

Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM

David Riaño

Javier Salas

Emilio Chuvieco

Departamento de Geografía

Universidad de Alcalá

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

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

e-mail: david.riano@univ.alcala.es

e-mail; javier.salas@uah.es

e-mail; emilio.chuvieco@uah.es

Resumen

En este trabajo se evalúa la clasificación de modelos de combustible a partir de imágenes Landsat-TM con el algoritmo de máxima probabilidad. El ensayo incluye la clasificación de una sola imagen corregida atmosférica y topográficamente (verano 1997), el uso de dos imágenes -clasificación multitemporal- (verano 1997 y primavera 1998) y la inclusión de información auxiliar (banda de textura, altitud, pendiente e iluminación).

Los modelos de combustible utilizados son los propuestos en el marco del proyecto europeo Prometheus (Prometheus, 1999), que para nuestra zona de estudio son siete: uno de herbáceas (modelo 1), tres de matorral con distintas alturas (modelos 2-4) y tres de bosque con distintas alturas del sotobosque (modelos 5-7). La zona de estudio es el Parque Nacional de Cabañeros, donde se han localizado mediante GPS una serie de parcelas piloto con los distintos modelos de combustible. Dichas parcelas se han utilizado para ubicar los campos de entrenamiento y los puntos de verificación.

Con las correcciones atmosférica y topográfica sirven para que las variaciones en los modelos de combustible fueran independientes de la dispersión atmosférica y de las diferentes condiciones de iluminación. Los resultados obtenidos con la imagen de verano, utilizando las reflectividades de las bandas TM 1-5, ofrecen una fiabilidad del 58 %. Al utilizar las imágenes de primavera y verano la precisión aumenta al 67 %. Este resultado mejora hasta un 79 % al introducir datos de altitud, pendiente e iluminación. Finalmente, al incluir la textura y las bandas térmicas (TM6) la precisión llega al 83 %. Las mayores dificultades se presentan de cara a la discriminación entre las diferentes alturas del matorral y para identificar la presencia del matorral bajo el arbolado.

El ensayo realizado muestra el interés de utilizar correcciones radiométricas, información multitemporal e información auxiliar que faciliten la discriminación de los modelos de combustible utilizados.

1. Cartografía de modelos de combustible con teledetección

El trabajo pionero de Kourtz (1977) introdujo las principales técnicas de clasificación digital que se utilizarían en los años siguientes: clasificación supervisada (algoritmo de máxima probabilidad), no supervisada y componentes principales. Además, empleó imágenes de distintas fechas para retener la variabilidad temporal de los modelos de combustible. En la misma línea, Rabbi (1979) obtuvo una clasificación no supervisada de trece modelos de combustible en la que destacó la capacidad de las bandas Landsat MSS-5 y MSS-7 (rojo e infrarrojo cercano, respectivamente) para discriminar la vegetación. En este trabajo se exponía la necesidad de que las diferencias de iluminación fueran normalizadas, de cara a obtener una clasificación más precisa. El interés de abordar esta corrección topográfica de las imágenes se ha resaltado también por muchos otros autores (Cosentino *et al.*, 1981; Salas y Chuvieco, 1995; Salazar, 1982; Stow, 1993; Tymstra y Ellehoj, 1994; Yool *et al.*, 1984) en el ámbito de la cartografía de combustibles forestales.

En el marco del proyecto FIREScope, que surgió a consecuencia de una campaña especialmente catastrófica de incendios forestales en California, se realizaron importantes avances en la cartografía de modelos combustibles (Cosentino y Estes, 1981; Cosentino *et al.*, 1981; Yool *et al.*, 1984). Se comenzó a emplear la textura como variable auxiliar sobre la banda roja del Landsat MSS. En ese caso, la textura se definió a partir de la desviación típica de una ventana móvil de 3x3 píxeles. En estos trabajos se abordó una clasificación mixta, aplicando primero un análisis de conglomerados, y posteriormente una clasificación supervisada con el algoritmo de máxima probabilidad. Finalmente, también se emplearon otras variables auxiliares para diferenciar los combustibles, como la ocurrencia histórica del fuego, la precipitación y la topografía; estos dos últimos parámetros en un intento de modelizar la disponibilidad de agua e indirectamente la biomasa.

Shasby *et al.* (1981) propuso una clasificación mixta similar a la del proyecto FIREScope con una imagen MSS en la que se introducía la altitud, pendiente y orientación como variables auxiliares. Se basó en la idea de que las plantas se distribuyen en función de posiciones topográficas. A partir de este trabajo, resulta frecuente introducir la altitud en la discriminación de modelos (Burgan y Shasby, 1984; Miller *et al.*, 1986; Miller y Johnston, 1985; Root *et al.*, 1986; Salas y Chuvieco, 1995; Van Wangtendonk, 1997; Vasconcelos *et al.*, 1998; Werth *et al.*, 1985).

En el trabajo de Salazar (1982), se remarcó el interés de utilizar en esta cartografía los índices de vegetación, principalmente el verde/rojo y el infrarrojo/rojo. Esta autora identifica tres factores que afectan a la reflectividad de los modelos de combustible: el dosel vegetal, el suelo y la topografía. Dichos factores guardan relación con los componentes puros de vigor vegetal, suelo y sombra que utiliza posteriormente Roberts *et al.* (1997), junto con el mapa de vegetación obtenido a partir del análisis de mezclas espectrales, para obtener el mapa de combustibles. Esta idea de generar primero un mapa de vegetación y, posteriormente, la cartografía de los modelos de combustible se emplea también por muchos otros autores (Agee y Pickford, 1985; Benson *et al.*, 1982; Burgan *et al.*, 1998; Roberts *et al.*, 1997; Root *et al.*, 1986). El mapa de vegetación se complementa con datos auxiliares (ocurrencia histórica del fuego, mapa de suelos, altitudes, trabajo de campo, etc.) para obtener el mapa de modelos de combustible.

El análisis multitemporal, puede servir como herramienta para solucionar problemas de confusión entre combustibles (Dixon *et al.*, 1984), no ya sólo analizando el estado de la vegetación en distintas estaciones del año, sino también recogiendo la variabilidad interanual. Esta técnica es de interés para la cartografía de modelos de combustible con sensores de baja resolución espacial y alta resolución temporal, como las imágenes NOAA, ya que su bajo coste de adquisición y la mayor

probabilidad de encontrar imágenes libres de nubes, permiten procesar un mayor número de imágenes. Miller y Johnston (1985) y Miller et al. (1986) utilizaron el índice de vegetación normalizado (NDVI) de imágenes de varias fechas para diferenciar once modelos mediante una clasificación no supervisada. McKinley et al. (1985), usando una técnica similar, realizaron una clasificación de los modelos de combustible para once estados de USA. Este trabajo lo ha continuado más recientemente Burgan et al. (1998) utilizando, además de la serie temporal del NDVI, información auxiliar y extensivo trabajo de campo.

