

**Geografía y medio ambiente: métodos de modelización y análisis.**

**Bases para el diseño de un SIG orientado al estudio de la degradación ambiental en áreas de montaña: el caso de los Andes centromeridionales.**

F. Silió<sup>1</sup>, J.C. G. Codron<sup>1</sup>, L. Campo<sup>2</sup>, E. Cacho<sup>2</sup>, F. Rodríguez<sup>2</sup>, Y. Ruiz<sup>2</sup>, S. Sainz<sup>2</sup>, C. Villaverde<sup>2</sup>

---

**Resumen**

El objeto de esta comunicación es destacar el papel que los Sistemas de Información Geográfica pueden desempeñar como método de análisis y modelización de los procesos de degradación ambiental en áreas de montaña andina. Tanto los objetivos del SIG como el esquema metodológico que se proponen deben ser entendidos en el marco del proyecto *Ambiente y Sociedad en los Andes: políticas y estrategias*<sup>3</sup>.

**1.- Introducción.**

Desde una perspectiva geográfica, el proceso de degradación ambiental al que se ven sometidas grandes extensiones de los Andes centromeridionales responde a la acción simultánea y combinada de una serie de factores ligados tanto a la dinámica propia del medio físico como al uso y explotación de los recursos naturales por parte de las comunidades. La ausencia de una política medioambiental efectiva de los gobiernos responsables, unido a una no siempre clara percepción del problema por parte de la población, se traducen en un creciente deterioro de las condiciones preexistentes y una importante disminución de los recursos disponibles: abandono de cultivos, desaparición de la cubierta vegetal, interrupción de las comunicaciones, vaciamiento demográfico, pérdida de vidas humanas, etc.

La fragilidad que caracteriza a estos espacios de montaña justifica sobradamente la búsqueda urgente de soluciones, así como la elaboración de nuevas propuestas territoriales encaminadas a promover un uso sostenible de los recursos naturales. Alternativas que deben, en último término, alcanzar un equilibrio entre los condicionantes de tipo físico y los modos de uso del medio como parte de la estrategia de las comunidades para mantener su calidad de vida.

---

<sup>1</sup> Dpto. de Geografía, Urbanismo y O. T. Universidad de Cantabria.

<sup>2</sup> Investigadores adscritos al proyecto. Universidad de Cantabria.

<sup>3</sup> *Policies for Sustaining Environments and Livelihoods in Peru, Bolivia and Argentina*. Proyecto INCO-DC, Comisión de las Comunidades Europeas, 1997. Con la participación de las Universidades de Leeds (Gran Bretaña), Amsterdam (Países Bajos), Cantabria (España), Católica Pontificia de Perú, Mayor de San Andrés (La Paz, Bolivia) y Buenos Aires (Argentina).

Se hace necesario, por lo tanto, diseñar una investigación específica que incluya los métodos de las ciencias naturales y sociales. Queremos subrayar en este punto la importancia de adoptar una perspectiva multidisciplinar en este tipo de estudios, en el que la integración de lo físico y lo socioeconómico juega un papel central. Desde este enfoque, los Sistemas de Información Geográfica ofrecen un marco excepcional por sus capacidades en (a) la formación y explotación de un banco de datos medioambientales homogéneo capaz de reunir los distintos estudios sectoriales, (b) la mejora de la calidad de la información disponible mediante la creación de nuevos datos espaciales, (c) el análisis integrado de las distintas variables y (d) el diseño y modelización de nuevas políticas territoriales de carácter medioambiental en áreas de montaña (HEYWOOD, PRICE y PETCH, 1994).

## **2.- Areas de estudio.**

Las áreas seleccionadas en el estudio comprenden los valles centrales de Tarija (Bolivia), Quebrada de Humahuaca (Argentina) y valle del Colca (Perú). Consideradas globalmente y desde una perspectiva ambiental, estos espacios de montaña presentan una rica variedad de factores geoecológicos y son suficientemente representativos en el contexto andino por su diversidad topográfica (zonas de montaña, altiplano y cuencas intramontanas, así como ambientes de piedemonte fuertemente diseccionados en ambas laderas de las Yungas), climática (climas que varían desde los áridos en el valle de Puquina a los subhúmedos de las partes más bajas de la Quebrada de Humahuaca en un transecto NW-SE) y biogeográfica. A ello debemos unir la existencia de abundante información procedente de investigaciones anteriores coordinadas por la Universidad de Leeds<sup>4</sup> y de experiencias centradas en la utilización del SIG en la zonificación agro-ecológica para el caso de Bolivia (ZONISIG, 1997).

