

## DETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS EN EL SURESTE DE MÉXICO, UTILIZANDO ÍNDICES PRE Y POST-INCENDIO NBR Y BAI, DERIVADOS DE COMPUESTOS MODIS

LILIA DE LOURDES MANZO DELGADO<sup>1</sup> y JOSÉ LÓPEZ GARCÍA<sup>2</sup>

\*Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, 04510 Coyoacán, México

[lmanzo@igg.unam.mx](mailto:lmanzo@igg.unam.mx), [jlopez@unam.mx](mailto:jlopez@unam.mx)

### RESUMEN

En el marco de las actividades realizadas por la Red Latinoamericana de Incendios (RedLatif) y la Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudios de los Recursos Naturales (SERENA), se desarrolló el algoritmo AQM2008 para identificar las áreas quemadas en la región sureste de México para el periodo 2008. El método consistió en ajustar los índices espectrales pre y post-incendio NBR (Normalized Burn Ratio) y BAI (Burned Area Index) derivados de los productos de reflectancia de 16 días MCD43B4 del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), tomando como referencia el algoritmo de áreas quemadas AQL2004. La validación se realizó mediante interpretación visual de imágenes Landsat ETM+ en combinación con los registros oficiales de incendios elaborados por la Comisión Nacional Forestal. El algoritmo estimó 52,977.8 ha afectadas por incendios; el 74% corresponde a terrenos agropecuarios y el 26 % tuvo lugar en bosques templados, selvas tropicales, pastizales y manglares. La alta precisión global del algoritmo (> 99%) se atribuye a la gran cantidad de pixel no quemados en las imágenes Landsat ETM+. El error promedio de omisión fue 45.99% y el error de comisión 51.91%. Asimismo, el promedio del coeficiente Kappa se estimó en 0.47, sugiriendo con ello que el algoritmo ajustado AQM2008 presenta una confiabilidad razonable. Los resultados representan una alternativa para analizar el patrón de distribución espacial y temporal de las áreas quemadas, así como identificar zonas de atención prioritaria en materia de incendios.

Palabras clave: Área quemada, MODIS, BAI, NBR.

DETECTION OF BURNT AREAS IN SOUTH-EASTERN MEXICO, USING PRE/POST-FIRE INDICES NBR AND BAI DERIVED FROM MODIS COMPOSITES

### ABSTRACT

As part of the activities of the Latin American Remote Sensing and Fire Monitoring Network (RedLaTIF) and the Latin-American network for the monitoring of natural resources

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

(SERENA), an algorithm AQM2008 has been developed to identify areas burnt during 2008 in south-eastern Mexico. The pre/post-fire spectral indices NBR (normalized burn ratio) and BAI (burned area index) were derived from 16-day surface reflectance composites from the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensor (MCD43B4), taking as a reference the AQL2004 algorithm of burnt areas. Validation was based on a comparison of Landsat ETM+ images with the National Forestry Commission's official records of wildfires. The algorithm estimated 52,977.8 ha affected by wildfires in 2008, of which 74% involved agricultural land and 26% temperate woodland, tropical forest, pasture and mangroves. The high global precision of the algorithm (> 99%) is attributable to the high number of pixels corresponding to unburnt land in the Landsat ETM+ images. The mean error of omission was 45.99%, and error of commission 51.91%. In addition, the mean Kappa coefficient was 0.47, suggesting that the adjusted AQM2008 algorithm achieved reasonable confidence. The results represent an alternative for analysing the pattern of spatial and temporal distribution of burnt areas and for identifying zones that merit priority attention with regard to wildfires.

Keywords: Burned area, MODIS, BAI, NBR.

## 1. Introducción

En México cada año se presentan numerosos incendios forestales propiciando la deforestación de extensas superficies de bosques templados, selvas tropicales y matorrales, además de contribuir al calentamiento global y disminución de la calidad de los servicios ambientales. Los registros oficiales de incendios forestales elaborados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2012) muestran una tendencia creciente de estos eventos a partir de la década de 1970, alcanzando un registro excepcional en la década de 1990, asociado al efecto de El Niño - Oscilación del Sur (ENOS) 1997-1998, considerado el más intenso del siglo pasado (Coghlan, 2002), el cual ocasionó el mayor desastre a nivel nacional, con 14,408 incendios que afectaron 849,632 ha, según la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP, 1998). En la década actual, los incendios acumulados en los tres últimos años sugieren que la tendencia ascendente de estos eventos continuará (tabla 1). El inicio y dispersión de los incendios en diferentes coberturas forestales se atribuye no sólo al uso tradicional del fuego en las actividades agrícolas y pecuarias, como el sistema de roza, tumba y quema (Ochoa-Gaona y González-Espinosa, 2000), sino también a la presencia de fenómenos meteorológicos como los huracanes que generan gran cantidad de material vegetal combustible (López-Portillo *et al.*, 1990), en combinación con periodos prolongados de sequía e incrementos de temperatura, ocasionados por la presencia del ENOS (Rowel y Moore, 2000). En el sureste de México, todos estos factores se combinan de manera especial favoreciendo la presencia de incendios en ecosistemas sensibles al fuego (Román-Cuesta *et al.*, 2003). Debido a ello se considera importante realizar un monitoreo sistemático de las áreas quemadas en esta región.

**Tabla 1. Reportes oficiales de incendios forestales en México**

Periodo	Número de incendios	Superficie afectada (ha)
1970 - 1979	51,292	1'058,000
1980 - 1989	67,357	2'579,000
1990 - 1999	100,408	2'676,000
2000 - 2009	81,315	2'174,000
2010 - 2012	25,304	1'414,000

Después de la temporada de incendios catastrófica de 1998, México, al igual que otros países, reforzó los programas de prevención y detección de incendios utilizando diversas técnicas de percepción remota, imágenes de satélite y sistemas de información geográfica (Ressl *et al.*, 2009). Estos avances han sido de gran utilidad para las brigadas que combaten, controlan y registran estos eventos, logrando complementar los reportes con información referente a la ubicación del evento, además de las fechas de inicio y terminación. Por otra parte, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2012), responsable de monitoreo de incendios, presenta informes diarios, semanales o mensuales de estos siniestros. Actualmente los avances logrados en materia de incendios han sido muy buenos; sin embargo, se considera necesario abordar otros temas de gran relevancia, entre los que destacan el monitoreo de áreas afectadas por incendios, en complemento con su representación cartográfica, logrando con ello conocer el patrón de distribución espacial y temporal de estos eventos en diversas escalas geográficas. Un estudio de tal magnitud, requiere sin duda el apoyo de diversas técnicas de percepción remota e imágenes de satélite. El monitoreo y cartografía de superficies afectadas por incendios constituye un apoyo importante para desarrollar programas de reforestación y recuperación de este tipo de superficies.

