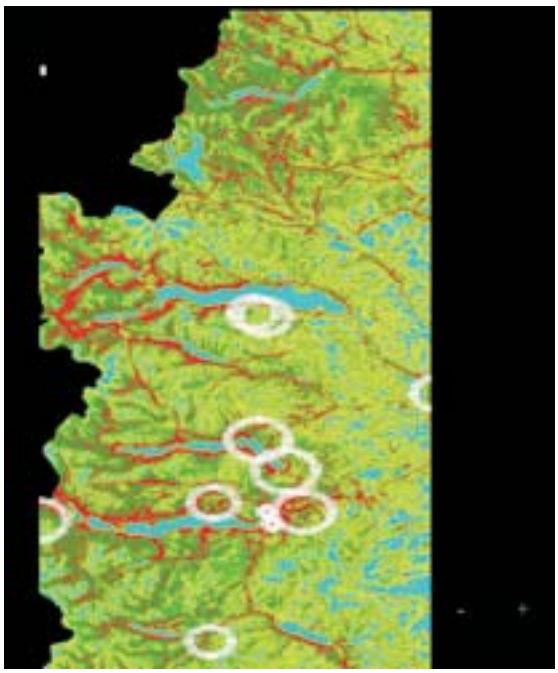


Figura 4. Riesgo postfloración y zonas de contagio.

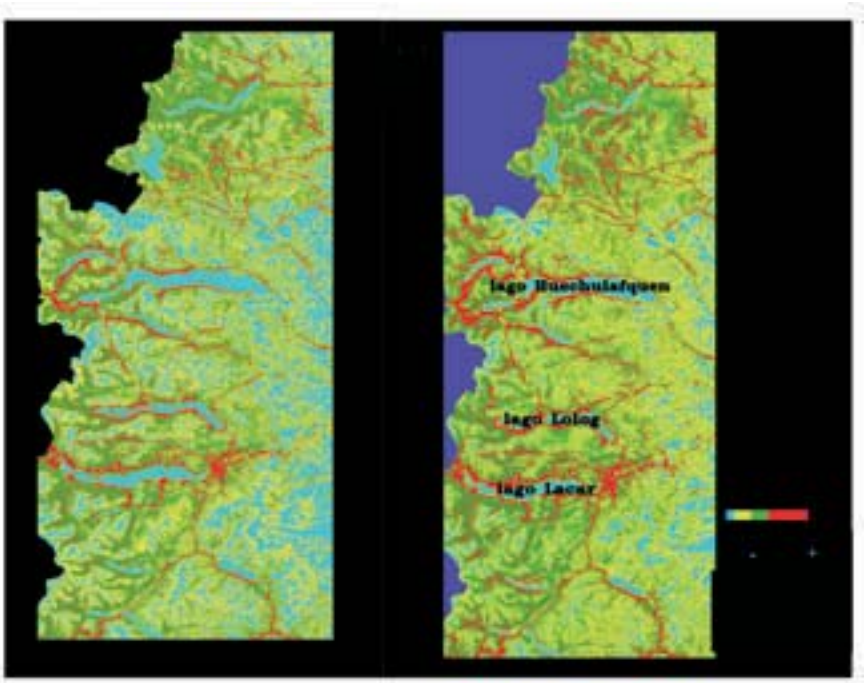


Figura 5. Evolución del riesgo con la floración en Centro-Sur del Lanín (derecha: riesgo prefloración, izquierda; riesgo postfloración.

La siguiente tabla muestra un análisis cuantitativo:

Cuadro 1. Riesgo de Hantavirus antes y después de la floración.

	Floración	Riesgo			
		Medio	Mínimo	Máximo	Desv. Stand.
Lago Hermoso	Antes	0,0461	0	0,9536	0,0333
	Después	0,0582	0	1,652	0,0443
Centro-Sur Lanín	Antes	0,0482	0	1,4664	0,4871
	Después	0,0571	0	2,1811	0,058

El riesgo medio se ha visto aumentado casi en la misma proporción en ambas zonas (alrededor de 0,01). Y aunque este incremento medio no ha sido muy elevado, el incremento de los valores máximos sí ha sido considerable: alrededor del orden de 0,7 para ambas zonas.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta responde al caso aplicado puesto que el modelo de predicción de riesgo explica gran parte de los casos de contagio de Hantavirus.

La floración y posterior secado de la caña colihue es un hecho que modifica el riesgo de Hantavirus y éste provoca un aumento de los casos de enfermedad durante el periodo postfloración. Aplicando esta metodología se podrían identificar áreas de riesgo potencial asociado a la floración de caña colihue.

Esta metodología es aplicable a diferentes áreas de riesgo y en general a situaciones epidemiológicas que tengan marcado comportamiento territorial.

A efecto de mejorar las predicciones del riesgo sería necesario incorporar al modelo otros factores ambientales que afectan la distribución de ratones colilargos.

REFERENCIAS

Boone, J.D; McGwire, K.C; Ottenson, E.W; DeBaca, R.S; Kuhn, E.A; Villard, P; Brussard, P.F; St Jeor, S.C. (May-June, 2000): "Remote Sensing and Geographic Information Systems: Charting Sin Nombre Virus Infections in Deer Mice". *Emerging Infectious Diseases*, 6 (3).

Cantoni, G; Mills, J; Padula, P; Calderón, G; Herrero, E; Sandoval, P; Pini, N; Larrieu, E. (1998): *Estudio longitudinal de prevalencia de Hantavirus en roedores del sur de Argentina*. Consejo Provincial de Salud Pública de Río Negro. Disponible en: *http://www.rionegro.gov.ar/salud/docum/hantaarg.doc*

Elder, F.M (2002): *Hantavirus en la provincia de Neuquén: situación actual. Área de Epidemiologia*. Subsecretaria de Salud de la provincia de Neuquén.

Folgarait, P.J; Monjeau, J.A; Kittlein, M. (1998): "Solving the enigma of granivory rates in Patagonia an throughout other deserts of the world ; is thermal range the explanation ?". *Ecología Austral*, 8: 251-263.

Glass, G.E; Cheek, J.E; Patz, J.A; Shields, T.M; Doyle, T.J; Throughman, D.A; Hunt, D.K; Enscore, R.E; Gage, K.L; Irland, C; Peters, C.J; Bryan, R. (March-April 2000): "Using Remotely Sensed Data To Identify Areas at Risk for Hantavirus Pulmonary Síndrome". *Emerging Infectious Diseases*, 6 (3).

Guthmann, N. (1996): *Estudio de un Ensamble de Roedores en la Estepa Ecotonal Patagónica*. Ph. D. thesis, Universidad Nacional del Comahue. Centro Regional Universitario Bariloche.

Lillesand, T.M y Kiefer, R.W. (1999): *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons, Inc. Cuarta edición

Monjeau, J.A; Sikes, R.S; Birney, E.C; Guthmann, N; Phillips, C.J. (1997): "Small Mammal Community Composition within the Major Landscape Divisions of Patagonia, Southern Argentina". *Mastozoología Neotropical*, 4 (2): 113-127.

Sanguinetti, J y García, L. (2001): *Floración masiva de Chusquea culeou en el Parque Nacional Lanín. Eventuales consecuencias ecológicas, su vinculación con las actividades humanas y necesidades de Manejo y Monitoreo*. Dirección de Parque Nacionales (San Martín de los Andes).

Aplicación de SIG y teledetección satelital en los modelos de transmisión de la fascioliasis humana y animal en los Andes

M.V. Fuentes[1], S. Sainz-Elipe[1], P. Nieto[2], J.B. Malone[2] y S. Mas-Coma[1]

(1) Departament de Parasitologia, Facultat de Farmàcia, Universitat de València, Avinguda de Vicent Andrés Estellés s/n, 46100 Burjassot, València.
(2) Department of Pathobiological Sciences, School of Veterinary Medicine, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana 70803, USA.

RESUMEN

El presente estudio describe las bases para crear un SIG capaz de modelizar la epidemiología de la fascioliasis humana y animal en los Andes, enfermedad parasitaria reconocida por la OMS como un problema de salud pública. La metodología propone el uso de bases de datos multidisciplinares con la información del parásito y su ciclo, así como de factores climáticos con más de 30 años de datos mensuales procedentes de estaciones terrestres, y de datos de satélites, inicialmente NDVI y Tmax. Mediante el software especializado Erdas Imagine y Arcview, además del estadístico StatView, se ha creado un proyecto SIG denominado "Programa epidemiológico de control para la fascioliasis humana y animal en los Andes". En este proyecto se usaron datos climáticos de la FAO, calculándose dos índices de predicción de transmisión, y datos de NDVI de imágenes AVHRR-NOAA del período 1992-96. La primera parte del proyecto ha sido desarrollada a escala regional en Chile central. Los resultados han sido validados a escala local en el Altiplano Norte Boliviano. Actualmente se está desarrollando este proyecto en las zonas endémicas de esta helmintiasis en Perú, Ecuador y Venezuela. Los resultados muestran la correlación entre prevalencia de la enfermedad de tipo negativo con la evapotranspiración potencial, el índice de aridez calculado para áreas de gran altitud y los valores bajos de NDVI, y de tipo positivo con la precipitación, el número de días con lluvia y los valores más elevados de NDVI. Así ha podido crearse un mapa de riesgo de transmisión de fascioliasis a escala local en las zonas estudiadas considerando tres niveles: sin riesgo, bajo o moderado riesgo y alto riesgo. Cabe concluir que la metodología presentada en particular, y los SIG en general, son una herra-

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

mienta válida para el desarrollo de modelos epidemiológicos de control de importantes enfermedades parasitarias helmintianas.

***Palabras Clave**: SIG, Fascioliasis, Andes, NDVI.*

ABSTRACT

The present study describes the fundamentals needed to create a GIS able to model the epidemiology of human and animal fascioliasis in the Andes, a parasitic disease recognized by the WHO as a public halth problem. The methodology proposes the use of multidisciplinary databases with information on the parasite and its life cycle as well as climatic factors including monthly data over 30 years from terrestrial stations, remote sensing data including initially NDVI and Tmax. Using specialized software Erdas Imagine and Arcview and also statistic StatView, a GIS project named "Epidemiological Programme to Control Human and Animal Fascioliasis" has been created. Climatic data of the FAO and NDVI data from AVHRR-NOAA images of the 1992-96 period has been used in this project. Moreover, two forecasting indices of transmission have been calculated. The first part of the project has been developed on a regional scale in central Chile. The results have been validated on a local scale in the Northern Bolivian Altiplano. At present this project is being developed in the endemic zones of this helmithiasis in Peru, Ecuador and Venezuela. The results show a negative correlation between disease prevalence with PET, the aridity index calculated for high altitude areas and low NDVI values, a positive correlation with precipitation, number of days with rainfall and high NDVI values. Thus, a fascioliasis transmission risk map has been created on a local scale for the study areas considering three levels; no risk, low or medium risk and high risk. The conclusion can be drawn that the present methodology, in particular, and GIS, in general, are adequate tools to develop epidemiological models to control serious parasitic helminth diseases.

***Key Words**: GIS, Fascioliasis, Andes, NDVI.*

INTRODUCCIÓN

El medio ambiente, a causa de las múltiples condiciones y factores que determinan su variabilidad, juega un papel de gran importancia en la epidemiología de los parásitos. Cada especie parásita en particular requiere unas determinadas condiciones del medio, tanto abióticas como bióticas, para que su persistencia en el tiempo y su expansión o propagación en el espacio se hagan posibles. Así, el clima se manifiesta como un regulador de la distribución y de la frecuencia de muchas especies parásitas, tanto desde el punto de vista estacional como geográfico. La estrecha relación entre la bionomía parasitaria y el clima ha sido intensamente estudiada, sobre todo en algunas parasitosis de marcada importancia humana y animal. Esto

ha hecho posible la predicción, a veces con bastante exactitud, de los períodos de riesgo para personas y animales y el desarrollo de modelos de predicción de la evolución de las poblaciones parasitarias.

Siguiendo las recomendaciones del grupo científico internacional GNOSIS (GIS Network On Snail-borne Infections with special reference to Schistosomiasis) en general, y las de *Fuentes* (2004) para la fascioliasis en la cordillera Andina en particular, todo SIG aplicado en parásitos vehiculados por caracoles como hospedadores intermediarios, estará basado en el uso de una base de datos (epidemiológica, medioambiental, de datos "remote sensing", etc.). Esta base de datos, con la ayuda del software especializado necesario, puede ser reflejada en forma cartográfica, permitiendo desarrollar un modelo epidemiológico de la enfermedad en el área de estudio capaz de predecir sus patrones de transmisión espacial y temporal.

En el presente estudio se describen las bases para crear un SIG capaz de modelizar la epidemiología de transmisión de la fascioliasis humana y animal en la cordillera Andina. Esta parasitosis hepática ha sido recientemente declarada por la OMS como un problema de salud pública en diferentes países andinos, desde Bolivia a Venezuela.

