

ESTIMACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE LA VEGETACIÓN A PARTIR DE SENSORES DE ALTA Y BAJA RESOLUCIÓN

E. CHUVIECO*, F. J. SALAS, I. AGUADO, D. COCERO, y D. RIAÑO
Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá,
Colegios, 2 – 28801 Alcalá de Henares
*e-mail: emilio.chuvieco@uah.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta una comparación sobre la fiabilidad de emplear imágenes de distintos sensores espaciales (Landsat-TM, NOAA-AVHRR y SPOT-Vegetation) en la estimación del contenido de humedad de diversas especies mediterráneas. Los resultados muestran relaciones bastante consistentes entre esta variable y la reflectividad recogida en las bandas del infrarrojo medio de onda corta (SWIR) (1.6 y 2 μm) tanto para pastizales como para especies de matorral, si bien para el caso de pastizales también resultan sensibles los índices de vegetación convencionales, y el cociente entre estos índices y la temperatura de superficie. La aplicación tentativa de modelos de ajuste permite establecer coeficientes de determinación superiores a 0,8 para pastizales y 0,7 para matorrales.

Palabras clave: humedad de la vegetación, Landsat-TM, NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation.

ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis on the performance of different satellite images (Landsat-TM, NOAA-AVHRR and SPOT-Vegetation) to estimate moisture content of several Mediterranean species. Results from quantitative correlation of field data and satellite images are presented. They show a good correlation trend between moisture content and remote sensing data in the short wave infrared (SWIR) region (1.6 and 2 μm), both for grasslands and shrublands. For grasslands, traditional vegetation indices, based on red and near infrared data, performed also well, as well as a ratio of vegetation indices and surface temperature. Determination coefficients of 0.8 and 0.7 were obtained from multitemporal comparison with field data.

Keywords: vegetation moisture content, Landsat-TM, NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation.

1. Introducción

La estimación del contenido de agua de las plantas resulta de gran importancia, pues se trata de una de las variables más críticas para explicar la actividad vegetativa y los modelos de productividad vegetal (Boyer, 1995). Por ejemplo, un conocimiento más detallado, tanto en el espacio como en el tiempo, del contenido de agua del cultivo en regadío nos permitiría mejorar la gestión de los recursos hídricos, aportando agua al cultivo cuándo y dónde sea más vital. En el ámbito de la vegetación herbácea o arbustiva, el contenido de agua resulta un parámetro clave para explicar la evolución fenológica de las formaciones vegetales, detectando situaciones de déficit que puedan dar lugar a deterioros críticos del tejido vegetal (Hale y Orcutt, 1987). En lo que se refiere a la prevención de desastres naturales, como sequías o incendios forestales, el estado hídrico resulta de notable importancia, en la medida en que el contenido de agua está inversamente relacionado con la inflamabilidad y la combustibilidad (Viegas *et al.*, 1992).

La estimación del contenido de agua en las plantas se puede realizar básicamente por tres métodos: muestreo de campo, información meteorológica y teledetección. Los tres sistemas tienen ventajas e inconvenientes. El trabajo de campo resulta el método más directo y preciso, pero tiene el inconveniente de ser costoso y lento, además de contar con un carácter muy local, lo que dificulta su aplicación operativa. Habitualmente se aplica un sistema de muestreo, seleccionando ciertas plantas que se consideren representativas de la situación hídrica del conjunto (Desbois *et al.*, 1997). Esta selección resulta bastante complicada, al tener que considerar las diversas variables que influyen en el estado hídrico de la planta (situación topográfica, suelos, densidad de la cubierta, tipo de especie, situación dentro de la planta, etc.). Habitualmente el contenido hídrico se mide por métodos gravimétricos, comparando el peso húmedo y seco de la muestra, lo que implica que la estimación no es inmediata, sino que requiere un cierto tiempo (24-48 h) para conseguir el secado de la muestra.

El empleo de índices de humedad basados en datos meteorológicos es práctica común en la estimación de la evapotranspiración o del riesgo de incendios (Camia *et al.*, 1999). Suelen basarse en variables básicas, como la temperatura y humedad del aire, precipitación y velocidad del viento, a partir de las que se generan índices más complejos, que intentan simular el efecto de estas variables sobre la actividad fisiológica de las plantas. Desde el punto de vista operativo, resultan más convenientes que el trabajo de campo, ya que la red de observación meteorológica es bastante extensa y proporciona información muy frecuentemente. Ahora bien, presenta dos notables problemas. Por un lado, habitualmente estos índices asumen relaciones teóricas entre las condiciones de la atmósfera y el estado hídrico de la planta, que se suponen equivalentes en cualquier especie. Como es sabido, la respuesta de las distintas plantas a las mismas condiciones atmosféricas puede ser muy variable, dependiendo de su propia fisiología (Kramer, 1983), con lo que los índices meteorológicos pueden estar sobre o infra-estimando el contenido de agua según la planta responda al aumento de radiación, viento o precipitación. El segundo problema en el empleo de índices meteorológicos está relacionado con la situación geográfica de las estaciones de medida, habitualmente apta para el control hídrico de cultivos, pero mucho más problemática para las masas forestales, frecuentemente alejadas de los emplazamientos de las estaciones. Esto implica la

Chuvienco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus (Artículos)*, nº 1, p. 1-16

necesidad de aplicar métodos de extrapolación espacial para estimar las condiciones atmosféricas en las áreas forestales de interés, que no siempre resultan precisos, sobre todo cuando la topografía introduce variaciones locales muy pronunciadas.

