

Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas

S. Opazo Saldivia^{1,2} y E. Chuvieco Salinero²
sergio.opazo@alu.uah.es

¹ Escuela de Ciencias Agropecuarias Universidad de Magallanes.
Av. Bulnes 01855, Punta Arenas, Chile.

² Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá.
Calle Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares, España.

RESUMEN

El fuego es uno de los principales agentes causantes de cambios ambientales a diferentes escalas y en diversas latitudes. La generación de información relevante para la prevención, reducción y evaluación de los impactos generados por los incendios forestales es de gran importancia. En este ámbito, el uso de teledetección para la cartografía de áreas quemadas ha tenido un desarrollo creciente en los últimos años.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la eficacia de los distintos productos de reflectividad MODIS para ser utilizados en la cartografía de área quemada a escala global. En primer lugar, hemos analizado la separabilidad espectral de las diferentes bandas y de índices especialmente adaptados para la discriminación de áreas quemadas. Posteriormente, se abordó la discriminación de píxeles quemados para finalmente proceder a la cartografía de manchas quemadas.

La efectividad de los distintos productos evaluados se midió comparando el área quemada con los perímetros extraídos de una imagen CBERS de alta resolución espacial (20m).

El producto MODIS de 8 días mostró la mayor sobre estimación. Por su parte, el compuesto de 32 días entregó errores altos de comisión y omisión. Los productos corregidos del efecto bi-direccional (BRDF) mostraron una buena exactitud en cuanto al error de comisión. Respecto al error de omisión se puede decir que el producto MCD43 infra estima las áreas quemadas en mayor medida que el producto MOD43. Desafortunadamente, los productos corregidos del BRDF ofrecen menor resolución espacial que los productos de reflectividad de 8 días (1km/500m), reduciendo su utilidad a las aplicaciones globales.

PALABRAS CLAVE: Cartografía, áreas quemadas, MODIS, incendios, teledetección.

ABSTRACT

The fire is one of the main agents that causes environmental changes on different scales and in diverse latitudes. The generation of relevant information for the prevention, reduction and assessment of fire impacts is of great importance. With this scope, the use of remote sensing for cartography of burned areas has experienced an increasing development in the last years.

The main objective of this work is to assess the effectiveness of different MODIS reflectance products for burned area mapping at global scale. The spectral separability of different bands and spectral indices especially designed to discriminate burned areas was utilized and analyzed. The performance of the different reflectance products for mapping burned area was assessed with high-resolution imagery, namely CBERS.

MODIS 8-day standard reflectance product shows the highest over estimation of all four products evaluated. Whereas, 32 days composites offered high commissions and omission errors. The omission (84%), as a result of time persistence of carbon signal. The Bidirectional Reflectance Distribution Factor (BRDF) corrected products show the higher accuracy in the commission errors. Regarding the omission error, the MCD43 product shows a greater under estimation of burned area than MOD43 product. Unfortunately, the BRDF corrected products offer lower spatial resolution (1km/500m) than standard 8-day reflectance products, which reduce their utility to global applications.

KEY WORDS: Burned area mapping, MODIS, fire, Remote Sensing.

INTRODUCCIÓN

Importancia de los incendios en el mundo

Las actividades humanas combinadas con los sucesos naturales alteran cada vez más la cubierta

vegetal de la tierra, siendo los incendios una de las causas más importantes de este cambio (Zhan *et al.*, 2002). La gran extensión, frecuencia e intensidad que han adquirido los incendios en los últimos años hacen de este fenómeno uno de los principales problemas ecológicos en todas las escalas, afectando

cada año a millones de hectáreas en el bosque tropical, boreal y mediterráneo, causando una amplia variedad de efectos en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Martín, 1998; Morgan *et al.*, 2001; Riaño *et al.*, 2002). Dentro de estos efectos, tanto a escala local como regional, destacan el impacto sobre la utilización del suelo, su productividad, capacidad de carga, biodiversidad, alterando los procesos hidrológicos, biogeoquímicos, y atmosféricos (Roy *et al.*, 2002). Los incendios también tienen efectos directos sobre la población humana debido a la contaminación atmosférica producida por el humo, sumado a la pérdida de valiosos recursos naturales (Fraser *et al.*, 2002).

Ahora bien, el fuego es un elemento esencial en el funcionamiento de numerosos ecosistemas forestales. En los bosques tropicales, se producen incendios todos los años durante la estación seca, algunas especies muestran rasgos adaptativos como una corteza gruesa, la capacidad de cerrar las cicatrices dejadas por el fuego, la capacidad de rebrotar y adaptaciones de las semillas. La importancia ecológica de estos incendios sobre dichas especies es trascendental (Nasi *et al.*, 2002).

En muchos países no se dispone de cartografía de áreas quemadas. Esta carencia dificulta la toma de decisiones a la hora de identificar e inventariar los daños causados por los incendios (García y Chuvieco, 2004). La comunidad científica requiere de esta información para investigar el impacto que ocasiona el fuego sobre la flora, fauna, ecosistemas, suelos y en los numerosos ciclos terrestres y atmosféricos donde los incendios juegan un rol importante (Roy *et al.*, 2005).

Métodos para cartografiar áreas quemadas

Las primeras técnicas de delimitación de áreas quemadas y evaluación de daño se realizaron mediante observaciones de campo, siendo costosas e inadecuadas para incendios de grandes dimensiones. Estos procedimientos ocupaban semanas e incluso meses después de ocurrido el fuego, resultando lentos, poco precisos y ofrecían inventarios demasiado generales. Más recientemente, la delimitación de perímetros de grandes incendios se ha realizado usando técnicas de GPS (Global Positioning System) directamente desde terreno o desde helicópteros. Esta técnica genera un buen nivel de detalle del borde del área afectada, pero no considera los parches no quemados en el interior del perímetro (Heredia *et al.*, 2003).

También se ha empleado la interpretación de fotografías aéreas en blanco y negro o color para cartografiar áreas quemadas, obteniendo resultados en escalas que van de 1:10.000 a 1:25.000 (Koutsias y Karteris, 2000).

Con el lanzamiento de los primeros satélites, surgieron las primeras técnicas de teledetección que mostraron potencial en la localización de focos activos, cartografía de áreas quemadas y evaluación de daños causados por el fuego. La teledetección satelital se plantea como una técnica muy sólida para cartografiar áreas quemadas, ya que permite una observación sistemática de toda la superficie terrestre, en bandas del espectro sensibles a la discriminación de la señal quemada y en formato digital (Chuvieco, 1999). Hasta la fecha se han realizado numerosos estudios que muestran el interés de la teledetección para cuantificar el tamaño y el nivel de daño de un área quemada (Barbosa *et al.*, 2002; Chuvieco y Congalton, 1988; Chuvieco y Martín, 1994; Flannigan y Vonder Haar, 1986; Grégoire *et al.*, 2003; Karteris y Kritikos, 1991; Martín y Chuvieco, 1995; Musaoglu y Kaya, 2001; Pereira *et al.*, 1997; Tansey *et al.*, 2004).

Sensores utilizados para la cartografía de áreas quemadas

Uno de los sensores más utilizado en cartografía de áreas quemadas ha sido el NOAA-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Fue diseñado originalmente para estudios meteorológicos, cuenta con una buena cobertura temporal y cubre todo el planeta o una parte considerable de él. Se ha utilizado en numerosas investigaciones de detección de focos de calor y cartografía de áreas quemadas (Eva y Lambin, 1998; Flannigan y Vonder Haar, 1986; França y Setzer, 2001; Kaufman *et al.*, 1990; Martín *et al.*, 2002; Matson *et al.*, 1984; Roy *et al.*, 1999), aunque presenta una resolución espacial y espectral solo apropiada para estudios globales.