Desde que Kourtz (1977) señalara la importancia de realizar estudios multitemporales sobre imágenes MSS, transcurre mucho tiempo hasta que otros autores se lanzaran a emplear esta técnica para la cartografía de combustibles. La ausencia de esta clase de trabajos quizás se deba al elevado precio de las imágenes de alta resolución espacial, como las Landsat. Stow (1993) emplea la transformación Tasseled-Cap (Crist y Cicone, 1984), extrayendo los componentes de brillo, verdor y humedad de imágenes TM, para explicar las características espectrales de los modelos de combustible en distintas épocas del año. Para esta tarea realiza una corrección atmosférica equiparando los Niveles Digitales (ND) de una serie de imágenes a una imagen de referencia. Van Wangtendonk (1997) realiza una clasificación no supervisada de tres tipos de combustibles, utilizando el NDVI de seis fechas. En un trabajo posterior (Van Wangtendonk y Root, 1999) calcula tres componentes puros (herbáceas, árboles de hoja perenne y sombra) a partir de las seis imágenes y los usa para evaluar la variabilidad interestacional, relacionándolos con tres tipos de combustibles.

Como hemos visto, las principales técnicas de clasificación de modelos de combustible han sido la clasificación supervisada (con el algoritmo de máxima probabilidad), la clasificación no supervisada y la clasificación mixta. La aplicación de nuevos clasificadores se presume como una de las posibles piezas clave para obtener resultados más precisos (Wilson *et al.*, 1994). En este contexto, Vasconcelos et al. (1998) emplean redes neuronales para cartografiar siete modelos de combustible.

La mayoría de los estudios consultados sólo utilizan las bandas de la región visible y los infrarrojos cercano y medio, si bien, puede resultar interesante el uso de otras regiones del espectro. En general, los autores no consideran al gradiente de temperatura como una capa de interés temático para discriminar combustibles (Salas y Chuvieco, 1995) y por lo tanto el canal térmico se ve excluido a la hora de realizar la clasificación. Sin embargo, Agee y Pickford (1985) resaltan la importancia de este factor a la hora de diferenciar los principales tipos de combustible. Por otro lado, existen varios trabajos que proponen el uso de las microondas. Kyun (1997) compagina el radar (ERS1-SAR) y los datos ópticos del TM, con la idea de introducir información sobre la estructura de la vegetación. Los resultados de su clasificación supervisada no mejoran sobre los que tienen en cuenta sólo la imagen TM, debido en principio a la dificultad de corregir el efecto topográfico en las imágenes radar.

Los sensores tradicionalmente empleados para la cartografía de modelos de combustible han sido primero Landsat-MSS (Agee y Pickford, 1985; Benson *et al.*, 1982; Burgan y Shasby, 1984; Cosentino, 1977; Cosentino y Estes, 1981; Cosentino *et al.*, 1981; Dixon *et al.*, 1984; Kourtz, 1977; Miller y Johnston, 1985; Ow *et al.*, 1993; Rabii, 1979; Root *et al.*, 1986; Salazar, 1982; Shasby *et al.*, 1981) (Willis, 1985; Wilson *et al.*, 1994; Yool *et al.*, 1984) y posteriormente Landsat-TM (Campbell *et al.*, 1995; Castro y Chuvieco, 1998; Miller y Yool, 1999; Salas y Chuvieco, 1995; Stow, 1993; Van Wangtendonk, 1997; Van Wangtendonk y Root, 1999; Vasconcelos *et al.*, 1998; Vázquez y Denore, 1999). Esta efectividad del programa Landsat se debe a su alta resolución espacial (MSS, con 79 m y TM, con 30 m) y a su elevada resolución espectral, tras la llegada del sensor TM, que incorpora dos bandas en el infrarrojo medio, de gran utilidad para discriminar la vegetación.

Las imágenes SPOT se han utilizado también en alguna ocasión para la cartografía de modelos (Castro y Chuvieco, 1998; Solana *et al.*, 1999). El SPOT-Pan (10 m de píxel) se ha empleado como apoyo en la clasificación de imágenes TM, para intentar discriminar mejor zonas con una distribución muy heterogénea de los modelos de combustible (Vázquez y Denore, 1999).

El radar ERS1-SAR se pretende utilizar para diferenciar distintas estructuras de la vegetación, ya que se presume puede cuantificar la cantidad de biomasa (Beaudoin *et al.*, 1995), lo que acompañado de otros sensores como TM, puede ayudar a mejorar la discriminación entre modelos de combustible (Kyun, 1997), una vez que se haya conseguido corregir adecuadamente el efecto topográfico.

En cuanto a sensores de baja resolución espacial, destaca el uso de NOAA-AVHRR (Burgan *et al.*, 1998; McKinley *et al.*, 1985; Miller *et al.*, 1986; Miller y Johnston, 1985; Werth *et al.*, 1985). El tamaño de sus píxeles (1 Km²) conlleva la mezcla de distintos tipos de combustible en un mismo píxel. Sin embargo, este sensor tiene la ventaja de que permite cartografiar grandes extensiones de territorio. Los resultados son útiles para la planificación, pero no para la supresión de incendios forestales.

Finalmente, también se han empleado, para realizar cartografía de modelos de combustibles (Roberts *et al.*, 1997), sensores hiperespectrales aerotransportados como el AVIRIS (con una altura de vuelo adecuada para obtener una resolución de 20 m), que representan el futuro de la nueva generación de satélites.

2. Objetivos

En este trabajo pretendemos elaborar un mapa de modelos de combustible del Parque Nacional de Cabañeros. Entre los objetivos más específicos se contaban:

- ✓ Selección de las bandas Landsat-TM con mayor capacidad para discriminar modelos, incluyendo tanto las originales, como las derivadas a partir de distintas técnicas: texturales, y las generadas a partir de modelos digitales del terreno (altitud, pendiente e iluminación).
- ✓ Evaluar la importancia de las correcciones radiométricas y topográficas en los resultados de la clasificación.
- ✓ Elaborar una metodología útil para la cartografía de modelos de combustible que pudiera ser extrapolable a otras áreas de estudio, con las ventajas que supone el empleo de la teledetección: bajo coste y cobertura global.
- ✓ Realizar un mapa de modelos de combustible que pudiera ser integrado en sistemas de prevención, predicción y modelado de incendios.

3. Metodología

El proceso seguido para obtener la clasificación digital se basó en las siguientes etapas (ver figura 1):

- ✓ Selección de las imágenes de satélite para la clasificación.
- ✓ Generación del modelo digital de elevaciones (MDE) y sus derivados (pendiente e iluminación) para ser utilizados en el proceso de corrección topográfica y como capas de información auxiliar para la clasificación.
- ✓ Corrección geométrica de las imágenes de satélite.
- ✓ Corrección del efecto atmosférico sobre las imágenes de satélite.
- ✓ Corrección del efecto topográfico, que conlleva una diferente iluminación en distintas zonas de las imágenes de satélite.
- ✓ Realización de trabajo de campo para llevar a cabo la selección de campos de entrenamiento en la clasificación digital y para su posterior verificación.
- ✓ Proceso de clasificación digital mediante el algoritmo de máxima probabilidad.