Finalmente, las imágenes de satélite pueden paliar algunos de los problemas arriba indicados. Por un lado, facilitan una cobertura espacial exhaustiva, con buena frecuencia temporal, lo que asegura poder observar cualquier zona de interés. Por otro, la estimación es directa, se basa en la señal reflejada/emitada por la propia planta, y no en las condiciones atmosféricas que la circundan, por lo que estaría, al menos teóricamente, mejor relacionada que éstas con el estado hídrico específico de cada masa vegetal. En este caso, el principal problema radica en demostrar que hay una buena relación entre ese estado hídrico y el comportamiento espectral de la planta, que es lo que en última instancia miden los sensores de teledetección. Dicho de otra manera, es preciso verificar que las variaciones en el contenido de agua implican un cambio *significativo* en la manera en que las plantas reflejan o emiten energía electro-magnética, que además resulte *separable* de la acción de otros factores en la señal, como son el área foliar, los ángulos de observación, la geometría de las plantas, la situación topográfica o el tipo de suelo. En esta línea se inscribe el presente trabajo.

2. Efecto del agua sobre el comportamiento espectral de las plantas

Diversos autores han estudiado relaciones entre la reflectividad y el contenido de agua tanto de hojas aisladas como de doseles vegetales (Riaño *et al.*, 2000). La mayor parte de estos estudios se han llevado a cabo en laboratorio, en condiciones controladas de observación, mediante el uso de espectro-radiómetros (Bowman, 1989, Carter, 1991, Cohen, 1991, Hunt y Rock, 1989, Jackson y Ezra, 1985, Peñuelas *et al.*, 1997, Thomas *et al.*, 1971). Estos estudios han mostrado que el contenido hídrico de la vegetación está más claramente relacionado con la reflectividad en el SWIR, entre 1,1 y 2,5 μm , en donde las relaciones son claras, aunque negativas, ya que a estas longitudes de onda se presentan picos de alta absorción en presencia de agua.

Respecto a la reflectividad del infrarrojo cercano (0,8-1,1 μm), 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, 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; 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). Finalmente, un tercer grupo de autores no encuentra un cambio significativo en la reflectividad del infrarrojo cercano 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

Chuvienco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus (Artículos)*, nº 1, p. 1-16

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).

Una alternativa al empleo de los canales ópticos es el análisis de la dinámica térmica de las plantas. Cuando la vegetación está bien irrigada, el aumento de la radiación incidente implica también un incremento de la evapotranspiración (calor latente), lo que lleva a reducir el calor sensible (temperatura del aire) frente a zonas inmediatas. En consecuencia, la diferencia entre la temperatura del aire y la de superficie puede ser un buen indicador del estado hídrico de las plantas. Sobre este principio se han apoyado varios estudios realizados sobre cultivos en regadío (Jackson *et al.*, 1981, Jackson *et al.*, 1986, Moran *et al.*, 1994). La relación entre los índices de vegetación y la temperatura de superficie también se ha demostrado de gran utilidad para evaluar el estrés hídrico de las plantas (Vidal y Devaux-Ros, 1995, Vidal *et al.*, 1994).

Además de las experiencias en condiciones de laboratorio, se han desarrollado algunos trabajos a partir de imágenes de satélite (Chuvienco *et al.*, 1999). Los resultados han sido bastante adecuados para pastizales (Chladil y Nunez, 1995; Paltridge y Barber, 1988), mientras que en matorrales resultan más controvertidos (Alonso *et al.*, 1996).

3. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo ha sido evaluar la capacidad de estimar el contenido hídrico de diversas especies herbáceas y arbustivas mediterráneas a partir de teledetección. La finalidad última de nuestro proyecto es proponer la aplicación operativa de las imágenes de satélite en la prevención del riesgo de incendio forestal, si bien también pueden aplicarse estos análisis al análisis de los cultivos.

Como objetivos específicos, se pretendía comparar la información proporcionada para esta aplicación por sensores de alta y baja resolución espacial, concretamente los Landsat-TM, NOAA-AVHRR y Spot-Vegetation. El área de estudio corresponde al 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 de los años 1996 a 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.

4. Metodología

4.1. Medidas en terreno

Para el presente proyecto se consideraron especies herbáceas y arbustivas (*Cistus ladanifer*, *Erica arborea*, *Erica australis*, *Rosmarinus officinalis*), si bien también se midió una especie de

Chuvieco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus (Artículos)*, nº 1, p. 1-16

arbolado semi-caducifolio (el quejigo: *Quercus faginea*). 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 (Desbois *et al.*, 1997; Trowbridge y Feller, 1988).

Se eligió un total de seis parcelas de muestra. 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:

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

Todas las muestras recogidas tenían un peso entre 100 y 200 gramos, y eran pesadas en el momento de su recogida con una balanza portátil (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 de la planta (que aquí denominamos contenido de humedad, CH), definido como el peso del agua en función del peso seco de la muestra:

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

donde P_h es el peso en gramos de la muestra verde, y P_s el peso en seco. El resultado se expresa en porcentaje.