El sensor VEGETATION (VGT) fue desarrollado por el Centre National D'Etudes Espaciales (CNES), se lanzó por primera vez a bordo de SPOT4 (Système Probatoire de l'Observation de la Terre) en 1998 y posteriormente un segundo sensor fue lanzado en el SPOT5¹ en el año 2002. Posee 4 bandas que cubren el espectro azul (Blue, 0.43-0.47 μ m), rojo (Red,

¹ <http://www.spot-vegetation.com>

0.61-0.68 μm), infrarrojo (NIR, 0.78-0.89 μm) e infrarrojo de onda corta (SWIR, 1.58-1.74 μm). Los datos VGT son calibrados radiométricamente y corregidos de los efectos atmosféricos. Esto junto a su buena resolución espectral para estudios de áreas quemadas, explica su gran uso en los últimos años (Eastwood *et al.*, 1998; Fraser *et al.*, 2000; Maggi y Stroppiana, 2002; Silva *et al.*, 2005; Stroppiana *et al.*, 2003; Tansey *et al.*, 2004).

La aparición de nuevos sensores, diseñados para estudios ambientales, tales como MODIS (Moderate – Resolution Imaging Spectroradiometer), SAC-C/MMRS (Argentinian Satellite for Scientific Application-C/Multispectral Medium Resolution Scanner) e IRS-WIFS (Indian Remote Sensing Satellite's Wide Field of View Sensor), entre otros de menor importancia, han permitido en los últimos años llevar a cabo diversas investigaciones en cartografía de área quemada (Chuvieco *et al.*, 2005; García y Chuvieco, 2004; Li *et al.*, 2004; Vázquez *et al.*, 2001; Roy *et al.*, 2005).

A escala local, la teledetección satelital se ha utilizado para determinar perímetros y áreas quemadas, siendo la serie de sensores LANDSAT los más ampliamente utilizados (Benson y Briggs, 1978; Chuvieco y Congalton, 1988; Epting *et al.*, 2005; García-Haro *et al.*, 2001; Hall *et al.*, 1980).

Productos de cartografía de área quemada disponibles

A escala global y regional se han planteado iniciativas que pretenden generar cartografías de áreas quemadas usando distintos sensores y técnicas. Dentro de las primeras propuestas destaca el proyecto GLOBSCAR, que surgió como consecuencia de la convención de Kyoto en 1997, donde se demostró la necesidad de contar con información sobre la biomasa quemada a escala global. Este proyecto utilizó datos del sensor de baja resolución ATSR-2 a bordo del satélite ERS-2, de la Agencia Espacial Europea. Los productos GLOBSCAR² se realizaron para el año 2000 y cuentan con una resolución de 1km². Otra iniciativa pionera de carácter global es el programa Global Burned Area 2000 (GBA 2000) dirigido por el Joint Research Center (JRC) de la Comisión Europea. Dicho programa puso en marcha un grupo de trabajo internacional para desarrollar e implementar métodos avanzados

² <http://www.geosuccess.net/geosuccess/>

de cartografía de áreas quemadas, teniendo como objetivo principal realizar una estimación a escala global, utilizando imágenes SPOT Vegetation. El producto GBA 2000 cuenta con una resolución espacial de 1 Km² y se orienta principalmente a la comunidad científica para el modelamiento del cambio global relacionado con las emisiones del fuego, las reservas terrestres de carbono y la cobertura de la tierra (Fraser *et al.*, 2002). Actualmente el proyecto se encuentra en la fase de validación³.

A escala regional, la Red Latinoamericana de Teledetección e Incendios Forestales (RedLaTIF⁴) es una red regional que pretende unir esfuerzos en el campo de la observación y gestión de los incendios forestales en todos los países latinoamericanos. Su objetivo primordial es conseguir una mejor y mayor coordinación entre la comunidad latinoamericana, de todos aquellos proyectos relacionados con incendios forestales, haciendo uso de la teledetección y de todas aquellas tecnologías geoespaciales aplicables. Actualmente, la RedLaTIF está trabajando en una cartografía de áreas quemadas de Latinoamérica para el año 2004 (AQL04). Este proyecto utiliza como base datos del sensor MODIS, específicamente el compuesto de 32 días proporcionado por la Universidad de Maryland⁵. En este marco se sitúa el presente trabajo de investigación, que explora productos MODIS alternativos para cartografiar áreas quemadas a nivel global, contribuyendo la evaluación de nuevos productos que permitan continuar con este proyecto en el futuro próximo.

OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo principal de este estudio es evaluar la eficacia de los productos de reflectividad MODIS para cartografiar áreas quemadas a escala global.

Objetivos Específicos

- Establecer qué producto ofrece mayor separabilidad espectral entre áreas quemadas y no quemadas.
- Establecer un algoritmo de discriminación y cartografía de áreas quemadas.

³ http://www.gvm.jrc.it/tem/Disturbance_by_fire

⁴ <http://mob.conae.gov.ar/redlatif/>

⁵ <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/index.jsp>



Fig. 1. Área de Estudio.

- Determinar la precisión de los resultados obtenidos por los diferentes productos MODIS, comparando con las áreas quemadas obtenidas a partir de imágenes de mayor resolución espacial.

AREA DE ESTUDIO

El presente estudio cubre un sector del territorio de Brasil, Bolivia y Paraguay (Figura 1). Esta zona fue seleccionada debido a la mayor concentración de focos de calor obtenidos de información elaborada por INPE y resultados preliminares de informes del proyecto AQL. Los límites del área de estudio son: al Norte 9°57' S, al Sur 19°58' S, al Oeste 63°51' W y al Este 50°45' W.

METODOLOGÍA

Descripción del Sensor MODIS

El Sensor MODIS⁶ (Moderate Resolutions Imaging Spectroradiometer) viaja a bordo de las plataformas satelitales Terra (1999) y Aqua (2002). Este sensor posee una anchura de barrido de 2.300 Km., proporcionando una visión completa de la tierra cada 1 ó 2 días. Adquiere datos en 36 canales espectrales, ofreciendo una alta sensibilidad radiométrica (12 bits). Sus canales espectrales abarcan desde los

0.4 a 14.4 μm (Tabla 1), cubriendo las regiones espectrales del visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo de onda corta (SWIR), infrarrojo de onda media (MWIR) e infrarrojo de onda larga (LWIR). Cuenta con dos canales con una resolución espacial de 250 metros al nadir, cinco canales con 500 metros y 29 con un kilómetro (Jin y Sader, 2005; Justice et al., 1998).

Descripción de los Productos MODIS utilizados

Uno de los objetivos anteriormente expuestos consiste en determinar qué producto estándar de MODIS resulta más certero para la discriminación de áreas quemadas, para ello se evaluaron los productos de reflectividad que se describen a continuación.

Los productos MOD09A1, MOD43B4 y MCD43B4 son elaborados por la NASA (National Aeronautics and Space Administration) mediante su programa EOS (Earth Observation System) y son distribuidos por LP DAAC (The Land Processes Distributed Active Archive Center).

El producto MOD09A1⁷ se realiza a partir de 8 imágenes diarias de reflectividad, ofreciendo para cada banda una estimación de la reflectividad espectral de superficie, corregida del efecto atmosférico. Cuenta con una resolución espacial de 500 metros. Este compuesto se realiza utilizando un algoritmo que en primer lugar elimina los píxeles

⁶ <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.

⁷ <http://modis-sr.ltdri.org/html/guide.htm>.

Uso previsto	Banda	Ancho de Banda ^{nm}	Uso previsto	Banda	Ancho de Banda ^{nm}
Tierra/nubes	1	620 – 670	Superficie/nubes	20	3660 – 3840
Aerosoles	2	841 – 876	Temperature	21	3929 – 3989
	3	459 – 479		22	3929 – 3989
	4	545 – 565		23	4020 – 4080
	5	1230 – 1250	Atmósfera	24	4433 – 4438
	6	1628 – 1652	Temperatura	25	4482 – 4549
	7	2105 – 2155	Nubes Cirrus	26	1360 – 1390
Color del Océano/ Phytoplankton/ Biogeoquímica	8	405 – 420	Vapor de Agua	27	6535 – 6895
	9	438 – 448		28	7175 – 7475
	10	483 – 493	Propiedades de las nubes	29	8400 – 8700
	11	526 – 536	Ozono	30	9580 – 9880
	12	546 – 556	Superficie/nube	31	10780 – 11280
	13	662 – 672	Temperatura	32	11770 – 12270
	14	673 – 683	Altura tope nube	33	13185 – 13785
	15	743 – 753		34	13485 – 13785
	16	862 – 877		35	13785 – 14085
Atmósfera	17	890 – 920		36	14085 – 14385
Vapor de Agua	18	931 – 941			
	19	915 – 965			

Tabla. 1. Bandas del Sensor MODIS. Adaptado de Guenther 2002.

con datos considerados de baja calidad (nubes, sombras, artefactos), luego entre los píxeles restantes se conserva el que cuente con el mínimo valor en la banda 3 (459-479 μm).

