

# MEDITERRANEA

## SERIE DE ESTUDIOS BIOLÓGICOS

2000 Época II N° 17



COMITÉ EDITORIAL: Ch. P. BLANC

G.U. CARAVELLO  
S.G. CONARD  
A. FARINA  
A. FERCHICHI  
M. MANSOUR (†)



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Departamento de Ecología. Facultad de Ciencias

COMITÉ CIENTÍFICO:

Ch. P. BLANC. Lab. Zoogéographie. Université Montpellier III. Francia.  
S.G. CONARD. USDA Forest Service. Riverside. U.S.A.  
A. FARINA. Lab. Ecología del Paisaje. Museo Historia Natural. Aulla. Italia.  
A. FERCHICHI. I.R.A. Medenine. Túnez.  
M.MANSOUR. Institute of Ecological Chemistry. GSF-Munich. Alemania (†).  
G.U.CARAVELLO. Istituto di Igiene. Università di Padova. Italia.

COMITÉ EDITORIAL:

V. Peiró, J. Martín, G. López, E. Seva.

DIRECCIÓN:

Eduardo Seva. Dep. Ecología. Fac. de Ciencias. Universidad de Alicante.

SECRETARÍA:

Victoriano Peiró. Dep. Ecología. Universidad de Alicante.

EDITA:

Servicio de Publicaciones. Universidad de Alicante.

CORRESPONDENCIA:

Departamento de Ecología. Fac. de Ciencias. Universidad de Alicante.  
Ap. 99 - 03080 Alicante. España.  
Teléfono de Secretaría: 96/5909520  
Fax: Rev. Mediterránea. Dep. Ecología. 96/5903464

I.S.S.N.: 0210-5004

Depósito Legal: A-1059-1984

Composición e impresión: Gráficas ESTILO, S.C. Alicante

**Estos créditos pertenecen a la edición impresa de la obra**

Edición electrónica:



# **MEDITERRÁNEA**

**Epoca II. N.º 17**  
**SERIE DE ESTUDIOS BIOLÓGICOS**  
**UNIVERSIDAD DE ALICANTE**

**Bases para estimar el contenido de humedad  
en plantas mediterráneas a partir de la  
teledetección**

# Índice

---

## Portada

## Créditos

## Bases para estimar el contenido de humedad en plantas mediterráneas a partir de la

<b>teledetección</b> .....	5
Resumen .....	5
Abstract .....	6
Resumée .....	6
Introducción .....	7
Rangos espectrales asociados con el contenido de agua .....	9
1. Visible (VIS) .....	9
2. Infrarrojo cercano (IRC) .....	11
3. Infrarrojo medio (IRM) .....	13
Objetivos .....	14
Metodología .....	18
Resultados .....	22
Conclusiones .....	29
Agradecimientos .....	30
Referencias .....	31

## **Bases para estimar el contenido de humedad en plantas mediterráneas a partir de la teledetección**

David Riaño \*

Patrick Vaughan \*

Emilio Chuvieco \*

### **RESUMEN**

Se analizan espectros de laboratorio correspondientes a diferentes especies mediterráneas, en el rango de 0,4 a 2,5 mm para distintos contenidos de humedad. Las especies escogidas fueron tres tipos de arbustos: Jara, brezo y romero (*Cistus ladanifer*, *Erica australis* y *Rosmarinus officinalis*), dos de árboles: Quejigo y rebollo (*Quercus faginea* y *Quercus pyrenaica*) y pasto. Al reducirse el contenido de agua de la vegetación, hemos observado, como tendencia general, una escasa sensibilidad en las bandas del visible (VIS), una disminución de la reflectividad en infrarrojo cercano (IRC), nítida en algunas especies y ligera en otras, y un aumento de la reflectividad en el infrarrojo medio (IRM). Parece obvio que los cambios afectan de modo

diverso a las plantas en función del tamaño y morfología de sus hojas, y de la proporción de cubierta verde.

**Palabras-claves:** Humedad, plantas mediterráneas, reflectividad, teledetección.

### **ABSTRACT**

Using an spectro-radiometer, laboratory spectra, ranging from 0,4 to 2,5 mm, were taken from various Mediterranean species at different moisture content levels. Three shrub species were chosen (*Cistus ladanifer*, *Erica australis* and *Rosmarinus officinalis*), two tree types (*Quercus faginea* and *Quercus pyrenaica*), and tallgrass. As plant water content diminishes, the general trends observed varied according to the different band wavelengths. These trends showed a low sensitivity in the visible band (VIS), a decrease of the reflectance in the Near-infrared (NIR), which was sharp in some species, and finally, a reflectance increase in the Mid-infrared (MIR). Obviously, changes in moisture content have different effects on the plants depending on its size, leaf shape, and the proportion of vegetation cover.

**Keywords:** moisture, Mediterranean plants, reflectance, remote sensing.

### **RESUMÉE**

On analyse les spectres de laboratoire correspondants aux diverses espèces méditerranéennes, dans le rang entre 0.4 et 2.5 m, pour différents contenus d'humidité. Les espèces choisies ont été trois types d'arbustes?: ciste, bruyère et romarin (*Cistus ladanifer*, *Erica australis* et *Rosmarinus officinalis*); deux types d'arbres: chêne rouvre

David Riaño, Patrick Vaughan, Emilio Chuvieco  
**Bases para estimar el contenido de humedad en plantas  
mediterráneas a partir de la teledetección**

---

(*Quercus faginea*) et rouvre (*Quercus pyrenaica*) ; et pâturage . Comme conséquence de la réduction de l'humidité dans la végétation on a pu observer une sensibilité très basse dans les bandes du visible (VIS), une diminution de la réflectivité dans l'infrarouge prochain (IRC), très significative pour quelques espèces, et une augmentation de la réflectivité dans l'infrarouge moyenne (IRM). Il paraît évidente que les changes d'humidité affectent de différent manière aux végétales en fonction de leur dimension, la morphologie de leurs feuilles et la proportion de couverture végétale.