Una primera observación de la evolución temporal de la humedad de las especies muestreadas permite deducir la gran variedad fenológica que manifiestan ([figura 1](#)). Mientras los pastizales ofrecen un claro contraste entre la primavera (valores próximos a los 250%) y el verano (en torno al 10%), los matorrales ofrecen un comportamiento mucho más estable, gracias a estar mejor adaptados a las condiciones de estrés hídrico estival. Los *Cistus* y *Rosmarinus* muestran un mayor contraste primavera-verano (de 150 a 80%, respectivamente), mientras las *Ericas* apenas ofrecen contraste estacional, con valores próximos al 80% en primavera y verano. La única especie arbórea muestreada (el *Q. faginea*) ofrece, al igual que los otros matorrales, mayor contraste estacional. De cara a uniformizar las series de datos de imágenes que teníamos disponibles, presentaremos los resultados del análisis de correlación únicamente con pastizal, jara, romero y un promedio de las distintas especies de matorral.

4.2. Análisis preliminar de las imágenes

Como se dijo anteriormente, la información obtenida en terreno se correlacionó con imágenes Landsat-TM, NOAA-AVHRR y SPOT-Vegetation. El primer sensor proporciona una resolución espacial y espectral muy adecuada para estos estudios, ya que el tamaño del píxel permite localizar con precisión la parcela muestreada. Además, cuenta con dos bandas en el SWIR, que, como hemos visto, es la región espectral más idónea para el análisis del estado hídrico. Sin embargo, el coste y la frecuencia de adquisición de las imágenes dificulta la obtención de series temporales consistentes, por lo que lo utilizamos aquí como instrumento de calibración.

Los sensores NOAA-AVHRR y Spot-Vegetation proporcionan una buena resolución temporal (imágenes diarias), si bien el tamaño del píxel es bastante grosero (1 km²), lo que dificulta la comparación con los datos medidos en terreno. La resolución espectral de ambos sensores es adecuada para estos estudios. Ambos permiten el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que se ha utilizado ampliamente para estimar la actividad fotosintética de las plantas. El AVHRR ofrece además información de los canales térmicos, lo que permite seguir la evolución de las temperaturas de superficie. Además, es un sensor de libre recepción, lo que abarata notablemente los costes para realizar series temporales largas. En su contra estaría la escasa estabilidad radiométrica en las longitudes de onda cortas (muy dependientes de los ángulos de observación), y su difícil geo-referenciación. Por su parte, el Spot-Vegetation mejora la estabilidad radiométrica y geométrica del AVHRR, introduce un canal en el SWIR, pero resulta más costoso y no cuenta con canales térmicos.

El procesamiento de las imágenes AVHRR se realizó íntegramente en nuestro Departamento para las imágenes posteriores a 1998, cuando se instaló una estación de recepción directa (formato HRPT). Previamente a esa fecha, se adquirieron a la empresa Infocarto, S.A. y a la antena universitaria de Dundee. La serie está formada por las imágenes diarias adquiridas entre el 31 de marzo y el 30 de septiembre de 1996 a 1999. Todas ellas corresponden a la pasada diurna del satélite NOAA-14, correspondiente a las 15,00 h GMT. 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. Las imágenes fueron corregidas radiométrica y geométricamente, utilizando como proyección base la UTM, con huso 30 extendido.

Las imágenes Landsat-TM y Spot-Vegetation corresponden a periodos más cortos de tiempo. La primera serie está formada por 7 imágenes coincidentes con días de muestreo en campo. Por problemas de cobertura nubosa, la adquisición se reparte en tres años: 1997 (16 de Abril, 21 de Julio y 23 Septiembre); 1998 (5 de Mayo, 24 de Julio y 10 de Septiembre) y 1999 (6 de Abril). Las imágenes fueron corregidas geométricamente y ajustadas multitemporalmente mediante puntos de control, y se les aplicaron correcciones atmosféricas básicas.

Finalmente, la serie de imágenes Spot-Vegetation corresponden a 14 adquisiciones realizadas durante 1999, en la primavera y el verano. Fueron adquiridas a la empresa Spot-Image, que facilitó la corrección orbital. El ajuste multitemporal se realizó mediante puntos de control, utilizando las líneas de costa y embalses como elementos de referencia.

La [figura 2](#) incluye una muestra de las imágenes Landsat y Vegetation utilizadas en este trabajo. Como puede observarse, la resolución espacial es muy diversa, si bien ofrecen patrones espaciales bastante comparables.

4.3. Variables derivadas

A partir de las imágenes de reflectividad y temperatura del suelo (derivada siguiendo el método propuesto por Coll y Caselles, 1997 y Valor y Caselles, 1996) de los distintos sensores comentados, se generaron las siguientes variables secundarias, que se asumían relacionadas con el contenido de agua en la vegetación:

1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Rouse *et al.*, 1973):

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

donde ρ_{IRC} y ρ_R indican la reflectividad en el canal del infrarrojo cercano y en el rojo, respectivamente.

2. Índice de vegetación del infrarrojo (*Normalized Difference Infrared Index*), que algunos autores han correlacionado satisfactoriamente con el contenido de agua de la vegetación (Hunt y Rock, 1989):

$$NDII = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{SWIR}}{\rho_{IRC} + \rho_{SWIR}}$$

donde ρ_{IRC} y ρ_{SWIR} indican la reflectividad en el canal del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio óptico, respectivamente.