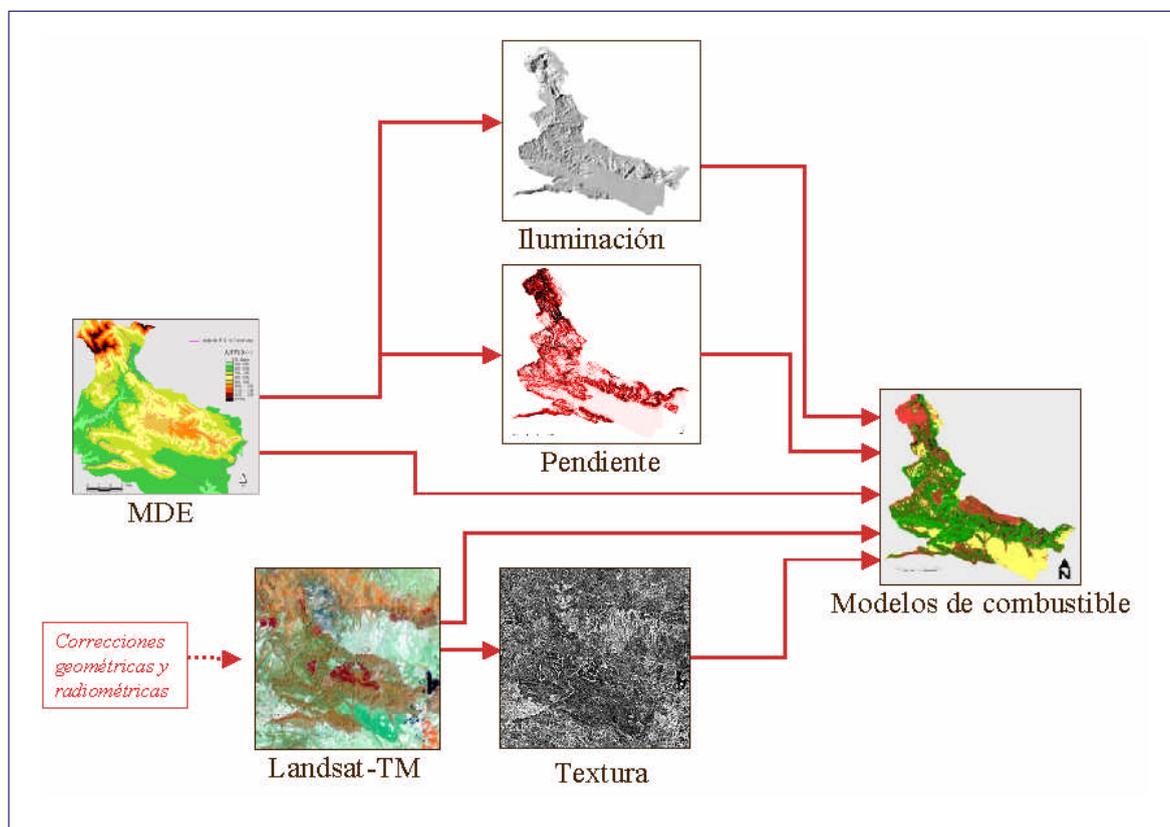


Figura 1. Esquema de la metodología desarrollada para la cartografía de modelos de combustible.

Se eligieron dos imágenes Landsat-TM, una de primavera (5 de Mayo de 1998) y otra de verano (21 de julio de 1997) para recoger la variabilidad fenológica de las especies, libres de nubes y con unas buenas condiciones de iluminación, por la elevada altura solar, con el fin de reducir el efecto topográfico en la medida de lo posible.

Generación del MDE

La generación del MDE se realizó partiendo de la digitalización manual de los mapas del Servicio Geográfico del Ejército a escala 1:50.000, con curvas de nivel con equidistancias de 20 m, para todo el Parque Nacional de Cabañeros y su perímetro de protección. La interpolación espacial para generar el MDE raster se llevó a cabo mediante el algoritmo de distancia transformada (Rosenfeld y Pfaltz, 1966). Este método se basa en la interpolación lineal. Previamente genera una curva de nivel intermedia entre dos curvas contiguas. Estas curvas intermedias, junto con las originales, se usan para la interpolación lineal. Este algoritmo minimiza el problema de collados o puntos de inflexión. El resultado se verificó mediante un muestreo sistemático de toda la zona interpolada, obteniéndose un error promedio de ± 9 m. Finalmente, el MDE se utilizó para generar el mapa de pendiente e iluminación.

Corrección geométrica

La corrección geométrica se realizó mediante la localización de 40 puntos de control, de los que se conocía su posición en la imagen que va a ser corregida y sus coordenadas en el mapa de referencia del Servicio Geográfico del Ejército a escala 1:50.000. Los puntos de control se situaron homogéneamente en zonas fácilmente identificables sobre el mapa y la imagen, no sujetas a dinamismo temporal. A estos puntos de control se les ajustó una ecuación o función de transformación de 2º grado entre la imagen sin corregir y el mapa o imagen de referencia. Finalmente, se transfirieron los ND a la nueva posición mediante interpolación bilineal. Una vez que se tuvo corregida una imagen se utilizó ésta como referencia y se realizó la corrección de la otra imagen. En la corrección imagen a imagen fue más fácil encontrar elementos coincidentes, lo que aseguró una buena superposición de ambas imágenes. El error en la corrección geométrica en ambos casos estuvo en torno a 0,5 píxeles.

Corrección atmosférica

La corrección atmosférica sirvió para intentar eliminar el efecto de la dispersión de la radiación electromagnética originada por parte de los gases y partículas en suspensión de la atmósfera, para que las variaciones en los modelos fueran independientes de las condiciones atmosféricas. Para ello se calculó la reflectividad mediante la ecuación (Chuvieco, 1996):

$$\rho_k = \frac{K\pi(L_{sen,k} - L_{a,k})}{\tau_{k,o}(E_{o,k} \cos \theta_i \tau_{k,i} + E_{d,k})} \quad (1)$$

Donde:

ρ_k = Reflectividad en la banda k.

K = Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas (1 UA = 1.49598 · 10⁸ Km, varía a lo largo del año entre 0.983 y 1.017 UAs).

$L_{sen,k}$ = Radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k (W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹).

$L_{a,k}$ = Radiancia atmosférica debida a la dispersión en la banda k (W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹).

$\tau_{k,o}$ = Transmisividad atmosférica para el flujo ascendente en la banda k.

$E_{o,k}$ = Irradiancia solar en el techo de la atmósfera en la banda k (W m⁻² μm⁻¹).

$\cos\theta_i$ = Coseno del ángulo cenital del flujo incidente (complementario del ángulo de elevación solar).

