

Artigo

Angela De Santis · Patrick Vaughan

Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas

Recibido: 17 Xaneiro 2009 / Aceptado: 2 Marzo 2009
© IBADER- Universidade de Santiago de Compostela 2009

Resumen La cartografía y discriminación de áreas quemadas por incendios forestales constituye una fuente de información clave para las tareas de gestión post-incendio. La teledetección ha demostrado ser una herramienta cada vez más operativa para desempeñar este tipo de trabajo. Este artículo reúne y explica las últimas aplicaciones y técnicas de teledetección usadas para la cartografía de área quemada centrándose en aspectos de viabilidad espectral, escala y precisión.

Palabras clave Área quemada · Discriminación · Índice espectral · Cartografía

Abstract Discriminating and mapping burned areas from forest fires is a key issue in post-fire management tasks. Remote sensing has proved to be an increasingly operative tool in this line of work. This paper reviews and explains a selection of the latest remote sensing applications and techniques used for burned area mapping focusing on its efficiency in terms of spectral feasibility, scale and precision.

Keywords Burned Area · Discrimination · Spectral Indices · Mapping

Introducción

Un sistema de gestión de los incendios forestales requiere una evaluación global de las áreas afectadas por el fuego, tanto in términos de perímetro y área del incendio, como de

nivel de daño provocado por el fuego en la vegetación y suelo. Esta información es crítica a la hora de destinar y priorizar recursos (actuando antes en las zonas más afectadas), para mitigar la erosión del suelo y favorecer la regeneración de la vegetación. Pese a la buena calidad de las estadísticas de ocurrencia del fuego que se presentan en España (Vélez, 2000), la mayor parte de los incendios no tienen una referencia geográfica de gran precisión, puesto que su localización se registra en el espacio cubierto por una cuadrícula de 10 x 10 Km (Dirección General de la Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente), o en el término municipal de origen. Distintas leyes autonómicas obligan a registrar el perímetro de los incendios de mayor extensión (normalmente por encima de 50 ha), utilizando técnicas GPS, pero esta metodología resulta ser poco homogénea a nivel nacional (Heredia et al., 2003) y de difícil acceso. Al no existir directrices generales, en la mayoría de los casos, los perímetros obtenidos mediante GPS no incluyen las manchas interiores y no distinguen los niveles de daño.

En líneas generales, los incendios alteran la cubierta vegetal, reduciendo la clorofila y el contenido de humedad. Asimismo, incrementan el porcentaje de suelo descubierto, lo carbonizan y alteran su color y humedad. Estos efectos en la vegetación y el suelo producen cambios en los patrones de reflectividad, que pueden ser detectados mediante el análisis de imágenes de satélite. Por esta razón, la teledetección se plantea como una alternativa muy sólida para cartografiar áreas quemadas, ya que proporciona una cobertura espacial y temporal suficientemente detallada así como una información espectral que permite la separación de las áreas quemadas respecto a otros tipos de coberturas.

Numerosos estudios (Barbosa et al., 2002; Camacho, 1993; Chuvieco et al., 2002; Cochrane et al., 1998; Fernández et al., 1997; Garcia & Chuvieco, 2004; Koutsias & Karteris, 2000; Martín et al., 2002; Martínez et al., 2002; Roy et al., 2005; Salvador et al., 2000; Eva & Lambin, 1998) han confirmado la aplicabilidad de la teledetección a la discriminación del área quemada. Para llevar a cabo esta

tarea, se han propuestos diferentes técnicas, que pueden ser agrupadas en dos apartados (Heredía et al., 2003): por un lado la selección de los índices espectrales más idóneos, y por otra las técnicas de discriminación propiamente dicha (unitemporales y multitemporales).

El principal objetivo de este trabajo es analizar y comparar los diversos métodos existentes para realizar cartografía de área quemada, a diferentes escalas, a partir de imágenes de satélite.

Caracterización espectral de las áreas quemadas

En la caracterización espectral de la vegetación quemada es necesario considerar dos tipos diferentes de señal: la que proviene de la formación y deposición de carbón y cenizas y la procedente de la alteración de la estructura y cantidad de la vegetación. El primer tipo de señal es una consecuencia de la combustión de la vegetación, y tiene el inconveniente de que dura poco tiempo y se degrada por la acción del viento y la lluvia, que pueden eliminarlo a las pocas semanas o meses después de ocurrido el incendio. La segunda señal es más estable, pero es menos nítida para discriminar los efectos del fuego, puesto que la eliminación parcial o total de la vegetación puede ser igualmente causada por otros factores, tales como la deforestación, aclareos, estrés de la vegetación o la acción de plagas (Pereira et al., 1999b).

