

Cartografía de áreas quemadas en Sudamérica: detección de píxeles semilla

South America burnt areas mapping: core pixels detection

S. Opazo¹ y E. Chuvieco²
sergio.opazo@umag.cl

¹ Universidad de Magallanes, Av. Bulnes #01855. Punta Arenas – Chile.

² Universidad de Alcalá, C/ colegios N°2. Alcalá de Henares - España

Recibido el 16 de junio de 2009, aceptado el 05 de noviembre de 2009

RESUMEN

El siguiente artículo presenta un método para la detección de píxeles semilla, que constituye la primera fase de la cartografía de áreas quemadas. Este se basa en un algoritmo de discriminación elaborado en el marco del proyecto AQL2004 de la RedLatif (Chuvieco *et al.*, 2008). Dicho algoritmo propone dos fases, la primera se orienta a la detección de píxeles semilla a partir de índices especialmente adaptados a la señal del carbón y la segunda etapa se orienta a mejorar la cartografía mediante la incorporación de un algoritmo de contexto para mejorar la definición del perímetro de área quemada desde las semillas identificadas previamente.

El presente estudio se centra en la primera fase del algoritmo, la cual ha sido enriquecida incorporando umbrales diferenciados según las distintas condiciones regionales del área de estudio, para esto se han evaluado previamente distintas capas de información de tipo climática y de vegetación con las cuales se ha construido un mapa de clases para la diferenciación regional del valor de discriminación de las semillas.

Los resultados muestran porcentajes de detección superiores al 80% en incendios mayores de 500 hectáreas.

PALABRAS CLAVE: Cartografía, incendios forestales, área quemada, MODIS

ABSTRACT

The following paper presents the first part of a methodology for mapping burnt area at global scale. This part named core pixels detection is based on an algorithm developed under the project AQL2004 of RedLatif (Latinoamerican Red for Remote sensing and forest fires) (Chuvieco *et al.*, 2008).

This algorithm proposes two phases, the first is orientated to detection of core pixels using especially elaborate indexes to the coal signal and the second stage is aimed at improving mapping using contextual analysis for better definition of the burnt area perimeter.

This algorithm has been enriched incorporating flexible regional thresholds; this thresholds has been created using and evaluating different layers of information (climate and vegetation). There results show detection rates of over 80% in fires larger than 500 hectares.

KEYWORDS: Cartography, forest fires, burnt areas, MODIS

INTRODUCCIÓN

Un gran número de estudios ambientales utilizan la teledetección como herramienta de monitoreo y evaluación de los diversos procesos que afectan a la superficie terrestre. La gran capacidad de cobertura espacial y alta frecuencia de observación que proveen los sensores satelitales junto a la prontitud con que se pueden obtener los datos, hacen de ellos un valioso recurso para la detección y cartografía de incendios y para la gestión de áreas vulnerables (Chuvieco, 2008).

Los sensores más utilizados para la cartografía de áreas quemadas a escala global han sido el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) a bordo de la serie de satélites NOAA, el SPOT-VEGETATION que se encuentra a bordo de las plataformas SPOT- 4 y 5 y el ATSR2 (Along Track Scanning Radiometer) a bordo de ERS-2. Actualmente se cuenta con sensores de nueva generación desarrollados especialmente para estudios ambientales como MODIS (Moderate Resolution Instrument Spectroradiometer) a bordo de las plataformas Terra y Aqua, MERIS (The Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument) a bordo del satélite Envisat y otros sensores de programas emergentes como el MMRS (Multispectral Medium Resolution Scanner) que viaja sobre el satélite argentino SAC-C o el AWIFS (Advanced Wide Field Sensor) a bordo del satélite indio IRS. Sus nuevas características de resolución espectral y espacial, unidos a la libre distribución de los datos (MODIS – MERIS) potencian el desarrollo de nuevas técnicas y algoritmos de cartografía de área quemada, incrementando notablemente el número de estudios científicos en este y otros ámbitos ambientales.

En la actualidad se encuentran disponibles dos productos de área quemada con cobertura global, el primero denominado GBA2000 (Global Burnt Area) (http://www-tem.jrc.it/Disturbance_by_fire/products/burnt_áreas/global2000/global2000.htm, último acceso 4 de mayo de 2008) utilizó datos del sensor SPOT-VEGETATION y se realizó inicialmente para el año 2000, actualmente se rebautizó como L3JRC y cubre desde el año 2000 hasta el 2007 (Tansey *et al.*, 2007; Tansey *et al.*, 2004). El segundo producto se denomina GLOBSCAR y se ha realizado con datos del sensor ATSR-2; se procesó inicialmente el año 2000, pero actualmente se realiza para los años 1998 hasta 2007 (<http://geofront.vgt.vito.be/geosuccess/>, último acceso 4 de mayo de 2008) (Simon *et al.*, 2004). Actualmente

está disponible el producto de área quemada estándar MODIS MCD45 que ofrece una cobertura global con una resolución espacial de 500 metros (Roy *et al.*, 2005).

La generación de cartografías de áreas quemadas a escala global se ha basado fundamentalmente en métodos de discriminación que utilizan comparaciones multitemporales de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) o de otros índices espectrales como el GEMI (Global Environment Monitoring Index) o el SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) (Barbosa *et al.*, 1999; Chuvieco *et al.*, 2002; Kasischke y French, 1995; Martín y Chuvieco, 1995; Pereira, 1999; Sifakis *et al.*, 2004; Trigg y Flasse, 2000), aunque también se han propuesto algunas metodologías que incorporan la combinación de canales térmicos y ópticos (Fraser *et al.*, 2000; Roy *et al.*, 1999), clasificaciones supervisadas (Cahoon *et al.*, 1994); regresiones logísticas (Fraser *et al.*, 2002), entre otras técnicas. En los últimos años se han propuesto metodologías basadas en índices orientados especialmente a la señal quemada. Estos índices tienen como principal ventaja la mejora en la disminución entre áreas quemadas y superficies de comportamiento espectral similar, reduciendo los errores de comisión (zonas clasificadas como quemadas cuando no lo son). En este ámbito algunos de los índices más utilizados en los últimos años y que han ofrecido buenos resultados han sido el NBR (Normalized Burnt Ratio) (Key y Benson, 1999), el BAI (Burn Area Index) (Martín, 1998) y el MIRBI (Mid-Infrared Bispectral Index) (Trigg y Flasse, 2000). Su utilización ha permitido el desarrollo de numerosos trabajos de discriminación de áreas quemadas (Chuvieco *et al.*, 2008; Dempewolf *et al.*, 2007; Loboda *et al.*, 2007; Martín *et al.*, 2005; Roy *et al.*, 2005).

La principal limitación en la cartografía de áreas quemadas se produce por la heterogeneidad espectral de la señal quemada. Esta heterogeneidad se observa tanto dentro de un mismo incendio como entre diferentes zonas afectadas, dificultando la elaboración de algoritmos con criterios estándar para todas las zonas y traduciéndose finalmente en errores en la exactitud de las estimaciones. Algunos motivos de esta variación se deben a factores como el tipo de ecosistema afectado, las características del combustible (biomasa, estructura del dosel), la severidad del fuego, la humedad del terreno, la época del año, estado fenológico, las condiciones climáticas posteriores al incendio (lluvia, viento, etc.) y el tiempo entre la quema y la captura de la imagen (Pereira *et*

al., 1999; Pereira y Setzer, 1993; Roy y Landmann, 2005). Así mismo, la persistencia o duración del carbón y por tanto su respuesta espectral dependerá esencialmente de la capacidad de regeneración que posea la vegetación del sitio afectado (Pereira *et al.*, 1999). La contribución del tipo de suelo que ha sufrido el incendio es otro elemento que incide en la señal, especialmente en regiones con bajos porcentajes de vegetación donde su influencia es notable, pudiendo confundirse con áreas quemadas en el caso de los suelos oscuros o por el contrario en el caso de los suelos brillantes la señal del carbón se disipa.

Las características y propiedades de la señal quemada pueden generar confusión con superficies de comportamiento similar como son los suelos anegados, láminas de agua, sombras o los suelos oscuros, aumentando las falsas detecciones. Por este motivo, el desarrollo de metodologías capaces de producir una mayor exactitud en las estimaciones es un tema de investigación a diversas escalas (Justice *et al.*, 1993).

En este ámbito, se planteó el proyecto AQL 2004 dentro de la Red Latinoamericana de Teledetección e Incendios Forestales (RedLaTIF) (<http://www.fuego.org.ar/redlatif/index.html>, último acceso 4 de mayo de 2008), para cartografiar áreas quemadas en Latinoamérica durante el año 2004 (Chuvieco *et al.*, 2008). Una de las cuestiones más discutidas en dicho estudio fue el establecimiento de los umbrales de discriminación, dado que la gran extensión de terreno abarcada incluía todo tipo de ecosistemas, desde zonas desérticas hasta densos bosques tropicales. Normalmente, un punto crítico en toda cartografía de áreas quemadas es la definición de los umbrales de discriminación entre quemado y no quemado. Usualmente para definir ese límite se utiliza información obtenida de zonas quemadas previamente identificadas y de ellas se extrae un valor (comúnmente el valor medio) que es utilizado para la obtención de los perímetros quemados. Este umbral es difícilmente generalizable, especialmente cuando se trata de zonas muy extensas con gran diversidad de vegetación, en donde se induciría a errores en la discriminación. Por ello, el funcionamiento del algoritmo puede ser bueno en algunas zonas, pero no necesariamente funciona bien en otras (Li *et al.*, 2003). En este aspecto, algunas validaciones realizadas para cartografías de área quemada a gran escala han mostrado diferencias en su exactitud dependiendo del tipo de vegetación afectada (Chuvieco *et al.*, 2008; Loboda *et al.*, 2007; Sifakis *et al.*, 2004).

