

CARTOGRAFÍA DE INCENDIOS FORESTALES EN PARAGUAY MEDIANTE IMÁGENES AQUA-MODIS

M. Pilar Martín Isabel¹, Larissa K. Rejalaga Noguera²

(1) Instituto de Economía, Geografía y Demografía
Centro de Ciencias Humanas y Sociales
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
C/. Albasanz, 26-28 - 28037 Madrid
mpilar.martin@cchs.csic.es

(2) Facultad de Ciencias Agrarias
Universidad Nacional de Asunción
Campus Universitario de la Ciudad de San Lorenzo Paraguay

RESUMEN

Uno de los principales problemas ambientales que se plantean actualmente a nivel mundial es la pérdida de los recursos forestales ocasionada por el fuego. La gran extensión y dificultad de acceso a muchas de las zonas afectadas, especialmente en zonas tropicales, hace difícil la cuantificación del daño que provocan los incendios forestales. La cartografía operativa de las áreas quemadas requiere disponer de métodos fiables y rápidos que permitan obtener resultados en un margen relativamente corto de tiempo y a una escala espacial y temporal adecuada para la gestión del fenómeno. La teledetección desde satélite supone una técnica adecuada para esta finalidad ya que proporciona datos de la superficie terrestre con una cobertura espacial y temporal suficientemente detallada y ofrece información espectral apropiada para la cartografía de áreas quemadas. En este trabajo se aborda el uso de imágenes procedentes del sensor AQUA-MODIS para la cartografía de áreas afectadas por incendios forestales en Paraguay. Se propone una metodología que combina productos MODIS con distintas resoluciones espaciales (500 y 250 metros) y espectrales (7 y 2 bandas) con el propósito de mejorar la capacidad de discriminación y delimitación de las zonas afectadas por incendios forestales en un ámbito tropical. La metodología propuesta nos permitió discriminar todos los incendios ocurridos en la zona de estudio con tamaño igual o superior a 150 hectáreas. La capacidad de discriminación resultó aceptable (en torno a los 60 %) para los incendios entre 100 y 125 hectáreas, en cambio demostró ser más limitada para los incendios inferiores a 100 hectáreas.

Palabras Clave: AQUA-MODIS, Paraguay, cartografía, áreas quemadas, índices espectrales, resolución espacial

ABSTRACT

One of the major environmental problems facing the world today is the loss of forest resources caused by fire. The large size and difficulty of access to many affected areas, especially in tropical areas, make difficult to quantify the damage caused by forest fires. Operational mapping of burned areas requires the availability of reliable and rapid methods that can produce results in a relatively short time range and a spatial and temporal scale appropriate to the management of the phenomenon. Satellite remote sensing is a suitable technique for this purpose as it provides data on the Earth's surface with enough spatial and temporal coverage and provides detailed spectral information suitable for mapping burned areas. This paper discusses the use of images from the AQUA-MODIS sensor for mapping areas affected by forest fires in Paraguay. It propose a methodology that combines MODIS products with different spatial (500 and 250 meters) and spectral (7 and 2 bands) resolutions for the purpose of improving the capacity of discrimination and delimitation of areas affected by forest fires in a tropical area. The proposed methodology allowed us to discriminate all fires in the study area with size equal to or greater than 150 hectares. The discrimination capacity was acceptable (around 60%) for fires between 100 and 125 hectares, however proved to be more limited for fires less than 100 hectares.

Key Words: AQUA-MODIS, Paraguay, mapping, burned areas, spectral indexes, spatial resolution

1.- INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales afectan anualmente millones de hectáreas de bosques tropicales en Asia, África y América del Sur. Estos incendios están relacionados principalmente con prácticas agrícolas, apertura de nuevos asentamientos rurales y ganadería intensiva (Cardoso *et al.*, 2003; Setzer *et al.*, 1994). Sin embargo, a los factores sociodemográficos y tecnológicos que subyacen con frecuencia en la ocurrencia de incendios en áreas de bosque tropical, se le suman los efectos climáticos globales, que parecen incrementar la frecuencia e intensidad de sequías, como la ocurrida durante 1998, que trajo como consecuencia grandes superficies de selvas tropicales afectadas por el fuego. En ese año, bajo la influencia de un fenómeno "El Niño" especialmente intenso siete países centroamericanos fueron afectados por incendios en 1,2 millones de hectáreas. También en América del Sur se produjeron eventos de gran magnitud. Así, tan sólo en un estado de la Amazonía brasileña (Roraima) el fuego afectó 1 millón de hectáreas (<http://www.pnuma.org/forodeminstros/12-barbados/bbdt03e-BosquesTropicalesHumedos.pdf>). En el período 97-98 en el estado de Roraima ardió un 53% del ecosistema de savana mientras que la media de superficie quemada en el periodo 1997-2000 fue del 38 % (Barbosa y Fearnside, 2005). En el sureste de Asia, por ejemplo, los incendios relacionados con el episodio de "El Niño" de los años 1997-1998 provocaron pérdidas económicas por valor de unos 9 billones de dólares. En el mismo periodo más de 20 millones de hectáreas ardieron en América del Sur y Central provocando a su vez pérdidas estimadas en más de 10 billones de dólares (Bowman *et al.*, 2009).

