



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional De Estudios Superiores,
Unidad Morelia

Evaluación de la fiabilidad temática de
cartografía de cubierta/uso de suelo del estado
de Michoacán

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

Licenciado en Ciencias Ambientales

P R E S E N T A

ANDRÉS PIÑA GARDUÑO

TUTORES:

Dr. Jean François Mas Causel

Mtro. Richard Lemoine Rodríguez

MORELIA, MICHOACÁN

ENERO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 07** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **21 de junio del 2017**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Andrés Piña Garduño** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **309295387**, con el trabajo titulado: "Evaluación de la fiabilidad temática de cartografía de cubierta/uso de suelo del estado de Michoacán" bajo la dirección como **tutor** del **Dr. Jean Francois Mas Causse** y como **co-tutor** del **M. G. Richard Lemoine Rodríguez**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dr. Adrián Ghilardi
Vocal: Dr. Gerardo Hernández Cendejas
Secretario: Jean Francois Mas Causse
Suplente: Dr. Iván Franch Pardo
Suplente: M. G. Gabriela Cuevas García

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 25 de enero del 2018.



DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ
SECRETARIO GENERAL

CAMPUS MORELIA

Apartado Postal 27-3 (Santa Ma. De Guido), 58090, Morelia, Michoacán
Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3502 y (55)56.23.73.02, Extensión Red UNAM: 80503
www.enesmorelia.unam.mx

A MIS PADRES Y HERMANOS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad y al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental por la formación durante la licenciatura en Ciencias Ambientales. Sobre todo, a los profesores e investigadores que son pilares de estas instituciones al compartir sus experiencias y conocimientos dentro y fuera del aula, conmigo y cada uno de mis compañeros que han recorrido este camino.

Agradezco a mis asesores Dr. Jean François Mas y M.G. Richard Lemoine por su paciencia apoyo y guía intelectual.

A mis sinodales, M.G. Gabriela Cuevas, Dr. Adrián Ghilardi, Dr. Gerardo Hernández y al Dr. Iván Franch por revisar, comentar y apresurar este proceso.

A la Escuela Nacional de Estudios superiores unidad Morelia que, junto al personal administrativo, brindaron todo el apoyo en los trámites realizados en especial a Alejandro Rebollar y Agustín Martínez.

Al Programa Nacional de Becas y Financiamiento (PRONABES) y al Programa de vinculación con los egresados de la UNAM por los apoyos económicos que me fueron otorgados durante y al termino de mis estudios. De igual manera agradecer el financiamiento de este trabajo de investigación a los proyectos “Monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el estado de Michoacán: un análisis de cambios mediante sensores remotos a escala regional” (FOMIX CONACYT MICH-2012-C03-192429), ¿Puede la modelación espacial ayudarnos a entender los procesos de cambio de cobertura/uso del suelo y de degradación ambiental?” (SEP-CONACYT 178816) y FOREST2020-ECOSUR.

A la Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM) por compartir información y bases de datos que enriquecieron este trabajo.

Por último y no menos importante a la Universidad Nacional Autónoma de México y el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Naucalpan que han sido partes importantes en mi desarrollo profesional.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mis padres (Andrés y Ana) y hermana (Ceci) por el apoyo en cada momento de mi vida. Gracias por su esfuerzo para culminar mis estudios.

A Diego, amigo y hermano por hacer que la estancia en Morelia sea más familiar como de costumbre.

A Brenda Amairani por la buena compañía, amistad, apoyo y cariño antes y durante esta etapa de formación.

A mis amigos y compañeros en el camino de las Ciencias Ambientales, por las experiencias y conocimiento compartido. En especial a Saulo, Néstor, Marco, Luis, Vanessa, Mariana y Donovan.

Al amigo, asesor y maestro Richard Lemoine, por el apoyo en la elaboración de este trabajo y sus consejos en la ruta laboral, personal y académica.

A Jean François, Ernesto Vega, Alejandro Casas y Alicia Castillo por el apoyo que me han dado dentro y fuera del aula.

A los compañeros y amigos del sector 7, principalmente a los que apoyaron en este proyecto Jairo, Rafa y Evelyn.

A Alfredo Fuentes por ser, profesor, amigo y padrino en este viaje.

Finalmente, a todas las personas que he conocido durante esta etapa como estudiante, egresado y tesista que de alguna manera han enriquecido este camino con conocimientos y experiencias.

Resumen

Los mapas de cubierta/uso de suelo (CUS) representan herramientas importantes en la toma de decisiones y gestión forestal. Dichos mapas deben ser sometidos a una evaluación de fiabilidad temática, con la finalidad de conocer la calidad de sus datos. En este trabajo se realizó la evaluación de fiabilidad temática de la cartografía del estado de Michoacán elaborada por Mas *et al.* (2016), con base en un muestreo estadísticamente robusto. Complementariamente, el mapa se comparó con datos de campo correspondientes a cubiertas forestales de la Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM). La evaluación del mapa indica una fiabilidad global de 83.3%, con un intervalo de confianza de 3.1%. La comparación del mapa con puntos de campo mostró coincidencias del 64% en Selvas y 79% en bosques. Por otro lado, existen incongruencias principalmente entre categorías primaria y secundaria de los mismos tipos de vegetación. Dichas incongruencias pueden, en parte, explicarse por problemas de geometría, unidad mínima cartografiable, fragmentación del paisaje y ambigüedad de las categorías empleadas. Posteriormente se realizó una evaluación cuantitativa de fiabilidad de los cambios de cubierta uso del suelo (CCUS), con la finalidad de identificar y cuantificar los tipos de incongruencias que pueden surgir en el proceso de verificación de los sitios con el uso de la información de referencia, enfocados principalmente a las categorías de pérdida y degradación forestal. Esta evaluación indicó una fiabilidad global de 72%. 26.47% de las incongruencias fueron temáticas, 29.47% geométricas y 44.11% de heterogeneidad.

Abstract

Land use/cover maps (LUCM) are important tools in decision making and forest management. Such data must be submitted to accuracy assessments, in order to know the quality of the map data. In this study an accuracy assessment of the cartography of the state of *Michoacán* by Mas *et al.* (2016) was carried out, based on a statistically robust sampling. In addition, the map was compared with ground truth data corresponding to forest cover categories of the Forestry Commission of the State of *Michoacán* (Comisión Forestal del Estado de *Michoacán*; COFOM). Accuracy assessment indicates an overall accuracy of 83.3%, with a confidence interval of 3.1%. The comparison of the map with the ground truth data showed coincidences of 64% in tropical forests and 79% in temperate forests. On the other hand, there are inconsistencies, mainly between the primary and secondary categories of the same vegetation categories. These inconsistencies can be explained, partially, as consequence of geometry issues, minimum mapping unit, landscape fragmentation and ambiguity of the employed categories. Subsequently, an accuracy assessment of land use/cover changes was performed, in order to identify and quantify the inconsistencies types that may arise in the verification process of the sites when reference information is employed, focused in forest loss/degradation. This assessment has indicated an accuracy of 72%. In this case, 26.47% of the inconsistencies were label issues, 29.47% geometrical and 44.1% derived from landscape heterogeneity.

CONTENIDO

CAPÍTULO I: EVALUACIÓN DE LA FIABILIDAD TEMÁTICA DE CARTOGRAFÍA DE CUBIERTA/USO DE SUELO DEL ESTADO DE MICHOACÁN **1**

INTRODUCCIÓN **1**

Objetivo general	3
Objetivos particulares:	3
Antecedentes	4

METODOLOGÍA **7**

Área de estudio	7
Materiales	9
Sitios de verificación de la Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM)	9
Cartografía de cubierta/uso de suelo generada por Mas <i>et al.</i> (2016)	11

EVALUACIÓN DE FIABILIDAD CARTOGRÁFICA **13**

Diseño de la muestra	14
Foto-interpretación de los sitios de verificación	15
Análisis de datos	15
Comparación del mapa de Mas <i>et al.</i> (2016) con los puntos de campo de COFOM	16
Cuantificación de las incongruencias	17

RESULTADOS **18**

Evaluación de la fiabilidad del mapa de Mas <i>et al.</i> (2016)	18
Comparación entre Mas <i>et al.</i> (2016) y datos de campo (Bosques y Selvas) de COFOM	21
Comparación entre la cartografía y los puntos de campo en imágenes de alta resolución	24

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES **31**

CAPITULO II: EVALUACIÓN DE LA FIABILIDAD DE CAMBIOS DE CUBIERTA/USO DE SUELO DEL ESTADO DE MICHOACÁN **33**

INTRODUCCIÓN **33**

METODOLOGÍA **36**

Diseño de la evaluación de fiabilidad de CCUS	36
RESULTADOS	38
Comparación del mapa y los datos de referencia	38
Verificación visual de las inconsistencias	42
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	48
CONCLUSIONES FINALES	49
BIBLIOGRAFÍA	51

TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

Tabla 1. Sistema clasificatorio empleado por COFOM en la elaboración de su cartografía de (CUS) para el estado de Michoacán (27 clases).	10
Tabla 2. Sistema clasificatorio empleado por Mas et al. (2016) en la elaboración de su cartografía de (CUS) para el estado de Michoacán (23 clases).	13
Tabla 3. Matriz bruta entre las categorías del mapa Mas et al. (2016) del año 2007 con las imágenes de referencia, incluyendo el área de cada clase.	19
Tabla 4. Matriz de error del mapa Mas et al. (2016) con los índices de fiabilidad para cada clase.	20
Tabla 5. Matriz de error entre la cartografía elaborada por Mas et al. (2016) y datos de campo de COFOM (2014) para categorías de bosque. El color gris (Diag.) representa las categorías que coinciden de igual manera entre el mapa y los datos de campo, el azul es la suma de primarias y secundarias (S/P); son los puntos donde se presenta una diferencia entre vegetaciones primarias y secundarias de la misma categoría y el verde es la diferencia de etiquetas (D/E); categorías que se diferencian en la etiqueta debido al sistema clasificatorio, pero contienen el mismo tipo de bosque.	22
Tabla 6. Matriz de error entre la cartografía elaborada por Mas et al. (2016) y COFOM (2014) para categorías de selvas. El color gris (Diag.) representa las categorías que coinciden de igual manera entre el mapa y los datos de campo, el azul es la suma de primarias y secundarias (S/P); son los puntos donde se presenta una diferencia entre vegetaciones primarias y secundarias de la misma categoría y el verde es la diferencia de etiquetas (D/E); categorías que se diferencian en la etiqueta debido al sistema clasificatorio, pero contienen el mismo tipo de bosque.	23
Tabla 7. Clasificaciones utilizadas en cada cartografía ordenadas por tipos de vegetación comparables.	24
Tabla 8. Área en km ² de las combinaciones utilizadas para la estratificación de la información de Mas et al. (2016) y Hansen et al. (2013).	39
Tabla 9. Puntos aleatorios estratificados asignados por combinación.	39

Tabla 10. Matriz bruta entre la cartografía y los datos verificados por el intérprete. _____ 40

Tabla 11. Matriz entre la cartografía y los datos verificados por el intérprete solo para las inconsistencias de interés. _____ 41

FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del estado de Michoacán (zona de estudio). _____ 8

Figura 2. Clasificación de los tipos de error _____ 18

Figura 3. Inconsistencia entre la cartografía (Agricultura) y puntos de campo (Bosque de Pino Encino). _____ 25

Figura 4. Inconsistencia entre la cartografía (Cultivo Perenne) y puntos de campo (Bosque de Pino). _____ 26

Figura 5. Inconsistencia entre la cartografía (Agricultura) y puntos de campo (Selva Baja Caducifolia). _____ 26

Figura 6. Inconsistencia entre la cartografía (Agricultura) y puntos de campo (Bosque de Pino Secundario). _____ 27

Figura 7. Inconsistencia entre la cartografía (Agricultura) y puntos de campo (Bosque de Pino Encino Secundario). _____ 28

Figura 8. Inconsistencia entre la cartografía (Agricultura) y puntos de campo (Selva Baja Caducifolia Secundaria). _____ 28

Figura 9. Inconsistencia entre la cartografía (Bosque de Pino Secundario) y puntos de campo (Bosque Mesófilo Primario) _____ 29

Figura 10. Inconsistencia entre la cartografía (Bosque de oyamel) y puntos de campo (Bosque de Pino). _____ 30

Figura 11. Inconsistencia entre la cartografía (Cuerpo de Agua) y puntos de campo (Selva Mediana Caducifolia). _____ 30

Capítulo I: Evaluación de la fiabilidad temática de cartografía de cubierta/uso de suelo del estado de Michoacán

Introducción

En las últimas décadas, el aumento en la demanda de recursos naturales y el crecimiento de la población humana han intensificado actividades antrópicas como la agricultura, la industria, el comercio y la urbanización. Dichas actividades modifican la estructura de la superficie de la tierra (principalmente a través del cambio de cubierta/uso de suelo), perturbando los principales ciclos biogeoquímicos y eliminando especies y poblaciones preexistentes en la mayoría de los ecosistemas (Vitousek *et al.*, 1997). Muchos de estos cambios derivan en alteraciones en el funcionamiento de los sistemas naturales, lo cual se ejemplifica en el cambio climático global, causando pérdidas irreversibles de la diversidad biológica (Steffen *et al.*, 2004).

El uso de la tierra para producir bienes y servicios representa la alteración humana de mayor impacto en el ambiente, ya que modifica la estructura y funcionamiento de los ecosistemas del planeta, transformando la forma en que estos interactúan con la atmósfera, los sistemas acuáticos, y regiones circundantes (Vitousek *et al.*, 1997). Según Lambin (1997), la mayor parte de los cambios ocurridos en ecosistemas terrestres se deben a la conversión de la cubierta, degradación vegetal y la intensificación en el uso del suelo. Un ejemplo de las tendencias globales mencionadas es el caso de México. En los casi dos millones de kilómetros cuadrados de superficie terrestre con que el país cuenta, se identifican gran cantidad de cambios de cubierta/uso de suelo (en adelante CCUS), que en general están por encima de la media mundial (Mas *et al.*, 2009). Tal es el caso de las tasas de deforestación, incremento de áreas de cultivo y pastoreo, expansión urbana y muchos otros procesos que derivan en problemas ecológicos y sociales (Mas *et al.*, 2004).

Debido a lo anterior, los estudios sobre los procesos de CCUS se encuentran en el centro de atención de la investigación ambiental actual. Por ello, conocer la dimensión,

dinámica y la causalidad de los CCUS son objetivos prioritarios (Bocco *et al.*, 2001). Los análisis del CCUS son una herramienta que permite identificar los posibles escenarios a futuro, la magnitud y los lugares donde ocurren estos cambios para cada parte del mundo, así como comprender las causas y efectos de los procesos de degradación, desertificación, disminución de la biodiversidad, y en general, pérdida del capital natural y cultural (Vitousek *et al.*, 1997). Esto es crucial para aquellos países que concentran la mayor riqueza natural y cultural, que son también los que exhiben las más altas tasas de pérdida y degradación de los ecosistemas (Lambin *et al.*, 2001; Mas *et al.*, 2009). Es imperativo estudiar estos procesos, debido a que los resultados derivados de dichos análisis son datos de gran utilidad para generar políticas enfocadas en reducir o mitigar el daño ambiental derivado de dichos procesos (Velázquez *et al.*, 2002).

Usualmente, la cuantificación de CCUS se lleva a cabo mediante insumos de percepción remota (fotografías aéreas e imágenes de satélite) o cartografía temática de cubierta/uso de suelo (en adelante CUS; Bocco *et al.*, 2001). Por consiguiente, los mapas temáticos tales como mapas de CUS son ampliamente utilizados para la gestión, toma de decisiones, diseño, implementación y seguimiento de las políticas de conservación y manejo de los recursos naturales (Mas *et al.*, 2003). Por lo anterior, la información contenida en los mapas es fundamental y resulta importante conocer la calidad/fiabilidad de dichos datos. En México, como en varias partes del mundo, la tendencia por realizar evaluaciones de bases de datos cartográficas ha aumentado en los últimos años, no obstante, no todas las evaluaciones incluyen diseños estadísticos robustos, además de que aún es necesario estandarizar los métodos de evaluación cartográfica. La evaluación de fiabilidad de datos y bases geográficas digitales es un asunto que cada vez tiene mayor trascendencia, ya que permite valorar la cercanía del producto cartográfico con la realidad, y así evaluar el riesgo de tomar decisiones con base a esta información (Couturier y Mas, 2009). Además, medir la fiabilidad cartográfica ayuda al usuario a conocer y modelar el error que resulta del uso de estos datos en un Sistema de Información Geográfica (SIG; Luneta *et al.*, 1991).

Los resultados de la evaluación de la fiabilidad generan información que determina la calidad general del mapa (fiabilidad global) y la de cada categoría de CUS (fiabilidad del usuario y del productor). Tomando en cuenta esta evaluación se pueden corregir, por ejemplo, sesgos en la evaluación de la superficie de cada una de las categorías incluidas en un mapa (Card, 1982). Esta evaluación se vuelve aún más importante cuando los productos de una clasificación de imágenes se combinan con otros datos geográficos para tomar decisiones, ya que, si los errores contenidos en mapas de CUS se combinan con errores de otros datos, al realizar los análisis estadísticos, ocurre la propagación de los errores de ambos (Mas y Morales, 2011). Así, la importancia de evaluar la fiabilidad cartográfica va más allá de simplemente calificar los mapas generados. Su importancia radica en que dicha evaluación permite conocer los defectos y sesgos del mapa de manera general y por categoría de CUS, por lo que constituye un elemento fundamental realizar estudios de evaluación cartográfica (Mas y Morales, 2011).