El umbral utilizado por AQL2004, se ajustó tratando de que todos los tipos de ecosistemas quedasen incluidos y no se omitiesen áreas quemadas, generando así resultados disímiles para los distintos ecosistemas. Por lo tanto, una de las conclusiones propuestas fue la adaptación del algoritmo a las condiciones regionales.

El presente estudio tiene como objetivo continuar en la línea marcada por el proyecto AQL2004, analizando la variabilidad espectral de diferentes zonas quemadas con el fin de optimizar el método para la detección de píxeles semillas a escala continental, lo que supondrá la primera fase del algoritmo de cartografía de área quemada en Sudamérica que proponemos desarrollar. Para el análisis hemos utilizado índices especialmente adaptados a la señal quemada, de cara a definir criterios para el establecimiento de umbrales flexibles que se adapten a las condiciones regionales, disminuyendo así los errores en la estimación global.

El método utilizado se basa en un enfoque de dos fases que fue propuesto anteriormente por otros autores (Bastarrika y Chuvieco, 2006; Martín, 1998) y específicamente ha sido utilizado en Latinoamérica por AQL2004. La primera etapa se orienta a la detección de los píxeles más claramente quemados que se denominan semillas, lo que permite reducir las falsas detecciones (error de comisión). Posteriormente, en la segunda fase se define más detalladamente el conjunto del perímetro quemado a partir de las semillas, con el propósito de reducir los errores de omisión.

DATOS DE ENTRADA

El producto utilizado fue un compuesto de 16 días denominado MCD43B4 (<http://edcdaac.usgs.gov/modis/mcd43b4v4.asp>, último acceso 4 de mayo de 2008). Este producto ha sido evaluado previamente frente a otros productos MODIS, determinándose como el más conveniente para este trabajo (Opazo y Chuvieco, 2007). Cuenta con 7 bandas (Tabla 3.1) de reflectividad del sensor MODIS corregidas de la influencia atmosférica, así como del efecto bi-direccional que provoca la influencia del ángulo de visión del sensor. Este producto cuenta con una resolución espacial de 1 Km². El sensor MODIS forma parte del programa EOS (Earth Observation System) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y es distribuido por LP DAAC (<http://edcdaac.usgs.gov/>).

Banda	Ancho de Banda(μm)	Región del espectro
1	620 – 670	Rojo
2	841 – 876	Infrarrojo cercano
3	459 – 479	Azul
4	545 – 565	Verde
5	1230 – 1250	Infra – rojo de onda corta
6	1628 – 1652	Infra – rojo de onda corta
7	2105 – 2155	Infra – rojo de onda corta

Tabla 1. Bandas producto Modis MCD43

El producto MCD43 es generado a partir de una combinación de los datos adquiridos por Terra y Aqua, lo que optimiza su calidad, posibilitando una mayor cantidad de píxeles libres de nubes. Para la realización del presente trabajo se procesaron 70 mosaicos del MCD43 de toda Sudamérica, que comprenden un periodo de estudio de tres años (2004 a 2006).

Además de los datos MODIS también se emplearon perímetros de área quemada obtenidos previamente en la fase de validación del proyecto AQL2004 a partir de la interpretación visual de imágenes de sa-

télite de mayor detalle espacial (Landsat TM/ETM, de 30m y CBERS CCD, de 20m) (Chuvieco *et al.*, 2008). Estos fueron complementados con nuevos perímetros obtenidos utilizando el mismo procedimiento.

Para la interpretación de las imágenes Landsat se optó por la composición en color SWIR, IRC y Visible utilizada previamente por otros autores para la cartografía de áreas quemadas (Koutsias y Karteris, 1998) y en el caso de las imágenes CBERS se utilizó la combinación IRC, Rojo y Verde, puesto que estas imágenes no cuentan con información en el canal SWIR (Figura 1).

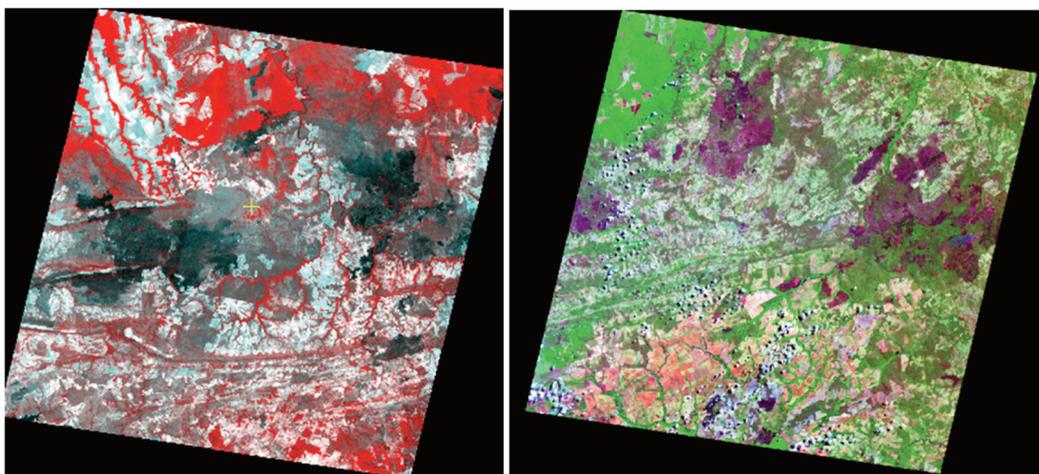


Figura 1. Ejemplo de imágenes de alta resolución utilizadas en AQL2004 para la extracción de perímetros quemados, a la izquierda imagen CBERS (combinación de bandas R: SWIR – G: rojo – B: verde); a la derecha imagen Landsat (combinación de bandas R: SWIR – G: infrarrojo – B: azul).

Las imágenes de alta resolución utilizadas para la obtención de perímetros quemados están localizadas en diversas latitudes de Sudamérica y cubren gran parte de los ecosistemas del continente. Utilizando estos perímetros se realizó la extracción de información sobre zonas quemadas y no quemadas, y también fueron utilizados en la fase de validación de las semillas. En la siguiente figura vemos la distribución espacial de las imágenes (Figura 2).

Como hemos mencionado anteriormente, algunos de los factores que pueden explicar la gran heterogeneidad que muestran las áreas quemadas tienen relación con el tipo de ecosistema afectado, la severidad del fuego, el tiempo entre la quema y la captura de la imagen, la humedad del terreno o la época del año. En este sentido, la hipótesis planteada se fundamenta en que la respuesta espectral del área quemada debe mostrar diferencias en los distintos tipos de vegetación y climas, especialmente en los casos más extremos como por ejemplo entre vegetación arbórea y pastizales o entre climas tropicales y climas fríos. Contar con información de todas estas variables es muy difícil, más aún en una zona de grandes dimensiones.

Por ello, se ha analizado la información existente para Sudamérica que esté relacionada con estos factores y que puede ser útil para la diferenciación regional del umbral. Principalmente se ha buscado información relacionada con la vegetación y el clima.

Tras el análisis de la información disponible se han seleccionado tres capas de información (Figura 3):

- a) Un mapa de clasificación climática según Köppen realizado a escala global por el Department of Natural Sciences la Universidad de Viena (Beck *et al.*, 2005; Kottek *et al.*, 2006).
- b) Un mapa de cobertura de suelo (MODQ12) (Friedl *et al.*, 2002; Friedl *et al.*, 2001) categorizado con la leyenda del IGBP (International Geosphere – Biosphere Programme) que se realizó utilizando información proveniente del sensor MODIS.
- c) Los campos continuos de vegetación (Vegetation Continuous Fields - VCF) (Hansen *et al.*, 2003). Este último producto se compone de tres bandas que expresan la proporción de arbolado, de vegetación herbácea y de suelo desnudo y también se generó con datos del sensor MODIS.

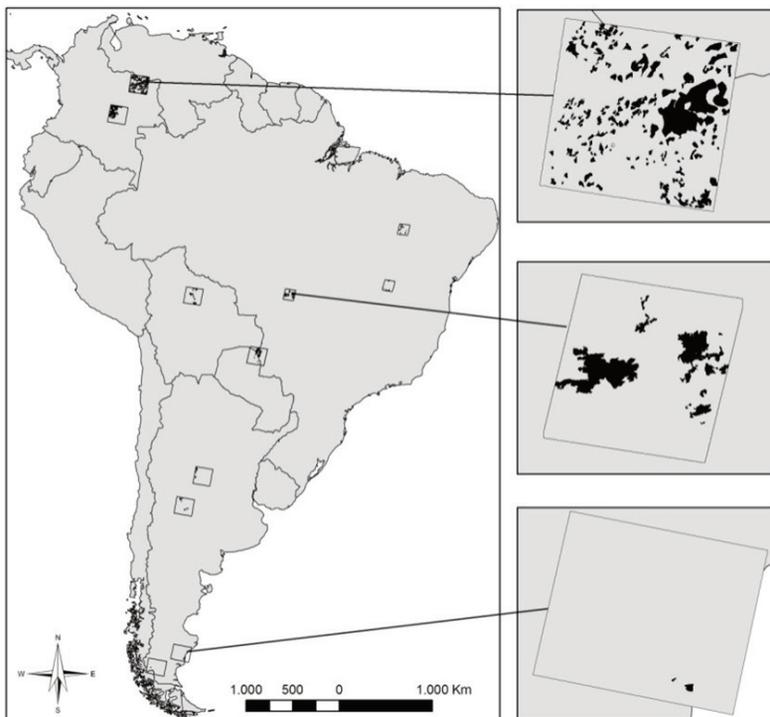


Figura 2. Localización de las ventanas donde se identificaron los perímetros quemados