En Paraguay no existen estadísticas oficiales de superficies afectadas por incendios forestales. Actualmente los únicos datos disponibles de forma consistente e ininterrumpida desde el año 2001 son los relativos a focos activos facilitados por el *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* de Brasil (INPE) y obtenidos a partir del análisis de imágenes de los satélites NOAA, GOES y TERRA (http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/index_es.php#). En el año 2004 (seleccionado como referencia para este estudio) el INPE registró en Paraguay un total de 13.727 focos de incendios, de ellos 675 se localizaron en zonas de conservación como el Parque Nacional Río Negro (164 focos) y el Parque Nacional Paso Bravo (114 focos). Más recientemente, en el año 2007, el Gobierno paraguayo se vió obligado a declarar el estado de emergencia nacional ante una gran oleada de incendios fores-

tales que en tres semanas arrasaron 500.000 hectáreas de bosques y cultivos en el noreste del país.

Resulta evidente la importancia del fenómeno de los incendios forestales en Paraguay y también el interés de contar con información más precisa sobre los daños que este fenómeno ocasiona. Para que esta información sea realmente efectiva en las labores de gestión debería incluir no sólo la cuantificación de los focos, sino la extensión y localización espacial de las áreas afectadas, especialmente en zonas protegidas, donde este tipo de información resulta de especial interés de cara a preservar su diversidad biológica.

La teledetección ha demostrado su interés para obtener información a diversas escalas sobre las consecuencias de los incendios. En las últimas décadas se han desarrollado diversos proyectos internacionales para la obtención de información sobre el fenómeno a partir de imágenes de satélite. En América Central y del Sur resultan de especial interés las actividades de la Red LATIF (<http://mob.conae.gov.ar/redlatif/>) que en el año 2004 abordó un ambicioso proyecto para obtener una cartografía mensual de áreas quemadas de todo el continente, desde México hasta la Patagonia, utilizando datos del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). El total de superficie quemada durante todo el año se estimó en 153.215 km² (Chuvieco *et al.*, 2008).

Por lo que respecta a las diversas aproximaciones metodológicas empleadas hasta el momento en la cartografía de áreas quemadas mediante teledetección espacial, en general han estado dirigidas hacia la consecución de algoritmos automáticos o semi-automáticos basados en el uso de índices espectrales. Una de las aproximaciones más interesantes es la de Roy *et al.* (2005). Estos autores proponen un algoritmo para la cartografía de incendios a escala global utilizando imágenes MODIS basado, no en el uso de índices espectrales, sino en el análisis multitemporal de imágenes corregidas del efecto de reflectividad bidireccional (BRDF). El algoritmo propuesto se basa en detectar los cambios entre la reflectividad observada en cada píxel y la predicha a partir de la caracterización multitemporal del mismo. La importancia de este método reside en que ha sido adoptado dentro del programa de la NASA para producir la cartografía global de incendios a partir de datos del sensor MODIS (http://modis-fire.umd.edu/Burned_Area_Products.html), es el denominado MODIS Burned product (MCD45A1). Se han realizado validaciones del producto en zonas de Sudamérica,

África, Asia, Australia y Europa. Los resultados obtenidos demuestran la validez del método pero ponen de manifiesto la necesidad de combinarlo con otros procedimientos (filtros basados en umbrales) que permitan minimizar las fuentes de error.

Independientemente de las metodologías utilizadas, una de las principales limitaciones de los trabajos que han abordado la cartografía de áreas quemadas a escala regional o global es la resolución espacial de las imágenes utilizadas. Hasta hace poco tiempo, los sensores que permitían abordar este tipo de estudios ofrecían una resolución espacial máxima de 1 Km². Esto dificultaba la discriminación de incendios pequeños (inferiores a 100 has) así como de otros de mayor tamaño pero cuyas características (nivel de severidad, vegetación previa) implicaban un escaso contraste espectral entre la zona quemada y la no afectada. El lanzamiento del sensor MODIS a bordo de las plataformas TERRA y AQUA abrió nuevas posibilidades en este campo al ofrecer resoluciones espaciales y espectrales mejoradas permitiendo obtener coberturas globales con resolución espacial de 500 y 250 metros según bandas espectrales. A pesar de este avance, pocos autores han explorado la posibilidad de utilizar esta información en conjunto para mejorar la precisión en la delimitación de las áreas quemadas. Algunos trabajos han utilizado las imágenes de 250 metros para la delimitación de áreas quemadas, especialmente mediante técnicas de análisis visual. Este método es utilizado por el JRC (Joint Research Center) en su sistema de evaluación del área quemada en los países europeos del Mediterráneo como parte del denominado European Forest FIRE Information System (EFFIS). Menos frecuentes son los estudios que aborden la cartografía de incendios con imágenes MODIS de 250 m con técnicas de análisis digital. El presente trabajo de investigación trata de explorar en esta línea y propone el uso combinado (no fusionado) de productos MODIS de distintas resoluciones espaciales y espectrales, como alternativa para cartografiar áreas quemadas a nivel regional.

2.- OBJETIVOS

En este artículo se propone un método para la identificación y cartografía de áreas quemadas a escala regional en ámbitos tropicales mediante imágenes de satélite AQUA-MODIS con distinta resolución espacial y espectral. Para abordar este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la capacidad de los productos AQUA-MODIS de 250 y 500 m para discriminar espectralmente las zonas afectadas por incendios en ámbitos tropicales y evaluar los índices espectrales más adecuados para realizar la discriminación con cada producto.
- Proponer una metodología que permita combinar ambos productos, aprovechando la mejor resolución espectral del producto MODIS de 500 m para la discriminación automática de los incendios; y la mayor resolución espacial del producto de 250 m para una delimitación más precisa de las áreas afectadas.