La relevancia del presente trabajo no solo consiste en generar información respecto a la evaluación de la cartografía y las bases de datos geográficos generados para el estado de Michoacán, sino que también surge de la necesidad de fomentar este tipo de evaluaciones. Esto contribuye a estandarizar y homogeneizar el control de la calidad de los productos cartográficos, los cuales muchas veces son utilizados como herramientas de gestión social, ambiental y económica.

Objetivo general

Evaluar la fiabilidad de mapas de cubierta/uso de suelo del estado de Michoacán con base en un muestreo estadísticamente robusto de sitios de verificación.

Objetivos particulares:

- Comparar los datos de campo de la cartografía del estado de Michoacán (2014) elaborada por la Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM) con el mapa elaborado por Mas *et al.* (2016).

- Identificar las principales inconsistencias entre el mapa y los puntos de campo.
- Evaluar la cartografía de cambios del estado de Michoacán periodo 2004--2014.
- Identificar inconsistencias en el mapa de cambio periodo 2004--2014 del estado de Michoacán.

Antecedentes

En años recientes, evaluar la fiabilidad de la cartografía temática ha comenzado a generar interés en el ámbito académico, dado que surgieron las primeras publicaciones en el mundo que evalúan los CCUS de carácter regional. Tal es el caso de los productores de cartografía de países como Estados Unidos de América, que presentó una evaluación de algunos mapas elaborados en 1992 de su región occidental (Zhu *et al.*, 2000; Laba *et al.*, 2002; Stehman *et al.*, 2003; Wickham *et al.*, 2004). La unión europea evaluó el proyecto Corine Land Cover 2000, un estudio de la cubierta y uso forestal del territorio europeo (Büttner y Maucha, 2006). En 2007, Wulder *et al.* publicaron la evaluación del mapa de la isla de Vancouver, Canadá. En México se presentaron los resultados de la evaluación del Inventario Forestal Nacional (IFN) en cuatro áreas eco-geográficas consideradas zonas megadiversas (Couturier y Mas, 2007; Couturier y Mas, 2009).

Así mismo, Olofsson *et al.* (2013) realizaron una revisión de los artículos publicados entre 2005 y 2010 en dos de las principales revistas de percepción remota: *Remote Sensing of Environment* e *International Journal of Remote Sensing*, que cuentan con un gran acervo de publicaciones referentes a CCUS. Esta revisión reveló que de 57 publicaciones referentes a análisis de CCUS, 8 artículos no incluían ningún tipo de evaluación, 24 evalúan sus mapas estáticos pero no sus cambios, 16 presentan una evaluación de la fiabilidad de cambios pero no reportan suficientes datos para poder calcular índices de fiabilidad y solo 9 estudios contaban con una evaluación de la fiabilidad temática robusta, proporcionando las medidas de cambio y la información de sus estimaciones. Esta revisión mostró que a pesar de la gran cantidad de información que ha surgido en los últimos 30 años respecto a los métodos de evaluación y a la gran cantidad de

conclusiones obtenidas, no se han logrado difundir de forma eficiente entre la comunidad académica (Olofsson *et al.*, 2013).

En México, por ejemplo, son pocas las bases de datos geográficas que han sido sometidas a evaluación. Esto significa que parte importante de los datos publicados a la fecha carecen de una evaluación estadísticamente robusta que los respalde; como los datos de tasas de cambio de uso de suelo que derivan de ellos (Mas y Couturier, 2011). En la actualidad, los principales esfuerzos que se realizan para obtener información cartográfica a nivel nacional son la carta de uso del suelo y vegetación del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y el Inventario Nacional Forestal y de Suelos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR; Fernández y Mas, 2003; Sánchez-Colón *et al.*, 2009).

Estos inventarios son inherentemente laboriosos por su escala y nivel de detalle, exigen una cantidad elevada en recursos, trabajo de campo y gabinete, por tanto, es difícil actualizarlos en intervalos de tiempo cortos (se suelen actualizar cada cinco años aproximadamente). Este periodo de actualización es deficiente para atender los problemas y toma de decisiones que surgen en las distintas zonas del país para el monitoreo de la pérdida de cobertura forestal, el impacto por incendios forestales y el crecimiento de las fronteras agrícolas y pecuarias, entre otros cambios (Sánchez-Colón *et al.*, 2009). Estas principales fuentes de información no cuentan con una evaluación de la fiabilidad de su cartografía temática, ya que sólo en las zonas donde se tiene mayor incertidumbre de lo interpretado, se efectúa trabajo de campo. Por lo tanto, no hay reportes o documentos que evalúen la fiabilidad de los mapas resultantes, que, en la mayoría de los casos, contienen un número de errores mayor al esperado (Franklin *et al.*, 2000; Fernández y Mas, 2003).

Hasta la actualidad, se han elaborado cinco inventarios forestales de cobertura nacional (CONAFOR, 2014). El primero fue realizado de 1961 a 1985, con el objetivo de determinar las áreas maderables del norte del país, utilizando fotografías aéreas de las zonas arboladas de mayor valor comercial. En el año de 1991 se elaboró el Inventario

Nacional Forestal de Gran Visión, actualizando la información del país basándose en la Carta de Uso Actual del Suelo y Vegetación serie I de INEGI, utilizando imágenes clasificadas de manera digital del satélite NOAA-AVHRR, obteniendo mapas de la vegetación forestal y no-forestal de todo el país escala 1: 1,000,000 (CONAFOR, 2011).

El inventario Nacional Forestal se realizó de forma periódica entre 1992 y 1994, usando como base imágenes del satélite Landsat TM de alta resolución y muestreos de campo. Como resultado de este tercer inventario nacional, se generaron mapas de vegetación forestal a escala 1: 250,000 (SARH, 2004; CONAFOR, 2011). El Cuarto Inventario Forestal Nacional se elaboró en el año 2000. En este trabajo se utilizaron imágenes del satélite Landsat ETM+ de alta resolución, elaborando de esta manera la carta de vegetación y uso de suelo a escala 1: 250,000, con un sistema clasificatorio compatible al del INEGI pero menos detallado. En este inventario no se concluyó el trabajo de campo, pero es el único con una evaluación de su fiabilidad cartográfica (SEMARNAT, 2011; CONAFOR, 2014).

El quinto Inventario Nacional Forestal se realizó del 2004 al 2009. Mediante esta Información se aprobó la Ley General del Desarrollo Forestal Sustentable, la cual establece análisis anuales de los índices de cobertura forestal sustentados en imágenes de satélite de alta resolución, tomando como base las cartas de uso actual del suelo y vegetación del INEGI. También se estableció actualizar este inventario cada cinco años a través de muestreos sistemáticos para el levantamiento de datos en campo para bosques y selvas. Como productos de este inventario se obtuvieron cartas de vegetación forestal a nivel nacional escala 1:250,000. El re-muestreo de estos datos se generó entre 2009 y 2013 (CONAFOR, 2014).

A partir del año 2013 comenzaron los trabajos para elaborar inventarios forestales de las 32 entidades federativas del país. Hasta la fecha solo se tienen publicados los resultados de 16 entidades, entre los cuales se encuentra el correspondiente al estado de Michoacán. Se tienen reportados otros dos inventarios para el estado; uno elaborado en 1971 por la Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM), para fines de manejo

forestal y otro en 1992 (COFOM, 2014). A pesar de los extensos antecedentes de cartografía para el país, la mayor parte de dichos insumos no han sido evaluados.

Con base en los antecedentes mencionados, el presente trabajo se enfocó en realizar, empleando un muestreo estadísticamente robusto de sitios de verificación, una evaluación de la cartografía de CUS elaborada en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), dicho mapa fue generado por Mas *et al.* (2016) en el ámbito de un proyecto financiado por el Fondo Mixto CONACYT Gobierno del estado de Michoacán. Además, se llevó a cabo una comparación del mapa con datos de campo del Inventario Estatal Forestal y de Suelos (IEFyS) de la COFOM, con la finalidad de identificar inconsistencias entre ambas bases de datos.

Metodología

Área de estudio

El área de estudio del presente trabajo fue el estado de Michoacán (Fig.1), localizado en el occidente de México. Michoacán cuenta con una extensión de casi 60,000 kilómetros cuadrados, representando el 3% de la superficie del país (INEGI, 2011). Su localización en una zona tropical del hemisferio norte sumada a su topografía accidentada, provocan que sus climas varíen de cálido y seco en la costa, a templado y semiárido en la zona continental. El estado es parte de dos de las cuencas hidrológicas más importantes para el país: el sistema fluvial Lerma Chapala Santiago y el Rio Balsas (CONAGUA, 2007; INEGI, 2011). Las principales regiones fisiográficas representadas en el estado son la Altiplanicie Mexicana, el sistema Volcánico Transversal, la sierra Madre del Sur, la Depresión del Balsas y la Costa Pacífica, con elevaciones que van de 0 a 4,000 msnm, siendo uno de los estados más ricos en recursos forestales del país (CONABIO, 2005). El estado de Michoacán tiene poco más de 4,000,000 de habitantes, y se encuentra entre los primeros 15 estados con mayor contribución al Producto Interno Bruto (PIB) nacional. Esto se debe principalmente al comercio, agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y ciertas actividades

como la industria manufacturera y los servicios inmobiliarios. Michoacán cuenta con un alto índice de pobreza y marginalidad, con muy altas tasas de migración a los Estados Unidos de América (Bocco *et al.*, 2001; INEGI, 2011, SEMARNAT, 2011, INEGI, 2012).