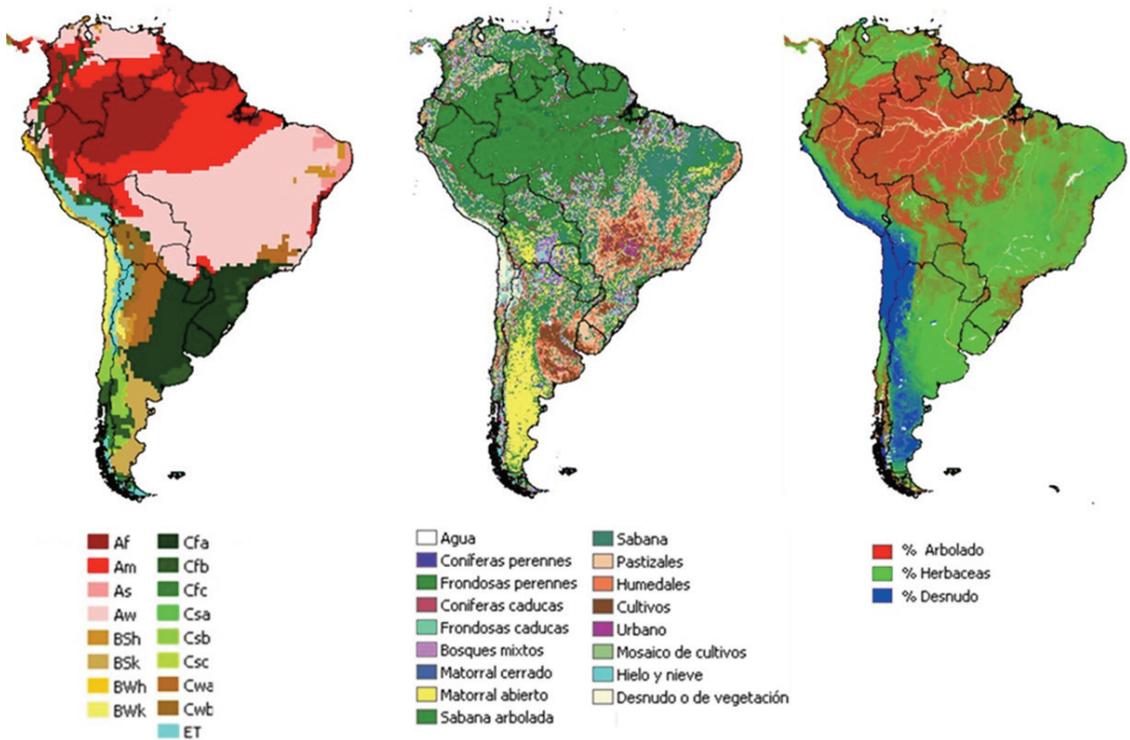


Figura 3. Variables auxiliares utilizadas para el análisis (en orden de izquierda a derecha: a) Clasificación climática de Köppen – b) Cobertura de suelo MOD12Q1 – c) Campos continuos de vegetación)

En la siguiente tabla (Tabla 2) se detalla la clasificación climática de Köppen:

Código	Descripción	Código	Descripción
Af	Tropical Húmedo	Cfb	Templado húmedo (verano templado)
Am	Tropical Monzónico	Cfc	Templado húmedo (verano frío)
As	Tropical (verano seco)	Csa	Templado con verano seco y cálido
Aw	Tropical (invierno seco)	Csb	Templado con verano seco y templado
BSh	Estepario cálido	Csc	Templado con verano seco y frío
BSk	Estepario frío	Cwa	Templado con invierno seco y verano cálido
BWh	Desierto cálido	Cwb	Templado con invierno seco y verano templado
BWk	Desierto frío	ET	Polar
Cfa	Templado húmedo (verano cálido)		

Tabla 2. Descripción de la clasificación climática de Köppen

METODOLOGÍA

La metodología planteada para la detección de las semillas cuenta con información de entrada proveniente del producto MODIS (MCD43), de mapas de clima y vegetación, y de perímetros de área quemada de alta resolución. El algoritmo parte de una serie de procesamientos previos de los datos (lectura, reproyección, mosaico), continuando con una serie de análisis y criterios espectrales y temporales para detectar los píxeles semillas (Figura 4). Gran parte del proceso se automatizó con la ayuda del lenguaje de programación propio del sistema de tratamiento PCI Geomatics (<http://www.pcigeomatics.com/>, último acceso 4 de mayo de 2008).

Pre-procesamiento

El pre-procesamiento de las imágenes MODIS incluyó principalmente el cambio del formato original .hdf al formato .pix, luego la generación de los mosaicos y posteriormente la reproyección desde sinusoidal (proyección original) a Goodes Homolosa interrumpida. Este sistema de referencia fue elegido puesto que gran parte de la información disponible se encontraba en dicha proyección.

Para cubrir completamente Sudamérica se descargaron 28 cuadrantes de unos 1000 por 1000 kilómetros cada uno (Figura 5), lo que supone una superficie total de estudio de 28 millones de kilómetros cuadrados aproximadamente.

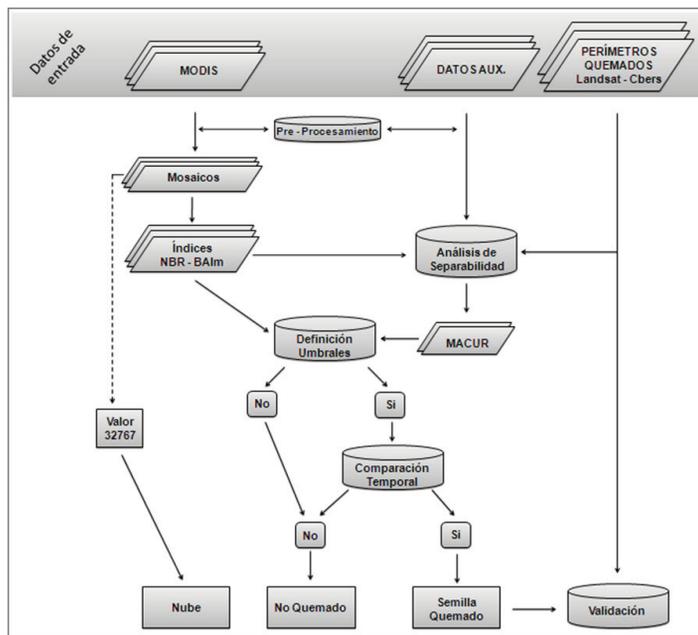


Figura 4. Esquema del algoritmo de detección de píxeles semilla

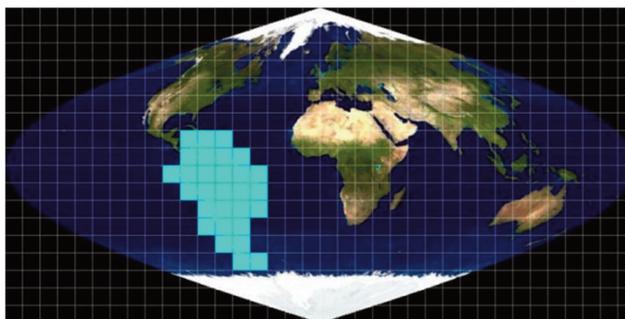


Figura 5. Imágenes MODIS - MCD43 descargadas.

Cálculo de índices espectrales

Dentro de las posibilidades existentes para discriminar áreas quemadas se han obtenido buenos resultados con el uso de índices adaptados a la señal del carbón. En el presente estudio se optó por la utilización de los índices BAI Burned Area Index (Martín, 1998), que fue diseñado específicamente para la discriminación de áreas quemadas y el NBR Normalized burn ratio (Key y Benson, 1999), ampliamente utilizado para estos fines. Ambos índices han mostrado resultados satisfactorios en diversos estudios y poseen una mejor capacidad discriminatoria sobre otros índices espectrales (Bastarrika y Chuvieco, 2006; Chuvieco *et al.*, 2002; Chuvieco *et al.*, 2008; Heredia *et al.*, 2003; Lasaponara, 2006; Loboda *et al.*, 2007; Martín, 1998; Martín *et al.*, 2005; Roy *et al.*, 2005).

Muestreo de áreas quemadas y no quemadas

Para analizar la variabilidad de la señal quemada en función de las diversas variables auxiliares de vegetación y clima hemos realizado un muestreo aleatorio estratificado sobre las zonas quemadas utilizando los perímetros que teníamos disponibles. Este tipo de muestreo permite asignar el número de muestras

proporcionalmente al tamaño del polígono, por lo tanto los polígonos más grandes contarán con un mayor número de muestras y los más pequeños tendrán menor cantidad (Figura 6). Las muestras no quemadas se obtuvieron sobre zonas cercanas y similares a las áreas quemadas, lo que permite asegurar características homogéneas, para ello se consideró un corredor de seguridad (búfer) de dos píxeles al exterior de los perímetros quemados. A partir de este límite, se realizó un segundo corredor de diez kilómetros dentro del cual se extrajeron muestras aleatorias. De cada punto se extrajo la información de los índices NBR y BAIm y de los datos auxiliares.

