

# Estimación de la Humedad de Diferentes Especies Vegetales Mediterráneas mediante Distintos Sensores de Teledetección

David Cocero, David Riaño, Emilio Chuvieco

Departamento de Geografía

Universidad de Alcalá

C/ Colegios, 2. 28801, Alcalá de Henares.

Tlfno: 91 885 44 29. Fax: 91 885 44 39

david.cocero@uah.es david.riano@univ.alcala.es emilio.chuvieco@uah.es

## 1. Introducción

Esta comunicación continúa el trabajo que venimos desarrollando en los últimos años para estimar el estado hídrico de la vegetación mediante imágenes de satélite de cara a la prevención de incendios. Un germen de este trabajo se presentó en el último coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (Cocero *et al.*, 1998).

La estimación del peligro de incendio forestal en los ecosistemas mediterráneos debe tener en cuenta los elementos que determinan el inicio y la propagación del fuego. El presente trabajo muestra la utilización de diferentes sensores espaciales de cara a estimar las condiciones de riesgo previas al inicio de este suceso.

Las imágenes de satélite pueden ser utilizadas para la prevención de incendios (estimación del peligro a corto plazo), basándose en relacionar la información espectral y el estado hídrico de la vegetación. La teledetección complementaría entonces a los datos obtenidos de estaciones meteorológicas (índices meteorológicos de peligro), proporcionando conjuntamente una visión más adecuada del peligro de incendio. Como es sabido, los índices de peligro de incendio basados en datos meteorológicos tales como la temperatura, la humedad del aire y la velocidad del viento (Camia *et al.*, 1999; Van Wagner, 1987) presentan dos problemas. En primer lugar, no están calibrados para estimar la humedad de la vegetación viva, y en segundo, no son fáciles de extrapolar espacialmente debido a la frecuente dispersión geográfica de las estaciones meteorológicas.

Además, la estimación directa del estado hídrico de la vegetación a partir de medidas de campo presenta una notable dificultad operativa, ya que requiere un costoso muestreo espacial y resulta difícil generalizar las medidas a territorios amplios. En este contexto, las imágenes de satélite pueden ser de gran utilidad para efectuar un seguimiento del contenido de humedad de la vegetación. El principal interés de estos datos es proporcionar, con una buena frecuencia temporal y sobre grandes áreas, una exhaustiva información bien distribuida espacialmente del estado del combustible; siendo, en estos momentos, el principal reto de los investigadores demostrar que la información que proporcionan está relacionada con la humedad de la vegetación.

Muchos autores han intentado demostrar esta potencialidad, pero debido a que algunos posibles factores de ruido son difíciles de controlar se han realizado un amplio rango de medidas espectrales de laboratorio. Estos estudios han mostrado que el contenido hídrico de la vegetación está más claramente relacionado con la reflectividad en el infrarrojo medio, que se encuentra entre 1,4 y 2,0  $\mu\text{m}$  (Bowman, 1989; Cohen, 1991; Hunt *et al.*, 1987; Jackson y Ezra, 1985; Ripple, 1986; Thomas *et al.*, 1971; Tucker, 1980). Es bien conocido que estas longitudes de onda presentan picos de alta absorción de agua y por consiguiente la reflectividad en el infrarrojo medio está negativamente relacionada con el contenido hídrico de las plantas.

Con respecto a la reflectividad del infrarrojo cercano (0,8-1,1  $\mu\text{m}$ ), las conclusiones recogidas por diferentes estudios no están de acuerdo entre sí, puesto que se miden aumentos o disminuciones en la reflectividad de la vegetación dependiendo de si la medición se realiza sobre una sola hoja o sobre todo el dosel vegetal. Para hojas individuales, la mayoría de los autores encuentran un aumento en la reflectividad del infrarrojo cercano cuando la hoja se seca (Bowman, 1989; Hunt y Rock, 1989; Hunt *et al.*, 1987; Thomas *et al.*, 1971), lo que puede deberse al incremento en el índice refractivo de la capa del mesófilo cuando el agua es reemplazada por aire. Sin embargo, otros autores miden una disminución en la reflectividad (Peñuelas *et al.*, 1993; Riaño *et al.*, 1999; Westman y Price, 1988), que puede estar causada por los efectos indirectos de la sequía en la hoja, como la disminución del índice de área foliar o las sombras debidas al rizado de la hoja (Jackson y Ezra, 1985; Westman y Price, 1988). Finalmente, un tercer grupo de autores no encuentra un cambio significativo en la reflectividad del infrarrojo medio cuando la hoja se seca (Carter, 1991; Pierce *et al.*, 1990).

Por último, el espectro visible ha demostrado no ser muy sensible al contenido hídrico de la vegetación, al menos en términos absolutos. Por un lado, la reducción de la clorofila después de que se seque la hoja aumenta la reflectividad, mientras que por otro, cuando disminuye el agua se reduce la reflectividad. Así, algunos autores encontraron que la banda roja del espectro era sensible al contenido hídrico de las plantas (Jackson y Ezra, 1985; Ripple, 1986), mientras que otros no observaron cambios significativos (Bowman, 1989; Thomas *et al.*, 1971).

## 2. Objetivos

---

Nuestra hipótesis de partida es que el contenido de humedad de algunas especies vegetales puede ser estimado a partir de los datos espectrales captados por los satélites de teledetección, hecho que permitiría refinar los sistemas actuales de prevención del peligro, al proporcionarnos un muestreo exhaustivo del territorio, más intensivo que el facilitado por los índices meteorológicos, tradicionalmente utilizados en la prevención del peligro. De acuerdo con ello, la información espectral medida por teledetección podría presentar correlaciones intensas con el estado hídrico de algunas especies vegetales, siempre que presentaran doseles simples, ya que serían las más sensibles a los cambios meteorológicos del verano. De esta forma, los datos procedentes de teledetección completarían los obtenidos de estaciones meteorológicas, proporcionando ambos una visión más completa del peligro de incendio.

Como objetivos específicos, este trabajo presenta los primeros resultados de una estimación del contenido de humedad de la vegetación a partir de la información captada por los sensores AVHRR y Vegetation a bordo de los satélites NOAA y SPOT, respectivamente. La comparación se realiza con la serie de imágenes del año 1999, en donde teníamos información común a ambos sensores, si bien contamos con un archivo más amplio para las imágenes NOAA-AVHRR (desde 1996). El interés de trabajar con ambos sensores es su alta resolución temporal (imágenes diarias), y similar resolución espacial, que resulta de gran importancia de cara a una prevención operativa del riesgo de incendio.

## 3. Metodología

---

El área elegida para abordar este estudio es el Parque Nacional de Cabañeros, localizado entre el cuadrante noroccidental de la provincia de Ciudad Real y el suroccidental de la de Toledo, con una superficie de 41.804 hectáreas. El período de trabajo abarca desde abril a septiembre del año 1999, con objeto de considerar la variación existente en las condiciones de humedad de la vegetación desde la primavera, momento en que las cubiertas vegetales presentan su máximo vigor, hasta el verano, cuando alcanzan su mínimo debido a la fuerte sequía estival.

