

EVALUACIÓN DE IMÁGENES NOAA-AVHRR Y TERRA-MODIS PARA CARTOGRAFÍA REGIONAL DE ÁREAS QUEMADAS

EMILIO CHUVIECO¹, MARÍA PILAR MARTÍN² Y GEMMA VENTURA¹

¹ Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá -C/ Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares
e-mail: emilio.chuvieco@uah.es; gemma.ventura@uah.es

² Instituto de Economía y Geografía, C.S.I.C. - C/ Pinar 25, 28006 Madrid
e-mail: mpilar.martin@ieg.csic.es

Palabras clave: NOAA-AVHRR, Terra-MODIS, Incendios forestales, España

RESUMEN

La cartografía de áreas quemadas a partir de la teledetección se ha desarrollado notablemente en los últimos años, gracias al creciente interés por obtener una evaluación global de las áreas afectadas por incendios (Ahern *et al.*, 2001; Chuvieco y Martín, 1994). Con este enfoque global, el sensor más utilizado ha sido el NOAA-AVHRR, gracias a su buena resolución espectral y adecuada frecuencia temporal, si bien en los últimos años se han introducido nuevos sensores, como el ATSR, a bordo del satélite europeo ERS, que ha sido la base del world fire web (Piccolini y Arino, 2000), y más recientemente el Terra-Modis, que cuenta con una resolución espectral muy detallada para este tipo de estudios (<http://modis-fire.gsfc.nasa.gov/>).

En este trabajo comparamos las posibilidades de los canales MODIS, comprendidos entre 0,4 y 2,5 micras, y los correspondientes a la nueva versión del sensor NOAA-AVHRR/3 para cartografiar áreas quemadas en la Península Ibérica. El análisis se realiza con imágenes del verano de 2001. En el texto se comentan los resultados de algunas técnicas de separabilidad estadística y se presentan ejemplos de cartografía de áreas quemadas de la España peninsular. Se comparan los resultados entre AVHRR y Modis, verificándose mediante interpretación visual de imágenes Landsat-ETM+.

ABSTRACT

In the past few years, Burned area mapping has been developed remarkably, because of remote sensing and its suitability to produce accurate burned area estimates (Ahern *et al.*, 2001; Chuvieco y Martín, 1994). Globally, NOAA-AVHRR, with a high spectral resolution and adequate temporal frequency, represents the most common source or remotely sensed data for burned area mapping. But several new sensors such as ATSR, on board of ESA's European Remote Sensing Satellite ERS, which was the basis of the World Fire Web (Piccolini y Arino, 2000), and Terra-Modis, with higher spectral resolution may provide greater efficiency for these studies (<http://modis-fire.gsfc.nasa.gov/>).

In this paper, we compare the possibilities of MODIS channels, between 0,4 y 2,5µm, with NOAA-AVHRR/3 sensors for burned area mapping in the Iberian Peninsula. The analysis was developed using summer images from 2001. In the text, the results of some techniques of statistical separability are explained and some examples of burned areas analysis from the Iberian Peninsula are presented. Moreover, a comparison between AVHRR and Modis results has been done by verifying the data with visual interpretation from Landsat-ETM+ images.

1. TELEDETECCIÓN Y ÁREAS QUEMADAS

Un sistema de gestión integral de incendios forestales requiere disponer de bases de datos suficientemente precisas y actualizadas de las áreas afectadas por incendios forestales. Esto permitiría a los gestores una comprensión más global de los factores de riesgo, así como de los mecanismos relacionados con la regeneración de las zonas quemadas (Koutsias y Karteris, 1998). La cartografía operativa de áreas quemadas requiere disponer de métodos consistentes, fiables y rápidos que permitan obtener resultados en un margen relativamente corto de tiempo y a una escala espacial y temporal adecuada para la gestión.

Entre los medios actualmente disponibles, la teledetección desde satélite supone una de las técnicas más prometedoras para esta finalidad, gracias a proporcionar una cobertura espacial y temporal suficientemente

detallada, con información espectral sensible para separar áreas quemadas de otro tipo de coberturas. En consecuencia, el empleo de la teledetección con esta finalidad ha crecido notablemente en los últimos años (véase, por ejemplo, las referencias citadas en Chuvieco, 1999). Una clasificación simple de los artículos publicados permite señalar tres áreas de especial desarrollo:

- a) aplicación de nuevos sensores como el SPOT-Vegetation, DMSP-OLE y Terra-Modis, intentando resolver los problemas que han planteado hasta el momento las imágenes Landsat o NOAA (Fraser y Landry, 2000; Landry *et al.*, 1995).
- b) Desarrollo y adaptación de métodos de tratamiento novedosos para discriminar las áreas quemadas de otras cubiertas. Entre ellos cabe citarse la interferometría radar, las técnicas de desmezclado espectral, las de análisis multitemporal y la regresión logística (Bruzzone y Fernández-Prieto, 2000; Fraser *et al.*, 2000; Koutsias y Karteris, 1998; Koutsias *et al.*, 2000).
- c) Generación de nuevos índices, mejor adaptados al área quemada que los tradicionales. Estos índices se han basado en análisis de laboratorio, con espectro-radiometría, o en datos extraídos de imágenes reales, tanto Landsat-TM como NOAA-AVHRR (López y Caselles, 1991; Martín, 1998; Pereira, 1999; Trigg y Flasse, 2001)