Análisis de separabilidad entre quemado y no quemado

En primer lugar se analizó la capacidad discriminatoria de los índices espectrales NBR y BAIm entre zonas quemadas y no quemadas. Los datos se agruparon según la ventana y según tipo de cobertura de suelo, con esto se pretende comprobar que zonas presentaran mayores problemas para la discriminación. La prueba seleccionada fue la llamada *distancia normalizada* (D) (Kaufman y Remer, 1994), la cual ha sido ampliamente utilizada en numerosos es-

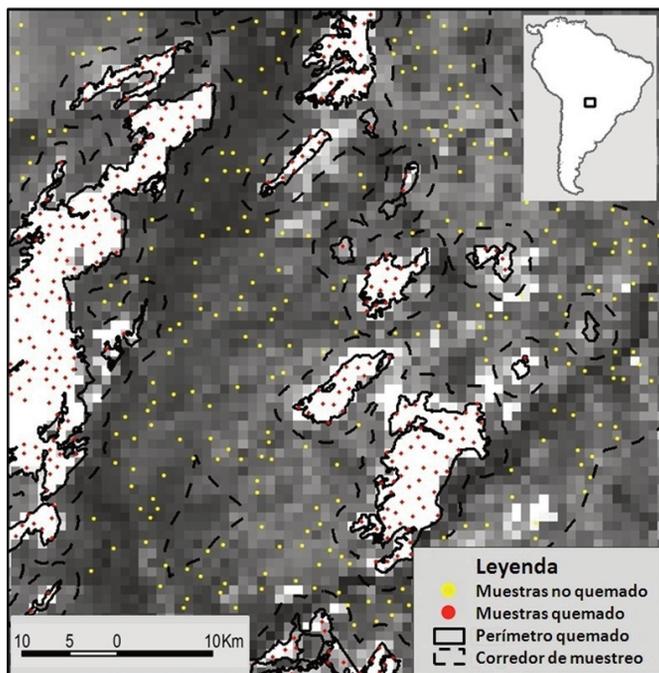


Figura 6. Muestreo aleatorio para la extracción de información espectral. Realizado sobre imágenes MODIS. En la figura vemos un ejemplo en una ventana del centro del continente, de fondo una imagen del índice BAIm (2004241), donde los tonos más claros representan valores más altos del índice.

tudios de este ámbito (Bastarrika y Chuvieco, 2006; Chuvieco *et al.*, 2005; Garcia y Chuvieco, 2004; Lasaponara, 2006; Martín, 1998; Pereira, 1999), la fórmula se define de acuerdo a:

$$D = \frac{|X2 - X1|}{S2 + S1} \quad (1)$$

Donde X2 y X1 corresponden a los valores medios de las áreas quemadas y no quemadas respectivamente y S2 y S1 son las desviaciones típicas de las mismas clases. Según este índice (*D*) los valores mayores indican una separabilidad mejor, los valores más bajos indican que hay una mayor confusión entre las clases.

Análisis de variabilidad dentro de zonas quemadas

Luego de realizar las pruebas de separabilidad entre áreas quemadas y no quemadas centramos el análisis en los datos obtenidos dentro de los perímetros quemados con el objeto de verificar la existencia de variaciones significativas en el valor de los índices NBR y BAIm en estas zonas. Con este propósito, los valores de los índices se agruparon en función de las coberturas antes descritas (variables de clima y vegetación). Para simplificar los análisis estadísticos se optó por la reclasificación de la variable de cobertura de suelo en tres grupos principales: coberturas arboladas, matorrales y coberturas herbáceas. En el caso de la variable VCF se utilizó solo

la componente de arbolado ya que existe una alta correlación negativa con la componente de herbáceas (Pearson de -0,91) y el uso de una de ellas es suficiente en el análisis. La componente de arbolado fue agrupada en percentiles del 20%. La componente de suelo desnudo fue eliminada del análisis ya que, como es lógico, no se queman zonas con poca vegetación y la mayor parte de los puntos muestreados coinciden con zonas de suelo desnudo menores al 10%. Las variables de agrupación utilizadas en las pruebas estadísticas fueron tres, cada una dividida en los grupos que vemos en la tabla 3. En el caso de la variable climática se contó con cinco grupos que representan la variabilidad climática del continente, dos de la zona tropical (Aw y Am), dos de la zona templada (Cwa y Cwb) y uno de la zona fría (Bsk).

Luego del análisis visual de las gráficas realizadas con las tres variables de agrupación se determinó realizar pruebas estadísticas de comparación de medias. Esto permitió saber si las diferencias entre los grupos eran significativas y de este modo seleccionar las variables más apropiadas con el fin de generar el mapa de clases para la diferenciación de umbral regional. En este sentido, de cara a utilizar el test más apropiado para estas comparaciones, se contrastó la normalidad de los índices (NBR y BAIm) obtenidos sobre zonas quemadas utilizando la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Los resultados de esta prueba determinaron que los datos NBR y BAIm extraídos dentro de los perímetros quemados no se ajustaban al comportamiento de una distribución normal, por lo que se decidió realizar pruebas no paramétricas para la comparación de medias. Específicamente se seleccionó la prueba U de Mann-Whitney.

	Variable	Grupos
1	Componente de arbolado (VCF)	0-12
		13-17
		18-23
		24-29
		>30
2	Climas Köppen	Aw
		Am
		Bsk
		Cwa
		Cwb
3	Cobertura de Suelo (MOD12q1)	Arbolada
		Matorrales
		Herbáceas

Tabla 3. Variables de agrupación utilizadas para las pruebas de comparación de medias

Generación del Mapa Auxiliar de Clases de Umbrales Regionales (MACUR)

Luego del análisis estadístico de las variables se seleccionaron los grupos que mostraron diferencias significativas en la prueba de Mann-Whitney. Específicamente, hemos considerado que existe diferencia entre los grupos cuando tienen un valor de significación inferior a 0,05 en ambos índices (NBR y BAIm), de lo contrario se consideran como grupos iguales. Finalmente, combinando los grupos de las variables que mostraron diferencias significativas se realizó el MACUR.

Definición de los umbrales

La definición de los umbrales post incendio se realizó tomando como referencia un grupo de muestras aleatorias extraídas dentro de los perímetros de área quemada disponibles. En total se contó con más de 400 perímetros distribuidos en distintas regiones de Sudamérica. Luego, para asignar un valor de umbral diferenciado en cada clase del MACUR se utilizó la media aritmética de todas las muestras obtenidas en cada una de ellas.

Para la definición de los umbrales temporales se utilizaron los perímetros de área quemada con los que se realizó una serie de extracciones temporales en diversas ventanas representativas de los ecosiste-

mas del continente. El análisis temporal permite en primer lugar evaluar la existencia de un cambio importante en la reflectividad después del incendio, por lo que t debería ser mayor a $t-1$, en el caso de BAIm y menor en el caso de NBR. En segundo lugar la comparación con las imágenes posteriores al incendio permitirá evaluar la persistencia de la señal quemada en el tiempo, en este sentido las diferencias entre t , $t+1$ y $t+2$ deben ser leves, de lo contrario el píxel no se considera como quemado. Con los datos obtenidos se probaron tres tipos de comparaciones temporales, la diferencia simple ($t - t-1$), el cociente ($t / t-1$) y la pendiente de cambio (α). Esta última la calculamos como:

$$\tan \alpha = \frac{\Delta \text{Índice}}{\Delta t} \quad (2)$$

Donde:

α = ángulo de la pendiente

$\Delta \text{Índice}$ = Índice posterior al incendio - Índice previo al incendio

Δt = Intervalo de tiempo en días

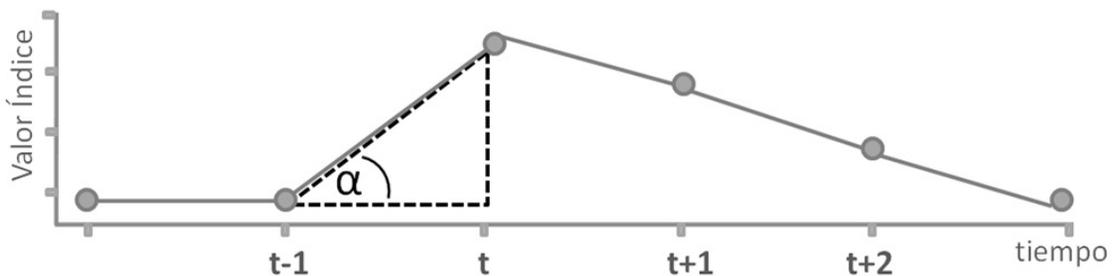


Figura 7. Ángulo de la pendiente de cambio

Posteriormente, los resultados de las tres comparaciones temporales fueron evaluados y se definieron los umbrales de corte.

En resumen, para la discriminación de los píxeles semillas hemos incorporado en primer lugar un análisis post incendio y en segundo lugar el análisis temporal, en este sentido las condiciones que debe cumplir un píxel para ser considerado semilla son las siguientes:

- El NBR y el BAI_m deben superar el valor umbral definido según cada clase del MACUR.
- La comparación temporal entre el índice post incendio (t) y el índice pre incendio (t-1) debe mostrar un cambio significativo. El umbral será definido mediante un valor obtenido del análisis temporal dentro de perímetros quemados identificados previamente.
- La comparación temporal entre los índices post incendio (t) y los índices posteriores (t+1 y t+2) deben mostrar diferencias leves, es decir estabilidad de la señal post incendio. Especialmente en regiones templadas y frías.

Identificación de zonas con mayor cobertura nubosa

Como hemos mencionado anteriormente el producto MODIS - MCD43 identifica los píxeles que se encuentran cubiertos por nubes asignándole un valor fijo (32767). Utilizando esta información,

hemos cuantificado la cantidad de píxeles libres de nubosidad para los años 2004, 2005 y 2006. De esta manera se pretende identificar las zonas donde la detección de áreas quemadas tendrá mayores limitaciones debido a la menor posibilidad de obtener datos útiles y evitar confundir con errores de omisión.

El cálculo se realizó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Nubes} = \left(\frac{\text{N}^\circ \text{ de compuesto cubiertos por nubes}}{\text{N}^\circ \text{ Compuestos anuales}} \right) * 100$$

Validación de las semillas

Para comprobar el grado de confianza del algoritmo de detección hemos utilizado los perímetros de áreas quemadas de alta resolución. Con ellos hemos comprobado el porcentaje de detección de manchas agrupándolas según su tamaño. Consideramos un perímetro como detectado si al menos una semilla está dentro de él. Se ha realizado la validación utilizando todos los perímetros disponibles y luego hemos utilizado sólo los perímetros que disponían de imágenes libres de nubosidad.