### 3.1. Medidas de la humedad del combustible

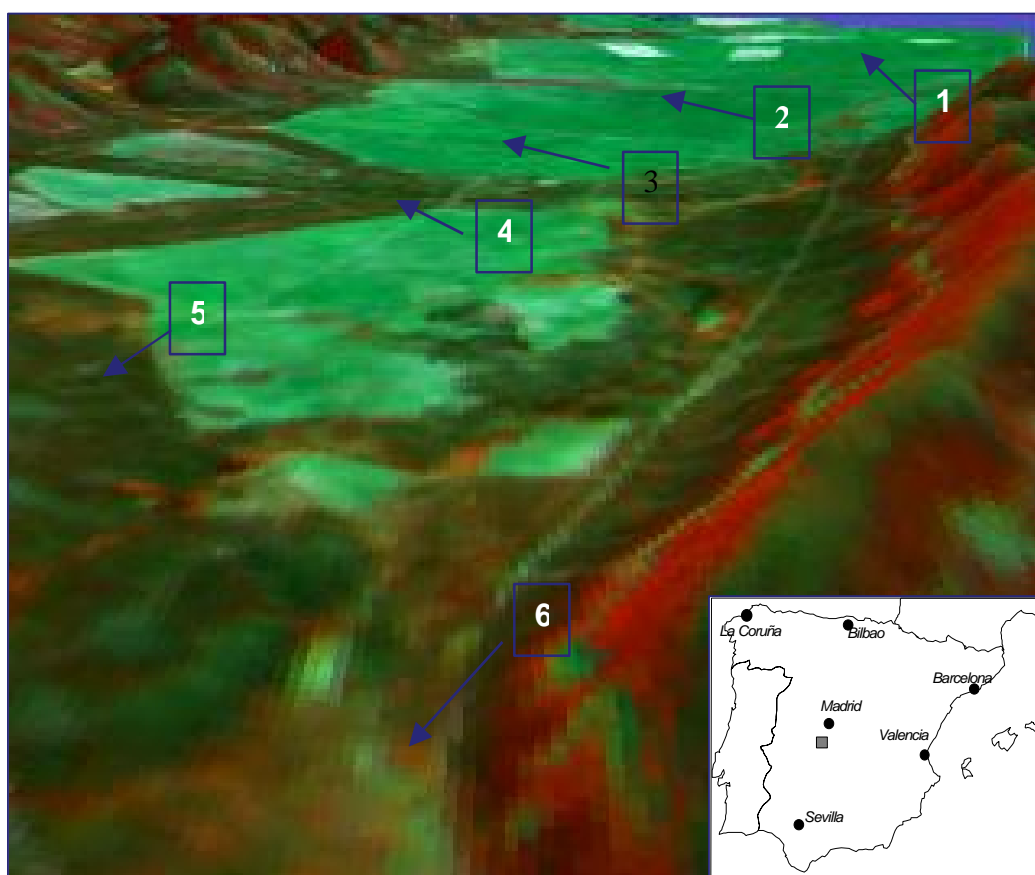
Para el presente proyecto se consideraron como tipos de combustible forestal de interés el pasto, el matorral y el arbolado. Planteamos como hipótesis que el primero determina la probabilidad de ignición de una masa forestal, mientras los dos segundos la mayor o menor facilidad de propagación ante el fuego.

Previa a la planificación del trabajo de campo, se revisó la bibliografía referente al diseño del muestreo, la localización de las parcelas, la toma de muestras y el trabajo de laboratorio (Brown *et al.*, 1989; Desbois *et al.*, 1997; Trowbridge y Feller, 1988; Viegas *et al.*, 1990).

Se eligieron un total de seis parcelas de muestra (figura 1), con los siguientes tipos de combustible: pasto, jara (*Cistus ladanifer*), brezo (*Erica australis*), romero (*Rosmarinus officinalis*), labiérnago (*Phyllirea angustifolia*) y quejigo (*Quercus faginea*). La recogida de muestras de vegetación en cada una de las parcelas seleccionadas se llevó a cabo de una forma sistemática, una vez cada ocho días, y a la misma hora aproximadamente (entre las 12:00 y las 16:00 h).

Según las distintas especies recogidas, la selección del material para el cálculo de la humedad de la vegetación fue diferente:

- ✓ El pasto fue arrancado y desprovisto posteriormente de la tierra que quedaba adherida a las raíces.
- ✓ En los matorrales las muestras recogidas fueron los extremos de las ramillas laterales y terminales, cortadas en tramos de unos 5-10 cm.
- ✓ En el caso de la vegetación arbórea, se recogieron hojas en diferentes partes del mismo individuo.



**Figura 1: Imagen Landsat-TM en 3D del Parque Nacional de Cabañeros con la localización de las parcelas de muestreo**

Todas las muestras recogidas tenían un peso entre 100 y 200 gramos, y eran pesadas en el momento de su recogida en una balanza (con una pesada máxima de 250 gramos y un error de 0,1 gramos). Posteriormente se trasladaban al laboratorio, donde se secaban en una estufa durante cuarenta y ocho horas a una temperatura de 60°C. Tras esta operación, las muestras fueron pesadas de

nuevo con la misma balanza. Con esta información se calculó la humedad del combustible (que aquí denominamos FMC, *Fuel Moisture Content*), definido como el peso del agua en función del peso seco:

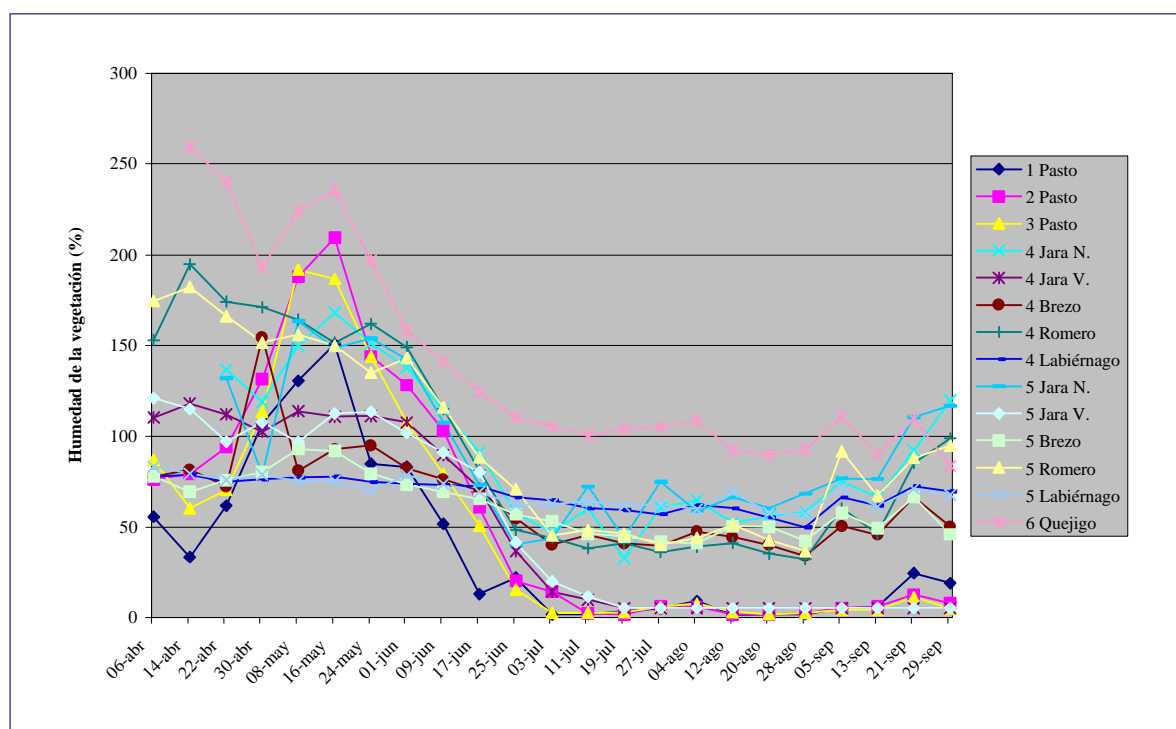
$$FMC = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

donde  $P_h$  es el peso en gramos de las hojas verdes, y  $P_s$  el peso en seco. El resultado se expresa en porcentaje.