Por más de dos décadas se han utilizado técnicas de percepción remota e imágenes de satélite para identificar áreas quemadas, cuyos principios se basan en la repuesta espectral de los depósitos de ceniza y carbón, derivados de la combustión del material vegetal. El comportamiento espectral de las áreas quemadas se caracteriza por presentar un incremento en la reflectancia de la región visible (0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ ), en combinación con una disminución de ésta en el infrarrojo cercano (0.78 - 0.90  $\mu\text{m}$ ), incrementándose nuevamente en la región del infrarrojo medio (1.3 - 8.0  $\mu\text{m}$ ) y térmico (8.0 - 14.0  $\mu\text{m}$ ). Estos cambios están relacionados con la interrupción de la actividad fotosintética, afectación en la estructura interna de las hojas y pérdida del efecto absorbente del agua (Pereira *et al.*, 1999). Asimismo, el efecto de quemado puede ser atenuado o eliminado por el viento y la lluvia, algunas semanas o meses después del incendio. En complemento, las afectaciones de las áreas quemadas son más evidentes cuando se eliminan los elementos arbóreos o arbustivos, permaneciendo el efecto 2 o 3 semanas en el pastizal y varios años en el bosque templado (Robinson, 1991; Pereira *et al.*, 1999).

Las imágenes más utilizadas para identificar áreas quemadas han sido las AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), SPOT-Vegetation (Sistema Probatorio de Observación de la Tierra), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y Landsat TM/ETM+ (Thematic Mapper / Enhanced Thematic Mapper plus), empleando para ello índices de vegetación como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), clasificación supervisada, y componentes principales (Martín y Chuvieco, 1995; Cahoon *et al.*, 1999; Siljestrom y Moreno,

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

1995; Chuvieco *et al.*, 2005); sin embargo, se ha demostrado que los índices de áreas quemadas Normalized Burn Ratio (NBR; López-García y Caselles, 1991) y Burned Area Index (BAI; Martín *et al.*, 2005) presentan los mejores resultados, porque utilizan las bandas del infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta, que son más sensibles a la presencia de carbón y ceniza en el suelo (Bastarrika *et al.*, 2011).

Actualmente se encuentran disponibles varios productos de áreas quemadas a escala global. Uno de ellos es el GBA2000 (Global Burnt Area) con 1 km de resolución, desarrollado originalmente en el año 2000 con datos SPOT-Vegetatio, denominado posteriormente como L3JRC (Consortio formado por tres Universidades -University of Leicester (UK), Université Catholique de Louvain (BE), Instituto de InvestigaçãO Cient'fica Tropical, Lisbon (PT)- y el Joint Research Centre-European Commission), cuyos resultados fueron generados hasta 2007 (Tansey *et al.*, 2007). Por otra parte, el proyecto GlobCarbon (Global Carbon), continuación de GlobScar (Global Burn Scars) con 1 km de resolución, se inició en 2001 con imágenes ASTER (Along Track Scanning Radiometer) sustituidas posteriormente por imágenes Envisat (Environmental Satellite), generando resultados hasta 2007 (Simon *et al.*, 2004). De manera paralela, el producto oficial de áreas quemadas MCD45, con 500 m de resolución espacial, se ha generado a partir de imágenes MODIS desde el año 2000 hasta la fecha (Roy *et al.*, 2005). La cartografía de áreas quemadas ha sido de gran relevancia para conocer el patrón de distribución global de estos eventos; sin embargo, se considera necesario analizar dichos patrones a escala regional y local.

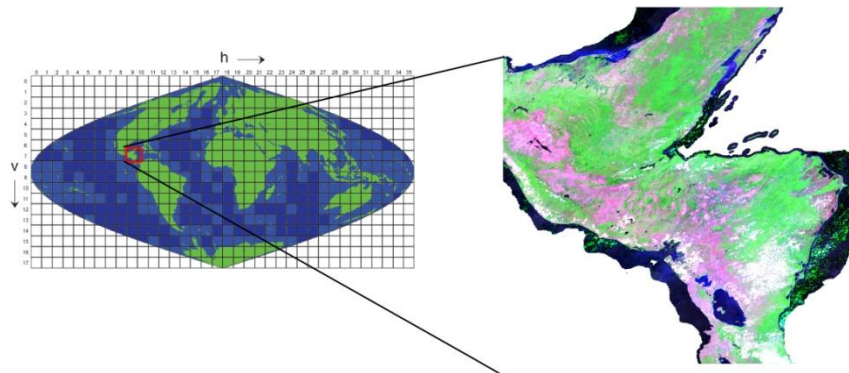
A finales de 2004 se formó la Red Latinoamericana de Teledetección de Incendios Forestales (RedLatif) con apoyo del programa internacional GOF-C-GOLD (Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics), teniendo como objetivo inicial cartografiar las superficies quemadas de gran extensión ocurridas en 2004, desde México hasta la Patagonia en Argentina, utilizando los compuestos MODIS de 32 días de reflectancia de la superficie, logrando construir el algoritmo AQL2004 (Áreas Quemadas en Latinoamérica), a partir del cual se obtuvo información relevante a escala regional y nacional (Chuvieco *et al.*, 2008). En 2008 RedLatif, en el marco del proyecto Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudios de los Recursos Naturales (SERENA), se propuso desarrollar un algoritmo que permitiera evaluar sistemáticamente las áreas quemadas en Latinoamérica, utilizando imágenes MODIS diarias, compuestos de 32 días (MOD09) y compuestos de 16 días de reflectancia de la superficie (MCD43B4), tomando como periodo de análisis el mismo año. Para lograr esto se establecieron las siguientes etapas: 1) Selección de áreas piloto, 2) Ajustes y validación del algoritmo AQL2004 a escala local, 3) Análisis comparativo entre los algoritmos y 4) Aplicación y validación regional. En la primera etapa se eligieron 6 Tiles o ventanas MODIS como áreas piloto, las cuales se ubicaron en México, Cuba, Colombia, Paraguay, Brasil y Argentina. El Tile correspondiente a México cubre gran parte de la región sureste del país y parte de Centroamérica. El presente trabajo expone los resultados obtenidos para el área piloto asignada para México utilizando compuestos de 16 días de reflectancia de la superficie (MCD43B4).