En escalas globales, abarcando todo el planeta o una parte considerable de él, el sensor más utilizado ha sido el NOAA-AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), gracias a contar con una magnífica cobertura temporal, aunque presenta una resolución espacial y espectral poco apropiada para estos estudios. Más recientemente, las imágenes del sensor ATSR (*Along-Track Scanning Radiometer*), a bordo del satélite ERS, han permitido generar una cartografía global de focos activos, que resulta la base para un sistema de consulta disponible en Internet (<http://shark1.esrin.esa.it/ionia/FIRE/AF/ATSR/>). También resulta muy destacable la puesta en órbita del sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo de los satélites Terra y Aqua, que ya dispone de diversos productos operativos en relación al inventario global de áreas quemadas (<http://modis-fire.gsfc.nasa.gov/>), y el reciente lanzamiento del MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) a bordo del Envisat, que permitirá utilizar tecnologías hiperespectrales para la determinación de áreas quemadas.

2. OBJETIVOS

En este trabajo se pretende comparar el rendimiento de las imágenes AVHRR/3, tomadas por el satélite NOAA, con las del Terra-Modis, de cara a cartografiar áreas quemadas en grandes incendios forestales. El trabajo se aplica a espacios mediterráneos, aunque podría extenderse a otros ecosistemas con similares patrones de comportamiento y efectos del fuego.

3. MÉTODOS

3.1. Procesamiento de las imágenes

En primer lugar, adquirimos imágenes NOAA-AVHRR y Terra-MODIS sobre toda la península ibérica para el verano de 2001. Las primeras se han tomado de la antena receptora HRPT instalada en nuestro departamento (<http://www.geogra.uah.es/NOAA/NOAA.htm>), mientras las imágenes MODIS se han descargado de la página web de la NASA que dedica a este sensor (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Las características espectrales y temporales de ambos sensores se incluyen en la tabla 1. Aunque el MODIS también cuenta con canales térmicos, para este trabajo sólo hemos utilizado las bandas de reflectividad (1 a 7), ya que cuentan con mejor resolución espacial (500m frente a 1000 de los otros canales).

Las imágenes MODIS fueron pre-procesadas por NASA, incluyendo la geo-referenciación, conversión a valores de reflectividad y compuestos multitemporales. Por su parte, las imágenes AVHRR fueron georeferenciadas a proyección UTM utilizando un modelo orbital disponible en el software de nuestra estación receptora. Además, mejoramos el ajuste multitemporal entre ellas empleando un programa de corrección semiautomática mediante estereocorrelación basada en una librería de ventanas de puntos de control. Antes de abordar la corrección geométrica, los valores digitales brutos fueron convertidos a reflectividad y temperatura de brillo empleando los coeficientes de calibración proporcionados por la NOAA.

Tabla 1: Características de los sensores AVHRR y MODIS

Canales		AVHRR ¹	MODIS ²
1	Longitud de onda (µm)	0.58 – 0.68	0.62 – 0.67
2		0.72 – 1.10	0.841 – 0.876
3		1.58 – 1.64	0.459 – 0.479
4		10.3 – 11.3	0.545 – 0.565
5		11.5 – 12.5	1.23 – 1.25
6			1.628 – 1.652
7			2.105 – 2.155
Resolución espacial		1.1 x 1.1 km	500 x 500 m

(1) Paso diario de AVHRR/3

(2) Solamente se han procesado los primeros canales con mayor resolución

3.2. Generación de compuestos multitemporales

Un aspecto de gran importancia en el análisis de imágenes de alta frecuencia temporal es la eliminación de nubes, sombras u otros artefactos que pueden ser originados por las variaciones diarias en los ángulos de observación. Como es sabido, el sensor AVHRR tiene un ciclo de 9 días, pero adquiere imágenes diarias, lo que supone que los píxeles de la misma zona se adquieren con distintos ángulos de observación en una serie temporal. Varios autores han mostrado la importancia de los efectos angulares en la reflectividad de un determinado píxel, evidenciando el interés de aplicar correcciones que tengan en cuenta esos efectos bidireccionales (Sandmeier y Itten, 1999). Aunque estamos trabajando en esta línea, analizando la aplicación operativa de distintos modelos disponibles en la literatura (Cihlar *et al.*, 1994; Shepherd y Dymond, 2000), en este punto del proyecto no parecía oportuno introducir estas correcciones, por lo que resultaba necesario optar por realizar compuestos de imágenes diarias. Estos compuestos, además, permiten eliminar o reducir el efecto de nubes y de sombra de nubes, tan importante en lo que atañe a la cartografía del área quemada.