La utilización del FMC en nuestro estudio se basa en que ha sido recomendado en el ámbito de la prevención de incendios forestales por un buen número de investigadores (Blackmarr y Flanner, 1968; Olson, 1980; Pook y Gill, 1993; Rice y Martin, 1985; Simard, 1968; Van Wagner, 1967; Viegas *et al.*, 1992; Viney, 1991) y es fácil de calcular, aunque es muy sensible a las variaciones del peso fresco a la hora de la recogida de la muestra.

Una primera observación de la evolución temporal de la humedad del combustible durante el año 1999 (figura 2) indica que ésta varía no tanto por las condiciones medioambientales del entorno como por el tipo de especie, ya que se observan comportamientos dispares en especies distintas recogidas en la misma parcela y comportamientos similares en la misma especie recogida en distintas parcelas. Este hecho es lógico si tenemos en cuenta que la influencia de los parámetros meteorológicos es diversa en cada especie, en función de su propia adaptación al estrés hídrico estival.

**Figura 2: Humedad de la vegetación en el año 1999**



En cuanto a las especies muestreadas, el pasto presenta los contenidos de humedad más altos (en primavera), si exceptuamos las hojas de quejigo, y más bajos (en el verano) de todas las especies analizadas presentando una clara evolución estacional en su contenido de humedad. Destaca el hecho de que debido a la escasez de lluvias durante el final del invierno se inicia el periodo de estudio con unos valores de humedad muy bajos, recuperándose claramente estos valores después de un periodo de intensas lluvias que tiene lugar durante el mes de mayo.

Entre las diferentes especies de matorral, podemos hablar de dos grupos diferenciados según su contenido de humedad durante la primavera. El primero lo formarían la jara y el romero, con una humedad más alta durante la primavera que la del brezo y el labiérnago, que formarían el segundo grupo y que presenta un contenido de humedad bajo al inicio del periodo de estudio. Sin embargo, las cuatro especies presentan un comportamiento similar durante el verano, con una evolución temporal que no presenta grandes oscilaciones, alcanzando sus mínimos a finales de agosto, para continuar posteriormente con un leve y continuo ascenso durante el mes de septiembre. Destaca la clara evolución estacional del romero, con los valores más altos en primavera y más bajos en verano de todas las especies de matorral analizadas.

El quejigo, por su parte, también presenta una evolución temporal muy clara, con su máximo durante la primavera, para luego producirse un descenso progresivo y continuado hasta finales de septiembre.

### 3.2. Análisis de las imágenes NOAA-AVHRR

El sensor NOAA-AVHRR proporciona una imagen cada 12 horas, siendo su resolución espacial de 1,1 x 1,1 km. Para este trabajo empleamos los dos primeros canales del satélite: rojo (R), entre 0,58 y 0,68  $\mu\text{m}$ , e infrarrojo cercano (IRC), 0,72 a 1,10  $\mu\text{m}$ , que permiten el cálculo de índices de vegetación, relacionados con la actividad fotosintética (Tucker y Sellers, 1986) y el contenido de humedad (Paltridge y Barber, 1988), y los dos canales en el infrarrojo térmico (IRT) (banda 4, de 10,3 a 11,3  $\mu\text{m}$ , y banda 5, 11,5 a 12,5  $\mu\text{m}$ ), que hacen posible el cálculo de la temperatura de superficie (Kerr *et al.*, 1992; Vidal, 1991).

Las imágenes NOAA-AVHRR adquiridas para este proyecto fueron recogidas por la estación receptora del Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá (figura 3). Todas ellas corresponden a la pasada diurna del satélite NOAA-14, adquirida aproximadamente a las 14,30 h. A pesar de que se pretendían procesar las imágenes diarias de estos períodos, debido a algunos problemas de recepción o al elevado porcentaje de nubes, algunas debieron descartarse.

**Figura 3: Antena de la estación receptora de imágenes NOAA-AVHRR**



Las variables derivadas de las imágenes del satélite NOAA-AVHRR que se utilizaron en este proyecto fueron las siguientes:

- ✓ Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{r_{IRC} - r_R}{r_{IRC} + r_R}$$

donde  $r_{IRC}$  y  $r_R$  indican la reflectividad en el canal del infrarrojo cercano y en el rojo, respectivamente. Varios estudios teóricos han señalado una fuerte relación entre este índice de vegetación y algunos parámetros vitales de la planta, como el contenido de clorofila y la radiación fotosintéticamente activa interceptada o absorbida por la planta (Sellers, 1987) y la evapotranspiración (Deblonde y Cihlar, 1993; Kerr *et al.*, 1989). Asimismo, el empleo de compuestos de varias imágenes de índices diarios, de las que se obtenga su valor máximo (*Maximum Value Composite*, MVC: Holben, 1986), permite restringir los problemas causados por el efecto atmosférico y los ángulos de observación, que complican el uso de imágenes diarias.

Por otro lado, el uso de estas imágenes en la determinación del estrés hídrico de la vegetación y, en consecuencia, en la previsión del peligro de incendio, se ha demostrado de gran utilidad. Algunos estudios han aplicado este índice para estimar el estrés hídrico de las hojas de algunos cultivos (Ajai *et al.*, 1983; Tucker, 1980), el contenido de humedad del combustible en zonas de pradera suficientemente uniformes (Chladil y Nunez, 1995; Paltridge y Barber, 1988) y el contenido de humedad de la vegetación (Cibula *et al.*, 1992; Deshayes *et al.*, 1998; Westman y Price, 1988).

- ✓ Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) (Huete, 1988)

$$SAVI = \frac{(r_{IRC} - r_R)}{(r_{IRC} + r_R + l)}(1 + l)$$

Donde  $l$  es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación y que está relacionado con la reflectividad del suelo. Para densidades intermedias, como en el caso de las imágenes de satélite, se toma  $l = 0.5$ . Este índice se utiliza con el fin de conseguir corregir algunos efectos externos al valor del NDVI en lugares donde la aportación de la reflectividad del suelo es elevada (Huete, 1988).

- ✓ Índice de vegetación global (GEMI) (Pinty y Verstraete, 1992), diseñado específicamente para reducir el efecto de las perturbaciones atmosféricas:

$$GEMI = eta \times (1 - 0.25 \times eta) - \frac{r_{IRC} - 0.125}{1 - r_R}$$

donde

$$eta = \frac{2 \times (r_{IRC}^2 - r_R^2) + 1.5 r_{IRC} + 0.5 r_R}{r_{IRC} + r_R + 0.5}$$

y donde  $r_{NIR}$  y  $r_R$  son, respectivamente, la reflectividad en el infrarrojo cercano y en el rojo.

- ✓ Humedad en un píxel concreto, denominado *Site Moisture* (SM) (Eidenshink *et al.*, 1990), y que se obtendría a partir de:

$$SM = 250 (VER_{rel} + VER_{abs}) / 2$$

donde  $VER_{rel}$  es el verdor relativo, definido como:

$$VER_{rel} = 100 (ND_0 - ND_{min}) / (ND_{max} - ND_{min})$$

siendo  $ND_0$  el NDVI observado para un píxel en una fecha concreta, y  $ND_{max}$  y  $ND_{min}$  el máximo y el mínimo, respectivamente, de NDVI para ese píxel durante todo el período de estudio. El verdor absoluto ( $VER_{abs}$ ) se define como:

$$VER_{abs} = 100 (ND_0 - NR_{min}) / NR_{max}$$

donde  $VER_{abs}$  es el porcentaje absoluto de verdor,  $NR_{max}$  es el valor máximo observado de NDVI en una serie histórica de imágenes (0,66) y  $NR_{min}$  es el valor mínimo observado de NDVI sobre la hierba seca (0,05).