En cuanto a las falsas detecciones fueron cuantificadas y agrupadas según el tamaño de la mancha. En la figura 8 vemos un ejemplo de los perímetros y las detecciones MODIS (semillas).

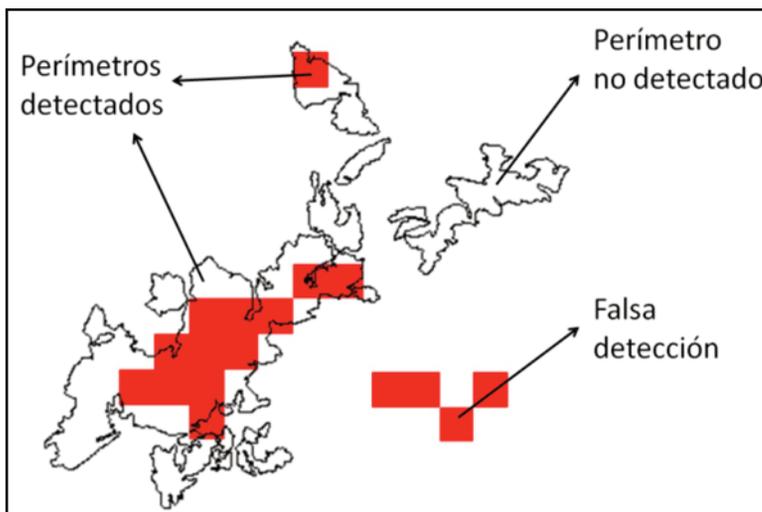


Figura 8. Validación de las semillas

RESULTADOS

Análisis de separabilidad entre quemado y no quemado

En la siguiente figura (Figura 9) se pueden ver los resultados del análisis de separabilidad de los índices NBR y BAIm entre quemado y no quemado. Los resultados muestran la separabilidad en función de la ventana muestreada. Se puede observar que de las once ventanas, el índice BAIm ofrece mayores valores de discriminación en siete. En cambio el ín-

dice NBR muestra mejores resultados en cuatro de los once casos.

Del mismo modo se ha calculado la separabilidad entre diferentes tipos de cobertura (Figura 10). Los mayores valores de separabilidad se observan en las coberturas de bosques y cultivos, en cambio los matorrales y coberturas herbáceas mostraron inferiores valores de separabilidad. En cuanto a los índices también se aprecian diferencias, ya que en las coberturas de cultivos, matorral y pastizales los mejores valores fueron para el índice BAIm y en las demás coberturas el NBR muestra mayor separabilidad.

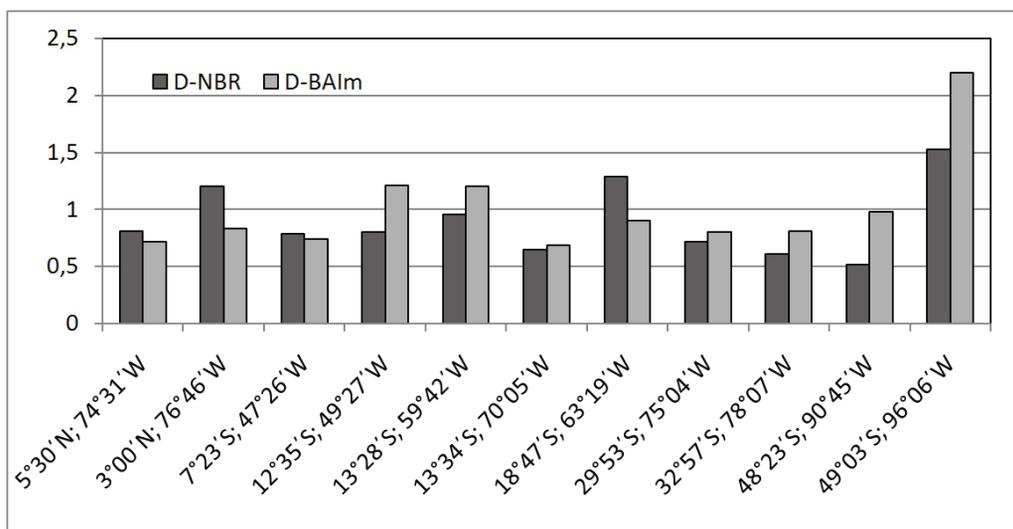


Figura 9. Separabilidad entre quemado y no quemado para los índices NBR y BAIm según diferentes ventanas de muestreo

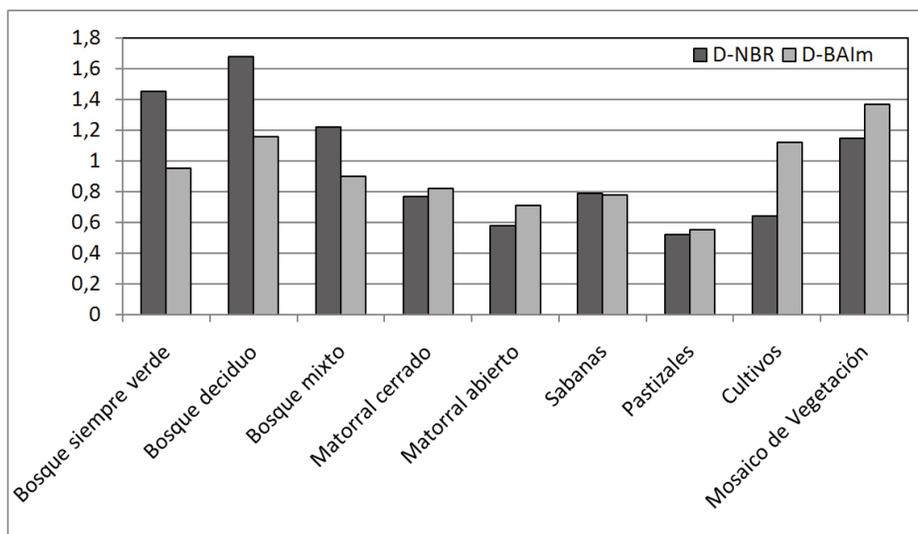


Figura 10. Separabilidad entre quemado y no quemado para los índices NBR y BAIm según tipos de cobertura de suelo

Variabilidad dentro de zonas quemadas

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la prueba de comparación de medias (U de Mann-Whitney). Los valores medios de áreas quemadas se muestran en círculos negros con su respectiva desviación típica en barras del mismo color. Como referencia se observa en tonos grises las medias obtenidas en áreas no quemadas. Luego, en las tablas 3, 4 y 5 se pueden ver los valores de significación en cada caso analizado. Si el valor de significación es mayor a 0,05 las clases son estadísticamente iguales, por el contrario si este valor es menor las clases son diferentes.

En primer lugar, se observan las gráficas de medias agrupadas según cobertura de suelo (Figura 11). Las categorías herbáceas y arbolado muestran valores medios de quemado cercanos a cero y la categoría de matorrales muestra un valor levemente inferior a cero. En el caso del BAI_m, el valor quemado más bajo lo muestra la categoría de herbáceas, el mayor valor la categoría de matorrales y la categoría arbolada muestra un valor intermedio. El índice BAI_m

muestra desviaciones típicas amplias en comparación con el NBR. Esto se debe a que con este índice se obtienen valores muy elevados en los casos donde la distancia al valor de convergencia es muy próxima.

Los resultados del test entre los tipos de cobertura (herbáceas, matorral y árboles) indicaron que no hay diferencia significativa entre las zonas quemadas de herbáceas y árboles, dado que sus valores de significación superan 0,05, tanto para el NBR como para el BAI_m. Por tanto, se acepta la hipótesis de igualdad. Por el contrario, la cobertura de matorrales difiere estadísticamente de las demás clases (significación < 0,05).

En segundo lugar, se realizó el análisis según el tipo de clima (Figura 12), se pueden apreciar algunas diferencias, especialmente en el tipo tropical monzónico (Am) que muestra los valores más bajos de BAI_m y los mayores en NBR. El clima estepario frío (BSk) es el que muestra los valores más altos de BAI_m y más bajos de NBR. Los climas templados (Cw) y el clima tropical de sabana (Aw) muestran valores medios en ambos índices.

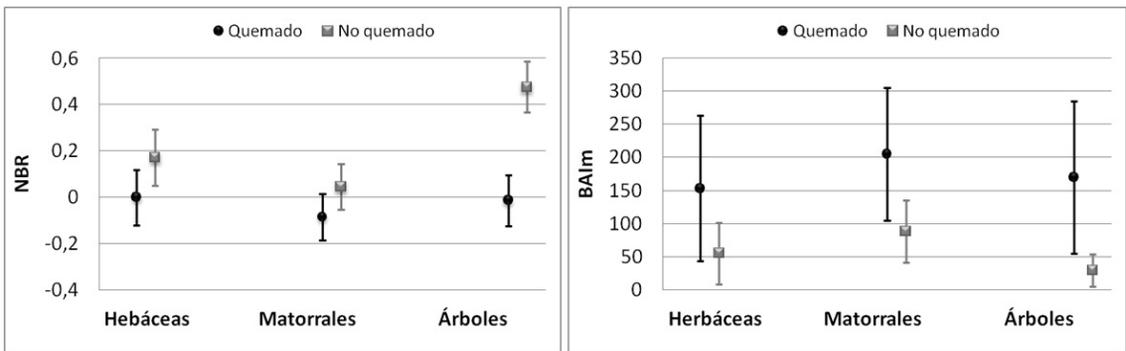


Figura 11. Valores índice NBR (izquierda) y BAI_m (derecha) según diferentes tipos de cobertura de suelo

