

Thematic accuracy of hotspots and wildfires in Michoacán, Mexico

Fiabilidad temática de puntos de calor e incendios forestales en Michoacán, México

Ignacio González-Gutiérrez^{1*}; Jean F. Mas-Causse¹;
Luis M. Morales-Manilla¹; Karla A. Ocegüera-Salazar²

¹Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA). Antigua carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Exhacienda de San José de la Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, México.

²Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES). Antigua carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Exhacienda de San José de la Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, México.

*Corresponding author: igonzalez@pmip.unam.mx; tel.: +52 (443) 135 4902.

Abstract

Introduction: Wildfire monitoring programs were first implemented in Mexico at the end of the last century; however, there are no studies that report their accuracy in detecting fires and hotspots.

Objective: To evaluate the thematic accuracy of hotspots and wildfire records in a region of Michoacán de Ocampo, Mexico.

Materials and methods: Rapid Eye high spatial resolution images were classified to detect fire scars. The images were crossed with hotspot maps from the MODIS sensor, processed by the National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO), and from the MODIS, AVHRR and GOES sensors, processed by the National Meteorological Service (SMN), as well as with wildfire records from the National Forestry Commission (CONAFOR). Detection rates and confusion matrices were generated to assess accuracy.

Results and discussion: The detection rate was higher with the CONABIO MODIS sensor (>75 %) in categories greater than 50 ha. The overall accuracy of hotspots was 62 %; however, the errors of omission (underestimation) and commission (overestimation) were 85 and 34 %, respectively. The fires reported by CONAFOR lack spatial coincidence with respect to scars, so the accuracy analysis was discarded.

Conclusion: The use of hotspots, according to detection rates, is ideal for fires exceeding 50 ha. The thematic accuracy of hotspots and fire records should be evaluated at the beginning of a study.

Keywords: Detection rate, fire scars, Rapid Eye, linear spectral mixing model, Card correction.

Resumen

Introducción: Los programas de monitoreo de incendios forestales incursionaron en México a finales del siglo pasado; sin embargo, no existen estudios que reporten su fiabilidad en la detección de incendios y puntos de calor.

Objetivo: Evaluar la fiabilidad temática de los puntos de calor y registros de incendios forestales en una región de Michoacán de Ocampo, México.

Materiales y métodos: Se clasificaron imágenes de alta resolución espacial *Rapid Eye* para detectar cicatrices de incendios. Las imágenes se cruzaron con mapas de puntos de calor del sensor MODIS, procesados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), y de los sensores MODIS, AVHRR y GOES, procesados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), así como con registros de incendios forestales de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Se generaron tasas de detección y matrices de confusión para evaluar la fiabilidad.

Resultados y discusión: La tasa de detección fue mayor con el sensor MODIS de la CONABIO (>75 %) en las categorías mayores de 50 ha. La fiabilidad global de los puntos de calor fue 62 %; no obstante, los errores de omisión (subestimación) y comisión (sobrestimación) representaron 85 y 34 %, respectivamente. Los incendios reportados por la CONAFOR carecen de coincidencia espacial con respecto a las cicatrices, por lo que el análisis de fiabilidad fue descartado.

Conclusión: El uso de los puntos de calor, de acuerdo con las tasas de detección, es ideal para incendios que superen las 50 ha. La fiabilidad temática de los puntos de calor y de los registros de incendios debe evaluarse al inicio de una investigación.

Palabras clave:

Tasa de detección, cicatrices de incendios, *Rapid Eye*, modelo lineal de mezcla espectral, corrección de Card.

Introduction

Wildfires, according to the Secretaría de Gobernación (2014), are previously unpredicted fires that burn plant fuels in forests, tropical forests and scrub, forcing people to try to extinguish them. In Mexico, wildfires occur during the dry season, reaching their most critical level in April and May, which is why the federal government has implemented programs for monitoring and detecting them. The Ministry of Environment and Natural Resources (SEMARNAT), through the National Forestry Commission (CONAFOR), has developed the "National Wildfire Protection Program," which focuses on the detection, combating and extinction of wildfires. This program uses the following fire detection mechanisms: fixed land (forest watchtowers), mobile land (constant supervision with automobiles), and aerial (supervision with light aircraft and helicopters) to monitor inaccessible areas (Secretaría de Gobernación, 2014).

Cruz-López, Saldaña, Ressler, and Colditz (2011) and Manzo (2016) point out that CONAFOR's historical reports recorded approximately 14,000 wildfires in the 1998 season, considered the most catastrophic of recent years in Mexico. Against this backdrop, the "Hotspot detection by remote sensing techniques" program was developed, which later became the "Early warning system for fires", both implemented by CONABIO (National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity). These programs have used images from several sensors, highlighted by the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIRSS). Hotspots record thermal anomalies related to the generation of wildfires fires and burns in pastures and crops (Cruz-López et al., 2011). The spots are detected through the use of thermal bands in a satellite image, from pixels that comply with the thresholds established within an algorithm and that show a high temperature compared to their neighbors.

The National Water Commission (CONAGUA) is another agency that, through the National Meteorological Service (SMN), has constantly monitored the territory through the "Detection and monitoring of wildfires" program, which uses satellite images from the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES), AVHRR and MODIS sensors.

The information generated by the above programs is expressed through hotspots reported daily to various government agencies throughout the country. Although these programs have been using satellite technology for more than 15 years, there is no literature on thematic accuracy; it is therefore necessary to carry out tests to determine the uncertainty level. Thematic

Introducción

El incendio forestal, de acuerdo con la Secretaría de Gobernación (2014), es el fuego que afecta combustibles vegetales en bosques, selvas y matorrales, cuya quema no estaba prevista, lo que obliga a intentar su extinción. En México, los incendios forestales se presentan durante el periodo de secas, alcanzando su nivel más crítico en los meses de abril y mayo, razón por la cual el gobierno federal ha implementado programas para el monitoreo y detección. La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), desarrolla el "Programa nacional de protección contra incendios forestales", el cual está enfocado en la detección, combate y extinción de estos. Dicho programa emplea los siguientes mecanismos para la detección de incendios: terrestres fijos (torres de vigilancia forestal), terrestres móviles (supervisión constante con automóviles), y aéreos (supervisión con avionetas y helicópteros) para el monitoreo de zonas inaccesibles (Secretaría de Gobernación, 2014).

Cruz-López, Saldaña, Ressler, y Colditz (2011) y Manzo (2016) señalan que los reportes históricos de la CONAFOR registraron aproximadamente 14 000 incendios forestales en la temporada de 1998, considerada la más catastrófica de los años recientes en el territorio mexicano. Con este antecedente se desarrolló el programa "Detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota", que más tarde migró a "Sistema de alerta temprana para incendios", ambos implementados por la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). Estos programas han utilizado imágenes de varios sensores entre los que destacan el *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) y el *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIRSS). Los puntos de calor registran anomalías térmicas relacionadas con la generación de incendios forestales, quemaduras en pastizales y en cultivos (Cruz-López et al., 2011). Los puntos son detectados mediante el empleo de bandas térmicas en una imagen de satélite, a partir de píxeles que cumplen con los umbrales establecidos dentro de un algoritmo y que muestran una temperatura elevada en comparación con sus vecinos.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es otra dependencia que, a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ha monitoreado constantemente el territorio mediante el programa "Detección y seguimiento de incendios forestales". Este programa utiliza imágenes de satélite provenientes de los sensores *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), AVHRR y MODIS.

La información generada por los programas mencionados se expresa a través de puntos de calor reportados diariamente a varias dependencias

accuracy, according to Chuvieco (2008) and Mas, Díaz-Gallegos, and Pérez (2003), is the degree of accuracy achieved by a map obtained from the digital or visual classification of a satellite image, when compared with reference information considered highly reliable and analyzed with statistical techniques.

The evaluation of thematic map accuracy is a topic addressed by several papers (Card, 1982; Chuvieco, 2008; Congalton, 1991; Mas et al., 2003, 2014; Olofsson et al., 2014; Olofsson, Foody, Stehman, & Woodcock, 2013; Stehman & Czaplewski, 1998) that present the following recommendations to perform it with statistical rigor: a) implement a probabilistic design by reporting the sampling unit, sampling type and sample size; b) provide an adequate spatial and temporal representation, from the reference data, to label each sample unit accurately; c) summarize the accuracy assessment by reporting a confusion matrix in terms of area proportion; d) estimate overall accuracy by indicating omission and commission errors; and e) quantify the uncertainty of the accuracy indices by confidence intervals. These aspects are considered basic in any accuracy study.

In this regard, the objective of this research was to determine the thematic accuracy of hotspots and wildfires recorded in a period of 2011, in a region of the state of Michoacán, given that there is no history of this type at the national level. The data were obtained from three federal sources: CONAFOR, CONABIO and SMN.

Materials and methods

Study area

The study area included the municipalities of Aquila, Aguililla, Chinicuila and Coalcomán in the state of Michoacán, covering an area of 5 875 km² (Figure 1). The area was determined based on two factors: the hotspot concentrations shown by CONABIO, SMN and CONAFOR fire reports, and the availability of high spatial resolution images in early February and late May, 2011.

Study material

CONABIO's hotspots in shapefile format (points) were downloaded through its portal (<http://incendios.conabio.gob.mx>), while those of SMN were obtained through a request for information from the Department of Environmental Atmospheric Monitoring. It should be noted that CONABIO's hotspots come from MODIS image processing, while the SMN hotspots come from GOES, AVHRR and MODIS image processing.

Wildfire data were obtained through CONAFOR's state office in a spreadsheet with the following information:

gubernamentales en todo el país. A pesar de que estos programas llevan más de 15 años utilizando tecnología satelital, no existe literatura sobre la fiabilidad temática; por ello, es necesario hacer pruebas para determinar la incertidumbre alcanzada. La fiabilidad temática, de acuerdo con Chuvieco (2008) y Mas, Díaz-Gallegos, y Pérez (2003), es el grado de exactitud que alcanza un mapa obtenido de la clasificación digital o visual de una imagen de satélite, al ser comparado con información de referencia considerada altamente confiable y analizado con técnicas estadísticas.