3. Cociente entre el NDVI y la Temperatura de Superficie (NDVI/TS). Utilizado preliminarmente por varios autores para estimar el CH de matorrales mediterráneos Alonso *et al.*, 1996; Chuvieco *et al.*, 1999

5. Resultados

5.1. Correlaciones simples

Las tendencias observadas a partir del análisis de la correlación de Pearson entre el contenido de humedad (CH) y las variables derivadas de las imágenes puede observarse en la [tabla 1](#). De esta tabla se deducen algunos comentarios interesantes. Por un lado, se observa una tendencia consistente entre sensores. Los tres conjuntos de imágenes, pese a sus diferentes resoluciones

Chuvienco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus (Artículos)*, nº 1, p. 1-16

espaciales, espectrales y temporales, muestran tendencias similares. La síntesis de las correlaciones encontradas permite realizar las siguientes afirmaciones:

1. Los signos de las correlaciones son consistentes con lo esperado: valores positivos para los índices de vegetación (NDVI y NDII) y negativos para las temperaturas de superficie (TS). Como antes se indicó, los índices de vegetación miden las condiciones de vigor vegetal de la planta (principalmente su contenido en clorofila). Al disminuir el contenido de agua, también lo hacen otros procesos fisiológicos de la planta, lo que implica asimismo una reducción de estos índices. Por el contrario, al aumentar la temperatura de superficie también lo hace la tensión hídrica, lo que supone una mayor pérdida de agua almacenada en las plantas.
2. Los valores de correlación son, en general, más elevados para el pastizal que el matorral. Esto es consecuencia de varios factores. Por un lado, las herbáceas tienen una mayor dependencia de las condiciones estacionales; varían de modo más abrupto entre la primavera y el verano, como ya vimos previamente, como consecuencia de la menor capacidad de absorción de agua que tienen las plantas herbáceas, que son, en casi todos los casos del área de estudio, anuales.
3. El NDVI se comporta muy bien para estimar el contenido de agua en pastizales, pero no así en matorrales. A nuestro juicio, este fenómeno es debido a que el NDVI es más sensible a las variaciones del verdor que acompañan a la pérdida de agua en las herbáceas, que al contenido de agua en sí. En otras palabras, este índice mide un efecto indirecto de la pérdida de agua (la marchitez de la planta, como consecuencia de alcanzar una tensión hídrica que ya no tolera).
4. Por su parte, el NDII sí que resulta más sensible al contenido de agua, pues está calculado a partir de una banda espectral muy sensible a la absorción de agua en las hojas (el infrarrojo medio de onda corta, SWIR). En consecuencia, funciona bien tanto en pastizales como en matorrales. Lamentablemente, esto sólo puede comprobarse con las imágenes SPOT-Vegetation y Landsat-TM, ya que el NOAA-AVHRR no ha recogido información del SWIR hasta fecha muy reciente (a partir de octubre de 2000 con el lanzamiento del NOAA-16).
5. El cociente NDVI/TS presenta muy buenas correlaciones con el contenido de humedad para los distintos sensores. En consecuencia, sería preferible utilizarlo, frente al NDVI, en caso de que sea necesario abordar una estimación mixta para pastizales y matorrales (aquí no podemos calcularlo para el sensor Vegetation, al faltar en éste los canales térmicos).

Los valores de significación son muy elevados para casi todas las correlaciones calculadas con imágenes AVHRR, ya que el tamaño de la muestra es bastante alto (88 casos, 22 periodos de 4 años). En el caso de las imágenes Vegetation, con sólo 14 imágenes disponibles, ya se observan algunos problemas de significancia en las correlaciones de NDVI y humedad de matorral. Para el caso del Landsat-TM únicamente las correlaciones del pastizal tienen significación más alta del 95 %, mientras en matorral sólo el NDII logra estos niveles de fiabilidad.

5.2. Regresiones múltiples

Una vez que habíamos determinado 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 estimar la humedad a partir de las variables de la imagen. Puesto que el contenido de humedad también tiene un claro componente estacional, hemos incluido en las regresiones múltiples una variable asociada a la fecha de observación. En diversos ensayos se probaron varias variables temporales: día juliano, número de horas de sol (calculadas a partir del día del año y latitud) y número de horas de sol acumuladas. Por su sencillez, elegimos finalmente una función del día juliano, que proporcionaba resultados similares a las otras variables. La función elegida fue de tipo exponencial (Ed):

$$Ed = EXP(-0.0222 * \text{Juliano})$$

donde Juliano varía de 1 (1 de enero) a 365 (31 de diciembre). El coeficiente en la exponenciación se calculó empíricamente a partir del contenido de humedad del pastizal, mediante métodos de regresión.

Las funciones de regresión múltiple calculadas para los distintos sensores fueron las siguientes. Para el Pastizal:

$$CH = -118.49 + 520 \text{ NDVI} + 3.82 \text{ NDVI/Ts} + 1208.25 * Ed$$

a partir de imágenes AVHRR. Con un coeficiente de determinación (r^2) de 0.639, lo que implica que casi el 64 % de la varianza es explicada por el modelo. Para las imágenes Vegetation, la ecuación resultante sólo seleccionó el NDII como variable independiente, alcanzando una capacidad explicativa menor (48 %). Finalmente, con las imágenes Landsat-TM, la variable seleccionada fue el cociente NDVI/Ts, con una capacidad explicativa muy alta (84 %).

Para el caso del matorral, el modelo de regresión múltiple seleccionado para las imágenes AVHRR fue el siguiente:

$$CH = 12.199 + 91.476 \text{ NDVI} + 8.60 \text{ NDVI/Ts} + 131.44 * Ed$$

con una varianza explicada del 51.4 %. Para las imágenes Vegetation, las variables significativas son el NDII y el NDVI (que complementa algunos aspectos del primer índice), ofreciendo una explicación del 82 %. Finalmente, los modelos a partir de imágenes Landsat-TM ofrecen como variable más significativa el NDII, con una varianza explicada del 57 %.