Para las imágenes MODIS estas correcciones ya están incluidas en el producto estándar que facilita la NASA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/accuracy/mod09.html>), por lo que no serán aquí tratadas. En cuanto a nuestras imágenes AVHRR, hemos empleado diversos métodos de la obtención de compuestos temporales. En la literatura especializada, el método más empleado, sin duda, está basado en elegir, para cada serie temporal (normalmente entre 8 y 16 días) los valores correspondientes al día en el que el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) tenga un valor más alto (Holben, 1986). Varios autores han mostrado que esta técnica no es muy apropiada para discriminar áreas quemadas, ya que estas superficies tienen un NDVI muy bajo, por lo que elegir el día con el NDVI máximo tenderá a seleccionar siempre el píxel no quemado (incluso una nube encima de un incendio, si la hubiere), obteniéndose una imagen poco nítida de las áreas quemadas (Martín y Chuvieco, 1998; Pereira *et al.*, 1999). Alternativas a este criterio pueden ser elegir el día con la máxima temperatura de la serie, lo que elimina píxeles nubosos y con sombra, seleccionado preferentemente lo quemado sobre la vegetación sana en áreas de borde, o el mínimo del albedo, que elimina el problema de nubes y áreas fronterizas, pero no el de sombras. En cualquier caso, ambos criterios (junto al max NDVI) no garantizan seleccionar los ángulos de observación más verticales.

Para este trabajo, hemos aplicado diversas técnicas de composición multitemporal de imágenes diarias, en series de ocho días, comparando resultados con otras más convencionales. Hemos tratado de combinar dos criterios, para solventar los problemas que maximizar una sola banda presenta. Desde el punto de vista de la coherencia espacial, los resultados más adecuados se han obtenido seleccionando, entre los tres días con máxima temperatura de brillo del canal 4, el que tuviera el mínimo ángulo de barrido. El problema de este criterio es que no resuelve completamente la cobertura de nubes y las sombras. Para estos dos problemas, se ha visto más recomendable seleccionar entre los tres días con máxima temperatura el que tuviera el mínimo albedo del canal 2, o entre los tres días de mínimo albedo el que tuviera la máxima temperatura. Estas opciones, más la mezcla de temperatura y ángulo de observación, mejoran la observación del área quemada sobre el compuesto tradicional del máximo NDVI (figura 1).