La evaluación de la fiabilidad temática es un tema abordado por diversos trabajos (Card, 1982; Chuvieco, 2008; Congalton, 1991; Mas et al., 2003, 2014; Olofsson et al., 2014; Olofsson, Foody, Stehman, & Woodcock, 2013; Stehman & Czaplewski, 1998) que presentan las siguientes recomendaciones para realizarla con rigor estadístico: a) implementar un diseño probabilístico reportando la unidad de muestreo, tipo de muestreo y tamaño de la muestra; b) proporcionar una representación espacial y temporal adecuada, a partir de los datos de referencia, para etiquetar cada unidad de la muestra con precisión; c) resumir la evaluación de la fiabilidad reportando una matriz de confusión en términos de proporción de área; d) estimar la fiabilidad global indicando los errores de omisión y comisión; y e) cuantificar la incertidumbre de los índices de fiabilidad mediante intervalos de confianza. Estos aspectos se consideran básicos en cualquier estudio de fiabilidad.

En este sentido, el objetivo de la presente investigación fue determinar la fiabilidad temática de los puntos de calor y de incendios forestales registrados en un periodo del año 2011, en una región del estado de Michoacán, debido a que no existen antecedentes de este tipo a nivel nacional. Los datos se obtuvieron de tres fuentes federales: CONAFOR, CONABIO y SMN.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio comprendió los municipios de Aquila, Aguililla, Chinicuila y Coalcomán en el estado de Michoacán, abarcando una superficie de 5 875 km² (Figura 1). El área se determinó con base en dos factores: las concentraciones de puntos de calor mostradas por la CONABIO, por el SMN y por los reportes de incendios de la CONAFOR; y la disponibilidad de imágenes de alta resolución espacial a principios de febrero y al final del mes de mayo del 2011.

Material de estudio

Los puntos de calor de la CONABIO en formato *shapefile* (puntos) se descargaron a través de su portal (<http://>



Figure 1. Location of the study area for assessing the thematic accuracy of hotspots and wildfire records in the state of Michoacán, Mexico.

Figura 1. Localización del área de estudio para la evaluación de la fiabilidad temática de los puntos de calor y de los registros de incendios forestales en el estado de Michoacán, México.

geographic coordinates, municipalities, causes, start dates, vegetation types, burnt area and duration of events. An important input was the V Series Land and Vegetation Use map of the National Institute of Statistics and Geography (INEGI, 2011) with a 1:250000 scale. In addition, thanks to an existing agreement between CONABIO and the National Autonomous University of Mexico (UNAM), 24 Rapid Eye images with a spatial resolution of 5 m were obtained. Half of these images are from February 6 and the other half are from May 20, 2011. All the material was processed in the ArcGIS 9.3.1 Geographic Information System (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2009) with a UTM Zone 13 North projection system and WGS84 Datum.

Methods

Forest and grassland cover map

The boundaries of the covers, indicated on the INEGI V-Series map, were improved through a visual interpretation at a scale of 1: 50,000, taking as background the Rapid Eye images of February 6, 2011.

incendios.conabio.gob.mx), mientras que los del SMN se obtuvieron mediante una solicitud de información al Departamento de Monitoreo Atmosférico Ambiental. Cabe mencionar que los puntos de calor de la CONABIO provienen del procesamiento de imágenes MODIS, mientras que los del SMN se obtienen del procesamiento de imágenes GOES, AVHRR y MODIS.

Los datos de incendios forestales se obtuvieron a través de la delegación estatal de la CONAFOR en una hoja de cálculo con la siguiente información: coordenadas geográficas, municipios, causas, fechas de inicio, tipos de vegetación, superficie afectada y duración de los eventos. Un insumo importante fue el mapa Uso de suelo y vegetación de la Serie V del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2011) con escala 1:250000. Adicionalmente, gracias a un convenio existente entre la CONABIO y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se consiguieron 24 imágenes *Rapid Eye* con una resolución espacial de 5 m. La mitad de estas imágenes son del 6 de febrero y la otra mitad son del 20 de mayo de 2011. Todo el material se procesó en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS

Subsequently, the covers were reclassified into four categories: tropical forests, forests, grasslands and other covers. This resulted in a map of forest and grassland covers that served as the basis for determining the type of vegetation affected by the fires.

Rapid Eye image processing

Recent fires show a highly detectable footprint or scar with remote sensing techniques, due to the behavior of vegetation in the spectrum after a fire; according to Robinson (1991) and Pereira et al. (1999), vegetation shows a slight increase in visible response and a decrease in the near-infrared region. Depending on the combination of spectral bands, the scars acquire very characteristic shades; for example, in a false color, scars ranging from dark green to completely black can be seen. These scars are very noticeable in the time of greatest water stress of vegetation that coincides with the months of greatest damage by fires.

Fire scars were detected with Rapid Eye level 2A images indicating radiometric, geometric and terrain pre-processing (Blackbridge, 2013). The detection was done with the DETEQ methodology (detection of burnt areas in real time), developed by Brazil's National Institute for Space Research (INPE). This methodology is based on the application of the linear spectral mixing model (LSMM), segmentation of the shadow fraction image and application of an unsupervised classification (Câmara, Valeriano, & Vianei, 2006; Shimabukuro et al., 2006, 2011).

Once classified, the burnt areas were analyzed through a visual interpretation in order to remove areas not corresponding to fire scars, since the shadow fraction image also enhances the shadows and water bodies present (Figure 2). The processing was done in the open source software SPRING version 5.3 (Câmara, Souza, Freitas, & Garrido, 1996).

Debugging of CONAFOR, CONABIO and SMN databases

CONAFOR's useful data for the accuracy analysis were the geographic coordinates of the fires reported in forests and tropical forests between February 6 and May 20, 2011 in the municipalities involved. The coordinates were spatialized in shapefile point format and treated with a 1000-m buffer in order to obtain a greater spatial coincidence with respect to the reported location. These polygons were crossed with fire scars to evaluate their accuracy.

On the other hand, CONABIO and SMN hotspots located in the municipalities involved and reported between February 6 and May 20, 2011 were selected. A square buffer of 1000, 1100 and 4000 m was applied to these points to simulate the pixels of the MODIS,

9.3.1 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2009) con un sistema de proyección UTM Zona 13 Norte y Datum WGS84.

Métodos

Mapa de cubiertas forestales y pastizales

Los límites de las cubiertas, indicados en el mapa de la Serie V de INEGI, se mejoraron a través de una interpretación visual a una escala 1:50000, teniendo de fondo las imágenes *Rapid Eye* del 6 de febrero de 2011. Posteriormente, las cubiertas se reclasificaron en cuatro categorías: selvas, bosques, pastizales y otras cubiertas. De esta manera se obtuvo un mapa de cubiertas forestales y de pastizales que sirvió de base para determinar el tipo de vegetación afectada por los incendios.

Procesamiento de imágenes Rapid Eye

Los incendios ocurridos recientemente muestran una huella o cicatriz altamente detectable con técnicas de percepción remota, debido al comportamiento de la vegetación en el espectro después de un incendio; de acuerdo con Robinson (1991) y Pereira et al. (1999), la vegetación muestra un ligero aumento en la respuesta del visible y una disminución en la región del infrarrojo cercano. Dependiendo de la combinación de bandas espectrales, las cicatrices adquieren tonalidades muy características; por ejemplo, en un falso color se pueden apreciar cicatrices que van del verde oscuro hasta las completamente negras. Estas cicatrices son muy notables en la época de mayor estrés hídrico de la vegetación que coincide con los meses de mayor afectación por los incendios.

Las cicatrices de incendios se detectaron con imágenes *Rapid Eye* nivel 2A que indican un preprocesamiento radiométrico, geométrico y del terreno (Blackbridge, 2013). La detección se hizo con la metodología DETEQ (detección de áreas quemadas en tiempo real), desarrollada por el Instituto de Investigaciones en Pesquisas Espaciales (INPE) de Brasil. Esta metodología se basa en la aplicación del modelo lineal de mezcla espectral (MLME), segmentación de la imagen fracción sombra y aplicación de una clasificación no supervisada (Câmara, Valeriano, & Vianei, 2006; Shimabukuro et al., 2006, 2011).

Una vez clasificadas, las áreas quemadas se analizaron a través de una interpretación visual con el fin de remover las áreas no correspondientes a cicatrices de incendios, ya que la imagen fracción sombra también realza las sombras y los cuerpos de agua presentes (Figura 2). El procesamiento se realizó en el *software* de código abierto SPRING versión 5.3 (Câmara, Souza, Freitas, & Garrido, 1996).

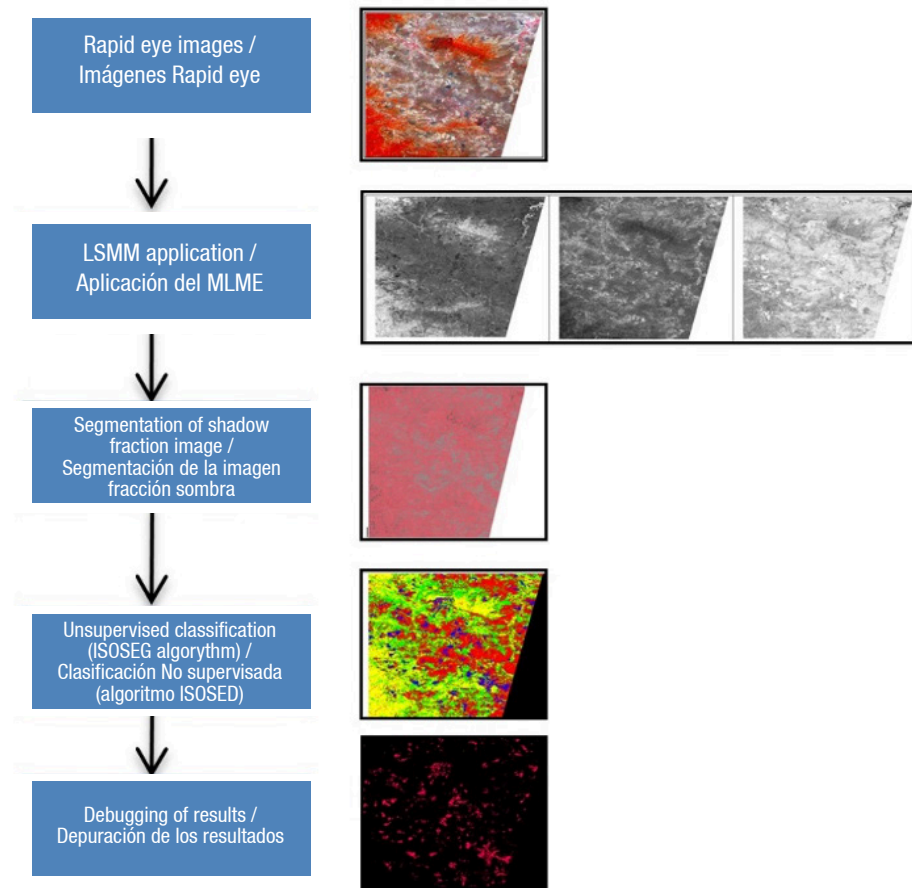


Figure 2. Methodological processes for obtaining fire scars. LSMM: Linear Spectral Mixing Model.