En el dominio espectral correspondiente al visible (VIS), la reflectividad de una zona quemada se ve incrementada, como consecuencia de la pérdida de clorofila de las hojas y/o el aumento en la proporción de suelo descubierto. Sin embargo, en superficies quemadas muy recientemente con fuegos intensos, donde la vegetación ha sido afectada severamente y el predominio de carbón y cenizas es significativo, la reflectividad disminuye considerablemente,

dando lugar a confusiones con áreas de poca reflectividad, como las sombras, cuerpos de agua, humedales y bosques densos de coníferas. Esto se debe a que tanto la clorofila como la ceniza /carbón tienen reflectividades muy bajas en el VIS. Esas similitudes reducen la posibilidad de usar el rango del visible para discriminar superficies quemadas (Pereira et al., 1999b).

El infrarrojo cercano (IRC) es la región del espectro donde la señal de las áreas quemadas recientemente es más evidente, especialmente cuando la cantidad de combustible quemado es alta y la combustión ha producido gran cantidad de carbón depositado sobre el suelo, ocasionando, de esta manera, una disminución de la reflectividad.

Los cambios en la respuesta espectral provocados por las áreas quemadas en el infrarrojo medio de onda corta (SWIR) llevan a un aumento de la respuesta, como observado en el rango del VIS. En este último, la reflectividad se incrementa como consecuencia de la pérdida de clorofila, mientras que en el SWIR, la reflectividad se incrementa por la disminución de humedad en los tejidos de las plantas. El incremento de la reflectividad en el SWIR es mayor que en el espectro VIS. Por último, la reflectividad de las superficies quemadas en el SWIR es menor que la reflectividad de las superficies no quemadas (suelos descubiertos, afloramientos rocosos o áreas urbanas), pero más elevada que la reflectividad de la vegetación sana y el agua (Pereira et al., 1999b).

En conclusión, el deterioro de la estructura interna de la hoja y la disminución de clorofila y contenido de humedad en la vegetación afectada por un incendio, conducen a un aumento de la respuesta espectral en las longitudes de onda del visible e infrarrojo medio (SWIR) y una pérdida en el infrarrojo cercano (IRC) (White et al., 1996).

La figura 1 muestra un resumen de los cambios que experimenta la firma espectral de la vegetación en relación al nivel de daño sufrido por el incendio.

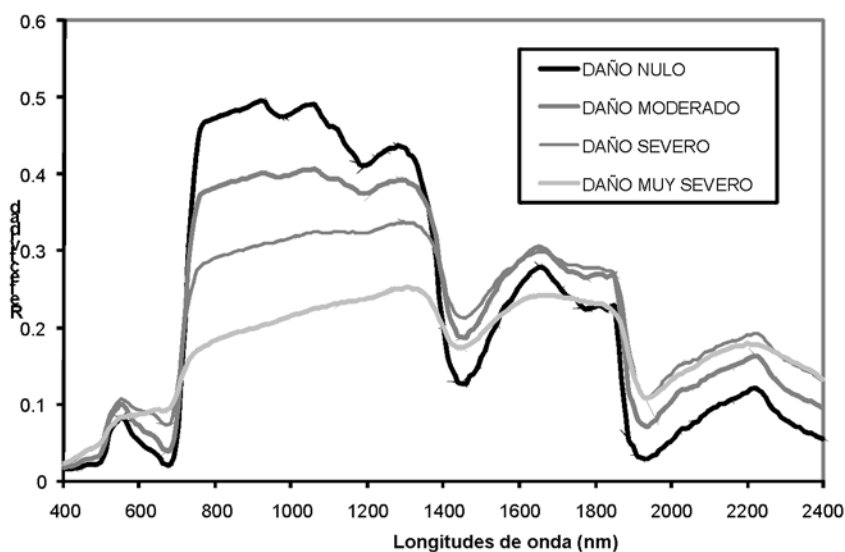


Figura 1.- Cambios que experimenta la firma espectral de la vegetación en relación al nivel de daño sufrido por el incendio

Índices espectrales para la discriminación del área quemada

Los índices espectrales han sido comúnmente utilizados para la discriminación de área quemada desde imágenes de satélite. Los primeros en utilizarse fueron los índices de vegetación, inicialmente desarrollados para realzar la señal de la vegetación (ya que se basan principalmente en el contraste entre el rojo y el infrarrojo cercano), minimizando los efectos atmosféricos y del suelo (Chuvieco et al., 2002a). En esta línea existen distintas alternativas dependiendo de los sensores disponibles (Chuvieco et al., 2002a; Trigg & Flasse, 2001). La tabla 1 muestra una lista de los índices más utilizados. Aunque los índices de vegetación permiten identificar la pérdida y/o el daño de la vegetación debidos al fuego, la respuesta espectral de la vegetación quemada (la alta reflectividad en el VIS y baja en el IRC) puede ocasionar confusión con otras cubiertas, como agua, zonas en sombra y, en algunos casos, coníferas. En consecuencia, el tradicional índice de vegetación NDVI (fórmula descrita en la tabla 1) no resulta

ser un buen discriminador del área quemada en imágenes posteriores al incendio, aunque sí muestra buenos resultados en comparaciones multitemporales (antes y después del incendio). El SAVI (tabla 1) ha demostrado ser muy sensible a la hora de identificar la cantidad de vegetación en zonas muy poco densas. El GESAVI (tabla 1) representa una mejora del índice anterior, pero es muy dependiente de la elección del parámetro Z, que para su correcta definición, precisa el conocimiento a priori de la zona de estudio. Esta limitación ha reducido mucho su utilización. El GEMI (tabla 1), además de estar menos afectado por las variaciones atmosféricas y del suelo que el NDVI, ha resultado ser más sensible a la hora de discriminar el área quemada.