En las zonas templadas, la vegetación natural de Michoacán incluye los siguientes tipos de vegetación: bosque de abeto, bosque de pino, bosque de pino-encino y bosque de encino. En las zonas de clima cálido seco, el tipo de vegetación dominante es la selva baja caducifolia. La vegetación del estado ha sido perturbada principalmente para implementar pastizales inducidos, pastizales cultivados, matorral secundario y bosque cultivado (Rzedowski, 1991).

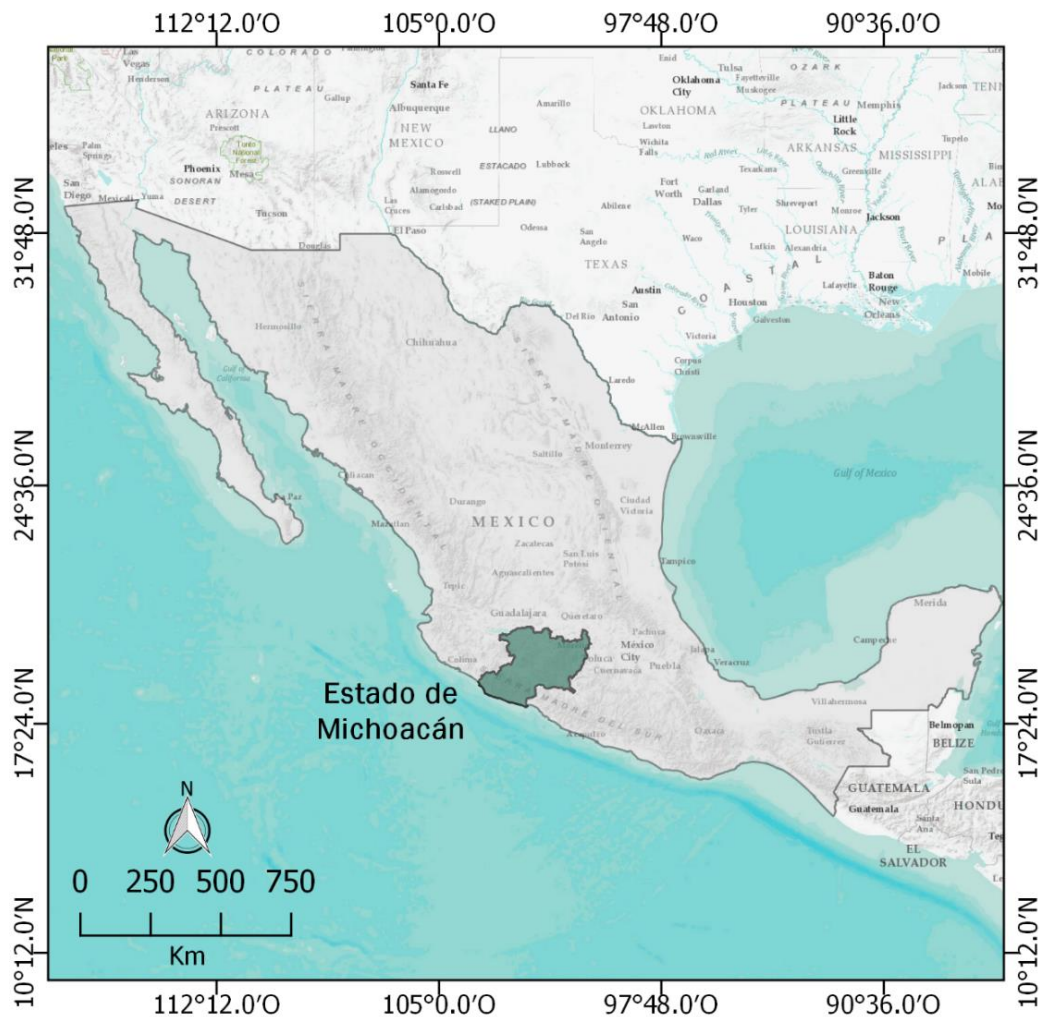


Figura 1. Ubicación geográfica del estado de Michoacán.

Materiales

Para llevar a cabo el presente trabajo se utilizaron imágenes de alta resolución del satélite SPOT 5, correspondientes a los años 2004, 2007 y 2014, el mapa de CUS del estado de Michoacán, generado por Mas *et al.* (2016), e información correspondiente a sitios de verificación en campo para bosques y selvas del IEFyS 2014 de COFOM (COFOM, 2014). Se describen a continuación el mapa de cubierta y uso de suelo y los sitios de campo utilizados en el presente estudio.

Sitios de verificación de la Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM)

Para la planeación de la cartografía de CUS, la Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM) empleó un muestreo sistemático para ubicar los conglomerados y un muestreo aleatorio para seleccionar los conglomerados utilizados al levantar la información (COFOM, 2014). Este muestreo se enfocó en las áreas arboladas (bosques y selvas) basándose en un sistema clasificatorio de 27 clases (Tabla. 1).

Para la elección de las áreas arboladas se sobrepusieron 813 cuencas hidrológicas con un porcentaje de cubierta forestal igual o mayor a 25%. Las microcuencas que cumplieron esta característica se seleccionaron para los trabajos de muestreo. Posteriormente, se dividieron en cuadrículas de 2 por 2 kilómetros, las cuales a su vez se dividieron en 16 cuadrantes de 500 por 500 metros, considerando la microcuenca como unidad de planeación básica. La captura de datos en campo tuvo un tamaño de muestra para el levantamiento de 548.8 hectáreas y comenzó en 2007 con los conglomerados de bosque, terminando en 2013 con selvas, obteniendo un total de 500 puntos de verificación

Tabla 1. Sistema clasificatorio empleado por COFOM en la elaboración de su cartografía de (CUS) para el estado de Michoacán (27 clases).

CLASES
Bosque de pino
Bosque de pino-encino
Bosque de encino-pino
Bosque de encino
Bosque mesófilo de montaña
Bosque de oyamel
Selva mediana
Selva baja
Selva baja espinosa
Mezquital
Matorral subtropical
Matorral crasicaule
Palmar
Manglar
Vegetación halófila y gipsófila
Vegetación hidrófila
Vegetación secundaria
Erosión
Deslave
Lava volcánica
Banco de material
Cuerpo de agua
Asentamiento humano
Agricultura de riego
Agricultura de temporal
Huertas
Pastizal inducido

Cartografía de cubierta/uso de suelo generada por Mas *et al.* (2016)

El mapa se describe en Mas *et al.*, (2015) y Mas *et al.*, (2017). Dicho mapa se generó mediante el uso de 32 imágenes multi-espectrales del satélite SPOT 5 con resolución de 10 metros para cada una de las fechas de estudio (2004, 2007 y 2014) correspondientes a la estación seca del año (diciembre-marzo), puesto que en esta época existe menor nubosidad en las imágenes. Para elaborar la cartografía se empleó un método híbrido, que integra procesos automatizados, análisis espacial e interpretación visual para la generación de mapas de diferentes fechas con base en procesos de mejora de escala, actualización y desactualización cartográfica.

El método híbrido consistió en varias etapas para la producción de la cartografía temática. Como primer paso se generó mediante interpretación visual un mapa escala 1:100,000 del estado de Michoacán con imágenes del año 2007, el cual posteriormente fue sometido a un proceso semi-automatizado de afinación de resolución y una revisión por foto-intérpretes del INEGI, lo que permitió que se corrigieran errores de clasificación. Después se dio a la tarea de generar un mapa escala 1:50,000. Para esto, se implementó la segmentación de las imágenes SPOT de 2007 mediante la plataforma en línea BIS Cloud (Berkeley Image Segmentation, 2015), lo que permitió obtener límites espaciales para conjuntos de píxeles espectralmente homogéneos, con un área mínima cartografiable de una hectárea. En una etapa siguiente se intersectó el mapa 2007 de CUS escala 1:100,000 con los segmentos derivados de 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. Después se calculó una función de densidad para cada categoría en el programa R (R Core Team, 2014; RStudio Team, 2015), que indica la probabilidad de un segmento con un valor espectral específico de pertenecer a una categoría particular del mapa. De esta forma se identificaron los segmentos con respuestas atípicas, es decir, que presentan una respuesta espectral que no corresponde a la categoría que recibieron del mapa. Además, se generó una clasificación digital no supervisada con un algoritmo de árbol C5 (Quinlan, 1993), en R. Este algoritmo asigna a cada segmento una

categoría con base solamente en su respuesta espectral. Los resultados de esta clasificación se emplearon como referencia de la confusión espectral de los segmentos que se verificarían visualmente. Finalmente, se inspeccionaron visualmente en imágenes de alta resolución los segmentos identificados como atípicos y los que presentaron una categoría obtenida por la clasificación automatizada distinta a la del mapa, en QGIS (QGIS Development Group, 2015). En esta inspección el intérprete decidió si el segmento permanecía en la categoría señalada por el mapa o si representaba un CCUS, mediante criterios de interpretación visual: textura, patrón, tamaño, forma y tonalidad de los segmentos de la imagen. De esta forma se elaboró el mapa para el año 2007 a escala 1: 50,000, con un área mínima cartografiable de una hectárea. En una etapa siguiente, se implementó el mismo método en las imágenes SPOT de 2004 y 2014, lo que permitió desactualizar (hacia el pasado, para generar el mapa 2004) y actualizar (mapa 2014) el mapa de 2007. Esta cartografía empleó un sistema de clasificación de 23 clases, enfocadas en la vegetación que existe en el estado de Michoacán, diferenciando en dos clases las cubiertas forestales de acuerdo a la densidad de árboles y estado de conservación (primario y secundario; Tabla. 2).

