



Evaluación de las tasas de deforestación en Michoacán a escala detallada mediante un método híbrido de clasificación de imágenes SPOT

Assessment of deforestation rates in Michoacan at detailed scale through a hybrid classification method of SPOT images

Jean-François Mas^{1*}, Richard Lemoine-Rodríguez¹, Rafael González¹, Jairo López-Sánchez², Andrés Piña-Garduño² y Evelyn Herrera-Flores²

¹ Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Morelia, Michoacán, México.

² Universidad Nacional Autónoma de México. Escuela Nacional de Estudios Superiores. Morelia, Michoacán, México.

* Autor de correspondencia: jfmas@ciga.unam.mx

RESUMEN

En las últimas décadas, se han registrado altas tasas de deforestación en el estado de Michoacán. En el presente trabajo se puso en marcha un método de clasificación híbrido que combina procesos automatizados, análisis espacial e interpretación visual, el cual permitió generar cartografía de cubierta/uso de suelo para el estado de Michoacán, a escala 1:50 000, con un área mínima cartografiable de una hectárea para 2004, 2007 y 2014. Adicionalmente, se evaluó la fiabilidad de la cartografía generada. La evaluación del mapa para 2007 indicó que la fiabilidad global fue de 83.3%, con un intervalo de confianza de 3.1%. Las tasas de deforestación en Michoacán han disminuido (*i.e.*, 2004–2007; 0.17%, 2007–2014; 0.07%). No obstante, existen dos focos principales de deforestación donde bosques de pino y pino-encino han sido sustituidos por huertas de aguacate (centro del estado) y selvas bajas y medianas han sido transformadas en pastizales (región sierra-costa).

PALABRAS CLAVE: actualización cartográfica, cartografía de cubierta/uso de suelo, evaluación de la fiabilidad, inventarios forestales, segmentación de imagen.

ABSTRACT

In the last decades, the state of Michoacán has suffered high deforestation rates. In this work, we implemented a hybrid classification method that combines automated processing, spatial analysis and visual interpretation, which enabled us to produce land use/cover maps for Michoacán, scale 1:50 000 with a minimum mapping unit of one hectare for 2004, 2007 and 2014. Additionally, we assessed the accuracy of the elaborated cartography. Accuracy assessment of the 2007 map shows an overall accuracy of 83.3%, with a confidence interval of 3.1%. Deforestation rates have decreased in Michoacán (*i.e.*, 2004–2007; 0.17%, 2007–2014; 0.07%). However, there are two main deforestation hotspots in which pine and pine-oak forests have been replaced by avocado orchards (center part of the State) and deciduous forests have been transformed into grasslands (sierra-costa region).

KEYWORDS: accuracy assessment, forest inventories, land use/cover maps, cartographic updating, forest inventories, image segmentation.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el planeta ha sufrido un acelerado proceso de cambios de cubierta/uso del suelo (CCUS), debido principalmente a la constante expansión urbana y el establecimiento de nuevas zonas agrícolas (Grimm *et*

al., 2008). Dicho fenómeno ha impactado de forma negativa la cubierta forestal mundial (deforestación). Las regiones del planeta que exhiben mayores tasas de deforestación son los trópicos (Centro y Sur América, Sur y Sureste de Asia y África (Keenan *et al.*, 2015).

México no es la excepción a este fenómeno, pues exhibe altas tasas de CCUS. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2010), las tasas de deforestación en el país fueron de 0.5% (354 000 ha/año) en el periodo 1990–2000 y de 0.2% (155 000 ha/año) en el periodo 2005–2010. Entre las consecuencias más importantes de la pérdida de cubierta forestal destacan la disminución del potencial de bienes y servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas, el calentamiento global, la alteración de ciclos hidrológicos y biogeoquímicos y la pérdida de hábitat (Velázquez *et al.*, 2002).

Para muchas regiones del país no existe información con un nivel de detalle espacial y temporal que permita cuantificar con precisión los CCUS, ni en particular la deforestación. Sin embargo, contar con cartografía de cubierta/uso del suelo (CUS) detallada, reciente y precisa es imprescindible para la toma de decisiones sobre la gestión de los bosques. Los datos de percepción remota han sido ampliamente utilizados para elaborar cartografía de CUS (Millington y Alexander, 2000; Manakos y Braun, 2014; Camacho-Sanabria *et al.*, 2015; Thenkabil, 2015). Sin embargo, el análisis de imágenes de satélite para la elaboración de mapas de CUS y el monitoreo de los CCUS en estados como Michoacán no es una tarea fácil por varias razones: (1) existe una gran diversidad de tipos de vegetación y usos del suelo, además la vegetación puede presentar diversos estados fenológicos y diferentes niveles de degradación (lo que causa confusión espectral al clasificar la CUS), (2) el paisaje presenta un alto grado de fragmentación (compuesto por pequeños parches y fragmentos de vegetación secundaria), (3) los usos del suelo son múltiples (áreas de agricultura de temporal y bosques degradados también se emplean para la ganadería), (4) las cubiertas forestales presentan distintos grados de perturbación, lo cual dificulta definir su estado de conservación/degradación con base en información espectral y (5) el paisaje es dinámico y presenta cambios en diferentes escalas de tiempo (cambios fenológicos, quemadas, rotaciones de cultivos o cambios permanentes; Mas *et al.*, 2016). Adicionalmente, el empleo de

imágenes de baja resolución espacial no permite detectar parches de deforestación que se presentan en pequeños fragmentos (Mas y Gutiérrez, 2006).

En este artículo se describe un método híbrido de clasificación que emplea procesamiento digital e interpretación visual de imágenes, mediante el cual se generó cartografía de CUS para el estado de Michoacán a escala 1:50 000, lo que permitió detectar pequeños parches de deforestación en todo el estado. Adicionalmente, se evaluó la fiabilidad temática de la cartografía generada, con la finalidad de conocer la confiabilidad de los datos. Finalmente, se analizaron los cambios de CUS a través del periodo 2004–2014.