Figura 2. Procesos metodológicos para la obtención de cicatrices de incendios. MLME: Modelo Lineal de Mezcla Espectral.

AVHRR and GOES sensors, respectively, in order to know the number of fire scars that exist inside, and thus calculate the detection rate and perform the accuracy analysis.

Detection rate

The detection rate (T_d) is defined as the proportion of area affected by fire, identified through images. The rate was calculated with the formula $T_d = C_i/T_c$, where C_i is the total number of scars detected within a hotspot pixel and T_c is the total number of scars identified with high-resolution images. The crossing between the hotspot polygons and the scars also allowed separation by type of cover.

Thematic accuracy assessment

Sampling design

Polygons with dimensions of 1000, 1100 and 4000 m with stratified random sampling were used as the sampling unit. The choice of a suitable sample size was necessary because at the time of generating simulated pixels there was a high overlap of hotspot polygons. The sample size

Depuración de las bases de datos de CONAFOR, CONABIO y SMN

Los datos útiles de la CONAFOR para el análisis de fiabilidad fueron las coordenadas geográficas de los incendios reportados en bosques y selvas entre el 6 de febrero y el 20 de mayo de 2011 en los municipios involucrados. Las coordenadas se espacializaron en formato de puntos *shapefile* y se trataron con un *buffer* de 1000 m, para procurar una mayor coincidencia espacial con respecto a la ubicación reportada. Estos polígonos se cruzaron con las cicatrices de incendios para evaluar su fiabilidad.

Por otra parte, se seleccionaron los puntos de calor de la CONABIO y del SMN situados en los municipios involucrados y reportados entre el 6 de febrero y el 20 de mayo de 2011. A estos puntos se aplicó un *buffer* cuadrado de 1000, 1100 y 4000 m para la simulación de píxeles de los sensores MODIS, AVHRR y GOES, respectivamente, con el fin de conocer el número de cicatrices de incendios que existen en su interior, y así calcular la tasa de detección y ejecutar el análisis de fiabilidad.

(n) was calculated using the following formulae (Chuvienco, 2008; Mas et al., 2003; Stehman & Czaplewski, 1998):

$$S = t \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$$

equivalent to

$$n = \frac{t^2 p(1-p)}{s^2}$$

where,

t = 1.96 for an alpha of 0.05 (5 % probability that the true value of the map's accuracy is outside the confidence interval)

p = estimate of the map's desired accuracy

s² = sample variance.

Evaluation of data verification and analysis sites

This phase consisted of labeling the sample polygons in two categories: 0 = no hotspot and 1 = with hotspot. Data were analyzed using confusion matrices developed with the verification data (fire scars) and with the map results (hotspots and no hotspots). In this case, since there were only two categories, matrices were obtained with two columns and two lines (Table 1).

In Table 1: X₀₀ = agreements between the reference and the map for category 0, X₀₁ = data mapped as 0 actually belonging to category 1; X₁₊ = total of category 0, and X₂₊ = total of category 1, both included in the map. However, Card (1982) and Olofsson et al. (2013, 2014) propose that measures of the proportion of area derived from the confusion matrix, corrected by an estimator, should be considered. As there are errors of omission (burnt areas not detected) and commission (burnt areas that did not exist), there is an underestimation and overestimation of the categories. This information was used to adjust the confusion matrix (Table 2).

In Table 2: \hat{P}_{00} represents proportion agreements between the reference and the map for category 0; \hat{P}_{01} is the proportion of data mapped as 0 actually belonging to category 1; \hat{P}_{1+} is the total proportion of category 0 and \hat{P}_{2+} is the total proportion of category 1, both included in the map. Thus, overall accuracy (OA), omission error

Tasa de detección

La tasa de detección (Td) se define como la proporción de superficie afectada por incendios, identificada a través de imágenes. La tasa se calculó con la fórmula Td = Ci/Tc, donde Ci es el total de cicatrices detectadas al interior de un píxel de punto de calor y Tc es el total de cicatrices identificadas con las imágenes de alta resolución. El cruce entre los polígonos de puntos de calor y las cicatrices también permitió la separación por tipo de cobertura.

Evaluación de la fiabilidad temática

Diseño del muestreo

Como unidad del muestreo se utilizaron polígonos con las dimensiones de 1000, 1100 y 4000 m con tipo de muestreo aleatorio estratificado. La elección de un tamaño de muestra adecuado fue necesaria porque al momento de generar pixeles simulados existía una sobreposición alta de polígonos de puntos de calor. El tamaño de la muestra (n) se calculó utilizando las fórmulas siguientes (Chuvienco, 2008; Mas et al., 2003; Stehman & Czaplewski, 1998):

$$S = t \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$$

equivalente a

$$n = \frac{t^2 p(1-p)}{s^2}$$

donde,

t = 1.96 para un alfa de 0.05 (5 % de probabilidad de que el valor real de la fiabilidad del mapa esté fuera del intervalo de confianza)

p = estimación de la fiabilidad que se desea alcanzar en el mapa

s² = varianza de la muestra.

Evaluación de los sitios de verificación y análisis de datos

Esta fase consistió en etiquetar los polígonos de la muestra en dos categorías: 0 = sin punto de calor y 1 = con punto de calor. Los datos se analizaron

Table 1. Example of a confusion matrix for the evaluation of verification sites with two categories (0 = no hotspot and 1 = with hotspot).

Cuadro 1. Ejemplo de matriz de confusión para la evaluación de los sitios de verificación con dos categorías (0 = sin punto de calor y 1 = con punto de calor).

		Reference data / Datos de referencia		
		0	1	Sum / Suma
Map / Mapa	0	X ₀₀	X ₀₁	X ₁₊
	1	X ₁₀	X ₁₁	X ₂₊
Sum / Suma		X ₊₁	X ₊₂	

Table 2. Confusion matrix adjusted in proportion of area.
Cuadro 2. Matriz de confusión ajustada en proporción de área.

		Reference data / Datos de referencia		
		0	1	Sum / Suma
Map / Mapa	0	\hat{P}_{00}	\hat{P}_{01}	\hat{P}_{1+}
	1	\hat{P}_{10}	\hat{P}_{11}	\hat{P}_{2+}
Sum / Suma		\hat{P}_{+1}	\hat{P}_{+2}	

(E_o) and commission error (E_c) were calculated with the adjusted matrices and with the following formulae (Olofsson et al., 2013, 2014):

$$OA = \sum_{k=1}^q \hat{P}_k$$

$$E_o = \frac{\hat{P}_{+i} - \hat{P}_{ii}}{\hat{P}_{+i}}$$

$$E_c = \frac{\hat{P}_{i+} - \hat{P}_{ii}}{\hat{P}_{i+}}$$

where,

\hat{P} = unbiased estimator of the proportion of area in cell ij of the confusion matrix

\hat{P}_{i+} = marginal of column i

\hat{P}_{+i} = marginal of row i

\hat{P}_{ii} = diagonal of that column.

Measurement of confidence intervals

Confidence intervals of the omission error and commission error estimates were calculated using the following formulae (Card 1982; Olofsson et al., 2013, 2014):

$$HCI_{EC} = z \sqrt{\frac{\hat{P}_{ii}(\pi_i - \hat{P}_{ii})}{\pi_i^2 \hat{P}_{i+}}}$$

$$HCI_{EO} = z \sqrt{\hat{P}_{jj} \hat{P}_{+j}^{-4} \left[\hat{P}_{jj} \left(\sum_{i \neq j}^q \hat{P}_{ij} (\pi_i - \hat{P}_{ij}) / \hat{P}_{i+} \right) + (\pi_j - \hat{P}_{jj}) (\hat{P}_{+j} - \hat{P}_{jj})^2 / \hat{P}_{j+} \right]}$$

where,

HCI_{EC} = average confidence interval for commission error of category i

z = number of standard deviations from a normal distribution for a 95 % confidence level (z = 1.96)

HCI_{EO} = average confidence interval for the omission error for category j.

Results

Forest and grassland cover map

As a result of the adjustment made to the INEGI Series V map, it was determined that the forests cover an

mediante matrices de confusión elaboradas con los datos de verificación (cicatrices de incendios) y con los resultados del mapa (puntos de calor y sin punto de calor). En este caso, como solo hubo dos categorías se obtuvieron matrices con dos columnas y dos líneas (Cuadro 1).

En el Cuadro 1: X_{00} = acuerdos entre la referencia y el mapa para la categoría 0, X_{01} = datos cartografiados como 0 perteneciendo en realidad a la categoría 1; X_{1+} = total de la categoría 0, y X_{2+} = total de la categoría 1, ambos cartografiados en el mapa. No obstante, Card (1982) y Olofsson et al. (2013, 2014) proponen que deben considerarse las medidas de la proporción de área derivada de la matriz de confusión, corregidas por un estimador. Al existir errores de omisión (superficies quemadas no detectadas) y comisión (superficies quemadas que no existieron), hay una subestimación y sobrestimación de las categorías. Con esta información se realizó un ajuste de la matriz de confusión (Cuadro 2).