3.- METODOLOGÍA

3.1.- Área de Estudio

Se ha elegido como zona de estudio un sector situado en la parte noreste de Paraguay, norte de Bolivia, y el noroeste de Brasil (Figura 1). El área de estudio comprende una zona excepcionalmente rica y compleja ya que se encuentra en una área de transición ecológica, por lo que fue declarada en el año 2001, como "Reserva de la Biosfera del Gran Chaco", con una superficie total aproximada de 4.707.250 hectáreas y en el cual se establece un "Área de Reserva para Parque Nacional Río Negro", con una superficie total de 30.460 ha. Esta zona fue seleccionada debido a la alta concentración de focos de incendios que presenta anualmente según datos del INPE, especialmente durante los meses de agosto a octubre.

3.2.- Datos

Para la realización de la cartografía de áreas quemadas en la zona de estudio se utilizaron imágenes adquiridas por el sensor MODIS que forma parte del programa EOS (*Earth Observation System*) de la NASA (*National Aeronautic and Space Administration*). Este sensor opera actualmente a bordo de los satélites TERRA y AQUA. El sensor MODIS capta información en 36 bandas espectrales que incluyen el visible, infrarrojo cercano (IRC), infrarrojo medio de onda corta (SWIR) y térmico con una resolución espacial de 250, 500 m y 1 km (dependiendo de la longitud de onda).

Existen un gran número de productos estándar de MODIS, utilizados en muy diferentes campos de aplicación (oceanografía, biología, ciencias atmosféricas, etc). Todos ellos son distribuidos gratuitamente a través de diversos servidores como por ejemplo <https://wist.echo.nasa.gov/api/>.

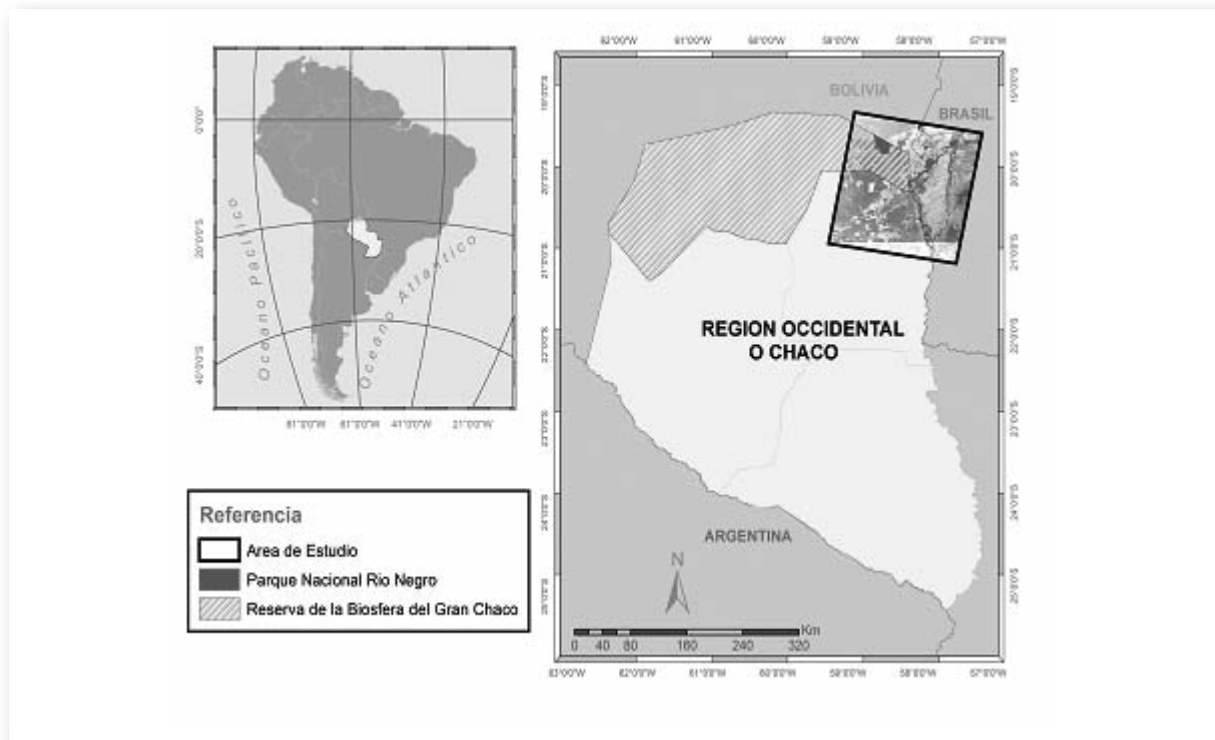


Figura 1.- Ubicación del área de estudio

Los productos utilizados para esta investigación son:

- MODIS-AQUA SURFACE REFLECTANCE 8-DAY L3 GLOBAL 250 m SIN GRID V004 (MYD09Q14). Son compuestos de 8 días, que se realizan a partir de las imágenes diarias de reflectividad en 2 bandas, rojo e IRC. La resolución espacial es de 250 m.
- MODIS-AQUA SURFACE REFLECTANCE 8-DAY L3 GLOBAL 500 m SIN GRID V004 (MYD09A14). Son compuestos de 8 días, que se realizan a partir de las imágenes diarias de reflectividad en 7 bandas, que van desde el visible hasta el SWIR. La resolución espacial es de 500 m.