OBJETIVOS

Los objetivos de este estudio fueron i) definir y poner en marcha un método de clasificación que combina procesos automatizados y manuales para elaborar cartografía de CUS del estado de Michoacán a escala 1:50 000 para 2004, 2007 y 2014, ii) evaluar la fiabilidad temática de la cartografía generada mediante un método estadísticamente robusto y iii) analizar los cambios en la cubierta forestal en Michoacán durante la última década.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estado de Michoacán (Fig. 1) se ubica en la región Centro Occidente de México y tiene una superficie de aproximadamente 60 000 km². Michoacán es uno de los estados más diversos del país en cuanto a tipos de vegetación (Bocco, Mendoza y Masera, 2001). En las zonas templadas se distribuyen bosques de oyamel, pino, encino y pino-encino, mientras que en las zonas cálidas del estado se encuentran selvas caducifolias bajas y medianas. Los bosques del estado de Michoacán han experimentado importantes procesos de CCUS, de los cuales han derivado principalmente pastizales inducidos, pastizales cultivados y cultivos perennes (Bocco *et al.*, 2001; España-Boquera y Champo-Jiménez, 2016).



FIGURA 1. Ubicación geográfica del estado de Michoacán.

Materiales

Se emplearon 32 imágenes SPOT 5 multi-espectrales de 10 m de resolución con nivel de procesamiento 1B tomadas durante la estación de sequía (diciembre-marzo) de 2004, 2007 y 2014 y datos de campo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (Infys) 2004-2010 de la Comisión Nacional Forestal (Conafor). Las imágenes SPOT corresponden a la estación seca de cada año debido a que en dicha época se presenta menor nubosidad en las imágenes. Las imágenes SPOT de 2004 y 2014 fueron ajustadas espacialmente respecto a las del año base (2007) mediante correcciones geométricas, empleando una transformación polinomial y el método de re-muestreo del vecino más cercano. Los procesamientos de imágenes se llevaron a cabo en la plataforma de modelado espacial DINAMICA (Soares-Filho, Cerqueira y Pennachin, 2002), el programa de segmentación de imágenes BIS Cloud (Berkeley Image Segmentation, 2015), el Sistema de Información Geográfica QGIS (QGIS Development Team, 2015) y el ambiente para análisis estadísticos R (R Core Team, 2014; RStudio Team, 2015).

Método de clasificación

En este trabajo se desarrolló un método híbrido que combina procesamiento digital e interpretación visual para

generar mapas de diferentes fechas con base en procesos de mejora de la escala de cartografía existente, actualización y desactualización cartográfica, similar al método de clasificación interdependiente de la FAO (1996). Como primer paso, mediante la foto-interpretación de las imágenes SPOT de 2007, se generó un mapa escala 1:100 000 del estado de Michoacán en QGIS. La escala de dicho mapa no fue más detallada debido a que éste entraría posteriormente a un proceso semi-automatizado de afinación de su resolución. El sistema clasificatorio empleado fue una adaptación del sistema de las series de vegetación y uso de suelo del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi), basado en información estructural, florística y fenológica, tomando en cuenta los elementos discernibles en imágenes multi-espectrales. La cartografía utilizada estuvo compuesta por 16 categorías de CUS: agricultura de riego, agricultura de temporal, cultivo perenne, asentamientos humanos, pastizal inducido/cultivado, bosque de encino, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque mesófilo, bosque de pino-encino, selva baja caducifolia, selva mediana caducifolia, cuerpos de agua, manglar, popal-tular y áreas sin vegetación aparente. Además, se diferenciaron las categorías correspondientes a cubiertas forestales en dos clases dependiendo del estado de conservación de la vegetación (primario y secundario). Este mapa fue revisado por foto-intérpretes del Inegi y posteriormente corregido para mejorar su precisión.

Posteriormente, se detalló la escala del mapa de CUS de 2007 escala 1:100 000 obtenido mediante interpretación visual (Fig. 2a), con la finalidad de obtener un mapa escala 1:50 000. Para ello, se segmentaron las imágenes SPOT 2007 mediante la plataforma de segmentación en línea BIS Cloud, obteniendo grupos de píxeles espectralmente homogéneos, con un área mínima de una hectárea (Fig. 2b). Como siguiente paso, en QGIS se interseccionó el mapa 2007 de CUS 1:100 000 y los segmentos obtenidos con las imágenes SPOT del mismo año, asignando una categoría del mapa a cada segmento, con base en la categoría del mapa que cubriera mayor proporción de cada segmento (Fig. 2c). Posteriormente se calculó en R una función de densidad para cada categoría (Li y Racine,

2003; Hayfield y Racine, 2008), la cual indica la probabilidad para un segmento con un valor espectral específico de pertenecer a una categoría particular del mapa. Para estimar la densidad de probabilidad, se utilizó el método de estimación de Kernel propuesto por Aitchison y Aitken (1976). Este es un método de estimación de densidad de probabilidad no paramétrico que no considera ningún supuesto sobre el tipo de distribución de los datos. En este caso, permite estimar la probabilidad de que un segmento pertenezca a una categoría de CUS con base en su valor en una o varias bandas espectrales (Fig. 2d).

De esta forma, se identificaron los segmentos que presentaron una respuesta espectral que no correspondió a la categoría que recibieron del mapa (respuesta atípica). Adicionalmente, se generó en R una clasificación digital supervisada mediante un algoritmo de árbol C5 (Quinlan, 1993), el cual asigna una categoría a cada segmento con base en su respuesta espectral únicamente. Dicha categoría sirve como referencia de la confusión espectral de los segmentos que son verificados visualmente (Fig. 2e). Finalmente, se realizó la interpretación visual de los segmentos atípicos y de aquellos a los que la clasificación automatizada asignó una categoría diferente a la del mapa en QGIS. El intérprete decidió si el segmento permanecía con la categoría del mapa o representaba un cambio respecto al mapa mediante criterios de interpretación visual: textura, patrón, tamaño, forma y tonalidad de los segmentos de la imagen. De esta forma se generó el mapa de 2007 a escala 1:50 000 (Fig. 2f). En una etapa siguiente, se realizó la segmentación de las imágenes de 2004 y 2014 que permitieron desactualizar (hacia el pasado, para generar el mapa 2004) y actualizar (mapa 2014) el mapa de 2007, empleando el mismo método.