$\tau_{k,i}$ = Transmisividad atmosférica para el flujo descendente en la banda k.

$E_{d,k}$ = Irradiancia difusa atmosférica debida a la dispersión en la banda k (W m⁻² μm⁻¹).

El método de corrección aplicado fue el de la transmisividad de la atmósfera descendente por defecto (Chavez, 1996), que utiliza en la ecuación 1 los siguientes valores:

$L_{a,k} = a_{0,k} + a_{1,k} ND_{\min}$. El ND_{\min} del histograma en la banda k.

$\tau_{k,o} = \cos\theta_o$. Como $\theta_o = 0$; $\tau_{k,o} = 1$.

$\tau_{k,i} = 0.70, 0.78, 0.85, 0.91$ para TM1, TM2, TM3 y TM4, respectivamente. Para TM5 y TM7 se toman los valores obtenidos por Gilabert *et al.* (1994) (0.95 y 0.97).

$E_{d,k} = 0$. Ignora la irradiancia difusa.

Este método recurre al ND mínimo de cada banda como medida de la radiancia debida a la dispersión atmosférica, mientras que la transmisividad atmosférica para el flujo descendente se extrapola de experimentos físicos llevados a cabo sobre atmósferas reales sin cobertura nubosa.

Como resultado de la aplicación de la corrección atmosférica sobre las imágenes de satélite se verificó que la reflectividad de las dos imágenes era comparable entre sí al presentarse en ambos casos las siguientes características (PCI, 1997):

- ✓ La vegetación presenta un pico de reflectividad en el verde.
- ✓ La reflectividad del agua está entre 0-1% en las bandas TM4, 5 y 7.
- ✓ La reflectividad del suelo desnudo y del cemento debe incrementarse con el aumento de la longitud de onda.

Corrección topográfica

La corrección topográfica permitió compensar las diferencias de iluminación solar, debidas a la variación altitudinal del terreno. Las zonas de umbría presentaban menos reflectividad de lo que debieran, mientras que las zonas en solana presentaban una reflectividad más alta de lo esperado. Para realizar la corrección topográfica es necesario calcular la iluminación (IL), es decir, el coseno del ángulo de incidencia (γ_i):

$$IL = \cos \gamma_i = \cos \theta_p \cos \theta_i + \sin \theta_p \sin \theta_i \cos(\phi_a - \phi_o) \quad (2)$$

Donde:

θ_p = pendiente del terreno: La inclinación del terreno con respecto a la horizontal.

θ_i = ángulo cenital solar: El ángulo complementario de la elevación solar.

ϕ_a = ángulo azimutal solar: La dirección del sol con respecto al norte.

ϕ_o = ángulo de orientación: El ángulo existente entre el vector que señala el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto.

Se eligió un método de corrección topográfica semiempírico conocido como corrección-c (Teillet *et al.*, 1982):

$$\rho_H = \rho_T \left(\frac{\cos \theta_i + c_k}{IL + c_k} \right) \quad (3)$$

Donde:

$$c_k = \frac{b_k}{m_k}; \text{ Para: } \rho_T = b_k + m_k IL$$

Introduce un parámetro “ c_k ” que es el cociente entre la pendiente (b_k) y el término independiente (m_k) de la ecuación de regresión entre la ρ_T y la IL.

Tras realizar la corrección topográfica se verificó que se habían eliminado ciertas sombras que aparecían en las imágenes por la baja iluminación (ver figura 2). De esta manera se consiguió homogeneizar la variabilidad espectral dentro de cada uno de los modelos de combustible.

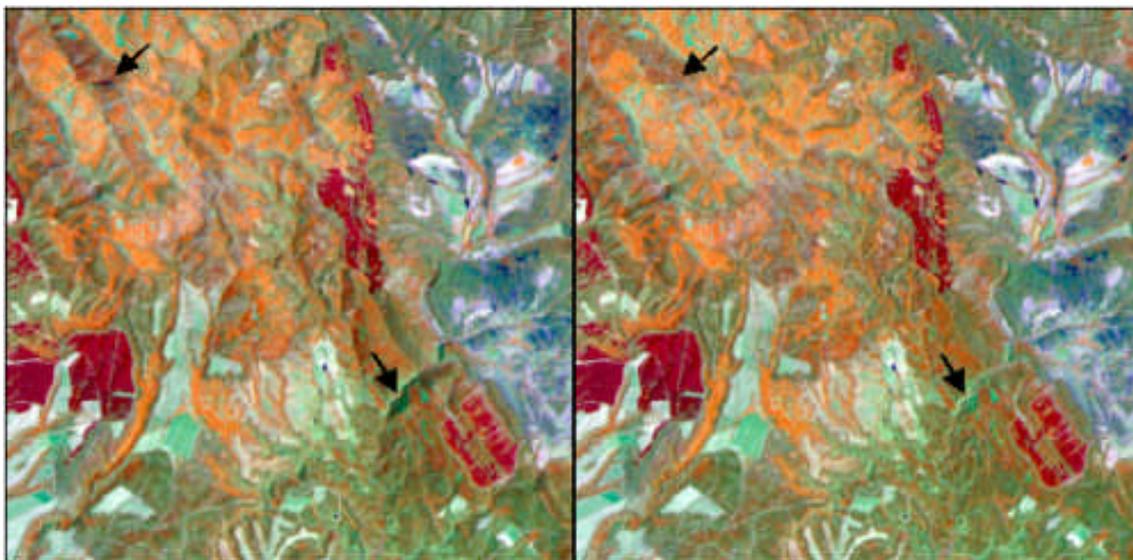


Figura 2. Detalle de la zona norte del Parque Nacional de Cabañeros antes (izquierda) y después de realizar la corrección topográfica (derecha). Las flechas señalan ejemplos de zonas donde la corrección ha sido eficiente. Composición en color TM4-5-3 de la imagen del día 21-7-97.

Trabajo de campo

Los modelos de combustible se definen como una representación matemática del estrato combustible con la inclusión de todos los parámetros necesarios para calcular ciertas variables relacionadas con el comportamiento del fuego, que normalmente son la velocidad de propagación y la intensidad del fuego (Deeming, 1975; Rothermel, 1972). Las características a tener en cuenta a la hora de definir un modelo están relacionadas con la altura y densidad de la vegetación.

El trabajo de campo consistió en seleccionar 102 parcelas homogéneas en cuanto al modelo de combustible se refiere, identificando dicho modelo de combustible en función de una clave fotográfica, cuyo esquema aparece en la figura 3, seleccionando parcelas suficientemente homogéneas, accesibles, con un número equilibrado de parcelas por cada uno de los modelos. La identificación se realizó según la descripción de los siete modelos de combustible propuestos en el proyecto europeo Prometheus:

- ✓ Modelo 1: Pasto.
- ✓ Modelo 2: Matorral (0.30-0.60 m).
- ✓ Modelo 3: Matorral (0.60-2.00 m).
- ✓ Modelo 4: Matorral (2.00-4.00 m).
- ✓ Modelo 5: Bosque sin combustibles de superficie (sin arbustos ni herbáceas).
- ✓ Modelo 6: Bosque con combustibles de superficie. Existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles.
- ✓ Modelo 7: Bosque con combustibles de superficie. No existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles (continuidad vertical).