Tabla 2. Sistema clasificatorio empleado por Mas et al. (2016) en la elaboración de su cartografía de (CUS) para el estado de Michoacán (23 clases).

CLASES
Agricultura de riego
Agricultura de temporal
Cultivo perenne
Asentamientos humanos
Pastizal inducido / pastizal cultivado
Bosque de encino / veg. primaria
Bosque de encino / veg. secundaria
Bosque de oyamel primario
Bosque de oyamel secundario
Bosque de pino / veg. primaria
Bosque de pino / veg. secundaria
Bosque mesófilo primario
Bosque mesófilo secundario
Bosque Pino encino / veg. primaria
Bosque Pino encino / veg. secundaria
Selva baja caducifolia / veg. primaria
Selva baja caducifolia / veg. secundaria
Selva mediana caducifolia / veg. primaria
Selva mediana caducifolia / veg. secundaria
Cuerpos de agua
Manglar
Popal-tular
Sin vegetación aparente

Evaluación de fiabilidad cartográfica

En esta sección se describe el proceso de evaluación de fiabilidad cartográfica, de acuerdo a lo propuesto por Stehman y Czaplewsky (1998), la cual consta de las siguientes etapas:

- 1) Diseño de la muestra, que es la selección de los sitios a verificar.

- 2) Obtención de las clases correspondientes a cada sitio mediante foto-interpretación en imágenes de alta resolución o visitas de campo.
- 3) Análisis de los datos, que consiste en elaborar la matriz de confusión y calcular los índices de fiabilidad.

Posteriormente se explica la manera en que se aplicó el método de evaluación de fiabilidad para la cartografía y su comparación con los diferentes datos de campo de bosques y selvas de COFOM.

Diseño de la muestra

El diseño de la muestra consistió en la selección de sitios de verificación, determinando; la unidad del muestreo, el método de muestreo y el tamaño de la muestra. La unidad del muestreo se eligió mediante el protocolo para la selección del subconjunto de unidades espaciales que permiten relacionar la localización de la información del mapa con la del terreno (Mas *et al.*, 2003). Para esto es posible utilizar un punto, un pixel (en caso de un mapa generado por clasificación digital de una imagen de satélite), un grupo de pixeles, un polígono del mapa o una unidad de superficie con formas predeterminadas (Chuvieco, 2002; Mas *et al.*, 2003). Estas unidades se determinaron sin descartar regiones con poca accesibilidad. El método del muestreo que se utilizó fue un muestreo aleatorio estratificado, ya que la muestra se efectúa dividiendo los datos muestreados en estratos, con base en una variable auxiliar (clase de CUS, altitud, región ecológica, división administrativa, facilidad de acceso, clase en el mapa, entre otros), lo que permite tener control sobre la distribución de los sitios de muestreo y obtener información sobre subconjuntos de la población (Mas y Couturier, 2011).

En este caso el muestreo estratificado permitió incluir un número estadísticamente representativo de sitios de verificación para cada categoría independientemente de su superficie, estratificando con las 23 categorías del mapa. Lo anterior es importante, ya que permite evaluar todas las categorías del mapa, incluso

aquellas que ocupan una pequeña proporción del paisaje o están distribuidas en pocos polígonos, y el tamaño de la muestra asignada a este estrato puede ser lo suficientemente grande como para producir una correcta evaluación de su fiabilidad (Olofsson *et al.*, 2014). Así mismo, se eligió el tamaño de la muestra, que se refiere en este caso al número de sitios de verificación para estimar la fiabilidad del mapa, entre mayor tamaño tenga la muestra elegida, la evaluación será más precisa, aunque existen métodos que ayudan a reducir el tamaño sin afectar los resultados de la evaluación. En este caso se eligieron un total de 946 puntos con base en las ecuaciones propuestas por Olofsson *et al.* (2014).

Foto-interpretación de los sitios de verificación

En la foto-interpretación de los sitios de verificación, los sitios se caracterizan por ser asociados a una o varias clases del sistema clasificatorio del mapa a evaluar. Para este caso se verificaron mediante foto-interpretación en imágenes de 2.5 metros de resolución espacial, resultado de la fusión entre la banda pancromática de 2.5 metros y las bandas multi-espectrales de 10 metros de SPOT, además de imágenes de muy alta resolución de GoogleEarth. Comparando de esta manera los datos obtenidos por el intérprete que verificó las imágenes y la información que proporciona el mapa escala 1:50,000 a evaluar. Finalmente, se realizó la verificación en campo de 110 sitios difíciles de foto-interpretar en las imágenes, los cuales correspondieron principalmente a zonas cubiertas por selva baja caducifolia, bosque de encino y bosque mesófilo. Debido a que estos sitios se verificaron visualmente en imágenes del 2007, se constató en imágenes de 2014 que no presentaran cambios, y de esta manera evitar los errores que podrían surgir por la diferencia de fecha del trabajo en campo respecto a la del mapa evaluado.

Análisis de datos

Los datos de fiabilidad se analizaron empleando una matriz de confusión o matriz de error, la cual permite comparar la información de los sitios de verificación con el mapa evaluado. La matriz de error organiza los datos adquiridos de tal manera que resume los resultados clave y ayuda a cuantificar la fiabilidad temática. De esta manera se muestran los errores

de omisión y comisión, así como el índice de fiabilidad global (proporción del mapa correctamente clasificado; ecuación. 1); la fiabilidad del usuario (probabilidad de que un sitio de una categoría en los datos de verificación seleccionado aleatoriamente corresponda a la categoría en la realidad, relacionado a errores de comisión) y el de la fiabilidad del productor (proporción de sitios de verificación de cada categoría que están correctamente clasificados en el mapa, relacionado a errores de comisión), así como su certidumbre (intervalos de confianza; Couturier y Mas, 2011; Olofsson *et al.*, 2014).

(1) Fiabilidad Global:
 $P_c = \sum_{k=1}^q P_{kk}$
 $P_c =$ Sumatoria de los valores de la diagonal

En el caso de muestreos estratificados, el número de sitios verificados por categoría ya no es necesariamente proporcional a la superficie cubierta por cada categoría. En tal caso, para calcular los índices de fiabilidad sin sesgo, las matrices se deben ponderar con la proporción que cubre cada categoría en el mapa, según el método propuesto por Card (1982). Para esto se utilizó la herramienta *AccurAssess* de QGIS (Mas *et al.*, 2014). Cabe mencionar que dicho proceso de evaluación del mapa de Mas *et al.* (2016) fue dirigido solo al mapa del año 2007, ya que fue el utilizado como base en la generación de la cartografía para las fechas 2004 y 2014.

Comparación del mapa de Mas *et al.* (2016) con los puntos de campo de COFOM

Para comparar los datos de campo de COFOM con la cartografía, primero se realizó la extracción de datos correspondientes a coordenadas geográficas y tipos de vegetación de la base de datos correspondiente a los puntos de campo. Dicha información se transformó a puntos (formato shape) en QGIS. Una vez espacializados, los puntos de COFOM fueron intersectados con la cartografía, con la finalidad de obtener un archivo final con la información correspondiente a ambas bases de datos.

Eventualmente, se utilizó el resultado de la intersección para recategorizar las clases de los distintos productos y de esta manera facilitar la comparación entre ellos. Como

se mencionó anteriormente, cada producto incluía un número distinto de categorías; los puntos de COFOM 27 y el mapa 23, por lo tanto, se dio a la tarea de ajustarlas, homogenizando los nombres de las categorías que se repetían entre los productos, dando prioridad a las clases de bosques y selvas. De esta manera se definieron las siguientes categorías derivadas de la intersección entre bases de datos: “coincidencias” (misma clase en ambas capas) “diferencias entre estado de la vegetación” (misma clase, pero diferencia entre primaria o secundaria), “diferencias entre sistemas clasificatorios” (comparación ambigua debido a bosques mixtos y diferentes etiquetas) e inconsistencias (diferente clase).