El objetivo de este trabajo fue desarrollar el algoritmo AQM2008 (Áreas Quemadas en México), tomando como base el AQL2004, para elaborar la cartografía de las superficies afectadas por incendios en el sureste de México utilizando el producto estándar MODIS MCD43B4 para el periodo 2008.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Área en estudio

La región sureste de México, comprendida en la ventana MODIS-H09v07, incluye en su totalidad a los estados de Chiapas y Tabasco, así como parte de Campeche, Yucatán y Quintana Roo (figura 1). Durante 2008, CONAFOR reportó 743 incendios y 35,250 ha afectadas, considerando al estado de Quintana Roo como el más afectado (17,830 ha) seguido por el de Chiapas (9,711 ha). A nivel nacional, ambos estados fueron considerados entre las 10 entidades con mayor superficie afectada por incendios. En la región sureste, al igual que el resto de México, el 85% de los incendios presentan en promedio superficies < 20 ha, cuya duración no rebasa las 24 horas.



**Figura 1. La ventana MODIS-H09v07 del producto MCD43B2 incluye los estados del sureste de México (Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo) y varios países de Centroamérica (Belice, Guatemala, Honduras y El Salvador).**

### 2.2. Imágenes MODIS

Actualmente se encuentran en órbita un buen número de satélites que ofrecen una gama de productos para detectar las áreas quemadas. Por lo que respecta a los sensores de mediana resolución espacial, el Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS), ha incrementado notablemente su aplicación en la detección y cartografía de superficies quemadas en los últimos años, siendo cada vez más los trabajos de investigación en este campo. Su buena resolución espectral, junto a la adecuada resolución temporal y al tamaño del pixel, convierten a MODIS, en el sensor más utilizado para analizar fenómenos dinámicos a escala media. De manera complementaria, las imágenes de alta resolución espacial, como Landsat y SPOT, han constituido un apoyo importante para validar, evaluar y describir las áreas quemadas.

El producto estándar MODIS MCD43B4 se genera cada 16 días, en proyección Sinusoidal, a partir de la combinación de los datos de los satélites Terra y Aqua, con resolución espacial de 1

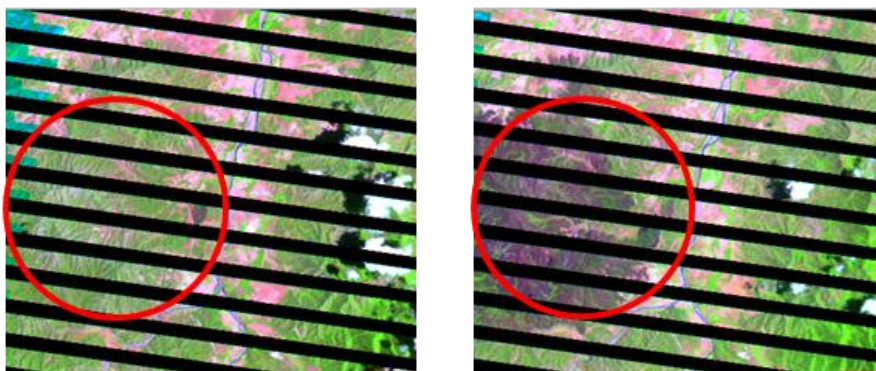
Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

km y 7 bandas espectrales ([https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_products\\_table/mcd43b4](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mcd43b4)), logrando con ello corregir el efecto bidireccional y reducir la influencia de nubes y distorsiones atmosféricas. Este producto se creó con la finalidad de optimizar la calidad de los compuestos MODIS de 32 días, constituyendo una oportunidad para cartografías áreas quemadas con mejores resultados (Opazo y Chuvieco, 2007), considerado de gran utilidad para las condiciones ambientales de Latinoamérica (Opazo y Chuvieco, 2009).

Para la realización del presente trabajo se procesaron 46 compuestos MCD43B4 del año 2008, los cuales fueron descargados del Visualizador Global del Servicio Geológico de Estados Unidos (<http://glovis.usgs.gov>). Este producto se genera cada 8 días considerando un intervalo de 16 días de adquisición, incluyendo un periodo de traslape entre los compuestos de 8 días. La clave de los compuestos representa el año, seguida por el día juliano en que se inicia el intervalo. El primer compuesto de 2008 es A2008001, cubre el intervalo 001 - 016 (1 - 16 de enero de 2008); el segundo, A2008009, cubre el intervalo 009 - 024 (9 - 24 de enero de 2008) teniendo 8 días de traslape con el compuesto anterior (9 - 16 de enero). Siguiendo esta secuencia, cada año está integrando por 46 compuestos.

### 2.3. Algoritmo AQM2008

Este proceso se inició con la revisión de los reportes oficiales de incendios para identificar los eventos con mayor duración y superficie afectada en 2008 (CONAFOR, 2012). Esto permitió seleccionar y ubicar un incendio relevante (> 500 ha), reportado entre el 11 y 23 de abril de 2008, en la Zona de Protección Forestal La Frailescana, Chiapas (15° 53' 11.86 N y 92° 58' 47.53 W), al oeste del área en estudio. Con esta información se identificó el área quemada en las imágenes Landsat ETM+ previas y posteriores al incendio (figura 2); al igual que en el compuesto MCD43B4 A2008105 (14 de abril - 29 de abril 2008). Por su tamaño y afectación, esta área fue elegida para verificar y adecuar, en caso necesario, cada uno de los pasos del algoritmo AQL2004, especialmente los relacionados con los índices NBR y BAI.



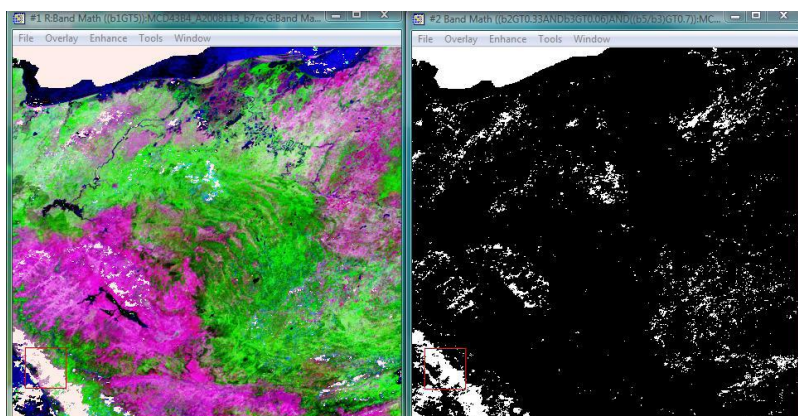
**Figura 2. Imágenes Landsat ETM+ (path 21; row 29) RGB (543) donde se identifica un área quemada antes (9 de abril 2008; izquierda) y después (25 de abril de 2008; derecha) de un incendio forestal.**

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

El algoritmo AQM2008 está compuesto por tres fases: 1) Discriminación, 2) Comparación multitemporal y 3) Análisis contextual. Las nubes y las superficies no combustibles se enmascaran antes de iniciar la primera fase para disminuir posibles confusiones. Las nubes se eliminaron (figura 3) utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Si } (B2 > 0.25) \text{ y } (B3 > 0.06) \text{ y } (B5/B3 > 0.7) \quad (1)$$

siendo B2 (8.41-8.76  $\mu\text{m}$ ), B3 (4.59- 4.79  $\mu\text{m}$ ) y B5 (12.30 - 12.50  $\mu\text{m}$ ) las bandas de MCD43B4.