Evaluación de la fiabilidad temática y de los CCUS

Esta evaluación se enfocó en el mapa de 2007 debido a que fue el mapa base para generar los de 2004 y de 2014 y, por lo tanto, la calidad de estos últimos dependería del primero. De acuerdo con lo sugerido por Olofsson *et al.* (2014), se determinó el tamaño de la muestra con base en

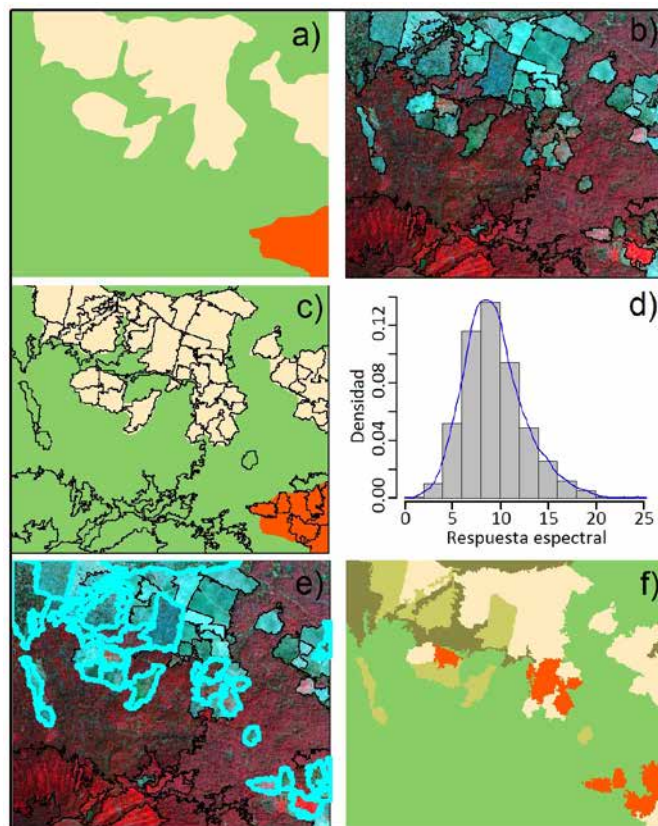


FIGURA 2. Etapas del método híbrido de clasificación: a) Mapa foto-interpretado de 2007 escala 1:100 000, b) Segmentos generados a partir de la imagen SPOT de 2007, c) Intersección entre el mapa 1:100 000 y la segmentación, d) Histograma de densidad de segmentos para la categoría bosque de pino-encino primario (banda 4), los valores de densidad menores a 0.02 corresponden a segmentos con una respuesta espectral atípica para dicha categoría, e) Se resaltan en azul los segmentos que exhiben una respuesta atípica para su categoría del mapa y f) Mapa de 2007 escala 1:50 000.

una aproximación normal, presumiendo un mapa con una fiabilidad global de 80% y un intervalo de confianza inferior a 3%. Se seleccionaron 946 sitios de verificación con base en un muestreo aleatorio estratificado. La estratificación del muestreo, utilizando las categorías del mapa, permitió escoger el número de sitios para cada categoría. Para corregir los sesgos de representación entre categorías se aplicó el método propuesto por Card (1982) y Olofsson *et al.* (2014) utilizando el complemento *AccurAssess* en QGIS



(Mas *et al.*, 2014). Este método permite evaluar el valor de varios índices de fiabilidad, así como su certidumbre (intervalo de confianza). Los índices calculados fueron: (1) la fiabilidad global (proporción del mapa correctamente clasificada), (2) la fiabilidad del usuario (relacionada con los errores de comisión de la categoría) y (3) la fiabilidad del productor (relacionada con los errores de omisión de la categoría).

Se fotointerpretó cada sitio de verificación en imágenes con resolución espacial de 2.5 m, resultado de la fusión entre la banda pancromática (2.5 m) y las bandas multi-espectrales (10 m) de SPOT y en imágenes de muy alta resolución de GoogleEarth. La categoría obtenida por foto-interpretación para cada sitio se comparó con la información del mapa escala 1:50 000 para construir una matriz de confusión. Finalmente, se realizaron salidas de campo para apoyar la interpretación de 110 sitios de verificación difíciles de interpretar en las imágenes, ubicados principalmente en áreas de selva baja caducifolia, bosque de encino y bosque mesófilo. Debido a que dichos sitios fueron clasificados en imágenes de 2007, se verificó en imágenes de 2014 que no exhibieran cambios para evitar errores debido a la fecha del trabajo de campo respecto a la del mapa evaluado. Adicionalmente, con la finalidad de realizar una segunda evaluación de la cartografía, se llevó a cabo un ejercicio de comparación con los datos de campo del Infys 2004–2010. Dicha evaluación consistió en intersectar los puntos de muestreo de campo del Infys con el mapa de 2007 y cuantificar las coincidencias (aciertos) y los errores de clasificación.

Finalmente, se realizaron estadísticas de cambio con base en la cartografía generada, enfocadas en cuantificar la deforestación en el estado de Michoacán durante la última década (área neta deforestada anualmente y tasas de deforestación). Dichas estadísticas fueron calculadas a nivel estatal y municipal para ambos periodos (2004–2007 y 2007–2014), con base en la fórmula propuesta por la FAO (1995):

$$\delta_n = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1$$

Donde:

S_1 : Superficie del mapa fecha 1

S_2 : Superficie del mapa fecha 2

n : número de años entre ambas fechas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método de híbrido de clasificación desarrollado en este trabajo permitió obtener mapas de CUS del estado de Michoacán para 2004, 2007 y 2014, a escala 1:50 000, con una unidad mínima cartografiada de una hectárea. Una vez obtenido el mapa base de 2007, generar los mapas de 2004 y 2014 requirió el trabajo de tres personas durante un periodo de tres meses. Parte de este tiempo fue dedicado a editar manualmente los mapas para corregir incongruencias en los límites entre imágenes. Lo anterior equivale aproximadamente a una semana de trabajo por escena SPOT completa o bien 0.7 minutos por kilómetro cuadrado cartografiado.

Existe una gran variedad de métodos de detección de cambios con imágenes de satélite (Hussain, Chen, Cheng, Wei y Standley, 2013). Las principales ventajas del método son: i) la segmentación de imagen permite generar objetos (segmentos) que corresponden a unidades del paisaje (fragmentos de bosques, parcelas agrícolas) y evita la obtención de píxeles aislados en la imagen clasificada (efecto sal y pimienta), ii) la detección de los cambios no se basa en la comparación de los valores espectrales entre fechas, lo cual implica el uso de imágenes de fechas similares y la aplicación de correcciones radiométricas, sino en la detección de segmentos con una respuesta espectral atípica en comparación con los demás objetos de la misma imagen y iii) el método se basa en clasificaciones interdependientes, similar al método de clasificación interdependiente propuesto por la FAO (1996), lo cual evita la creación de cambios erróneos por clasificaciones independientes y permite elaborar mapas de distintas fechas que son congruentes en el tiempo.