MATERIAL Y MÉTODOS

Las áreas estudiadas y analizadas han sido: el Altiplano Norte Boliviano (Bolivia), el Altiplano Peruano y el Valle de Cajamarca (Perú), la región de Cotopaxi (Ecuador) y el Estado de Mérida (Venezuela).

Mapas digitales de todas las áreas estudiadas han sido confeccionados, mostrando para cada uno de ellos, como mínimo, las siguientes características: localidades más importantes, curvas de nivel altitudinal, cursos y masas de agua; además de carreteras principales y secundarias, uso de la tierra, etc. Estos mapas digitales han sido utilizados como soporte de base de cada una de las zonas analizadas, sobreponiéndose cada uno de los campos temáticos sobre este mapa base.

Diferentes estaciones climáticas, en función de la disponibilidad en cada región, han sido analizadas de forma profunda mediante el estudio de las variables climáticas que más influencia presentan en la transmisión de la fascioliasis. Siguiendo las indicaciones postuladas por *Fuentes et al.* (1999), se ha analizado la temperatura media, la pluviometría anual y el número de días con lluvia a lo largo de cada mes, y la evapotranspiración potencial. Además, el análisis ha sido llevado a cabo de forma temporal a lo largo de períodos, habitualmente, no inferiores a 30 años con registros diarios y/o mensuales. Los datos de la mayoría de las estaciones climáticas han sido obtenidos a partir de la aplicación informática FAOCLIM de la FAO.

Para cada una de las estaciones climáticas estudiadas se han confeccionado los correspondientes climadiagramas. Estos han sido confeccionados no de la forma tradicional sino utilizando el índice de aridez como sustituto de la temperatura, ya que toda la zona de estudio se encuentra a gran altitud y por tanto es necesario introducir esta modificación (*Schreiber*, 1981; *Fuentes et al.* 1999). Cada climadiagrama nos ha permitido diferenciar de forma real y

exacta entre la época húmeda y la época seca a lo largo de todo el año en cada una de las áreas endémicas estudiadas.

A partir de los datos procesados de cada una de las estaciones climáticas analizadas se ha calculado para cada una de ellas los dos índices de predicción de transmisión de fascioliasis más utilizados y con una mayor fiabilidad, el Indice Mt (*Ollerenshaw y Rowlands*, 1958; *Ollerenshaw*, 1971, 1973), generado y aplicado en Europa, y el Indice wb-bs (*Malone et al.*, 1987, 1998), generado y aplicado en América y África. Además, y siguiendo la propuesta formulada por *Fuentes et al.* (1999), se ha introducido la modificación, en el cálculo de cada uno de estos índices, correspondiente a zonas situadas a gran altitud y baja latitud, como es el caso de las áreas analizadas en este estudio. Así mismo se ha calculado la evolución anual de los valores acumulados de ambos índices, lo cual nos permite conocer las posibilidades de transmisión estacional o permanente.

Las imágenes satelitares analizadas son imágenes AVHRR de 1 Km de resolución espacial, y que han sido obtenidas desde el satélite espacial NOAA. Las imágenes utilizadas han sido "dekade" imágenes del período 1992-1996, obtenidas del "Global Land 1-km project" (http://edcdaac.usgs.gov/1KM/1kmhomepage.asp), una única imagen correspondiente a un periodo de 10 días (agrupación de un total de 20 imágenes), estudiándose, para cada área de estudio 36 "dekade" imágenes por año analizado. Así mismo, en cada área y a partir de las "dekade" imágenes obtenidas inicialmente han sido creadas dos imágenes estacionales, correspondientes a la estación seca y la estación húmeda, y una única imagen anual.

El estudio final se ha llevado a cabo mediante el análisis de los valores de NDVI procedente de las imágenes resultantes en cada área, mediante la utilización del software Erdas Imagine 8.3.1. Con este mismo software, y tras la ubicación georreferenciada de cada localidad en la imagen anual, se procedió a: 1) creación de "annotation points" circulares de 10 Km de diámetro, aproximadamente 78540 Ha de superficie, localizándose el centro en las coordenadas geográficas de cada una de las localidades incluidas en el estudio; 2) extracción de los valores medios anuales de NDVI para cada uno de los "annotation points" creados; y 3) reagrupación del global de los valores de NDVI en 6 clases iniciales preestablecidas con la finalidad de favorecer el manejo de los datos y su posterior tratamiento estadístico (*Fuentes et al.*, 2001).

A partir del software ArcView GIS 3.1a y de su aplicación Spatial Analyst, se procedió a la extracción, previa conversión de la imagen raster a vector file, de los valores estadísticos (minimum, maximum, mean, median, etc.) correspondientes a la superficie ocupada por cada clase de NDVI en cada uno de los "annotation points" considerados.

Microsoft Excel 5.0, Stat View 7.0 y SPSS 6.1 han sido el softwar estadístico utilizado para los análisis de correlación, de regresión lineal y la confección de los consecuentes modelos de transmisión de fascioliasis, necesarios para la confección de los mapas de riesgo.

La modelización de la transmisión se ha llevado a cabo utilizando los valores de NDVI como variable independiente y la transformación logística de las prevalencias (P) de fascioliasis humana como variable dependiente [log(P/1-P)]. Este modelo está basado inicialmente en la modelización climática (índices climáticos) propuesta por *Fuentes et al.*, 1999 y posteriormente en la modelización mixta (índices climáticos / NDVI) con la propuesta por *Fuentes y*

Malone (1999) a escala regional en las regiones centrales de Chile, y por *Fuentes et al.* (2001) a escala local en el Altiplano Norte Boliviano.

Los mapas de riesgo creados para las regiones analizadas están basados en el modelo SIG mixto (índices climáticos / NDVI), y en el cual se han diseñado tres grados de riesgo de transmisión de la fascioliasis: sin riesgo, riesgo bajo-medio y riesgo alto, para una escala de 1x1 km. Estos mapas de riesgo de transmisión han sido creados mediante el software ArcView GIS 3.1a y de su aplicación Spatial Analyst.

RESULTADOS

Para cada una de las regiones se ha determinado, bien por modelización directa o bien por extensión de otro modelo procedente de una región similar: la determinación de la época seca y de la época húmeda corregidas según su altitud y latitud; el cálculo del período de mayor transmisión de acuerdo con los valores de los indices climáticos de predicción; y el diseño de un mapa de riesgo de transmisión basados en los modelos mixtos (índices climáticos / NDVI) propuestos por *Fuentes et al.* (1999, 2001) y *Fuentes y Malone* (1999).

Modelo Altiplano Andino (Altiplano Norte Boliviano y Altiplano Peruano)

Se detecta una estación húmeda entre los meses de octubre-noviembre a marzo-abril y una época seca entre los meses de mayo a septiembre (Figura 1).

El período de mayor transmisión, de acuerdo con los índices de predicción, se produce entre los meses de noviembre-diciembre y febrero-marzo (Figura 2). Sin embargo a través

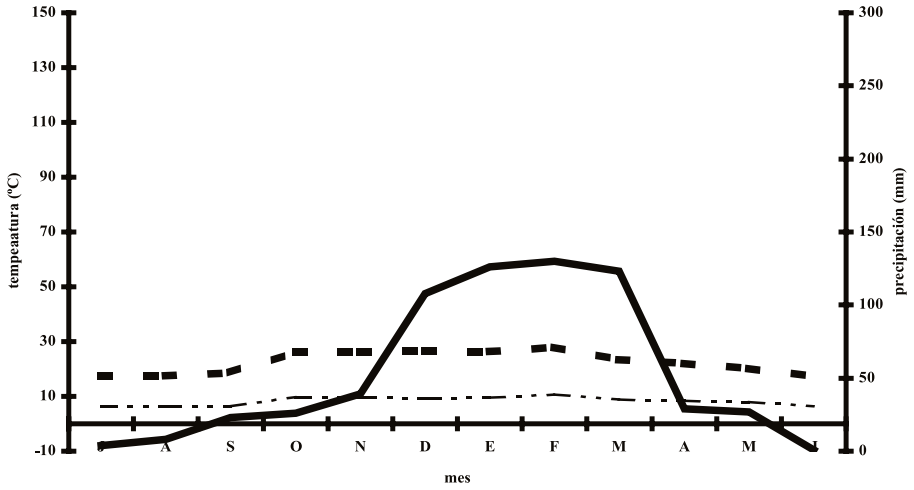


Figura 1. Climadiagrama de Puno (Altiplano Peruano).
—— precipitación (mm), -- -- -- índice de aridez, — - - — temperatura (ºC)

del análisis de los valores acumulados del índice WB-bs se deduce que este período se ve prolongado a los meses comprendidos entre octubre y mayo en el Altiplano Boliviano y entre los meses de noviembre a abril en el Altiplano Peruano, siendo además ésta la diferencia más significativa detectada entre ambas áreas.

El mapa de riesgo de transmisión (Figura 3) muestra las áreas conocidas de endemia en el Altiplano Boliviano como áreas de alto riesgo, así como las áreas de menor prevalencia, pero no despreciable, como áreas de riesgo medio. Los mismos resultados han sido demostrados en la parte peruana, concretamente en la zona de Asillo, la cual presenta además otra problemática relacionada con los canales de irrigación construidos por la administración. Cabe destacar en el Altiplano Peruano la zona circundante al lago Titicaca como un área de probable endemia y que debería ser tenida en cuenta como tal por las autoridades sanitarias locales.

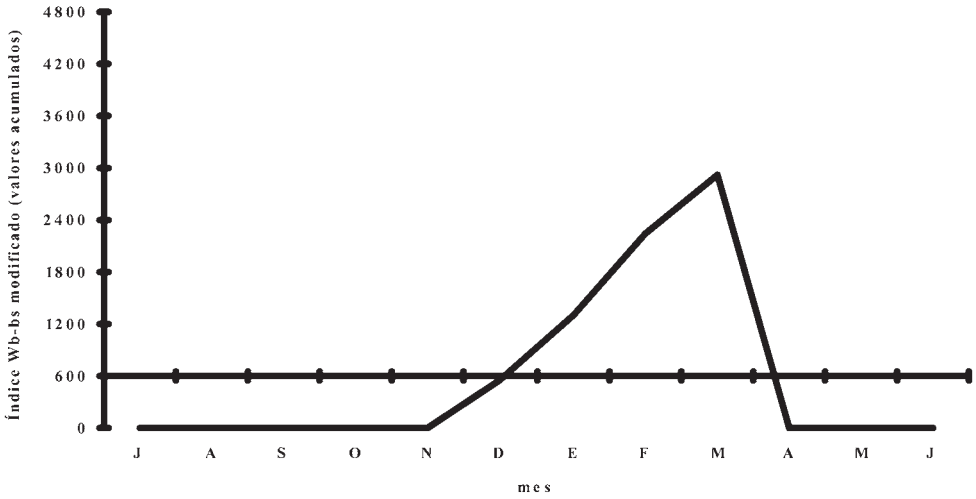


Figura 2. Valores acumulados del índice Wb-bs de Puno (Altiplano Peruano)

Modelo Valle Andino (Valle de Cajamarca)

Se detecta una estación húmeda entre los meses de octubre a abril y una época seca entre los meses de mayo a septiembre (Figura 4).

El período de mayor transmisión, de acuerdo con los índices de predicción, se produce entre los meses de enero y abril (Figura 5). Sin embargo a través del análisis de los valores acumulados del índice WB-bs se deduce que este período se ve prolongado de forma considerable a los meses comprendidos entre octubre y abril, de forma bastante análoga a la detectada en el modelo Altiplano Andino.

El mapa de riesgo de transmisión (Figura 6) muestra las áreas conocidas de endemia, como es el área al este de la ciudad de Cajamarca.

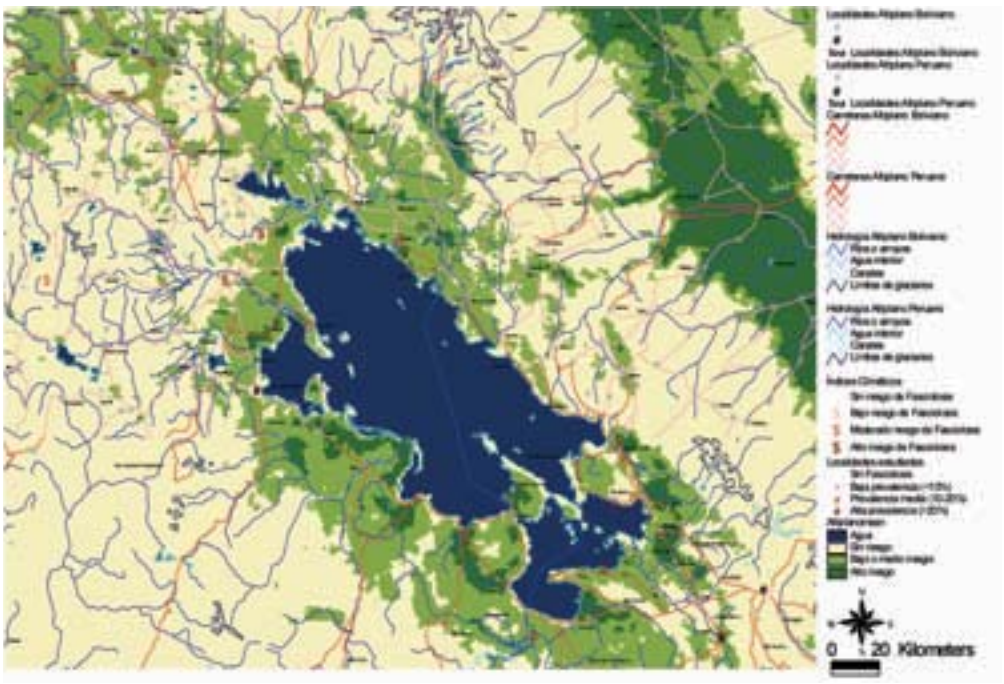


Figura 3. Mapa de riesgo de transmisión basado en valores de NDVI del Altiplano Peruano y Boliviano.