Al tener las categorías homogenizadas se prosiguió a construir la matriz de error, que ayudó a cuantificar el número de coincidencias del mapa con los puntos de campo y determinar las inconsistencias de clasificación. Todo esto se verificó en imágenes de alta resolución (GoogleEarth), verificando de esta manera 500 puntos para bosques y 170 puntos de selvas (de acuerdo a la disponibilidad de puntos). Finalmente se dio a la tarea de foto-interpretar visualmente los puntos correspondientes a inconsistencias entre los datos de COFOM y el mapa, donde se revisaron imágenes del año 2007 para comparar y explicar las posibles incongruencias entre la cartografía y los puntos de campo. Cabe mencionar que los datos de COFOM no permiten una evaluación de la fiabilidad estadísticamente rigurosa porque no siguen un muestreo diseñado con base en los límites y polígonos del mapa.

Cuantificación de las incongruencias

Una vez identificadas las incongruencias entre los puntos de campo y la cartografía para las categorías correspondientes a bosques y selvas, se dio a la tarea de revisarlas visualmente. Derivado de esto se cuantificaron con base al tipo de incongruencia que presentaban. Para este trabajo se clasificaron en tres tipos; temáticas, geométricas y de heterogeneidad (Fig. 2).

- a) Temática: Esta incongruencia se debe a clasificar o etiquetar las clases con una categoría que no es la adecuada.
- b) Geométrica: Incongruencia asignada a la posición donde está ubicado el punto.

c) Heterogeneidad: Error relacionado con la complejidad del paisaje al asignar una clase cuando hay diversas cubiertas/ usos presentes.

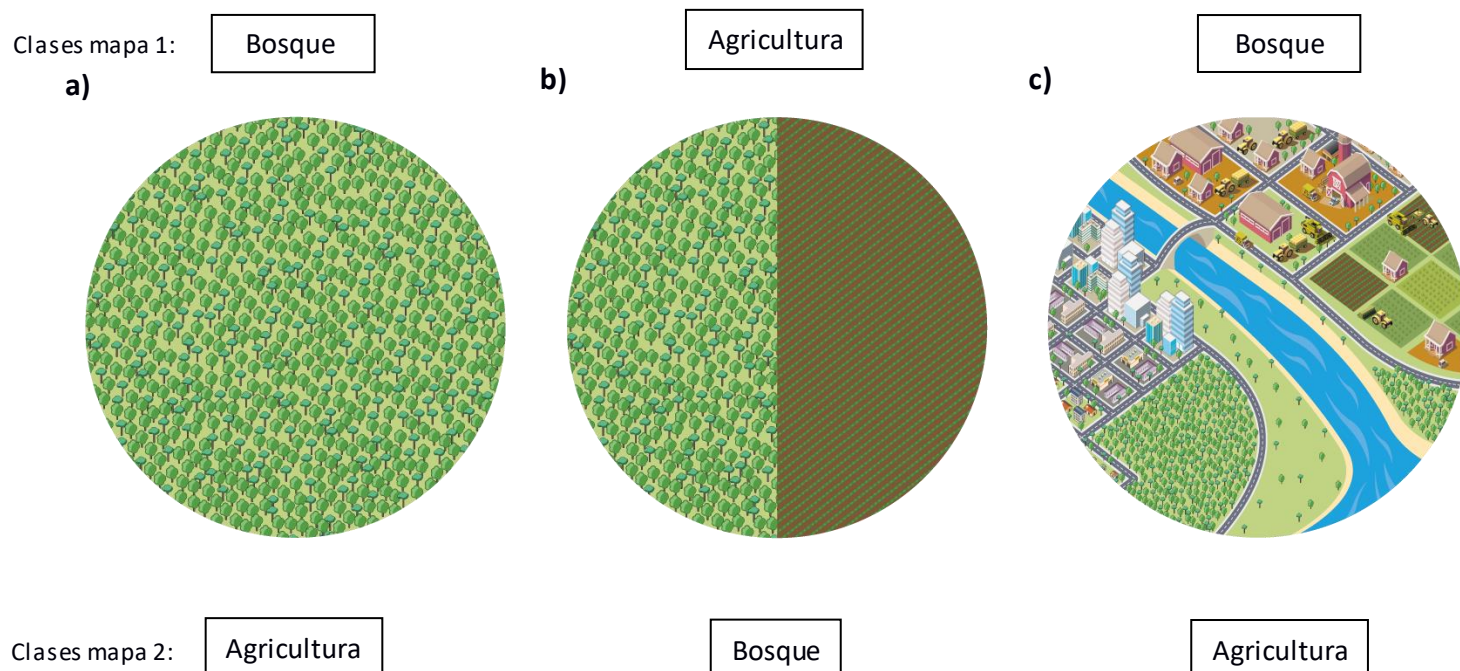


Figura 2. Ejemplos gráficos de los tipos de incongruencia.

Resultados

Evaluación de la fiabilidad del mapa de Mas *et al.* (2016)

En la tabla 3 se muestra la matriz bruta con las áreas que le corresponden a cada categoría en el mapa, además de los puntos de correspondencia entre el mapa y las imágenes de referencia. En la tabla 4 se observan los índices para cada clase del mapa, los valores de fiabilidad del usuario (aparece en la columna como “Fiab.Usu”) y la fiabilidad para el productor (columna “Fiab.Prod”). Observando de esta manera que clases como: Cultivo perenne, Asentamientos humanos, Bosque Pino encino/veg primaria, Selva baja caducifolia/veg primaria, se encuentran representados cartográficamente con una fiabilidad superior a 80%. A diferencia de éstas, las clases primarias y secundarias de: Bosque Mesófilo primario y Bosque Mesófilo secundario, Bosque de Oyamel y Bosque de

Pino Secundario, que presentaron bajos niveles de fiabilidad. La fiabilidad global de esta cartografía resultó de 83.3% con un intervalo de confianza de 3.1%. Esto significa que existe un 95% de probabilidad de que el resultado de la fiabilidad del mapa se ubique entre 80.3% y 86.4%.

Tabla 3. Matriz bruta entre las categorías del mapa Mas et al. (2016) del año 2007 con las imágenes de referencia, incluyendo el área de cada clase.

Mapa	REFERENCIA																							SUMA	Área (km ²)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
1	31	5		1	3								1			2								43	5,472.40
2	1	31			6												2	1		1			1	43	7,660.87
3	1		41						1							1								44	4,667.36
4				41	2																			43	1,002.44
5					40											2	1							43	6,749.85
6					2	28	3						2		3	2	3							43	1,838.66
7		1	1		3	1	30			2	1		1		1		2							43	3,886.76
8								37		4	1		1											43	157.53
9		4			9			2	24	2	2													43	16.64
10						2	1	1		35						2		2						43	2,211.71
11		1			4		1		1	22			3	4	3		2	2						43	1,414.60
12		1	1		1	1				8	2	15		12	2									43	65.20
13			1					2		1			2											6	0.19
14		1								1			39	1				1						43	4,572.09
15					2	2	2			2	1		1	4	28	1								43	3,699.04
16		1			2										40	1								44	12,167.91
17																51								51	7,244.20
18			1		4	1	1								1		34		1					43	876.67
19		1		1	2		2						3		3	1	2	27						42	746.38
20	1				1										1	1			38		1			43	992.24
21																				28				28	17.29
22	5	3			1															2		32		43	125.02
23			1		1		2							1						1		1	36	43	75.63

1=Agricultura de riego, 2=Agricultura de temporal, 3=Cultivo perenne, 4=Asentamientos humanos, 5=Pastizal inducido/pastizal cultivado, 6=Bosque de encino primario, 7=Bosque de encino secundario, 8=Bosque de oyamel primario, 9=Bosque de oyamel secundario, 10=Bosque de pino primario, 11=Bosque de pino secundario, 12=Bosque mesófilo primario, 13=Bosque mesófilo secundario, 14=Bosque Pino encino primario, 15=Bosque Pino encino secundario, 16=Selva baja caducifolia primaria, 17=Selva baja caducifolia secundaria, 18=Selva mediana caducifolia primaria, 19=Selva mediana caducifolia secundaria, 20=Cuerpos de agua, 21=Manglar, 22=Popal-tular, 23=Sin vegetación aparente

Tabla 4. Índices de fiabilidad por clase del mapa de Mas et al. (2016)