**Figura 3. Compuesto MCD43B4 A2008113, RGB (721), antes (izquierda) y después de aplicar la máscara de nubes.**

La máscara de superficies no combustibles se construyó a partir del mapa de vegetación VCF (Vegetation Continuous Fields; Hansen *et al.*, 2004), el cual se ajustó a la misma proyección y resolución espacial que los compuestos MODIS de 16 días MCD43B4. El producto VFC, versión 2004, fue seleccionado por ser el más reciente en el momento que se iniciaron las pruebas del AQM2008, además de presentar la fecha más cercana al periodo en estudio. Sin embargo, dicha versión sólo permitió enmascarar como superficies no combustibles a los ríos y cuerpos de agua (clases entre 1 - 5); agrupando todas las clases de vegetación como superficies combustibles.

La primera fase del algoritmo discrimina los píxeles más afectados por el fuego a partir de umbrales fijos aplicados a los índices post-incendio Normalized Burn Ratio (NBR; López-García y Caselles, 1991) y Burned Area Index (BAI; Martín *et al.*, 2005).

El índice NBR, conocido también como el cociente normalizado de área quemada, se basa en el contraste espectral entre el infrarrojo cercano (NIR: 0.78 - 0.90  $\mu\text{m}$ ) y el infrarrojo de onda corta (SWIR: 2.09 - 2.35  $\mu\text{m}$ ). En un ambiente post-incendio, las superficies quemadas son poco reflectivas en el NIR, asociado a las alteraciones estructurales de la vegetación; en contraste, con el SWIR, que son muy reflectivas debido a la pérdida de agua en el suelo y la vegetación. El NBR identifica las superficies afectadas por el fuego a partir de dichas bandas, cuyo intervalo de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre -1 y +1, mediante la siguiente expresión:

$$NBR = \rho_{NIR} - \rho_{SWIR} / \rho_{NIR} + \rho_{SWIR} \quad (3)$$

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

siendo  $\rho_{NIR}$  = reflectividad del NIR (8.41 - 8.76  $\mu\text{m}$ ) y  $\rho_{SWIR}$  = reflectividad del SWIR (21.05 - 21.55  $\mu\text{m}$ ); donde NIR y SWIR corresponden a las banda 2 y banda 7 de MCD43B4.

El índice NBR logra una mejor discriminación de las áreas quemadas en comparación con los índices de vegetación como el NDVI ubicados en la región del visible porque la información del NIR y SWIR presenta un mayor contraste en este tipo de superficies (Roy et al. 2005). Diversos estudios han enfatizado la potencialidad del NBR no sólo para delimitar las áreas quemadas sino también para evaluar el grado de severidad (Cocke et al., 2005; Miller y Thode, 2007).

El índice BAI, también identifica áreas quemadas en el dominio espectral del NIR y el SWIR, incluyendo un valor o punto de convergencia, en cada banda, definido como la distancia cuadrática inversa de una muestra determinada de píxeles quemados. De esta manera, el BAI evita confusiones con otras coberturas que están espectralmente cercanas a las áreas quemadas, tales como el agua (Martín et al., 2005). El BAI original se desarrolló para imágenes AVHRR-NOAA (Martín, 1998), logrando también un buen desempeño en Landsat (Chuvieco et al., 2002) y MODIS (Martín et al., 2002). Los puntos de convergencia del BAI para AQL2004 se fijaron en 0.08 (NIR) y 0.2 (SWIR) (Chuvieco et al., 2008), los cuales se mantuvieron iguales para AQM2008, mediante la siguiente expresión:

$$BAI = 1 / (pc_{NIR} - p_{NIR})^2 + (pc_{SWIR} - p_{SWIR})^2 \quad (4)$$

siendo  $pc_{NIR} = 0.8$ ;  $pc_{SWIR} = 0.2$ ;  $p_{NIR}$  = reflectancia en NIR (8.41- 8.76  $\mu\text{m}$ );  $p_{SWIR}$  = reflectancia en SWIR (21.05 - 21.55  $\mu\text{m}$ ); donde NIR y SWIR corresponden a las banda 2 y banda 7 de MCD43B4.

Después de haber obtenido los índices BAI y NBR, ambos resultados se combinan para seleccionar los píxeles quemados que presenten un valor mínimo en cada índice. Dichos umbrales se determinaron tomando como base en el área quemada seleccionada para ajustar el algoritmo (figura 2). El resultado de la combinación de ambos índices se aplicó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Si } (BAI > 95) \text{ y } (NBR > 0.05) \quad (5)$$

La segunda fase del algoritmo es un análisis multitemporal que compara la diferencia de valores pre y post-incendio NBR y BAI de los píxeles discriminados en un tiempo dado ( $t$ ), con relación al valor del mismo píxel en el compuesto anterior ( $t-1$ ):

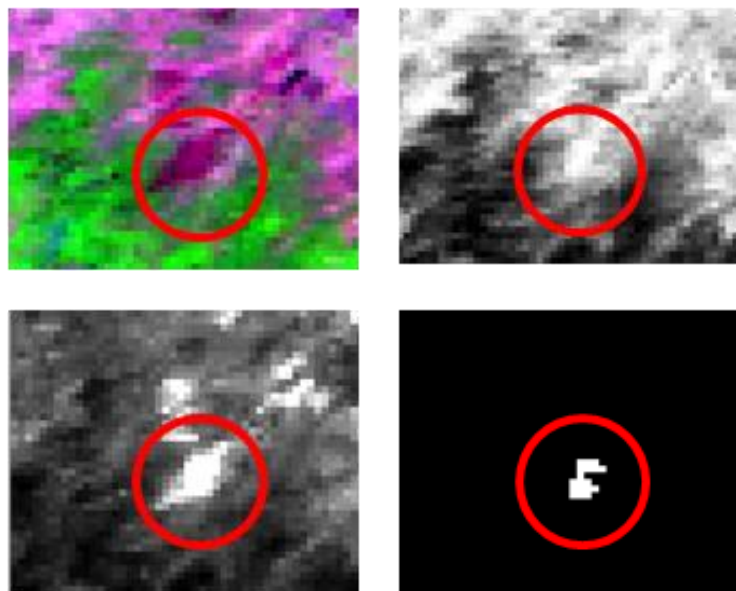
$$BAI_t - BAI_{t-1} \text{ y } NBR_t - NBR_{t-1} \quad (6)$$

Si la diferencia es mayor que los umbrales establecidos para BAI ( $>0.25$ ) y NBR ( $> 50$ ), las áreas quemadas se conservan; de lo contrario se eliminan. De esta manera el píxel seleccionado puede ser elegido una sólo vez, disminuyendo la posibilidad de elegir el mismo evento de manera consecutiva (por lo menos dos veces).