Debido a los frecuentes problemas de cobertura nubosa que encontramos en esta zona se decidió trabajar con los compuestos multitemporales MODIS en lugar de imágenes diarias. El compuesto elegido para este trabajo corresponde al período comprendido entre el 28 de agosto al 4 de septiembre de 2004 y fue seleccionado como caso de estudio debido al alto número de incendios ocurridos en la zona en esas fechas y la posibilidad de poder contar para la validación de resultados con una imagen Landsat 5 TM de la zona de estudio adquirida al día 31 de agosto de 2004 (escena 227/074). Dicha imagen se ha obtenido, a tra-

vés de la página Web de la CONAE (<http://ggg.conae.gov.ar/catalogo/index.htm>).

3.3.- Discriminación de Áreas Quemadas

3.3.1.- Cálculo de índices espectrales

Los productos MODIS utilizados cuentan con una corrección radiométrica, atmosférica y geométrica. Sin embargo, antes de iniciar el procesamiento de las imágenes es necesario llevar a cabo sobre ellas una serie de operaciones básicas como el cambio de formato y su reproyección para ajustarlas a la cartografía de Paraguay (UTM 21S WGS 84).

La mayor parte de los estudios que han abordado hasta el momento la cartografía de áreas quemadas con imágenes de satélite se basan en el uso de índices de vegetación (IV). Si bien otros autores han optado por proponer índices específicos adaptados al comportamiento espectral de las zonas quemadas. En cualquier caso, los índices más utilizados hasta el momento en este ámbito tienen en común el uso de las bandas del rojo e infrarrojo cercano, y más recientemente el uso del SWIR. Para analizar la capacidad de los mismos para la discriminación de áreas quemadas en zonas tropicales se ha decidido en este estudio calcular los siguientes:

- **GEMI** (Global Vegetation Monitoring Index) (Pinty y Verstraete, 1992): fue diseñado para minimizar los efectos atmosféricos y cambios de color de suelo.

$$\text{GEMI} = \frac{\eta * (1 - 0.25 * \eta) - (\rho_R - 0.125)}{\rho_g}$$

$$\text{donde } \eta = \frac{(2 * (\rho_{IRC}^2 - \rho_R^2) + (1.5 * \rho_{IRC}) + (0.5 - \rho_R))}{(\rho_{IRC} + \rho_R + 0.5)}$$

- **NBR** (Normalized Burned Ratio) (Key y Benson, 1999): Se ha empleado fundamentalmente para medir la severidad del fuego pero también es un índice muy utilizado en la cartografía de áreas quemadas.

$$\text{NBR} = (\rho_{i,irc} - \rho_{i,swir}) / (\rho_{i,irc} + \rho_{i,swir})$$

- **MIRBI** (Mid Infrared Index) (Trigg y Flasse, 2001): Se trata de un índice diseñado específicamente para la cartografía de incendios en África utilizando las bandas 6 y 7 de MODIS

$$\text{MIRBI} = 10 * \text{LMIR} - 9.8 * \text{SMIR} + 2$$

$$\text{donde LMIR} = 0.98 \text{SMIR} + 1.5$$

- **BAI** (Burned Area Index) (Martín, 1998): diseñado para la cartografía de áreas quemadas en zonas mediterráneas con imágenes AVHRR. Este índice se define como la distancia euclidiana entre el valor de albedo que representa a cada píxel de la imagen y el valor de un punto de convergencia que define el comportamiento tipo de una zona recientemente quemada en el espacio espectral considerado

$$\text{BAI} = 1 / ((\rho_{C_r} - \rho_r)^2 + (\rho_{C_{irc}} - \rho_{irc})^2)$$

$$\text{donde: } \rho_{C_r} = 0,1, \rho_{C_{irc}} = 0,06$$

- **BAIM** (Burned Area Index_MODIS): Es una adaptación del índice anterior para imágenes MODIS, sustituye la banda del rojo por la del SWIR y presenta valores del punto de convergencia adaptados a las características espectrales y radiométricas de las imágenes MODIS (Martín *et al.*, 2005).

$$\text{BAIM} = 1 / ((\rho_{C_{irc}} - \rho_{irc})^2 + (\rho_{C_{swir}} - \rho_{swir})^2)$$

$$\text{donde } \rho_{C_{irc}} = 0.08 \text{ y } \rho_{C_{swir}} = 0.2$$

Estos valores fueron definidos para los tipos de coberturas de vegetación y suelos de la Península Ibérica. Sin embargo, dado que las características de la zona de estudio difieren mucho de las de un ámbito mediterráneo, se

espera que los valores de los puntos de convergencia varíen. Por ello, se propone en este trabajo una adaptación de los mismos basada en el análisis del comportamiento espectral de las zonas quemadas. Siguiendo el criterio establecido por Martín (1998) y utilizando como referencia los valores de reflectividad en las bandas 2 y 7 de las zonas quemadas de nuestra área de estudio (localizadas con la ayuda de la imagen Landsat TM) proponemos un nuevo valor de convergencia en el IRC de 0,06 en lugar del 0,08 propuesto por Martín *et al.* (2005).

3.3.2.- Cartografía de Áreas Quemadas

Para determinar el método de cartografía de áreas quemadas fue preciso definir:

- El procedimiento de segmentación de las imágenes para la discriminación de las zonas quemadas respecto a las no afectadas.
- El método para combinar los productos de 500 y 250m de cara a conseguir la cartografía de áreas quemadas aprovechando las capacidades de resolución espectral del primero y espacial del segundo.