Para solucionar los problemas relacionados con los índices de vegetación, se han desarrollado índices específicos para área quemada (tabla 1).

El NBR (tabla 1), es análogo al más antiguo *Normalized Difference Infrared Index (NDII)* desarrollado por Hunt & Rock (1989), pero fueron Key y Benson (2005) quienes lo

	Índice	Formulación	Referencia
ÍNDICES DE VEGETACIÓN	Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R}}$ <p>Donde $\rho_{i,IRC}$ y $\rho_{i,R}$ = reflectividades del pixel i en la banda del infrarrojo cercano (IRC) y del rojo (R) respectivamente.</p>	Rouse et al., 1974
	Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{(\rho_{IRC} - \rho_R)}{(\rho_{IRC} + \rho_R + L)} \times (1 + L)$ <p>Donde L= parametro que considera la diferencia en transmisividad de la copa para el R y el IRC. L = 0.5 se considera un valor óptimo general para bosques (Hueté, 1988). (1+L) = es un factor multiplicativo para mantener el mismo rango de valores que el NDVI.</p>	Hueté, 1988
	Generalized Soil-Adjusted Vegetation Index	$GESAVI = \frac{\rho_{IRC} - B\rho_R - A}{R + Z}$ <p>Donde Z = coeficiente de ajuste para el suelo</p>	Martínez et al., 2002
	Global Environmental Monitoring Index	$GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) - [(\rho_R - 0.125)/(1 - \rho_R)]$ <p>Donde:</p> $\eta = \frac{2(\rho_{IRC}^2 - \rho_R^2) + 1.5\rho_{IRC} + 0.5\rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + 0.5}$	Pinty & Verstraete, 1992
ÍNDICES DE ÁREA QUEMADA	Normalized Burnt Ratio	$NBR_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,SWIR}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,SWIR}}$ <p>Donde $\rho_{i,SWIR}$ = reflectividad del pixel i en la banda del infrarrojo medio de onda corta (SWIR, entre 1 y 2.5 micras).</p>	Miller & Yool, 2002; Patterson & Yool, 1998
	SWIR Index	$SWIRratio = \frac{\rho_{TM7}}{\rho_{TM4}}$ <p>Donde ρ_{TM7} y ρ_{TM4} = reflectividades para las bandas 7 (SWIR) y 4 (IRC) de Landsat TM.</p>	Pereira, 1999; Roy et al., 1999
	Índice de área quemada (IAQ) o Burned Area Index (BAI)	$IAQ_i = \frac{1}{(\rho_{C_R} - \rho_{i,R})^2 + (\rho_{C_{IRC}} - \rho_{i,IRC})^2}$ <p>Donde ρ_{C_R} y $\rho_{C_{IRC}}$ = reflectividades del centro de convergencia para áreas quemadas en el R y en el IRC, con valores de 0.1 y 0.06, respectivamente en la propuesta de Martín, 1998.</p>	Martín, 1998
	Burned Area Index MODIS	$BAIM_i = \frac{1}{(\rho_{IRC} - \rho_{i,IRC})^2 + (\rho_{SWIR} - \rho_{i,SWIR})^2}$	Martín et al., 2002

Tabla 1.- Definición de los índices más utilizados para cartografiar área quemada

denominaron *Normalized Burn Ratio*. Este es uno de los índices más utilizado tanto para cartografiar el área quemada, como para identificar los distintos niveles de daño que ha sufrido la vegetación a causa del incendio (Key & Benson, 2004, 2005; García & Chuvieco, 2004; van Wagtenonk et al., 2004; Epting et al., 2005; Cocke et al., 2005; Brewer et al., 2005). Una simplificación del NBR, es el SWIR index (tabla 1). Se trata de un ratio simple entre la banda del SWIR de Landsat TM y la banda del IRC y fue utilizado con éxito por Pereira (1999) y Roy et al. (1999).

Finalmente, Martín y Chuvieco (1998) propusieron el IAQ (tabla 1), basado en la distancia a un centro de convergencia que espectralmente identifica la señal del carbón. Recientemente este índice ha sido modificado incluyendo la banda del SWIR (1.3- 2 μ m), más eficaz a la hora de discriminar incendios (Fraser et al., 2002; López García & Caselles, 1991). Este nuevo índice, el BAI MODIS (tabla 1), fue específicamente desarrollado para las bandas del sensor MODIS (B2= IRC; B7= SWIR). Su eficacia ha sido ampliamente contrastada (Martín et al., 2002; Pereira et al., 1999a).