El producto MOD43B4⁸ brinda cada 16 días datos de reflectividad atmosféricamente corregidos. Disminuye la influencia de las nubes respecto al MOD09 y corrige el efecto bi-direccional que provoca la influencia del ángulo de visión del sensor. Los datos son proporcionados con una resolución espacial de 1 Km.

Al igual que en el caso anterior, el producto MCD43B4 también proporciona cada 16 días datos de 1 Km. de resolución corregidos del efecto bi – direccional, de la influencia de las nubes y de las distorsiones atmosféricas. La diferencia fundamental con el anterior radica en que el MCD43B4 es generado a partir de una combinación de los datos adquiridos por Terra y Aqua, con objeto de optimizar la calidad del producto.

El producto MOD09 – 32 días⁹ es elaborado por el Departamento de Geografía de la Universidad de Maryland y está disponible on-line en GLCF (The Global Land Cover Facility) desde noviembre del año 2000, se realiza a partir de 4 compuestos de 8 días MOD09A1, conservando los valores del compuesto de 8 días que tenga el segundo albedo más

bajo. Este no se incluye en la lista de productos estándar MODIS, y se encuentra en la proyección Goode homoloseña interrumpida, frente a la sinusoidal de los productos estándar.

Los valores de reflectividad de los productos descritos anteriormente han sido escalados en todos los casos x 10.000.

Adquisición de las imágenes

Los productos MOD09A1, MOD43B4 y MCD43B4 fueron descargados gratuitamente desde el servidor Glovis¹⁰ habilitado por LP DAAC. El compuesto de 32 días, se descargó directamente desde el servidor GLCF de la Universidad de Maryland¹¹.

Selección del período de estudio

De acuerdo con el trabajo previo realizado en el proyecto AQL se logró determinar el periodo del año donde se concentra la mayor cantidad de superficies quemadas. En base a estos resultados se decidió trabajar con el periodo más afectado, siendo seleccionado el mes de Septiembre del año 2004.

⁸ <http://www-modis.bu.edu/brdf/>.

⁹ <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/modis/500m32day.shtml>

¹⁰ <http://glovis.usgs.gov/>

¹¹ <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>

Procesamiento de las imágenes MODIS

Filtrado (zonas no combustibles – nubes)

Para eliminar las zonas no combustibles de las imágenes se elaboró un filtro de vegetación utilizando el producto VCF (Vegetation Continuous Fields) confeccionado a partir de datos MODIS por la Universidad de Maryland¹². Este producto expresa en tres bandas la proporción de vegetación arbolada, vegetación herbácea, o de suelo descubierto. En este caso, hemos considerado no combustible cuando el porcentaje de suelo desnudo es superior al 80%, o si el porcentaje de herbáceas es menor al 70% y la vegetación arbolada es menor de un 10%.

En algunos casos los compuestos no logran eliminar la totalidad de la nubosidad en las imágenes, por lo que se elaboró una máscara de nubes. Esta máscara se realizó empleando un criterio espectral, etiquetándose como nube si la reflectividad en la banda 2 era superior a 25% y en la banda 3 mayor a 6%, además el ratio entre las bandas 5 / 3 debía ser mayor a 0,7.

Calculo de índices espectrales

Uno de los índices más utilizados en la cartografía de áreas quemadas ha sido el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), especialmente en el análisis multitemporal de áreas afectadas por incendios. A pesar de su abundante uso en estudios de zonas quemadas, se ha demostrado que su capacidad discriminadora es baja en relación a otros índices especialmente desarrollados para estos efectos ofreciéndose distintas alternativas que facilitan una mejor discriminación del área quemada (Chuvieco *et al.*, 2002; Pereira, 1999; Stroppiana *et al.*, 2002; Trigg y Flasse, 2001). Dentro de las posibilidades existentes se han obtenido buenos resultados en la discriminación de áreas quemadas con el uso de los índices NBR (Normalized Burned Ratio) y BAI (Burned Area Index) (Heredia *et al.*, 2003).

El NBR fue definido en 1999 por Key y Benson como:

$$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$$

Donde ρ_{NIR} indica la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano y ρ_{SWIR} la reflectividad en la banda del infrarrojo medio de onda corta (SWIR, entre 1 y 2,5 micras).

El BAI fue definido por Martin (1998) específicamente para discriminar el área afectada por el fuego sobre imágenes AVHRR. Este índice es calculado desde la distancia espectral de cada píxel a un punto espectral de convergencia.

$$BAI = \frac{1}{(\rho_{C_R} - \rho_R)^2 + (\rho_{C_{NIR}} - \rho_{NIR})^2}$$

Donde, ρ_{C_R} y $\rho_{C_{NIR}}$ son las reflectividades de un punto de convergencia para áreas quemadas en el rojo e infrarrojo cercano, respectivamente y ρ_R y ρ_{NIR} son la reflectividad en las mismas bandas. Los puntos de convergencia propuestos por sus autores fueron definidos como 0.1 y 0.06 para ρ_{C_R} y $\rho_{C_{NIR}}$, respectivamente.

Posteriormente, Martin *et al.* 2002 realizaron una modificación para el BAI insertando información proveniente del SWIR en lugar de la correspondiente al canal rojo. El nuevo índice resultó definido como:

$$BAI_{MODIS} = \frac{1}{(\rho_{C_{SWIR}} - \rho_{SWIR})^2 + (\rho_{C_{NIR}} - \rho_{NIR})^2}$$

Siendo $\rho_{C_{SWIR}}$ y $\rho_{C_{NIR}}$ las reflectividades de un punto de convergencia para áreas quemadas en el SWIR e infrarrojo cercano, respectivamente y ρ_{SWIR} y ρ_{NIR} son la reflectividad en las mismas bandas. Los nuevos puntos de convergencia definidos fueron 0.2 para el infrarrojo cercano ($\rho_{C_{NIR}}$) y 0.08 para el $\rho_{C_{SWIR}}$

Análisis de separabilidad entre áreas quemadas y no quemadas

Para examinar la capacidad discriminadora de áreas quemadas de cada producto se ha analizado la separabilidad espectral que ofrecen sus bandas y los índices derivados de ellas. Se han utilizado medidas de distancia espectral normalizada (D) (Kaufman y Remer, 1994) y de distancia de Bhattacharyya (BD). Estas mediciones indican el grado de separabilidad entre un área quemada y una no quemada. El análisis de distancia espectral normalizada per-

¹² <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/modis/vcf/>

mite obtener un valor de separabilidad por cada banda, en cambio la distancia de Bhattacharyya hace un análisis multiespectral, evaluando en su conjunto todas las bandas de cada producto.

Se calculó la distancia espectral espacial y temporal. La primera toma como referencia los píxeles quemados y no quemados extraídos de la imagen post incendio. La distancia temporal utiliza la imagen pre- incendio para la extracción de la muestra no quemada y la imagen post-incendio para extraer información de la muestra quemada, ambas extracciones se realizaron en el mismo lugar geográfico.

Las extracciones se realizaron sobre zonas previamente identificadas a partir de imágenes de alta resolución CBERS, esto permite confirmar si se encuentran quemadas o no. La extracción de área quemada se efectuó sobre un perímetro realizado dentro de los límites de un incendio, abarcando una extensión de 300 km², aproximadamente. En cuanto al área no quemada se extrajo información de un cuadrante de aproximadamente 650 km², ubicado junto al área incendiada. Según la clasificación de cobertura de suelo descargada de Global Land Cover Facility (Hansen *et al.*, 2000), esta zona corresponde principalmente a vegetación de bosques siempre verdes, matorrales abiertos y matorrales cerrados (Figura2).