En el Cuadro 2: \hat{P}_{00} representa acuerdos de proporción entre la referencia y el mapa para la categoría 0; \hat{P}_{01} es la proporción de datos cartografiados como 0 perteneciendo en realidad a la categoría 1; \hat{P}_{1+} es la proporción total de la categoría 0 y \hat{P}_{2+} es la proporción total de la categoría 1, ambos cartografiados en el mapa. De esta manera, la fiabilidad global (FG), el error de omisión (E_o) y el error de comisión (E_c) se calcularon con las matrices ajustadas y con las fórmulas siguientes (Olofsson et al., 2013, 2014):

$$OA = \sum_{k=1}^q \hat{P}_k$$

$$E_o = \frac{\hat{P}_{+i} - \hat{P}_{ii}}{\hat{P}_{+i}}$$

$$E_c = \frac{\hat{P}_{i+} - \hat{P}_{ii}}{\hat{P}_{i+}}$$

donde,

\hat{P} = estimador insesgado de la proporción de superficie en la celda ij de la matriz de confusión

\hat{P}_{i+} = marginal de la columna i

area of 238 500 ha, the tropical forests 187 400 ha, the grasslands 139 000 ha and other covers 22 600 ha, representing 41, 32, 24 and 3 % respectively. This map is very important for calculating the detection rate, as greater accuracy is required on the scale to identify the affected covers.

Fire scar detection

The mapping resulted in a total of 2 181 scars: 1 468 in grasslands, 435 in tropical forests and 278 in forests with a burnt area of 10 836, 1 529 and 4 091 ha, respectively. The total burnt area is 16 448 ha, representing 3 % of the total study area. In the four municipalities involved, grassland was the cover with the highest number of scars and also with the largest burnt area. According to Figure 3, grasslands represent the largest number of fires in all categories analyzed, except in the category of more than 100 ha in which fires in forests stand out. An important feature was the size of the scars, since most of the 2 181 were of small magnitude; scars from 1 to 10 ha represented 82 %, scars from 10 to 50 ha represented 16.8 % and scars greater than 50 ha represented 1.2 %.

\hat{P}_{+i} = marginal de la fila i
 \hat{P}_{ii} = diagonal de dicha columna.

Medición de los intervalos de confianza

Los intervalos de confianza de las estimaciones del error de omisión y error de comisión se calcularon con las fórmulas siguientes (Card 1982; Olofsson et al., 2013, 2014):

$$HCI_{EC} = z \sqrt{\frac{\hat{P}_{ii}(\pi_i - \hat{P}_{ii})}{\pi_i^2 \hat{P}_{i+}}}$$

$$HCI_{EO} = z \sqrt{\hat{P}_{jj} \hat{P}_{+j}^{-4} \left[\hat{P}_{jj} \left(\sum_{i \neq j}^q \hat{P}_{ij} (\pi_i - \hat{P}_{ij}) / \hat{P}_{i+} \right) + (\pi_j - \hat{P}_{jj}) (\hat{P}_{+j} - \hat{P}_{jj})^2 / \hat{P}_{j+} \right]}$$

donde,

HCI_{EC} = intervalo medio de confianza para el error de comisión de la categoría i

z = número de desviaciones estándar de una distribución normal para un nivel de confianza de 95 % (z = 1.96)

HCI_{EO} = intervalo medio de confianza para el error de omisión para la categoría j.

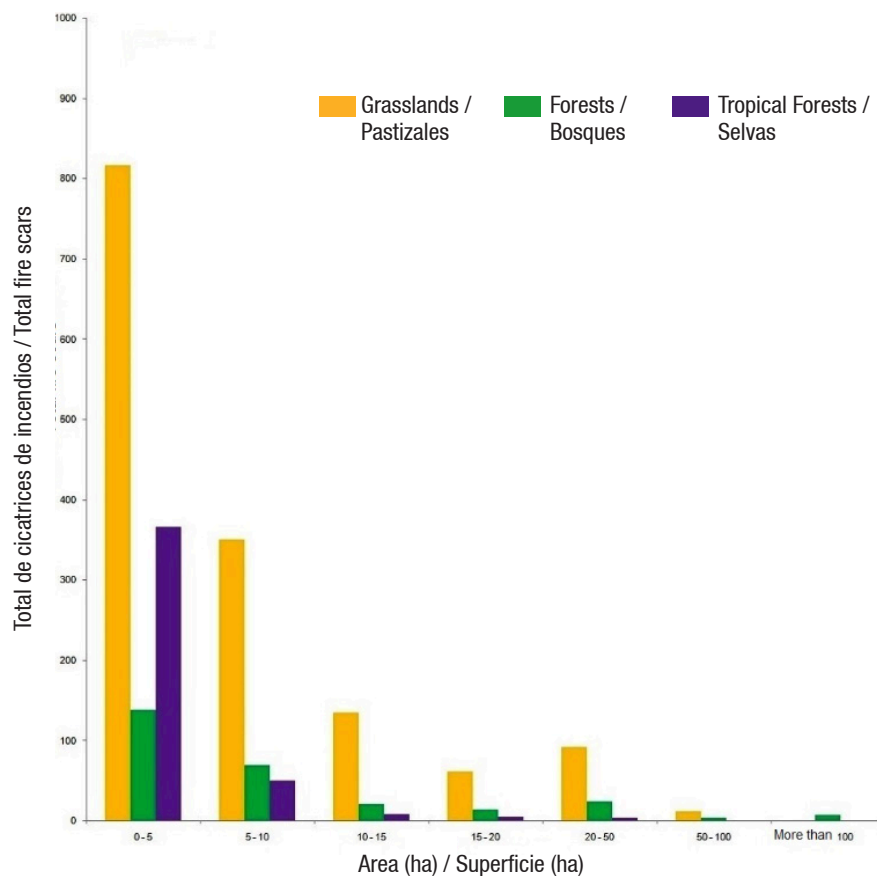


Figure 3. Magnitude of fire scars (February 6 and May 20, 2011) in four municipalities (Aquila, Aguililla, Chinicuila and Coalcomán) in the state of Michoacán, Mexico.

Figura 3. Magnitud de las cicatrices de incendios (6 de febrero y 20 de mayo del 2011) en cuatro municipios (Aquila, Aguililla, Chinicuila y Coalcomán) del estado de Michoacán, México.

Detection rate with CONABIO and SMN hotspots

The detection rate was determined from the SMN and CONABIO hotspots; 710 spots were obtained from the MODIS sensor processed by CONABIO and 166 spots from the MODIS sensor, 82 spots from the AVHRR sensor and 102 spots from the GOES sensor processed by SMN. These spots, with their respective buffer, were crossed with the 2 181 scars.

Table 3 shows that there are 1 321 scars ranging from 1 to 5 ha when the MODIS sensor detected 368, which yields a detection rate of 28 %. At the other end there are seven scars of more than 100 ha and six were detected; therefore, the detection rate was 86 %. It can be seen that the detection rate increases as the burnt area increases. Figure 4 shows the results obtained when the same procedure was performed for the hotspots of the other sensors. The fire scars were also separated by type of cover inside the simulated pixel, as seen in Figure 5.

Figure 5A represents the MODIS case processed by CONABIO. In the 15 to 20 ha category, the detection rate reached was 56, 50 and 40 % for grasslands, forests and tropical forests, respectively. In the 20 to 50 ha category, the detection rate was 48, 50 and 75 % in grasslands, forests and tropical forests, respectively. The 50 to 100 ha category achieved detection rates of 75 % in grassland and forest covers and 100 % in tropical forest ones. Finally, in the category of more than 100 ha, the detection rate was 85 % in forests.

Figure 5B represents the case of the GOES sensor. In the 20 to 50 ha category, the detection rate was 43, 50 and 75 % in grasslands, forests and tropical forests, respectively. In the 50 to 100 ha category, the detection rate was 58, 25 and 100 % in grasslands, forests and

Resultados

Mapa de cubiertas forestales y pastizales

Como resultado del ajuste realizado a la Serie V de INEGI se obtuvo que los bosques abarcan una superficie de 238 500 ha, las selvas 187 400 ha, los pastizales 139 000 ha y otras cubiertas 22 600 ha, que representan 41, 32, 24 y 3 %, respectivamente. Este mapa es muy importante para calcular la tasa de detección, ya que se requiere una mayor precisión en la escala para identificar las cubiertas afectadas.

Detección de cicatrices de incendios

El mapeo arrojó como resultado un total de 2 181 cicatrices: 1 468 en pastizales, 435 en selvas y 278 en bosques con una superficie de afectación de 10 836, 1 529 y 4 091 ha, respectivamente. El área total siniestrada es de 16 448 ha que representan 3 % del total de la superficie de estudio. En los cuatro municipios involucrados, el pastizal fue la cobertura con mayor número de cicatrices y también con la mayor superficie afectada. De acuerdo con la Figura 3, los pastizales representan la mayor cantidad de incendios en todas las categorías analizadas, excepto en la categoría de más de 100 ha en la que sobresalen los incendios en bosques. Un rasgo importante fue el tamaño de las cicatrices, ya que la mayoría de las 2 181 fueron de pequeña magnitud; las cicatrices de 1 a 10 ha representaron 82 %, las cicatrices de 10 a 50 ha representaron 16.8 % y las cicatrices mayores de 50 ha representaron 1.2 %.

Tasa de detección con puntos de calor de CONABIO y SMN

La tasa de detección se determinó a partir de los puntos de calor del SMN y de la CONABIO. Se obtuvieron 710

Table 3. Fire detection rate (February 6 and May 20, 2011) of the MODIS sensor processed by CONABIO.

Cuadro 3. Tasa de detección de incendios (6 de febrero y 20 de mayo del 2011) del del sensor MODIS procesado en la CONABIO.

Area (ha)/ Superficie (ha)	Scars detected with Rapid Eye/ Cicatrices detectadas con <i>Rapid Eye</i>	Scars detected with the MODIS* sensor/ Cicatrices detectadas con el sensor MODIS*	Detection rate/ Tasa de detección
1 – 5	1 321	368	0.28
5 – 10	470	158	0.34
10 – 15	165	62	0.38
15 – 20	81	44	0.54
20 – 50	120	59	0.49
50 – 100	17	13	0.76
>100	7	6	0.86
Total	2 181	710	

*Scars were separated by magnitude of area detected, although a MODIS pixel may include several scars.