En este marco general es posible identificar una amplia variedad de procesos relacionados con la degradación ambiental, tanto físicos (procesos de inundación, coladas de barro, deslizamientos, actividad sísmica) como de origen antrópico (cambios en el uso del suelo, deforestación, sobrepastoreo, contaminación minera, etc.). Ello permite, por lo tanto, seleccionar una serie de áreas piloto de reducidas dimensiones, con un interés específico para la realización de estudios ambientales a mayor escala y con la suficiente representatividad como para extrapolar los resultados al contexto regional. Los criterios empleados en la selección de las áreas piloto responden a su interés específico para cada uno de los equipos (suficiente variedad de fenómenos y correlación de factores), la información disponible y su accesibilidad.

## **3.- El papel del SIG. Objetivos.**

En relación con los objetivos globales del proyecto, el papel del SIG se centra en subrayar la dimensión espacial y temporal de los procesos de degradación medioambiental más significativos. Desde el punto de vista espacial el SIG facilita la integración de factores que se producen a distintas escalas, desde la parcela o microcuenca (deslizamientos, coladas, acarcavamiento, etc.) hasta la región fisiográfica (clima). Por otra

<sup>4</sup> Documentos de trabajo dentro del proyecto Estrategias de agricultores y sistemas de producción agropecuaria en ambientes frágiles en áreas montañosas de América Latina. Proyecto de la Comisión de las Comunidades Europeas, 1992-1996.

parte, permite definir de modo preciso cuál es la localización concreta de estos procesos, sus relaciones de causalidad y de qué modo inciden en el conjunto territorial. Desde el punto de vista temporal, gracias a la datación de sedimentos y especies forestales podemos elaborar una reconstrucción cronológica de los procesos más dinámicos con especial atención al momento histórico en que se aparecen y sus ritmos. La combinación de estos dos tipos de lecturas posibilita la diferenciación de las causas del cambio (naturales o artificiales).



**Fig. 1** Areas de estudio

Nuestra propuesta de diseño de un SIG multifactorial, multiescalar y multitemporal se traduce en la elaboración para cada una de las áreas de estudio de un doble sistema con distintas escalas y objetivos: (a) un SIG a escala regional (1:100.000), que ofrezca una visión de conjunto, necesariamente descriptiva y estática, de la situación actual del medio, orientado a poner de relieve aquellos factores de mayor incidencia en los procesos de degradación ambiental, y que sirva al mismo tiempo como marco de referencia para el estudio social; (b) un SIG a escala local (1:10.000), útil en el estudio detallado de las áreas piloto seleccionadas, y en el que se incorpore la dimensión temporal. Dos escalas que responden a objetivos concretos y en las que los trasvases de información deben ser cuidadosamente tratados.

Dentro de este marco, el SIG ofrece:

- 1) Un sistema homogéneo que resuelva las tareas de captura, estructuración y almacenamiento de la información. El SIG cumple una primera función en la formación de un banco de datos medioambientales en el que se integren las distintas informaciones sec-

toriales, en forma de mapas y bases de datos. Su alimentación se realiza a partir de la cartografía disponible, la fotointerpretación, el trabajo de campo y la recogida de los datos estadísticos<sup>5</sup>.

2) Un soporte para el análisis sectorial especializado y un sistema de representación cartográfica. Los mapas y datos almacenados en el SIG constituyen un valioso soporte para los trabajos de cada uno de los equipos involucrados en el proyecto, tanto en la elaboración de cartografía de análisis o sectorial como de síntesis. Desde esta perspectiva, la capacidad del SIG en la creación de nueva información numérica y cartográfica mediante el empleo de las herramientas analíticas del sistema es un aspecto crítico.

3) Un sistema de ayuda en la toma de decisiones territoriales. Las capacidades de análisis multifactorial y multivariante abren un amplio abanico de posibilidades en la evaluación de las propuestas de uso sostenible e identificación de las alternativas con un mayor grado de éxito.