La distancia espectral normalizada se define como:

$$D = (X_a - X_b) / (S_a - S_b)$$

Donde:

X_a = media de la clase a

X_b = media de la clase b

S_a = desviación típica clase a

S_b = desviación típica clase b

En nuestro caso a y b serían área quemada y no quemada, respectivamente.

La distancia de Bhattacharyya queda definida por la siguiente expresión:

$$BD(i,j) = 2 * [1 - \exp(-a(i,j))]$$

Donde:

$BD(i,j)$ = Distancia espectral entre la clase i y la clase j. (por ejemplo quemado y no quemado)

$$a(i,j) = 0.125 * T[M(i) - M(j)] * \text{Inv}[A(i,j)] * [M(i) - M(j)] + 0.5 * n \{ \det(A(i,j)) / \text{SQRT}[\det(S(i)) * \det(S(j))] \}$$

Donde:

$M(i)$ = vector media de la clase i, donde el vector tiene N bandas (N bandas es el numero de bandas usadas).

$S(i)$ = Matriz de covarianza para el caso i.

$\text{Inv } S(i)$ = Matriz inversa de $S(i)$

$\text{Trace}[\]$ = Traza de la matriz (sumatoria de la diagonal)

$T[\]$ = Matriz transpuesta

$A(i,j) = 0.5 * [S(i) + S(j)]$

$\det(\)$ = Matriz determinante

$\ln\{ \}$ = Logaritmo natural del valor escalar

$\text{SQRT}[\]$ = Raíz cuadrada del valor escalar

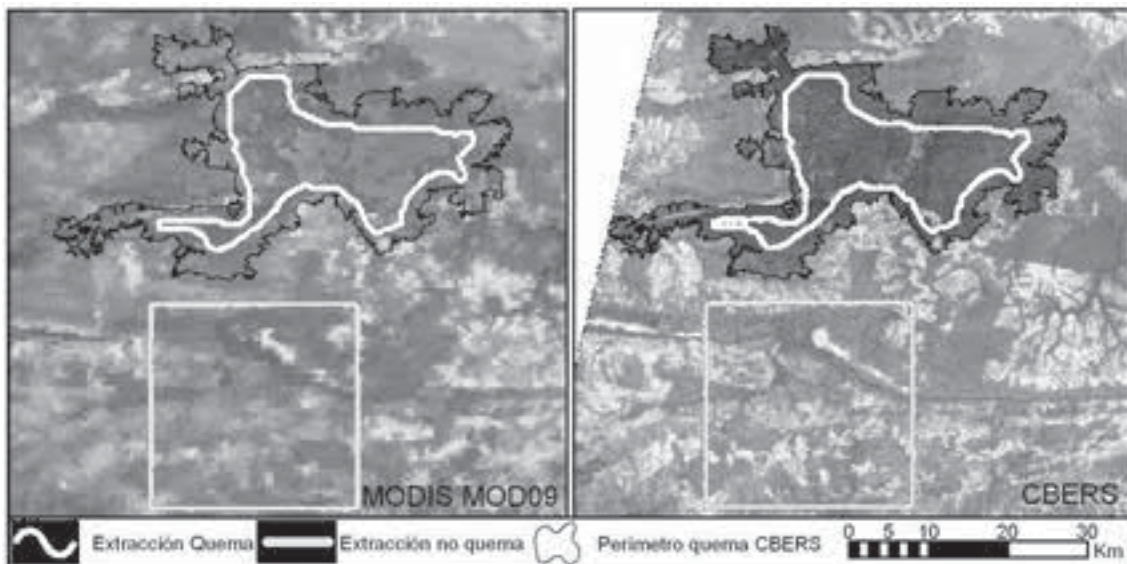


Figura. 2. Extracciones sobre área quemada y no quemada. A la izquierda imagen MOD09 (500x500) y a la derecha imagen CBERS (20x20m.)

Semillas quemadas

Extracciones

Las semillas de área quemada son píxeles que pertenecen indudablemente a zonas quemadas. Para establecerlos se utilizaron los valores de NBR y BAIm obtenidos en la extracción realizada sobre el área quemada identificada con la ayuda de la imagen de alta resolución (Figura 2), esto permitió conocer puntos críticos y definir los umbrales.

Definición de umbrales

Debido a la alta variación de los valores de los índices calculados no se pudo establecer un umbral fijo para todos los productos (Figura 3), por lo tanto se definieron umbrales para cada uno de ellos usando un criterio estándar. A partir de las estadísticas obtenidas del muestreo de la región quemada se fijó el umbral para el NBR y BAIm como la media menos una desviación típica. Por lo tanto, todo valor superior a este umbral será considerado como semilla de área quemada.

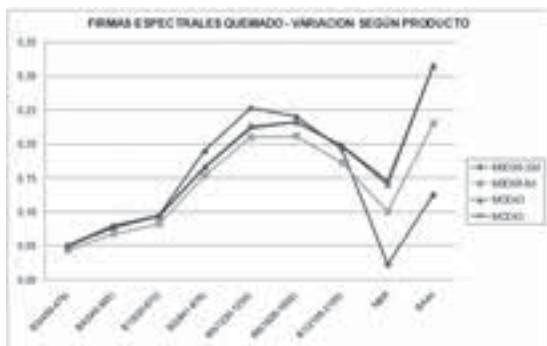


Figura 3. Gráfico variación reflectividades e índices. El BAIm está escalado ($BAIm \cdot 0.001$) para que se sitúe en el rango de los demás índices.

Los umbrales se fijaron en los siguientes valores:

PRODUCTO	UMBRAL BAIm	UMBRAL NBR
MCD43	157	0,05
MOD43	168	0,057
MOD09-32D	70	-0,037
MOD09-8D	80	-0,022

Tabla 2. Umbrales semillas quemado.

Fase de cartografía

De cara a mejorar la cartografía y disminuir los errores de omisión se incorporó el siguiente algoritmo de crecimiento de regiones a partir de la fase de píxeles semilla.

- En primer lugar se eliminaron los grupos de píxeles semilla pequeños ($< 3km^2$)
- Sobre las nuevas semillas se calculó un buffer de distancia de 3 km.
- Se calculó un filtro de media para el BAIm post incendio sobre una ventana de calculo de 11×11 .
- Luego un píxel se añade a lo detectado en la fase de semillado si cumple las siguientes condiciones:
 - a. Si el índice BAIm del píxel $> (BAIm \text{ media} \cdot 1.3)$
 - b. Se encuentra dentro del buffer de distancias de 3 Km. realizado a partir de las semillas.

Finalmente la cartografía fue codificada en 4 clases:

- Áreas quemadas
- Áreas no quemadas
- Áreas no observadas (Nubes – Falta de datos)
- Áreas no combustibles

Imágenes de alta resolución

Para la validación de los resultados de los productos MODIS se contó con imágenes del satélite CBERS de 20 metros de resolución espacial (path 165; row 116), una del 10 de septiembre de 2004 y otra anterior del 15 de agosto del mismo año.

La selección de las imágenes se hizo en base a su concentración de áreas quemadas distinguibles en los quicklooks. Los quicklooks son imágenes que se pueden extraer de los catálogos electrónicos disponibles en Internet¹⁴. Con ellos es posible conocer si la imagen es propicia para identificar zonas quemadas e identificar también la calidad de la misma. La disponibilidad de una imagen pre-incendio fue otro de los criterios para la selección, esto permite verificar que las zonas analizadas corresponden a áreas quemadas y no a otro tipo de cobertura permanente. La corrección geométrica de las imágenes se hizo tomando como referencia los productos ortorectificados LANDSAT de libre distribución disponibles en el servidor de la Universidad de Maryland¹⁵.

¹⁴ <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>

¹⁵ <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>

Con las imágenes corregidas se procedió a la extracción de los perímetros quemados. En este proceso se empleó interpretación visual.

Validación de los resultados

A partir del análisis visual de las imágenes CBERS se extrajeron los perímetros quemados de una zona perteneciente al área de estudio.