**Mots clés:** humidité, plants méditerranées, réflectivité, teledetection.

## INTRODUCCIÓN

**E**l contenido de agua en las plantas es uno de los aspectos críticos de su desarrollo fisiológico y resulta un parámetro clave cuando pretendemos determinar condiciones de estrés. La humedad disponible en la planta influye directamente en el crecimiento celular, la transpiración y la fotosíntesis.

La estimación de esta variable mediante teledetección resulta de gran utilidad para la predicción de rendimientos agrícolas, abordar estimaciones de evapo-transpiración regional y determinar condiciones de riesgo de incendios, entre otros. Para que dicha estimación sea posible, resulta preciso estudiar con detalle los efectos del agua en la reflectividad de la

hoja y de la planta, de cara a aislar las bandas más sensibles a la observación remota y determinar niveles de afectación críticos.

Las variaciones del contenido de humedad de las plantas, y en última instancia del estrés hídrico, provocan cambios fisiológicos y anatómicos de distinta naturaleza según las especies. La carencia de agua lleva consigo una reducción en la transpiración de la planta, lo que implica un aumento de la temperatura de las hojas, pues la evapotranspiración libera calor a la atmósfera. Además, al reducirse el agua disponible, la planta intenta reducir la transpiración cerrando los estomas, lo que causa una menor absorción de  $\text{CO}_2$ , un deterioro de la estructura de los tejidos, una reducción de la fotosíntesis y, en última instancia, una menor productividad (HALE y ORCUTT, 1987).

Algunos de estos cambios son perceptibles mediante sensores remotos, ya que implican una modificación de la radiancia reflejada o emitida por la planta. La falta de agua implica modificaciones en el color de las hojas o en su morfología, como el rizado y enrollado o la caída de las hojas, así como en su temperatura. Todos estos aspectos pueden, al menos teóricamente, detectarse mediante teledetección (JACKSON, 1986). El problema estriba en si esas modificaciones

del comportamiento espectral de la planta son suficientemente nítidas, de tal forma que permitan discriminar el contenido de agua de otros factores, como la contribución del suelo, de la morfología de la planta o de la atmósfera. Sobre este punto ha habido diversas posturas en los últimos años. Algunos autores concluyen que el contenido de agua no supone una modificación sensible de la reflectividad (HUNT y ROCK, 1989; COHEN, 1991b), pero sí de la temperatura de las hojas (JACKSON, 1986; MORAN *et al.*, 1994), mientras otros obtienen buenas correlaciones en estudios empíricos (WESTMAN y PRICE, 1988; CIBULA *et al.*, 1992). Vamos a analizar con mayor detalle los argumentos de unos y de otros, centrándonos en las longitudes de onda ópticas (entre 0,4 y 2,5 micrómetros), para posteriormente analizar algunos espectros tomados, en este rango espectral, para distintas especies mediterráneas.

## **RANGOS ESPECTRALES ASOCIADOS CON EL CONTENIDO DE AGUA**

### **1. Visible (VIS)**

Como es sabido, las hojas absorben la mayor parte de la energía incidente en las bandas visibles (0,4 – 0,7  $\mu\text{m}$ ). La baja reflectividad en el azul y el rojo se atribuye normalmen-

te a la absorción por la clorofila y otros pigmentos accesorios. La clorofila, carotenos y xantofilas absorben radiación a 0,445  $\mu\text{m}$ , pero sólo la clorofila absorbe en el rojo (alrededor de 0,645  $\mu\text{m}$ ) (GATES *et al.*, 1965). El pico del verde se produce por una carencia relativa de absorción por estos pigmentos, lo que proporciona el color verde de las plantas que percibe nuestra vista. Este efecto puede estar enmascarado por el agua (THOMAS *et al.*, 1971), debido a que la reflectividad en el VIS es más alta, entre otras razones por la dispersión Rayleigh (GATES, 1980). Es decir, la pérdida de agua provoca la actuación de dos factores en direcciones contrarias, aumenta la reflectividad, por un lado, por la pérdida de funcionalidad de la clorofila y disminuye, por otro, al disminuir el propio contenido de humedad. Al efecto de la clorofila hay que añadir, en caso de que el experimento no se realice hoja por hoja, la disminución de cobertura que supone la deshidratación, que en este rango del espectro suele suponer un aumento de la reflectividad (EVERITT y NIXON, 1986; RIPPLE, 1986). Según dominen unos u otros factores, por el tipo de estudio y por el tipo de hoja, se produce una tendencia u otra, aunque lo más normal es un ligero aumento (EVERITT y NIXON, 1986; CARTER, 1991) o mantenimiento prácticamente constante (BOWMAN, 1989;

HUNT y ROCK, 1989) de la reflectividad con la pérdida de la humedad.