Burgan y Hartford (1993) han usado en Estados Unidos un índice de estas características, que ellos denominan RGI (*Relative Greenness Index*), para hacer un seguimiento del estado de la vegetación y su predisposición al fuego. Los mapas de verdor elaborados a partir de este índice han planteado resultados razonables y parecen ofrecer buenas posibilidades para hacer una valoración de las condiciones de cara al inicio del fuego en grandes áreas (Burgan, 1995).

- ✓ Temperatura de superficie (TS), variable utilizada en estudios de evapotranspiración y que está relacionada con el calentamiento global de las especies vegetales (Seguin *et al.*, 1991; Delegido *et al.*, 1991; Caselles *et al.*, 1993; Delegido y Caselles, 1993; Sandholt y Andersen, 1993).
- ✓ Diferencia entre la Temperatura de Superficie y la Temperatura del Aire (TS-TA). La temperatura del aire se obtuvo a partir de los datos proporcionados por una estación meteorológica automática situada en el Parque Nacional de Cabañeros. Seguin *et al.*, (1991) han establecido que las diferencias acumuladas entre las temperaturas superficiales obtenidas a partir de la información proporcionada por el satélite en las primeras horas de la tarde y del aire en el momento de máxima temperatura medida en la estación meteorológica constituyen un buen descriptor del estado hídrico o estrés de los cultivos (Sánchez, 1998).
- ✓ Cociente entre el NDVI y la TS (NDVI/TS).
  - ✓ La relación entre el NDVI y la TS ha sido utilizada como un indicador de estrés hídrico y riesgo de incendio, al indicar el contraste entre la actividad fotosintética y la temperatura que afectan a la vegetación. Illera *et al.* (1996) emplean la pendiente de la recta de regresión para determinar condiciones de peligro, mientras que Alonso *et al.* (1996) y Chuvieco *et al.* (1999) relacionan con éxito el cociente entre el NDVI y la TS y el FMC para diversas especies mediterráneas.



### 3.3. Análisis de la imágenes Vegetation

El sensor Vegetation, a bordo del satélite SPOT-4, presenta una resolución espacial media similar a la del NOAA-AVHRR (1 km<sup>2</sup>). Cuenta con 4 bandas: azul (0,43-0,47 μm), rojo (0,61-0,68 μm), infrarrojo cercano (0,78-0,89 μm) e infrarrojo medio (1,58-1,75 μm). Para este estudio utilizamos los canales rojo e infrarrojo cercano que, como señalamos anteriormente, permiten el cálculo de índices de vegetación; y la banda del infrarrojo medio, más directamente relacionada con el contenido de humedad que la banda 3 del NOAA-AVHRR (3,55-3,93 μm); ya que esta banda, situada entre 1,55 y 1,75 μm se enmarca en las longitudes de onda más sensibles al contenido de agua, pues son las bandas de mayor absorción hídrica (Knipling, 1970).

Para este proyecto se dispuso de catorce imágenes Vegetation del área de estudio, abarcando desde abril a septiembre del año 1999. Se calcularon los mismos índices de vegetación que para las imágenes NOAA-AVHRR (NDVI, SAVI, GEMI y SM). Además, se calculó el NDII (*Normalized Difference Infrared Index*), que algunos autores han correlacionado satisfactoriamente con el contenido de agua de la vegetación (Hunt y Rock, 1989):

$$NDII_i = \frac{\mathbf{r}_{i,IRC} - \mathbf{r}_{i,iRM}}{\mathbf{r}_{i,IRC} + \mathbf{r}_{i,iRM}}$$

donde  $\rho_{IRC}$  y  $\rho_{IRM}$  son las reflectividades del infrarrojo cercano y medio respectivamente.



## 4. Resultados

### 4.1. Relación entre FMC e imágenes de satélite

#### 4.1.1. Relación entre FMC e imágenes NOAA-AVHRR

Con las salvedades que una serie tan corta (una sola campaña, primavera-verano) puede presentar, comentaremos a continuación los resultados obtenidos del análisis temporal entre las imágenes de satélite y las mediciones del FMC en terreno. La tabla 1 muestra las correlaciones de Pearson entre el FMC y las distintas variables generadas a partir de las imágenes NOAA-AVHRR. Se observan las siguientes tendencias:

- ✓ En el caso del pasto las correlaciones son significativas en todos los casos. Son especialmente altas en el caso del SAVI y del GEMI, con valores superiores a 0,8 en todos los casos.

	TS	NDVI	TS-TA	SAVI	GEMI	SM	NDVI/TS
Pasto (1)	-0,65	0,76	-0,56	0,83	0,81	0,76	0,74
Pasto (2)	-0,70	0,78	-0,59	0,89	0,89	0,82	0,78
Pasto (3)	-0,67	0,78	-0,55	0,82	0,83	0,82	0,78
Pasto (promedio)	-0,66	0,75	-0,55	0,82	0,81	0,77	0,75
Brezo (4)	-0,77	0,50	-0,59	0,74	0,72	0,56	0,69
Jara N. (4)	-0,87	0,55	-0,82	0,72	0,71	0,70	0,85
Jara V. (4)	-0,81	0,80	-0,70	0,84	0,79	0,89	0,93
Romero (4)	-0,93	0,66	-0,79	0,74	0,70	0,78	0,93
Labiérnago (4)	-0,85	0,50	-0,71	0,60	0,57	0,71	0,82
Brezo (5)	-0,85	0,69	-0,73	0,69	0,59	0,77	0,83
Jara N. (5)	-0,78	0,53	-0,70	0,52	0,44	0,64	0,77
Jara V. (5)	-0,75	0,28	-0,71	0,43	0,31	0,79	0,75
Romero (5)	-0,93	0,62	-0,77	0,55	0,46	0,71	0,92
Labiérnago (5)	-0,86	0,46	-0,71	0,51	0,43	0,60	0,80
Matorral (promedio)	-0,88	0,66	-0,76	0,71	0,65	0,77	0,88
Quejigo (6)	-0,84	0,69	-0,63	0,50	0,37	0,65	0,88

**Tabla 1: Correlación de Pearson entre el FMC y los derivados de las imágenes del satélite NOAA-AVHRR\* (los número entre paréntesis indican el número de la parcela donde se tomó la muestra)  
\*las correlaciones significativas al nivel 0,01 aparecen en negrilla.**

- ✓ De todos los índices de vegetación, el SAVI y el GEMI presentan mejores correlaciones que el NDVI para la mayoría de las especies, pero las diferencias entre ellos son, generalmente, pequeñas.
- ✓ La TS presenta correlaciones negativas y significativas con todas las especies, obteniéndose las correlaciones más altas en el caso de los matorrales. Este hecho es lógico si tenemos en cuenta que cuanto más alta sea la temperatura mayor será la evapotranspiración y menor el contenido de agua de las plantas.

- ✓ Tendencias similares hemos encontrado con la variable TS-TA, que está correlacionada significativamente con todas las especies, excepto una parcela de jara y una de quejigo, aunque con valores algo más bajos que en el caso de la TS.
- ✓ El cociente NDVI/TS presenta mejores correlaciones para el pasto que en los casos anteriores, siendo similares los valores en el caso de los matorrales. Estas correlaciones son significativas en todos los casos.

#### 4.1.2. Relación entre FMC e imágenes Vegetation

Las tendencias (tabla 2) que hemos encontrado son similares a las que presentan las imágenes NOAA-AVHRR, aunque con la peculiaridad de que el índice de vegetación calculado a partir de los valores del IRM (el NDII) mejora las correlaciones con el FMC. Para este índice las correlaciones son significativas en todos los casos, excepto para una parcela de brezo.