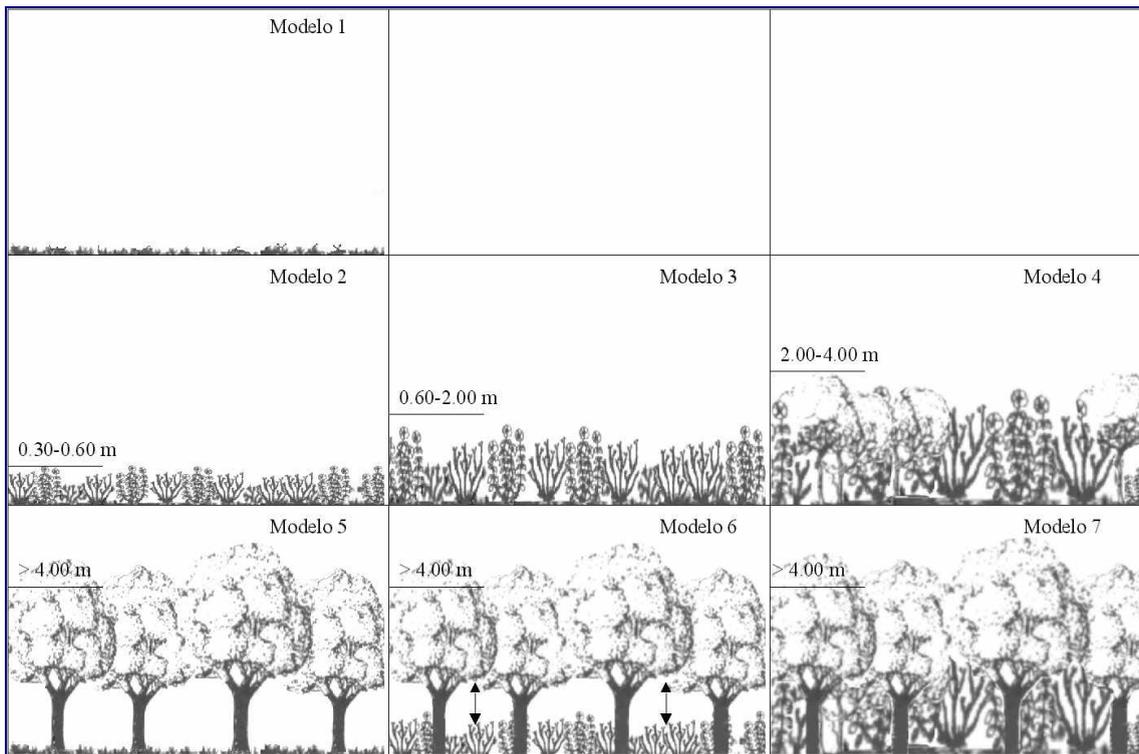


Figura 3. Esquema de modelos de combustible del proyecto Prometheus.

Cada parcela se localizó mediante un GPS tipo GARMIN, que ofrece una precisión de ± 100 m. Se distinguieron varias comunidades vegetales dentro de cada modelo. Además, se localizaron parcelas con pedrizas y se identificó sobre las imágenes el agua y el suelo desnudo. Se anotó para cada parcela las principales especies, la densidad, la cobertura, la altura, la pendiente, el ángulo de incidencia solar, las coordenadas y la fecha de adquisición.

Clasificación de la imagen

El proceso de clasificación digital se realizó contando con datos espectrales y espaciales, provenientes de las imágenes de satélite, e información auxiliar, extraída del MDE.

En cuanto a los datos reflectivos se refiere se excluyó la banda TM 7 de ambas imágenes ya que su información redundante hacía empeorar los propios resultados de la clasificación. La banda TM6 del infrarrojo térmico se transformó en valor de temperatura de superficie mediante la inversión de la ecuación de Planck (Wukelic *et al.*, 1989):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad (8.37.)$$

Donde:

$$K_1 = 60.78 \text{ mW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}.$$

$$K_2 = 1260.56 \text{ K.}$$

L = Radiancia espectral recibida por el sensor en el infrarrojo térmico.

La variabilidad espacial se evaluó midiendo la homogeneidad en la banda TM3 de la imagen de verano en una ventana móvil de 3x3 píxeles, mediante el cálculo de la matriz de coincidencias (PCI, 1997). En esta matriz se miden las veces que un ND está al lado de otro igual.

Como información auxiliar se incluyó en el proceso de clasificación el MDE y las variables derivadas de éste, como son la pendiente y la iluminación.

A la hora de definir los campos de entrenamiento hay que intentar que cada uno de los modelos de combustible presente unas características espectrales homogéneas, de tal manera que no se confunda con el resto de modelos de combustible. Con este propósito se diferenciaron 19 categorías con ND homogéneos:

- ✓ 1. Pedrizas.
- ✓ 2. Suelo desnudo.
- ✓ 3. Láminas de agua.
- ✓ 4. Modelo 1: Cultivo.
- ✓ 5. Modelo 1: Pastizal.
- ✓ 6. Modelo 1: Dehesa (con mayor cantidad de árboles que los dos modelos anteriores, que pueden llegar a ocupar el 25 %).
- ✓ 7. Modelo 2: Nanojaral-brezal.
- ✓ 8. Modelo 2: Nanojaral sobre pizarras.
- ✓ 9. Modelo 3: Madroñal en proceso de regeneración tras un incendio.
- ✓ 10. Modelo 3: Jaral y jaral-brezal
- ✓ 11. Modelo 4: Jaral, jaral-brezal y madroñal.
- ✓ 12. Modelo 4: Rebollar de bajo porte.
- ✓ 13. Modelo 5: Pinar.
- ✓ 14. Modelo 5: Alcornocal y encinar.
- ✓ 15. Modelo 5: Rebollar y quejigar.
- ✓ 16. Modelo 6: Pinar.
- ✓ 17. Modelo 6: Rebollar y quejigar.
- ✓ 18. Modelo 7: Bosque mixto.
- ✓ 19. Modelo 7: Rebollar.

Estas clases espectrales, tras la fase de asignación, se agruparon en los 7 modelos de combustible de la leyenda Prometheus que pretendíamos incluir en el mapa resultado.

El algoritmo empleado para la asignación fue el de máxima probabilidad, asignándose cada píxel a la categoría que maximice su probabilidad.

4. Resultados

La verificación de la cartografía de modelos de combustible se apoyó en el trabajo de campo realizado. Se muestrearon 102 parcelas, de tal manera que se escogió un total de 9 píxeles por parcela. Los alrededores de cada una de parcelas de muestreo se utilizó como campo de entrenamiento, mientras que la zona central de estas parcelas de muestreo se empleó en la verificación. Es decir, que se buscó la independencia entre el proceso de clasificación y el de verificación.