CATEGORÍA	Fiab. Usu	IC	Lím. Infe	Lím. Sup	Fiab. Prod	IC	Lím. Infe	Lím. Sup
Agricultura de riego	0.72	0.13	0.59	0.85	0.93	0.08	0.84	1.00
Agricultura de temporal	0.72	0.13	0.59	0.85	0.83	0.10	0.72	0.93
Cultivo perenne	0.93	0.07	0.86	1.00	0.97	0.04	0.93	1.00
Asentamientos humanos	0.95	0.06	0.89	1.00	0.86	0.21	0.66	1.00
Pastizal inducido/cultivado	0.93	0.08	0.85	1.00	0.68	0.10	0.59	0.78
Bosque de encino primario	0.65	0.14	0.51	0.79	0.76	0.16	0.59	0.92
Bosque de encino secundario	0.70	0.14	0.56	0.83	0.86	0.08	0.78	0.95
Bosque de oyamel primario	0.86	0.10	0.76	0.96	0.78	0.32	0.46	1.00
Bosque de oyamel secundario	0.56	0.15	0.41	0.71	0.07	0.11	0.00	0.18
Bosque de pino primario	0.81	0.12	0.70	0.93	0.78	0.14	0.64	0.92
Bosque de pino secundario	0.51	0.15	0.36	0.66	0.79	0.22	0.57	1.00
Bosque mesófilo primario	0.35	0.14	0.21	0.49	1.00	0.00	1.00	1.00
Bosque mesófilo secundario	0.33	0.38	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00
Bosque Pino encino primario	0.91	0.09	0.82	0.99	0.83	0.08	0.75	0.92
Bosque Pino encino secundario	0.65	0.14	0.51	0.79	0.91	0.08	0.82	0.99
Selva baja caducifolia primaria	0.91	0.08	0.82	0.99	0.92	0.04	0.87	0.96
Selva baja caducifolia secundaria	1.00	0.00	1.00	1.00	0.86	0.09	0.77	0.95
Selva mediana caducifolia primaria	0.79	0.12	0.67	0.91	0.46	0.17	0.29	0.63
Selva mediana caducifolia secundaria	0.64	0.14	0.50	0.79	0.88	0.15	0.73	1.00
Cuerpos de 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
Popal-tular	0.74	0.13	0.61	0.87	0.77	0.32	0.45	1.00
Sin vegetación aparente	0.84	0.11	0.73	0.95	0.26	0.37	0.00	0.63

Fiab.Usu= Fiabilidad del Usuario, IC= Intervalo de confianza, Lím. Infe= límite inferior, Lím. Sup= límite Superior, Fiab.Prod=Fiabilidad del Productor.

Comparación entre Mas *et al.* (2016) y datos de campo (Bosques y Selvas) de COFOM

Se observa en la matriz de error entre el mapa y los puntos de campo de COFOM correspondientes a bosques (tabla 5), que, de un total de 500 puntos verificados, 74 puntos comparten la misma clase (diagonal gris), 127 presentan diferencias entre vegetaciones primarias y secundarias de la misma clase (relleno azul), 196 puntos tienen diferencias entre los sistemas clasificatorios pero comparten alguna clase (relleno verde) y 103 puntos no comparten ninguna clase (inconsistencias), obteniendo un total de 397 puntos que coinciden entre las diferentes etiquetas. El mayor número de coincidencias de estos datos pertenece a la clase de bosques de pino encino secundario, seguido de bosques de pino primario y secundario y encino primario y secundario. Se presenta un alto número de inconsistencias entre las categorías de bosque de encino y oyamel y agricultura de temporal con bosques de pino encino secundario. De manera general, el porcentaje de coincidencias para las categorías de bosque entre la cartografía y los puntos de campo es de 79.4%.

En la matriz correspondiente a selvas (tabla 6), se verificaron un total de 170 puntos, de los cuales 57 puntos coinciden por tener la misma clase (diagonal gris), 52 puntos presentan diferencias entre vegetaciones primarias y secundarias de las mismas clases (relleno azul) y 61 puntos no comparten ningún tipo de clase (inconsistencias), obteniendo un total de 109 puntos que comparten algún tipo de vegetación. Las clases correspondientes a selvas bajas caducifolias primarias y secundarias son las de mayor número de puntos coincidentes (46 primarias y 10 secundarias). El mayor número de inconsistencias se da entre las categorías de selvas bajas caducifolias (primarias-secundarias) y los pastizales. La comparación de estos datos en las categorías de selva da un total de 64% de coincidencias entre la cartografía y los puntos de campo.

Tabla 5. Matriz de error entre la cartografía elaborada por Mas et al. (2016) y datos de campo de COFOM (2014) para categorías de bosque. El color gris (Diag.) representa las categorías que coinciden de igual manera entre el mapa y los datos de campo, el azul es la suma de primarias y secundarias (S/P); son los puntos donde se presenta una diferencia entre vegetaciones primarias y secundarias de la misma categoría y el verde es la diferencia de etiquetas (D/E); categorías que se diferencian en la etiqueta debido al sistema clasificatorio, pero contienen el mismo tipo de bosque.

DATOS DE CAMPO DE COFOM (BOSQUES)												
CLASE	BE-P	BE-S	BO-P	BO-S	BP-P	BP-S	BPE-P	BPE-S	Cul-Pe	MST	P.T	Suma
AG-R		1					1	2			4	
AG-T		1			4	4		12			21	S/P
A-H		2				1					3	127
BE-P	2	1		1	7	2		4			17	
BE-S		3		4	5	5	2	13	1		33	
BO-P		2	1	4	2	2	1	2			14	
BO-S						1		1	1		3	
BP-P	1	6			1	3	2	5			18	D/E
BP-S		1		1	1	2	1	7			13	196
BMP						1		1			2	
BPE-P	7	34		15	24	46	10	115	1		252	
BPE-S	2	10			25	16	3	54			110	
C-A								1			1	
CUL-PE					2	1	1	1	1	1	7	Diag.
PI/PC				1				1			2	74
SBC-P		1					1	2			4	
SBC-S		1			4	4		12			21	Total
P.T	12	61	1	26	71	84	21	219	4	1	500	397

AG R=Agricultura de riego, AG T=Agricultura de temporal, Cul-Pe=Cultivo perenne, A-H=Asentamientos humanos, PI/PC=Pastizal inducido o cultivado, BE-VPA =Bosque de Encino Primario; BE-VSH =Bosque de Encino Secundario, VS= Vegetación Secundaria, BO-P= Bosque de Oyamel Primario, BO-S= Bosque de Oyamel Secundario BP-VP=Bosque de Pino Primario, BMP = Bosque Mesófilo Primario, BPE-P = Bosque de Pino-Encino Primario, BPE-VS = Bosque de Pino-Encino Secundario, C-A= Cuerpo de Agua SBC-P=Selva Baja Caducifolia Primario, SBC-VS= Selva Baja Caducifolia Secundaria, SM=Selva mediana Caducifolia, MTS-P= Matorral Sub Tropical Primario, MTS-S= Matorral Sub Tropical Secundario, P.T.=Puntos totales verificados.

Tabla 6. Matriz de error entre la cartografía elaborada por Mas et al. (2016) y datos de campo de COFOM (2014) para categorías de selvas. El color gris (Diag.) representa las categorías que coinciden de igual manera entre el mapa y los datos de campo, el azul es la suma de primarias y secundarias (S/P); son los puntos donde se presenta una diferencia entre vegetaciones primarias y secundarias de la misma categoría y el verde es la diferencia de etiquetas (D/E); categorías que se diferencian en la etiqueta debido al sistema clasificatorio, pero contienen el mismo tipo de bosque.

DATOS DE CAMPO DE COFOM (SELVAS)									
CLASE	MST-P	MST-S	PI/ PC	SBC-P	SBC-S	SMC-P	SMC-S	P. T	Suma
AG-T	1			2	5			8	
BE-P				1			1	2	S/P
BE-S				3	1	2		6	52
BP-S					1			1	
BPE-P				2	1		1	4	
BPE-S				4	1	1		6	
C-A				1		1	1	3	Diag.
PI/ PC	1		1	9	8			19	57
SBC-P	3			46	25	1	2	77	
SBC-S		1		25	10	2		38	
SMC-P				3	1		2	6	TOTAL
P. T	5	1	1	96	53	7	7	170	109

MAPA DE MAS ET AL., 2016

AG R=Agricultura de riego, Ag T=Agricultura de temporal, CUL-PE=Cultivo perenne, A-H=Asentamientos humanos, PI/PC=Pastizal inducido o cultivado, BE-VPA =Bosque de Encino Primario; BE-VSH =Bosque de Encino Secundario, VS= Vegetación Secundaria, BO-P= Bosque de Oyamel Primario, BO-S= Bosque de Oyamel Secundario BP-VP=Bosque de Pino Primario, BMP = Bosque Mesófilo Primario, BPE-P = Bosque de Pino-Encino Primario, BPE-VS = Bosque de Pino-Encino Secundario, C-A= Cuerpo de Agua SBC-P=Selva Baja Caducifolia Primario, SBC-VS= Selva Baja Caducifolia Secundaria, SM=Selva mediana Caducifolia, MTS-P= Matorral Sub Tropical Primario, MTS-S= Matorral Sub Tropical Secundario, P.T.=Puntos totales verificados

La tabla 7 presenta las diferentes clases que se emplearon en los distintos productos para su realización. Se puede observar que están ordenadas por los tipos de vegetación que comparten y pueden ser comparables entre ellos. La clasificación de Mas *et al.* (2016) incluye un menor número de clases (23) que COFOM (27). Además, se aprecia que la clasificación de COFOM identifica mezquital y algunos matorrales. Dichas clases no se incluyen en el mapa de Mas *et al.* (2016).