#### 4.- Esquema metodológico.

Desde el punto de vista metodológico, el principal reto del SIG reside no tanto en sus capacidades de almacenamiento y representación de la información, sino en sus posibilidades para conducir un tipo de estudio multidisciplinar. En este sentido, resulta imprescindible diseñar un esquema metodológico que compagine las funciones analíticas del sistema con los objetivos generales y específicos del trabajo. Se trata, por lo tanto, de definir el modo por el cual se han de integrar cada uno de los trabajos sectoriales en sucesivas etapas con un mayor grado de síntesis, lo que por otra parte constituye una de las principales demandas por parte de los equipos menos involucrados en este tipo de herramientas.

El esquema que se propone intenta resolver las cuestiones de la integración, el cambio de escala y el análisis temporal señaladas anteriormente y se compone de las siguientes fases:

##### 1. Creación del SIG a escala regional.

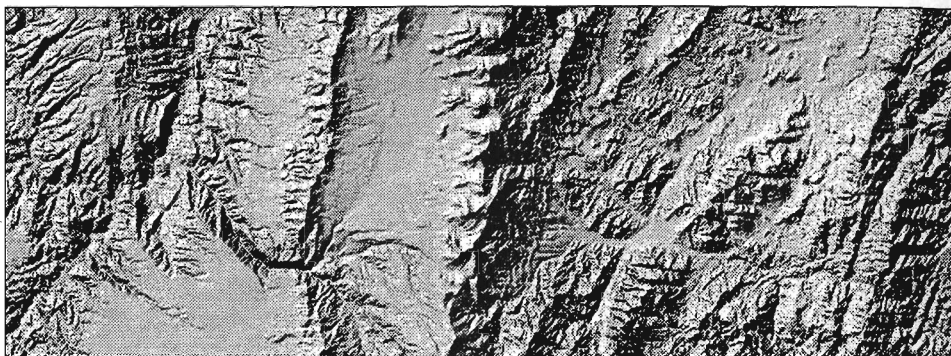
La alimentación del SIG a escala regional para cada área se realiza a partir de la digitalización de la cartografía existente a escala 1:50.000 (topografía, red hidrográfica, límites administrativos, asentamientos, red de comunicaciones, toponimia), cartografía temática elaborada por fotointerpretación (geomorfología y vegetación) y datos estadísticos (clima, socioeconomía).

Además de la necesaria puesta a punto instrumental y metodológica orientada a homogeneizar los métodos de captura, codificación y estructuración de los datos mediante el

---

<sup>5</sup> El trabajo simultáneo de distintos equipos requiere atender a cuestiones previas como la definición de los métodos de captura de la información, la homogeneidad de escalas y leyendas o la elección del software SIG a emplear. En este sentido, la elección del sistema SIG IDRISI responde tanto a razones funcionales (estructura de datos sencilla, amplio rango de operadores analíticos, combinación de datos raster y vectoriales, conexión con bases de datos, etc.) como operativas (facilidad de manejo, conocimiento previo y experiencia de los miembros del proyecto).

SIG<sup>6</sup>, esta fase exige un tratamiento específico para adecuar los datos de relieve y clima a los requisitos del sistema. En el primer caso, mediante la formación de los Modelos Digitales del Terreno (con resolución de 25 m) por interpolación de curvas de nivel y puntos acotados<sup>7</sup>, de los que se obtienen los mapas derivados: pisos altitudinales, pendientes, orientaciones, cuencas de drenaje, etc. En el caso del clima, es necesario ajustar previamente las series climáticas de las estaciones termopluviométricas almacenados en la base de datos del SIG por métodos estadísticos y, mediante análisis de regresión en combinación con el MDT y álgebra de mapas, elaborar la cartografía de temperaturas y precipitaciones.