5.3. Regresiones por periodos

En los ejercicios realizados previamente, pudimos observar que la tendencia evolutiva del CH resultaba marcadamente estacional en el caso de las herbáceas, y con cierto contraste para el matorral. En consecuencia, decidimos abordar un ejercicio de regresión temporal, aplicando distintos coeficientes a los dos periodos: primavera (entre el 1 de abril y el 1 de junio) y verano

Chuvienco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", GeoFocus (Artículos), nº 1, p. 1-16

(desde 1 de junio al 30 de septiembre). Los modelos se calibraron a partir de las mismas variables seleccionadas significativamente en el anterior paso, esto es, una variable temporal (Ed), el NDVI y el cociente entre NDVI y Ts. El modelo resultante ofrece una mejor capacidad explicativa, tanto para el pastizal (de 0.64, utilizando una sola ecuación a 0.77 utilizando una para cada período) como para el matorral (de 0.51 a 0.67). En ambos casos, se trata de mejoras significativas, por lo que proponemos este método como más apto para la estimación del CH a partir de las imágenes AVHRR. No abordamos este ejercicio con las imágenes Landsat o Vegetation, por falta de una serie más completa de datos (sólo 7 y 14 imágenes, respectivamente), lo que dificultaría aplicar una regresión independiente a los periodos de primavera y verano.

La trayectoria temporal de los valores observados y estimados a partir de estas regresiones temporales puede analizarse en las [figuras 3](#) (pastizal) y [4](#) (matorral). Como puede observarse, el ajuste es bastante adecuado. Se detectan algunos valores cumbre en la serie medida en terreno, que bien puede ser consecuencia de algunos factores de ruido en el proceso de medición. No obstante, las tendencias se recogen bien, especialmente el contraste primavera-verano, mucho menos acusado en el caso del matorral. Los valores culminantes de la primavera para el pastizal son bastante dependientes de las lluvias de febrero a marzo, por lo que se observan infra-estimaciones si las imágenes se adquieren a inicios de abril.

Junto a estas estimaciones temporales, el empleo de imágenes de satélite permite obtener una estimación de la diversidad espacial en el CH. Aplicando los modelos previamente analizados pueden obtenerse mapas de CH, para los distintos sensores. Estos mapas pueden integrarse con otras variables de riesgo (humanas o meteorológicas) de cara a mejorar la planificación preventiva y, en última instancia, paliar los efectos de los incendios. En la [figura 5](#) se recogen algunos ejemplos de este tipo de cartografía.

Pese al interés de estos análisis, resulta necesario insistir en la incertidumbre que todavía rodea a estas estimaciones, como consecuencia de los problemas derivados del sensor (falta de resolución espacial, AVHRR y Vegetation, o temporal, Landsat-TM, adecuada), de la complejidad para aislar el CH de otros factores que inciden en la respuesta espectral de la planta, o del propio proceso de muestreo en terreno. Una Investigación futura debería verificar estas relaciones en otros espacios y tipos de vegetación, plantear ecuaciones más globales y aislar más adecuadamente el efecto de los diversos factores de variación espectral.

6. Conclusiones

En el trabajo hemos presentado algunas relaciones empíricas entre el CH y variables derivadas de los sensores AVHRR, Vegetation y Landsat-TM para varios tipos de vegetación mediterránea. Es de destacar que las tendencias esperadas entre el CH y las imágenes de satélite se confirman en todos los casos, siendo positivas con los índices de vegetación y negativas para la temperatura de superficie. Estas relaciones nos muestran que las bandas basadas en el infrarrojo medio de onda corta son más sensibles que las basadas sólo en el cercano y el visible para estimar el CH, principalmente en el caso del matorral que no modificar su verdor de modo tan drástico como el pastizal al reducirse el volumen de agua disponible en la planta. En caso de que el sensor no disponga de esta banda, como ha ocurrido con las imágenes NOAA-AVHRR, resulta más

Chuvienco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 1-16

conveniente contar con algún índice mixto basado en índices de vegetación y temperaturas de superficie. Se recomienda utilizar ecuaciones diferenciadas para el pasto y el matorral, así como para la primavera y el verano, siempre que la serie temporal sea lo suficientemente densa en el tiempo.

7. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos europeos Control-Fire-Sat (ENV4-CT97-0479) e Inflamm (ENV4-CT98-0700), financiados por el programa de Medioambiente y Clima de la Comisión Europea (DG-XII). 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.