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

El compuesto de enero 2008 ( $t_1$ ) se consideró como el tiempo inicial, cuyos resultados se comparan con el último compuesto de 2007 ( $t_0$ ). Al final de esta fase las áreas quemadas pequeñas ( $< 3$  píxeles = 300 ha) fueron eliminadas.

La tercera fase del algoritmo es un análisis contextual para agregar nuevos píxeles al grupo seleccionado y establecer la superficie afectada por el fuego. Para ello se utiliza un buffer de 3 km (3 píxeles) y el índice BAI con un filtro de paso bajo aplicado en una ventana de 7 x 7 píxeles. Si el BAI del píxel  $>$  (BAI medio \* 1.3) y el píxel está dentro del buffer, entonces se considera como áreas quemada (figura 4). El algoritmo ajustado AQM2008 fue aplicado a los 46 compuestos MCD43B4 que cubren el periodo 2008.



**Figura 4. Aplicación del algoritmo AQM2008 al compuesto MCD43B4 2008105, donde se identifica el área quemada presentada en la figura 2. De arriba a abajo y de izquierda a derecha: a) MODIS RGB (721), b) NBR, c) BAI, d) área quemada identificada.**

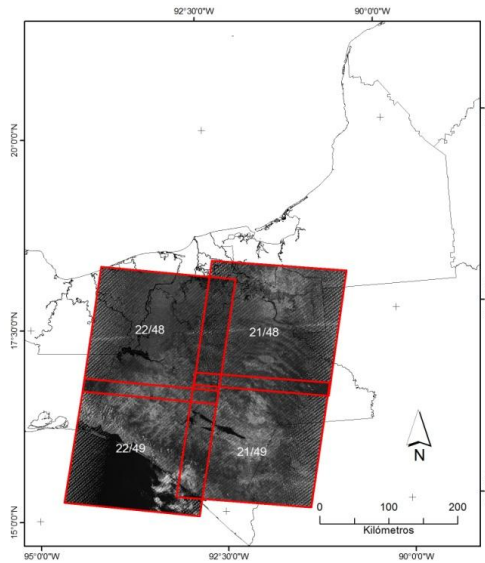
#### 2.4. Validación AQM2008

Para comprobar el grado de confianza del algoritmo AQM2008 se utilizaron los perímetros de áreas quemadas delimitados en imágenes Landsat ETM+, las cuales han sido utilizadas ampliamente para este tipo de evaluaciones (Roy *et al.*, 2005, Chuvieco *et al.*, 2008), particularmente por su alta resolución espacial y amplio rango espectral en las longitudes del visible e infrarrojo medio y por su frecuencias temporal de 16 días, logrando con ello un monitoreo sistemático de las áreas afectadas por incendios.

La búsqueda y adquisición de las imágenes Landsat ETM+ para el periodo de incendios 2008 (enero - junio) se realizó por medio del Visualizador Global del Servicio Geológico de

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

Estados Unidos (<http://glovis.usgs.gov>). Se descargaron 16 imágenes, con nubosidad < 35%, en formato Geotiff, corregidas geométrica y radiométricamente (Level-1G), en proyección UTM (Universal Transverse Mercator). Las imágenes seleccionadas cubren cuatro escenas contiguas de la porción oeste del área en estudio cuyos Path/Row son 22/48; 22/49; 21/48 y 21/49. Cada escena incluye 4 fechas del periodo mencionado (figura 6, tabla 2). En conjunto representan aproximadamente 28.6 % del área en estudio, abarcando el estado de Chiapas, donde el AQM2008 identificó extensas áreas quemadas. Por ello, se consideró que dichas imágenes representan una muestra importante para validar el algoritmo AQM2008.



**Figura 6. Imágenes Landsat ETM+ (recuadros en color rojo) seleccionadas para validar los perímetros de áreas quemada derivadas del algoritmo AQM2008. Los sitios de validación cubren 125,000 km<sup>2</sup>**

La identificación de áreas quemadas en las imágenes Landsat ETM+ se basó en la interpretación visual comparativa entre dos compuestos RGB bandas 5(15.5 - 17.5  $\mu\text{m}$ ); 4(7.50 - 9.00  $\mu\text{m}$ ); 3(6.30-6.90  $\mu\text{m}$ ) y 7(20.90 - 23.50  $\mu\text{m}$ ); 4(7.50 - 9.00  $\mu\text{m}$ ); 3(6.30-6.90  $\mu\text{m}$ ) de fechas consecutivas (Roy *et al.*, 2005), tomando como referencia los perímetros quemados identificados previamente en los compuestos MODIS. En dichos compuestos las áreas quemadas pueden presentar colores rojo, café o morado en tonos oscuros, cuya presencia se confirma al comparar la misma superficie en la imagen de fecha anterior (figura 2). Considerando la resolución espacial de los compuestos MODIS y de Landsat ETM+ sólo se delimitaron polígonos quemados > 250 ha.

De manera complementaria, las áreas quemadas identificadas por AQM2008 fueron comparadas visualmente con los puntos de calor identificados por la CONABIO y la áreas quemadas generadas por MODIS MCD45A1 que elabora la Universidad de Maryland mediante FIRMS - Web Fire Mapper (Fire Information for Resources Management System: <http://firefly.geog.umd.edu/firemaps>).