En la figura 2 se muestran unos ejemplos de índices espectrales calculados a partir de imágenes MERIS (a, b, c, figura 2) y Landsat TM (d, e, f, figura 2) para el incendio de Guadalajara, que en 2005 arrasó casi 13.000 ha de pinar. Tratándose de un incendio reciente, se puede notar que tanto los índices específicos para área quemada (BAI, SWIR index y NBR), como los índices de vegetación (NDVI y SAVI), a excepción del GEMI, consiguen una buena delimitación del incendio.

Técnicas de discriminación de incendios

Las técnicas de discriminación de incendios pueden ser agrupadas entre las que emplean una sola fecha, posterior al incendio, que llamaremos "unitemporales", y las que comparan imágenes anteriores y posteriores al fuego, que llamaremos "multitemporales".

Técnicas unitemporales

En este primer caso, lo más habitual es utilizar una segmentación de umbrales a partir de bandas originales o de los resultados de la aplicación de índices espectrales, transformaciones de bandas, etc. El objetivo es definir grupos homogéneos de píxeles hasta encontrar la relación óptima entre errores de omisión y comisión. En el caso de la delimitación del área quemada, los umbrales muy exigentes reducirían las áreas no quemadas que se discriminen como tales (errores de comisión), a la vez que aumentarían los píxeles realmente quemados que no se detectarían con este algoritmo (errores de omisión). Debido a la dificultad que supone extraer todo el perímetro quemado, sobre todo cuando se trata incendios que afectan diferentes tipos de vegetación y con distintas intensidades (Chuvieco & Martín, 1999; Chuvieco et al., 2002a; Martín, 1998), las técnicas multifase representan la alternativa más viable.

En ámbito español, Bastarrika & Chuvieco (2006) proponen, para los Países de la cuenca mediterránea, la utilización de un algoritmo de contexto espacial con imágenes Landsat TM y ETM+. Para ello utilizan una metodología basada en dos fases: en la primera se identifican los píxeles semilla (con alta probabilidad de que estén quemados) característicos del área quemada (umbral muy estricto), y en la segunda, a partir de estas semillas, se ejecutan algoritmos de crecimiento de regiones con diferentes criterios de homogeneidad que definirán el final del proceso.

En la misma línea, Oliva et al. (2007) utiliza una técnica basada en la aplicación de dos umbrales aplicándola a la zona noroeste de la Península Ibérica: el primero, muy estricto, limita los errores de comisión al 5%, mientras que el segundo intenta cubrir toda la zona quemada, reduciendo al mínimo los errores de omisión.

Técnicas multitemporales

La discriminación de las áreas afectadas por el fuego, más o menos recientemente, se ha basado preferentemente en la comparación multitemporal de imágenes adquiridas antes y después del incendio. Esto se debe a que los cambios en las características espectrales de las zonas quemadas pueden ser detectados utilizando oportunas combinaciones de bandas o índices espectrales (tabla 1), que facilitan la detección de los cambios en las cubiertas. En este caso es fundamental la homogeneización radiométrica y el ajuste geométrico entre las imágenes de referencia utilizadas.

Para la utilización de composiciones de color para la comparación multitemporal en el caso de imágenes Landsat-TM y ETM, la literatura científica recomienda el uso de las bandas 1, 4 y 7 (Chuvieco et al., 2002a; Key & Benson, 1999) que corresponden a la región azul del VIS (1), el IRC (4) y el SWIR (7), respectivamente. Esta composición de color asigna la banda del SWIR al cañón del rojo, el IRC al cañón del verde y la banda del azul al cañón del azul. En esta composición el incendio aparece de forma nítida con unos colores rojizos-granates muy característicos (figura 3). Este tono es el resultado del incremento de la señal en la banda del SWIR y un decremento en la banda del IRC de las zonas afectadas por los incendios forestales. Para el resto de sensores disponibles, se seleccionarán, de forma similar al caso de Landsat, las bandas que mejor recojan las características espectrales de la señal de las áreas quemadas.

Una alternativa a la interpretación visual de los incendios, es la utilización de técnicas de detección de cambio, como, por ejemplo, los vectores multitemporales y el análisis de componentes principales.