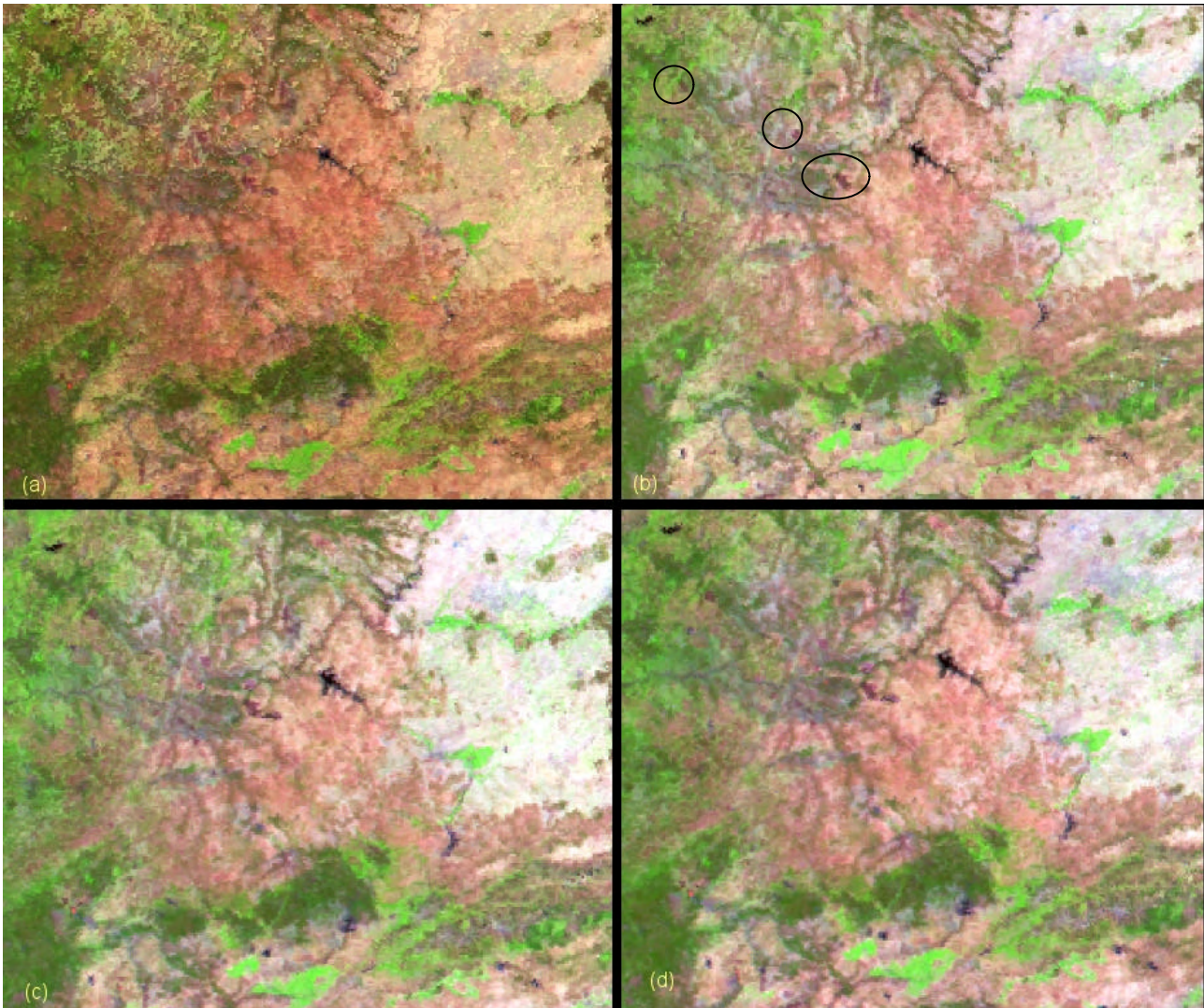


Figure 1: *Compuestos multitemporales sobre un sector occidental de la frontera España-Portugal: (a) Máx NDVI, (b) 3maxB4, min observación; (c) 3maxB4, minB2; (d) 3minB2, maxB4. Compárese el contraste para área quemada (círculos) entre distintos compuestos.*

3.3. Capacidad de discriminación de áreas quemadas

Hemos planteado La cartografía de áreas quemadas en dos fases: en la primera se identificarían incendios, mientras en la segunda se delimitaría con precisión las áreas quemadas en cada uno. En la primera fase se pretende discriminar, en un ámbito regional (en nuestro caso, el conjunto de la península ibérica) al menos un píxel dentro de cada recinto quemado, mientras en la segunda se intenta delimitar con mayor precisión el área afectada por el fuego en cada uno de los incendios detectados en la fase anterior. La ventaja de este doble enfoque es contextualizar espacialmente el análisis del área quemada, que puede tener niveles de daño muy variados y, por tanto, señales espectrales bastante heterogéneas, dejando la primera fase para delimitar únicamente aquellos píxeles más nítidamente quemados. Esto evita posibles errores de omisión o comisión (píxeles no identificados como fuego, cuando lo son, o viceversa), que suelen caracterizar los estudios donde se aplican criterios globales a un área suficientemente grande.

Las bandas que hemos utilizado para el estudio son las 7 no térmicas del MODIS, por un lado, y las 5 originales del AVHRR. Además, hemos calculado los siguientes índices:

- NDII: definido inicialmente para analizar concentraciones de humedad en plantas (Hunt y Rock, 1989), a partir de las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del medio de onda corta (SWIR):

$$NDII = \frac{\tilde{n}_{NIR} - \tilde{n}_{SWIR}}{\tilde{n}_{NIR} + \tilde{n}_{SWIR}}$$

- BAI: índice de área quemada, definido específicamente para imágenes AVHRR (Martín y Chuvieco, 1998) a partir de las bandas infrarrojo cercano y rojo:

$$BAI = \frac{1}{(pc_r - r_r)^2 + (pc_{nir} - r_{nir})^2}$$

donde pc_r y pc_{nir} son los denominados valores de convergencia para áreas recientemente quemadas. Se han definido como 0.1 y 0.06, respectivamente.

Para evaluar la capacidad discriminadora de las bandas y los índices derivados de las imágenes hemos utilizado la medida de la divergencia transformada (TD) y las distintas normalizadas (z). Ambas se miden como distancias entre área quemada y el resto de las categorías de cobertura del suelo. La distancia normalizada se define como:

$$Z_{ab} = (\mu_a - \mu_b) / (\hat{\sigma}_a - \hat{\sigma}_b)$$

donde μ_a es la media de la clase quemada y μ_b la media de cualquier otra clase, mientras $\hat{\sigma}_a$ y $\hat{\sigma}_b$ indican sus respectivas desviaciones típicas. Este índice se ha utilizado por varios autores para analizar discriminabilidad de bandas en cartografía de área quemada (Martín y Chuvieco, 2001; Pereira, 1999).

A partir de analizar estas medidas se seleccionaron las bandas más idóneas para discriminar áreas quemadas, teniendo como objetivo, como antes se indicó, los píxeles dentro de ellas que hubieran sido más intensamente quemados. La discriminación de estos píxeles se realizó utilizando umbrales múltiples sobre compuestos multitemporales adquiridos después del fuego. Se ha tomado como ejemplo, un compuesto realizado entre los días 5 y 12 de agosto de 2001. Los umbrales se aplican sobre las imágenes AVHRR y MODIS, para comparar posteriormente los resultados entre ellas.