## **2. Infrarrojo cercano (IRC)**

La alta reflectividad de la vegetación en esta banda del espectro se ha asociado tradicionalmente al estado de vigor de la planta, su porcentaje de cobertura verde y su buen estado foliar. Al modificarse el contenido de agua de la planta se producen dos efectos que, si bien son patentes en las demás bandas del óptico, aquí son especialmente cruciales. Por un lado, las modificaciones en la reflectividad debidos al propio contenido de agua, que son más patentes si consideramos las hojas aisladamente; por otro, las debidas a la pérdida de vigor vegetal que implica el deterioro hídrico de la planta: senescencia, pérdida de área foliar, deterioro de la estructura, que afectan principalmente a la planta en su conjunto. Simplificando las cosas podemos decir que el contenido de agua *per se* implica una ligera reducción de la reflectividad, luego en el IRC la hoja seca tenderá a presentar una mayor reflectividad que la húmeda. Por el contrario, la planta en su conjunto deteriora su actividad fisiológica al llegar a extremos de tensión hídrica, implicando en esos casos una notable reducción de la reflectividad en esa banda. Conviene tener en cuenta que la alta reflectividad de las hojas en el

## Mediterránea

Serie de estudios biológicos (2000)

---

IRC (entre 0,7 y 1,3  $\mu\text{m}$ ) se debe a su estructura celular interna (KNIPLING, 1970). La radiación se difunde y dispersa a través de la cutícula y la epidermis a las células del mesófilo y cavidades de aire del interior de las hojas. La radiación posteriormente es dispersada por reflexiones y refracciones múltiples en la interfase de las paredes de las celdas hidratadas con los espacios de aire intercelulares, debido a las diferencias existentes en el índice de refracción (1,4 para las celdas hidratadas y 1,0 para el aire). Entre el 40 y el 60 % de la radiación incidente en el IRC se dispersa hacia arriba (ésta es la radiación reflejada), mientras que el resto se dirige hacia abajo (radiación transmitida), absorbiéndose muy poca cantidad (KNIPLING, 1970). Al irse perdiendo agua en las hojas, hay más superficies de contacto entre paredes de celdas húmedas y cavidades de aire intercelulares, por lo que tienden a aumentarse las reflexiones y refracciones múltiples (VOGELMANN y BJÖRN, 1984), incrementándose, aunque ligeramente, la reflectividad. Más aún, cuando las hojas se acercan a la pérdida total de humedad la reflectividad es incluso mayor debido a que el índice de refracción de los materiales celulares secos es mayor que el de las células hidratadas (CARTER, 1991). Este efecto se ha comprobado en análisis de laboratorios sobre hojas aisladas de *Agave deserti* (HUNT et al., 1987), *Quercus agrifolia*, *Picea*

*Pungens*, *Liquidambar styraciflu* y *Glycine max* (HUNT y ROCK, 1989). Otros autores no observan cambios significativos en esta banda (Carter, 1991), mientras un tercer grupo detecta una reducción de la reflectividad, comprobada para hojas de pino y secuoya (WESTMAN y PRICE, 1988). Esta disminución parece más claramente debida a los efectos secundarios de la pérdida en el contenido de humedad, como son la reducción de la actividad vegetativa (transpiración, fotosíntesis, productividad) y el deterioro en el área foliar y la estructura de la hoja. Esto ha permitido observar notables decrementos de reflectividad en el conjunto de la planta (JACKSON y EZRA, 1985; WESTMAN y PRICE, 1988).

### **3. Infrarrojo medio (IRM)**

La polémica sobre el efecto del contenido de agua en la reflectividad del IRC se desvanece en la región del medio (entre 1,6 y 2,4  $\mu\text{m}$ ), ya que aquí es unánime la observación de una relación inversa entre contenido de agua y reflectividad. Los efectos se observan tanto para una hoja (RIPPLE, 1986; HUNT y ROCK, 1989; COHEN, 1991b), como para el conjunto de la planta (TUCKER, 1980; JACKSON y EZRA, 1985; WESTMAN y PRICE, 1988).

La respuesta de la vegetación en estas longitudes de onda está dominada por la fuerte absorción del agua, que se produce principalmente en 1,4, 1,9 y 2,4  $\mu\text{m}$  (KNIPLING, 1970). En esta región, los picos de reflectividad de la vegetación se originan aproximadamente a 1,6 y 2,2  $\mu\text{m}$ , justo entre las bandas de absorción del agua, de ahí que al disminuir el contenido de humedad la reflectividad aumente. Esto se debe a que el agua es un buen absorbente del flujo de radiación incidente, por lo que la cantidad de energía solar reflejada en esta región es una función inversa de la cantidad de agua presente en la hoja.

## **OBJETIVOS**

Este proyecto se sitúa en el marco general del empleo de la teledetección para estimar riesgo de incendios forestales. Desde el punto de vista del riesgo físico, cuando se emplea esta técnica para estimar riesgo de incendios se está asumiendo que la teledetección permite determinar las condiciones de estrés hídrico de las cubiertas vegetales, ya que la vegetación sólo arde cuando está suficientemente seca. Además el contenido de agua es una importante variable a tener en cuenta en estudios de inicio y propagación del fuego, ya que afecta tanto a la inflamabilidad de la vegeta-

ción como a la velocidad de propagación del fuego (BURGAN y ROTHERMEL, 1984).