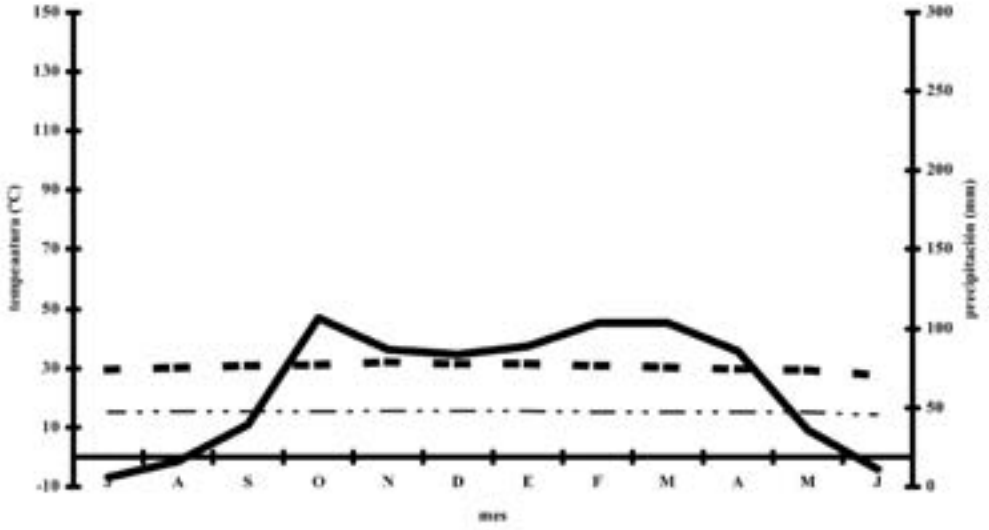


Figura 4. Climadiagrama de Cajamarca. —— precipitación (mm), ------ índice de aridez, — - - — temperatura (ºC)

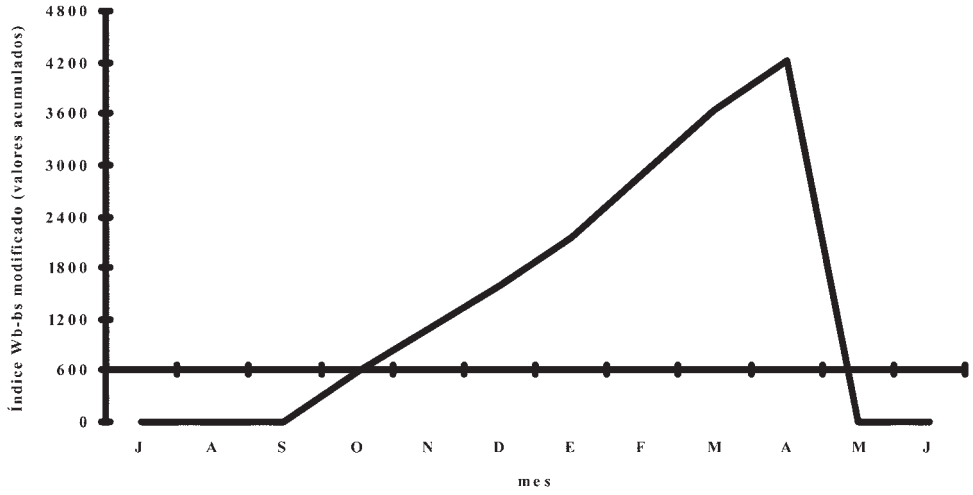


Figura 5. Valores acumulados del índice Wb-bs de Cajamarca.

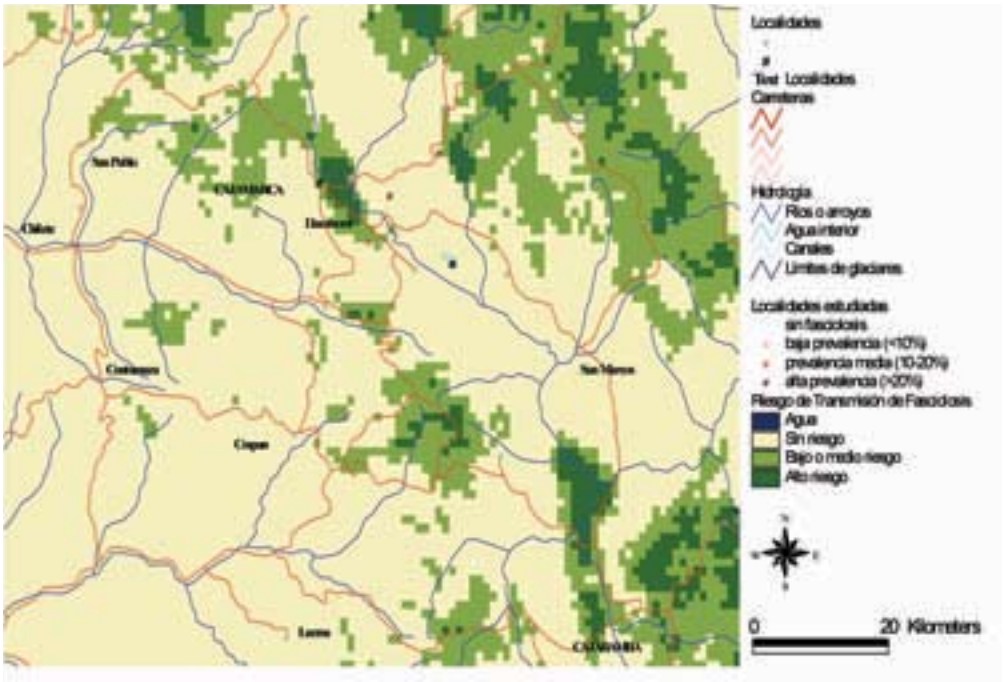


Figura 6. Mapa de riesgo de transmisión basado en valores de NDVI del Valle de Cajamarca.

Modelo Cotopaxi

Se detecta una estación húmeda entre los meses de septiembre a mayo y una época seca entre los meses de junio a agosto (Figura 7), si bien se produce de forma intermitente o irregular dentro de la región analizada.

Al igual que en la determinación de la época húmeda y seca, se produce una asimetría en cuanto al período de riesgo de transmisión que es prácticamente nulo en algunos valles, por ejemplo en Latacunga, Ambato y Patate (centro), y bastante prolongado, según los valores acumulados del Wb-bs, que predicen transmisión entre octubre y junio, en otros valles (Figura 8).

El mapa de riesgo de transmisión (Figura 9) muestra cómo existe la discontinuidad predecida por los índices climáticos, con valles de nula transmisión y otros cercanos de alto riesgo, sin duda debido a unas condiciones climáticas totalmente diferentes y a la vez cambiantes.

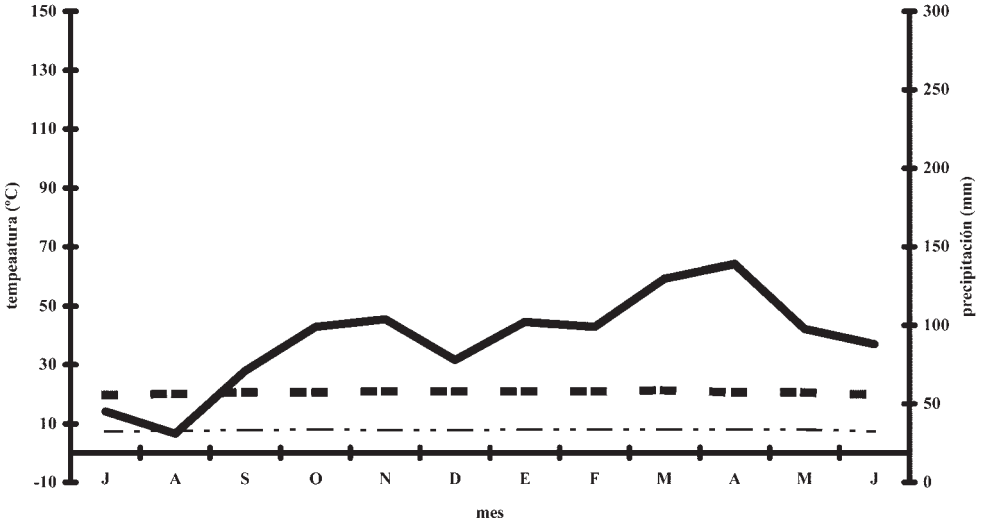


Figura 7. Climadiagrama de Cotopaxi.
—— precipitación (mm), -- -- -- índice de aridez, — - - — temperatura (ºC)

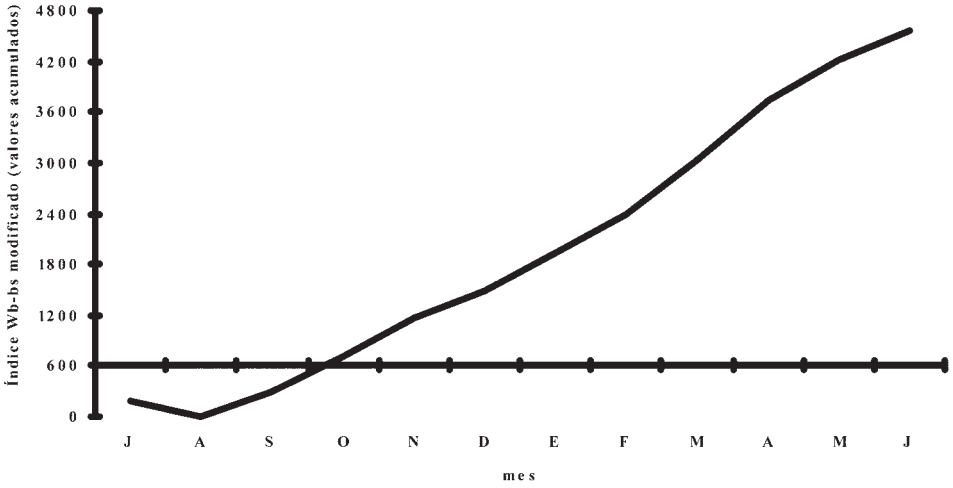


Figura 8. Valores acumulados del índice Wb-bs de Cotopaxi

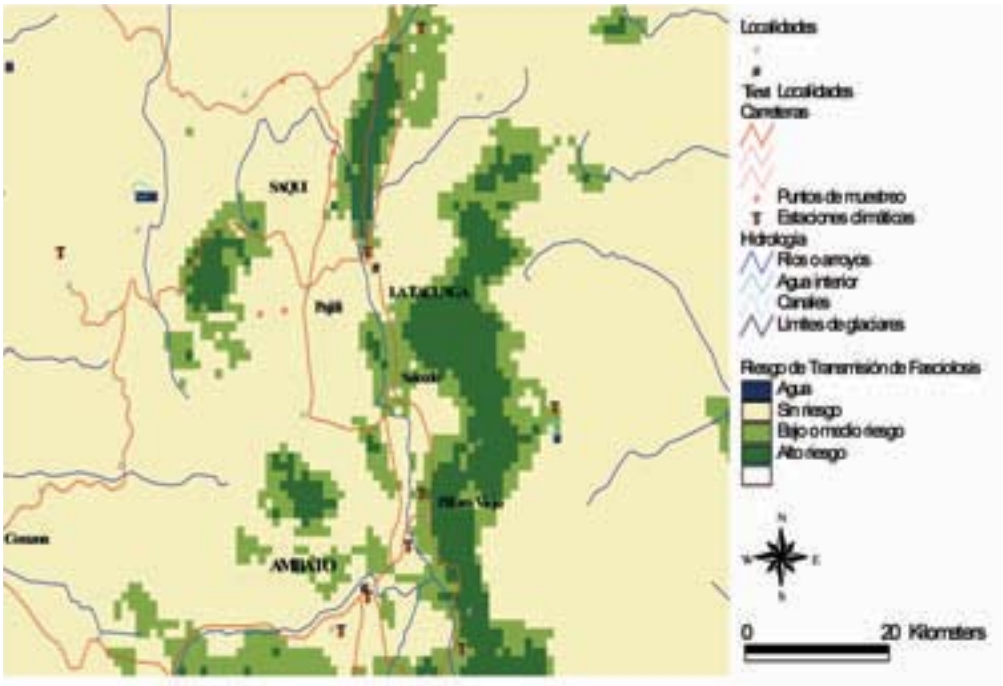


Figura 9. Mapa de riesgo de transmisión basado en valores de NDVI de la Región de Cotopaxi.