8. Referencias bibliográficas

- Alonso, M. *et al.* (1996): "Estimating temporal dynamics of fuel moisture content of Mediterranean species from NOAA-AVHRR data", *EARSEL Advances in Remote Sensing*, 4, 4, pp. 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, pp. 249-255.
- Boyer, J. S. (1995): *Measuring the water status of plants and soils*. Academic Press, Inc.
- Camia, A., Bovio, G., Aguado, I. y Stach, N. (1999): "Meteorological fire danger indices and remote sensing", en: Chuvienco, E. (Ed.): *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Berlin, Springer-Verlag, pp. 39-59.
- Carter, G. A. (1991): "Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves", *American Journal of Botany*, 78, pp. 916-924.
- Chladil, M. A. y Nunez, M. (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, pp. 165-171.
- Chuvienco, E., Deshayes, M., Stach, N., Cocero, D. y Riaño, D. (1999): "Short-term fire risk: foliage moisture content estimation from satellite data", en: Chuvienco, E. (Ed.): *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Berlin, Springer-Verlag, pp. 17-38.
- Cohen, W. B. (1991): "Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions", *International Journal of Remote Sensing*, 12, pp. 1865-1876.
- Coll, C. y Caselles, V. (1997): "A global split-window algorithm for land surface temperature from AVHRR data: validation and algorithm comparison". *Journal of Geophysical Research*, 102B14, pp. 16697-16713.
- Desbois, N., Deshayes, M. y Beudoin, A. (1997): "Protocol for fuel moisture content measurements", en Chuvienco, E. (Ed.): *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires*. Alcalá de Henares, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, pp. 61-72.
- Hale, M. y Orcutt, D.M. (1987): *The Physiology of Plants Under Stress*. New York, John Wiley & Sons.
- Hunt, E. R. y Rock, B. N. (1989): "Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances", *Remote Sensing of Environment*, 30, pp. 43-54.

Chuvieco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus (Artículos)*, nº 1, p. 1-16

- Jackson, R. D. y Ezra, C. E. (1985): "Spectral response of cotton to suddenly induced water stress", *International Journal Remote Sensing*, 6, pp. 177-185.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J. y Pinter, P. J. (1981): "Canopy temperature as a crop water stress indicator", *Water Resources Research*, 17, pp. 1133-1138.
- Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J. y Idso, S. B. (1986): "Detection and evaluation of plant stress for crop management decisions", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24, pp. 99-106.
- Kramer, P. J. (1983): *Water relations of plants*. London, Academic Press, Inc.
- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y. y Vidal, A. (1994): "Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index", *Remote Sensing of Environment*, 49, pp. 246-263.
- Paltridge, G. W. y Barber, J. (1988): "Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data", *Remote Sensing of Environment*, 25, pp. 381-394.
- Peñuelas, J., I, F., Biel, C., Serrano, L. y Savé, R. (1993): "The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status", *International Journal of Remote Sensing*, 14, 10, pp. 1887-1905.
- Peñuelas, J., Piñol, J., Ogaya, R. y Filella, I. (1997): "Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970)", *International Journal of Remote Sensing*, 18, 13, pp. 2869-2875.
- Pierce, L. L., Running, S. W. y Riggs, G. A. (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, pp. 579-586.
- Riaño, D., Vaughan, P. y Chuvieco, E. (2000): "Bases para estimar el contenido de humedad en plantas mediterráneas a partir de la teledetección", *Mediterránea. Serie de estudios biológicos. Época II*, 17, pp. 27-34.
- Ripple, W. J. (1986): "Spectral reflectance relationships to leaf water stress", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52, pp. 1669-1675.
- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. H. y Harlan, J. C. (1974): *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation*. Type III Final Report. NASA/GSFCT. Greenbelt, MD. USA.
- Thomas, J. R., Namken, L. N., Oerther, G. F. y Brown, R. G. (1971): "Estimating leaf water content by reflectance measurements", *Agronomy Journal*, 63, pp. 845-847.
- Trowbridge, R. y Feller, M. C. (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, pp.128-131.
- Valor, E. y Caselles, V. (1996): "Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas", *Remote Sensing of Environment*, 57, pp. 167-184.
- Vidal, A. y Devaux-Ros, C. (1995): "Evaluating forest fire hazard with a Landsat TM derived water stress index", *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, pp. 207-224.
- Vidal, A., Pinglo, F., Durand, H., Devaux-Ros, C. y Maillet, A. (1994): "Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forest from NOAA thermal IR", *Remote Sensing of Environment*, 49, pp. 296-303.
- Viegas, D. X., Viegas, T. P. y Ferreira, A. D. (1992): "Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in central Portugal", *The International Journal of Wildland Fire*, 2, 2, pp. 69-85.

Chuvieco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hidrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 1-16

Westman, W. E. y Price, C. V. (1988): "Spectral changes in conifers subjected to air pollution and water stress: experimental studies", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26, pp. 11-20.

TABLAS

Tabla 1. Correlación de Pearson entre el CH y las variables derivadas de las imágenes NOAA-AVHRR, LANDSAT y SPOT-Vegetation)

Especie	Índice	AVHRR-CH		Vegetation-CH		LandsatTM – CH	
		r pearson	nivel signif	r pearson	nivel signif	r pearson	nivel signif
Pastizal	NDVI	0.754	1.93E-18	0.660	0.010	0.889	0.007
	NDII	---	---	0.693	0.006	0.892	0.007
	TS	-0.511	2.96E-07	---	---	-0.773	0.041
	NDVI/TS	0.502	5.25E-07	---	---	0.918	0.003
Jara (<i>Cistus ladanifer</i>)	NDVI	0.474	2.68E-06	0.470	0.089	0.574	0.177
	NDII	---	---	0.786	0.0001	0.801	0.030
	TS	-0.722	1.43E-17	---	---	-0.568	0.183
	NDVI/TS	0.717	4.80E-17	---	---	0.732	0.060
Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	NDVI	0.529	1.00E-07	0.515	0.059	0.723	0.066
	NDII	---	---	0.814	0.0001	0.526	0.245
	TS	-0.775	1.90E-18	---	---	-0.528	0.223
	NDVI/TS	0.806	1.93E-18	---	---	0.622	0.135
Matorral	NDVI	0.501	3.32E-07	0.509	0.062	0.574	0.177
	NDII	---	---	0.828	0.0002	0.756	0.048
	TS	-0.671	1.37E-13	---	---	-0.481	0.274
	NDVI/TS	0.678	4.39E-14	---	---	0.623	0.134