Los métodos para estimar el contenido de humedad del combustible (FMC, *Fuel Moisture Content*) se basan en el muestreo directo en el campo o en índices meteorológicos que se suponen relacionados con las variaciones en el contenido de humedad. Los primeros son muy costosos y presentan problemas de representatividad, ya que no cubren grandes áreas, mientras el empleo de índices meteorológicos implica una estimación indirecta, además de asumir una respuesta uniforme de las distintas especies a la variación de las condiciones atmosféricas. La teledetección permitiría, por un lado, un muestreo exhaustivo del territorio, y por otro, realizar estimaciones directas de las distintas variables.

En la literatura especializada hay abundantes ejemplos de esta aplicación (LÓPEZ *et al.*, 1991; BURGAN y HARTFORD, 1993; VIDAL *et al.*, 1994; PROSPER-LAGET *et al.*, 1995; ILLERA *et al.*, 1996), pero en ningún caso se demuestra que físicamente exista esa relación entre contenido de agua en la planta y radiancia detectada por el sensor. Algunos autores sí han establecido relaciones empíricas entre humedad de la vegetación, medida en terreno, e información de satélite, fundamentalmente para especies herbá-

ceas (PALTRIDGE y BARBER, 1988; CHLADIL y NUNEZ, 1995; ALONSO *et al.*, 1996), si bien no resultan definitivas sus conclusiones, ya que se trata de estudios basados en imágenes AVHRR, con una resolución excesivamente gruesa para evitar ruidos procedentes de factores extraños a la variable que se pretende medir.

Por esta razón, parecía oportuno analizar con más detalle las relaciones entre contenido de humedad y radiancia reflejada o emitida por la vegetación. Nos centramos en este trabajo en el rango óptico del espectro, entre 0,4 y 2,5  $\mu\text{m}$ , ya que ha sido el más empleado hasta el momento en estas aplicaciones, además de por contar con instrumentos de medida adaptados a estas longitudes de onda.

Se han tomado espectros en condiciones controladas de laboratorio, para distintos niveles de contenido de agua. Asimismo, se presentan resultados de mediciones realizadas en el terreno, a lo largo de una temporada de medidas realizada sobre el Parque Nacional de Cabañeros, en primavera y verano de 1997.

Partimos de la experiencia previa de otros autores, ya revisada en la literatura. La mayor parte de los estudios relacionados se han basado en especies herbáceas (JACKSON y EZRA, 1985; CIBULA *et al.*, 1992). Menor experiencia existe

en relación con árboles (WESTMAN y PRICE, 1988) y arbustos (EVERITT y NIXON, 1986; COHEN, 1991a), y apenas existe experiencia con especies mediterráneas que, por estar bien adaptadas a la sequía estival, podrían presentar un comportamiento peculiar frente al reseñado en la literatura.

Hasta el momento, los análisis de reflectividad se han venido realizado de muy diversas maneras. Son más abundantes los análisis en laboratorio para hojas individuales (THOMAS *et al.*, 1971; BOWMAN, 1989; COHEN, 1991b), aunque también existen estudios de laboratorio con grupos de hojas (Ripple, 1986). La radiometría de campo también se ha empleado en varios estudios (EVERITT y NIXON, 1986; CIBULA *et al.*, 1992). Pese a la mayor dificultad de estas mediciones, al ser más difícil de controlar los parámetros de observación, resultan los más adecuados para relacionar con la información detectada por sensores de teledetección, ya que ofrecen condiciones más similares de adquisición (salvando los efectos de la atmósfera). El análisis utilizando bandejas con hojas puede servir de puente de unión para comparar los resultados de la radiometría de campo y del análisis de hojas individuales (RIPPLE, 1986). Además, esta metodología es más cercana a lo que finalmente observa el

satélite, ya que se puede ver el efecto de la cobertura y de los cambios en la geometría.

## **METODOLOGÍA**

Para obtener los espectros de laboratorio de diferentes contenidos de humedad en especies mediterráneas, se realizó un muestreo de terreno en el Parque Nacional de Cabañeros, que estamos utilizando como área de estudio para la calibración de modelos de FMC a partir de imágenes de satélite. Las especies recolectadas fueron tres tipos de arbustos: Jara, brezo y romero (*Cistus ladanifer*, *Erica australis* y *Rosmarinus officinalis*), dos de árboles: Quejigo y rebollo (*Quercus faginea* y *Quercus pyrenaica*) y pasto. Todas ellas son muy comunes en el ámbito mediterráneo.

Las hojas se almacenaron en un hielo hasta su traslado al laboratorio. Allí se colocaron las hojas de cada especie en bandejas negras, apiladas, con el haz mirando al radiómetro y cubriendo completamente el campo de visión de éste. Las mediciones de reflectividad se realizaron verticalmente (ángulo de observación 90°), tomando, antes de cada medida, la reflectividad de un blanco de referencia rigurosamente calibrado (*Spectralon Reflectance Target, Sample I.D.: SRT-99-050*). Después de la primera medición, las bandejas fueron pesadas e introducidas en un horno a 60° C para su

deseccación (temperaturas más elevadas provocan que se evaporen también las esencias). A la media hora, se extrajeron del horno, se pesaron y se midió de nuevo la reflectividad. El proceso se repitió hasta que el peso se mantenía constante, lo que implicaba que las hojas estaban completamente secas. El contenido de humedad de cada muestra analizada se determinó utilizando la siguiente expresión:

$$\text{FMC (\%)} = \left( \frac{P_f - P_s}{P_s} \right) * 100$$

Donde  $P_f$  es el peso fresco de la muestra (el medido en cada adquisición) y  $P_s$  es el peso seco (el obtenido al final del proceso). El resultado se expresa en tanto por ciento de peso seco.