Cualquier criterio para determinar umbrales en la aplicación que nos ocupa resulta discutible ya que el fenómeno quemado no es homogéneo en el espacio (Martín, 1998). Las áreas quemadas ofrecen diversos grados de afectación, lo que dificulta establecer fronteras nítidas entre lo afectado y no afectado por el fuego. En este sentido, lo más habitual para determinar estos umbrales es utilizar los valores estadísticos extraídos de la categoría a discriminar, con la media (μ) y algún múltiplo (n_x) de la desviación típica (δ) como criterio de corte: ($\mu + n_x \cdot \delta$). Este múltiplo dependerá de la sensibilidad de la variable para distinguir la categoría quemado de otras presentes en la imagen. En nuestro caso hemos utilizado como referencia para determinar los umbrales, los valores de una serie de píxeles seleccionados de forma aleatoria en la imagen y que consideramos representativos del comportamiento espectral de cada cubierta (zonas quemadas y distintos tipos de vegetación no afectada) en las bandas del sensor MODIS. Para establecer el umbral de discriminación de cada índice se calcularon los porcentajes de discriminación de cada uno de ellos a partir de los valores de media y desviación típica obtenidos de la muestra de puntos para la categoría quemado (localizada en la imagen a partir de los perímetros

obtenidos mediante interpretación visual de imágenes Landsat). Se partió calculando el porcentaje de discriminación de cada índice utilizando la media y se fue sumando progresivamente un valor de desviación típica (en intervalos de 0.1) hasta alcanzar niveles de discriminación del 100 % para todos los índices. Para determinar el mejor umbral de corte se realizó el cálculo de los errores de comisión (píxeles de otras cubiertas seleccionados como quemado por el umbral establecido) para distintos porcentajes de discriminación de la categoría quemado, seleccionándose aquel umbral de corte que, para un mismo porcentaje de discriminación, ofrecía los menores errores de comisión.

Como ya hemos mencionado, al utilizar los dos productos MODIS se pretendía combinar las capacidades de mayor resolución espectral del producto de 500 m y espacial del producto de 250 de cara a mejorar la delimitación espacial de las áreas quemadas. Teniendo en cuenta este objetivo se planteó un método en 3 fases:

Fase 1: Discriminación de incendios. En esta fase el objetivo era discriminar de forma automática los incendios ocurridos minimizando los errores de comisión (confusión con otras cubiertas). Para ello utilizamos el producto de 500 m cuya resolución espectral permite calcular índices basados en el SWIR para evitar confusiones con cubiertas que tienen un comportamiento espectral muy similar a las zonas quemadas, como por ejemplo el agua. En este caso se trataba de aplicar a las imágenes un umbral de corte (quemado/no quemado) suficientemente restrictivo que asegurase un alto porcentaje de discriminación pero al mismo tiempo garantizase un bajo error de comisión.

Fase 2: Delimitación espacial precisa de los incendios. En esta fase el objetivo era conseguir una correcta delimitación espacial del área afectada en cada incendio. Para ello utilizamos el producto de 250m por su mejor resolución espacial. Se trataba, en este caso, de aplicar un umbral menos restrictivo que el anterior para evitar en lo posible los errores de omisión. Este umbral menos restrictivo, unido a la menor resolución espectral de estas imágenes implicó una alta tasa de errores de comisión.

Fase 3: Cartografía final de las áreas quemadas. En esta fase el objetivo era combinar los

resultados obtenidos en las dos fases anteriores para obtener una correcta delimitación de las áreas quemadas. El criterio para la combinación de los resultados de las fases 1 y 2 fue de tipo espacial: sólo se retuvieron en el mapa final los polígonos delimitados en la fase 2 que coincidían espacialmente con los píxeles discriminados en la fase 1, esto es, que tocaban o estaban a menos de 250 m (margen de 1 píxel para evitar problemas de ajuste espacial) de los polígonos de la fase 1. Esto garantizaba retener la delimitación espacial mas precisa obtenida en la fase 2 pero eliminando los polígonos erróneamente detectados en esta fase.

La validación de la cartografía obtenida con MODIS se ha realizado a partir de la comparación con los perímetros de los incendios obtenidos mediante interpretación visual de una imagen Landsat TM correspondiente al día 31 de agosto de 2004 (escena 227/074).

4.- RESULTADOS

En la Tabla 1 se puede observar el análisis de los errores de comisión y omisión realizados para la selección y posterior segmentación de los índices a utilizar en las distintas fases de la cartografía. Esta tabla permite comparar los errores de comisión (totales y por categorías) de todos los índices calculados en los dos productos para un mismo porcentaje de discriminación de la categoría quemado (65 % para el producto de 500 m). Como se puede observar, los errores de comisión más bajos corresponden a BAI, BAIM y MIRBI. NBR presenta confusiones más altas con todas las categorías, especialmente con agrícola mientras que GEMI presenta una altísima confusión con la categoría matorral.

Como ya se ha comentado, la segmentación de las imágenes se realizó estableciendo un umbral de corte que permitió discriminar las áreas quemadas de las no afectadas. Esta es una de las fases más delicadas del proceso, tanto por la dificultad de establecer un criterio objetivo, como por su repercusión sobre los resultados que se pueden obtener.