Los resultados de la clasificación con la imagen de verano, utilizando las reflectividades de las bandas TM 1-5, ofrecieron una fiabilidad del 58 %. Al utilizar las imágenes de primavera y verano la precisión fue del 67 %. Este resultado mejoró hasta un 79 % al introducir datos de altitud, pendiente e iluminación. Finalmente, al incluir la textura y las bandas térmicas (TM6) la precisión llegó a ser del 83 % (ver figura 4).

El proceso de clasificación proporcionó la distinción de las 19 categorías espectrales que se agruparon en los 7 modelos finales, más una categoría denominada "sin combustible", que identifica las láminas de agua y las pedrizas. Los resultados obtenidos de la clasificación se suavizaron mediante un filtro modal, asignando a cada píxel el valor de la moda de una ventana móvil de 3x3 píxeles.

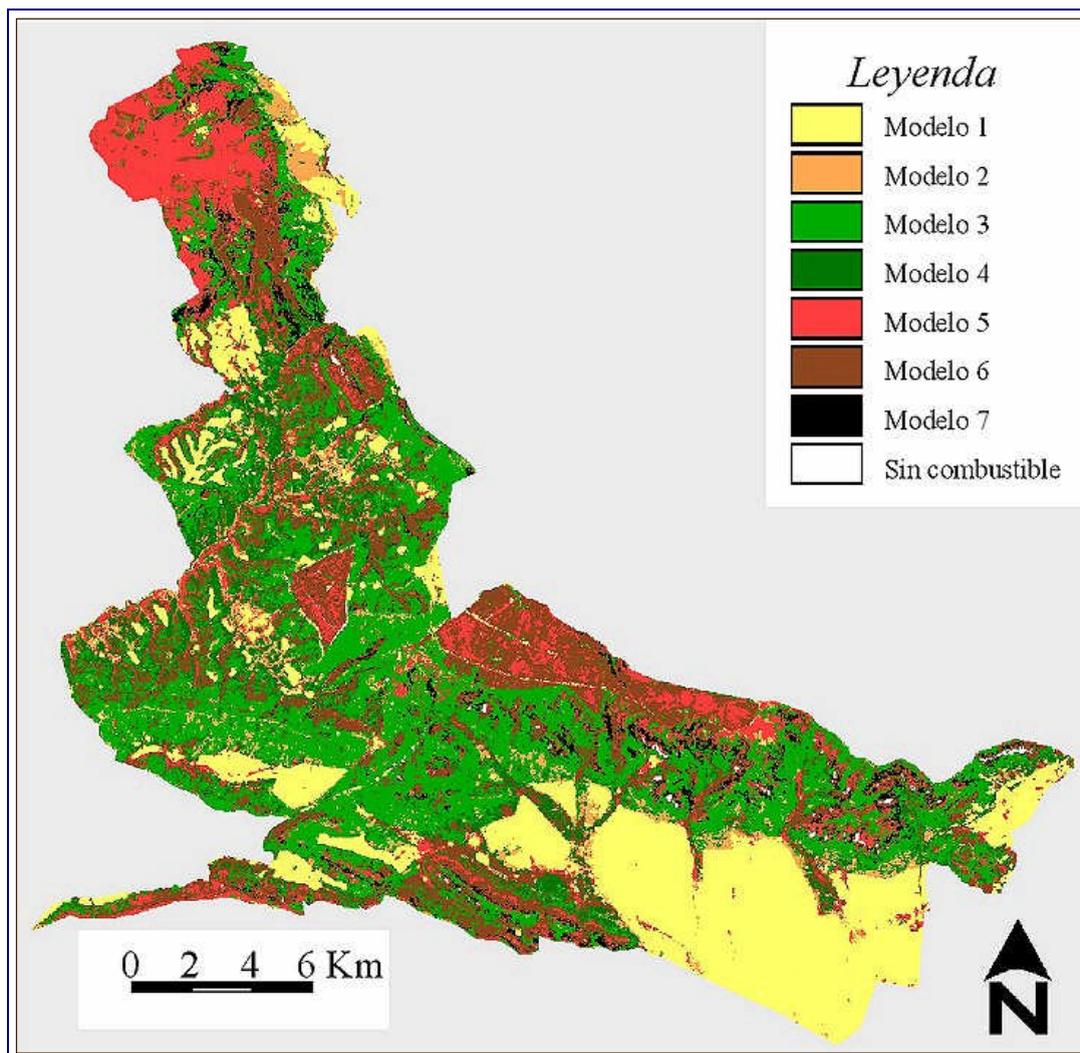


Figura 4. Mapa de modelos de combustible.

La zona norte de Cabañeros está dominada por modelos de arbolado 5, 6 y 7. El modelo 7 prevalece, sobre todo, en las zonas de densidad no muy alta de arbolado, donde puede llegar la luz para el crecimiento del matorral. El modelo 5 se corresponde normalmente con las zonas de repoblación o vegetación autóctona donde se han llevado a cabo trabajos forestales y pastoreo o donde el avanzado estado de la sucesión impide el paso de la luz necesaria para el desarrollo del sotobosque. El modelo 6 responde a zonas donde llega luz suficiente y se ha producido el abandono de la actividad forestal. El modelo 3 domina la mayor parte de Cabañeros y donde hay más disponibilidad de nutrientes y agua aparece el modelo 4. El modelo 2 se encuentra en zonas donde el suelo no está muy desarrollado, llegando a no haber combustible en las zonas de alta pendiente donde aparecen manchas formadas por pedrizas. Finalmente, el modelo 1 ocupa la mayor parte de la Raña.

La matriz de confusión de la clasificación final (ver tabla 1), con el 83 % de fiabilidad global muestra como las mayores dificultades se presentaron en la discriminación entre las diferentes alturas del matorral (modelos 2, 3 y 4) y para identificar la presencia del matorral bajo el arbolado (modelos 5 y 6).

Los modelos de matorral se distinguen fundamentalmente por la altura y densidad, estando compuestos por especies similares; de ahí que la mayores dificultades de distinción aparecieran entre el modelo 3 y los modelos 2 y 4. La confusión se redujo mucho entre el modelo 2 y 4, ya que la diferencia de alturas y densidades entre ambos modelos es mucho mayor.

Los modelos de arbolado presentaron su mayor problema a la hora de diferenciar entre el modelo 5 y 6. Estos dos modelos se distinguen por la presencia o no de sotobosque, lo que es difícil de identificar desde el espacio, debido a la presencia de los propios árboles. En las zonas de modelo 7 el espacio entre los árboles es mayor, con una mayor disponibilidad de luz para el crecimiento de matorral. Dentro de este modelo no aparecen pinares de repoblación. Ambas circunstancias, el mayor espaciado entre los árboles y la exclusión de los pinares, conllevaron su mejor distinción de los modelos 5 y 6.