La técnica de los vectores multitemporales intenta incorporar no sólo la importancia, sino también la duración del cambio entre imágenes. Si representamos en un eje dividido dos bandas originales (por ejemplo, la del rojo y la del IRC), cada píxel viene definido por un punto (localización de su Nivel Digital -ND- en las dos bandas). Si ese píxel cambia su cobertura entre las dos fechas, también modificará su emplazamiento espectral. La magnitud del

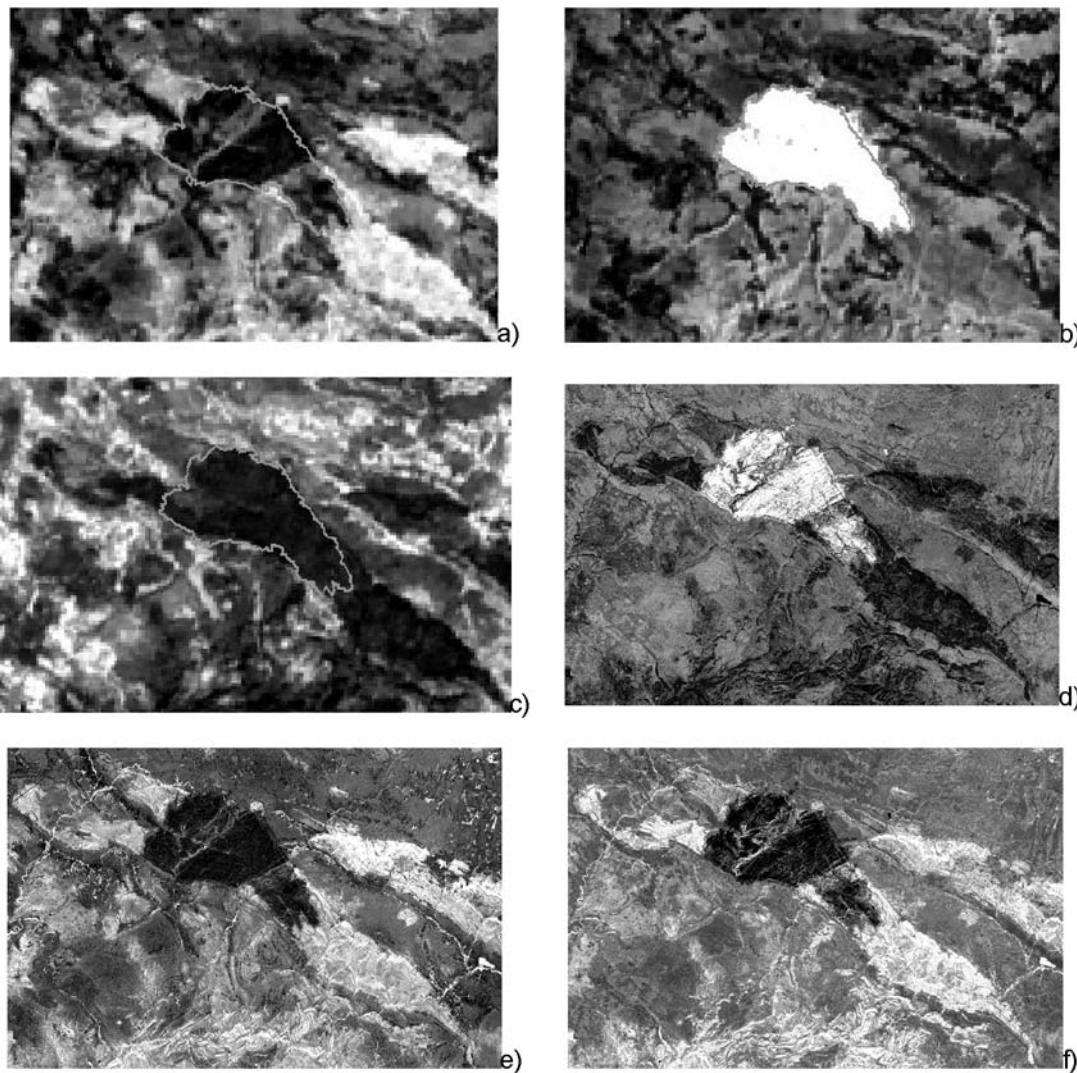


Figura 2.- Ejemplos de índices espectrales calculados a partir de imágenes MERIS y Landsat TM para el incendio de Guadalajara (2005): a) NDVI, b) BAI (o IAQ), c) GEMI, d) SWIR index, e) SAVI, f) NBR

cambio vendrá dado por la longitud del vector que separa ambos puntos. Por su parte, el sentido del cambio se define por el ángulo que forma dicho vector con el eje de referencia (Chuvieco, 2002). Con este método, el píxel quemado mostrará los cambios en las bandas características, tal y como se han descrito en el apartado sobre la firma espectral del área quemada, y la intensidad del daño debido al fuego estará correlacionada con la longitud de los vectores de cambio.