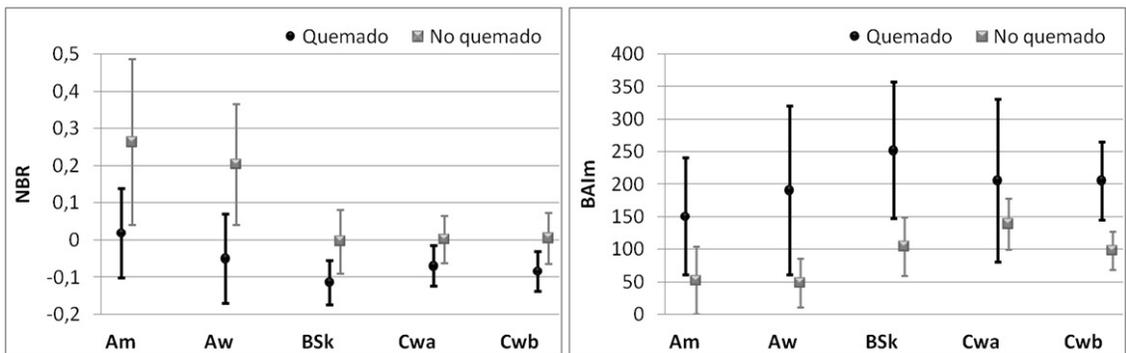


Figura 12. Valores índice NBR (izquierda) y BAI_m (derecha) según diferentes tipos de clima

La prueba U de Mann-Whitney realizada utilizando como variable de agrupación los tipos de clima (Köppen) mostró para el caso del NBR que no existe diferencia significativa entre CWa, CWb y Aw (significación > 0,05), en tanto que la combinación Am y BSk difieren significativamente de los demás grupos. En el caso del BAI_m, la combinación entre CWa y CWb muestran un valor de 0,582 por lo que se consideran iguales, las demás combinaciones son menores a 0,05; por lo que en estos casos se rechaza la hipótesis de igualdad.

Por último, se ha utilizado la variable de agrupación de arbolado (Figura 13). Los valores de los índices NBR y BAI_m se presentan agrupados en función de distintos porcentajes de arbolado. Como se observa no se aprecian diferencias claras.

En el caso de la variable de arbolado, los resultados de la prueba de comparación de medias mostraron, para el índice NBR, que no existen diferencias significativas entre ninguno de los grupos. En tanto, para el índice BAI_m solo dos combinaciones se consideran como diferentes (0-12 y 18-23; 18-23 y >30).

Mapa auxiliar de clases de umbrales regionales (MACUR)

El mapa resultante cuenta con 6 clases (Figura 14), en la tabla 4 podemos ver la características de cada una de las categorías y el valor de los umbrales post incendio establecidos para los índices NBR y BAI_m en función de cada una de las clases del MACUR.

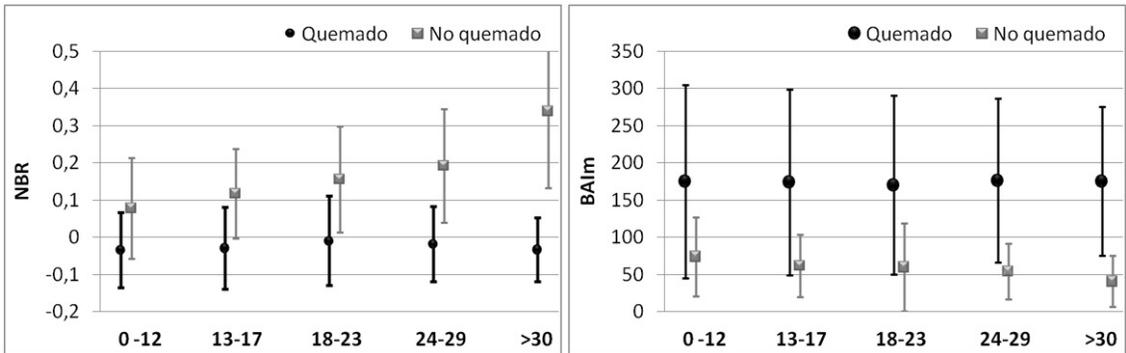


Figura 13. Valores de los índices NBR (izquierda) y BAI_m (derecha) según diferentes porcentajes de arbolado

Clase	Descripción	Umbral NBR	Umbral BAI
0	No combustibles	--	--
1	Clima tropical con cobertura arbolada o herbáceas	0.025	158
2	Clima templado o de sabana con cobertura arbolada o herbácea	-0.04	189
3	Clima estepario con cobertura arbolada o herbácea.	-0.061	210
4	Clima tropical con cobertura de matorral	-0.04	176
5	Clima templado o de sabana con cobertura de matorral	0.073	208
6	Clima estepario con cobertura de matorral	-0.095	228

Tabla 4. Umbrales de discriminación de NBR y BAI_m (post incendio)

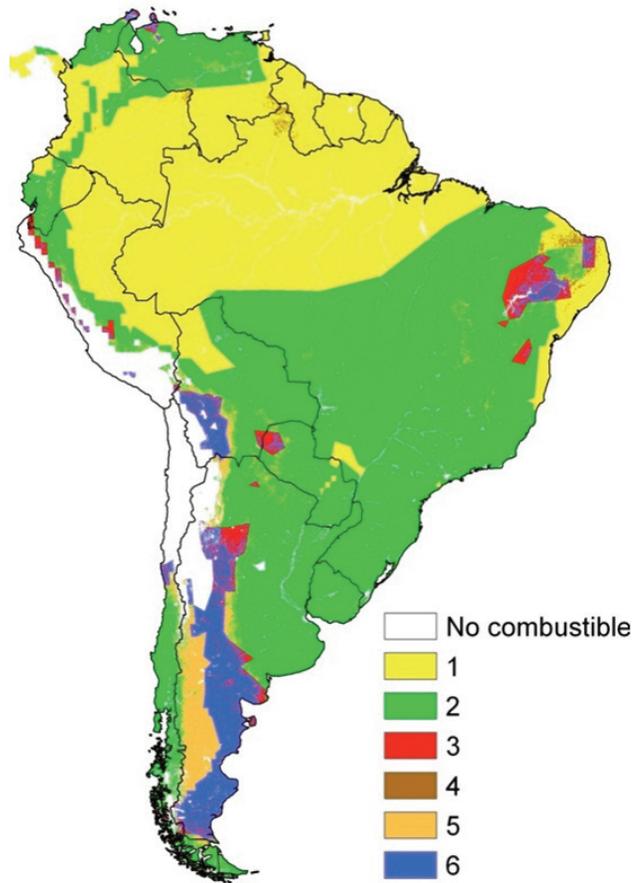


Figura 14. Mapa de clases para la diferenciación de umbrales

Umbrales temporales

Las extracciones temporales realizadas permitieron evaluar distintos métodos de comparación temporal, como resultado determinamos que la utilización de la diferencia simple y del cociente dificulta la asignación de un umbral que cubra todas las condiciones debido a que muestran amplias diferencias dependiendo de las zonas afectadas. Por el contrario, la *pendiente de cambio* mostró valores más homogéneos con una diferencia entre el menor y el mayor valor de solo 10° (Tabla 5).

Finalmente, se determinó la utilización de la *pendiente de cambio* aplicada sobre el índice BAI_m para realizar las comparaciones temporales. El umbral definido para la comparación entre la imagen pre y post incendio fue de 70° de pendiente. En el análisis temporal con las imágenes posteriores al incen-

dio se determinó que la pendiente no debía disminuir ni aumentar más del 10° en la imagen t+1 y no menos ni más de 20° en la imagen t+2.

Identificación de la nubosidad

A continuación se muestra un mapa donde se aprecia las zonas con mayor cantidad de periodos cubiertos por nubes. El porcentaje está expresado en número de compuestos cubiertos por nubes durante un año.

La figura 15 muestra el porcentaje de compuestos con presencia de nubes para los años 2004, 2005 y 2006. Se observan regiones donde la presencia de nubes es muy elevada. En general, se observa una distribución similar durante los tres años, aunque 2004 evidencia una menor cantidad global de cobertura nubosa.

Ubicación	País	Diferencia	Cociente	Pendiente
20°09S; 58°11W	Paraguay	257.6	5.4	86.4
13°24S; 45°13W	Brasil	63.6	2	75.9
08°02S; 44°00W	Brasil	95.7	2.6	80.5
03°01N; 71°46W	Colombia	241.9	137.3	86.2
05°55N; 69°30W	Venezuela	181.4	13	85

Tabla 5. Resultados de los métodos evaluados para el análisis temporal

Comparación	Umbral pendiente
Pre(t-1) – post(t)	>70°
Post (t) – post(t+1)	+10°
Post (t) – post(t+2)	+20°

Tabla 6. Umbrales utilizados para las comparaciones temporales, utilizando índice BAIm

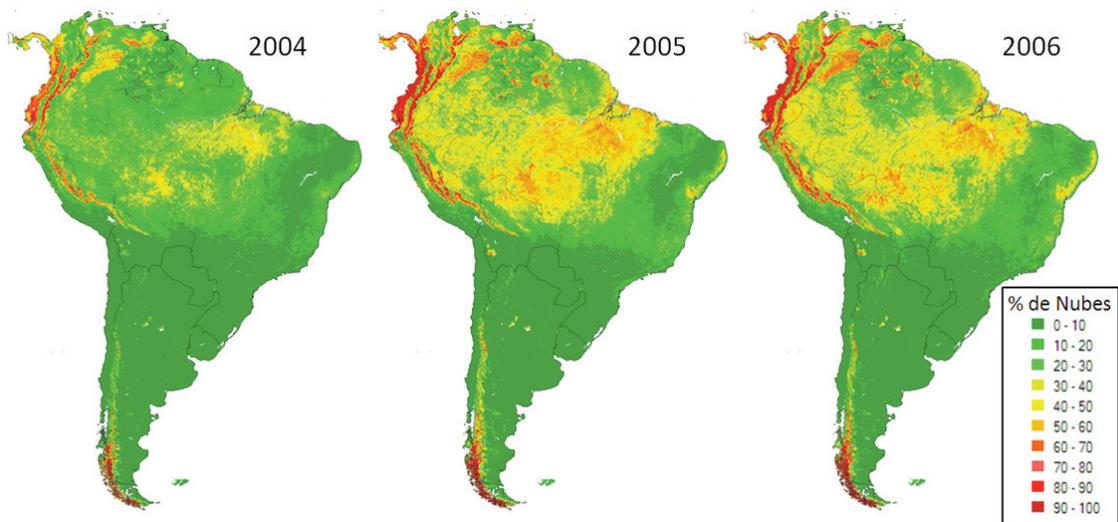


Figura 15. Porcentaje de compuestos con nubes por año

Las zonas más sensibles a la nubosidad son el oeste de Ecuador y Colombia, los llanos de Venezuela, la zona central de Brasil y el extremo sur de Chile.