Para evitar confusiones con algunas cubiertas con escasa probabilidad de quemarse (espacios agrícolas, urbanos, agua, etc.), el área discriminada a partir de umbrales ha sido posteriormente filtrada con una máscara de coberturas del suelo de interés forestal extraída del mapa CORINE.

4. RESULTADOS

4.1. Comparación visual entre imágenes AVHRR y MODIS

La figura 2 es un ejemplo de la diferencia de resolución existente entre la imagen MODIS con respecto a una imagen AVHRR, a la hora de discriminar áreas quemadas. Ambas imágenes están centradas en un incendio sufrido en la región de Mallos de Riglos, un área de gran interés cultural y ecológico en la provincia de Huesca. El incendio sucedió en agosto de 2001 y arrasó 3278 has.

Como es visible en la figura, el perímetro del incendio es claramente identificable en la imagen MODIS, a su vez se puede determinar fácilmente las diferencias existentes entre el área afectada y los alrededores de masa forestal no afectados. En el compuesto AVHRR igualmente podemos discriminar el área quemada, pero con mucha menos nitidez que en la imagen MODIS. El perímetro es más grosero de identificar y la distinción entre masa forestal quemada y no quemada mucho menor.

Con respecto a la calidad del color, la composición en ambas imágenes es muy similar, aunque la imagen AVHRR es más limitada a la hora de realizar discriminación entre píxeles. Siguiendo a varios autores (Koutsias *et al.*, 2000), hemos realizado composiciones en color incluyendo bandas en el SWIR (asignada al cañón rojo), IRC (cañón verde) y visible (cañón azul) dentro del rango espectral cubierto tanto por las imágenes AVHRR como por las MODIS.



Figura 2: de izquierda a derecha, MODIS (7/2/1) y AVHRR (3/2/1) composiciones en color de un incendio forestal (representado por un círculo blanco), el cual afecto a los Pre-Pirineos espanyoles durante la primera semana de Agosto de 2001. Es visible la ciudad de Zaragoza (parte inferior de la imagenes) y tambien la zona central del valle del Ebro.

4.2. Capacidad discriminadora de las bandas espectrales

En la Tabla 2 se representan los promedios de Z entre áreas quemadas y otras coberturas. Podemos ver que tanto en las imagenes MODIS como AVHRR, la banda del infrarrojo cercano (B2) es la que presenta mayor promedio, ello implica que esta banda es especialmente sensible a la hora de discriminar entre áreas quemadas y otro tipo de coberturas (principalmente vegetación vigorosa, como cultivos de riego, árboles frutales y algunas frondosas). MODIS presenta en general una mejor sensibilidad, mostrando mayores distancias en B2 y B5 (ambos en la parte más corta del infrarrojo). Es importante recordar que las bandas 4 y 5 de AVHRR son térmicas por lo que no corresponden al mismo rango espectral que cubre los canales de MODIS procesados en este trabajo.

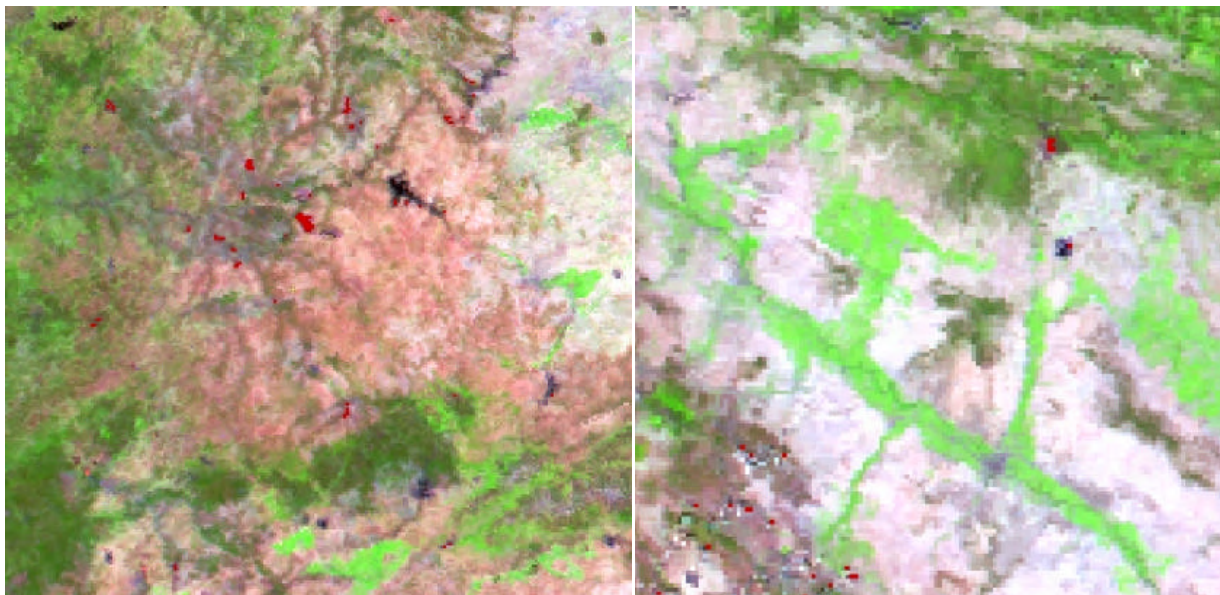
Tabla 2: Promedio de Z entre areas quemadas y otras 13 coberturas