Por último, el análisis de las Componentes Principales (ACP) es una técnica de reducción de la dimensionalidad de la imagen y ha sido ampliamente utilizada en estudios de teledetección. Su objetivo es sintetizar las bandas originales, creando unas nuevas bandas –los componentes principales (CP) de la imagen–, que recojan la parte más relevante de la información original. El sentido espectral de estos componentes se obtiene a partir de la matriz de autovectores, en donde se evidencia la asociación entre cada componente y las bandas originales (Chuvieco, 2002). En el caso de la discriminación multitemporal de los incendios, para cada fecha se puede seleccionar el CP más

relacionado con la vegetación (normalmente el CP2, en imágenes Landsat TM). De este modo, utilizando técnicas de detección de cambios, se realizarían las zonas que han sufrido cambios en la vegetación.

Escalas de trabajo

Es posible determinar el área quemada a tres diferentes escalas: global, regional y local. La escala de trabajo condicionará la unidad más pequeña de información que se debe incluir en el mapa temático, lo que suele denominarse mínima unidad cartografiable (MUC). Además determina la relación óptima entre errores de omisión y comisión que se puede alcanzar (Boschetti et al., 2004). De ahí que la escala de trabajo esté directamente relacionada con el tipo de sensor más idóneo para el estudio propuesto. En la tabla 2 se muestran los sensores más comunes y algunos ejemplos de los proyectos que actualmente los utilizan para producir cartografía de área quemada. En líneas generales, para proyectos a escala global los sensores más utilizados son el

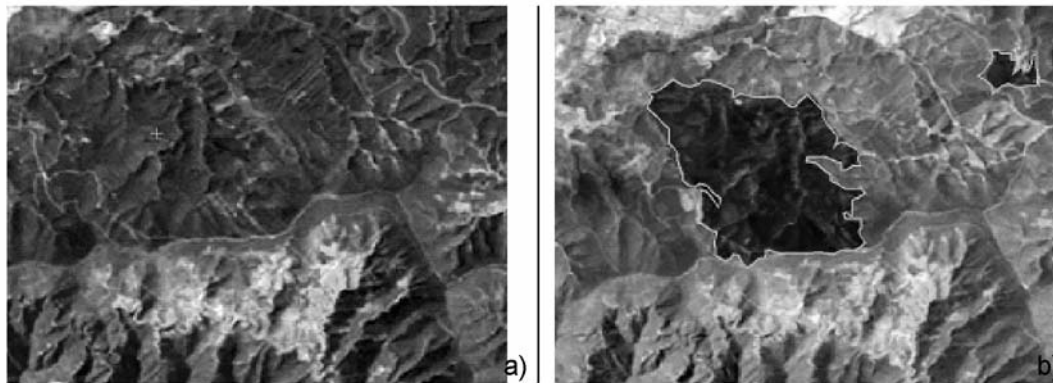


Figura 3.- Ejemplos del aspecto de un incendio en una imagen Landsat, visualizada con la siguiente composición en color: R: banda7, G: banda4, B: banda1. La a) corresponde a la imagen pre-incendio y la b) a la post-incendio (el perímetro del incendio aparece en naranja)

SENSOR	RESOLUCIÓN ESPACIAL		PROYECTOS EXISTENTES QUE FACILITAN CARTOGRAFÍA DE ÁREA QUEMADA A DIFERENTES ESCALAS
	Min (m)	Max (m)	
NOAA-AVHRR	1100	1100	Proyectos puntuales como los que se describen en Chuvieco et al., 2002b; Gong et al., 2001; Fuller & Fulk, 2001.
MODIS	250	1000	MODIS burned area product (MCD45) desarrollado por Roy et al. (2005a) (http://modis-fire.umd.edu/MCD45A1.asp#1). El módulo EFFIS Rapid Damage Assessment (RDA) ha sido creado en 2003 y utiliza imágenes MODIS de 250m de resolución (Barbosa et al., 2006).
MERIS	300	300	En el marco del Proyecto Europeo Preview (http://www.preview-risk.com/), el departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá está desarrollando un método de cartografía de área quemada para toda España (Oliva et al., 2007).
WIFS	180	180	El módulo EFFIS Damage Assessment tiene como objetivo armonizar las estadísticas de área quemada a nivel europeo, y para eso producen un mapa de zonas afectada por el fuego al final de cada estación de incendios utilizando Wide Field of View Sensor (WIFS) (http://effis.jrc.it/Home/).
AWIFS	60	60	En el marco del Proyecto Europeo Preview (http://www.preview-risk.com/), el departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá está desarrollando un método de cartografía de área quemada para toda España (Oliva et al., 2007).
LANDSAT	15	120	En el marco del proyecto FIREMON (http://www.fire.org/firemon), el USDA Americano tiene un inventario de las áreas quemadas a partir de la aplicación del índice NBR a imágenes Landsat. También en Portugal y España se está haciendo un inventario a partir de interpretación visual con imágenes Landsat.
SPOT	2,5	1165	GBA2000 desarrollado por el Joint Research Centre de la Unión Europea, con SPOT VEGETACIÓN y una resolución espacial de 1 Km ²)

Tabla 2.- Ejemplos de los sensores más utilizados en cartografía de área quemada y de los respectivos proyectos existentes

NOAA-AVHRR y el MODIS, con tamaño de píxel alrededor de 1 Km, mientras que para estudios de áreas más reducidas se utilizan Landsat y SPOT. Evidentemente existe un cierto solape en esta distinción, debido a que es necesario encontrar un equilibrio entre resolución espacial y espectral para cada aplicación.