Chuvienco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hidrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 1-16

FIGURAS

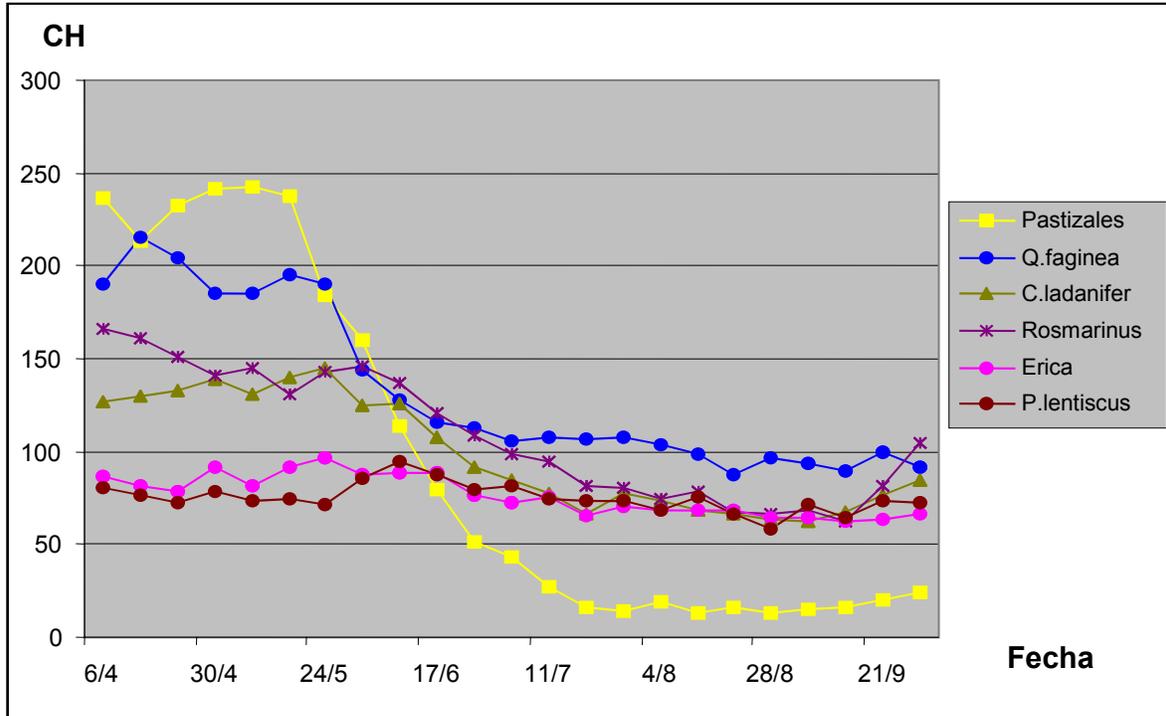


Figura 1: Valores promedio del contenido de humedad de la vegetación (1996 a 1999)



Figura 2. Imágenes Landsat-TM (izquierda) y Spot-Vegetation (derecha) correspondientes al Parque Nacional de Cabañeros. Ambas imágenes son de verano.

Chuvienco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hidrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 1-16

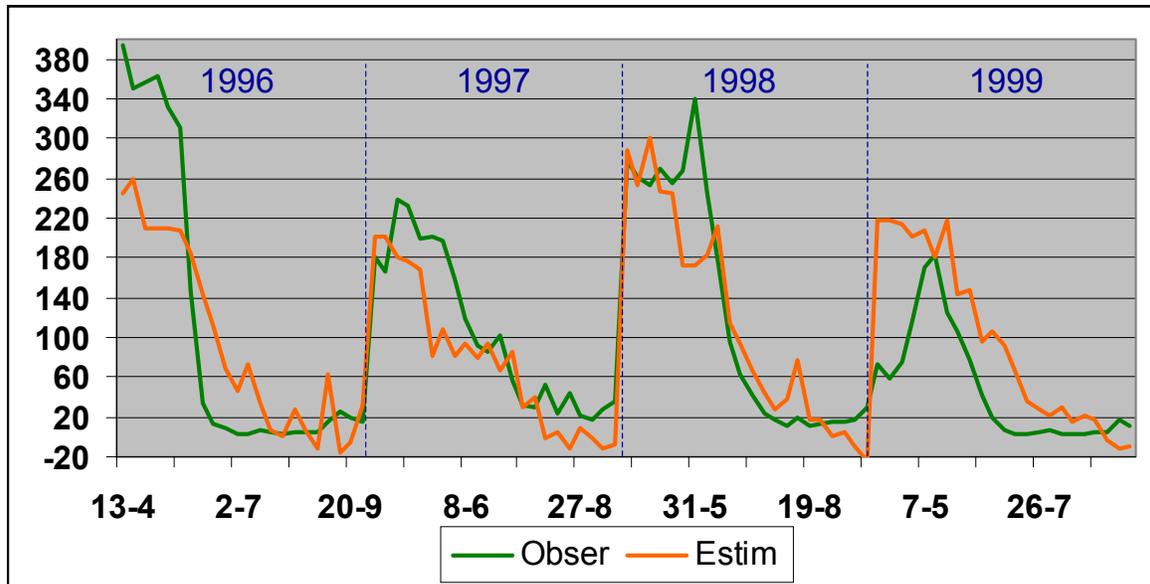


Figura 3. Valores observados y estimados del CH del pastizal para los cuatro años de estudio. Estimación con datos NOAA-AVHRR. La escala vertical indica la proporción de humedad en función del peso seco.