La verificación en campo de sitios que representaban altos niveles de confusión espectral permitió mejorar la cartografía. De los 110 sitios verificados en campo 23 presentaban errores de categoría, 12 correspondían a errores

entre primario y secundario de la misma categoría y 66 estaban correctamente clasificados. La evaluación del mapa de 2007 basada en el muestreo aleatorio estratificado indica que la fiabilidad global es de 83.3%, con un intervalo de confianza de 3.1%. Los demás índices se encuentran en la tabla 1.

La mayoría de las categorías del mapa de 2007 presentaron índices de fiabilidad satisfactorios salvo el bosque mesófilo, el bosque de oyamel secundario y el bosque

de pino secundario. Sin embargo, la mayor parte de los errores de clasificación se presentaron entre categorías cercanas (primario y secundario de un mismo tipo de bosque). Estos errores temáticos pueden deberse principalmente a la dificultad para detectar un tipo de vegetación tan fragmentado, como por ejemplo, el bosque mesófilo que se encuentra en el estado de Michoacán. En cuanto a los errores entre categorías de vegetación secundaria, estas pueden presentar respuestas espectrales muy

TABLA 1. Índices de fiabilidad del mapa de 2007.

<i>Categoría</i>	<i>Fiabilidad del usuario</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>	<i>Fiabilidad del productor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>
Agr r	0.72	0.13	0.59	0.85	0.93	0.08	0.84	1.00
Agr t	0.72	0.13	0.59	0.85	0.83	0.10	0.72	0.93
Cult P	0.93	0.07	0.86	1.00	0.97	0.04	0.93	1.00
AH	0.95	0.06	0.89	1.00	0.86	0.21	0.66	1.00
Pz	0.93	0.08	0.85	1.00	0.68	0.10	0.59	0.78
B Q	0.65	0.14	0.51	0.79	0.76	0.16	0.59	0.92
B Q sec	0.70	0.14	0.56	0.83	0.86	0.08	0.78	0.95
B A	0.86	0.10	0.76	0.96	0.78	0.32	0.46	1.00
B A sec	0.56	0.15	0.41	0.71	0.07	0.11	0.00	0.18
B P	0.81	0.12	0.70	0.93	0.78	0.14	0.64	0.92
B P sec	0.51	0.15	0.36	0.66	0.79	0.22	0.57	1.00
B M	0.35	0.14	0.21	0.49	1.00	0.00	1.00	1.00
B M sec	0.33	0.38	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00
B PQ	0.91	0.09	0.82	0.99	0.83	0.08	0.75	0.92
B PQ sec	0.65	0.14	0.51	0.79	0.91	0.08	0.82	0.99
SBC	0.91	0.08	0.82	0.99	0.92	0.04	0.87	0.96
SBC sec	1.00	0.00	1.00	1.00	0.86	0.09	0.77	0.95
SMC	0.79	0.12	0.67	0.91	0.46	0.17	0.29	0.63
SMC sec	0.64	0.14	0.50	0.79	0.88	0.15	0.73	1.00
Agua	0.88	0.10	0.79	0.98	0.83	0.24	0.59	1.00
Manglar	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
PT	0.74	0.13	0.61	0.87	0.77	0.32	0.45	1.00
SVA	0.84	0.11	0.73	0.95	0.26	0.37	0.00	0.63

Agr r=Agricultura de riego, Agr t=Agricultura de temporal, Cult P=Cultivo perenne, AH=Asentamientos humanos, Pz=Pastizal, B=Bosque; Q=Encino, A=Oyamel, P=Pino, M=mesófilo, PQ=Pino-encino, sec=Secundario, SBC=Selva baja caducifolia, SMC=Selva mediana caducifolia, PT=Popal-tular y SVA=Sin vegetación aparente.



similares y ser difíciles de diferenciar incluso en las imágenes de alta resolución. Debido a lo anterior, la cartografía elaborada permite un monitoreo fiable de la deforestación, pero no de la degradación forestal.

De acuerdo con la comparación con datos del Infys, las categorías de CUS coinciden en la mayoría de sitios (> 72% del total de puntos). Parte de la incongruencia existente podría atribuirse a diferencias de temporalidad entre los datos de campo y el mapa aquí generado, ya que los datos del Infys corresponden a levantamientos en el periodo 2004–2010 y este mapa está basado en imágenes de 2007. A pesar de que los datos de campo del Infys incluyen información detallada sobre las comunidades forestales, sus datos no presentan información respecto a otros tipos de cubiertas y usos del suelo. Además, los sitios de muestreo fueron seleccionados mediante una estratificación basada en el mapa de uso del suelo y vegetación del Inegi y no en el mapa aquí generado, por lo que este último ejercicio de comparación con la cartografía generada en el presente trabajo no permite corregir el sesgo relacionado con el muestreo (Card, 1982) para calcular los índices de fiabilidad temática.

Evaluación de los cambios en la cubierta forestal

Los mapas elaborados para 2004, 2007 y 2014 permitieron realizar un seguimiento detallado de las ganancias y pérdidas de la superficie boscosa en el estado de Michoacán. En la última década, la superficie cubierta tanto por bosques tropicales como templados en Michoacán ha disminuido de forma constante (Tabla 2).

TABLA 2. Superficie de cada tipo de bosque para el estado de Michoacán.

<i>Comunidad forestal</i>	<i>2004 (ha)</i>	<i>2007 (ha)</i>	<i>2014 (ha)</i>
Bosques templados	1 794 700	1 786 243	1 775 087
Bosques tropicales	2 114 855	2 105 246	2 096 208

Durante el periodo 2004-2007 (Fig. 3), se perdieron en promedio 6600 ha de bosque por año. Esta tasa de deforestación disminuyó a alrededor de 3000 ha anuales durante el periodo siguiente (2007-2014; Tabla 3). La deforestación se presentó en pequeños parches, con superficie media de 2.7 ha; Fig. 4).