	<b>NDVI</b>	<b>SAVI</b>	<b>NDII</b>	<b>GEMI</b>	<b>SM</b>
Pasto (1)	<b>0,70</b>	<b>0,74</b>	<b>0,69</b>	<b>0,78</b>	<b>0,70</b>
Pasto (2)	<b>0,70</b>	<b>0,70</b>	<b>0,70</b>	<b>0,68</b>	<b>0,70</b>
Pasto (3)	0,63	<b>0,70</b>	<b>0,81</b>	<b>0,70</b>	0,63
Pasto (promedio)	<b>0,63</b>	<b>0,65</b>	<b>0,68</b>	<b>0,65</b>	<b>0,62</b>
Jara N. (4)	<b>0,79</b>	<b>0,73</b>	<b>0,85</b>	0,59	<b>0,79</b>
Jara V. (4)	<b>0,69</b>	<b>0,79</b>	<b>0,82</b>	<b>0,75</b>	<b>0,69</b>
Brezo (4)	0,49	0,61	0,52	0,63	0,49
Romero (4)	<b>0,74</b>	<b>0,83</b>	<b>0,79</b>	<b>0,77</b>	<b>0,74</b>
Labiérnago (4)	<b>0,67</b>	<b>0,78</b>	<b>0,76</b>	<b>0,75</b>	<b>0,67</b>
Jara N. (5)	0,39	0,48	<b>0,81</b>	0,42	0,39
Jara V. (5)	0,67	0,58	<b>0,89</b>	0,39	0,67
Brezo (5)	0,55	0,60	<b>0,90</b>	0,49	0,55
Romero (5)	0,58	0,48	<b>0,84</b>	0,30	0,58
Labiérnago (5)	0,49	0,44	<b>0,76</b>	0,31	0,49
Matorral (promedio)	<b>0,52</b>	<b>0,59</b>	<b>0,71</b>	<b>0,55</b>	<b>0,53</b>
Quejigo (6)	<b>0,78</b>	0,57	<b>0,84</b>	0,30	<b>0,78</b>

Tabla 2: Correlación de Pearson entre el FMC y los derivados de las imágenes del satélite SPOT-Vegetation\* (los número entre paréntesis indican el número de la parcela donde se tomó la muestra)  
\*las correlaciones significativas al nivel 0,01 aparecen en negrilla.

También parece confirmarse que, teniendo en cuenta los mismos índices de vegetación calculados para los dos sensores, el SAVI y el GEMI presentan mejores correlaciones que el NDVI para la mayoría de las especies, pero las diferencias entre ellos vuelven a ser pequeñas.

## 4.2. Regresiones múltiples

Una vez que hemos encontrado correlaciones significativas entre el contenido de humedad de la vegetación y las variables derivadas de las imágenes de satélite pasamos a una segunda fase, en la que intentamos derivar el FMC a partir de las variables de satélite. Para ellos llevamos a cabo un análisis de regresión lineal múltiple, usando el método “exclusión iterativa”, con unos umbrales de 0,08 para aceptar y de 0,1 para rechazar la variable (SPSS, 1999). Llevamos a cabo tres análisis para cada sensor: pasto, matorral y una combinación de los dos.

### ✓ Sensor NOAA- AVHRR

1. Para el pasto, las variables seleccionadas fueron la TS y el SAVI, con un ajuste final  $r^2 = 0,69$ . El segundo proporciona la explicación más alta ( $r^2 = 0,68$ ) y la primera un pequeño incremento del valor definitivo ( $r^2 = 0,698$ ). La ecuación final es:

$$\text{FMC}_p = -15,645 - 1,071 \text{ TS} + 619,940 \text{ SAVI}$$

2. Para el matorral, las variables seleccionadas fueron las mismas que en el caso anterior más el SM, con un ajuste  $r^2 = 0,91$ . La ecuación final es:

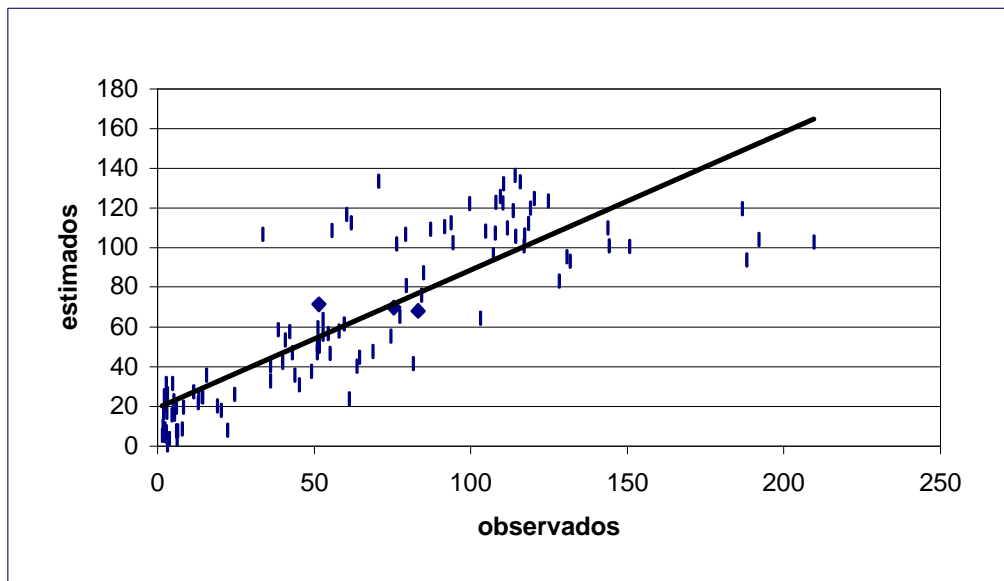
$$\text{FMC}_m = 117,754 - 2,395 \text{ TS} + 132,862 \text{ SAVI} + 1,737\text{E-}03 \text{ SM}$$

Aquí, la TS ofrece la explicación más alta ( $r^2 = 0,79$ ), mientras que los coeficientes de ajuste  $r^2$  son del 0,902 y del 0,914 una vez incluidos el SAVI y el SM, respectivamente.

3. Para una combinación del pasto y el matorral, las variables seleccionadas fueron las mismas que en el caso del matorral, con un ajuste  $r^2 = 0,72$ . En esta ocasión, es el SAVI el que proporciona la explicación más alta ( $r^2 = 0,637$ ), mientras que los coeficientes de ajuste  $r^2$  son del 0,709 y del 0,720 una vez incluidos la TS y el SM, respectivamente. La ecuación final es:

$$\text{FMC} = 37,481 - 1,583 \text{ TS} + 313,021 \text{ SAVI} + 2,705\text{E-}03 \text{ SM}$$

El gráfico con los valores observados y estimados en este último caso muestra una sólida tendencia en todo el rango de los valores de FMC (figura 4), si bien se estimaron valores negativos en cinco casos que no se muestran en el gráfico. El error máximo se produce en una parcela de pasto el 16 de mayo, en la que la estimación del FMC fue del 102% frente al 209% real; mientras que el error mínimo se encontró en otra parcela de pasto el 19 de julio, en el que la estimación fue del 3,80% frente al 3,62% real.