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
MODIS	2.18	4.16	1.71	2.03	3.05	1.61	1.38
AVHRR	1.71	2.47	1.33	1.40	1.64		

En cuanto a los análisis empleando la divergencia promedio, las bandas que mejor separan el área quemada de otras cubiertas siguen siendo las correspondientes al infrarrojo cercano (B2 del AVHRR y MODIS). La más notable excepción es el agua, en donde las similitudes espectrales con espacios recientemente quemados son bastante elevadas. La banda 7 (centrada en el SWIR) del MODIS resulta la más adecuada para esta separación, mientras en AVHRR, únicamente las temperaturas proporcionan márgenes de separabilidad mayores, pero no definitivos. La solución, en este aspecto vendría dada por utilizar cartografía de cobertura del suelo como apoyo y generar una máscara no forestal previamente al proceso.

4.3. Discriminación de píxeles quemados sobre la imagen AVHRR

De las dos fases analizadas previamente para cartografía de áreas quemadas, destacamos en este artículo la dedicada a discriminar áreas quemadas de otro tipo de cubiertas. En este caso, se pretende eliminar las posibles confusiones con otras áreas de rasgos espectrales similares (agua, sino se eliminó previamente, suelos oscuros, zonas en sombra, mezclas de agua y otras cubiertas, etc.). El objetivo sería reducir al máximo los errores de comisión (píxeles no quemados identificados como tal en la imagen), mientras los



errores de omisión (píxeles quemados que no se identifiquen como tales) serían tratados con mayor detalle en la segunda fase del trabajo mediante algoritmos de contexto.

Figura 3: Píxeles discriminados como incendios (en color rojo) en dos ventanas de la imagen de la Península Ibérica correspondiente a los días 5-12 de agosto, 2001. A la izquierda, región fronteriza entre Portugal y España, a la derecha, un sector de los Pirineos y Valle del Ebro

Presentamos aquí los criterios empleados para las imágenes AVHRR, dejando para la siguiente fase los aplicados a la imagen MODIS. El punto de partida eran las bandas espectrales originales y los índices derivados a partir de ella, tal y como se describieron más arriba. Se emplearon umbrales múltiples, que permitieran seleccionar el área quemada a partir de unas magnitudes físicas. A partir de los análisis realizados previamente, se consideraron como índices más idóneos los basados en una combinación de la reflectividad del infrarrojo cercano ($0,7-1\mu\text{m}$) y el SWIR ($1,5-1,7\mu\text{m}$), concretamente el NDII, aunque también empleamos el BAI, al ser definido específicamente para área quemada. Ninguno de los dos ofrecía una discriminación clara, con importantes confusiones con suelos oscuros y agua. El empleo de los canales térmicos, y en concreto de la temperatura de brillo del canal4, redujo un tanto este problema, ya que el agua siempre ofrece valores más fríos que el de un área recientemente quemada. En consecuencia, empleamos tres umbrales, basados en el BAI, NDII y T4. Los umbrales de corte se establecieron a partir de la media y la desviación típica de píxeles de muestra tomados de áreas quemadas. Intentamos restringir esos umbrales, de cara a evitar, como ya dijimos, errores de omisión.

La figura 3 recoge los resultados de este proceso para dos ventanas de la Península Ibérica, distribuidas en el oeste y noreste. Los resultados parecen razonables y encajan bastante bien con

lo observado sobre imágenes Landsat-ETM de mayor resolución. No obstante, sobre la segunda imagen se observa el efecto de la sombra de las nubes, que no fue completamente resuelto con el criterio de composición de imágenes antes comentado.