Para analizar el porcentaje que representa el área quemada detectada por los productos MODIS y lo detectado a través de la interpretación visual se elaboró una grilla de 10 x 10 Km. Luego, para cada una de las celdas de esta grilla se determinó el porcentaje de área quemada obtenido con alta resolución y con los productos MODIS. Esta información permitió determinar la correlación entre el perímetro quemado interpretado visualmente y las áreas quemadas detectadas por los productos MODIS.

RESULTADOS

Análisis de Separabilidad

Para establecer que producto ofrece mayor separabilidad espectral, entre área quemada y no quemada, se realizaron los siguientes análisis de distancias espectrales.

Distancia espectral normalizada para la diferencia espacial

En el caso de la separabilidad espacial podemos ver que las bandas que presentaron mayor separabilidad fueron las bandas 5 y 2. Desde el punto de vista de los productos, se puede ver que MOD43 y MCD43 (corregidos del efecto bi-direccional) presentan mejores separabilidades en todas las bandas espectrales (1-7), aunque en los índices BAIm y NBR el producto de 8 días presenta valores similares. El producto que presenta la menor separabilidad es el MOD09 compuesto de 32 días (MOD09_32D) (Figura 4).

Distancia espectral normalizada para las diferencias temporales

En la figura n° 5 podemos observar el gráfico de las distancias temporales. En él se aprecia un pano-

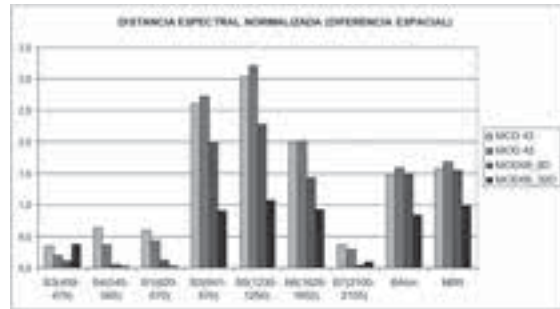


Figura 4. Distancia Espectral Normalizada (Diferencia Espacial).

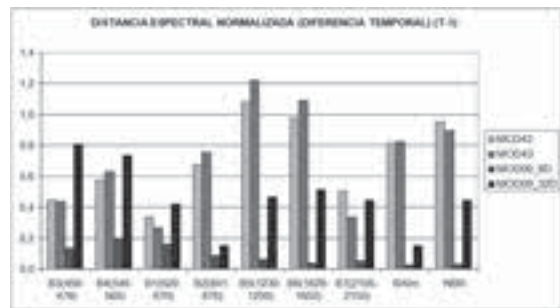


Figura 5. Distancia Espectral Normalizada para las diferencias temporales (T - 1). Se comprara la imagen post-incendio con la inmediatamente anterior.

rama similar al anterior, donde las mayores separabilidades las aportan los productos corregidos del efecto bi-direccional (MCD43 y MOD43).

Se aprecian valores de separabilidad altos para los índices BAIm y NBR.

El primer análisis temporal se realizó usando la imagen pre-incendio inmediatamente anterior (t-1), al utilizar estos datos se obtuvieron valores bajos de separabilidad para el producto MOD09 de 8 días. Esto se produce debido a que este producto cuenta con una resolución temporal más fina, por lo que en la imagen anterior se detecta también parcialmente el incendio, disminuyendo la diferencia espectral entre ellas (Figura 5). Luego, se usó dos imágenes anteriores (t-2) aumentando notoriamente su separabilidad (Figura 6).

En el nuevo gráfico se aprecian mayores valores de separabilidad para el producto MOD09 de 8 días superando ampliamente al compuesto de 32 días. En cuanto a los productos corregidos del efecto bi-direccional siguen mostrando los mejores resultados.

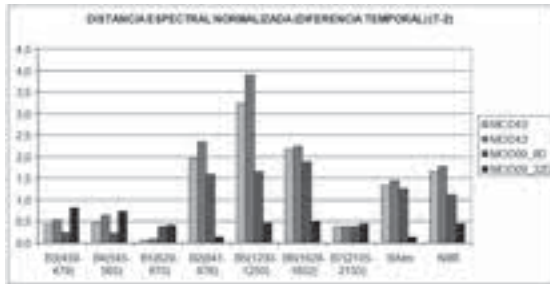


Figura 6. Distancia Espectral Normalizada para las diferencias temporales (T - 2). Se compara la imagen de dos periodos anteriores.

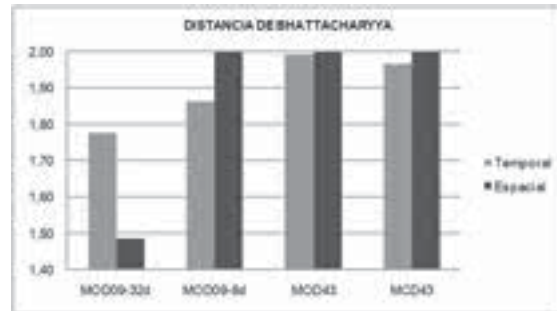


Figura 7. Distancia de Bhattacharyya entre áreas quemadas y no quemadas.

Distancia de Bhattacharyya

En el siguiente gráfico podemos observar la distancia de Bhattacharyya para las diferencias espaciales y temporales, en él se observa una separabilidad menor para el producto MOD09 de 32 días en ambos casos. Los productos corregidos del efecto bi-direccional presentan separabilidades altas temporal y espacialmente.

VALIDACIÓN

A continuación se presenta la validación de los productos MODIS. Esta se realizó comparando el perímetro discriminado a partir de imágenes de alta resolución CBERS con las áreas detectadas (hectáreas) por cada uno de los productos.

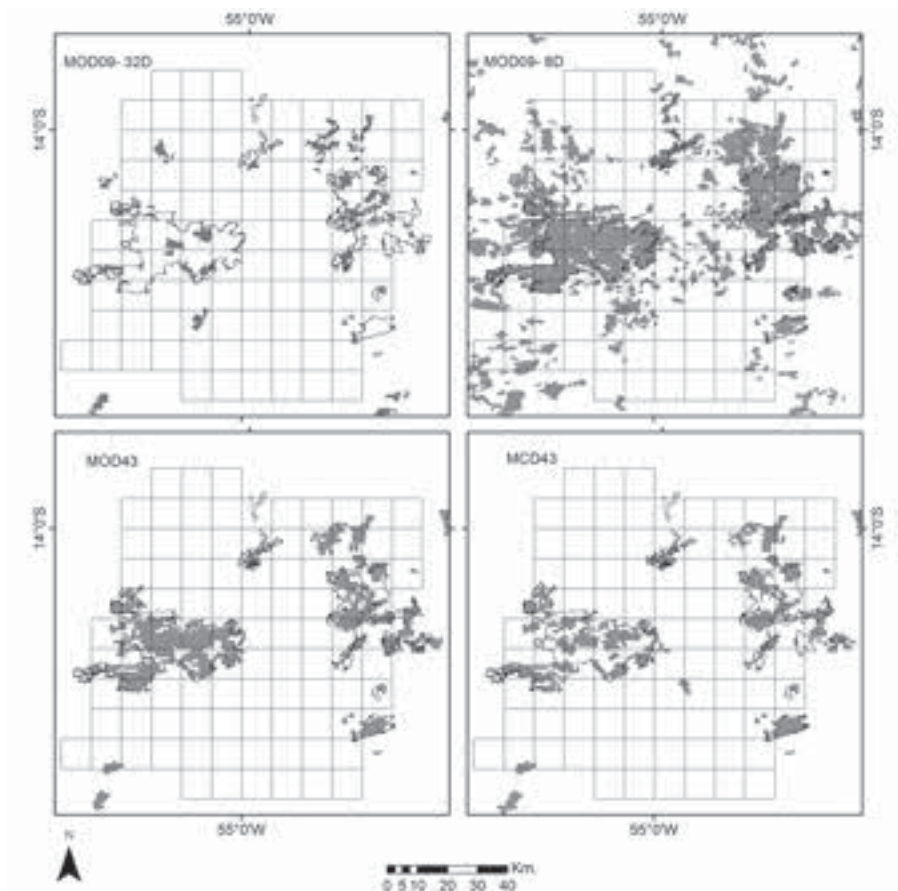


Figura 8. Validación productos MODIS. Perímetro CBERS en color negro. Área detectada por MODIS color gris.