Discusión y Conclusiones

Un sistema operativo de gestión de las áreas quemadas debería proporcionar de forma rápida, precisa y económicamente viable los límites de las áreas quemadas durante o inmediatamente después de la temporada de incendios. En este contexto la teledetección ha mostrado ser muy eficaz en la cartografía del área quemada, ya que proporciona una cobertura espacial y temporal suficientemente detallada e información espectral que permite la separación de las áreas quemadas respecto a otras cubiertas. La mayor ventaja de la utilización de la teledetección es la posibilidad de automatizar las técnicas de extracción de las áreas quemadas, obteniendo un producto estándar, rápido y más económico respecto a las técnicas tradicionales. En este artículo se han presentado las últimas aplicaciones y técnicas de teledetección usadas para la cartografía de área quemada, haciendo hincapié en la viabilidad espectral para su discriminación y los medios y sensores disponibles a este efecto. Es deseable que las herramientas, los métodos descritos y la escala de los resultados se implementen de forma más estándar y automatizada, especialmente a nivel regional.

Bibliografía

Barbosa, P., Kucera, J., Strobl, P., Vogt, P., Camia, A. y San-Miguel-Ayán, J. (2006). European Forest Fire information System (EFFIS) – rapid damage assessment: appraisal of burnt area maps in southern Europe using MODIS data (2003 to 2005). *Forest Ecology and Management*, 232, Supp. 1, pS218.

Barbosa, P.M., San-Miguel Ayán, J., Martínez, B. & Schmuck, G. (2002). Burnt area mapping in southern Europe using IRS-WiFS. In: *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety* (Viegas, Ed.) Millpress. Rotterdam.

Bastarrica Izaguirre, A. & Chuvieco Salinero, E. (2006). Cartografía de área quemada mediante crecimiento de regiones: aplicación en entornos mediterráneos con imágenes TM y ETM+. *Geofocus (Artículos)*. 6: 182-204.

Boschetti, L., Flasse, S.P. & Brivio, P. A. (2004). Analysis of the conflict between omission and commission in low spatial resolution dichotomic thematic products: The Pareto Boundary. *Remote Sensing of Environment*, 91: 280-292.

Brewer, C.K., Winne, J.C., Redmond, R.L., Opitz, D. W. & Mangrich, M.V. (2005). Classifying and Mapping Wildfire Severity: A Comparison of Methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(11): 1311-1320.

Camacho, M.T., (1993). Use of remote sensing in the visible spectrum for the study of burnt areas: the example of the Madres Massif (eastern Pyrenees, France). In: P.J. Kennedy and M. Kareris (Eds.). *International Workshop: Satellite Technology and GIS for Mediterranean Forest Mapping and Fire Management*. Thessaloniki. Greece. 85-95.

Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia. Barcelona.

Chuvieco, E. & Martín, M.P. (1999). Performance Assessment in the Fire Post-fire Phase. Final Report. FOQ-132-CT-05-1a. Department of Geography. Alcalá de Henares.

Chuvieco, E., Martín, M.P. & Palacios, A. (2002a). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*. 23(23): 5103-5110.

Chuvieco, E., Martín, M.P. & Ventura, G., (2002b). Evaluación de imágenes NOAA-AVHRR y Terra-MODIS para cartografía regional de áreas quemadas. X Simposio Internacional de la Sociedad de Expertos Latinoamericanos en Percepción Remota (SELPER). Cochabamba. Bolivia.

Cochrane, M.A. & Souza, C.M. (1998). Linear mixture model classification of burned forests in the Eastern Amazon. *International Journal of Remote Sensing*. 19(17): 3433-3440.

Cocke, A.E., Fule, P.Z. & Crouse, J.E. (2005). Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*. 14: 189-198.

Epting, J., Verbyla, D.L. & Sorbel, B. (2005). Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment*. 96: 328-339.

Eva, H. & Lambin, E.F. (1998). Burnt area mapping in Central Africa using ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*. 19(18): 3473-3497.

Fernández, A., Illera, P. & Casanova, J.L. (1997). Automatic mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sensing of Environment*. 60(2): 153-162.

Fraser, R.H., Fernandes, R. & Latifovic, R. (2002). Multi-temporal burned area mapping using logistic regression analysis and change metrics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*: 1486-1488.

Fuller, D.O. & Fulk, M., (2001). Burned area in Kalimantan, Indonesia mapped with NOAA-AVHRR and Landsat TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 22,4: 691-697.