**Figura 4: Valores observados y estimados del FMC para el sensor NOAA-AVHRR**

✓ Sensor SPOT-Vegetation

1. Para el pasto, la variable seleccionada fue el NDII, con un ajuste  $r^2 = 0,46$ . La ecuación final es:

$$\text{FMCp} = 118,742 + 360,181 \text{ NDII}$$

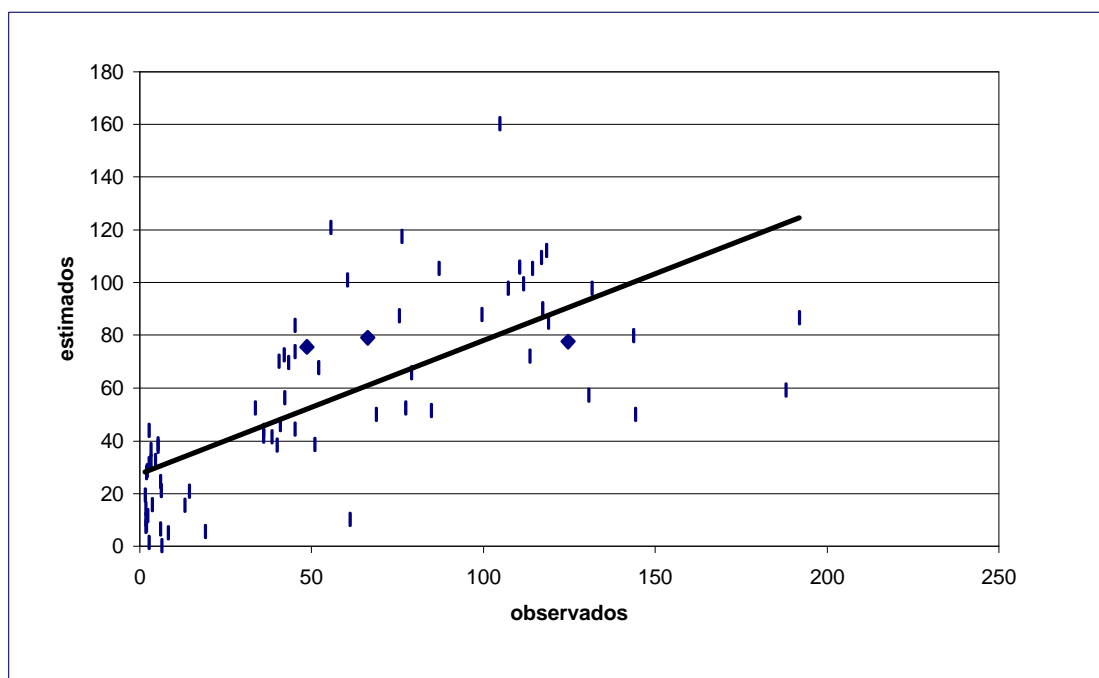
2. Para el matorral, la variable seleccionada fue de nuevo el NDII, con un ajuste  $r^2 = 0,50$ . La ecuación final es:

$$\text{FMCm} = 96,405 + 263,752 \text{ NDII}$$

3. Para una combinación de pasto y matorral, nuevamente la variable seleccionada fue el NDII, con un ajuste  $r^2 = 0,49$ . La ecuación final es:

$$\text{FMC} = 105,406 + 310,383 \text{ NDII}$$

El gráfico con los valores observados y estimados de FMC para la combinación de pasto y matorral se muestra en la figura 5, dándose el caso de que no se estiman valores negativos como ocurría con el NOAA-AVHRR. El error máximo se vuelve a producir en una parcela de pasto el 8 de mayo, en la que la estimación del FMC fue del 59% frente al 187% real. El error mínimo se encontró en otra parcela de pasto el 13 de septiembre, en el que la estimación fue del 6,62% frente al 6,00% real.

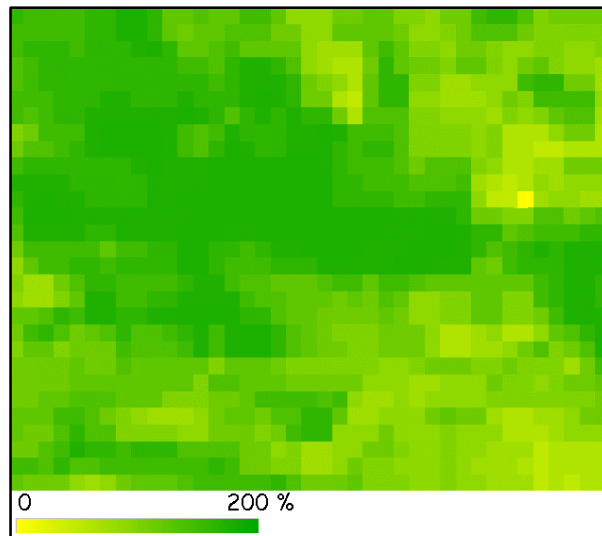


**Figura 5: Valores observados y estimados del FMC para el sensor SPOT-Vegetation**

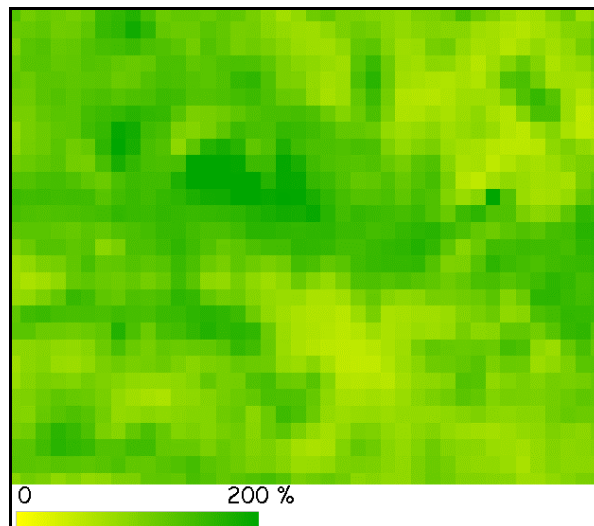
### 4.3. Cartografía del estado hídrico de la vegetación

A partir de las ecuaciones empíricas previamente generadas se obtuvieron cuatro imágenes sintéticas, una de primavera y otra de verano, para ambos sensores, de la variación espacial del estado hídrico de la vegetación (figuras 6, 7, 8 y 9). En nuestro caso, hemos utilizado las ecuaciones obtenidas para la combinación de pasto y matorral, aunque, evidentemente, para poder utilizar todas las ecuaciones de modo operacional deberían utilizarse fuentes auxiliares (mapas de cobertura del suelo o de vegetación) para distinguir entre vegetación herbácea y arbustiva. También podrían emplearse clasificaciones previas de las imágenes utilizadas o, incluso, un simple umbral relacionado con la variabilidad multitemporal de los índices de vegetación.

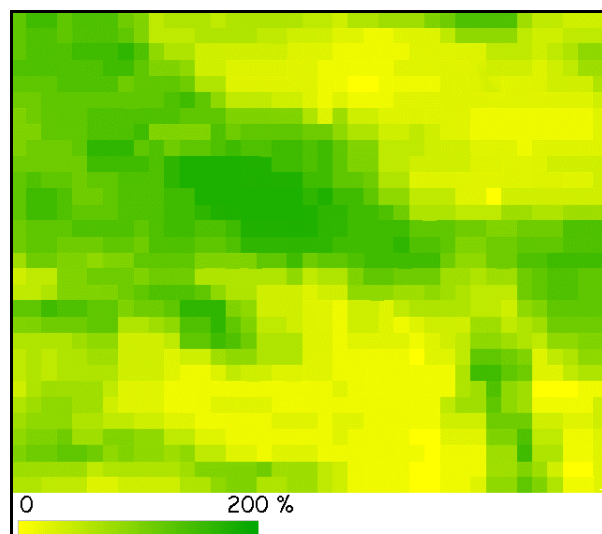
En las cuatro imágenes obtenidas podemos observar que los valores más bajos de FMC los encontramos en todos los casos en el valle central del área de estudio, dominado por pasto, mientras que las especies de matorral, que predominan en todo el área montañosa del Parque Nacional de Cabañeros, muestran valores más altos de FMC.