Para la fase 1, en la que se trabajó con el producto de 500 m, se decidió aplicar un umbral restrictivo con objeto de reducir, en la medida de lo posible, los errores de comisión. Se eligió un umbral que, en los análisis realizados sobre la muestra de

	UMBRALES	HERBACEAS (%)	MATORRALES (%)	BOSQUE TROPICAL (%)	BOSQUE CADUCIFOLIAS (%)	BOSQUE ALTO (%)	AGRICULTURA (%)	SAVANNA (%)	TOTAL (%)
BAI	MEDIA + 0.5 SD	244.4	0.50	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	2.50
GEMI	MEDIA + 0.6 SD	0.386	3.50	35.50	0.00	0.00	1.00	0.00	40.00
BAIM	MEDIA + 0.5 SD	115.15	1.00	0.50	0.50	0.00	1.00	0.00	3.00
NBR	MEDIA - 0.3 SD	-0.059	2.00	1.50	0.00	0.00	2.50	7.00	13.50
MIRBI	MEDIA + 0.2 SD	1.67	0.50	1.00	0.00	0.00	4.00	2.00	7.50

Tabla 1.- Errores de Comisión y umbrales aplicados en la fase 1 para el producto de 500 m

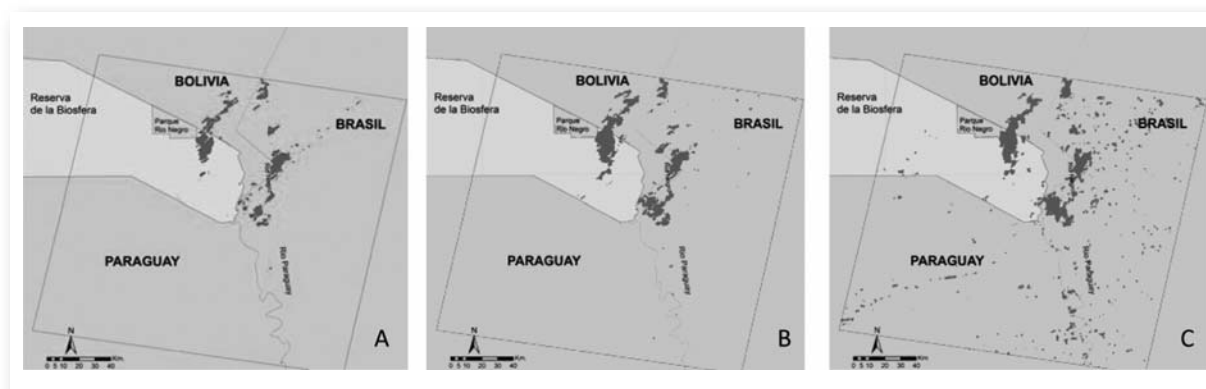


Figura 2.- Áreas quemadas obtenidas para los compuestos de 500 metros MODIS. A) BAI con el umbral establecido en 244,4, B) BIAM con el umbral establecido en 115,1, C) MIRBI con el umbral establecido en 1,67.

puntos, ofreciera errores de comisión inferiores al 10 % para los tres índices seleccionados (BAI, BAIM y MIRBI). Los umbrales correspondientes se pueden observar en la tabla 1 y el resultado de la segmentación de la imagen para los distintos índices en la figura 2.

Como se puede observar, el número y extensión de las áreas discriminadas como incendios, de acuerdo a los umbrales establecidos, varía en los distintos índices utilizados. BAI y BAIM presentan un nivel de discriminación muy similar en cuanto al número de áreas si bien la superficie de las áreas coincidentes es mayor en BAIM que en BAI. MIRBI presenta un comportamiento bastante distinto con un número muy superior de áreas discriminadas como incendio. Estas áreas se encuentran distribuidas por toda la imagen.

4.1.- Validación de la Fase de Discriminación con Imágenes LANDSAT-TM

Con objeto de comprobar la calidad de la discriminación realizada con cada índice y seleccionar el más adecuado para combinar posteriormente con el producto de 250 m, comparamos los resultados obtenidos con los perímetros de los incen-

dios delineados a partir del análisis visual de la imagen Landsat TM. El objetivo era calcular el número de incendios correctamente discriminados con cada índice y cuantificar los errores de comisión (áreas incorrectamente discriminadas como incendios). El número total de polígonos mayores de 25 ha digitalizados para la imagen Landsat fueron de 118 con una superficie total de 105.731 hectáreas. Los resultados de la comparación aparecen en la tabla 2.

Como se puede observar en la tabla 2, el porcentaje de acuerdo más alto corresponde a BAIM y MIRBI con un 84 y 85 % respectivamente de las áreas correctamente discriminadas. Así pues, estos índices resultarían más adecuados que BAI para esta fase pues ofrecen menos errores de omisión. Sin embargo, es preciso también tener en cuenta los errores de comisión. En este caso la diferencia es significativa entre BAIM y MIRBI siendo este último el que mayor número de áreas no coincidentes y, por tanto, incorrectamente discriminadas presenta. De estos resultados se concluye que la discriminación obtenida con el índice BAIM es la más adecuada y, por tanto, se ha usado como referencia para la combinación en la fase 3 con los resultados obtenidos del producto de 250 m.