García, M. & Chuvieco, E. (2004). Assessment of the potential of SAC-C/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. *Remote Sensing of Environment*. 92: 414-423.

- Gong, P., Pu, R., Li, Z. & Scarborough, J. (2001). An Integrated Approach for Wildland Fire Mapping in California, USA Using NOAA/AVHRR Data. 0-7803-7031-1/01, IEEE.
- Heredía Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. & Chuvieco, E. (2003). Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+. *Geofocus (Artículos)*, 3: 216-234.
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25: 295-309.
- Hunt, E.R. & Rock, B.N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*. 30: 43-54.
- Key, C. & Benson, N., (1999). The Normalized Burned Ratio, a Landsat TM radiometric index of burn severity incorporating multi-temporal differencing. U.S. Geological Survey.
- Key, C.H. & Benson, N., (2004). Ground Measure of Severity: The Composite Burn Index. FIREMON Landscape Assessment V4.
- Key, C.H. & Benson, N. (2005). Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In: D.C. Lutes, R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson & L.J. Gangi (Eds.). FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service. Rocky Mountain Research Station, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164. Ogden, UT, pp. CD:LA1-LA51.
- Koutsias, N. & Karteris, M. (2000). Burned area mapping using logistic regression modeling of a single post-fire Landsat-5 Thematic Mapper image. *International Journal of Remote Sensing*. 21(4): 673-687.
- López García, M.J. & Caselles, V. (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. Tesis Doctoral Thesis. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.
- Martín, M.P. and Chuvieco, E. (1995). Cartografía y evaluación superficial de grandes incendios forestales a partir de imágenes de satélite. *Ecología*. 9: 9-21.
- Martín, M.P., Díaz Delgado, R., Chuvieco, E. & Ventura, G. (2002). Burned land mapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS. In: D.X. Viegas (Ed.), IV International Conference on Forest Fire Research. 2002 Wildland Fire Safety Summit. Millpress. Luso. Coimbra. Portugal.
- Martínez, B., Meliá, J., San Miguel, J. & Barbosa, P., (2002). An optimized burned area detection method based on the GESAVI. In: D.X. Viegas (Ed.), IV International Conference on Forest Fire Research. 2002 Wildland Fire Safety Summit. Luso. Coimbra. Portugal.
- Miller, H.J. & Yool, S.R. (2002). Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data, *Remote Sensing of Environment*. 82: 481-496.
- Oliva, P. & Martín, P. (2007). Mapping burned area by using Spectral Angle Mapper in MERIS images. 6th International workshop on advances in RS and GIS applications in forest fire management. Thessaloniki. Greece. 26-29 de septiembre 2007.
- Patterson, M.W. & Yool, S.R. (1998). Mapping Fire-Induced Vegetation Mortality Using Landsat Thematic Mapper Data: A Comparison of Linear Transformation Techniques. *Remote Sensing of Environment*. 65: 132-142.
- Pereira, J.M.C. (1999). A Comparative Evaluation of NOAA/AVHRR Vegetation Indexes for Burned Surface Detection and Mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 37(1): 217-226.
- Pereira, J.M.C., Sa, A.C.L., Sousa, A.M.O., Martín, M.P. & Chuvieco, E. (1999a). Regional-scale burnt area mapping in Southern Europe using NOAA-AVHRR 1 km data. In: E. Chuvieco (Ed.). *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Springer-Verlag, Berlin. 139-155.
- Pereira, J.M.C., Sa, A.C.L., Sousa, A.M.O., Silva, J.M.N., Santos, T.N. & Carreiras, J.M.B. (1999b). Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. In: E. Chuvieco (Ed.). *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Springer-Verlag, Berlin. 123-138.
- Pinty, B. & Verstraete, M.M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*. 101: 15-20.
- Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.H. & Harlan, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC. Greenbelt, MD. USA.
- Roy, D.P., Giglio, L., Kendall, J.D. & Justice, C.O. (1999). Multi-temporal active-fire based burn scar detection algorithm. *International Journal of Remote Sensing*. 20(5): 1031-1038.
- Roy, D., Jin, Y., Lewis, P. & Justice, C. (2005). Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*. 97: 137-162.
- Salvador, R., Valeriano, J., Pons, X. & Díaz-Delgado, R. (2000). A semi-automatic methodology to detect fire scars in shrubs and evergreen forests with Landsat MSS time series. *International Journal of Remote Sensing*. 21(4): 655-671.
- Trigg, S. & Flasse, S. (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*. 22(13): 2641-2647.
- van Wageningen, J.W., Root, R.R. & Key, C.H. (2004). Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity, *Remote Sensing of Environment*. 92(3): 397-408.
- Vélez, R. (2000). Los incendios forestales en la cuenca mediterránea. In: Vélez, R. (Ed.) *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. Mc Graw Hill. Madrid. Capítulo 3.
- White, J.D., Ryan, K.C., Key, C.C. & Running, S.W. (1996). Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*. 6(3): 125-136.