Modelo Mérida

Se detecta una estación húmeda entre los meses de abril a octubre y una época seca entre los meses de septiembre a junio (Figura 10).

El período de riesgo de transmisión se predice entre octubre y mayo (Figura 11).

El mapa de riesgo de transmisión (Figura 12) muestra que el alto riesgo se debe producir en los valles internos de la cordillera andina en el Estado.

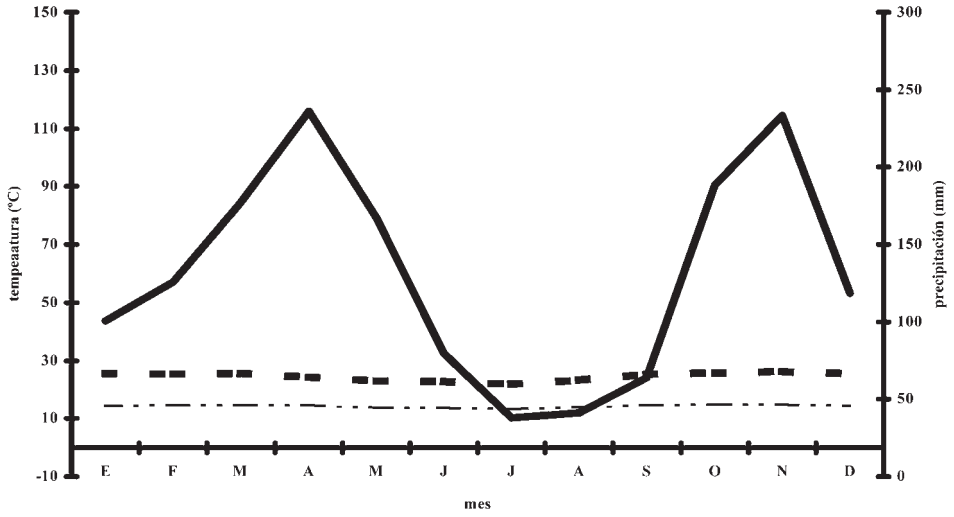


Figura 10. Climadiagrama de Tabay (Mérida). —— precipitación (mm), ------ índice de aridez, — - - — temperatura (ºC).

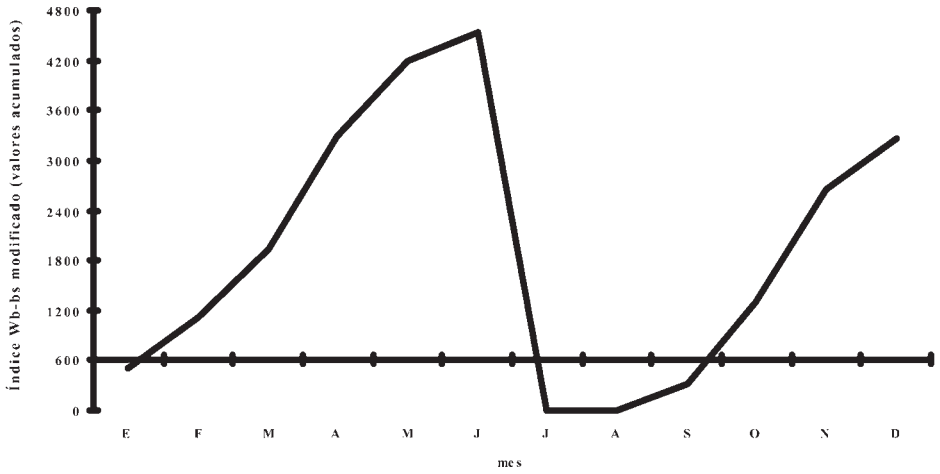


Figura 11. Valores acumulados del índice Wb-bs de Tabay (Mérida).

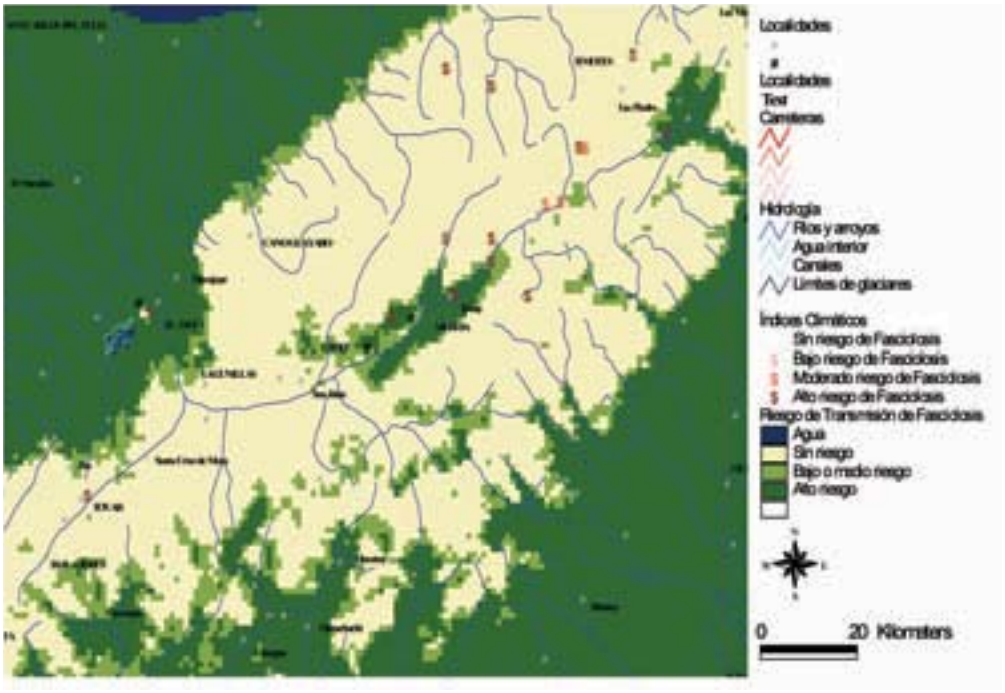


Figura 12. Mapa de riesgo de transmisión basado en valores de NDVI del Estado de Mérida.

CONCLUSIONES

El análisis de los resultados obtenidos permite postular la validez y aproximación de este modelo de predicción que combina el uso de datos climáticos, a través de la confección de climadiagramas y del cálculo de los índices de transmisión, y de datos de teledetección, a través de la reclasificación de los valores de NDVI. Estos proyectos SIG deben desarrollarse para áreas y regiones de endemia con características ecológicas similares, permitiendo así el desarrollo de modelos epidemiológicos capaces de delimitar de forma precisa tanto el factor de riesgo de transmisión como conocer cuáles son las zonas con mayor riesgo en relación con esta importante enfermedad parasitaria, y consecuentemente poder actuar de forma eficaz y precisa adoptando las correspondientes medidas profilácticas.

La continuación de estos proyectos debe ser llevada a cabo mediante la incorporación de más datos procedentes de mapas digitales, como los tipos de uso del suelo, y de teledetección, como la temperatura máxima de la superficie terrestre. Además, se incorporarán imágenes satelitales de mayor resolución que permitan el estudio más detallado de las áreas postuladas como de mayor endemicidad.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por el Proyecto Contrato No. TS3-CT94-0294 del programa STD de la Commission of the European Communities (DG XII: Science, Research and Development), Bruselas, UE; dos Proyectos del Programa de Cooperación Científica con América Latina, Instituto de Cooperación Iberoamericana, Agencia Española de Cooperación Internacional (I.C.I.-A.E.C.I.), Madrid, España; Proyecto PDP B2/181/125 de la OMS, Ginebra, Suiza; Proyectos DGICYT No. UE96-0001 y PM97-0099 del Ministerio de Educación y Cultura, Madrid, España; Proyecto No. BOS2002-01978 del Ministerio de Ciencia y Tecnología, Madrid, España; Proyecto No. 3006 de la Dirección General de Cooperación para el Desarrollo, Presidencia de Gobierno de la Generalitat Valenciana, València, España; y la Red de Investigación de Centros de Enfermedades Tropicales – RICET (Proyecto No. C03/04). Una parte de este trabajo fue financiada por una Beca de la Universitat de Valencia concedida para una estancia postdoctoral del primer autor en la Louisiana State University (EEUU).

REFERENCIAS

Fuentes, M.V. (2004): "Proposal of a Geographic Information System for modeling zoonotic fasciolosis transmission in the Andes". *Parasitología Latinoamericana*, Vol. 59 , en prensa.

Fuentes, M.V. y Malone, J.B. (1999): "Development of a forecast system for fasciolosis in Central Chile using remote sensing and climatic data in a geographic information system". *Research and Reviews in Parasitology*, Vol. 59, pp. 129-134

Fuentes, M.V.; Malone, J.B. y Mas-Coma, S. (2001): "Validation of a mapping and prediction model for human fasciolosis transmission in Andean very high altitude endemic areas using remote sensing data". *Acta Tropica*, Vol. 79, pp. 87-95.

Fuentes, M.V.; Valero, M.A.; Bargues, M.D.; Esteban, J.G.; Anglés, R. y Mas-Coma, S. (1999): "Analysis of climatic data and forecast indices for human fascioliasis at very high altitude". *Annals of Tropical Medicine & Parasitology*, Vol. 93, pp. 835-850.

Malone, J.B.; Gommes, R.; Hanssen, J.; Yilma, J.M.; Slingenberg, M.; Snijders, F.; Nachtergaele, F. y Ataman, F. (1998): "A geographic information system on the potential distribution and abundance of Fasciola hepatica and F. gigantica in east Africa based on Food and Agriculture Organization databases". *Veterinary Parasitology*, Vol. 78, pp. 87-101.

Malone, J.B.; Williams, T.E.; Muller, R.A.; Geaghan, J.P. y Loyacano, J.P. (1987): "Fascioliasis in cattle in Louisiana: development of a system to predict disease risk by climate, using the Thornthwaite water budget". *American Journal of Veterinary Research*, Vol. 48, pp. 1167-1170.

Schreiber, D. (1981): "A comparative examination of threshold values for dry months, taking the situaction of Kenya as an example". En *Applied Geography and Development*, 17, Tübingen, Institut für wissenschaftliche Zusammenarbeit, pp. 29-45.

Ollerenshaw, C.B. (1971): "The influence of climate on the life cycle of Fasciola hepatica in Britain with some observations on the relationship between climate and the incidence of fasciolasis in the Netherlands". En *Facts and Reflections, Symposium Proceedings (3 June 1971)*, Parasitology Department of the Central Diergeneeskundig Institut, Lelystad, pp. 41-63.

Ollerenshaw, C.B. (1973): "A comment on the epidemiology of Fasciola hepatica in Italy. *Annali de la Faculta di Medicina Veterinaria*, Torino, Vol. 20, pp. 83-121.

Ollerenshaw, C.B. y Rowlands, W.T. (1958): "A method of forecasting the incidence of fascioliasis in Anglesey". *Veterinary Record*, Vol. 71, 591-598.

Aplicación de los SIG al seguro agrario combinado: una solución a los problemas de gestión de los datos de las inspecciones en campo

J. Cordero Gracia[1] y G. Parra Galant[2]

(1) Departamento de Economía Agroambiental, Ingeniería Cartográfica y Expresión Gráfica en la Ingeniería, Universidad Miguel Hernández, Carretera de Beniel, Km 3,2 03002 Orihuela (Alicante).
(2) Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández, Carretera de Beniel, Km 3,2 03002 Orihuela (Alicante).

RESUMEN

El Seguro Agrario combinado es una parte fundamental y práctica común, sin la que ya no se entiende una explotación agraria moderna bien en el cultivo de frutales, hortalizas, etc., o en cualquiera de las más de cien líneas de seguro existentes en España. Sin embargo, el seguro todavía presenta importantes problemas en su aplicación; tanto en la parte de contratación como en la de valoración. Estos problemas se deben principalmente a la falta de una correlación entre datos administrativos y datos de campo. Aunque las diversas entidades que componen el Sistema Nacional de Seguros Agrarios Combinados están creando una base de datos en el ámbito estatal, no se ha dado el siguiente paso; la aplicación de un Sistema de Información Geográfica que comprenda datos de las inspecciones de campo y de las líneas de contratación, tarifas, etc..