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

**Tabla 2. Relación de compuestos MODIS MCD43B4 e imágenes Landsat ETM+ del año 2008 utilizadas para validar los polígonos quemados identificados con AQM2008**

MODIS MCD43B4	Fecha inicial	Fecha final	Landsat ETM+ Path22/Row48	Landsat ETM+ Path22/Row49	Landsat ETM+ Path21/Row48	Landsat ETM+ Path21/Row49
A2008001	01-ene	16-ene		04-ene		
A2008009	09-ene	24-ene				
A2008017	17-ene	01-feb				
A2008025	25-ene	11-feb			05-feb	05-feb
A2008033	02-feb	17-feb	12-feb	12-feb		
A2008041	10-feb	25-feb				
A2008049	18-feb	04-mar				
A2008057	26-feb	12-mar				
A2008065	05-mar	20-mar	15-mar	15-mar		
A2008073	13-mar	28-mar				
A2008081	21-mar	05-abr	31-mar	31-mar		
A2008089	29-mar	13-abr				
A2008097	06-abr	21-abr				
A2008105	14-abr	29-abr			25-abr	25-abr
A2008113	22-abr	07-may	02-may			
A2008121	30-abr	16-may				11-may
A2008129	08-may	23-may				

Utilizando el programa ENVI, los polígonos delimitados un cada escena Landsat ETM+ se superpusieron a los identificados por MODIS, generándose ROI's (Regions of interest) para obtener la superficie de cada uno, la superficie interceptada entre ambos y la superficie cubierta por los polígonos MODIS y Landsat ETM+. La información de cada escena se organizó en una matriz de confusión para calcular la precisión global, los porcentajes de los errores de omisión y los de comisión, además del coeficiente Kappa (Congalton y Green, 1999).

La precisión global es la suma de los valores de la diagonal (superficie coincidente quemada y no quemada en Landsat ETM+ y MODIS), dividida por el número total de píxeles contenidos en Landsat ETM+ (Roy *et al.*, 2005).

Los errores de omisión (píxeles que no fueron identificados como áreas quemadas por el algoritmo) fueron calculados como la razón de los falsos negativos, con relación al número total de píxeles de referencia (Landsat ETM+). Los errores de comisión (píxeles etiquetados como áreas quemadas que no lo estaban) fueron calculados como la razón de los falsos positivos, con relación al producto global MODIS.

El coeficiente Kappa se utilizó para evaluar el nivel de acuerdo entre las áreas quemadas identificadas por el algoritmo AQM2008 y las delimitadas en Landsat ETM+. Un valor de 1 implica

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

un acuerdo perfecto y 0.5 un acuerdo razonable (Anaya y Chuvieco, 2012). Este criterio se tomó como base para evaluar finalmente la confiabilidad del algoritmo ajustado.

### 3. Descripción y análisis de resultados

Tomando como base el algoritmo AQL2004 y una superficie quemada (> 500 ha) de referencia, se construyó el algoritmo AQM2008 para el sureste de México, cuyo desarrollo consistió en ajustar los umbrales pre y pos-incendio de los índices NBR y BAI; así como los tamaños de las semillas quemadas, del buffer y de la ventana del filtro de paso bajo.

Tomando como referencia AQL2004, los umbrales mínimos post-incendio BAI y NBR aplicados en la expresión 5, se disminuyeron en 5 y 10 unidades respectivamente (tabla 3). Esto sugiere que las condiciones ambientales tropicales en el sureste de México, son diferentes a las condiciones promedio de Latinoamérica; generando una respuesta espectral post-incendio menor en los índices NBR y BAI. Tales ajustes permitieron identificar varias superficies quemadas que no hubieran sido seleccionadas con los umbrales AQL2004.

Los umbrales multitemporales, pre y postincendio BAI y NBR, aplicados en la expresión 6, se disminuyeron en 0.35 y 110 unidades respectivamente (tabla 3). Este ajuste permitió seleccionar nuevas superficies quemadas y reducir la posibilidad de elegir las mismas áreas quemadas en compuestos consecutivos. En general se considera que este paso tuvo un buen desempeño; sin embargo, algunas áreas quemadas en terrenos agrícolas fueron seleccionadas en más de una ocasión, sugiriendo que las quemadas son muy severas cuyo efecto se mantiene por varias semanas.

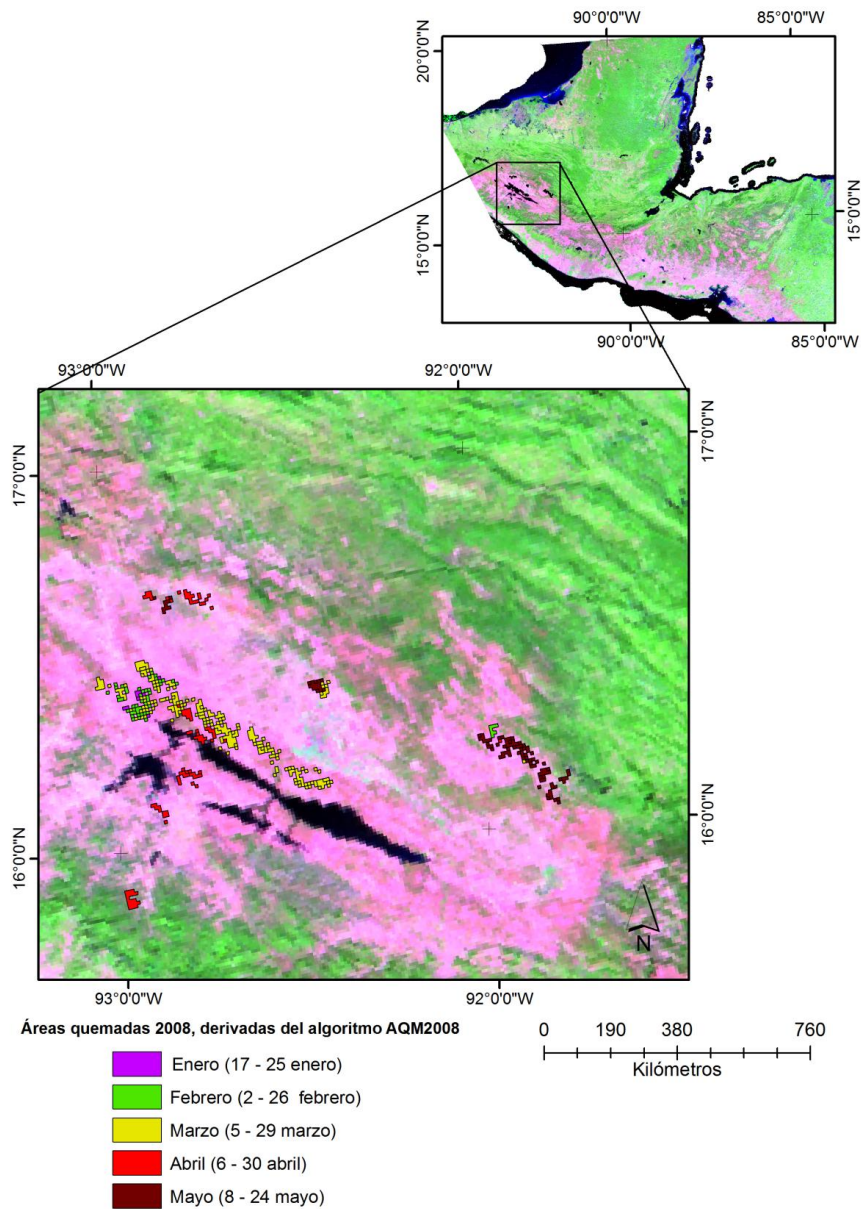
Otros ajustes importantes fueron los efectuados en los tamaños de las semillas quemadas, del buffer y la ventana del filtro de paso bajo, aplicados en la tercera fase del algoritmo. Estos fueron modificados después de comparar la resolución espacial de MOD09 (500 m) y MCD43B4 (1km), considerándose que cada uno de ellos podía ser disminuido de manera proporcional (tabla 3).