	BAI 500M	BAIM 500M	MIRBI 500M
Nº POLÍGONOS	108	128	439
POLÍGONOS COINCIDENTES CON LANDSAT	75	99	100
% ACUERDO CON LANDSAT	64	84	85
POLÍGONOS NO COINCIDENTES CON LANDSAT (ERRORES DE COMISIÓN)	33	29	339

Tabla 2.- Comparación de los resultados de la fase de discriminación con los perímetros de referencia LANDSAT

Para la fase 2, en la que se trabajó con el producto de 250 m, se decidió aplicar un umbral poco restrictivo que garantizase la correcta delimitación de las áreas quemadas (evitando errores de omisión en el interior de los perímetros) aún a riesgo de incurrir en altos errores de comisión, pues como ya se mencionó estos errores se solventarían en la fase 3. Los umbrales se determinaron, como en la fase 1, a partir de la muestra de puntos utilizada en el análisis de separabilidad. En este caso se tomaron como referencia los umbrales en los que se alcanzaba un 90% de discriminación de los píxeles correspondientes a áreas quemadas. Los umbrales se aplicaron sobre los dos índices cal-

culados para este producto en función de las bandas disponibles (BAI y GEMI). El resultado de la segmentación de la imagen se puede observar en la figura 3.

Las imágenes evidencian que el índice GEMI realiza una importante sobreestimación del área quemada que no resulta aceptable para los objetivos de este estudio.

A la vista de los resultados obtenidos en las fases 1 y 2 fueron finalmente los productos obtenidos con los índices BAIM (para el producto de 500 m) y BAI (para el de 250m) los que se combinaron en la fase 3 para obtener la cartografía final de las áreas quemadas siguiendo el criterio espacial descrito en anteriormente. El resultado de la combinación con criterios espaciales de los dos productos se puede observar en la figura 4.

4.2.- Validación de la Cartografía Final con Imágenes LANDSAT-TM

Si bien en el epígrafe anterior se incluyó una validación parcial de los resultados obtenidos en la fase 1, una validación más completa fue realizada sobre la cartografía final (figura 4). En este caso se comparó la cartografía obtenida con MODIS con los perímetros digitalizados con Landsat con el propósito de comprobar el tamaño mínimo del incendio que, con la metodología aplicada, este tipo de imágenes son capaces de discriminar. Como se puede ver en la tabla 3, las imágenes MODIS obtenidas con la superposición de los resultados de distintas resoluciones espaciales y espectrales

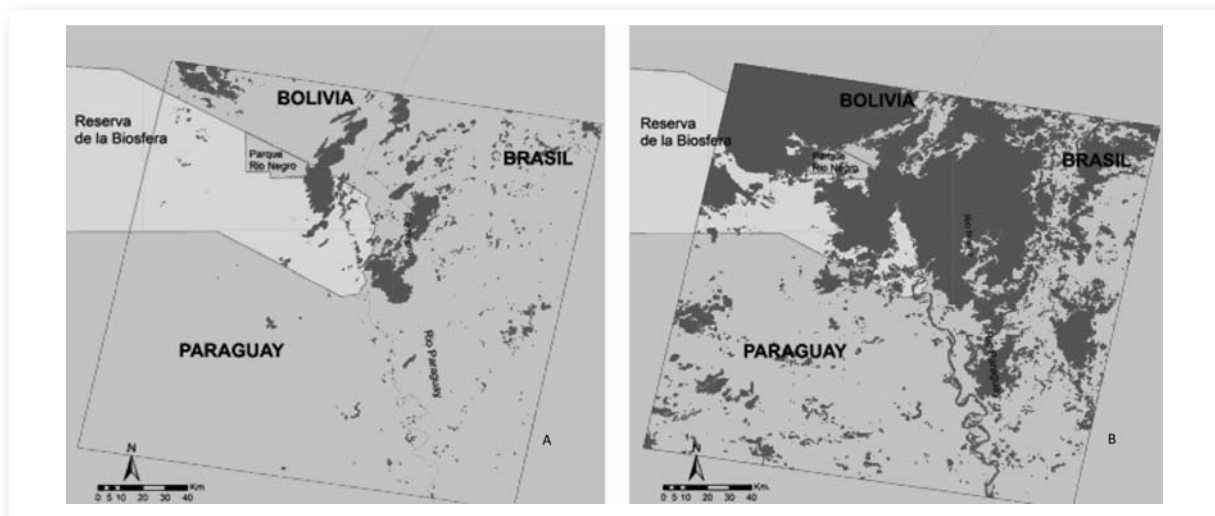


Figura 3.- Áreas quemadas obtenidas para los compuestos de 250 metros MODIS. A) BAI con el umbral establecido en $\geq 79,50$. B) GEMI con el umbral establecido en $\leq 0,53$.