Este proyecto surge como consecuencia de una doble necesidad: por una parte almacenar, estructurar y gestionar toda la información generada, a nivel de parcelas aseguradas, en las inspecciones de campo, en gran parte perdida o de difícil acceso, y por otra disponer de su respectiva representación gráfica racional de dicha base de datos, que nos permitirá de forma fácil y segura localizar y comprobar las parcelas aseguradas a inspeccionar en las visitas de campo.

En el presente proyecto se da parte de dicha fase, creando un Sistema de Información Geográfica con la ayuda de GeoMedia Professional v5.1, en una de las líneas de seguro, Multicultivo de Cítricos y Complementario, y en parte del territorio español, en la Comunidad

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

Autónoma de Murcia, proporcionándonos una herramienta que se pueda extrapolar a las diferentes líneas de cultivo en todo el ámbito nacional.

Palabras clave: *Sistema de información geográfica, seguro agrario, cítricos, riesgo de helada, zonificación, tarifas, Murcia.*

ABSTRACT

Combined agricultural insurance is a fundamental part and common practice in modern crop farming today but causes problems due to a hade of co-ordination between administrative data and field data. In this project a Geographical Information System has been created with the help of Geomedia Professional v5.1, in one of the insurance options, which is multicultivation of citrus fruits an complementary produce, and in the Spanish region of Murcia, providing us with an implement which can be transmitted to the different types of agriculture all over Spain.

Keywords: *Geographical Information System, agricultural insurance, citrus, frost risk, coverage of areas, charges, Murcia.*

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola y ganadera se encuentra sometida continuamente a las condiciones desfavorables de la naturaleza, que provocan pérdidas en producción, variando éstas en intensidad y frecuencia, en función de la zona donde se encuentre la explotación y del tipo de cultivo.

Estas pérdidas de producción conllevan la disminución de ingresos por parte del agricultor (o ganadero), incidiendo en su calidad de vida, y si este hecho se repite a corto o medio plazo, puede provocar el cese de la actividad agraria e incluso el despoblamiento agrícola de la zona, con todas las consecuencias económicas que ello implica.

Como herramienta para garantizar una renta mínima al agricultor aparece el *seguro agrario*.

Por seguro entendemos el contrato por el cual el asegurador se obliga mediante el cobro de una prima, y para el caso de que se produzca el evento cuyo riesgo es objeto de cobertura, a indemnizar, dentro de los límites pactados, el daño producido al asegurado o a satisfacer un capital, una renta u otras prestaciones convenidas (*art. 1º de Ley 50/1980, de 8 de octubre, de Contrato de Seguro*).

Asegurar es una práctica común en la agricultura moderna, ya sea en el cultivo de frutales, hortalizas, cereales, explotaciones ganaderas, etc., o en cualquiera de las más de cien líneas de seguro existentes en España. El Sistema Nacional de Seguros Agrarios se encuentra formado por diferentes entidades independientes, las cuales poseen diferentes funciones, como la coordinación, el aseguramiento, o el control del mismo.

- Entidad Estatal de Seguros Agrarios (ENESA).
- Dirección General de Seguros y Fondos de Pensiones.
- Consorcio de Compensación de Seguros.
- Las Comunidades Autónomas.
- Organizaciones Profesionales Agrarias y Cooperativas Agrarias.
- Agrupación Española de Entidades Aseguradoras de los Seguros Agrarios Combinados, S.A. (AGROSEGURO).

Siendo esta última, en nombre y por cuenta de las entidades que la integran, la que realiza la gestión general del sistema, elabora las condiciones y tarifas que serán de aplicación, controla la contratación de pólizas de las redes comerciales de las entidades aseguradoras, cobra las primas abonadas por los asegurados, gestiona la subvención correspondiente a los asegurados, realiza, por medio de profesionales libres (Ingenieros Agrónomos y Técnicos Agrícolas), la valoración de los daños ocasionados por los siniestros y procede al pago de las indemnizaciones.

Sin embargo, el seguro todavía presenta importantes problemas en su aplicación, tanto en la parte de contratación como en la de valoración. Este problema se debe principalmente a la falta de correlación entre los datos administrativos y los datos de campo. Aunque las diversas entidades que componen el Sistema Nacional de Seguros Agrarios Combinados están creando una base de datos a nivel estatal, aún no se ha dado el siguiente paso: emplear un Sistema de Información Geográfica para proporcionar una representación gráfica racional de dicha base de datos.

Se podría definir un Sistema de Información Geográfica como "sistema de gestión de base de datos para la captura, almacenamiento, manipulación, análisis y salida de datos georreferenciados" (*Huxhold,* 1991).

El objetivo principal de este trabajo es crear un sistema de información geográfica con GeoMedia Profesional v5.1, que comprenda tanto los datos administrativos de la actual base de datos como la información reflejada por los peritos tasadores en las hojas de campo. Información esta última, de difícil acceso o en parte perdida de una campaña a otra. Para la elaboración del SIG se ha optado por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, y más concretamente, la línea de Multicultivo de Cítricos y Complementario (096), con todas las opciones que abarca para los diferentes cultivos (naranjo, limonero, mandarino y pomelo) en las diferentes comarcas agrarias y zonas de tasación, con 116 parcelas de control en la zona de Beniel. Una vez establecido el SIG, se evaluará su aplicación en el futuro del seguro agrario.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material

En cuanto al material informático utilizado, desde un principio la idea fue conseguir un SIG de fácil aplicación y relativa sencillez en su manejo, lo que obliga a una serie de restriccio-

nes tanto a nivel de hardware (un ordenador que posea unas características estándar actuales) como de software (programas conocidos o de sencillo aprendizaje). Por todos estos motivos, junto a las elevadas cantidades de información cartográfica que mueven los programas CAD, causantes de posibles problemas con la velocidad y la estabilidad del sistema, se escogió utilizar GeoMedia Professional v5.1.

Para la realización de este trabajo se dispone de dos tipos de datos, los gráficos y los alfanuméricos. Dentro de los datos de carácter gráfico se ha dispuesto del siguiente material:

- Planos de trabajo en papel (tamaño DIN A3), suministrados por AGROSEGURO, sobre la zonificación en la línea de Multicultivo de cítricos en cada municipio (Figura 1).
- Fichero, en formato compatible con ArcView, en donde aparecen los municipios de la Comunidad Autónoma de Murcia.
- Ortofotos de las zonas de la comunidad murciana donde se encuentran las fincas de control.

Figura 1. Detalle de plano de zonificación por helada.

En cuanto a los datos de carácter alfanumérico:

– El libro *Tarifa de primas de coste del seguro complementario de multicultivo de cítricos*, facilitado por AGROSEGURO, en el cual aparecen las primas para toda España en esta línea de seguro, y se han utilizado las correspondientes a la Comunidad Autónoma de Murcia.
– Condiciones especiales del seguro combinado de cítricos.
– Norma específica de peritación de daños ocasionados sobre la producción de cítricos amparada por el seguro agrario combinado.
– Hojas de inspección en campo, rellenadas con los datos de las tasaciones de los siniestros ocurridos en cada una de las 116 parcelas de control durante los años de estudio.

Métodos

En primer lugar se define el entorno de trabajo, dividiendo la región de Murcia por la zonificación de tarifas, en función del riesgo de helada, que impone la Entidad Estatal de Seguros Agrarios (ENESA), para la opción de seguro de Multicultivo de Cítricos y Complementario. Una vez definida, se introducen los datos georeferenciados de las tasaciones en campo.

Para la obtención de la cartografía se recurrió a un fichero en formato compatible con ArcView, en donde aparece la Comunidad Autónoma de Murcia con todos los municipios. Este fichero, mediante la conexión correspondiente, se enlaza a GeoMedia, para posteriormente utilizarlo como plantilla para delimitar las zonas por riesgo de helada que vienen indicadas en los planos suministrados por AGROSEGURO. Los datos alfanuméricos fueron cedidos por AGROSEGURO, del libro citado anteriormente. Los datos que aparecen corresponden a los porcentajes sobre la tasación de la cosecha prevista durante el periodo de contratación.

Una vez finalizado el proceso de entrada de información en la ventana de datos, si cambiamos a la ventana de mapa, veremos un primer mapa monográfico (Figura 2), similar en la forma a cualquier mapa inicial de Murcia, pero con mucha más información (Figura 3).

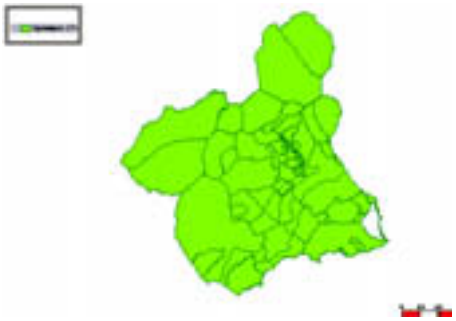


Figura 2. Mapa inicial tras la introducción de datos.

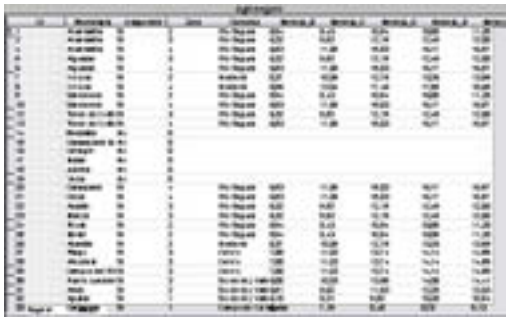
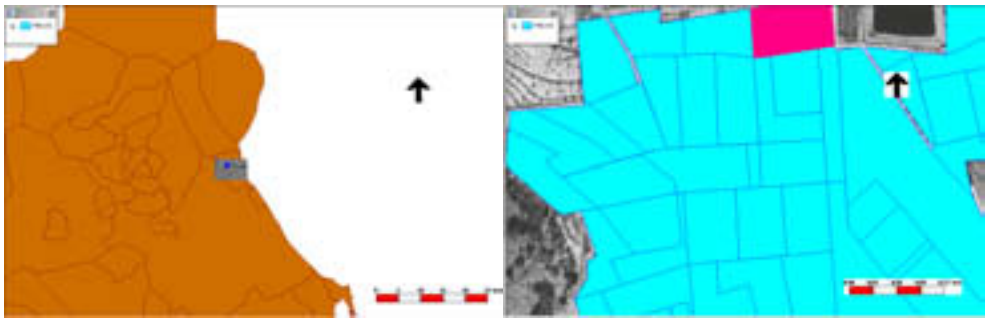


Figura 3. Ventana de datos correspondiente a mapa.

Una vez definido el entorno de trabajo, se procede a la localización de las parcelas de control en el mapa de Murcia de zonificación por helada.



Figuras 4 - 5. Situación de las parcelas control en el Mapa inicial de Murcia (T.M. de Beniel). Superposición sobre las ortofotos de la zona de las parcelas aseguradas.

Después de su identificación, se realiza la entrada de datos, procedentes de las tasaciones y reflejados en las hojas de inspección de campo (Figura 6). Estos datos según las especificaciones de AGROSEGURO (localizadas en la parte posterior de la copia de cada hoja de campo, que recibe el asegurado) se pueden dividir en:

– Apartado 1 y 2, se indica con una X, si se trata de una inspección inmediata o tasación definitiva.
– Apartado 3, corresponde al número de hoja de campo (ya impresa).
– Apartado 4, indica el literal de la línea de Seguro.
– Apartado 5, indica el nº de codigo correspondiente a la línea de seguro.

Datos del seguro. Apartados del 6 al 8, ambos inclusive, incluyen los principales datos de identificación del Seguro.

Situación del riesgo. Apartados 9 al 11, indican los literales y códigos de Provincia (9), Comarca (10), Término municipal y Subtérmino (11), y que vienen reflejados, salvo error, en la declaración del Seguro correspondiente.

Datos internos. Apartado 12, se indicara el nº de expediente asignado como el nº de orden de trabajo.

Datos de las parcelas:

- Apartados del 13 al 16, incluyen datos referentes a la Declaración de Seguro, excepto el apartado 15 (identificación catastral). Cuando resulte ser errónea la identificación catastral que figure en la Póliza, se reflejará la identificación **real** de la parcela.
- Apartado 17, superficie **real** de la parcela siniestrada.