*Las cicatrices se separaron por magnitud de superficie detectada, aunque un píxel de MODIS puede incluir varias cicatrices.

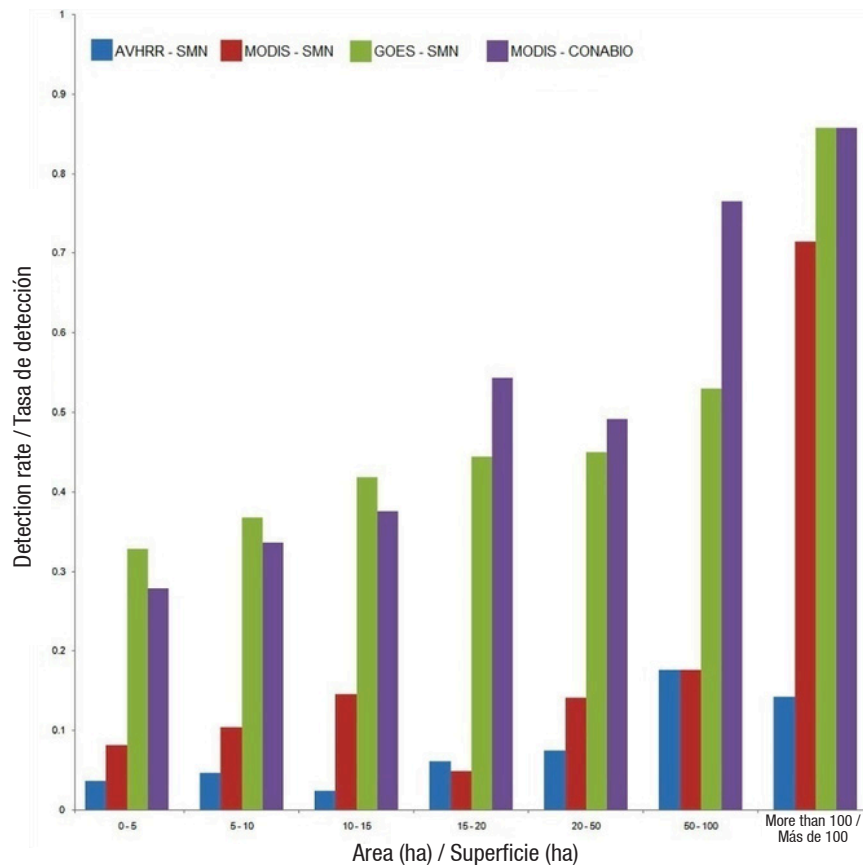


Figure 4. Scar rate detected by sensors (AVHRR, MODIS and GOES) processed by CONABIO (National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity) and SMN (National Meteorological Service).

Figura 4. Tasa de cicatrices detectadas por los sensores (AVHRR, MODIS y GOES) procesados por la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) y el SMN (Servicio Meteorológico Nacional).

tropical forests, respectively. In the category of more than 100 ha, the detection rate reached 86 % in forests. Something important to consider is the pixel size of this sensor, since scars of different magnitudes are conjugated in a 4000 m² area; therefore, it is recommended to take these data with caution.

Figure 5C shows the case of MODIS sensor data processed by SMN, which indicates very low detection rate values in all categories, except in the category of more than 100 ha, where the rate was 71 %, as it detected five of seven scars in forests. Figure 5D shows data from the AVHRR sensor, where the detection rate is very low in every category analyzed and in all three of the covers under study.

Accuracy assessment

CONAFOR fire reports

Table 4 presents the thematic accuracy analysis resulting from the crossing of CONAFOR wildfires (geographic location) versus scars in forests and tropical forests. It can be seen that the spatial location lacks accuracy, since only a forest fire coincides with a

puntos provenientes del sensor MODIS procesados en la CONABIO y 166 puntos del sensor MODIS, 82 puntos del sensor AVHRR y 102 puntos del sensor GOES procesados en el SMN. Estos puntos, con su respectivo *buffer*, se cruzaron con las 2 181 cicatrices.

En el Cuadro 3 se aprecia que existen 1321 cicatrices que van de 1 a 5 ha cuando el sensor MODIS detectó 368, lo cual arroja una tasa de detección del 28 %. En el otro extremo existen siete cicatrices de más de 100 ha y se detectaron seis; por tanto, la tasa de detección fue de 86 %. Se puede observar que la tasa de detección se eleva conforme la superficie afectada aumenta. La Figura 4 muestra los resultados obtenidos cuando se realizó el mismo procedimiento para los puntos de calor de los otros sensores. Las cicatrices de los incendios también se separaron por tipo de cubierta al interior del píxel simulado, tal como se observa en la Figura 5.

La Figura 5A representa el caso de MODIS procesado en la CONABIO. En la categoría de 15 a 20 ha, la tasa de detección alcanzada fue de 56, 50 y 40 % para pastizales, bosques y selvas, respectivamente. En la categoría de 20 a 50 ha, la tasa de detección fue de 48, 50 y 75 % en pastizales, bosques y selvas, respectivamente. La

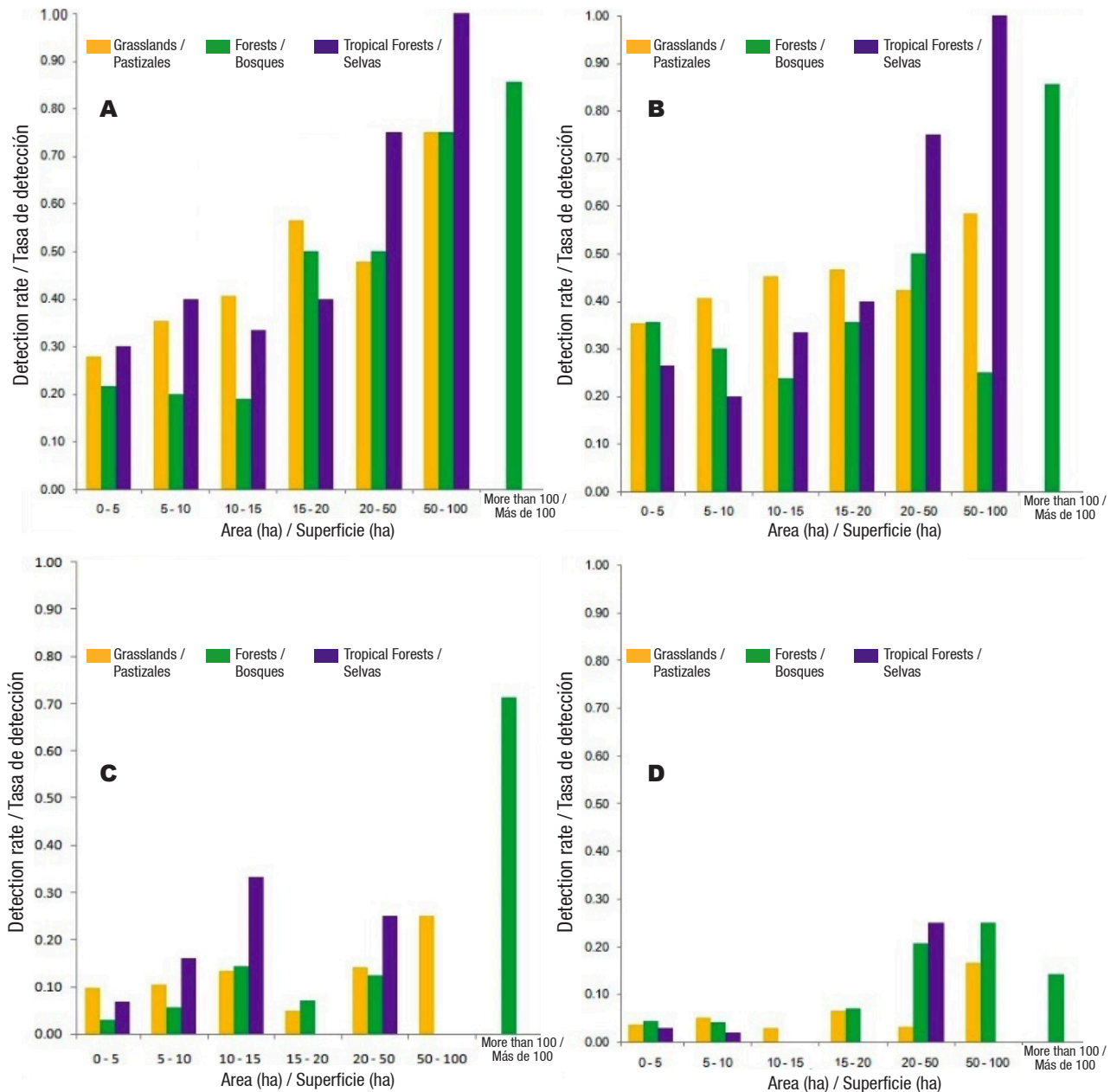


Figure 5. Comparison of the detection rates in the analyzed covers: A) MODIS sensor processed by CONABIO (National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity) and B) GOES sensor, C) MODIS sensor and D) AVHRR sensor processed by SMN (National Meteorological Service).

Figura 5. Comparación de las tasas de detección en las cubiertas analizadas: A) sensor MODIS procesado en la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) y B) sensor GOES, C) sensor MODIS y D) sensor AVHRR procesados en el SMN (Servicio Meteorológico Nacional).

scar; however, it does not mean that wildfires have not occurred, but it is not known what they are; therefore, the accuracy assessment was discarded.

CONABIO and SMN adjusted matrices

The sample size was 150 spots, expecting to achieve 70 % accuracy with an uncertainty of $\pm 5\%$:

$$n = \frac{(1.96)^2 0.7(1 - 0.7)}{(0.07333)^2} = 150$$

categoría de 50 a 100 ha alcanzó tasas de detección de 75 % en las cubiertas de pastizales y bosques y del 100 % en selvas. Finalmente, en la categoría de más de 100 ha, la tasa de detección fue de 85 % en bosques.