**Tabla 3. Comparación de umbrales para detectar áreas quemadas en AQL2004 y AQM2008**

Umbrales	AQL2004 (MOD09 - 500 m)	AQM2008 (MCD43B4 - 1 km)
BAI mínimo	100	95
NBR mínimo	0.15	0.05
BAI multitemporal	0.6	0.25
NBR multitemporal	160	50
Semillas	> 5 pixeles	>3 pixeles
Buffer	6 km	3 km
Filtro de convolución (paso bajo)	15 x 15	7 x 7

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

El algoritmo AQM2008 presentó resultados en los primeros 17 compuestos MCD43B4 correspondientes al periodo enero - mayo, confirmando la estrecha relación con la temporada de incendios forestales y las quemadas agropecuarias de la región. De esta manera, se identificaron 246 áreas quemadas, cuya superficie varió entre 86 y 2400 ha, cubriendo un total de 52,977.8 ha, siendo Chiapas el estado que agrupó la mayor superficie (89 %) seguido por Campeche (11%). Los meses de marzo y abril concentran el 68% de la superficie afectada (figura 7).



**Figura 7. Áreas quemadas derivadas del algoritmo AQM2008 y compuestos MODIS MCD43B4**

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

---

Así mismo, se observó que el algoritmo AQM2008 detectó en más de una ocasión las superficies quemadas. Sólo el 33 % de los polígonos quemados se detectaron una vez; 22% se identificaron 2 veces; 16% 3 veces y el 29% fueron seleccionados en repetidas ocasiones (4-9). Esta dinámica muy probablemente está relacionada con el periodo de traslape de 8 días que presentan los compuestos MCD43B4; propiciando que una misma superficie esté presente en 2 compuestos. Otra explicación puede estar asociada a la severidad de la quema, logrando que el efecto se prolongue por más de 2 semanas y en consecuencia pueda estar presente en más de dos compuestos. Asimismo, también puede estar relacionada con la resolución espacial (1 km por lado).

Por otra parte, el algoritmo AQM2008 discriminó tanto quemas agropecuarias como incendios forestales, ocupando un lugar preponderante las superficies agrícolas y pecuarias con 39,274.6 ha que representan 74% del total de la superficie quemada. En este contexto, los bosques templados y las selvas tropicales presentaron 9,614 ha afectadas (18%), seguidas por 4085.5 ha (8%) distribuidas en sabana, manglar, tular y pastizal inducido.

#### 4. Discusión y valoración de hallazgos

Para el mismo periodo, la CONAFOR reportó 743 incendios y 35,250 ha afectas en los estados que cubren el área en estudio: Campeche, Chiapas, Tabasco, Quintana Roo y Yucatán; considerando a Quintana Roo como el estado más afectado (17,830 ha) seguido por el de Chiapas (9,711 ha). La falta de información sobre la ubicación geográfica de los incendios constituyó una limitante para poder efectuar un análisis comparativo con los resultados obtenidos por el algoritmo AQM2008, los cuales incluyen incendios forestales y quemas agropecuarias. Sin embargo, cabe aceptar que el algoritmo no detectó áreas quemadas en tres estados que tuvieron reportes de incendios. Esta situación sugiere un análisis dirigido para tratar de encontrar los sitios afectados y analizar las posibles causas de los errores omitidos por el algoritmo AQM2008.

El análisis comparativo visual entre los resultados AQM2008, CONABIO y FIRMS permitió observar varias coincidencias importantes entre los diferentes productos. Todas las áreas quemadas AQM2008 presentan entre 1 y 14 puntos de calor, dependiendo de la superficie afectada, lo cual confirma su asociación con los incendios. La comparación con FIRMS permitió reconocer que ambos algoritmos detectaron, de manera general, las mismas superficies; sin embargo, AQM2008 omitió una superficie extensa (> 1400 ha) ubicada en la Reserva de la Biosfera El Triunfo, Chiapas. La omisión se debió a que los valores de los índices NBR y BAI se ubicaron por abajo que los umbrales establecidos, lo que sugiere que el incendio probablemente no fue muy severo. Tomando como referencia dicha área quemada se realizaron varias pruebas para reajustar el algoritmo AQM2008 en la expresión 5; sin embargo, los errores de comisión se incrementaban notablemente en toda el área en estudio. Esta situación sugiere que el algoritmo AQM2008 identifica áreas quemadas afectadas severamente por el fuego, donde muy probablemente los estratos arbóreo y arbustivo fueron eliminados, dejando expuesto el suelo con gran acumulación de carbón. Por otra parte, este análisis sugiere que AQM2008 presenta serias limitaciones para discriminar superficies moderadamente afectadas por el fuego.

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

Tomando como base los resultados de 8 matrices de confusión, se estimó que el algoritmo AQM2008 tiene una precisión global muy alta (> 99%), lo cual se atribuye a la gran cantidad de pixel no quemados en las imágenes Landsat ETM+. Por otra parte, el promedio de los errores de omisión se ubicó en 45.99%, en tanto que el promedio de los errores de comisión fue 51.91%. Asimismo, el promedio del coeficiente Kappa se estimó en 0.47, sugiriendo con ello que el algoritmo ajustado AQM2008 presenta una confiabilidad razonable (tabla 3), semejante a la confiabilidad reportada para el producto de área quemada MCD45A1 desarrollado a partir de imágenes MODIS con resolución de 500 m (Anaya y Chuvieco, 2012).

**Tabla 3. Escenas Landsat ETM+ seleccionadas para validar el algoritmo AQM2008**

ETM (Path/Row)	Fecha	MCD43B2-2008	Error de Comisión	Error de Omisión	Precisión Global	Coefficiente Kappa
21/49	09-abr-08	097	34.75	72.44	99.72	0.39
21/49	25-abr-08	105	12.79	42.96	99.98	0.69
21/49	25-abr-08	113	63.00	43.70	99.96	0.45
22/48	15-mar-08	073	61.95	15.24	99.98	0.53
22/48	31-mar-08	097	69.58	54.94	99.94	0.36
22/49	12-feb-08	033	29.99	48.25	99.93	0.59
22/49	31-mar-08	081	44.7	68.52	99.85	0.40
22/49	15-mar-08	065	51.19	69.26	99.87	0.38
Promedio			45.99	51.91	99.90	0.47

Los errores de omisión y comisión se deben generalmente a las diferencias entre la forma y extensión del área quemada, cuya delimitación estuvo determinada en gran parte por la resolución espacial de las imágenes. En el caso de las imágenes Landsat ETM+, la alta resolución espacial logró delimitar el perímetro con mayor precisión. En tanto que, los vectores derivados de los compuestos MODIS de 16 días adoptan formas geométricas irregulares, muy burdas, que cubren parte del área quemada, los cuales en ocasiones parecen estar desfasadas algunos kilómetros del área afectada.