En la mayor parte de los estudios reseñados, el contenido de humedad de la planta no se calcula en función del peso seco, sino del peso para un máximo contenido de humedad. Es el denominado contenido relativo de agua (RWC, Relative Water Content), que se define como:

$$\text{RWC (\%)} = \left( \frac{P_f - P_s}{P_{\text{sat}} - P_s} \right) * 100$$

Donde  $P_f$  es el peso fresco,  $P_s$  es el peso seco y  $P_{sat}$  es el peso saturado (con la máxima humedad posible). Hemos utilizado el FMC, en lugar del RWC, por dos razones. Por un lado, resulta una medida más ajustada a la aplicación última de este trabajo, ya que en la literatura relacionada con incendios se pretende estimar el contenido absoluto de agua, más que la relación con un máximo de acogida teórico (VIEGAS *et al.*, 1990; DESBOIS *et al.*, 1997). Por otro lado, la determinación del FMC es más operativa, ya que calcular el peso saturado implica, o bien sumergir las hojas en agua durante varias horas, escurrirlas y secar la superficie (CARTER, 1991), para evitar incluir el agua exterior, o mantener las hojas cubiertas durante 24 h con papel absorbente humedecido en un frigorífico (HUNT y ROCK, 1989) lo que resulta muy complicado cuando las muestras se toman regularmente y sobre áreas extensas.

Las medidas de reflectividad se realizaron con el espectroradiómetro GER2100, que realiza espectros continuos de 140 bandas en el rango de 0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$  (figura 1). La resolución espectral de este aparato es de 0,01  $\mu\text{m}$  en el VIS e IRC (hasta 1  $\mu\text{m}$ ) y de 0,024  $\mu\text{m}$  en el rango de 1 a 2,5  $\mu\text{m}$ . Si bien el radiómetro resulta bastante preciso, se detectaron ruidos esporádicos en algunas bandas del infrarrojo medio,

David Riaño, Patrick Vaughan, Emilio Chuvieco  
**Bases para estimar el contenido de humedad en plantas  
mediterráneas a partir de la teledetección**

---



Fig. 1. Imagen del espectro-radiómetro utilizado en las mediciones de laboratorio

por lo que, siguiendo una práctica habitual en espectrometría, se aplicaron algunos filtros a las medidas originales: eliminación de valores negativos y superiores a 1, y cálculo de medianas móviles en intervalos de 5 valores.

Las medidas de reflectividad se recogen en ángulos verticales, fijando el espectroradiómetro en un trípode con un preciso sistema de nivelado.

## **RESULTADOS**

Las figuras 2 a 7 muestran las curvas promedio de reflectividad para las especies muestreadas. Todas ellas se han obtenido a partir de tres medidas del radiómetro tras aplicar algunas rutinas para filtrar los valores anómalos y suavizar las curvas, como antes indicamos. Los valores de FMC no son los mismos en todas las especies, ya que la humedad de partida y el ritmo de desecación no es equivalente entre ellas. Como se comentó previamente, las medidas se realizaron en períodos regulares de secado (media hora a 60°), para todas las especies, pero la pérdida de agua es más intensa en unas que en otras. En cualquier caso, nos parece que queda de manifiesto la tendencia espectral de estas plantas al perder contenido de humedad.

David Riaño, Patrick Vaughan, Emilio Chuvieco  
**Bases para estimar el contenido de humedad en plantas mediterráneas a partir de la teledetección**

---

Tal y como concluimos de la revisión bibliográfica previa, la sensibilidad de las bandas visibles al cambio en el FMC es baja para todas las especies, si bien se observa un aumento de la reflectividad con la mayor desecación, especialmente cuando los valores de FMC son muy bajos. Este incremento parece más relacionado con el deterioro foliar producido por valores extremos de FMC con la consiguiente pérdida de los pigmentos fotosintéticos que con el contenido de agua propiamente dicho, pues apenas es perceptible el

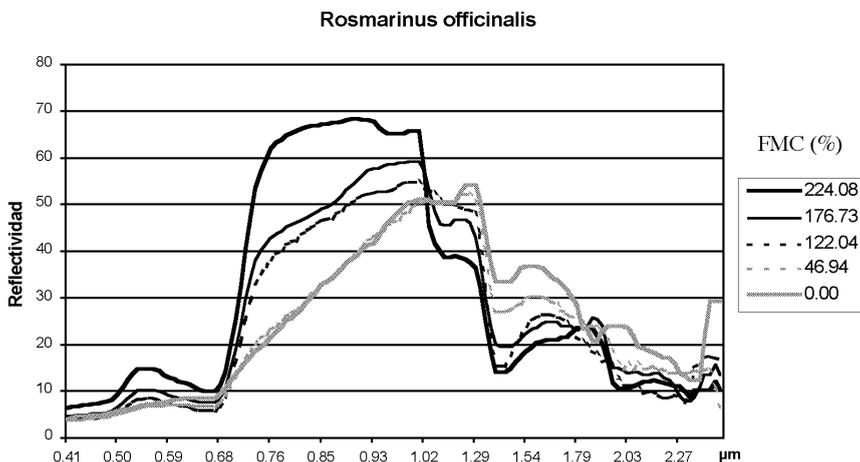


Fig. 2. Curvas de reflectividad a distintos contenidos de humedad para el Romero (*Rosmarinus officinalis*).