La Figura 5B representa el caso del sensor GOES. En la categoría de 20 a 50 ha, la tasa de detección fue de 43, 50 y 75 % en pastizales, bosques y selvas, respectivamente. En la categoría de 50 a 100 ha, la tasa de detección fue del 58, 25 y 100 % en pastizales,

This was verified with an average confidence interval of 0.06, with which the probability would be between 64 % and 76 %. The sample was divided into two categories: 75 for category 0 and 75 for category 1.

Table 5 shows the results of the matrix corrected by the proportion of the area, derived from the crossing between fire scars and a random sample of hotspots reported by CONABIO.

Overall accuracy was 72 % for the MODIS hotspots processed by CONABIO. In the case of the spots processed by SMN, accuracy was 72 % in MODIS hotspots, 66 % in AVHRR hotspots and 39 % in GOES hotspots. However, a more detailed analysis, shown in Table 6, allowed the calculation of commission and omission errors with their respective average confidence intervals.

Table 6 reports the omission and commission errors for the two categories under study, although only the results of category 1 referring to hotspots are analyzed.

The commission error for this category refers to the overestimation of hotspots in places that do not have fire scars. The highest error was presented with AVHRR sensor data with 51%; that is, for every 10 pixels of hotspots in five there are no scars. The lowest value was obtained with the GOES sensor (8 %).

bosques y selvas, respectivamente. En la categoría de más de 100 ha, la tasa de detección alcanzada fue de 86% en bosques. Algo importante que se debe considerar es la dimensión de los píxeles de este sensor, ya que en una superficie de 4000 m² se conjugan cicatrices de diferentes magnitudes, por tanto, se recomienda tomar estos datos con cautela.

La Figura 5C muestra el caso de los datos del sensor MODIS procesados en el SMN, el cual señala valores muy bajos de la tasa de detección en todas las categorías, salvo en la categoría de más de 100 ha, donde la tasa fue 71 %, ya que detectó cinco de siete cicatrices en bosques. La Figura 5D muestra datos del sensor AVHRR, donde la tasa de detección es muy baja en cualquier categoría analizada y en cualquiera de las tres cubiertas en estudio.

Evaluación de la fiabilidad

Reportes de incendios de CONAFOR

El Cuadro 4 presenta el análisis de fiabilidad temática resultante del cruce de incendios forestales (ubicación geográfica) de la CONAFOR versus las cicatrices en bosques y selvas. Se puede apreciar que la localización espacial carece de exactitud, pues solo un incendio forestal coincide con una cicatriz; sin embargo, no

Table 4. National Forestry Commission (CONAFOR) reports on wildfires of February 6 and May 20, 2011.

Cuadro 4. Reportes de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) sobre incendios forestales del 6 de febrero y 20 de mayo de 2011.

Municipality/Municipio	Reports by municipality/ Reportes por municipio	Reports that coincide with a scar/ Reportes que coinciden con alguna cicatriz	Scars in forests and tropical forests/ Cicatrices en bosques y selvas
Chinicuila	0	0	22
Aquila	0	0	359
Coalcomán	34	0	278
Aguililla	29	1	54
Total	63	1	713

Table 5. Matrix adjusted for MODIS sensor data processed by CONABIO (National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity).

Cuadro 5. Matriz ajustada para datos del sensor MODIS procesados en la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad).

		Reference (Fire scars)/Referencia (Cicatrices de incendios)			
		0	1	Total	Commission/ Comisión
Hotspots map (MODIS)/	0	0.65	0.22	0.88	0.25
Mapa de puntos de calor	1	0.05	0.06	0.12	0.47
(MODIS)	Total	0.71	0.29	1	
Overall accuracy/Fiabilidad global				0.72	
Omission/Omisión		0.08	0.78		

Table 6. Omission and commission errors with confidence intervals in the hotspot category.**Cuadro 6. Errores de omisión y comisión con intervalos de confianza en la categoría puntos de calor.**

Sensor type/Dependency/ Tipo de sensor/Dependencia	Commission error/ Error de comisión		Omission error/ Error de omisión	
	Category 0/ Categoría 0	Category 1/ Categoría 1	Category 0/ Categoría 0	Category 1/ Categoría 1
MODIS/CONABIO hotspots/Puntos de calor MODIS/CONABIO	0.25	0.47	0.08	0.78
Average confidence interval/Intervalo medio de confianza	0.05	0.03	0.01	0.02
MODIS/SMN hotspots/Puntos de calor MODIS/SMN	0.28	0.31	0.01	0.93
Average confidence interval/Intervalo medio de confianza	0.10	0.06	0.004	0.01
AVHRR/SMN hotspots/Puntos de calor AVHRR/SMN	0.33	0.51	0.01	0.97
Average confidence interval/Intervalo medio de confianza	0.12	0.10	0.004	0.009
GOES/SMN hotspots/Puntos de calor GOES/SMN	0.81	0.08	0.14	0.70
Average confidence interval/Intervalo medio de confianza	0.09	0.05	0.11	0.02

CONABIO: National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity; SMN: National Meteorological Service.

CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad; SMN: Servicio Meteorológico Nacional.

The omission error for category 1 refers to the underestimation of hotspots where there were fire scars. In this sense, the highest error was obtained with AVHRR sensor data with 97 %; that is, for every 10 hotspot pixels there are another 10 that have scars and were not reported. The AVHRR sensor is followed by the MODIS sensor data processed by SMN with 93 %, then the MODIS sensor data processed by CONABIO with 78 % and finally the GOES sensor data with 70 %. These results show that there is a high omission of fires that are not detected with images from these sensors (Figure 6).

In addition to the data analysis, confidence intervals were measured for each category and type of error. The results show very low values in all cases, indicating that the sample size was suitable for the accuracy assessment.

Discussion

The fires reported by CONAFOR lack spatial coincidence with respect to scars; of 63 fire reports there was only one match when applying a 1000-m buffer. Such results generate a confusing idea as to their location. This information is very useful, since fire, burnt area and spatial location statistics are constantly used for the generation of preventive indices and models, resource allocation, and incidence reports, among others (Ávila-Flores, Pompa-García, & Vargas-Pérez, 2010; Gutiérrez, Orozco-Hernández, Ordoñez, & Camacho, 2015; Torres-Rojo, Magaña-Torres, & Ramírez-Fuentes, 2007).

Regarding the detection rate for the simulated pixels of each sensor, the best results were obtained with the CONABIO MODIS sensor with a rate of 75 % in the 50 to 100 ha category and 86 % in areas larger than 100 ha.

significa que los incendios forestales no hayan ocurrido, sino que no se sabe cuáles son, por tanto, la evaluación de la fiabilidad quedó descartada.

Matrices ajustadas CONABIO y SMN

El tamaño de muestra fue de 150 puntos, esperando alcanzar una fiabilidad del 70 % con una incertidumbre de ± 5 %:

$$n = \frac{(1.96)^2 0.7(1 - 0.7)}{(0.07333)^2} = 150$$

Lo anterior se verificó con un intervalo medio de confianza de 0.06, con el cual la probabilidad quedaría comprendida entre 64 % y 76 %. La muestra se dividió en dos categorías: 75 para la categoría 0 y 75 para la categoría 1.

El Cuadro 5 muestra los resultados de la matriz corregida por la proporción del área, derivada del cruce entre las cicatrices de incendios y una muestra aleatoria de los puntos de calor reportados por la CONABIO.

La fiabilidad global fue de 72 % para los puntos de calor MODIS procesados en la CONABIO. En el caso de los puntos procesados por el SMN, la fiabilidad fue 72 % en puntos de calor MODIS, 66 % en puntos de calor AVHRR y 39 % en los puntos de calor GOES. No obstante, un análisis más detallado, mostrado en el Cuadro 6, permitió calcular los errores de comisión y omisión con sus respectivos intervalos medios de confianza.

El Cuadro 6 reporta los errores de omisión y comisión para las dos categorías en estudio, aunque solamente se analizan los resultados de la categoría 1 que se refiere a los puntos de calor.

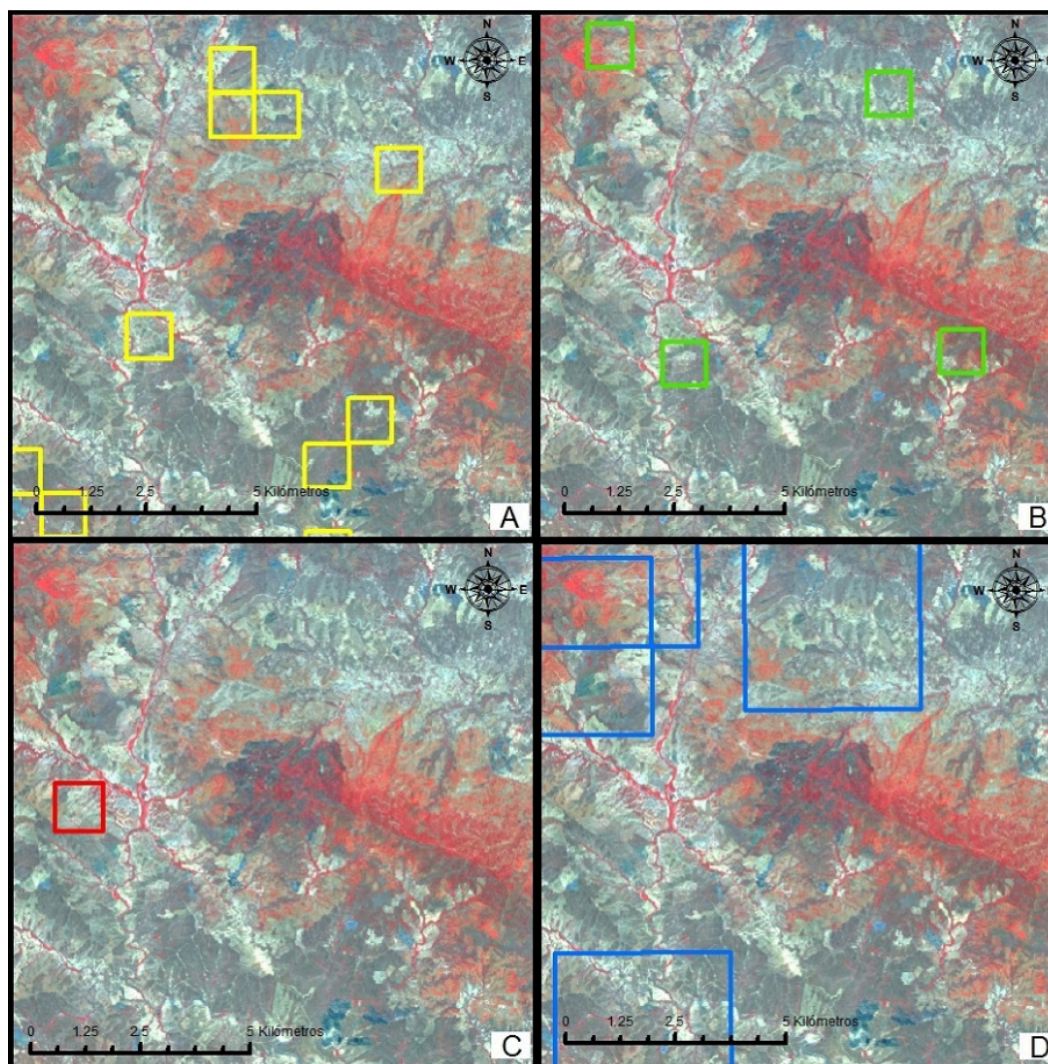


Figure 6. Commission and omission errors for the hotspots category: A) MODIS data processed by CONABIO (National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity), and B) MODIS data, C) AVHRR data and D) GOES data processed by SMN (National Meteorological Service).