**Fig. 2 Modelo Digital del Terreno (Valles centrales de Tarija, Bolivia).  
104 x 38 Km**

## 2. Integración de niveles y búsqueda de modelos globales.

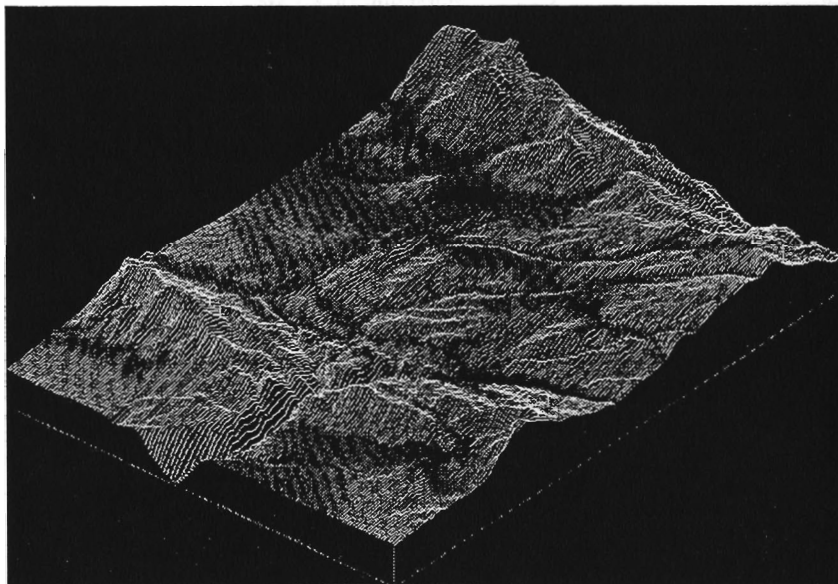
Primera fase de análisis geográfico, en sentido estricto, asistido por el SIG que persigue destacar los componentes físicos y sociales relacionados con el medioambiente más representativos en cada área, así como identificar los patrones estructurales y de comportamiento más generales mediante su combinación a pequeña escala. Esta fase exige un análisis integrado de los datos espaciales y temáticos a partir de los mapas elaborados previamente y con la ayuda del SIG en aspectos concretos.

- Análisis morfométrico del relieve (MDT) e identificación de los principales elementos fisiográficos que caracterizan los diferentes ámbitos geoecológicos: fondos de valle, laderas, planicies, crestas, cumbres, etc. (GARDNER, T.W., CONNERS SASOWSKI, K. Y DAY, R.L., 1990; WOOD, 1996)

<sup>6</sup> La entrada de la información en el SIG se resuelve mediante la combinación de la digitalización manual por tablero y la vectorización semiautomática de imágenes escaneadas. Se considera imprescindible que todos los niveles queden almacenados tanto en formato vectorial como en formato raster con el fin de ampliar las capacidades de análisis posteriores.

<sup>7</sup> En la interpolación de los MDT se ha empleado el método de kriging y una función lineal, con un radio de búsqueda de puntos de 5 km. Los resultados obtenidos presentan algunos problemas en las zonas de altiplano, en donde la disponibilidad de datos es menor, que puede ser solucionado parcialmente mediante la captura de coordenadas por GPS en campo.

- Caracterización espacial y topoclimática de las grandes unidades geomorfológicas y de vegetación, mediante las funciones del SIG de medida (centroide, superficie, perímetro, medida de forma), distancia (proximidad a la red hidrográfica, distancia a núcleos de población o red viaria, etc.) y superposición de mapas (altitud media, máxima y mínima, pendiente media y orientación media, precipitación y temperaturas medias, etc.)
- Identificación de las pautas de comportamiento de la vegetación, en relación con las condiciones topoclimáticas (pisos altitudinales, pendiente, orientación, régimen de temperaturas y precipitaciones, insolación, naturaleza del sustrato, procesos geomorfológicos) y las condiciones humanas (sistemas de aprovechamiento asociados, políticas agroforestales).
- Búsqueda de relaciones de reciprocidad entre unidades topográficas, geomorfológicas y de vegetación mediante funciones de superposición de mapas, tabulación cruzada, análisis de regresión y multivariante (GONZÁLEZ. C. *et al.*, 1995; PERLES ROSELLÓ, 1996).
- Determinación de áreas de accesibilidad en términos de superficies de fricción y coste de desplazamiento por combinación del MDT (pendiente), poblamiento, red de comunicaciones, hidrografía y vegetación. Comparación de las áreas resultantes con las unidades administrativas.