- Apartado 18, indica el código de cultivo realmente existente en la parcela.
- Apartado 19, indica el código de la variedad de cultivo realmente existente en la parcela.
- Apartado 20, indica el código de riesgo sufrido en la parcela: 1-Pedrisco, 3-Helada, 6-Viento Huracanado, 8-Inundación/Lluvia Torrencial, 15-Lluvia Persistente.
- Apartado 21, indica las fechas reales de ocurrencia de los siniestros acaecidos (día/mes).
- Apartado 22, indica la producción que podría obtenerse de acuerdo a sus condiciones normales de carácter edáfico, climático, tipo de plantación y de cultivo.
- Apartado 23, indica el grado de afección del cultivo.
- Apartado 24, indica la producción en (Kgs.) que se hubiera obtenido de no ocurrir ningún siniestro garantizado en la parcela siniestrada y de acuerdo a las reducciones (si procede) según lo previsto en el condicionado.
- Apartado 25, indica el código de reducción de la Producción Real esperada.
- Apartado 26, (Producción Real Final), es aquélla susceptible de recolección por procedimientos habituales y técnicamente adecuados.
- Apartado 27, indica el % de daños, tanto en cantidad como en calidad de la parcela siniestrada.
- Apartado 28, indica los "coeficientes" a aplicar cuando proceda.
- Apartado 29, indica el "coeficiente" aplicable en siniestros de Pedrisco garantizados por la Extensión de Garantías (cuando proceda).
- Apartado 30, indica el "coeficiente" aplicable en los siniestros de Daños Excepcionales y con relación a la fecha de recolección real (cuando proceda).
- Apartado 31, indica el importe de la compensación y/o deducción y su código correspondiente.
- Apartado 32, indica alguna situación especial de la parcela y/o del documento de "acta de tasación".
- Apartado 33, indica si la tasación se ha realizado sobre muestras testigo (S o N).
- Apartado 34, indica la opción, nº de arboles y los estados fenológicos de la parcela.
- Apartado 35, indica el número de registro del perito que efectúa la tasación, el D.N.I. o N.I.F., el nombre del mismo y su firma.
- Apartado 36, indica el D.N.I. o N.I.F. del que firma el documento (Asegurado, Tomador o Representante), y el nombre del mismo.
- Apartado 37, se indicara un SI o un NO si da conformidad o no al contenido del documento. En caso de disconformidad es imprescindible que en el presente documento o si fuera necesario en hoja anexa, se especifique con claridad los puntos de la Hoja de Campo a los que se refiera la disconformidad y las causas de la misma.

Además de los arriba mencionados, se crearan los campos:

– Indemnizaciones.
– Importe de indemnizaciones.

– Años de estudio con siniestro (0: sin siniestro,1: siniestro) y el número de año, por ejemplo *1,4* equivale a siniestro en el año de estudio numero 4.

Los datos introducidos, según su naturaleza, se dividen en dos entidades de área:

– La entidad **"Fincas"**, que contendrá los datos del seguro, situación del riesgo y los apartados del 13 al 19 y el apartado 34.

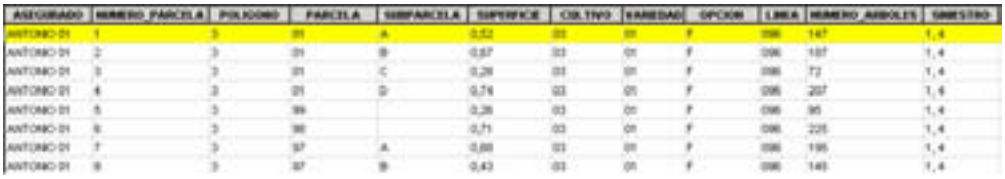


Figura 6. Vista de la ventana de datos de "Fincas"

– En caso de siniestro, la entidad **"Siniestro"** seguida del número de año de estudio (por ej. "Siniestro04"). La información se ampliará con los apartados restantes que contengan información.

PRODUCCION_REAL_FINAL	DAÑO_CANTIDAD	DAÑO_CALIDAD	IMPORTE	INDEMNIZACION	CODIGO_PERITO_TASADOR
1111,00	0,00	23,36	71,33	64,19	A
1433,00	0,00	23,36	91,94	82,75	A
590,00	0,00	23,36	37,87	34,08	A
1586,00	0,00	23,36	101,83	91,65	A
7573,00	0,00	49,55	129,99	2483,87	A
17935,00	0,00	49,55	159,92	1145,10	A
15544,00	0,00	49,55	144,33	2758,03	A
11558,00	0,00	49,55	106,87	2043,02	A

Figuras 7-8. Vista de la ventana de datos de "Siniestro04".

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Solamente con la creación del entorno, en donde aparecen las tarifas de la opción de seguro de Multicultivo de Cítricos y Complementario en función del riesgo de helada, tenemos ya una importante herramienta de trabajo, que nos permite un fácil acceso a la información sobre tarifas, cálculo del volumen de contratación, las bonificaciones, el coste del seguro, evaluación de zonas de riesgo, etc., de gran utilidad tanto para las empresas aseguradoras, tomadores, como

asegurados. También es utilizable en otros campos, ya que suministra información de primer orden sobre las zonas con más posibilidades de helada de toda la región.

Las consultas son uno de los aspectos más llamativos de un SIG, ya que introduciendo unas operaciones lógicas sencillas a base de caracteres se genera un *mapa nuevo*.

Las consultas pueden ser simples (un solo elemento en la orden lógica), o complejas, las cuales tienen dos o más elementos en la orden lógica. Por ejemplo, dentro de la orden lógica incluimos dos elementos, para averiguar qué zonas poseen la categoría 2 en la comarca Río Segura (`Comarca = 'Río Segura' AND Zona = '2'`), viéndose los resultados en las Figuras siguientes:

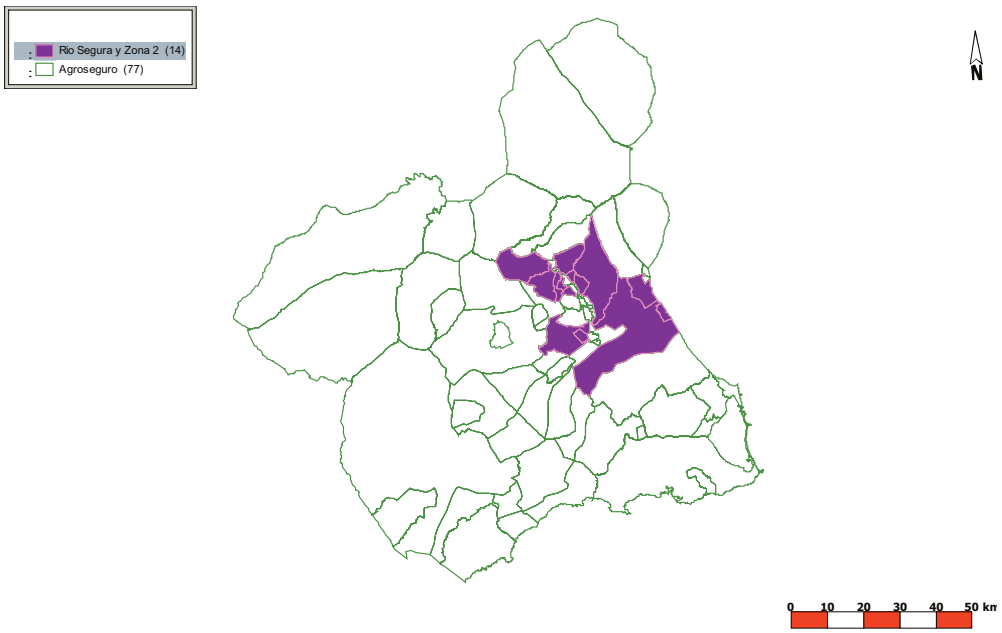


Figura 9. Resultado en ventana de mapa de una consulta compleja: `Comarca = 'Río Segura' AND Zona = '2'`.

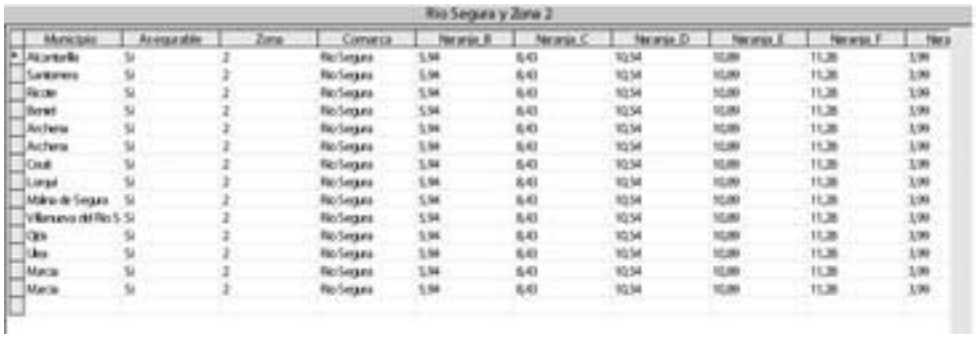


Figura 10. Resultado en ventana de datos de la consulta: `Comarca = 'Río Segura' AND Zona = '2'`.

Otro de los aspectos visuales que también llaman la atención en un SIG, y que los diferencia de las aplicaciones CAD, es la generación de mapas temáticos. En nuestro caso se han generado dos, uno con las diferentes zonas de riesgo de heladas (figura 11), y otro con los porcentajes de daño por pedrisco en las parcelas control (figura 12).

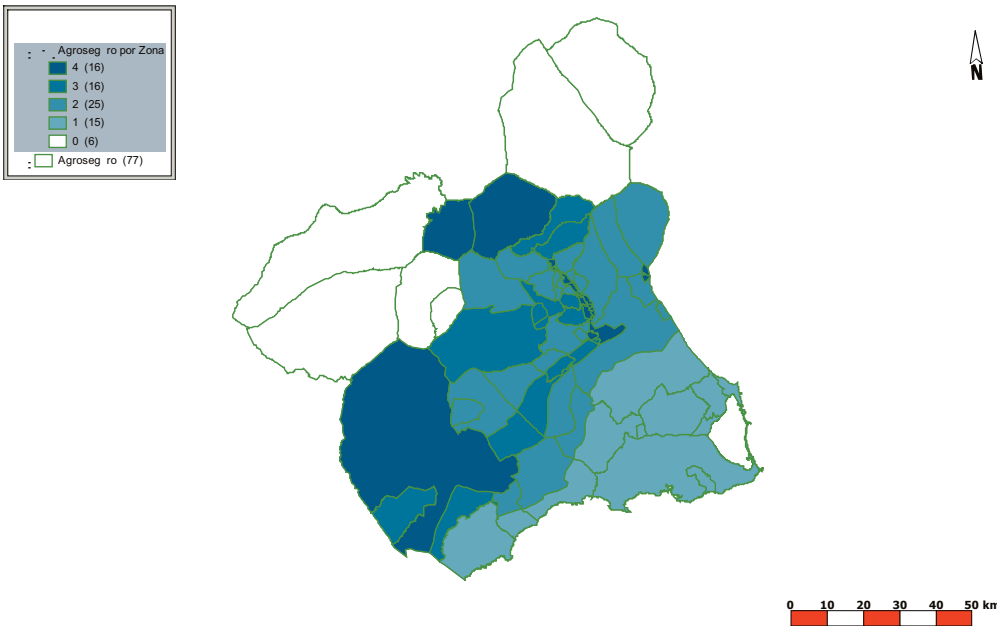


Figura 11. Mapa temático sobre la zonificación para la línea de seguro de Multicultivo de cítricos en Murcia.

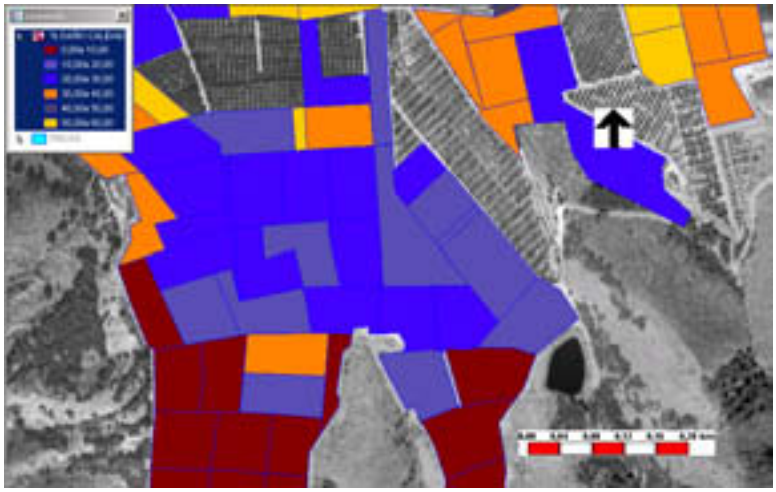


Figura 12. Mapa temático de los porcentajes de daño por pedrisco en año de estudio 04.

Como se aprecia en las figuras 11 y 12, con la introducción datos a nivel de parcelas aseguradas, se abre un nuevo abanico de posibilidades, que va desde el control de calidad de las tasaciones, por la simple identificación con coordenadas de las parcelas, por la vigilancia de partes duplicados, etc. hasta la creación de modelos teóricos de cálculo de indemnizaciones, estudio del comportamiento de una nube de pedrisco, de helada por advección u otro riesgo.

Los datos obtenidos se actualizan cada año y son comprobados y cotejados por un elevado numero de profesionales, desde el agricultor que estima la cosecha, el tomador que realiza el seguro, AGROSEGURO que comprueba los datos catastrales y administrativos, y los profesionales libres que reflejan la tasación del siniestro en las hojas de campo.