Figura 6. Errores de comisión y omisión para la categoría puntos de calor: A) datos MODIS procesados en la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), y B) datos MODIS, C) datos AVHRR y D) datos GOES procesados en el SMN (Servicio Meteorológico Nacional).

These results show similarity with the findings reported by Cruz-López et al. (2011), who compared the hotspots detected with MODIS versus scars detected with ASTER images. These authors indicate that when scars cover 50 % of a MODIS pixel, the match with ASTER images is 40 %, and that when the MODIS pixel approaches 80 % of the burnt area, the match with ASTER data reaches 85 % of what was detected. In other words, these results indicate that the larger the burnt area, the greater the probability of detection.

The thematic accuracy assessment had an overall average of 62 % in the confusion matrices with the sensors used; however, the omission and commission errors for the hotspots category represented an average of 85 and 34 %, respectively. The omission error expresses an idea of underestimation of areas burnt by fires. In

El error de comisión para esta categoría se refiere a la sobrestimación de puntos de calor en lugares que no tienen cicatrices de incendios. El error más alto se presentó con los datos del sensor AVHRR con 51 %; es decir, por cada 10 píxeles de puntos de calor en cinco no existen cicatrices. El valor más bajo se obtuvo con el sensor GOES (8 %).

El error de omisión para la categoría 1 se refiere a la subestimación de los puntos de calor donde sí hubo cicatrices de incendios. En este sentido, el error más alto se obtuvo con los datos del sensor AVHRR con 97 %; es decir, por cada 10 píxeles de puntos de calor existen otros 10 que tienen cicatrices y no fueron reportados. Al sensor AVHRR le siguen los datos del sensor MODIS procesados en el SMN con 93 %, después los datos del sensor MODIS procesados por la CONABIO con

this sense, it is essential to evaluate the CONABIO and SMN hotspots, since they are widely used by several agencies. CONABIO, for example, reports about 590 users from 109 agencies, with CONAFOR, CONANP (National Commission of Protected Natural Areas) and SAGARPA (currently SADER [Secretariat of Agriculture and Rural Development]) having the highest number of requests (Cruz-López et al., 2011). Other authors have also used CONABIO hotspots to generate preventive models against wildfires (Carrillo, Rodríguez, Tchikoué, Monterroso, & Pérez, 2012; Rodríguez-Trejo, Tchikoué, Cíntora-González, Contreras-Aguado, & de la Rosa-Vázquez, 2011), characterize spatial patterns and determine the anthropogenic and environmental factors that generate the presence or absence of hotspots (Muñoz-Robles & Santana-Arias, 2018).

The high omission values reported with the sensors used for fire monitoring are a consequence of several factors, such as the size of the burnt area, the duration of the fires, the time of acquisition of the images and the weather conditions. In relation to the size, it was possible to demonstrate that the class of 1 to 10 ha accounts for 82 % of the scars detected with Rapid Eye images, which is consistent with CONAFOR fire records, which indicate that the fires smaller than 10 ha accounted for 73 % of the total for the year 2011 in Michoacán. Vilchis-Frances, Diaz-Delgado, Magaña-Lona, Ba, and Gomez-Albores (2015) indicate that fires, on average, do not exceed 4 ha in the State of Mexico, which represents 87 %. Manzo (2016) analyzed cartographic products on fires and deduced that, nationally, fires under 50 ha represent 61 % and mentioned, on the other hand, that CONAFOR's historical reports indicate that 66 % are under 5 ha. In this way, it is confirmed that the sensors analyzed here do not detect small fires.

Fire duration is another factor to consider; in Michoacán, fires last an average of 4.5 h according to the CONAFOR 2011 database. Vilchis-Frances et al. (2015) state that fires start on average between 12:00 and 15:00 hours and that 83 % last less than 5 hours in the case of the State of Mexico, and Manzo (2016) indicates that, nationally, 83 % of fires last less than 24 hours.

The satellite images used to detect hotspots come from the MODIS, AVHRR and GOES sensors, so it is important to consider the travel time of these platforms to determine whether they can detect active fires. García-Mora and Mas (2011) report that the Terra-MODIS platform is scheduled to go from north to south and cross Ecuador at 10:30 a.m. (Mexico at 9:30 a.m.), while the Aqua-MODIS platform goes from south to north and crosses Ecuador at 1:30 p.m. (Mexico at 2:30 p.m.). Vera (2005) says that the NOAA-AVHRR18 platform has a heliosynchronous orbit from north to south with a

78 % y finalmente los datos del sensor GOES con 70 %. Estos resultados muestran que existe alta omisión de incendios que no son detectados con imágenes de estos sensores (Figura 6).

Aunado al análisis de los datos se midieron los intervalos de confianza para cada categoría y tipo de error. Los resultados presentan valores muy bajos en todos los casos, lo cual indica que el tamaño de la muestra fue idóneo para la evaluación de la fiabilidad.

Discusión

Los incendios reportados por la CONAFOR carecen de coincidencia espacial con respecto a las cicatrices; de 63 reportes de incendios solo existió una coincidencia, al aplicar un *buffer* de 1 000 m. Tales resultados generan una idea confusa en cuanto a su localización. Esta información es muy útil, ya que las estadísticas de incendios, superficie afectada y ubicación espacial son utilizadas constantemente para la generación de índices y modelos preventivos, asignación de recursos, reportes de incidencia, entre otros (Ávila-Flores, Pompa-García, & Vargas-Pérez, 2010; Gutiérrez, Orozco-Hernández, Ordoñez, & Camacho, 2015; Torres-Rojo, Magaña-Torres, & Ramírez-Fuentes, 2007).

Respecto a la tasa de detección para los píxeles simulados de cada sensor, los mejores resultados se obtuvieron con el sensor MODIS de la CONABIO con una tasa de 75 % en la categoría de 50 a 100 ha y de 86 % en superficies mayores de 100 ha. Estos resultados muestran similitud con lo reportado por Cruz-López et al. (2011), quienes compararon los puntos de calor detectados con MODIS versus cicatrices detectadas con imágenes ASTER. Estos autores indican que cuando las cicatrices cubren 50 % de un píxel de MODIS, la coincidencia con imágenes ASTER es de 40 %, y que cuando el píxel de MODIS se acerca al 80 % de superficie afectada, la coincidencia con datos ASTER llega al 85 % de lo detectado. En otras palabras, estos resultados señalan que cuanto mayor es la superficie afectada mayor es la probabilidad de detección.

La evaluación de la fiabilidad temática tuvo un promedio global del 62 % en las matrices de confusión con los sensores utilizados; no obstante, los errores de omisión y comisión para la categoría puntos de calor representaron un promedio de 85 y 34 %, respectivamente. El error de omisión expresa una idea de la subestimación de las áreas afectadas por incendios. En este sentido, es indispensable evaluar los puntos de calor de la CONABIO y del SMN, ya que son utilizados ampliamente por varias dependencias. La CONABIO, por ejemplo, reporta cerca de 590 usuarios de 109 dependencias, siendo la CONAFOR, la CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) y la SAGARPA (actualmente SADER [Secretaría de

first tour through Ecuador at 7:30 a.m. and a second 12 hours later, at 7:30 p.m. AVHRR 19 crosses Ecuador twice, at 1:30 p.m. and 1:30 a.m. The GOES sensor has a geostationary orbit and monitors the national territory every 30 min; however, due to its low spatial resolution (4,000 m), it is difficult to saturate a pixel, as fires are small and short-lived.

This information allows us to deduce that the MODIS-Terra and AVHRR-18 sensors are less likely to detect hotspots or fires because of their monitoring schedule and the short duration of events.

Conclusions

Regarding the coordinates of wildfires, reported by CONAFOR, there is no good capture system. If this situation were to improve, studies that are more reliable could be made. The use of hotspots, according to detection rates, are ideal for fires exceeding 50 ha. From this perspective, it would be ideal to explore other alternatives for the detection of small active fires with images of higher spatial resolution of a public or private nature. On the other hand, the methodology used here was ideal for assessing thematic accuracy with the support of high spatial resolution images and the improvement in the scale of the cover map. Finally, this type of evaluation could serve to give certainty to the information required by a wildfire monitoring and detection program, with the objective of contributing to a more accurate determination of fire susceptibility.

Acknowledgments

The authors thank SMN staff for kindly providing hotspots in shapefile format and CONAFOR's Michoacán Forest Fire Department for access to their fire databases.