## Mediterránea

### Serie de estudios biológicos (2000)

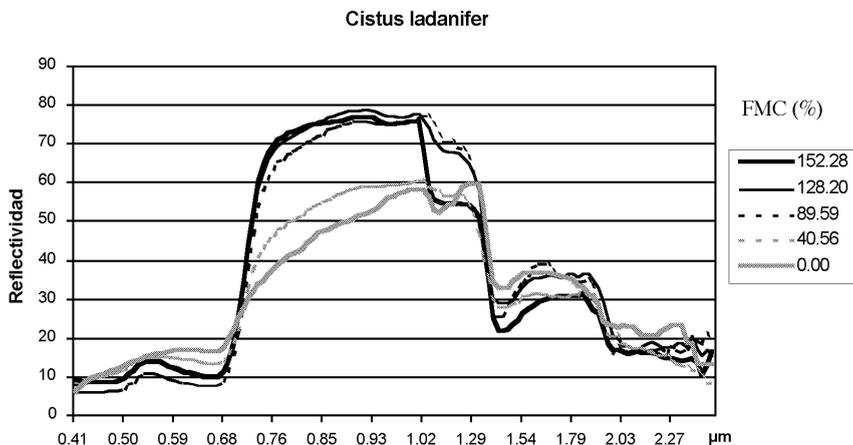


Fig. 3. Curvas de reflectividad a distintos contenidos de humedad para la jara (*Cistus ladanifer*).

cambio de reflectividad a pérdidas inferiores al 50 % de la humedad inicial. Incluso en algunas especies de matorral, como la jara y el romero, la reflectividad inicialmente disminuye, para aumentar a valores más extremos de FMC.

En cuanto al IRC el efecto del cambio en el contenido de humedad es muy diverso entre las especies analizadas. En algunos casos, como la jara, el romero y el brezo (aunque principalmente los dos primeros), la pérdida de reflectividad al disminuir el FMC es bastante notoria, con valores supe-

David Riaño, Patrick Vaughan, Emilio Chuvieco  
**Bases para estimar el contenido de humedad en plantas  
mediterráneas a partir de la teledetección**

---

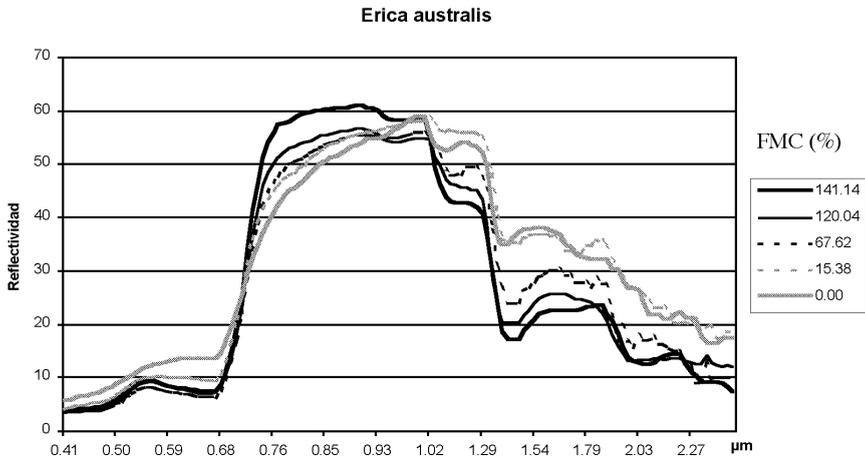


Fig. 4. Curvas de reflectividad a distintos contenidos de humedad para el brezo (*Erica australis*).

riores al 30% en algunas bandas para la jara y de hasta el 40% para el romero. De nuevo podemos apuntar como explicación de este deterioro la pérdida de vigor vegetal y del área foliar como consecuencia de la reducción de la humedad, de ahí que el efecto sea mayor en especies que tienden a curvarse y modificar de modo más drástico el porcentaje de cubierta verde (*R. officinalis* y *C. ladanifer*). El pasto ofrece una tendencia similar, aunque menos nítida, con reducciones del 10 al 15% de reflectividad. Sin embargo, cuando

## Mediterránea

### Serie de estudios biológicos (2000)

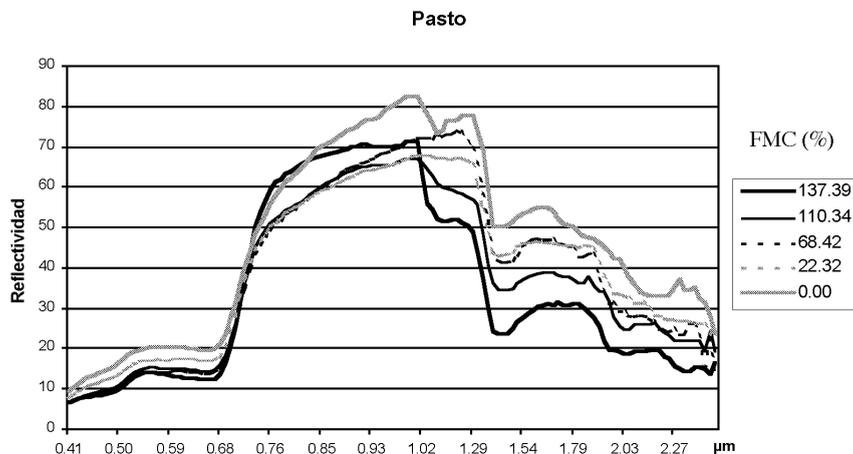


Fig. 5. Curvas de reflectividad a distintos contenidos de humedad para el pastizal.

está completamente seco ofrece valores de reflectividad en el IRC superiores incluso a su pleno vigor. Las dos especies de árboles muestreadas (*Q. faginea* y *Q. pyrenaica*) no ofrecen apenas cambios en la reflectividad.