La deforestación en Michoacán durante el periodo de estudio se ha concentrado principalmente en la región sierra-costa y en el centro del estado (zona aguacatera). También se observaron procesos de recuperación de la cubierta forestal en varias regiones del estado, aunque estos procesos de ganancia son menores que los de pérdida. En particular, se detectaron numerosos parches de pérdida de bosques templados en los municipios de Taretan, Uruapan y Ziracuaretiro, en los cuales ahora están establecidas huertas de aguacate (Fig. 5; Tabla 4). Durante el periodo 2004-2007, se observaron importantes procesos de deforestación de bosques tropicales en Aquila y Chinicuila, relacionados con el establecimiento de pastizales (Fig. 4; Tabla 4). La mayor proporción de los municipios del estado presentan pérdida forestal durante ambos periodos (2004-2007 y 2007-2014). Sin embargo, la superficie deforestada es menor en el segundo periodo (Fig. 5 y 6).

TABLA 3. Ganancia, pérdida y tasa de deforestación en Michoacán por tipo de bosque.

<i>Comunidad forestal</i>	<i>Periodo 2004–2007</i>			<i>Periodo 2007–2014</i>		
	<i>Ganancia neta (ha)</i>	<i>Pérdida neta (ha)</i>	<i>Tasa de deforestación anual (%)</i>	<i>Ganancia neta (ha)</i>	<i>Pérdida neta (ha)</i>	<i>Tasa de deforestación anual (%)</i>
Bosques templados	1 004	8 443	0.16	1 144	11 156	0.09
Bosques tropicales	1 976	11 326	0.18	1 947	9 047	0.06
Total	2 980	19 769	0.17	3 091	20 203	0.07

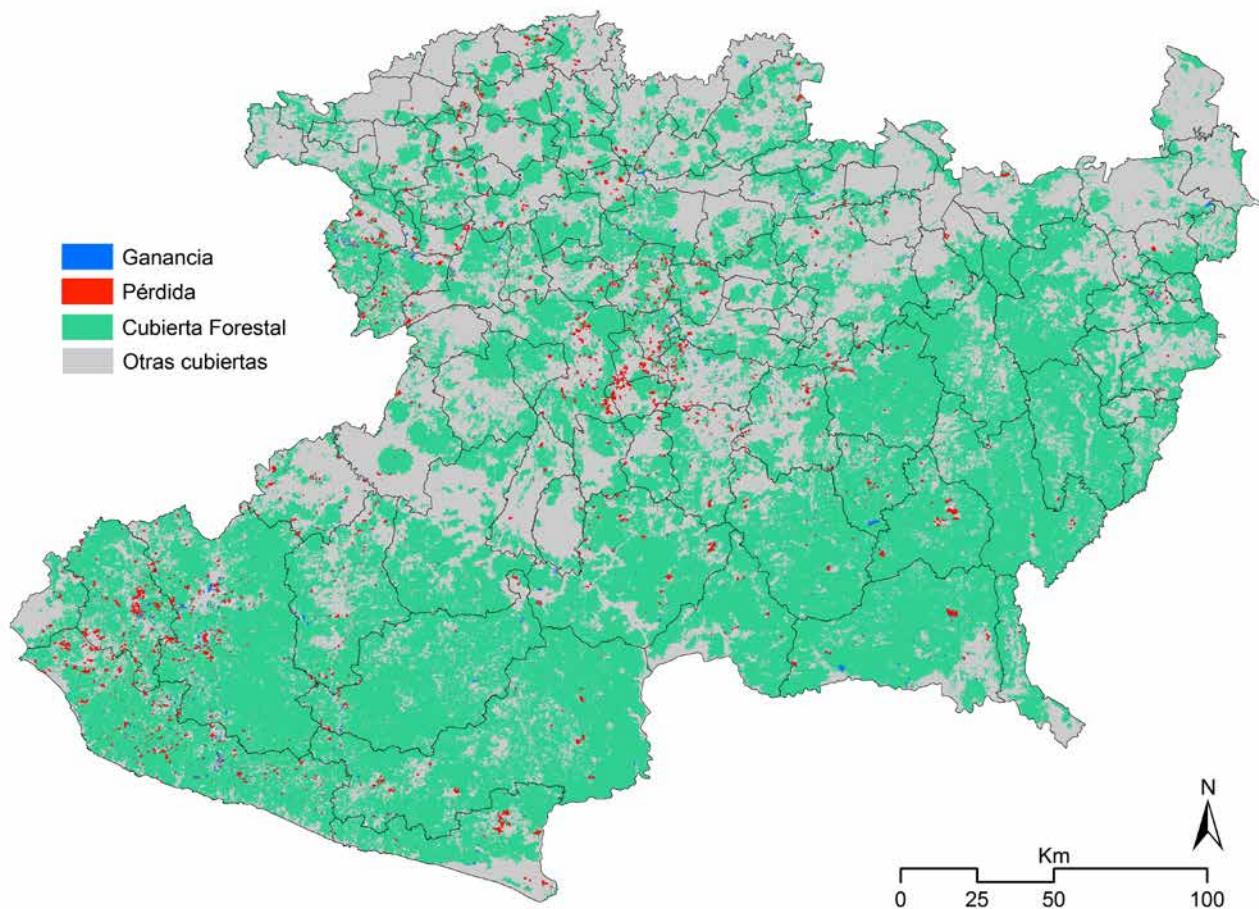


FIGURA 3. Áreas de pérdida (rojo) y ganancia forestal (azul) durante el periodo 2004-2007 en el estado de Michoacán. Las áreas forestales y no forestales en 2004 están representadas en verde y gris respectivamente.

Las tasas de deforestación que se identificaron son inferiores a las encontradas con base en cartografía a escala 1:250 000 para periodos anteriores. Por ejemplo, Bocco *et al.* (2001) encontraron tasas de deforestación de 1.8% y 1% por año para bosques templados y tropicales respectivamente durante el periodo 1976-1993. Mas, Velásquez-Montes y Fernández-Vargas (2005) identificaron tasas de 0.47% y 0.65% por año durante el periodo 1976-2000. La tendencia a la baja de las tasas de deforestación ha continuado durante la última década (Rosete-Vergés *et al.*, 2014). En general, la disminución de las tasas de deforestación en Michoacán y en México pueden deberse a la puesta en marcha de distintos programas;

como Pro-arból o pago por servicios ambientales, en el cual, según la FAO (2015), México ocupa el tercer lugar mundial. Además, en las últimas décadas han ocurrido intensos procesos de abandono del campo en México y de migración a zonas urbanas (Programa de la Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos, 2011), lo que también puede haber fomentado la disminución de las tasas de deforestación.