End of English version

References / Referencias

- Ávila-Flores, D. Y., Pompa-García, M., & Vargas-Pérez, E. (2010). Análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 253–260. doi: 10.5154/r.rchscfa.2009.08.028
- Blackbridge. (2013). Imágenes satelitales especificaciones técnicas. Retrieved July 1, 2018, from https://www.geosoluciones.cl/documentos/rapideye/RE_Product_Specifications_SPA.pdf
- Câmara, G., Souza, R. C. M., Freitas, U. M., & Garrido, J. (1996). SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. *Computers & Graphics*, 20(3), 395–403. doi: 10.1016/0097-8493(96)00008-8

Agricultura y Desarrollo Rural)) las de mayor número de solicitudes (Cruz-López et al., 2011). Otros autores también han utilizado puntos de calor de la CONABIO, para generar modelos preventivos contra incendios forestales (Carrillo, Rodríguez, Tchikoué, Monterroso, & Pérez, 2012; Rodríguez-Trejo, Tchikoué, Cíntora-González, Contreras-Aguado, & de la Rosa-Vázquez, 2011), caracterizar los patrones espaciales y determinar los factores antrópicos y ambientales que generan la presencia o ausencia de puntos (Muñoz-Robles & Santana-Arias, 2018).

Los valores altos de omisión reportados con los sensores utilizados para el monitoreo de incendios es consecuencia de varios factores, como el tamaño de la superficie afectada, la duración, la hora de adquisición de las imágenes y las condiciones meteorológicas. Con relación al tamaño, se pudo demostrar que la clase de 1 a 10 ha representa 82 % de las cicatrices detectadas con imágenes *Rapid Eye*. Esto concuerda con los registros de la CONAFOR, los cuales indican que los incendios menores de 10 ha representaron 73 % del total para el año 2011 en Michoacán. Vilchis-Frances, Diaz-Delgado, Magaña-Lona, Ba, y Gomez-Albores (2015) señalan que los incendios, en promedio, no superan las 4 ha en el Estado de México y representan 87 %. Manzo (2016) analizó productos cartográficos sobre incendios y dedujo que, a nivel nacional, los menores de 50 ha representan 61 % y mencionó, por otra parte, que los reportes históricos de la CONAFOR indican que 66 % son menores de 5 ha. De esta manera, se confirma que los incendios de pequeñas proporciones no son detectados por los sensores aquí analizados.

La duración de los incendios es otro factor para considerar; en Michoacán se tiene un promedio de 4.5 h de acuerdo con la base de datos de la CONAFOR 2011. Vilchis-Frances et al. (2015) plantean que los eventos inician en promedio entre las 12:00 y las 15:00 horas y que 83 % dura menos de 5 h para el caso del Estado de México, mientras que Manzo (2016) indica que, a nivel nacional, 83 % de los incendios dura menos de 24 h.

Las imágenes de satélite utilizadas para la detección de puntos de calor provienen de los sensores MODIS, AVHRR y GOES, de modo que es relevante considerar la hora de recorrido de estas plataformas, para determinar si pueden o no detectar incendios activos. García-Mora y Mas (2011) informan que la plataforma Terra-MODIS está programada para ir de norte a sur y cruzar el Ecuador a las 10:30 –México a las 9:30 horas–, mientras que la plataforma Aqua-MODIS va de sur a norte y atraviesa el Ecuador a las 13:30 horas –México a las 14:30 horas–. Vera (2005) dice que la plataforma NOAA-AVHRR18 tiene una órbita heliosincrónica de norte a sur con un primer recorrido por el Ecuador a las 7:30 horas y una segunda 12 horas después, a las 19:30 horas. El AVHRR 19 cruza

- Câmara, G., Valeriano, D., & Vianei, J. (2013). *Metodologia para o cálculo da taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal*. Brasil: INPE.
- Card, D. H. (1982). Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(3), 431–439. Retrieved from https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1982journal/mar/1982_mar_431-439.pdf
- Carrillo, G. R., Rodríguez, T. D., Tchikoué, H., Monterroso, R. A., & Pérez, S. J. (2012). Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia*, 37(9), 678–683. Retrieved from <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/01/678-RODRIGUEZ-6.pdf>
- Chuvieco, S. E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio* (3.ª ed.). Barcelona, España: Ariel Ciencias.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46. doi: 10.1016/0034-4257(91)90048-B
- Cruz-López, M. I., Saldaña L. G., Ressler, R., & Colditz, R. (2011). Sistema de alerta temprana para incendios forestales en México. In J. F. Mas (Ed.), *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio* (pp. 145–171). México: UNAM. Retrieved from http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/aplicacionesMODIS.pdf
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2009). ArcGIS Desktop (versión 9.3.1). California, Estados Unidos: Author.
- García-Mora, T. J., & Mas, J. F. (2011). Presentación del sensor MODIS. In J. F. Mas (Ed.), *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio* (pp. 11–24). México: UNAM. Retrieved from http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/aplicacionesMODIS.pdf
- Gutiérrez, M. G., Orozco-Hernández, M. E., Ordoñez, D. A., & Camacho, S. J. (2015). Régimen y distribución de los incendios forestales en el Estado de México (2000 a 2011). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 92–107. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v6n29/v6n29a7.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2011). Uso de suelo y vegetación de la Serie V del con escala 1:250000. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/temas/usuarios/>
- Manzo, D. L. de L. (2016). Incendios forestales de gran relevancia: algoritmos y sensor MODIS para su detección y monitoreo. En O. Moncada, & A. López (Eds.), *Geografía de México* (pp. 334–349). México: UNAM.
- Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J. R., & Pérez, V. A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas*, 51, 52–72. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n51/n51a5.pdf>
- Mas, J. F., Pérez-Vega, A., Ghilardi, A., Martínez, S., Loya-Carrillo, J. O., & Vega, E. (2014). A suite of tools for assessing Ecuador dos veces, a las 13:30 y a las 1:30 horas. El sensor GOES cuenta con una órbita geoestacionaria y monitorea el territorio nacional cada 30 min; sin embargo, por su baja resolución espacial (4000 m) difícilmente se podrá saturar un píxel, ya que los incendios son de pequeñas proporciones y corta duración.
- Esta información permite deducir que los sensores MODIS-Terra y el AVHRR-18 tienen menos probabilidades de detectar puntos de calor o incendios por su horario de monitoreo y la corta duración de los eventos.
- ### Conclusiones
- Respecto a las coordenadas de los incendios forestales, reportadas por CONAFOR, no existe un buen sistema de captura. Si esta situación mejorara podrían hacerse estudios más confiables. El uso de los puntos de calor, de acuerdo con las tasas de detección, son ideales para incendios que superen las 50 ha. Desde tal perspectiva, lo ideal sería explorar otras alternativas para la detección de incendios activos de pequeñas dimensiones con imágenes de mayor resolución espacial de carácter público o privado. Por otra parte, la metodología aquí empleada resultó idónea para evaluar la fiabilidad temática con el apoyo de imágenes de alta resolución espacial y de la mejora en la escala del mapa de cubiertas. Finalmente, este tipo de evaluación podría servir para dar certeza a la información requerida por un programa de monitoreo y detección de incendios forestales, con el objetivo de contribuir a una determinación más precisa de la susceptibilidad a incendios.
- ### Agradecimientos
- Al personal del SMN por proporcionar amablemente los puntos de calor en formato *shapefile* y al Departamento de Incendios Forestales de la CONAFOR Michoacán por las bases de datos de incendios.
- Fin de la versión en español**
-
- thematic map accuracy. *Geography Journal*, Article ID 372349. doi: 10.1155/2014/372349
- Muñoz-Robles, C., & Santana-Arias, R. (2018). Puntos de calor en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí: patrones espaciales y factores asociados. *Madera y Bosques*, 24(1), 1–16. doi: 10.21829/myb.2018.2411565
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–47. doi: 10.1016/j.rse.2014.02.015
- Olofsson, P., Foody, G. M., Stehman, S. V., & Woodcock, C. E. (2013). Making better use of accuracy data in land change

- studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*, 129, 122–131. doi: 10.1016/j.rse.2012.10.031
- Pereira, J. M. C., Sá, A. C. L., Sousa, A., Silva, J. M. N., Santos, T. N., & Carreiras, J. (1999). Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. In E. Chuvieco (Ed.), *Remote sensing of large wildfires: In the European Mediterranean Basin* (pp. 123–138). España: Springer.
- Robinson, J. M. (1991). Fire from space: Global fire evaluation using infrared remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 12(1), 3–24. doi: 10.1080/01431169108929628.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Tchikoué, H., Cíntora-González, C., Contreras-Aguado, R., & de la Rosa-Vázquez, A. (2011). Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia*, 45(5), 593–608. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n5/v45n5a6.pdf>
- Secretaría de Gobernación. (2014). *Incendios forestales* (3.^a ed.). México: CENAPRED. Retrieved from <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/159-FASCCULOINCENDIOSFORESTALES.PDF>
- Shimabukuro, Y. E., Duarte, V., Anderson, L. I., Valeriano, D. M., Arai, E., de Freitas, R. M., ...Moreira, M. A. (2006). Near real time detection of deforestation in the Brazilian Amazon using MODIS imagery. *Ambiente y Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 1(1), 37–47. Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/928/92810106/>
- Shimabukuro, Y. E., Santos, J. R., Rudorff, B. F. T., Arai, E., Duarte, V., & Lima, A. (2011). Detección operacional de deforestación y de áreas quemadas en tiempo casi real por medio de imágenes del sensor MODIS. In J. F. Mas (Ed.), *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio* (pp. 123–143). México: UNAM. Retrieved from http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/aplicacionesMODIS.pdf
- Stehman, S. V., & Czaplewski, R. L. (1998). Design and analysis for thematic map accuracy assessment: Fundamental principles. *Remote Sensing of Environment*, 64(3), 331–344. doi: 10.1016/S0034-4257(98)00010-8
- Torres-Rojo, J. M., Magaña-Torres, I. S., & Ramírez-Fuentes, G. A. (2007). Índice de peligro de incendios forestales de largo plazo. *Agrociencia*, 41(6), 663–674. Retrieved from <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2007/ago-sep/art-8.pdf>
- Vera, M. N. (2005). *Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la Península Ibérica*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Vilchis-Frances, A. Y., Díaz-Delgado, C., Magaña-Lona, D., Ba, K. M., & Gómez-Albores, M. A. (2015). Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas. *Agrociencia*, 49(7), 803–820. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v49n7/v49n7a8.pdf>