4.4. Discriminación a partir de imágenes MODIS

A partir del análisis de separabilidad espectral antes comentado, vimos que la combinación de bandas más adecuada para discriminar áreas quemadas sobre el MODIS debería incluir la región del NIR y el SWIR, con más relevancia la B2 y B7. Como ya vimos, la primera destaca como la banda más discriminante en 7 de las 13 coberturas del suelo analizadas, mientras la banda 7 aparece como la de mejor discriminación en 10 de las 13 cubiertas cuando se consideran 2 bandas en lugar de una para el cálculo de la divergencia. Esto nos llevó a modificar el índice de área quemada (BAI) definido previamente para las imágenes AVHRR, insertando la información correspondiente al SWIR en lugar de la correspondiente al rojo. En esta línea se han manifestado las propuestas de otros autores, que consideran el SWIR como la región más idónea para discriminar áreas recientemente quemadas (Eastwood *et al.*, 2000; Koutsias *et al.*, 2000; Stroppiana *et al.*, 2002; Trigg y Flasse, 2001).

$$BAI_MODIS = 1 / (pc_{irc} - r_{irc})^2 + (pc_{swir} - r_{swir})^2$$

En definitiva, el nuevo BAI se definiría como:

Los nuevos valores de convergencia se generaron a partir de las propias imágenes MODIS y sobre todo a partir de los datos de campo obtenidos con el espectroradiómetro. Para la banda 2 se adaptó ligeramente el punto de convergencia del antiguo BAI ya que la banda IRC de MODIS es más estrecha que la de NOAA-AVHRR, y se sustituyó el valor de 0,06 por el de 0,08. En resumen los valores de pc_{irc} y pc_{swir} serían 0,20 y 0,08, respectivamente.

Para comprobar la validez del nuevo índice lo hemos aplicado a compuestos de imágenes MODIS obtenidos sobre la Península Ibérica durante el verano de 2001. Se ha utilizado como referencia el compuesto del 5 al 12 de agosto de ese año, ya comentado con las imágenes AVHRR, pues durante el mes de julio y principios de agosto se produjeron en España varios incendios de grandes dimensiones. El resultado ofrece valores de BAI_MODIS más altos para las zonas con un comportamiento espectral más similar en las bandas 2 y 7 a los fijados como puntos de convergencia. Se trata, por tanto de zonas con una alta probabilidad de haber sido afectadas por un incendio. La posterior segmentación de esta imagen en dos categorías (1 incendio y 0 no incendio) nos permite obtener una discriminación de los posibles incendios ocurridos en la zona. Para simplificar el método hemos utilizado un umbral simple sobre la imagen del BAI que selecciona como incendio todos los píxeles con un valor superior a 250. El resultado de esta discriminación aparece representado en la figura 4, recogiendo los mismos sectores comentados para la imagen AVHRR. Resulta especialmente relevante el hecho de que un único umbral sobre el BAI permite la discriminación de los incendios sin introducir, al menos aparentemente, una gran cantidad de ruido por confusión con otro tipo de cubiertas. Esto es evidente, por ejemplo al observar las zonas de agua presentes en las ventanas, que no han sido discriminadas como incendio, lo que significa que la incorporación de la banda SWIR al cálculo del índice ha mejorado sensiblemente su capacidad de discriminación entre áreas quemadas y láminas de agua, una de las confusiones más frecuentes en este tipo de aplicaciones. Por otra parte, los compuestos temporales son más estables que los generados para imágenes AVHRR, no observándose efectos de nubes, sombras de nubes o efectos direccionales de importancia.

El índice se ha aplicado a otros compuestos temporales del mes de julio para analizar su estabilidad temporal, obteniéndose igualmente muy buenos resultados.

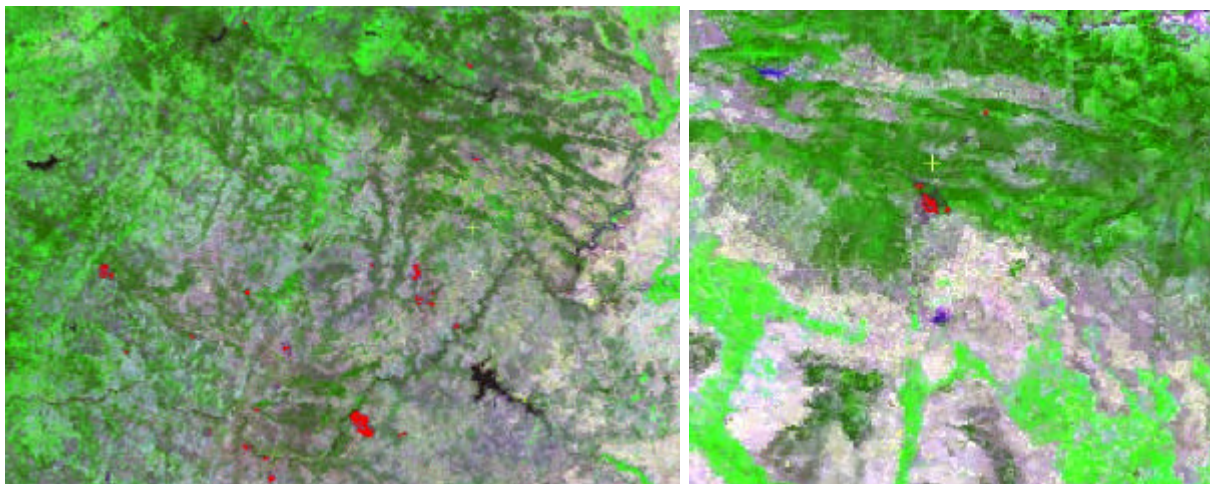


Figura 4: Píxeles discriminados como incendios (en color rojo) sobre imágenes MODIS de las mismas ventanas incluidas en la figura 3.