**Fig. 3** Areas de accesibilidad al medio (Pulario, Bolivia)

- Elaboración de cartografía socioeconómica a escala de municipios, a partir de los datos estadísticos censales: demografía, equipamientos, infraestructuras, niveles de producción, disponibilidad de servicios de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales. Operadores de medida: distancias entre núcleos de población, manantiales, equipamiento educativo, etc.), longitudes y sinuosidad de elementos lineales (red hidrográfica, comunicaciones).

### 3. Estudios ambientales de detalle en áreas de interés específico.

Partiendo de las unidades a pequeña escala recogidas en el SIG, la selección de áreas piloto de tamaño reducido permite abordar el estudio de fenómenos de tipo ambiental concretos. Mediante trabajos de campo de carácter sectorial se propone llevar a cabo una caracterización del territorio más detallada desde una perspectiva temporal.

Los datos recogidos en esta fase se centran en la delimitación precisa de las unidades geomorfológicas y de vegetación obtenidas por fotointerpretación, el cartografiado de nuevos elementos (unidades menores no apreciables en la foto aérea), la elaboración de fichas de inventario para cada unidad (geomorfología, suelos, vegetación y metales pesados) y la datación de sedimentos ( $C^{14}$  y luminiscencia) y especies arbóreas (dendrocronología).

Un nuevo SIG a escala 1:10.000 para cada área piloto en el que se incorporen los resultados en forma de mapas y bases de datos y que asista al análisis de los siguientes aspectos:

- Determinación y cuantificación espacio-temporal de los principales procesos de riesgo y alteración del medio físico: cálculo de la superficie de cada cuenca afectada por procesos de deterioro y riesgo ambiental (acarcavamiento, deslizamientos, coladas de lava, etc.) y su variación en el tiempo (VAN WESTEN, 1994).
- Cambios en el trazado de los cursos fluviales, de los conos y abanicos aluviales de los afluentes, velocidad de erosión de los lechos y sedimentación. Respuesta del sistema fluvial a los cambios ambientales. Periodicidad de las avenidas y relación de las anomalías más significativas con el fenómeno de "El Niño" (ENSO).
- Determinación y cuantificación de las propiedades físico - químicas del suelo a partir de la cartografía edáfica, señalando mediante superposición cartográfica su incidencia en los procesos geomorfológicos activos (aparición de *bad-lands* en sustratos blandos, por ej.) y en el desarrollo de otras actividades (cultivos, vegetación).
- Análisis de la dinámica de la vegetación en parcelas seleccionadas: caracterización y cartografía fitosociológica (tipo de formación, especies dominantes, altura, estado, composición por estratos, cubierta, sociabilidad, etc.). Cálculo de las condiciones topográficas de cada parcela por combinación con el MDT (altitud, pendiente, orientación) y edáficas (tipo de sustrato geológico y porcentaje de roca/piedra). Identificación de las formas de erosión asociadas (arroyada, eólica, soliflucción, etc.). Análisis de distancias a puntos habitados y presencia de agua en superficie. Prácticas de uso y frecuentación en cada parcela. Extrapolación de muestreos dendrocronológicos.
- Interpolación de datos muestrales y cartografía de áreas afectadas por contaminación de metales pesados, relacionados con la actividad minera.

- Análisis socioeconómico a escala de comunidades y hogares (entrevistas): ingresos de los hogares, ambiente, seguridad, sostenibilidad y percepción. Estrategias de uso y aprovechamiento de los recursos y su relación con la conservación del medio.
4. Definición de los principales problemas medioambientales, síntesis territorial y temática.

Fase final de carácter sintético con el objetivo de identificar y valorar aquellos factores de inestabilidad ambiental, determinar su origen (físico o antrópico), amplitud temporal y ritmo y repercusiones en el desarrollo de las actividades humanas. Permite definir el marco de actuación y las políticas medioambientales.