Tabla 1. Matriz de confusión. Se muestran la exactitud del productor (Ex_p) y del usuario (Ex_u) y el error de omisión (E_o) y comisión (E_c).

| | | Datos de referencia | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|-------|------------|-----------|
| | Modelos de combustible | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Sin comb. | Total | Ex_u (%) | E_c (%) |
| Datos de la clasificación | 1 | 134 | 0 | 0 | 2 | 3 | 0 | 0 | 1 | 140 | 95.7 | 4.3 |
| | 2 | 0 | 34 | 14 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 51 | 66.7 | 33.3 |
| | 3 | 0 | 5 | 186 | 32 | 3 | 2 | 3 | 0 | 231 | 80.5 | 19.5 |
| | 4 | 0 | 1 | 19 | 105 | 0 | 5 | 2 | 0 | 132 | 79.5 | 20.5 |
| | 5 | 1 | 5 | 6 | 1 | 114 | 10 | 1 | 0 | 138 | 82.6 | 17.4 |
| | 6 | 0 | 0 | 9 | 9 | 14 | 127 | 5 | 0 | 164 | 77.4 | 22.6 |
| | 7 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 43 | 0 | 45 | 95.6 | 4.4 |
| | Sin comb. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 17 | 100.0 | 0.0 |
| Total | | 135 | 45 | 234 | 153 | 135 | 144 | 54 | 18 | 918 | | |
| Ex_u (%) | | 99.3 | 75.6 | 79.5 | 68.6 | 84.4 | 88.2 | 79.6 | 94.4 | | | |
| E_c (%) | | 0.7 | 24.4 | 20.5 | 31.4 | 15.6 | 11.8 | 20.4 | 5.6 | | | |

En lo que respecta a los errores de omisión, complementario de la exactitud del productor, la principal equivocación surgió con el modelo 4, lo que implica que este modelo fue definido de una manera imperfecta, es decir que su delimitación resultó excesivamente reducida (Chuvieco, 1996). Por otra parte, el mayor error de comisión, complementario de la exactitud del usuario, aparece en el modelo 2, por lo que se evidenció una definición de este modelo demasiado amplia.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha elaborado un mapa de modelos de combustible del Parque Nacional de Cabañeros, utilizando como herramienta básica la teledetección. Esta tarea se lleva a cabo mediante el análisis de dos imágenes de satélite Landsat-TM, un modelo digital de elevaciones y la realización de trabajo de campo.

El ensayo realizado muestra el interés de utilizar información multitemporal, información auxiliar y correcciones radiométricas y topográficas que faciliten la discriminación de los modelos de combustible utilizados.

La corrección atmosférica de las imágenes Landsat-TM sirvió para que se cumplieran una serie de patrones típicos en las imágenes. La corrección topográfica permitió homogeneizar los ND dentro de cada categoría eliminándose ciertos efectos de sombra. Ambas correcciones permitieron afrontar con garantías la clasificación de modelos de combustible.

Las bandas de las imágenes Landsat-TM más apropiadas para la discriminación de los modelos de combustible fueron la TM1 a la TM6. La textura y, sobre todo, las variables topográficas y la información multitemporal permiten incrementar la precisión de la clasificación.

El mapa de modelos de combustible generado puede ser integrado en los sistemas de prevención, predicción y modelado de incendios. Esta metodología podría ser útil para ser extrapolada a otras áreas de estudio.

Queda todavía por resolver el problema de poder identificar las diferentes alturas de la vegetación y la presencia de sotobosque. En esta línea de investigación podría ser interesante recurrir a otras técnicas como los lidar, sensores activos que trabajan con láser (Blair *et al.*, 1999).

6. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por los proyectos Control-Fire-Sat e Inflamm del Programa de la Comisión Europea Medio Ambiente y Clima (DG-XII). Deseamos expresar nuestro agradecimiento a las autoridades y guardería del P.N. de Cabañeros por la ayuda prestada en la realización del trabajo de campo.

7. Bibliografía

- Agee, J.K. y Pickford, S.G. (1985). Vegetation and fuel mapping of North Cascades National Park. Final Report. College of Forest Resources. Seattle.
- Beaudoin, A., Vidal, A., Desbois, N. y Debaux- Ros, C. (1995). Monitoring the water status of Mediterranean forest using ERS-1, to support fire risk prevention. *IGARSS '95 (Quantitative Remote Sensing for Science and Applications)*. Florence, Italy. pp. 963-965.
- Benson, A., Greenlee, J. y Langenheim, J. (1982). Assessment of Wildland Fuel Hazards in Big Basin Redwoods State Park, California. *5th International Symposium on Computer-Assisted Cartography*. Crystal City, Virginia. pp. 55--63.
- Blair, J.B., Rabine, D.L. y Hofton, M.A. (1999). The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 115-122.
- Burgan, R.E., Klaver, R.W. y Klaver, J.M. (1998). Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. *International Journal of Wildland Fire* 8 (3): 159-170.
- Burgan, R.E. y Shasby, M.B. (1984). Mapping broad-area fire potential from digital fuel, terrain, and weather data. *Journal of Forestry* 82: 228-231.
- Campbell, J., Weinstein, D. y Finney, M. (1995). Integrating Landsat TM imagery, GIS, and Behave for forest fire fuels mapping and fire behavior modeling on the camp Lejeune marine corps base. *ACSM-ASPRS Annual Convention*. Charlotte (North Carolina). pp. 365-373. (<http://www.wildfire.org/firelib/doc.html>).
- Castro, R. y Chuvieco, E. (1998). Modeling Forest Fire Danger From Geographic Information Systems. *Geocarto International* 13: 15-23.
- Chavez, P.S. (1996). Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62 (9): 1025-1036.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Editorial: Rialp. Madrid.
- Cosentino, M. (1977). Fuel mapping in relation to the management of brushlands and timberlands in Mendocino County, California. Space Sciences Laboratory. Berkeley.
- Cosentino, M.J. y Estes, J.E. (1981). Use of Landsat data to develop a fuels database for a wildland fire simulation model. *Pecora VII Symposium*. Sioux Falls. pp. 590-599.
- Cosentino, M.J., Woodcock, C., E y Franklin, J. (1981). Scene Analysis for Wildland Fire- Fuel Characteristics in a Mediterranean Climate. *15th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, MI. pp. 635-646.
- Crist, E.P. y Cicone, R.C. (1984). Application of the tasseled cap concept to simulated Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering of Remote Sensing* 50: 343-352.
- Deeming, J.E. (1975). Fuel models in the national fire danger rating system. *Journal of Forestry* 73 (6): 347-350.
- Dixon, R., Shipley, R. y Briggs, A. (1984). Landsat - a tool for mapping fuel types in the Boreal Forest of Manitoba. A pilot study. Manitoba Remote Sensing Center
- Fire Management and Communications Section
Canada Centre for Remote Sensing. Winipeg, Manitoba.