5. CONCLUSIONES

La comparación entre imágenes AVHRR y MODIS para cartografía de áreas quemadas resulta claramente más beneficiosa para este segundo sensor, ya que ofrece mejor resolución espacial y bandas mejor adaptadas a las características radiométricas de las áreas recientemente quemadas, especialmente las situadas en la región del SWIR, entre 1,5 y 1,7 μm . La confusión entre áreas quemadas y agua puede resolverse a partir de máscaras de cobertura del suelo externas, o a partir de la información térmica, en el

caso del AVHRR, mientras en el MODIS se puede basar en los canales del SWIR, mediante algún índice espectral sintético. Para el AVHRR, sin embargo, queda pendiente el efecto de los píxeles mixtos –con mezcla de agua y de tierra- que complican la detección y la propuesta de técnicas más sólidas para la generación de compuestos multitemporales, que eliminen el efecto de sombras, nubes y observaciones angulares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen enormemente el apoyo del proyecto SPREAD (Contract EVG1-2001-00043). Agradecer también a NASA por proveer las imágenes MODIS a través de *EOS Data Gateway Service*.

BIBLIOGRAFIA

Ahern, F. J., J. G. Goldammer y C. O. Justice (Eds.) (2001): *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a coordinated international effort*, The Hague, The Netherlands, SPB Academic Publishing.

Bruzzone, L. y D. Fernández-Prieto (2000): An adaptive parcel-based technique for unsupervised change detection. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 817-822.

Chuvieco, E. (Ed.) (1999): *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*, Berlin, Springer-Verlag.

Chuvieco, E. y M. P. Martín (1994): Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60: 563-570.

Cihlar, J., D. Manak y N. Voisin (1994): AVHRR bidirectional reflectance effects and compositing. *Remote Sensing of Environment*, 48: 77-88.

Eastwood, J. A., B. K. Plummer y B. K. Wyatt (2000): The potential of SPOT-Vegetation data for fire scar detection in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 3681-3687.

Fraser, B. H. y Z. L. Landry (2000): Spot Vegetation for characterizing boreal forest fires. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 3525-3532.

Fraser, R. H., Z. Li y J. Cihlar (2000): Hotspot and NDVI differencing synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest. *Remote Sensing and Environment*, 74: 362-376.

Holben, B. N. (1986): Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1417-1434.

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.

Koutsias, N. y M. Karteris (1998): Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 3499-3514.

Koutsias, N., M. Karteris y E. Chuvieco (2000): The use of intensity-hue-saturation transformation of Landsat-5 Thematic Mapper data for burned land mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66: 829-839.

Landry, R., F. Ahern y R. O'Neil (1995): Forest burn visibility on C-HH radar images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21: 204-206.

López, M. J. y V. Caselles (1991): Mapping Burns and Natural Reforestation Using Thematic Mapper Data. *Geocarto International*, 1: 31-37.

Martín, M. P. (1998): *Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR*, Departamento de Geografía, Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá.

- Martín, M. P. y E. Chuvieco** (1998): Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. *Serie Geográfica*, 7: 109-128.
- Martín, M. P. y E. Chuvieco** (2001): Propuesta de un nuevo índice para cartografía de áreas quemadas: aplicación a imágenes NOAA-AVHRR y Landsat-TM. *Revista de Teledetección*, 16: 57-64.
- Pereira, J. M., A. C. L. Sa, A. M. O. Sousa, M. P. Martín y E. Chuvieco** (1999): Regional-scale burnt area mapping in Southern Europe using NOAA-AVHRR 1 km data, en *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin* (editado por E. Chuvieco). Berlin, Springer-Verlag: 139-155.
- Pereira, J. M. C.** (1999): A comparative evaluation of NOAA-AVHRR vegetation indices for burned surface detection and mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37: 217-226.
- Piccolini, I. y O. Arino** (2000): Towards a Global Burned Surface World Atlas. *Earth Observation Quarterly*, 65: 14-18.
- Sandmeier, S. R. y K. I. Itten** (1999): A Field Goniometer System (FIGOS) for Acquisition of Hyperspectral BRDF data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37: 978-986.
- Shepherd, J. D. y J. R. Dymond** (2000): BRDF Correction of Vegetation in AVHRR Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 74: 397-408.
- Stroppiana, D., S. Pinnock, J. M. C. Pereira y J.-M. Grégorie** (2002): Radiometric analysis of SPOT-VEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 81: 1-17.
- Trigg, S. y S. Flasse** (2001): An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 2641-2647.