Esta alta nubosidad se traducirá en una menor posibilidad de detección de áreas quemadas. Por el contrario existen amplias zonas del continente donde el compuesto MCD43 consigue imágenes libre de nubes en prácticamente todo el año, este es el caso de Argentina, Chile, Paraguay, Uruguay y la zona Sur de Brasil, Bolivia y Perú.

Validación

La siguiente tabla muestra los porcentajes de perímetros detectados en función de su tamaño.

Si consideramos todos los perímetros quemados de alta resolución que disponemos para este análisis, se encuentren o no cubiertos por nubes, el porcentaje

de acierto baja notablemente, especialmente en el caso de los incendios de menor tamaño. Ya que mientras más pequeño sea el incendio, las posibilidades de que quede completamente cubierto por nubes aumentan. Esta baja detección no se puede atribuir a fallos del algoritmo sino más bien a la alta frecuencia nubosa en estas áreas (Figura 16).

Una segunda evaluación de los resultados se realizó para verificar el error de comisión de las semillas, que se refiere a las semillas mal clasificadas como quemadas.

Píxeles semilla detectados en cada año

La siguiente tabla muestra el número de píxeles detectados en cada año, se observa una mayor cantidad en 2004.

Tamaño (km2)	Observados	Detectados	% Detección
>100	16	15	93.8
75 a 99	7	6	85.7
50 a 74	9	8	88.9
25 a 49	54	46	85.2
15 a 24	45	35	77.8
6 a 14	89	59	66.3
1 a 5	102	30	29.4
Total	322	199	61.2
Total>5km	220	169	82.95

Tabla 7. % Detección de perímetros quemados según su tamaño

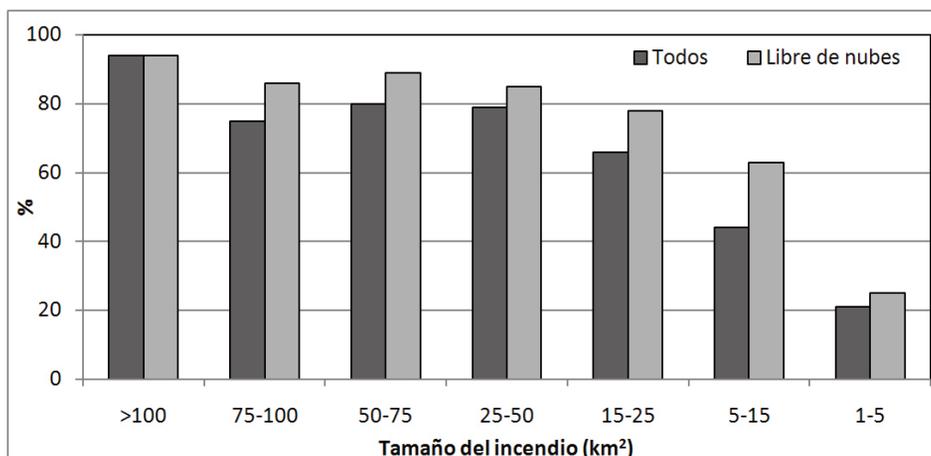


Figura 16. % Detecciones según tamaño de incendio

Tamaño de la mancha (Píxeles)	Número	% del total
2	20	34
3 y 4	20	34
5 y 6	8	14
7 y 8	2	3
9 y 10	2	3
>10	6	10
Total	58	100

Tabla 8. Manchas de semillas discriminadas en zonas no quemadas según tamaño – error de comisión

	AÑO		
	2004	2005	2006
Número de píxeles semilla (km ²)	36862	34479	24029

Tabla 9. Número de píxeles semilla detectados en cada año

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

El análisis de los datos espectrales de área quemada permitió confirmar la existencia de variaciones en el valor de los índices BAIm y NBR en las diferentes ventanas muestreadas, del mismo modo, se observan diferencias estadísticas significativas al agrupar los valores extraídos según las variables de cobertura de suelo y según tipos climáticos. Según el porcentaje de arbolado no se observan diferencias significativas, por esto no fue incluida como un factor de diferenciación del umbral.

El análisis estadístico de los índices agrupados según la variable de coberturas de suelo mostró un comportamiento similar para coberturas herbáceas y arboladas, y un valor mayor para los matorrales. Esto parece contradictorio, pues se podría esperar que a mayor biomasa la señal de carbón debería ser más alta, por lo tanto manteniendo las mismas condiciones y sólo cambiando el tipo de cobertura podríamos esperar que la señal de carbón más intensa la dejaría el arbolado, seguido del matorral y, por último, la señal más débil la dejaría la cobertura herbácea. Esta situación se puede explicar principalmente por el contenido de humedad de la vegetación, esta variable es crítica en la ignición y en

el comportamiento del incendio (De Santis *et al.*, 2006), pues a mayor contenido de humedad las posibilidades de una combustión completa será sustancialmente menor, por esto es importante considerar la cantidad de biomasa y el contenido de humedad que esta tiene, aún así es importante hacer notar que existen otros factores que tendrán incidencia en la variabilidad de la señal quemada, como la pendiente del terreno, la velocidad del viento o la estructura y continuidad del combustible, entre otros. Todos estos factores determinarán la severidad del fuego y por lo tanto el balance entre estas variables fundamental en la cantidad de señal quemada que dejará el incendio.

De la misma forma, es importante recordar que la señal captada por el sensor está compuesta por una media de todo lo que se encuentra dentro del píxel (en este caso 1km²), por ejemplo en el caso de los incendios llamados de superficie donde solo es afectado el sotobosque y el dosel de los árboles no se quema la señal quemada del píxel se verá afectada por la influencia del verdor de las copas, lo que se traducirá en una disminución del valor de la señal quemada.

Las pruebas de separabilidad espectral entre áreas quemadas y no quemadas mostraron diferencias

entre las ventanas de muestreo, lo que se debe fundamentalmente a los distintos tipos de vegetación existentes en cada una de ellas. Así mismo, el análisis de separabilidad según tipo de cobertura mostraron diferencias entre las categorías, esto indica que algunas coberturas tendrán un mayor grado de confusión que otras, en especial las coberturas que presentarán mayores dificultades en la discriminación serán pastizal, sabanas y matorral abierto. Los mayores valores de separabilidad entre quemado y no quemado los entregaron las coberturas de bosques y cultivos.

En cuanto a los índices utilizados podemos apreciar que en la mayoría de los casos (64%) la capacidad discriminatoria (separabilidad) del BAIm superó a la del NBR (36%). Esto nos permite justificar que su uso combinado ayudará a mejorar el grado de confianza en de las detecciones, disminuyendo las falsas detecciones (error de comisión).

Los resultados obtenidos muestran que las variables de cobertura de suelo y clima tienen relación con la variabilidad mostrada por los índices de área quemadas NBR y BAIm en las distintas regiones de Sudamérica, y en conjunto, estas variables permiten la generación de un mapa de clases de umbrales regionales (MACUR) para incorporar en el algoritmo de discriminación de semillas, permitiendo de este modo la aplicación diferenciada de umbrales en cada región del continente.

El producto MCD43, en conjunto con el mapa auxiliar MACUR, permite la adecuada detección de píxeles semillas a escala continental y muestran una gran capacidad de detección. La metodología propuesta permite detectar píxeles semillas con un alto porcentaje de acierto en incendios superiores a 5 km² (83% detección), este porcentaje crece en la medida en que el tamaño del incendio es mayor. En tanto, en incendios iguales o menores a 5 km² las detecciones se ven limitadas.

En relación al número de áreas quemadas mal clasificadas, se aprecia que un 68% de estas falsas detecciones corresponden a manchas de pequeño tamaño (< 4 píxeles).

En cuanto a la nubosidad de los productos se observa que el comportamiento es similar en los tres años evaluados, siendo levemente menores durante el año 2004. Las zonas más nubosas son el oeste de Ecuador y Colombia, los llanos de Venezuela, la zona amazónica de Brasil y el sur de Chile. En estas zonas, la detección de píxeles quemados es problemática, pero también gran parte de estas regiones son las que menos se queman por su alta pluviome-

tría. Un mayor número de compuestos descubiertos de nubosidad aumentará la capacidad del algoritmo para detectar áreas quemadas. Por otra parte, algunos estudios realizados muestran que las sombras ocasionadas por las nubes pueden ser confundidas con áreas quemadas, lo que se puede relacionar con posibles errores de sobre estimación (García y Chuvieco, 2004; Koutsias *et al.*, 2000). La evaluación de la nubosidad realizada mostró que la mayor parte del continente presenta un gran número de compuestos libres de nubes, por lo que la detección de áreas quemadas se verá limitada solo en algunas regiones concretas.

El uso conjunto de los índices NBR y BAIm resultó ser adecuado y aunque los valores que se utilizaron como puntos de convergencia para BAIm fueron estimados originalmente por Martín, *et al.* (2005) para climas mediterráneos, su utilización en este estudio resultó efectiva, lo que verifica la utilidad de este índice para estudios a escala global.