CONCLUSIONES

El método de clasificación desarrollado permitió generar en un tiempo razonable cartografía de CCUS detallada (escala 1:50 000) para el estado de Michoacán y detectar

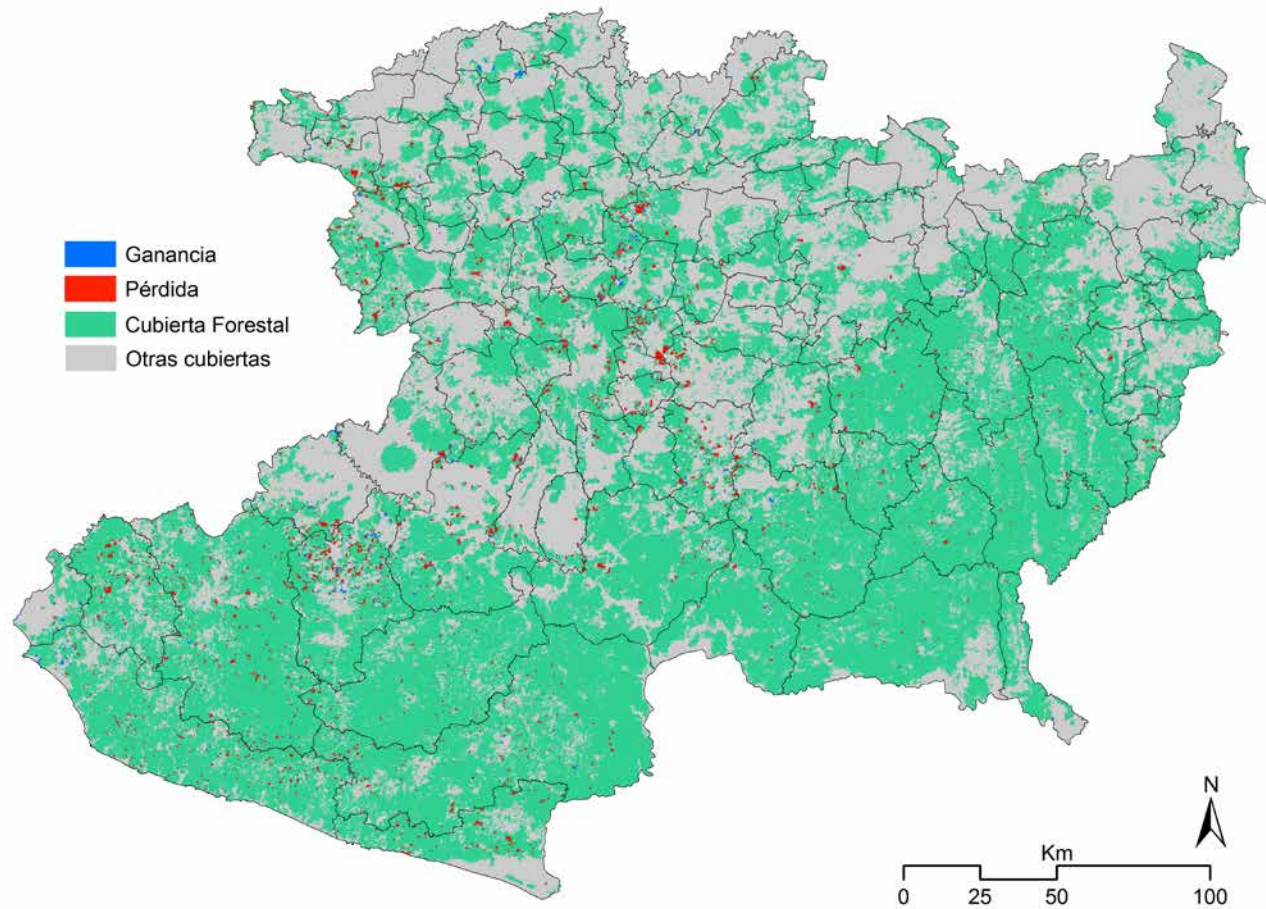


FIGURA 4. Áreas de pérdida (rojo) y ganancia forestal (azul) durante el periodo 2007-2014 en el estado de Michoacán. Las áreas forestales y no forestales en 2007 están representadas en verde y gris respectivamente.

la deforestación, con un nivel de fiabilidad aceptable. Lo anterior fue posible debido a que dicho método se beneficia de las virtudes de los procesamientos automatizados (generar grandes cantidades de datos en poco tiempo) y retoma la fortaleza de los métodos cartográficos tradicionales (interpretación visual de las imágenes). De modo que se obtuvieron polígonos de CUS de forma automática y todos los cambios que presenta la cartografía aquí generada fueron supervisados visualmente. En trabajos futuros, se integrará información bioclimática para afinar este sistema, ya que existe una fuerte relación entre patrones climáticos y de vegetación (Gopar-Merino, Velázquez y de Azcárate, 2015). Además, el método de

clasificación interdependiente permitió obtener mapas congruentes entre las distintas fechas. Se monitoreó la deforestación a escala espacial y temporal detallada, detectando pequeños parches de deforestación que no hubieran sido detectados mediante otros métodos o insumos. Se puede también recalcar que todos los procesamientos se llevaron a cabo con programas de código abierto (R, QGIS) y de acceso libre (DINAMICA), a excepción de la segmentación de imágenes. Sin embargo, este último proceso podría realizarse con programas de código abierto como SPRING (Câmara, Souza, Freitas y Garrido, 1996), lo cual vuelve todo el método totalmente reproducible.

TABLA 4. Municipios con mayor pérdida y ganancia forestal en el periodo 2004–2014.