- Gilabert, M.A., Conese, C. y Maselli, F. (1994). An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images. *International Journal of Remote Sensing* 15 (10): 2065-2086.
- Kourtz, P.H. (1977). An application of Landsat digital technology to forest fire fuel type mapping. *11th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor. pp. 1111-1115.
- Kyun, I.A. (1997). Tratamiento digital de imágenes Landsat5-TM y ERS-1 SAR para la clasificación de modelos de combustible. Trabajo de investigación. Universidad de Alcalá de Henares. Alcalá de Henares. 141 pp.
- McKinley, R.A., Chine, E.P. y Werth, L.F. (1985). Operational fire fuels mapping with NOAA-AVHRR data. En: *Pecora 10. Remote sensing in forest and range resource management* Fort Collins. pp. 295-304.
- Miller, J.D. y Yool, S.R. (1999). Mapping Fuel Risk at the Los Alamos Urban-Wildland Interface. *The Joint Fire Science conference and Workshop - Crossing the Millenium: Integrating Spatial Technologies and Ecological Principles for a New Age in Fire Management*. Boise, Idaho.
- Miller, W.A., Howard, S.M. y Moore, D.G. (1986). Use of AVHRR data in an information system for fire management in the Western United States. *20th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Nairobi, Kenya. pp. 67-79.
- Miller, W.A. y Johnston, D.C. (1985). Comparison of Fire Fuel Maps Produced Using MSS and AVHRR Data. *Pecora 10. Remote sensing in forest and range resource management*. Fort Collins, Colorado. U.S. Geological survey. pp. 305-314.
- Ow, C.F.Y., McCaffrey, T.M. y Ghitter, G. (1993). Multispectral Classification of Fire Fuel Types in Wood Buffalo National Park. *16th Canadian symposium on remote sensing - Remote sensing: a tool for modelling and managing environmental changes*. Quebec, Canada. Canadian Remote Sensing Society. pp. 629-634.
- PCI (1997). *Using PCI software*. Editorial/Richmond Hill. Ontario (Canadá).
- Prometheus (1999). (<http://kentauros.rtd.algo.com.gr/promet/schedule.htm>).
- Rabii, H.A. (1979). An investigation of the utility of Landsat-2 MSS data to the fire-danger rating area, and forest fuel analysis within Crater Lake National Park. Oregon State University.
- Roberts, D., Gardner, M., Regelbrugge, J., Pedreros, D. y Ustin, S. (1997). Mapping the distribution of Wildfire fuels using AVIRIS in the Santa Monica Mountains. *Summaries of the Seventh JPL Airbone Earth Science Workshop*. Pasadena, California. Jet Propulsion Laboratory. pp. 345-352.
- Root, R.R., Stitt, S.C.F., Nyquist, M.O., G.S., W. y Agee, J.K. (1986). Vegetation and fire fuel models mapping of North Cascades National Park. *ACSM-ASPRS Annual Convention*. Washington, D.C. pp. 75-85.
- Rosenfeld, A. y Pfaltz, J.L. (1966). Sequential operations in digital picture processing. *Journal of the association for computing machinery* 13 (4): 471-494.
- Rothermel, R.C. (1972). A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels: Research Paper INT-115. USDA, Forest Service. Ogden, Utah.
- Salas, F.J. y Chuvieco, E. (1995). Aplicación de imágenes Landsat-TM a la cartografía de modelos combustibles. *Revista de Teledetección* 5: 18-28.
- Salazar, L.A. (1982). Remote Sensing Techniques Aid in Preattack Planning for Fire Management: Res. Paper PSW-162. USDA, Forest Service. Berkeley, CA.

- Shasby, M.B., Burgan, R.R. y Johnson, G.R. (1981). Broad area forest fuels and topography mapping using digital Landsat and terrain data. *Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium*. West Lafayette. Purdue University. pp. 529-538.
- Solana, J., Merino, S., Recio, F. y Jiménez, R. (1999). Modelización del riesgo de incendios y pérdidas a partir de imágenes Spot-XS, cartografía temática e información estadística. *Teledetección. Avances y Aplicaciones*. Albacete, España. Asociación Española de Teledetección. pp. 275-278.
- Stow, D.A. (1993). The role of Geographic Information Systems for landscape ecological studies. En: *Landscape Ecology and Geographic Information Systems* (Haines-Young, R., Green, D.R. y Cousins, S.H., (Eds)). Taylor and Francis. London. pp. 11-21.
- Teillet, P.M., Guindon, B. y Goodeonugh, D.G. (1982). On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 8 (2): 84-106.
- Tymstra, C. y Ellehoj, E.A. (1994). Fire behavior prediction fuel type mapping using the Alberta Vegetation Inventory. *8th Annual symposium on geographic information systems in forestry, environmental and natural resources management*. Vancouver, British Columbia. Polaris Conferences.
- Van Wangtendonk, J.W. (1997). Use of thematic mapper imagery to map fuel models. *13th Conference on Fire and Forest Meteorology*. Lorne, Australia. International Association of Wildland Fire.
- Van Wangtendonk, J.W. y Root, R.R. (1999). Hyperspectral analysis of multitemporal Landsat-TM data for mapping fuels in Yosemite National Park. *The Joint Fire Science conference and Workshop - Crossing the Millenium: Integrating Spatial Technologies and Ecological Principles for a New Age in Fire Management*. Boise, Idaho.
- Vasconcelos, M.J.P. et al. (1998). Regional fuel mapping using a knowledge based system approach. *III International Conference on Forest Fire Research - 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*. Coimbra. ADAI. pp. 2111-2123.
- Vázquez, M.F. y Denore, B.J. (1999). FOMFIS, un sistema para la cartografía de combustibles forestales a partir de imágenes de satélite de alta resolución. *Teledetección. Avances y Aplicaciones*. Albacete, España. Asociación Española de Teledetección. pp. 279-282.
- Werth, L.F., McKinley, R.A. y Chine, E.P. (1985). The use of wildland fire fuel maps produced with NOAA-AVHRR scanner data. En: *Pecora X Symposium* Fort Collins. pp. 326-331.
- Willis, M.J. (1985). Applications of Landsat imagery fo fire fuels mapping projects covering large geographic areas. *Pecora 10 Symposium. Remote Sensing in Forest and Range Resource Management*. Fort Collins, Colorado. pp. 394-395.
- Wilson, B.A. et al. (1994). Landsat MSS classification of fire fuel types in Wood Buffalo National Park, Northern Canada.
- Wukelic, G.Z., Gibbons, D.E., Martucci, L.M. y Foote, H.P. (1989). Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper thermal band. *Remote Sensing of Environment* 28: 339-347.
- Yool, S.R., Eckhardt, D.W., Cosentino, M.J. y Estes, J.E. (1984). A Geographic Information System approach to quantitative assessment of wildlife fuels. *ACSM-ASPRS Annual Convention*. Washington DC. pp. 792-801.