Podemos asociar estos datos con los provenientes de otros SIG, para la creación de mapas de cultivos, aprovechamientos del suelo, comprobaciones catastrales, etc., consiguiendo sistemas que se actualizaran cada año. Asimismo, se dispondrá de un amplio registro del comportamiento del arbolado durante los años que son asegurados, ya que aunque no haya siniestro quedará constancia de su producción asegurada.

CONCLUSIONES

En vista de los resultados obtenidos, sería interesante su estudio en otros sectores, también asegurables por ENESA, como el subsector ganadero, con el control de las ganaderías (especie y raza de animales que lo componen, quiénes son los responsables sanitarios de ésta, etc.) o para el control de propagación de epidemias.

El Sistema de Información Geográfica resultante es una herramienta muy útil para cualquiera de las entidades de las que consta el Sistema Nacional de Seguros Agrarios Combinados, tanto en ésta como en otras líneas de seguro en todo el territorio español. El siguiente paso dentro de la evolución de este Sistema de Información Geográfica es ampliar el número de parcelas de control y años de estudio, con el fin de obtener resultados estadísticos de las diferentes aplicaciones.

REFERENCIAS

AGROSEGURO. (2003): *Tarifa de primas de coste del seguro complementario de multicultivo de cítricos.*

AGROSEGURO. (2003): *Condiciones especiales del seguro combinado de cítricos.*

AGROSEGURO. (2003): *Norma específica de peritación de daños ocasionados sobre la producción de cítricos amparada por el seguro agrario combinado.*

Ayén López, J.A., (2003): *Cartografía Catastral.* Universidad Miguel Hernández. Orihuela.

Burgaz, F.J.; Pérez-Morales, M.M. 1996. *1902-1992. 90 años de seguros agrarios en España.* M.A.P.A., Servicio de Publicaciones. Madrid.

Huxhold, W.E. (1991): *An introduction to Urban Geographic Information Systems,* Oxford University Press, New York, EE.UU.

Intergraph Corporation. (2001): *Manual del Usuario de GeoMedia Professional.* Huntsville, Alabama, EE.UU.

Martín Rodríguez, M.A. (2003): *Sociología y legislación de la empresa agraria. Tema 13: Los seguros agrarios.* Universidad Miguel Hernández. Orihuela.

M.A.P.A. (1999): *El Sistema de Seguros Agrarios en España. La Entidad Estatal de Seguros Agrarios (ENESA).* Centro de Publicaciones. Madrid.

www.igsap.map.es
www.mediadores-seguros.com
www.mapya.es
www.boe.es

Mapa de vulnerabilidade sócio-econômica como suporte à implantação do Programa Fome Zero no município de Criciúma-SC

L. F. Siqueira[1], M.Leal Lahorgue[2], A. Bittencourt de Souza[3], W. Comin Sonáglio[4]

(1) Professora Departamento de Geografia Universidade do Extremo Sul Catarinense. Av. Universitária, 1105, CEP: 88806-000,Criciúma-SC (Brasil) - lsi@unesc.rct-sc.br. Alun a de doutorado em Cadastro Técnico e Gestão Territorial – Universidade Federal de Santa Catarina-Florianópolis-SC.
(2) Professor Departamento de Geografia, Universidade do Extremo Sul Catarinense.
(3) Acadêmica Curso de Geografia, Universidade do Extremo Sul Catarinense.
(4) Acadêmico do Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense.

RESUMO

O presente trabalho pretende mostrar como os dados estatísticos podem ser tratados em Sistema de Informações Geográficas e oferecer subsídio para o administrador público. O trabalho em desenvolvimento trata da aplicação das técnicas de geoprocessamento como subsídio ao Programa Fome Zero no município de Criciúma-SC. Os dados fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa são disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, organizados por setor censitário.

***Palavras Chave**: Vulnerabilidade Social, Sistema de Informações Geográficas.*

ABSTRACT

The present work intends to show as the statistical data can be treated in Geographic Information System and to offer subsidy for the public administrator. The work in development deals with the application of the geoprocessing techniques as subsidy to the "Hunger Zero" Program in the city of Criciúma-SC. The basic data for the development of the research are available by the Brazilian Institute of Geography and Statistics - IBGE, organized for tax sector.

***Key Words:** Social vulnerability, Geographic Information System*

Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Editado por C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y J.B. Martínez Guevara. © 2004 Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

INTRODUÇÃO

A dinâmica sócioespacial advinda do movimento populacional faz com que o administrador público tenha que contar com instrumentos que o auxiliem na administração e na instalação de programas sociais. Como exemplos de programas que estão sob responsabilidade do poder público no Brasil, podemos citar os habitacionais, de infraestrutura, abastecimento alimentar e outros como o recente Fome Zero.

O Programa Fome Zero criado pelo governo federal, tem como principais objetivos reunir políticas públicas que envolvam os três níveis de governo, federal, estadual e municipal, para garantir a segurança alimentar da população. Segurança alimentar, neste caso, quer dizer o acesso regular em quantidade e qualidade necessárias à manutençao da saúde física e mental da população (*Governo Federal*, 2003).

Assim, este programa também encontra-se em implantação no município de Criciúma, localizado no sul do Brasil, no Estado de Santa Catarina.

O principal objetivo da pesquisa é identificar espacialmente as áreas de vulnerabilidade socio-econômica visando orientar o administrador público no processo decisório sobre a necessidade de atendimento pelo Programa Fome Zero.

Além deste objetivo, o projeto em andamento pretende agregar as variáveis para a composição do critério vulnerabilidade socio-econômica, gerar mapas que representem a população que vivem em situação de vulnerabilidade sócio-econômica, gerar mapas por renda e situação escolar, criar banco de dados considerando como unidade de análise setores censitários. Posteriormente, modelar o banco de dados que permita administrador público efetuar atualizações e consultas conforme a dinâmica e necessidade.

EXCLUSÃO SOCIAL E GEOPROCESSAMENTO

O crescimento da taxa de urbanização apresenta-se acompanhado de características perversas que marcam intensamente os centros urbanos fazendo-os adquirir uma configuração caótica atingindo diretamente a população.

De acordo com *Solano* (1991), em 1980 haviam dez cidades com mais de 10 milhões de habitantes no mundo. Destas, quatro estavam localizadas na América Latina e entre elas, São Paulo e Rio de Janeiro.

Segundo o *IBGE*[1], em 2000 a população urbana brasileira era 4,31 vezes maior que a população rural, refletindo na taxa de urbanização que passou de 75,6% em 1991 para 81,2% no ano de 2000.

A presença maior ou menor de infraestrutura e serviços urbanos e sua qualidade indicam o grau de segregação sócioespacial, uma vez que os grupos sociais empobrecidos residem em diverços espaços urbanos e que tem em comum a segregação socioespacial (*Ramos e Barbosa,* 2003).

---

1 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Sendo assim, o mapeamento das áreas de um município localizando a população em vulnerabilidade sócio-econômica ajuda o administrador público a identificar os locais prioritários para a implantação de programas sociais.

Como instrumentos técnicos utilizados para mapeamento em estudos sócio-econômicos, destaca-se a crescente aplicação das técnicas de geoprocessamento (*GISDECO*, 1999).

Geoprocessamento representa a área da ciência que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para tratar dados referentes a um determinado espaço geográfico (*D´Alge*, 2001).

No Brasil, as técnicas de geoprocessamento aplicadas em estudos sócio-econômicos podem ser exemplificadas pela publicação do Mapa da Exclusão/Inclusão Social do Município de São Paulo. Segundo *Sposati* (2000), o Mapa da Exclusão/Inclusão Social é uma metodologia que, usando de linguagens quantitativas, qualitativas e de geoprocessamento produz dois índices territoriais que hierarquizam regiões de uma cidade quanto ao grau de exclusão/inclusão social.

Especificamente sobre a questão da segurança alimentar, pode-se citar dois exemplos, um nacional e outro internacional, de aplicação de técnicas de geoprocessamento.

No dia 16 de outubro de 2003, foi lançado o Mapa da Fome, desenolvido pela empresa Infostrata o sistema combina diversas variáveis estatísticas e qualitativas com imagens de satélite. Esta associação de dados permite ao usuário identificar a condição socioeconômica de cada cidade atendida pelo programa (*Pacheco*, 2003).

Dentro das atividades internacionais, o exemplo mais emblemático trata-se do projeto desenvolvido em segurança alimentar junto a FAO (Food Agricultural Organization) denominado SICIAV (Sistemas de Información y Cartografía sobre la Inseguridad Alimentaria y la Vulnerabilidad). São redes de sistemas que reúnem, analisam e difundem informação sobre o problema da insegurança alimentar e vulnerabilidade. Dentre as atividades específicas, procura efetuar a localização das pessoas que padecem de fome ou subnutrição/subalimentação no mundo, através do mapeamento das áreas de vullnerabilidade (*FAO*, 2003).

Para este tipo de projetos é indispensável a utilização de recursos de informática que contemplem as relações entre a informação espacial (mapa) e as informações alfanuméricas (dados estatísticos e qualitativos) (*Dias e Camara*, 2001).

A importância de se disponibilizar informações estatísticas microlocais para os pesquisadores, na forma como o IBGE o faz, foram analisadas por *Curtis* (2000). O volume de dados e a qualidade dos mesmos faz com que os pesquisadores tenham que sistematizá-los de forma a obterem os índices e variáveis necessárias para a caracterização dos temas a serem tratados.

Assim, se o administrador público tiver disponível sistemas informatizados com banco de dados espacial (mapas) associado a informações estatísticas e qualitativas nos mais diversos temas, poderá efetuar consultas e análise espacial que indicarão os locais para os quais deverá deslocar sua atenção. Isto vale para qualquer tipo de informação que se queira ver espacializada no território. O que vai determinar a implantação do projeto são os objetivos específicos iniciais.

Uma das dificuldades do administrador público é ter instrumentos que forneçam informações rápidas e com dados confiáveis para suporte em implantações e aplicações de programas sociais.

Além de tratar de informações estatísticas ou qualitativas, o administrador necessita conhecer a localização geográfica da distribuição destas informações.

No caso do Programa Fome Zero é indispensável que se conheça a localização das pessoas que necessitam ser atendidas pelo programa. E, principalmente, as características e o número de pessoas. Portanto, para facilitar a implementação do programa é importante localizar espacialmente as pessoas que se encontram fora da escola, pessoas com renda inferior ao necessário para uma alimentação saudável e digna, pessoas que vivem em locais onde não é possível a implantação de horta doméstica (locais ambientalmente comprometidos) e etc.

A principal hipótese é que as técnicas de geoprocessamento e o processamento de informações microlocais publicadas pelo IBGE, podem ser instrumentos de grande utilidade para a implantação do Programa Fome Zero no município de Criciúma. Isto, não somente para a implantação, mas, também, para o acompanhamento do desenvolvimento das demais atividades do programa Fome Zero. Por exemplo, mapear e quantificar todas as atividades desenvolvidas mensalmente em cada bairro ou setor censitário.

METODOLOGIA

Pelas próprias características do Programa Fome Zero, entende-se que o público alvo pertence aos extratos mais pobres da sociedade, ou seja, aqueles considerados em condições de vulnerabilidade sócio-econômica (*Siqueira*, 2000). Considera-se um grupo de pessoas em condições de vulnerabilidade sócio-econômica aqueles cujos indicadores estatísticos demonstram insuficiência nas condições para uma vida saudável e digna. Como exemplos desses indicadores pode-se destacar: renda, saneamento básico abastecimento de água, coleta de lixo, esgotos, disponibilização de rejeitos), energia elétrica, educação e trabalho.

Para potencializar estas aplicações, o IBGE publicou os microdados estatísticos referentes ao Censo Demográfico de 2000, apresentando 527 variáveis por setor censitário. O setor censitário é a unidade mínima criada para fins de controle cadastral da coleta (*IBGE*, 2003), ou seja, é a unidade espacial percorrida pelo recenseador no momento da pesquisa censitária . A área de abrangência desses setores são definidos pelo número de habitações existentes, não podendo exceder de 300 casas (*IBGE*, 2001) (Figura 1).

Para os trabalhos em SIG s utilizam-se os softwares Idrisi e Statcart (software desenvolvido pelo IBGE) para apresentação dos dados estatísticos no Brasil (Figura 2).

Para a confecção do mapa de vulnerabilidade sócio-econômica do município de Criciúma que atenda as necessidades do programa Fome Zero, estão sendo adotadas as seguintes estratégias. No primeiro momento, efetuou-se a definição das variáveis para a composição do critério vulnerabilidade sócio-econômica. Renda, grau de escolaridade, abastecimento de água tratada, abastecimento de energia elétrica, coleta de rejeitos (lixo), são os primeiros índices analisados.

Figura 1. Exemplo de setor censitário percorrido pelo recenseador.