**Figura 6: Valores estimados del FMC (24 de abril) para el sensor NOAA-AVHRR**



**Figura 7: Valores estimados del FMC (24 de abril) para el sensor SPOT-Vegetation**



**Figura 8: Valores estimados del FMC (3 de julio) para el sensor NOAA-AVHRR**

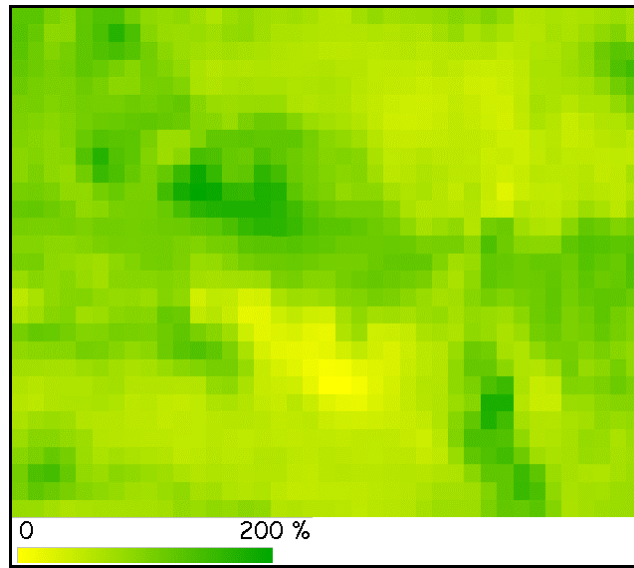


Figura 9: Valores estimados del FMC (3 de julio) para el sensor SPOT-Vegetation



## 5. Conclusiones

---

Como hemos visto a lo largo de los epígrafes previos resulta complicado establecer tendencias consistentes para estimar la humedad de la vegetación. No obstante, podemos apuntar algunas ideas que sirvan para plantear hipótesis que continúen esta línea de trabajo.

En el trabajo mostramos relaciones empíricas entre el FMC y variables derivadas de los sensores AVHRR y Vegetation para varios tipos de vegetación mediterránea. Estas relaciones nos muestran la importancia de incluir bandas localizadas en el IRM para mejorar la estimación del FMC proporcionada por las bandas situadas en el visible y el IRC. Por tanto, estos resultados enfatizan la necesidad de incluir bandas en el IRM en sensores con una buena resolución temporal, adecuados para este tipo de estudios, como el NOAA-AVHRR y el Vegetation.

Otro hecho a destacar es que las tendencias esperadas entre el FMC y las imágenes de satélite se confirman en todos los casos, siendo positivas con los índices de vegetación y negativas para los casos de la temperatura de superficie y la diferencia entre la temperatura de superficie y la del aire.

Respecto a los índices derivados de las imágenes de satélite que estimarían mejor la humedad de la vegetación, éstos serían el NDII, el SAVI y el GEMI, seguidos por el cociente entre el NDVI y la TS.

En cuanto a las diferentes especies analizadas, parece claro que la evolución multitemporal de la humedad del pasto puede ser correctamente estimada con los datos de satélite. Varias razones pueden explicar esta tendencia. En primer lugar, el pasto es la única cobertura anual de las analizadas, por lo que es la más afectada por los cambios estacionales. En segundo lugar, el pasto presenta el más alto porcentaje de materia verde y, por último, el pasto presenta la cobertura más homogénea de todas las analizadas.

Por último, destacar que las mejores correlaciones para el FMC del pasto se producen con los índices que tienen en cuenta el contraste espectral entre las regiones del IRC y el rojo (como el SAVI, el GEMI o el NDVI) y entre las regiones espectrales del IRC y el IRM (el NDII). Sin embargo, las relaciones no deben interpretarse de la misma manera para estos dominios espectrales. Mientras que las buenas correlaciones entre el FMC y el IRM pueden estar basadas en la presencia de picos de alta absorción en esta región espectral, la relación entre FMC, SAVI, GEMI o NDVI debe relacionarse con los cambios en el contenido de clorofila y en la estructura de la hoja que acompañan a las plantas herbáceas cuando se van secando. En otras palabras, la alta significación obtenida del contraste entre el IRC y el rojo a la hora de estimar el FMC de las plantas herbáceas debe relacionarse con los cambios fisiológicos que se producen en el pasto cuando varía su contenido hídrico, en lugar de su contenido de agua per se.

Puesto que la reducción del FMC en los matorrales mediterráneos no implica un deterioro serio de la estructura de la hoja, la reflectividad del IRC aumenta con el FMC en la mayoría de las especies, como resultado de una baja absorción de agua. Los efectos indirectos de la reducción del agua en la fisiología de las especies apenas se aprecia en los matorrales, no como en el caso del pasto. Además, en el caso de especies que reducen su índice de área foliar como resultado de la sequía (la jara, por ejemplo), también puede relacionarse el aumento de la reflectividad del IRC con influencias del suelo.

Finalmente, señalar que en el caso de la banda del IRM, el pasto y los matorrales están influenciados claramente por la absorción de agua, lo que explica la consistencia de las relaciones encontradas en todas las especies.

## **6. Agradecimientos**

---

Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos europeos Control-Fire-Sat (ENV4-CT97-0479) e Inflame (ENV4-CT98-0700), financiados por el programa de Medioambiente y Clima de la Comisión Europea (DG-XII). También se ha obtenido financiamiento parcial de la CICYT (AGF96-2094-CE). Deseamos también expresar nuestro agradecimiento a las autoridades del Parque Nacional de Cabañeros por las facilidades otorgadas en la realización de nuestros ensayos de campo, así como a todas las personas que han contribuido a la campaña de mediciones en terreno.

## 7. Bibliografía

---

- Ajai, D., S. Kamat, G. S. Chaturvedi, A. K. Singh y S. K. Sinha (1983). Spectral assessment of leaf area index, chlorophyll content, and biomass of chickpea. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **49**: 1727-1727.
- Alonso, M., A. Camarasa, E. Chuvieco, D. Cocero, I. Kyun, M. P. Martín y F. J. Salas (1996). Estimating temporal dynamics of fuel moisture content of Mediterranean species from NOAA-AVHRR data. *EARSEL Advances in Remote Sensing* **4**: 9-24.
- Blackmarr, W. H. y W. B. Flanner (1968). *Seasonal and diurnal variation in moisture content of six species of Pocosin shrubs*. Asheville, Southeastern Forest Experiment Station, U.S. Forest Service.
- Bowman, W. D. (1989). The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. *Remote Sensing of Environment* **30**: 249-255.
- Brown, J. K., G. D. Booth y D. G. Simmerman (1989). Seasonal Change in Live Fuel Moisture of Understory Plants in Western U.S. Aspen. *10th Conference on Fire and Forest Meteorology*. Ottawa, Canada: 406-412.
- Burgan, R. E. (1995). Use of remotely sensed data for fire danger estimation. *Int. Workshop on Remote Sensing and GIS applications to forest fire management*. (E. Chuvieco, Ed.) Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá: 87-97.
- Burgan, R. E. y R. A. Hartford (1993). *Monitoring Vegetation Greenness with Satellite Data*. Ogden, Utah, USDA Forest Service.
- Camia, A., G. Bovio, I. Aguado y N. Stach (1999). Meteorological fire danger indices and remote sensing. *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. (E. Chuvieco, Ed.) Berlin, Springer-Verlag: 39-59.
- Carter, G. A. (1991). Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. *American Journal of Botany* **78**: 916-924.
- Caselles, V., J. Delegido y E. Hurtado (1993). Teledetección: Aplicación en la determinación de la evapotranspiración. *Agronomía del Riego*. (F. J. Martín de Santa Olalla y J. A. De Juan, Eds.). Madrid, Universidad de Castilla-La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa.
- Chladil, M. A. y M. Nunez (1995). Assessing grassland moisture and biomass in Tasmania. The application of remote sensing and empirical models for a cloudy environment. *International Journal of Wildland Fire* **5**: 165-171.
- Chuvieco, E., M. Deshayes, N. Stach, D. Cocero y D. Riaño (1999). Short-term fire risk: foliage moisture content estimation from satellite data. *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. (E. Chuvieco, Ed.) Berlin, Springer-Verlag: 17-38.
- Cibula, W. G., E. F. Zetka y D.L. Rickman (1992). Response of Thematic Mapper bands to plant water stress. *International Journal Remote Sensing* **13**: 1869-80.
- Cocero, D., I. Aguado, A. Camarasa, D. Riaño, P. Vaughan, E. Chuvieco, M. Gómez, M.P. Martín y F. J. Salas (1998). Estimación de la humedad de la vegetación usando imágenes de satélite e índices meteorológicos del peligro de incendios. *Tecnología Geográfica para el Siglo XXI*. Barcelona, A.G.E. y Universidad Autónoma de Barcelona: 351-360.
- Cohen, W. B. (1991). Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *International Journal of Remote Sensing* **12**: 1865-1876.