Estas observaciones preliminares apoyan la idea de que la reflectividad en el IRC no está directamente relacionada con el contenido de agua de las plantas. La reflectividad del IRC estaría sólo asociada a los efectos producidos por el déficit de agua. Como ya se ha dicho antes, el agua como factor limitante origina mecanismos que reducen la transpiración,

David Riaño, Patrick Vaughan, Emilio Chuvieco  
**Bases para estimar el contenido de humedad en plantas  
mediterráneas a partir de la teledetección**

---

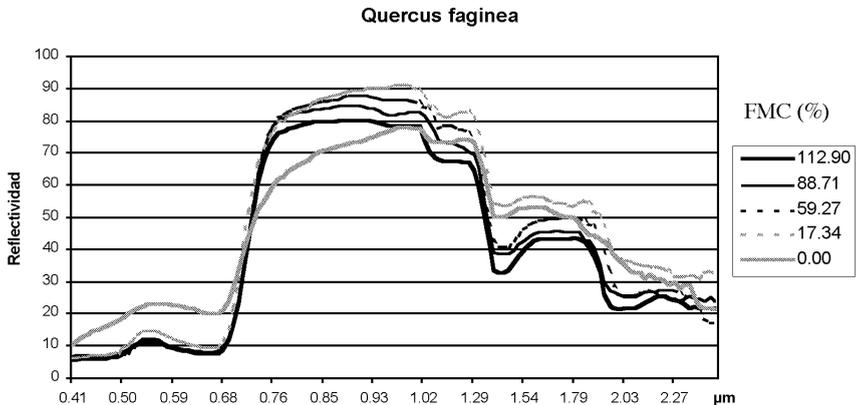


Fig. 6. Curvas de reflectividad a distintos contenidos de humedad para el quejigo (*Quercus faginea*).

disminuye la extensión foliar y cambian la morfología y la geometría. Éste parece ser el factor predominante que favorece la disminución de la reflectividad al disminuir el FMC. Que las especies de árboles muestreadas no sigan esta tendencia se puede deber a que empieza a pesar más el efecto del aumento de las reflexiones y refracciones múltiples que aumentan la reflectividad. El incremento de reflectividad en el pasto al secarse completamente puede ser debido a una mayor influencia del índice de refracción más alto de los materiales celulares secos que a cambios estructurales (el pasto no se curva tanto).

## Mediterránea

### Serie de estudios biológicos (2000)

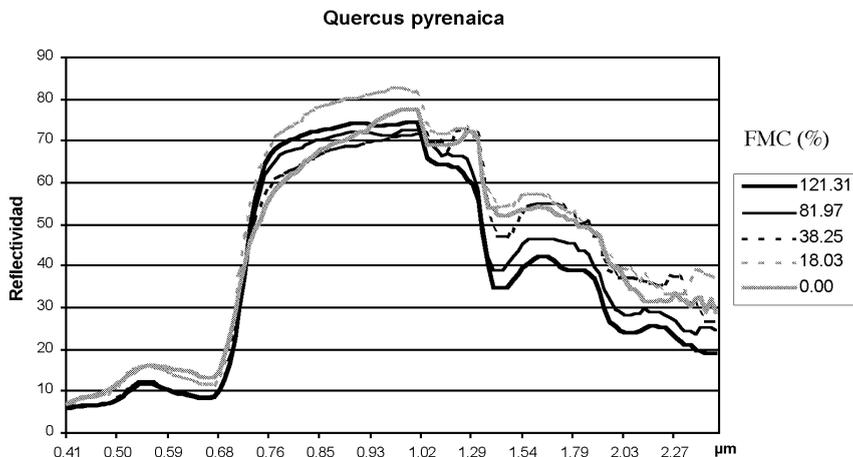


Fig. 7. Curvas de reflectividad a distintos contenidos de humedad para el rebollo (*Quercus pyrenaica*).

Tal y como se apuntaba en la revisión bibliográfica, sin duda el infrarrojo medio es la banda espectral más sensible a la variación en el contenido de humedad, ya que todas las especies muestreadas incrementan su reflectividad al secarse. De las especies analizadas, el pasto, *Q. pyrenaica*, *Q. faginea* y *E. australis* son las que muestran mayores cambios de reflectividad entre hojas secas y frescas. Las mayores diferencias aparecen en torno a dos de los picos de fuerte absorción del agua: 1,4 y 1,9  $\mu\text{m}$ , en donde se observan incrementos de hasta el 20% de reflectividad al secarse

completamente las hojas. La curva de reflectividad se va haciendo más plana, eliminándose las regiones de absorción. Curiosamente las especies menos sensibles a los cambios en esta banda del espectro son *C. ladanifer*, y *R. officinalis*, que habían mostrado las principales diferencias en el IRC. *R. officinalis* sí manifiesta un claro incremento de la reflectividad en torno a 1,4  $\mu\text{m}$ , pero apenas ofrece variación en longitudes más largas. Por su parte, *C. ladanifer* ofrece un perfil todavía más suavizado, con incrementos de reflectividad inferiores al 10%.