Producto MOD09 de 32 días

En el siguiente gráfico se observa la correlación entre las áreas detectadas por CBERS y el producto MOD09 de 32 días. El valor de R² obtenido fue 0,298; siendo el más bajo de todos los productos evaluados.

MOD09-32D	CBERS		
	Quemado	No Quemado	Total
	Quemado	17650	12625
No Quemado	94975	765300	860275
Total	112625	777925	890550

Tabla 3. Matriz de confusión, comparación entre MODIS y CBERS

El error de omisión es de un 84,3% y el error de comisión es de 41,7%.

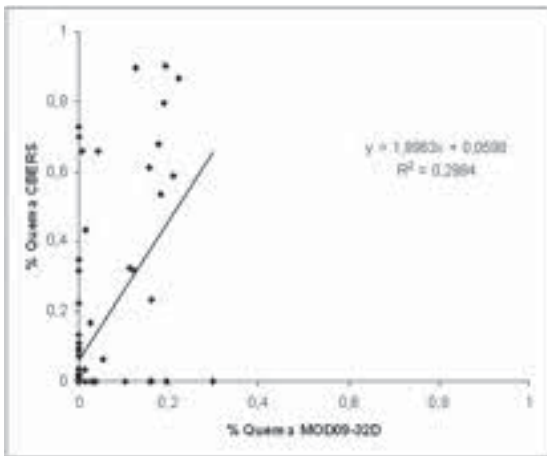


Figura 9. Correlación entre proporción de áreas quemadas con CBERS y MODIS (producto 32 días)

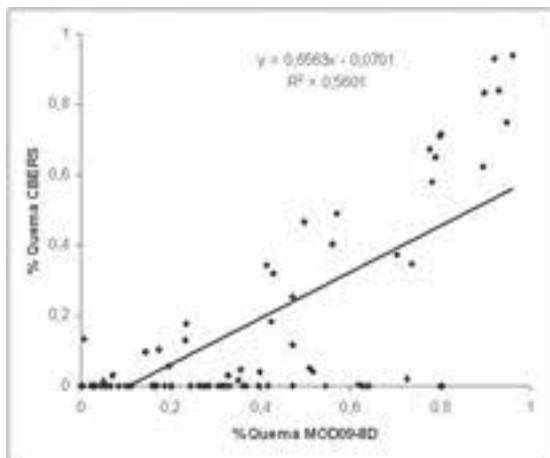


Figura 10. Correlación entre proporción de áreas quemadas con CBERS y MODIS (producto 8 días).

Producto MOD09 de 8 días

La figura 10 muestra el gráfico de correlación entre las áreas detectadas por CBERS y el producto MOD09 de 8 días. El valor de R² obtenido en este caso fue de 0,56; siendo ampliamente superior al producto anterior.

MOD09-8D	CBERS		
	Quemado	No Quemado	Total
	Quemado	101850	140550
No Quemado	9450	405075	414525
Total	111300	545625	656925

Tabla 4. Matriz de confusión, comparación entre MODIS y CBERS.

El error de omisión es de un 8,49% y el error de comisión es de 57,9%.

Producto MOD43

La correlación entre las áreas quemadas detectadas por el producto MOD43 y el perímetro realizado con la imagen CBERS muestra un valor R² de 0,57 (figura 11).

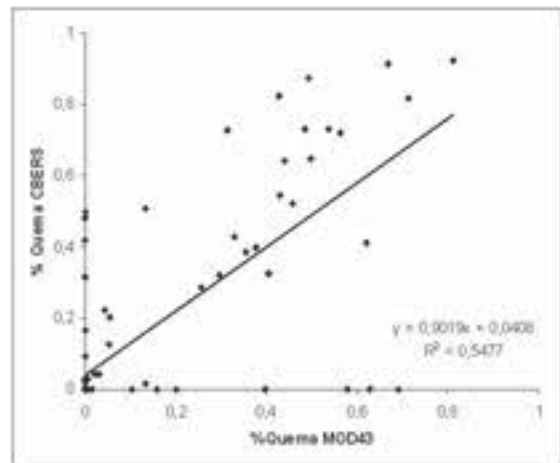


Figura 11. Correlación entre proporción de áreas quemadas con CBERS y MODIS (Producto BRDF Terra)

MOD43D	CBERS		
	Quemado	No Quemado	Total
	Quemado	71125	23025
No Quemado	39275	426900	466175
Total	110400	449925	560325

Tabla 5. Matriz de confusión, comparación entre MODIS y CBERS.

El error de omisión es de un 35,57% y el error de comisión es de 24,4%.

Producto MCD43

En la figura 12 vemos la correlación entre las áreas quemadas detectadas por el producto MCD43 y el perímetro realizado con la imagen CBERS. El valor de R² es de 0,61; siendo éste el más alto de todos los productos evaluados.

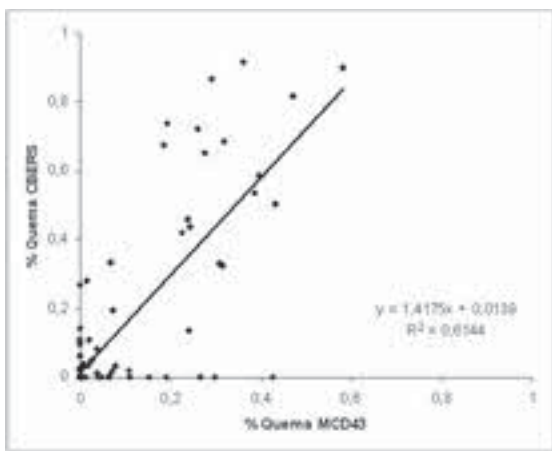


Figura 12. Correlación entre proporción de áreas quemadas con CBERS y MODIS (Producto BRDF Terra-Aqua).

		CBERS		
		Quemado	No Quemado	Total
MOD43D	Quemado	48725	20875	69600
	No Quemado	64425	572475	636900
	Total	113150	593350	706500

Tabla 6. Matriz de confusión, comparación entre MODIS y CBERS.

El error de omisión es de un 56,9% y el error de comisión es de 29%.

Nubosidad

La presencia de nubes en la imagen impide la detección de áreas quemadas, ya que no se pueden obtener valores de reflectividad de la superficie. A continuación, se muestra un gráfico de la nubosidad

que presenta cada uno de los productos evaluados (figura 13). Se puede apreciar la mejora notable que consigue el producto MCD43 (corrige los datos Terra con Aqua) en relación al producto MOD43, siendo mejor inclusive que el producto MOD09 de 8 días.

Interpretación de los resultados

Análisis de separabilidad

En las pruebas de distancia espectral realizadas, tanto espacial como temporalmente, los productos corregidos del efecto bi-direccional mostraron las mayores separabilidades en prácticamente todas las bandas. En el caso de los índices adaptados al fuego (BAIm y NBR) las distancias entregaron valores de separabilidad menor para el producto MOD09 compuesto de 32 días.

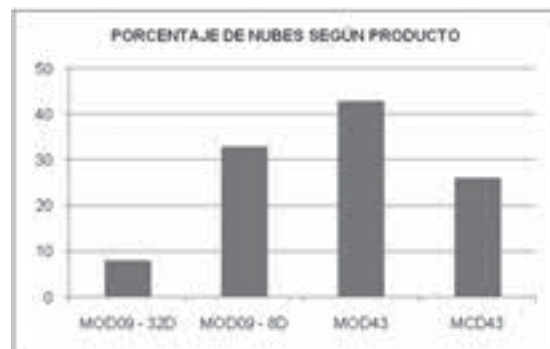


Figura 13. Nubosidad según producto MODIS.