- Deblonde, G. y J. Cihlar (1993). A multilayer analysis of the relationship between surface environmental variables and NDVI over the Canadian landmass. *Remote Sensing Reviews* **7**: 151-177.
- Delegido, J. y V. Caselles (1993). Evapotranspiración. *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Climatología y Desertificación*. (S. Gandía y J. Meliá, Eds.). Valencia, Universidad Politécnica: 205-213.
- Delegido, J., V. Caselles y E. Hurtado (1991). Determinación a escala regional de la evapotranspiración. *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: Agricultura*. (S. Gandía y J. Meliá, Eds.). Valencia, Universidad Politécnica: 345-370.
- Desbois, N., M. Deshayes y A. Beudoin (1997). Protocol for fuel moisture content measurements. *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires*. (E. Chuvieco, Ed.) Alcalá de Henares, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá: 61-72.
- Deshayes, M., E. Chuvieco, D. Cocero, M. Karteris, N. Koutsias y N. Stach (1998). Evaluation of different NOAA-AVHRR derived indices for fuel moisture content estimation: interest for short-term fire risk assessment. *III International Conference on Forest Fire Research - 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*. Coimbra, ADAI: 1149-1167.
- Eidenshink, J. C., R. E. Burgan y R. H. Haas (1990). Monitoring fire fuels condition by using time series composites of Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data. (P. Resource, Ed.) Washington DC: 68-82.
- Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* **7**: 1417-1434.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* **25**: 295-309.
- Hunt, E. R. y B. N. Rock (1989). Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment* **30**: 43-54.
- Hunt, E. R., B. N. Rock y P. S. Nobel (1987). Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment* **22**: 429-435.
- Illera, P., A. Fernández y J. A. Delgado (1996). Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest fire danger. *International Journal of Remote Sensing* **17**: 1093-1105.
- Jackson, R. D. y C. E. Ezra (1985). Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *International Journal Remote Sensing* **6**: 177-185.
- Kerr, Y., J. Imbernon, G. De Dieu, O. Hautecoeur, J. P. Lagouarde y B. Seguin (1989). NOAA-AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. *International Journal of Remote Sensing* **10**: 847-854.
- Kerr, Y. H., J. P. Lagouarde y J. Imbernon (1992). Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved Split Window algorithm. *Remote Sensing of Environment* **41**: 197-209.
- Knipling, E. B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* **1**: 155-159.
- Olson, C. M. (1980). An evaluation of the Keetch-Byram drought index as a predictor of foliar moisture content in a chaparral community. *Sixth Conference on Fire and Forest Meteorology*. Seattle: 241-244.
- Paltridge, G. W. y J. Barber (1988). Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment* **25**: 381-394.

- Peñuelas, J., I. Filella, C. Biel, L. Serrano y R. Savé (1993). The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing* **14**: 1887-1905.
- Pierce, L. L., S. W. Running y G. A. Riggs (1990). Remote detection of canopy water stress in coniferous forest using the NSOO1 Thematic Mapper simulator and the thermal infrared multispectral scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **56**: 579-586.
- Pinty, B. y M. M. Verstraete (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio* **101**: 15-20.
- Pook, E. W. y A. M. Gill (1993). Variations of Live and Dead Fine Fuel Moisture in *Pinus radiata* Plantations of the Australian Capital Territory. *International Journal of Wildland Fire* **3**: 155-168.
- Riaño, D., P. Vaughan y E. Chuvieco (1999). Estimación del contenido de humedad en la Jara (*Cistus ladanifer*) a partir de radiometría de laboratorio. *Teledetección. Avances y Aplicaciones*. (S. Castaño y A. Quintanilla, Eds.). Albacete, Asociación Española de Teledetección - Papeles de la Diputación de Albacete: 92-95.
- Rice, C. L. y R. E. Martin (1985). Live fuel moistures of California North coast shrub species. *Eight Conference on Fire and Forest Meteorology*. Detroit, MI: 263-269.
- Ripple, W. J. (1986). Spectral reflectance relationships to leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **52**: 1669-1675.
- Rouse, J. W., R. W. Haas, J. A. Schell, D. H. Deering y J. C. Harlan (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation*. Greenbelt, MD, USA, NASA/GSFCT.
- Sánchez, M. (1998). *Estimación de evapotranspiración máxima a través de datos meteorológicos e imágenes de satélite*. Departamento de Geografía. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá: 206 pp.
- Sandholt, I. y H. S. Andersen (1993). Derivation of actual evapotranspiration in the Senegalese Sahel, using NOAA-AVHRR data during 1987 growing season. *Remote Sensing of Environment* **46**: 164-172.
- Seguin, B. L., J. P. Lagouarde y M. Savane (1991). The assessment of regional water conditions from meteorological satellite thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment* **35**: 141-148.
- Sellers, P. J. (1987). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sensing of Environment* **21**: 143-183.
- Simard, A. J. (1968). *The moisture content of forest fuels - A review of the basic concepts*. Ottawa, Ontario, Forest Fire Research Institute: 47 pp.
- SPSS (1999). *SPSS for Windows*.
- Thomas, J. R., L. N. Namken, G. F. Oerther y R. G. Brown (1971). Estimating leaf water content by reflectance measurements. *Agronomy Journal* **63**: 845-847.
- Trowbridge, R. y M. C. Feller (1988). Relationships between the moisture content of fine woody fuels in lodgepole pine slash and the Fine Fuel Moisture Code of the Canadian Forest Fire Weather Index System. *Canadian Journal of Forest Research* **18**: 128-131.
- Tucker, C. J. (1980). Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment* **10**: 23-32.

- Tucker, C. J. y P. J. Sellers (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* **7**: 1395-1416.
- Van Wagner, C. E. (1967). *Seasonal variation in moisture content of Eastern Canadian tree foliage and the possible effect on crown fires*, Forestry Branch, Canada: 15 pp.
- Van Wagner, C. E. (1987). *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Ottawa, Canadian Forestry Service.
- Vidal, A. (1991). Atmospheric and emissivity correction of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data. *International Journal of Remote Sensing* **12**: 2449-2460.
- Viegas, D. X., T. P. Viegas y A. D. Ferreira (1990). Characteristics of some forest fuels and their relation to the occurrence of fires. *International Conference of Forest Fire Research*. Coimbra: B.03: 1-13.
- Viegas, D. X., T. P. Viegas y A. D. Ferreira (1992). Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in central Portugal. *International Journal of Wildland Fire* **2**: 69-85.
- Viney, N. R. (1991). A Review of Fine Fuel Moisture Modelling. *International Journal of Wildland Fire* **1**: 215-234.
- Westman, W. E. y C. V. Price (1988). Spectral changes in conifers subjected to air pollution and water stress: experimental studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **26**: 11-20.