## **CONCLUSIONES**

Se han presentado en este trabajo las firmas espectrales de varias especies mediterráneas con diferentes niveles de humedad. Estas curvas de reflectividad permiten apreciar tres aspectos que son útiles para un mejor entendimiento de los efectos del cambio de FMC en la reflectividad:

1. Las bandas VIS muestran una escasa sensibilidad a los cambios en el FMC, al menos en este tipo de experimentos, con hojas colocadas sobre una bandeja.
2. La reducción de la reflectividad en el IRC no está tanto ligada al contenido de humedad, como a los cambios en la morfología de las hojas que aquélla lleva consigo. Para algu-

nas, como *Q. faginea* o *Q. pyrenaica*, dicha reducción de la reflectividad es despreciable, pero para otras, como *C. ladanifer*, *E. australis* o *R. officinalis*, es bastante importante. Asimismo las variaciones en el área foliar y en la superficie reflectiva parecen ser más importantes que el contenido de agua *per se*.

3. El secado implica un incremento de la reflectividad en el IRM. Este efecto es claro en todas las especies, especialmente en torno a las bandas de máxima absorción del agua.

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto Megafires (ENV-CT95-0256) del Programa de la Comisión Europea Medio Ambiente y Clima (DG-XII). También se obtuvo financiación de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (AGF96-2094-CE). Deseamos expresar nuestro agradecimiento a las autoridades del P.N. de Cabañeros por las facilidades otorgadas en la realización de nuestros ensayos de campo, así como a David Cocero, Montserrat Gómez, Pilar Martín y Javier Salas, que han contribuido a la campaña de mediciones en terreno.

David Riaño, Patrick Vaughan, Emilio Chuvieco  
**Bases para estimar el contenido de humedad en plantas  
mediterráneas a partir de la teledetección**

---

## REFERENCIAS

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.

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.

BURGAN, R. E. y R. A. HARTFORD (1993). *Monitoring Vegetation Greenness with Satellite Data*. Ogden, Utah, USDA Forest Service.

BURGAN, R. E. y R. C. ROTHERMEL (1984). *BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System. Fuel Subsystem*. Ogden, Utah, USDA Forest Service.

CARTER, G. A. (1991). Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. *American Journal of Botany* **78**: 916-924.

—(1994). Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing* **15**: 697-703.

CIBULA, W. G., E. F. ZETKA y R. D.L. RICKMAN (1992). Response of Thematic Mapper bands to plant water stress. *International Journal Remote Sensing* **13**: 1869-80.

COHEN, W. B. (1991a). Response of vegetation indices to changes in three measures of leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **57**: 195-202.

—(1991b). Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *International Journal of Remote Sensing* **12**: 1865-1876.

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.

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.

EVERITT, J. H. y P. R. NIXON (1986). Canopy Reflectance of two drought-stressed shrubs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **52**: 1189-1192.

GATES, D. M. (1980). *Biophysical Ecology*. New York - Heidelberg - Berlin, Springer-Verlag.

GATES, D. M., H. J. KEEGAN, J. C. SCHLETER y V. R. WEIDNER (1965). Spectral properties of plants. *Applied Optics* **4**: 11-20.

HALE, M. y D. M. ORCUTT (1987). *The Physiology of Plants Under Stress*. New York, John Wiley & Sons.

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.

David Riaño, Patrick Vaughan, Emilio Chuvieco  
**Bases para estimar el contenido de humedad en plantas  
mediterráneas a partir de la teledetección**

---

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. (1986). Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. *Annual Review of Phytopathology* **24**: 265-87.

JACKSON, R. D. y C. E. EZRA (1985). Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *International Journal Remote Sensing* **6**: 177-185.

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.

LÓPEZ, S., F. GONZÁLEZ, R. LLOP y J. M. CUEVAS (1991). An evaluation of the utility of NOAA AVHRR images for monitoring forest fire risk in Spain. *International Journal of Remote Sensing* **12**: 1841-1851.

MORAN, M.S., T.R. CLARKE, Y. INOUE y A. VIDAL (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* **49**: 246-263.

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.

PROSPER-LAGET, V., A. DOUGUÉDROIT y J. P. GUINOT (1995). Mapping the risk of forest fire occurrence using NOAA satellite information. *EARSeL Advances in Remote Sensing* **4**: 30-38.

RIPPLE, W. J. (1986). Spectral reflectance relationships to leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **52**: 1669-1675.

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.

TUCKER, C. J. (1980). Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment* **10**: 23-32.

VIDAL, A., F. PINGLO, H. DURAND, C. DEVAUX-ROS y A. MAILLET (1994). Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forest from NOAA thermal IR. *Remote Sensing of Environment* **49**: 296-303.

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.

VOGELMANN, T. C., y L.O. BJÖRN (1984). Measurement of light gradients and spectral regime in plant tissue with a fiber optic probe. *Physiologia Plantarum* **60**: 361-368.

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.

David Riaño, Patrick Vaughan, Emilio Chuvieco  
**Bases para estimar el contenido de humedad en plantas  
mediterráneas a partir de la teledetección**

---

\* Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, - 28801 Alcalá de Henares.