En el análisis temporal el uso de la diferencia simple o el cociente mostraron valores muy heterogéneos dificultando la asignación de un umbral general para todo el continente. Por el contrario, el ángulo de la pendiente de cambio mostró valores más homogéneos facilitando la asignación de un único umbral para todas las regiones. De lo anterior, se puede deducir que aunque existen diferencias en la magnitud de los índices en las diferentes regiones del continente, el cambio que se presenta en el ángulo de la pendiente luego de un incendio es similar en todas las regiones e independiente del tipo de ecosistema afectado.

Finalmente, una de las ventajas del algoritmo propuesto en este estudio tiene relación con su simplicidad, que permite su implementación rápida y sin la necesidad de grandes inversiones, facilitando un sistema de cartografía de áreas quemadas a escala continental operativo y eficaz.

REFERENCIAS

- BARBOSA, P. M., GREGOIRE J.-M. y PEREIRA, J. M. C. 1999: An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. *Remote Sensing of Environment*, 69: 253-263.
- BASTARRIKA, A. Y CHUVIECO, E. 2006: Cartografía del área quemada mediante crecimiento de regiones: aplicación en entornos mediterráneos con imágenes TM y ETM+. *GeoFocus*, 6: 182-204.

- BECK, C., GRIESER, J., KOTTEK, M., RUBEL, F., y RUDOLF, B. 2005: Characterizing global climate change by means of Köppen climate classification. *Klimastatusbericht*: 139-149.
- CAHOON, D. R., STOCKS, B. J., LEVINE, J. S., COFER, W. R. y PIERSON, J. M. 1994: Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in Northern China and Southeastern Siberia. *Journal of Geophysical Research*, 99: 18627-18638.
- CHUVIECO, E. 2008: Satellite observation of biomass burning, en Earth observation of global change. *The role of satellite remote sensing in monitoring the global environment* (editado por E. Chuvieco). Springer Science: 109-142.
- CHUVIECO, E., MARTÍN, M. P. y PALACIOS, A. 2002: Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 5103-5110.
- CHUVIECO, E., OPAZO, S., SIONE, W., DEL VALLE, H., ANAYA, J., DI BELLA, C., CRUZ, I., MANZO, L., LÓPEZ, G., MARI, N., GONZÁLEZ-ALONSO, F., MORELLI, F., SETZER, A., CSISZAR, I., KARPANDEGUI, J., BASTARRIKA, A. y LOBONATI, R. 2008: Global burned land estimation in Latin América using MODIS composite data. *Ecological Applications*, 18: 64-79.
- CHUVIECO, E., VENTURA, G., MARTÍN M. P. y GOMEZ, I. 2005: Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. *Remote Sensing of Environment*, 94: 450 – 462.
- DE SANTIS, A., VAUGHAN, P., y CHUVIECO, E. 2006: Foliage moisture content estimation from one-dimensional and two-dimensional spectroradiometry for fire danger assessment. *Journal of Geophysical Research*, 111: 1-12.
- DEMPEWOLF, J., TRIGG, S., DEFRIES R. S. y EBY, S. 2007: Burned area mapping of the Serengeti-Mara region using MODIS reflectance data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4: 312-316.
- FRASER, R. H., FERNANDES, R. y LATIFOVIC, R. 2002: Multi-temporal burned area mapping using logistic regression analysis and change metrics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 3: 1486-1488.
- FRASER, R. H., LI, Z y CIHLAR, J. 2000: Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, 74: 362-376.
- FRIEDL, M. A., MCIVER, D.K., HODGES, J. C. F., ZHANG, X. Y., MUCHONEY, D., STRAHLER, A. H., WOODCOCK, C. E., GOPAL, S., SCHNEIDER, A., COOPER, A., BACCINI, A., GAO, F. y SCHAAF, C. 2002: Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83: 287-302.
- FRIEDL, M. A., MCIVER, D. K., ZHANG, X. Y., HODGES, J. C. F., SCHNEIDER, A., BACCINI, A., STRAHLER, A. H., COOPER, A., GAO, F., SCHAAF, C. y LIU, W. 2001: Global land cover classification from MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2: 733-735.
- GARCIA, M. y 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.
- HANSEN, M., DEFRIES, R., TOWNSHEND, J. R., CARROLL, M., DIMICELI, C. y SOHLBERG, R. A. 2003: Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. *Earth Interactions*, 7: 1-15.
- HEREDIA, A., MARTÍNEZ, S., QUINTERO, E., PIÑEROS, W. y CHUVIECO, E. 2003: Comparación de Distintas Técnicas de Análisis Digital para la Cartografía de Áreas Quemadas con Imágenes Landsat ETM+. *GeoFocus*, 3: 216-234.
- JUSTICE, C. O., MALINGREAU, J. P. y SETZER, A. W. 1993: Satellite remote sensing of fires: potential and limitations, en *Fire in the environment: the ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires* (editado por P. J. Crutzen y J. G. Goldammer). John Wiley & Sons: 77-88.
- KASISCHKE, E. y FRENCH, N. H. 1995: Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forest using multiple-season AVHRR NDVI composite data. *Remote Sensing of Environment*, 51: 263-275.
- KAUFMAN, Y. J. y REMER, L. A. 1994: Detection of forests using Mid-IR reflectance: an application for aerosol studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32: 672-683.
- KEY, C. y BENSON, N. 1999: The Normalized Burned Ratio, a Landsat TM radiometric index

- of burn severity incorporating multi-temporal differencing, U.S. Geological Survey (<http://www.nrmc.usgs.gov/research/ndbr.htm>).
- KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B. y RUBEL, F. 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15: 259-263.
- KOUTSIAS, N. y KARTERIS, M. 1998: Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 3499-3514.
- KOUTSIAS, N., KARTERIS, M. y CHUVIECO, E. 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.
- LASAPONARA, R. 2006: Estimating spectral separability of satellite derived parameters for burned areas mapping in the Calabria region by using SPOT-Vegetation data. *Ecological Modelling*, 196: 265-270.
- LI, Z., FRASER, R., JIN, J., ABUELGASIM, A., CSISZAR, I., PU, R. y HAO, W. 2003: Evaluation of algorithms for fire detection and mapping across North America from satellite. *Journal of Geophysical Research* 108: 1-12.
- LOBODA, T., O'NEAL, K. J. y CSISZAR, I. 2007: Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 109: 429-442.
- LÓPEZ GARCÍA, M. J. y 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, Departamento de Geografía, Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá.
- MARTÍN, M. P. y CHUVIECO, E. 1995: Mapping and evaluation of burned land from multitemporal analysis of AVHRR NDVI images. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 4 (3): 7-13.
- MARTÍN, M. P., DÍAZ DELGADO, R., CHUVIECO, E. y VENTURA, G. 2002: Burned land mapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS, IV International Conference on Forest Fire Research. 2002 Wildland Fire Safety Summit, Luso, Coimbra, Portugal, Millpress: 45.
- MARTÍN, M. P., GÓMEZ, I. y CHUVIECO, E. 2005: Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data, en *Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment* (editado por J. Riva, F. Pérez-Cabello y E. Chuvieco). Paris, Universidad de Zaragoza, GOF-C-GOLD, EARSeL: 193-198.
- OPAZO, S. y CHUVIECO, E. 2007: Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas. *Revista de Teledetección*, 27: 27-43.
- 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: 217-226.
- PEREIRA, J. M. C., SA, A. C. L., SOUSA, A. M. O., SILVA, J. M. N., SANTOS, T. N. y CARREIRAS, J. M. B. 1999: Spectral characterisation and discrimination of burnt areas, en *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin* (editado por E. Chuvieco). Berlin, Springer-Verlag: 123-138.
- PEREIRA, M. C. y SETZER, A. W. 1993: Spectral characteristics of fire scars in Landsat-5 TM images of Amazonia. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 2061-2078.
- ROY, D., JIN, Y., LEWIS, P. y 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.
- ROY, D. y LANDMANN, T. 2005: Characterizing the surface heterogeneity of fire effects using multi-temporal reflective wavelength data. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 4197-4218.
- ROY, D. P., GIGLIO, L., KENDALL, J. D. y JUSTICE, C. O. 1999: Multi-temporal active-fire based burn scar detection algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 20: 1031-1038.
- SIFAKIS, N., PARONIS, D. y KERAMITSO-GLOU, I. 2004: Combining AVHRR imagery with CORINE Land Cover data to observe forest fires and to assess their consequences. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5: 263-274.
- SIMON, M., PLUMMER, S., FIERENS, F., HO-

- ELZEMANN, J. J. y ARINO, O. 2004: Burnt area detection at global scale using ATSR-2: The GLOBSCAR products and their qualification. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 109: 1-16.
- TANSEY, K., GRÉGOIRE, J.-M., PEREIRA, J. M. C., DEFOURNY, P., LEIGH, R., PEKEL, J.-F., BARROS, A., SILVA, J., VAN BOGAERT, E., BARTHOLOMÉ, E. y BONTEMPS, S. 2007: L3JRC - A global, multi-year (2000-2007) burnt area product (1 km resolution and daily time steps), *Remote Sensing and Photogrammetry Society Annual Conference 2007*, Newcastle upon Tyne, UK.
- TANSEY, K., GREGORIE, J., BINAGHI, E., BOSCHETTI, L., BRIVIO, P. A., ERSHOV, D., FLASSE, E., FRASER, R., GRAETZ, D., MAGGI, M., PEDUZZI, P., PEREIRA, J., SILVA, J., SOUSA, A. y STROPPIANA, D. 2004: A global inventory of burned areas at 1 Km. Resolution for the year 2000 derived from SPOT VEGETATION data. *Climatic Change*, 67: 345-377.
- TRIGG, S. y FLASSE, S. 2000: Characterizing the spectral-temporal response of burned savannah using in situ spectroradiometry and infrared thermometry. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 3161-3168.