A pesar de las limitaciones encontrada, se considera que el algoritmo AQM2008 es una alternativa interesante para analizar la dinámica espacial y temporal de las áreas afectadas por incendios que facilita la ubicación preliminar de áreas quemadas de gran magnitud, las cuales pueden ser delimitadas con mayor precisión con imágenes de alta resolución como pueden ser Landsat ETM+.

## 5. Conclusiones

El uso de compuestos MODIS de 16 días permitió construir un algoritmo AQM2008, el cual fue capaz de detectar superficies quemadas > 300 ha, cuyo origen está relacionado con incendios forestales y quemas agropecuarias. Este algoritmo constituye un apoyo importante para monitorear extensas superficies quemadas de manera sistemática, proporcionando información

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

espacial y temporal de gran utilidad para elaborar programas de reforestación y vigilancia de quemas agropecuarias.

## Referencias bibliográficas

Anaya, J.A. y Chuvieco, E. (2012): "Accuracy assessment of burned area products in the Orinoco basin", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78, 53-70.

Bastarrika, A., Chuvieco, E. y Martín, M.P. (2011): "Mapping burned area from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors", *Remote Sensing of Environment*, 115, 1003-1012.

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., 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., Marí, N., González F., Morelli, F., Setter, A., Csiszar, I., Karpandegui, J., Bastarrika, A., Libonati, R. (2008): "Global burned land estimation in Latin America using Modis Composite Data", *Ecological Applications*, 18, 64-79.

Chuvieco, E., Ventura, G., Martín, M. P. y Gómez, I. (2005): "Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping", *Remote Sensing of Environment*, 94, 450-462.

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

Coghlan, C. (2002): "El Niño-causes, consequences and solutions", *Weather*, 57, 209-215.

CONAFOR (2012): Comisión Nacional Forestal - CONAFOR: *Reportes de incendios*. [consulta 15-12-2012]. Disponible en: [http://www.conafor.gob.mx/programas\\_nacionales\\_forestales/incendios/index.html](http://www.conafor.gob.mx/programas_nacionales_forestales/incendios/index.html)

Congalton, R.G. y Green, K. (1999): *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Application*. Lewis Publisher. Boca Ratón.

FIRMS - Web Fire Mapper (Fire Information for Resource Management System). *Modis Burned Area and Active Fire Layer*. University of Maryland, Maryland, USA. [consulta 15-12- 2012]. Disponible en <http://firefly.geog.umd.edu/firemaps>.

Hansen, M., Defries, R., Townshend, J.R., Carroll, M., Dimiceli, C., Sohlberg, R. (2004): 500m MODIS Vegetation Continuous Field. University of Maryland. Maryland, USA. [consultado 10-09-2009]. Disponible en <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/modis/>

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

López García, M.J., Caselles, V. (1991): "Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper Data", *Geogarto International*, 1, 31-37.

López-Portillo, J., Keyes, M.R., González, A., Cabrera, E. y Sánchez, O. (1990): "Los incendios de Quintana Roo: ¿catástrofe ecológica o evento periódico?", *Ciencias y Desarrollo*, 91, 43-57.

Martín, M.P. (1998): *Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR*. Tesis Doctoral. 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", *EAR-SeL 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., Chuvieco, E. (2005): "Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data", In (Eds.): J. Riva, F. Pérez-Cabello y Emilio Chuvieco: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management: fire Effects Assessment*, Universidad de Zaragoza, GOF-C-GOLD, EARSeL, París, pp. 193-198.

Miller, J.D. y Thode, A.E. (2007): "Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)", *Remote Sensing of Environment*, 109, 66-80.

Ochoa-Gaona, S. y González-Espinosa, M. (2000): "Land use and deforestation in the highlands of Chiapas, Mexico", *Applied Geography*, 20, 17-42.

Opazo Saldivia, S. y Chuvieco Salinero, E. (2007): "Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas", *Revista de Teledetección*, 27, 27-43.

Opazo, S. y Chuvieco, E. (2009): "Cartografía de áreas quemadas en Sudamérica: detección de píxeles semilla", *Revista de Teledetección*, 32, 50-71.

Pereira, J.M.C., Sá, A.C.L., Sousa, A.M.O., Silva, J.M.N., Santos, T.N. y Carreiras, J.M.B. (1999): "Spectral characterization and discrimination of burnt areas", en Chuvieco (Ed.): *Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean basin*, pp. 123-138. Madrid, Springer.

Ressl, R., López, G., Cruz, I., Colditz, R.R., Schmidt, M., Ressler, S. y Jiménez, R. (2009): "Operational active fire mapping and burnt area identification applicable to Mexican Nature Protection Areas using Modis and NOAA-AVHRR direct readout data", *Remote Sensing of Environment*, 113: 1113 - 1122.

Robinson, J.M. (1991): "Fire from space: global fire evaluation using infrared remote sensing", *International Journal of Remote Sensing*, 12, 3-24.

Román-Cuesta, R.M., García, M. y Retana, J. (2003): "Environmental and Human Factors influencing fire trends in ENSO and Non-ENSO years in tropical México", *Ecological Applications*, 13, 1177-1192.

Rowell, A. y Moore, P. F. (2000): *Global review of forest fires*. WWF/IUCN.

Manzo Delgado, L. y López García, J. (2013): "Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-2, p. 66-83. ISSN: 1578-5157

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

SEMARNAP (1998): *Los incendios forestales en México: 1998*. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México, D.F.

SEMARNAT (2002): *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas Ambientales*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F.

Siljestrom Ribed, P. y Moreno López, A. (1995): "Monitoring burnt areas by principal components analysis of multi-temporal TM data", *International Journal of Remote Sensing*, 16, 1577-1587.

Simon, M., Plummer, S., Fierens, F., Hoelzemann, 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., Gregoire, 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*, New-castle upon Tyne, UK.

U.S. Geological Survey Center (USGS) Global Visualization Viewer - Imágenes Landsat. [consulta 15-11- 2012] Disponibles en <http://glovis.usgs.gov>.