En cuanto al cálculo de la distancia espectral para las diferencias temporales se observaban valores de distancia bajos (<1,2), especialmente en el caso de los productos más cortos, posiblemente porque dicha imagen ya detectaba parcialmente el incendio. Al utilizar dos imágenes anteriores para las diferencias temporales, se obtuvieron valores similares a los obtenidos en el cálculo de las distancias espaciales.

La distancia de Bhattacharyya realiza un análisis de distancia espectral en conjunto para todas las bandas e índices, ella mostró en el análisis temporal y espacial una separabilidad menor para el com-

puesto de mayor duración. Por su parte, los productos corregidos del efecto bi-direccional y el producto MOD09 de 8 días presentaron valores altos de separabilidad.

Validación

El siguiente cuadro (Figura 14) muestra un resumen de la correlación y de los resultados de los errores de omisión y comisión obtenidos de la validación de cada producto MODIS.

Se observa que los productos corregidos del efecto bi-direccional (MCD43 y MOD43) y el producto de 8 días (MOD09-8D), presentan una correlación con el perímetro de validación CBERS similar, superando en todos los casos el 50%. Sin embargo, el producto de 32 días (MOD09-32D) tiene una correlación menor (29%). La causa de que las mejores correlaciones no superaran el 60% puede atribuirse a dos factores principalmente, el primero es el algoritmo de discriminación utilizado que es muy dependiente de los umbrales establecidos para la determinación de los píxeles semillas. La variación de este umbral puede cambiar rotundamente la superficie detectada. El segundo factor posible puede atribuirse a la validación, ya que no se pudo contar con imágenes de alta resolución para cubrir la totalidad del periodo estudiado, al parecer en la parte superior del área hubo un incendio posterior a la fecha de la imagen CBERS utilizada, por lo cual no se pudo extraer su perímetro, de comprobarse esto las correlaciones de todos los productos subirían.

Se puede apreciar que el producto de reflectividad estándar MODIS de 8 días muestra una gran sobre-estimación en relación a los demás productos evaluados, manteniendo un nivel de error de comisión del 57.9%. Por su parte, el compuesto de 32 días entregó errores altos de omisión, lo que puede estar relacionado con la permanencia en el tiempo de la señal del carbón que es baja en estas zonas tropicales, asimismo este producto arrojó valores elevados valores de comisión del 41,7%. Los productos corregidos del efecto bi-direccional (BRDF) mostraron los valores más bajos en cuanto a error de comisión, rondando el 25%. En cuanto al error de omisión se puede decir que el producto MCD43 infra-estima las áreas quemadas en mayor medida que el producto MOD43.

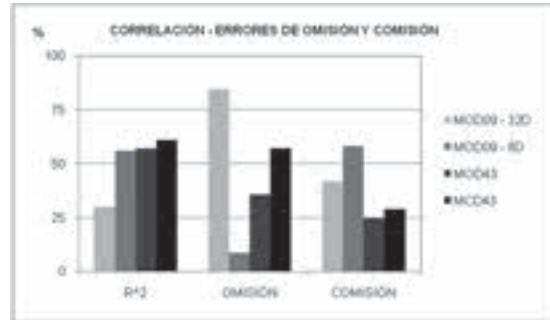


Figura 14. Gráfico resumen de la validación.

Nubosidad

La cantidad de nubes que tiene cada compuesto está directamente relacionada con las posibilidades concretas del producto para detectar áreas quemadas, el acceso a un mayor número de píxeles descubiertos de nubosidad aumentará la probabilidad de que sea detectado como área quemada.

En este caso el producto que se ofrece más despejado es el MOD09 de 32 días, lo que parece estar relacionado a la mayor duración del compuesto, al concentrar una mayor cantidad de días aumenta la probabilidad de que se adquiera una imagen libre de nubes.

Cabe destacar la disminución sustancial de cobertura nubosa que ofrece el producto MCD43 en relación al MOD43, esta mejora se atribuye a la doble posibilidad que tiene el compuesto MCD43 de encontrar píxeles despejados por concentrar datos MODIS provenientes de Terra y Aqua.

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en las pruebas de distancia espectral realizadas, los productos corregidos del efecto bi-direccional muestran los mayores valores de discriminación, tanto espacial como temporalmente. Desde el punto de vista espectral, se puede afirmar que estos productos son más propicios para discriminar áreas quemadas debido a que la corrección del efecto bi-direccional causa mejoras en las imágenes MODIS ampliando la diferenciación de este tipo de coberturas.

El algoritmo de discriminación de área quemada utilizado en este estudio, basado en píxeles semillas resulta muy dependiente de ellos. El criterio de umbrales sobre los índices espectrales BAIm y NBR que fue utilizado para establecer estas semillas es crítico y puede ser modificado y mejorado, quizá algún procedimiento que automatice su identificación podría ser apropiado. Por lo demás, la diferente resolución temporal de los productos analizados puede tener relación directa con la variación en la superficie quemada detectada en cada uno de ellos. Los productos elaborados con un mayor periodo temporal detectaron una superficie quemada menor, esto puede indicar una pérdida en la señal del carbón generada por el algoritmo de elaboración de los compuestos. Esta pérdida en la señal quemada de los compuestos que concentran mayor número de imágenes supone que el algoritmo propuesto en este estudio detecte menos semillas y, por consiguiente, menores superficies quemadas.

Las características ecológicas del área de estudio pueden ser otra de las causas importantes en la pérdida de la señal del carbón de los compuestos, ya que los ambientes tropicales tienen un ritmo de regeneración muy intenso. La severidad, características y condiciones en que se desarrolle el incendio deberían incidir directamente en las posibilidades del algoritmo propuesto en este estudio para detectar áreas quemadas, en este sentido un incendio de una severidad baja probablemente no sería detectado.

El producto MOD09 de 8 días y los productos corregidos del efecto bi-direccional mostraron las mayores correlaciones con el perímetro extraído de la imagen CBERS, específicamente el producto MCD43 mostró la mejor correlación en este estudio, recordemos que este último corrige los valores defectuosos captados por Terra usando datos de Aqua, esto disminuye la cantidad de píxeles etiquetados como nubes y aumenta la probabilidad de que sean detectados como área quemada, esta situación pudo haber derivado en el aumento de su correlación.

Por otra parte, sería apropiado evaluar el algoritmo de elaboración de los compuestos corregidos del efecto bi-direccional, dado que la etiquetación de píxeles como nubes está siendo demasiado severa, al menos para esta zona de estudio, esto empobrece la posibilidad de contar

con datos de reflectividad en muchos sectores de las imágenes.

En respuesta al objetivo principal de este estudio y según lo antes señalado se puede afirmar que los productos corregidos del efecto bi-direccional ofrecen una mejor posibilidad de discriminar áreas quemadas. Aun considerando la pérdida en la resolución espacial y temporal sobre el producto MOD09 parecen ser más propicios para estimar áreas quemadas a una escala global.

BIBLIOGRAFIA

- BARBOSA, P. M., J. SAN-MIGUEL AYANZ, B. MARTÍNEZ y G. SCHMUCK. 2002: Burnt area mapping in southern Europe using IRS-WiFS, en *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety* (Editado por Viegas). Rotterdam, Millpress.
- BENSON, M. L. y I. BRIGGS. 1978: Mapping the extent and intensity of major forest fires in Australia using digital analysis of Landsat imagery, In Proc. Of the Int. Symp. on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources, Freiburg: 1965-1980.
- CHUVIECO, E. (Ed.). 1999: *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*, Berlin, Springer-Verlag.
- CHUVIECO, E. y R. G. CONGALTON. 1988: Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data. *Geocarto International*, 4: 41-53.
- CHUVIECO, E. y M. P. MARTÍN. 1994: Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60: 563-570.
- CHUVIECO, E., M. P. MARTÍN y A. PALACIOS. 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., G. VENTURA, M. P. MARTÍN y I. GOMEZ. 2005: Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. *Remote Sensing of Environment*, 94: 450-462.
- EASTWOOD, J. A., S. E. PLUMMER, B. K. WYATT y B. J. STOCKS. 1998: The potential of SPOT-Vegetation data for fire scar detection in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 3681-3687.