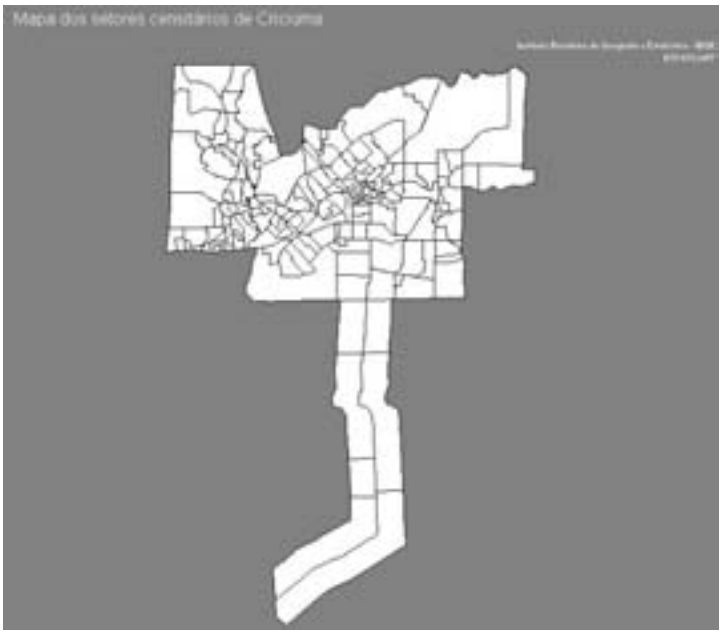


Figura 2. Mapa dos setores censitários urbanos do Município de Criciúma-SC.

RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto apresentado optou por tratar do conceito de vulnerabilidade social por trabalhar apenas com dados estatísticos e não com dados obtidos em campo. Assim, observa-se que as variáveis tratadas para conceituar uma população em estado de vulnerabilidade social, também caracterizam o conceito de pobreza.

A pobreza pode ser caracterizada pela circunstância econômica na qual uma pessoa carece dos recursos básicos para satisfazer as mínimas necessidades de sobrevivência como: saúde, alimentação, educação e moradia. Porém, algumas pessoas definem a pobreza com vários critérios. Os mais utilizados são os critérios de pobreza relativa e pobreza absoluta.

A pobreza relativa é experimentada pelas pessoas que possuem uma renda abaixo da média em uma determinada sociedade. A pobreza absoluta refere-se às pessoas que não dispõe de alimentos necessários para manter a saúde.

Assim sendo, na primeira etapa do projeto - onde se analisam as variáveis renda e educação para o município de Criciúma - constatou-se que o Bairro Ana Maria, identificado pelo IBGE como Setor Urbano número 57, aparece com os piores índices com relação a estas variáveis (Figura 3). No ítem renda, foi um dos 2 setores censitários onde observa-se a predominância de pessoas que tem um rendimento mensal de até 1/2 salário mínimo (U$ 1,69/dia, em valores de junho de 2004) e, portanto, as pessoas prioritárias em relação ao atendimento pelo Programa Fome Zero.

Figura 3. Mapa mostrando os setores censitários com rendimento de até 1/2 salário mínimo mensal.

Este resultado faz com que este setor seja identificado na divisão de bairros do município e receba a atenção da administração municipal. Os dados estatísticos apontam onde estão os problemas em relação a determinadas variáveis, mas é indispensável que se aprofundem os conhecimentos a respeito destes lugares, principalmente no que diz respeito a caracterização do bairro, as condições de vida da população residente e o processo de ocupação deste local. Em outras palavras, deve-se "dar vida" aos dados estatísticos, entender o processo que teve como resultante a realidade sócio-espacial de pobreza e carência de infraestruturas urbanas básicas.

Deve-se compreender a realidade de um local bastante específico, o bairro Ana Maria em Criciúma, sem esquecer que o processo que levou às atuais condições do bairro deve ser articulado com outras escalas de análise. É impossível dissociar da forma pela qual se estruturou a ocupação do espaço na cidade de Criciúma nem às conjunturas sócio-econômicas que atravessaram o país nos últimos anos.

Portanto, se parte do entendimento que a produção do espaço, e mais especificamente, a produção do espaço urbano é a base teórica fundamental para se conhecer a realidade.

Neste sentido, deve-se conceber o espaço urbano enfocando vários aspectos:

O urbano, em primeira instância, pode ser encarado sendo um mercado de trabalho geograficamente contíguo dentro do qual as trocas diárias e substituições desta força de trabalho são possíveis. Como a força de trabalho é uma mercadoria peculiar (afinal não é uma *coisa* e não se reproduz sob total controle da burguesia), a forma como se reproduz, se organiza ou deixa de se organizar coletivamente, como consome, o grau de educação formal que possui, etc., formam um mix particular em cada região urbana com implicações na qualidade e quantidade da disposição para o capital.

Sendo a busca pelo lucro por parte das empresas um dos fundamentos das relações sociais capitalistas, este pode aumentar através de uma melhor tecnologia ou de uma melhor localização. Só que tanto mudanças tecnológicas como de localização implicam custos. Uma brusca mudança tecnológica e sua provável mudança de configuração espacial pode desvalorizar massivamente o capital e o território preexistente, quebrando monopólios já assentados e inclusive organizações do trabalho. Na paisagem urbana criada pelo capitalismo, existe uma permanente tensão entre a relativa estabilização necessária para a acumulação (e inclusive para a amortização do capital fixo) e os processos dinâmicos de inovação (destruição criadora).

As relações de classe entre capital e trabalho tendem a produzir uma "coerência estruturada" da economia em uma região urbana. Na reprodução cotidiana da força de trabalho, normalmente os trabalhadores vão gastar seu salário em bens e serviços dentro de uma mesma região. Os salários são convertidos em certo estilo e padrão de consumo dentro de um sistema de área de mercado geograficamente "limitado". Ou, em outras palavras, também é possível definir o urbano como uma unidade de oportunidades de trabalho e consumo, no qual o capital também é interessado em sua continuidade.

A reprodução, tanto do capital como da força de trabalho, requer uma grande quantidade de infra-estruturas físicas e sociais. Isto não só consolida como reforça a tendência de uma coerência estruturada no urbano. As infra-estruturas físicas aparecem como ambiente construído

(estradas, pontes, escolas, fábricas, "shopping centers", casas e edifícios, etc.) e absorvem grandes quantidades de capital que fica imobilizado e costuma requerer uma quantidade de tempo longa para ser amortizada (Milton Santos concebe isto como fixo espacial ou sistema de objetos). As infra-estruturas sociais também requerem grandes quantidades de capital e seu efeito também se dá a longo prazo: é só pensar no sistema educacional, de saúde, previdência, etc. Por suas características, toda esta vasta gama de infra-estrutura envolve não só o capital financeiro para sua viabilização, como o Estado em suas várias instâncias (Nacional, Estadual, Municipal).

O resultado deste conjunto de questões é a expansão do conceito de urbano:

> "*An examination of physical and social infrastructures will help to broaden the conception of what an urban region is all about. It is more than a set of overlapping and interpenetrating commodity and labor markets; more than a set of intersecting labor process and productive forces; more, even than a simple structured coherence of production and consumption. It is also a living community endowed with certain physical and social assets, themselves the product of a long process of historical development and class struggle. These assets define the wealth of a community, and it is through their proper maintenance, enhancement, deployment, and use that productivity of labor power stands to be continuously preserved and enhanced at the same time as the reproduction and expansion of capital is assured*." (*Harvey*, 1989:147)

Portanto, é o conjunto destes aspectos que deve ser entendido como base para a compreensão de uma realidade urbana, na qual Criciúma e o bairro Ana Maria estão inseridos.

No Brasil, o espaço urbano também acabou se caracterizando como *locus* de concentração de pobreza, de exclusão das camadas mais pobres no acesso aos serviços e infraestruturas públicas e de formas de segregação sócio-espacial. Como disse Milton Santos,

> "*A cidade em si, como relação social e como materialidade, torna-se criadora de pobreza, tanto pelo modelo socioeconômico de que é o suporte como por sua estrutura física, que faz dos habitantes das periferias (e dos cortiços) pessoas ainda mais pobres. A pobreza não é apenas o fato do modelo socioeconômico vigente, mas, também, do modelo espacial*." (*Santos*, 1994:10)

Isto reforça a necessidade de se estudar a pobreza e as carências tanto sociais como de estruturas urbanas a partir da compreensão do processo de produção do espaço.

REFERENCIAS

Castel, Robert: *As metamorfoses da questão social. Uma crônica do salário*. 2ª. Edição. Petrópolis-RJ. Editora Vozes, 1998.

Curtis, Sarah. Statistiques microlocales dans le recensement de la population britannique: accès aus donnés pour la communauteé scientifique. In: *L'Espace Geographique*. Número 1. 2000.

D´Alge, Júlio César Lima. Cartografia para Geoprocessamento. In: *Introdução à ciência da Geoinformação*. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html. Acesso em julho 2001.

Dias, C. e Camara, G. *Arquitetura de Sistema de Informações Geográficas*. Disponível em: http:// www.dpi.inpe.br/geopro. Acesso em julho 2001.

Eastman, J.R. *Idrisi for Windows – Manual do usuário: introdução e exercícios tutoriais.* Versão em português: Hasenack, H. & Weber, E. (eds.). Porto Alegre, UFRGS – Centro de Recursos Idrisi, 1998. 235p.

FAO. L´aprovisionnement et la distribution alimentaires des villes. *http:///www.fao.org/ag/sada.htm.* Acesso em 11/08/1998.

FAO. Declaración de Roma sobre la Seguridad Alimentaria Mundial, 1996. Disponível em: *http:// www.fao.org/docrep/003/w3613s/w3613s00.htm*. Acesso em 15/10/2003.

Galeazzi, Maria Antonia (org). Segurança Alimentar e Cidadania. A contribuição das universidades paulistas. Ed. Mercado de Letras. Campinas-SP.1996.

Gisdeco. 1999. *GIS* . Disponível em: *http://www.geog.uu.n/gisdeco/gd20.htm.* Acesso em março 2000.

Gottdiener, Mark. *A produção social do espaço urbano*. São Paulo. Editora da USP. 1993.

Harvey, David. *A justiça social e a cidade*. São Paulo. Hucitec, 1980.

Harvey, David. *The urban experience*. Baltimore. Johns Hopkins, 1989.

IBGE – *Censo Demográfico 2000. Agregado de Setores Censitários dos Resultados do Universo*. *Documentação dos Arquivos de Dados*. Rio de Janeiro. 2002.

IBGE – *Base de informações por setor censitário. Censo Demográfico 200. Resultados do universo*. Criciuma. Santa Catarina.

Instituto Cidadania. *Projeto Fome Zero: uma proposta de política de segurança alimentar para o Brasil*. São Paulo. 2001.

Lefebvre, Henri. *El derecho a la ciudad*. 4ª. Ed. Barcelona. Ed. Península. 1978.

Martins, José de Souza. *A sociedade vista do abismo. Novos estudos sobre exclusão, pobreza e classes sociais*. Petrópolis-RJ, Ed. Vozes. 2002.

Pacheco, Paula.O mapa da fome. In: *Carta Capital*. Ano X, n.262. Outubro 2003.

Ramos, Maria Helena Rauta e BARBOSA, Maria José de Souza. *Gestão de políticas urbanas e mecanismos de democracia direta*. In: *Metamorfoses sociais e políticas urbanas*. DP&A Editora. Rio de Janeiro. 2002.

Rocha, Sonia. Renda e Pobreza nas metrópoles brasileiras. In: *Globalização, Fragmentação e Reforma Urbana. O futuro das cidades brasileiras na crise*. (org) L. C. Q. Ribeiro e O. A. Santos Júnior. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1994.

Santos, João Bosco Feitosa dos. Pobreza e exclusão social na América Latina. In: *América Latina. Transformações Econômicas e Políticas*. Elza Maria Franco Braga (org.). Fortaleza-CE. Editora UFC. 2003.

Santos, Milton. *A urbanização brasileira*. São Paulo, Editora Hucitec. 1994.

SICIAV. *Sistemas de Información y Cartografía sobre la Inseguridad Alimentaria y la Vulnerabilidad*. Disponível em: *http://www.fivims.net/index.jspx?lang=es*. Acesso em 15/10/2003

Siqueira, Lucimar Fátima. *Análise Sócio-Espacial da Localização de Equipamentos Públicos de Abastecimento Alimentar Urbano – Estudo de Caso em Florianópolis*-SC. Dissertação. CTC-UFSC. 2000.

Solano, Francisco de & UCLES, Mario Lungo. *Urbanização e Metropolização na América Latina* – 1. *Série Estudos Urbanos*. Coleção Documentos IEA. São Paulo-SP. Junho, 1991.

Sposati, Aldaiza. *Cidade, Território Exclusão/Inclusão Social*. Dispoível em: http://www.dpi.inpe.br/geopro. Acesso em setembro 2000.

Star, Jeffrey e ESTES, John. *Geographic Information Systems. An introduction*. Prentice Hall, New Jersey. 1990.