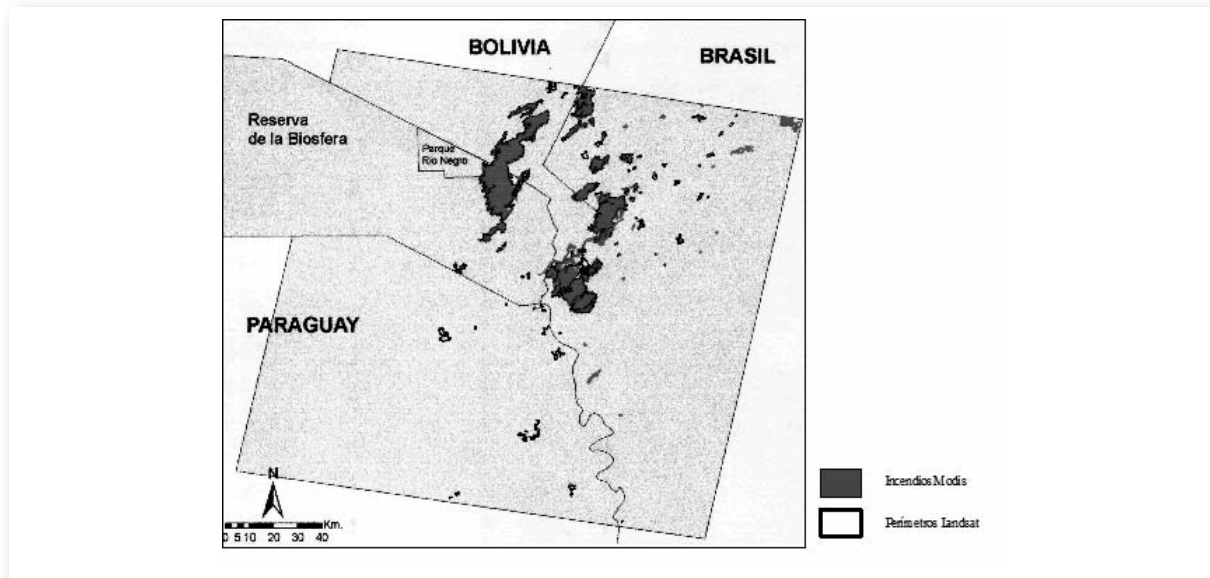


Figura 4.- Cartografía final de las áreas quemadas obtenidas de la superposición de los índices seleccionados de los compuestos de 250 y 500 metros. Se han superpuesto los perímetros digitalizados con Landsat TM para facilitar la interpretación de los resultados.

NÚMERO DE INCENDIOS LANDSAT	NÚMERO DE INCENDIOS MODIS	% ACUERDO
25-50	32	0
51-75	19	4
76-100	4	2
101-125	11	7
126-150	8	8
151-175	1	1
176-200	6	6
201-300	11	11
301-500	5	5
501-1000	9	9
1001-5000	10	10
5001-10000	1	1
> 10000	1	1

Tabla 3.- Verificación de la capacidad de discriminación de áreas quemadas de las Imágenes MODIS 250 y 500, según el tamaño del incendio

permiten discriminar todos los incendios a partir de 150 hectáreas. Incluso su capacidad de discriminación es aceptable (en torno a los 60 %) para los incendios entre 100 y 125 hectáreas, en cambio es un poco mas limitada para los incendios inferiores a 100 hectáreas.

5.- CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se ha tratado de desarrollar una metodología sencilla y operativa

para la discriminación y cartografía de medianos y grandes incendios de áreas boscosas ocurridos en un área de especial interés ecológico en el NE de Paraguay durante el periodo de incendios del año 2004.

Se han evaluado los índices espectrales para la identificación de áreas quemadas, concluyéndose que el BAI y el BAIM MODIS (ajustado el punto de convergencia) y determinando los umbrales, son los mas adecuados y los que presentan menores confusiones con otras coberturas, como suelos desnudos y zonas pantanosas. En cuanto a la metodología basada en la combinación de los productos de 500 y 250 m, se puede decir que resulta de interés para delimitar con mayor precisión las áreas quemadas, sin embargo sería conveniente profundizar en este punto, investigando sobre posibles algoritmos de fusión de las imágenes.

BIBLIOGRAFÍA

Barbosa, R.A. y Fearnside, P.M. (2005). Fire frequency and area burned in the Roraima savannas of Brazilian Amazonia, *Forest Ecology and Management*, 204: 371-384.

Bowman D.M.J.S., Balch J.K., Artaxo P., Bond W.J., Carlson J.M., Cochrane M.A., D'Antonio C.M., DeFries R.S., Doyle J.C., Harrison S.P., Johnston F.H., Keeley J.E., Krawchuck M.A., Kull C.A., Marston J.B., Moritz M.A., Prentice I.C., Roos C.I., Scott A.C.,

Swetnam T.W., van der Werf G.R. y Pyne S.J. (2009). Fire in the Earth System, *Science*, 324: 481-484.

Cardoso, M., Hurtt, G., Moore, B. y Prins, E. (2003). Projecting future fire activity in Amazonia. *Global Change Biology*, 9: 656-669.

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., Kanpandegi, J.A., Bastarrika, A. y Libonati, R. (2008). Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data. *Ecological Applications*, 18: 64-79.

Key, C. H. y Benson, N. C. (1999). Measuring and remote sensing of burn severity: the CBI and NBR. Poster abstract. In L. F. Neuenschwander and K. C. Ryan (Eds.), *Proceedings Joint Fire Science Conference and Workshop*, Vol. II, Boise, ID, 15-17 June 1999. University of Idaho and International Association of Wildland Fire. 284 pp.

Martín, M.P. (1998). *Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR*. Tesis doctoral. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. 228 pp.

Martín, M.P., Gómez, I. y Chuvieco, E. (2005). Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data. (*Proceedings of the 5th. International workshop on remote sensing and GIS applications to forest fire management: Fire effects assessment*. J. de la Riva, F. Pérez-Cabello y E. Chuvieco, Eds). Universidad de Zaragoza: 193-198.

Pinty B. y Verstraete M.M. (1992). GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites, *Vegetatio*, 101: 15-20

Roy, D. P., Y. Jin, P. E. Lewis y C. O. Justice (2005). Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*, 97: 137-162.

Setzer, A.W., Pereira M.C. y Pereira A.C. (1994). Satellite studies of biomass burning in Amazonia-Some Practical aspects. *Remote Sensing Review*, 10: 91-103.

Trigg S. y Flasse S. (2001). An evaluation of different spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal Remote Sensing*, 22: 2641-2647.