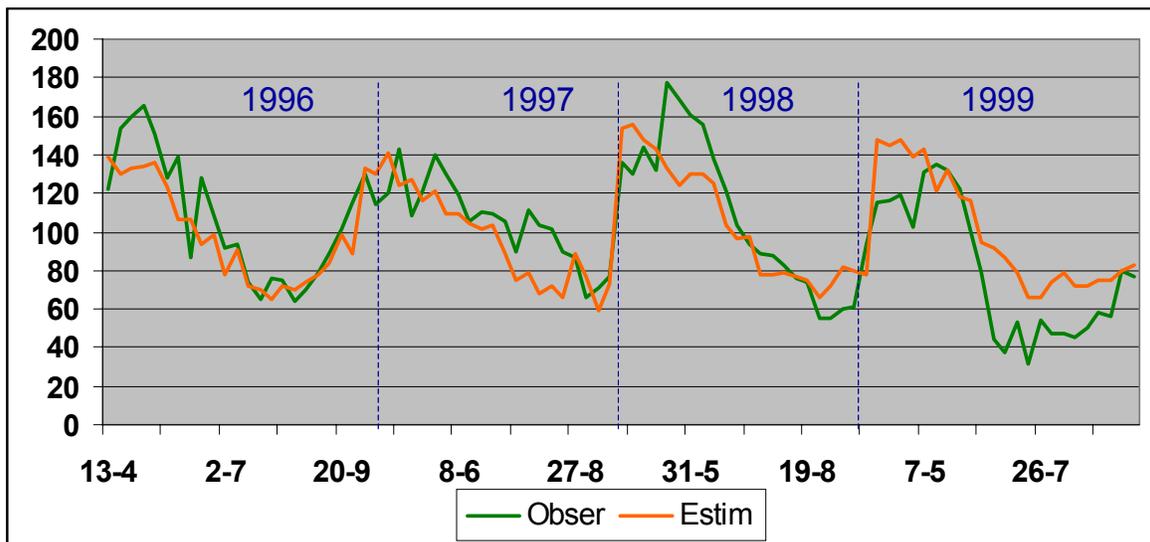


Figura 4. Valores observados y estimados del CH del matorral para los cuatro años de estudio. Estimación con datos NOAA-AVHRR. La escala vertical indica la proporción de humedad en función del peso seco.

Chuvieco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hidrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 1-16

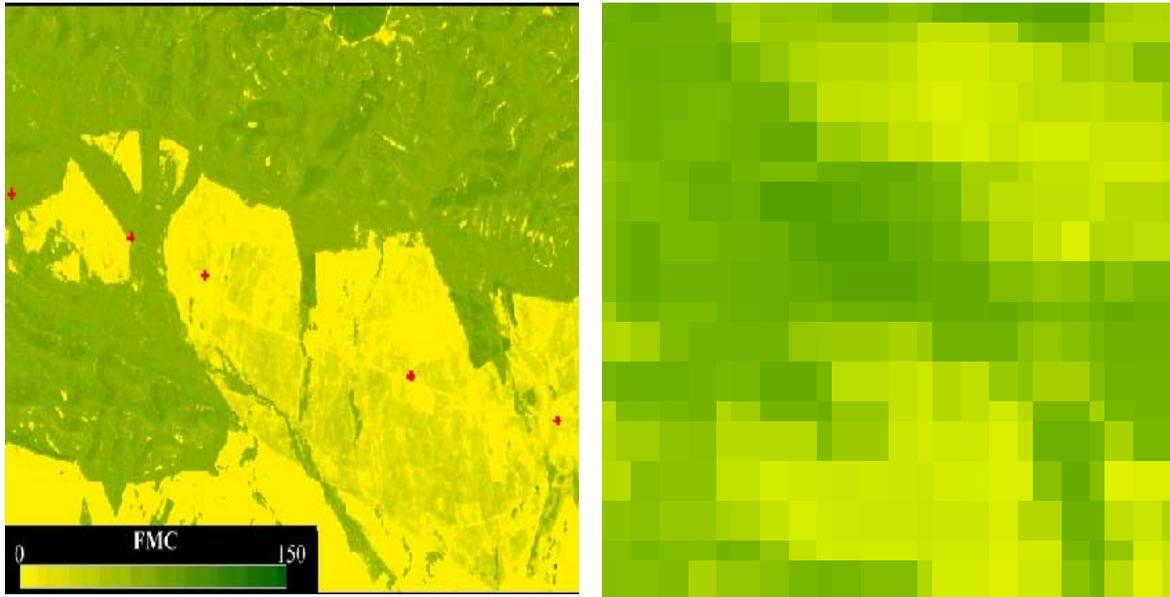


Figura 5. Ejemplo de mapas de CH generados a partir de teledetección: Izquierda (Landsat-TM de julio de 1998. En puntos rojos se indica la localización de las parcelas de muestreo); Derecha (NOAA-AVHRR, julio de 1999).