<i>Bosques tropicales</i>				<i>Bosques templados</i>			
Municipio	Ganancia neta (ha)	Municipio	Pérdida neta (ha)	Municipio	Ganancia neta (ha)	Municipio	Pérdida neta (ha)
Tanhuato	182	Aguila	2 718	Puruandiro	23	Coalcoman	2 176
Maravatio	75	Chinicuila	2 137	Marcos Castellanos	20	Uruapan	2 007
Chucandiro	34	Lázaro Cárdenas	1 403	Caracuario	20	Ario	1 091
Zacapu	21	Arteaga	1 204	Coahuayana	17	Tingambato	899
Copandaro	20	Coalcoman	1 176	Jacona	14	Salvador Escalante	752
Chilchota	18	La Huacana	1 132	La Piedad	13	Cotija	740
Tlalpujahuá	17	Apatzingan	932	Angangueo	5	Taretan	723
Jose Sixto Verduzco	15	Caracuario	849	Jiménez	4	Ziracuaretiro	672
Jacona	9	Tepalcatepec	779	Cojumatlan	4	Aguililla	660
Angamacutiro	6	Aguililla	690	Huaniqueo	2	Chinicuila	660

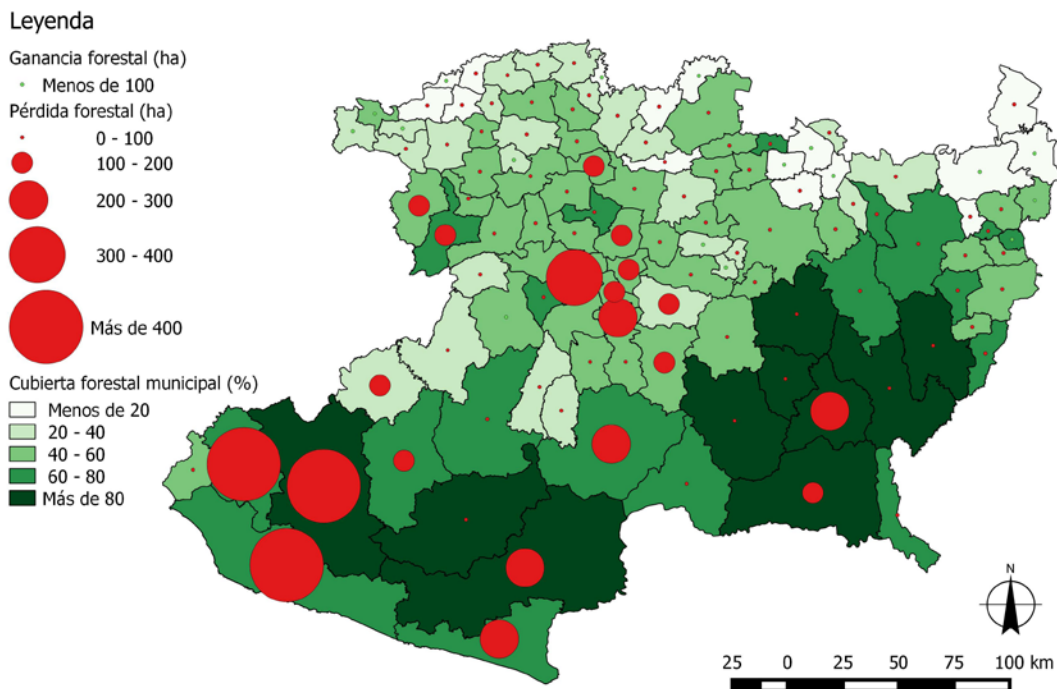


FIGURA 5. Áreas de pérdida (círculos rojos) y ganancia (círculos verdes) forestal por municipio (2004–2007) en hectáreas por año en el estado de Michoacán.

El fondo en tonos de verde indica la proporción (%) del municipio con cubierta forestal en 2004.

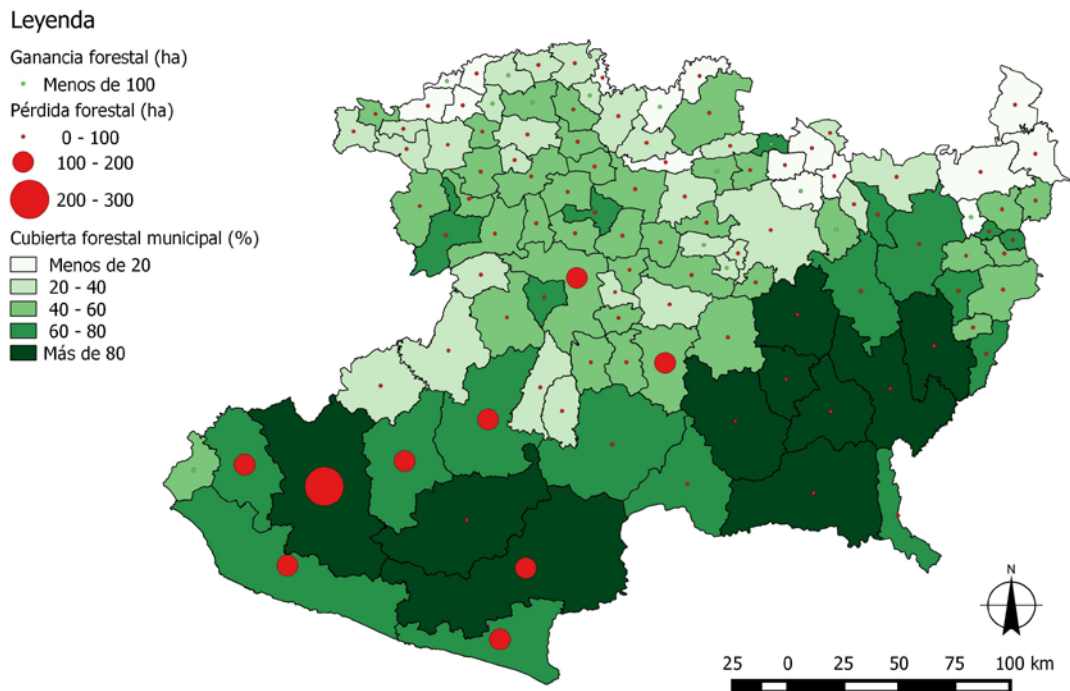


FIGURA 6. Áreas de pérdida (círculos rojos) y ganancia (círculos verdes) forestal por municipio (2007–2014) en hectáreas por año en el estado de Michoacán.

El fondo en tonos de verde indica la proporción (%) del municipio con cubierta forestal en 2007.

Aunque la tasa de deforestación en el estado de Michoacán disminuyó en la última década, es necesario continuar monitoreando los cambios en la cubierta forestal, con particular énfasis en los focos de deforestación identificados en este estudio. Contar con insumos con este nivel de detalle puede ser de gran utilidad para generar planes de ordenamiento y conservación forestal tanto a nivel regional como local. El método propuesto permite también llevar a cabo un monitoreo continuo y detallado de las cubiertas y usos del suelo para evaluar el efecto de políticas de conservación forestal ambientales.

RECONOCIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el proyecto “Monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el Estado de Michoacán: un análisis de cambios mediante sensores remotos a escala regional” (Fondo Mixto Conacyt-Gobierno del Estado de Michoacán, clave 192429). Las

imágenes SPOT fueron obtenidas mediante el convenio ERMEXS-UNAM. También agradecemos a los expertos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) por la revisión de la cartografía aquí generada.

REFERENCIAS

- Aitchison, J. y Aitken, C. G. G. (1976). Multivariate binary discrimination by the kernel method. *Biometrika*, 63(3), 413-420. doi: 10.1093/biomet/63.3.413
- Berkeley Image Segmentation. (2015). BIS Cloud. Disponible en línea: <http://www.imageseg.com>
- Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 44, 18-38.
- Camacho-Sanabria, J. M., Pérez, J., Isabel, J., Pineda-Jaimes, N. B., Cadena-Vargas, E. G., Bravo-Peña, L. C. y Sánchez, M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una

- porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, 21(1), 93-112. doi: 10.21829/myb.2015.211435
- Câmara, G., Souza, R. C. M., Freitas, U. M. y Garrido, J. (1996). SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers and Graphics*, 20(3), 395-403. doi: 10.1016/0097-8493(96)00008-8
- Card, D. H. (1982). Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 48(3), 431-439. Recuperado de https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1982journal/mar/1982_mar_431-439.pdf
- España-Boquera, M. L. y Champo-Jiménez, O. (2016). Proceso de deforestación en el municipio de Cherán, Michoacán, México, (2006-2012). *Madera y Bosques*, 22(1), 141-153. doi: 10.21829/myb.2016.221482
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (1995). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 1990* (Informe Principal). Roma, Italia: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (1996). *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. FAO Forestry Papers. Roma, Italia: FAO
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010* (Informe Principal 163). Roma, Italia: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2015). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015. Compendio de datos*. Roma, Italia: FAO.
- Gopar-Merino, L. F., Velázquez, A. y de Azcárate, J. G. (2015). Bioclimatic mapping as a new method to assess effects of climatic change. *Ecosphere*, 6(1), 1-12. doi: 10.1890/ES14-00138.1
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X. y Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756-760. doi: 10.1126/science.1150195
- Hayfield, T. y Racine, J. S. (2008). Nonparametric Econometrics: The np Package. *Journal of Statistical Software*, 27(5). doi: 10.18637/jss.v027.i05
- Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H. y Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80, 91-106. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006
- Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Granger, A. y Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9-20. doi: 10.1016/j.foreco.2015.06.014
- Li, Q. y Racine, J. S. (2003). Nonparametric estimation of distributions with categorical and continuous data. *Journal of Multivariate Analysis*, 18, 69-100. doi: 10.1016/S0047-259X(02)00025-8
- Manakos, I. y Braun, M. (2014). *Land use and land cover mapping in Europe*. Holanda: Springer. doi: 0.1007/978-94-007-7969-3.
- Mas, J.-F., Velázquez-Montes, A. y Fernández-Vargas, T. (2005). Monitoreo de los cambios de cobertura del suelo en Michoacán. En L.E. Villaseñor G. *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado* (204-206). Morelia, Mich. :Conabio.
- Mas, J.-F. y Gutiérrez, I. G. (2006). Evaluación de Imágenes MODIS para el monitoreo de la deforestación en México/ Evaluation of modis images to monitor deforestation in Mexico. *Ambiência*, 2(3), 19-27. Recuperado de <http://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/254/330>
- Mas, J.-F., Pérez-Vega, A., Ghilardi, A., Martínez, S., Loya-Carrillo, J. O. y Vega, E. (2014). A Suite of Tools for Assessing Thematic Map Accuracy. *Geography Journal*, 2014, 10. doi: 10.1155/2014/372349
- Mas, J.-F., Couturier, S., Paneque-Gálvez, J., Skutsch, M., Pérez-Vega, A., Castillo-Santiago, M. A. y Bocco, G. (2016). Comment on Gebhardt et al. MAD-MEX: automatic wall-to-wall land cover monitoring for the Mexican REDD-MRV Program using all Landsat data. *Remote Sens.* 2014, 6, 3923-3943. *Remote Sensing*, 8(7), 533. doi: 10.3390/rs6053923



- Millington, A. C. y Alexander, R. W. (2000). Vegetation mapping in the last three decades of the twentieth century. En R. Alexander y A. C. Millington. *Vegetation Mapping*, (321-331). Chochester, England: John Wiley & Sons.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E. y Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. doi: 10.1016/j.rse.2014.02.015
- Programa de la Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. (2011). *El estado de las ciudades de México 2011*. México: Programa de la Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos.
- QGIS Development Team. (2015). *QGIS Geographic Information System* [Software de cómputo]. Recuperado de <http://www.qgis.org/>
- Quinlan, R. (1993). *C4.5: Programs for machine learning*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- R Core Team. (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Soares-Filho, B. S., Cerqueira, G. C. y Pennachin, C. L. (2002). Dinamica - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3), 217-235. doi: 10.1016/S0304-3800(02)00059-5
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E. y Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, 20, 21-35. doi: 10.21829/myb.2014.201173
- RStudio Team. (2015). *RStudio: Integrated Development for R*. Boston, MA: RStudio, Inc. Recuperado de <http://www.rstudio.com/>.
- Thenkabail, P. S. (2015). *Remotely sensed data characterization, classification, and accuracies*. Florida, EUA: CRC Press.
- Velázquez, A., Mas, J.-F., Mayorga-Saucedo, R., Díaz, J. R., Alcántara, C., Castro, R., Fernández, T., Palacio, J. L., Bocco, G., Gómez-Rodríguez, G., Luna-González, L., Trejo, I., López-García, J., Palma, M., Peralta, A., Prado-Molina, J. y González-Medrano, F. (2002). Estado actual y dinámica de los recursos forestales de México, *Biodiversitas*, 41, 8-15. Recuperado de <http://www.biodiversidad.gob.mx/Biodiversitas/Articulos/biodiv41art2.pdf>

Manuscrito recibido el 8 de diciembre de 2016.

Aceptado el 24 de abril de 2017.

Este documento se debe citar como:

Mas, J.-F., Lemoine-Rodríguez, R., González, R., López-Sánchez, J., Piña-Garduño, A. y Herrera-Flores, E. (2017). Evaluación de las tasas de deforestación en Michoacán a escala detallada mediante un método híbrido de clasificación de imágenes SPOT. *Madera y Bosques*, 23(2), **-**. doi: 10.21829/myb.2017.2321472