- EPTING, J., D. L. VERBYLA y B. SORBEL. 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. y E. F. LAMBIN. 1998: Remote Sensing of Biomass Burning in Tropical Regions: Sampling Issues and Multisensor Approach. *Remote Sensing of Environment*, 64: 292-315.
- FLANNIGAN, M. D. y T. H. VONDER HAAR. 1986: Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Canadian Journal of Forest Research*, 16: 975-982.
- FRANÇA, H. y A. W. SETZER. 2001: AVHRR analysis of a savanna site through a fire season in Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 2449-2461.
- FRASER, R. H., R. FERNANDES y R. LATIFOVIC. 2002: Multi-temporal burned area mapping using logistic regression analysis and change metrics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*: 1486-1488.
- FRASER, R. H., Z. LI y R. LANDRY. 2000: SPOT Vegetation for Characterising Boreal Forest Fires. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 3525-3532.
- GARCIA, M. y E. CHUVIECO. 2004: Assessment of the potential of SAC-C/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. *Remote Sensing of Environment*, 92: 414-423.
- GARCÍA-HARO, F. J., M. A. GILABERT y J. MELIÁ. 2001: Monitoring fire-affected areas using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 533-549.
- GRÉGOIRE, J. M., K. TANSEY y J. M. N. SILVA. 2003: The GBA2000 initiative: Developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 1369-1376.
- GUENTHER, B., X. XIONG, V. SALOMONSON, W. L. BARNES y J. YOUNG. 2002: On-orbit performance of the Earth Observing System Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; first year of data. *Remote Sensing of Environment*, 83: 16-30.
- HALL, D. K., J. P. ORMSBY, L. JOHNSON y J. BROWN. 1980: Landsat digital analysis of the initial recovery of burned tundra at Kokolik river, Alaska. *Remote Sensing of Environment*, 10: 263-272.
- HANSEN, M., R. DEFRIES, J. R. G. TOWNSEND y R. SOHLBERG. 2000: Global land cover classification at 1km resolution using a decision tree classifier. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 1331-1365.
- HEREDIA, A., S. MARTÍNEZ, E. QUINTERO, W. PIÑEROS y E. CHUVIECO. 2003: Comparación de Distintas Técnicas de Análisis Digital para la Cartografía de Áreas Quemadas con Imágenes Landsat ETM+. *GeoFocus*, 3: 216-234.
- JIN, S. y S. SADER. 2005: MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects. *Remote Sensing of Environment*, 99: 462-470.
- JUSTICE, C. O., E. VERMOTE, J. TOWNSEND, R. DEFRIES, D. ROY, D. HALL, V. SALOMONSON, J. PRIVETTE, G. RIGGS, A. STRAHLER, W. LUNCHT, R. MINEN, Y. KNYAZIKHIN, S. RUNNING, R. NEMANI, Z. WAN, A. HUETE, W. VAN LEEUWEN, R. WOLFE, L. GIGLIO, J.P. MULLER, P. LEWIS, y M. BARNSLEY. 1998: The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36: 1228-1249.
- KARTERIS, M. A. y G. KRITIKOS. 1991: Assessment of Forest Fire Damages in Holy Mount Athos using remote sensing techniques, Workshop on Remote Sensing for Forestry applications, Copenhagen, Denmark, Danish Remote Sensing Society: 1-19.
- KAUFMAN, Y. J. y L. A. REMER. 1994: Detection of forests using Mid-IR reflectance: an application for aerosol studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32: 672-683.
- KAUFMAN, Y. J., C. J. TUCKER y I. Y. FUNG. 1990: Remote Sensing of biomass burning in the tropics. *Journal of Geophysical Research*, 95: 9927-9939.
- KOUTSIAS, N. y M. KARTERIS. 2000: Burned area mapping using logistic regression modeling of a single post-fire Landsat-5 Thematic Mapper image. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 673-687.
- LI, R. R., Y. J. KAUFMAN, W. M. HAO, J. M. SALMON y B. C. GAO. 2004: A Technique for Detecting Burn Scars Using MODIS Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42: 1300-1308.

- MAGGI, M. y D. STROPPIANA. 2002: Advantages and drawbacks of NOAA-AVHRR and SPOT-VGT for burnt area mapping in a tropical savanna ecosystem. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28: 231-245.
- MARTÍN, M. P. 1998: Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR, Departamento de Geografía, Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá.
- MARTÍN, M. P. y E. CHUVIECO. 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., R. DÍAZ DELGADO, E. CHUVIECO y G. VENTURA. 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.
- MATSON, M., S. R. SCHNEIDER, B. ALDRIDGE y B. SATCHWELL. 1984: Fire Detection Using the NOAA-Series Satellites, Washington, D.C., NOAA, NESDIS 7.
- MORGAN, P., C. C. HARDY, T. W. SWETNAM, M. G. ROLLINS y D. G. LONG. 2001: Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 329-342.
- MUSAOGLU, N. y S. KAYA. 2001: Use of satellite images in researching the impacts of forest fires. A case study: Gallipoli National Park, Proceedings of the 21st Earsel Symposium, Medias-France: 117-121.
- NASI, R., R. DENNOS, E. MEIJAARD, G. APPLGATE y P. MOORE. 2002: Los incendios forestales y la diversidad biológica. *Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales (FAO)*, 53: 36-40.
- 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., E. CHUVIECO, A. BEUDOIN y N. DESBOIS. 1997: Remote Sensing of burned areas: a review, en A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires (editado por E. Chuvieco). Alcalá de Henares, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá: 127-184.
- RIAÑO, D., E. CHUVIECO, S. L. USTIN, R. ZOMER, P. DENNISON, D. ROBERTS y J. SALAS. 2002: Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains. *Remote Sensing of Environment*, 79: 60-71.
- ROY, D., P. FROST, C. JUSTICE, T. LANDMANN, J. ROUX, K. GUMBO, S. MAKUNGWA, K. DUNHAM, R. DU TOIT, K. MHWAN-DAGARA, A. ZACARIAS, B. TACHEBA, O. DUBE, J. PEREIRA, P. MUSHOVE, J. MORISETTE, S. SANTHANA y D. DAVIES. 2005: The Southern Africa Fire Network (SAFNet) regional burned area product validation protocol. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 4265-4292.
- ROY, D., P. E. LEWIS y C. O. JUSTICE. 2002: Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data—a bi-directional reflectance model-based expectation approach. *Remote Sensing of Environment*, 83: 263-286.
- ROY, D. P., L. GIGLIO, J. D. KENDALL y C. O. JUSTICE. 1999: Multi-temporal active-fire based burn scar detection algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 20: 1031-1038.
- SILVA, J., A. SÁ y P. J. 2005: Comparison of burned area estimation derived from SPOT-VEGETATION and Landsat ETM+ data in Africa: Influencia de spatial pattern and vegetation type. *Remote Sensing of Environment*, 96: 188-201.
- STROPPIANA, D., G. J. M. y J. M. C. PEREIRA. 2003: The use of SPOT VEGETATION data in a classification tree approach for burnt area mapping in Australian savanna. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 2131-2151.
- STROPPIANA, D., S. PINNOCK, J. M. C. PEREIRA y J. M. GRÉGORIE. 2002: Radiometric analysis of SPOT-VEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 82: 21-37.
- TANSEY, K., J. GREGORIE, E. BINAGHI, L. BOSCHETTI, P.A. BRIVIO, D. ERSHOV, E. FLASSE, R. FRASE, D. GRAETZ, M. MAGGI, P. PEDUZZI, J. PEREIRA, J. SILVA, A. SUOSA y D. STROPPIANA. 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 S. FLASSE. 2001: An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 2641-2647.

- VÁZQUEZ, A., J. M. CUEVAS y F. GONZÁLEZ-ALONSO. 2001: Comparison of the use of WiFS and LISS images to estimate the area burned in a large forest fire. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 901-907.
- ZHAN, X., R. A. SOHLBERG, J. TOWNSHEND, C. DIMICELI, M. CARROL, J. EASTMAN, M. HANSEN, R. DEFRIES. 2002: Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. *Remote Sensing of Environment*, 83: 336-350.