El uso integrado de los datos almacenados en el SIG ofrece la posibilidad de generar los siguientes productos cartográficos de carácter sintético que constituyen un valioso instrumento, en combinación con los resultados sectoriales, para alcanzar algunos de los objetivos del proyecto:

- Elaboración de una cartografía ambiental de corte geocientífico: mapas de capacidades de uso del suelo, mapas de erosión actual y potencial y mapas de recomendación de usos (CARTOGRAFÍA DEL POTENCIAL DEL MEDIO NATURAL DE GRAN CANARIA, 1995).
- Identificación de las áreas con mayores índices de deterioro ambiental y su relación actual e histórica con factores físicos (lavado de suelos, actividad sísmica, deslizamientos) y/o humanos (sistemas de producción, estructuras sociales).
- Mapas dinámicos que expresen los principales cambios en los usos del suelo y de la cubierta vegetal en situaciones geocológicas homogéneas y su relación con la actividad geomorfológica y las estrategias de las comunidades (OZENDA, 1986; STEINBERG y HUSSER, 1988).
- Cartografía de los índices de calidad de vida e identificación de áreas menos favorecidas. Relación con las políticas sectoriales existentes de los gobiernos nacionales y regionales.
- Aplicación del SIG como herramienta de ayuda a la decisión multiobjetivo y multicriterio con el fin de evaluar e identificar a escala local nuevas prácticas agrícolas que aseguren una producción y aprovechamiento sostenible de los recursos.

#### 5.- Conclusiones.

El esquema de trabajo propuesto trata de subrayar la potencialidad de los Sistemas de Información Geográfica en un estudio ambiental de carácter multidisciplinar. Al abordar el trabajo desde una perspectiva geográfica reconocemos la importancia de alcanzar una visión sintética del problema, labor en la que el SIG puede desempeñar una inestimable función por sus capacidades analíticas y de representación. Somos conscientes de las dificultades que plantea la integración de algunas variables relacionadas con el hombre, no siempre posibles de cuantificar. Por esta razón, creemos que el SIG debe entenderse,



y así se ha hecho en nuestro caso, como una herramienta llena de posibilidades y limitaciones al mismo tiempo, que en ningún caso permite definir un esquema metodológico global sino complementario.

## BIBLIOGRAFIA

CARTOGRAFÍA DEL POTENCIAL DEL MEDIO NATURAL DE GRAN CANARIA (1995): *Memoria*. Cabildo Insular de Gran Canaria, Universitat de València y Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 165 pp.

GARDNER, T.W., CONNERS SASOWSKI, K. Y DAY, R.L. (1990): "Automatic extraction of geomorphometric properties from digital elevation data". *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Supplement, 60, pp. 57-68.

GONZÁLEZ, C., ORTIGOSA, L., MARTÍ, C. y GARCÍA-RUIZ, J.M. (1995): "The Study of spatial organization of geomorphic processes in mountain areas using GIS". *Mountain Research and Development*, vol, 12, 3, pp. 241-249.

HEYWOOD, D.I., PRICE, M.F. y PETCH, J.M. (1994): "Mountain regions and geographic information systems: an overview". En PRICE, Martin F. y HEYWOOD, D. Ian [Eds.]: *Mountain environments & Geographic Information Systems*. London, Taylor & Francis, pp. 1-23.

OZENDA, P. (1986): *La cartographie écologique et ses applications*. Paris, Masson, 160 pp.

PERLES ROSELLÓ, M.J. (1996): "Limitaciones, dificultades y soluciones en estrategias de trabajo que conecten el análisis espacial con estadísticos complejos. Aplicación al estudio del riesgo de erosión". *Modelos y Sistemas de Información en Geografía*, VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, pp. 309-317.

STEINBERG, J. y HUSSER, J. (1988): *Cartographie dynamique applicable a l'aménagement*. Paris, Sedes, 132 pp.

VAN WESTEN, C.J. (1994): "GIS in landslide hazard zonation: a review. With examples from the Andes of Colombia". En PRICE, Martin F. y HEYWOOD, D. Ian [Eds.]: *Mountain environments & Geographic Information Systems*. London, Taylor & Francis, pp. 135-165.

ZONISIG (1997): *SIBD. Sistema Integral de Bases de Datos*. Proyecto Zonificación Agro – ecológica y Establecimiento de una Base de Datos y Red de Sistemas de Información Geográfica en Bolivia. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, La Paz.

WOOD, J.D. (1996): *The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models*. Tesis doctoral, Universidad de Leicester.