Tabla 7. Clasificaciones utilizadas en cada cartografía ordenadas por tipos de vegetación comparables.

Tipo	Mas et al., (2016)	COFOM
Agricultura	Agricultura de riego Agricultura de temporal	Agricultura de riego Agricultura de temporal
Asentamientos	Asentamiento humano	Asentamiento humano
		Zona urbana
Cuerpos de agua	Cuerpos de agua	cuerpos de agua
Cultivo perenne	Cultivo perenne	Huertas
Pastizal	Pastizal inducido / pastizal cultivado	Pastizal inducido
Manglar	Manglar	Manglar
Vegetación acuática	Popal-tular	Popal Tular
Bosques	Bosque de encino primario Bosque de encino secundario Bosque de oyamel primario Bosque de oyamel secundario Bosque de pino primario Bosque de pino secundario Bosque mesófilo primario Bosque mesófilo secundario Bosque Pino encino primario Bosque Pino encino secundario	Bosque de encino Bosque de encino-pino Bosque de oyamel Bosque de pino Bosque mesófilo de montaña Bosque de pino-encino
Selvas	Selva baja caducifolia primaria Selva baja caducifolia secundaria Selva mediana caducifolia primaria Selva mediana caducifolia secundaria	Selva baja Selva baja espinosa Selva mediana
Sin Vegetación	Sin vegetación aparente	Banco de material Deslave Erosión Lava volcánica
Matorral		Matorral crasicaule Matorral subtropical
Mezquital		Mezquital
Palmar		Palmar

Comparación entre la cartografía y los puntos de campo en imágenes de alta resolución

La cartografía y los datos de campo muestran un número relativamente alto de inconsistencias con un total de 100 puntos para bosques y 59 en selvas. Esta revisión

considera que ese total de puntos son directamente debidos a errores temáticos. Sin embargo, al cuantificar estos datos por los distintos tipos de inconsistencia se identificó en bosques solamente un 26% de errores temáticos, 30% de tipo geométrico y 44% correspondieron a errores de heterogeneidad. Así mismo, en selvas solo se presentó 32.72% de errores temáticos, 38.18% de errores geométricos y 29.09% de errores de heterogeneidad.

Los errores de tipo temático identificados mediante la inspección visual corresponden a las clases de: cultivos perennes, agricultura y zonas urbanas (mapa) con clases de bosques y selvas: pino, encino, pino-encino y selva baja caducifolia secundaria (sitios de campo). La figura 3 es un claro ejemplo de un error temático por parte de la información de COFOM, el mapa indica la presencia de agricultura y el punto de campo de COFOM hace mención a un bosque de pino-encino. En la figura 4 el mapa etiqueta como cultivo perenne, mientras que el punto de campo de COFOM indica bosque de pino. Otro ejemplo de error temático se ve en la figura 5, donde el mapa clasifica agricultura y el punto de campo de COFOM selva baja caducifolia, mostrando un error de clasificación por parte del mapa.

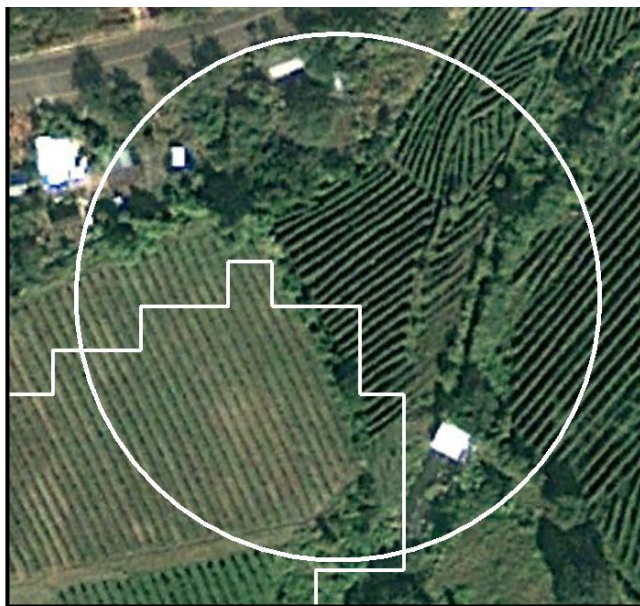


Figura 3. Inconsistencia entre la cartografía (Agricultura) y puntos de campo de COFOM (Bosque de Pino Encino).



Figura 4. Inconsistencia entre la cartografía (Cultivo Perenne) y puntos de campo de COFOM (Bosque de Pino).



Figura 5. Inconsistencia entre la cartografía (Agricultura) y puntos de campo de COFOM (Selva Baja Caducifolia).

Los errores geométricos se observaron principalmente en las zonas de “mosaicos” de CUS, que son áreas donde se intersectan distintas clases. La mayoría de estos casos se deben a un efecto de bordes de origen antrópico como; pastizales cultivados e inducidos, agricultura, cultivos perennes y otros bordes que existen de manera natural en el paisaje, como es el caso de cuerpos de agua y zonas con condiciones distintas entre las cubiertas/ usos. Ejemplos de esto se aprecian en casos donde el mapa indica agricultura y los datos de campo de COFOM señalan la presencia de bosques de pino secundario (figura 6 y 7). Otro ejemplo se presenta en la figura 8, donde el mapa indica agricultura y el punto de campo de COFOM señala selva baja caducifolia secundaria.



Figura 6. Inconsistencia entre la cartografía (Agricultura) y puntos de campo de COFOM (Bosque de Pino Secundario).

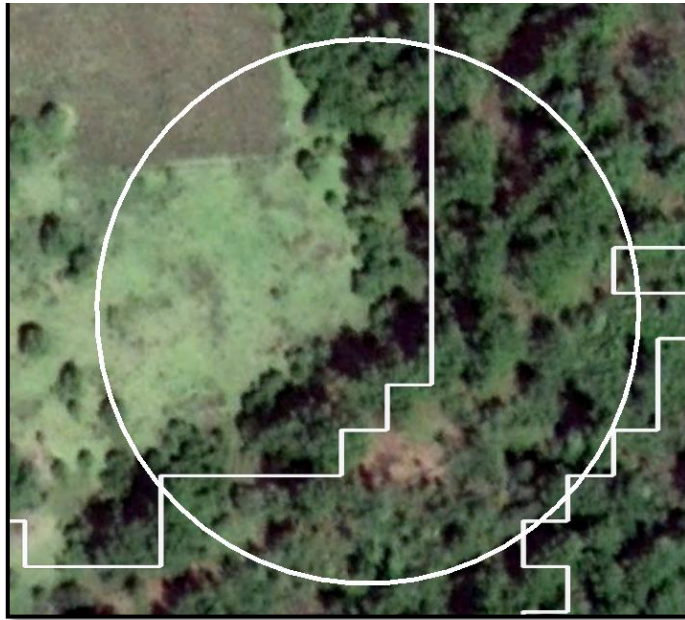


Figura 7. Inconsistencia entre la cartografía (Agricultura) y puntos de campo de COFOM (Bosque de Pino Encino Secundario).



Figura 8. Inconsistencia entre la cartografía (Agricultura) y puntos de campo de COFOM (Selva Baja Caducifolia Secundaria).

Por otro lado, los errores de heterogeneidad presentan importantes inconsistencias entre el mapa y los puntos de campo de COFOM en lugares con paisajes muy fragmentados. Se muestra un ejemplo de lo anterior en la figura 9, donde el mapa indica que hay bosque de pino secundario y el punto de campo de COFOM bosque mesófilo primario. También se presentan discrepancias en las zonas de transición entre clases, principalmente de origen forestal, en la figura 10 se observa que el mapa clasifica como bosque de oyamel y el punto de campo como bosque de pino. Finalmente, se presentan errores en zonas que contienen múltiples cubiertas, como en la figura 11, donde el mapa asigna a esa porción del mapa como un cuerpo de agua y el punto de campo de COFOM selva mediana caducifolia.



Figura 9. Inconsistencia entre la cartografía (Bosque de Pino Secundario) y puntos de campo de COFOM (Bosque Mesófilo Primario)



Figura 10. Inconsistencia entre la cartografía (Bosque de oyamel) y puntos de campo de COFOM (Bosque de Pino).



Figura 11. Inconsistencia entre la cartografía (Cuerpo de Agua) y puntos de campo de COFOM (Selva Mediana Caducifolia).

Discusión y conclusiones

La evaluación de la fiabilidad del mapa del estado de Michoacán exhibe índices de fiabilidad satisfactorios, superando el 80% de fiabilidad global. Dicho nivel de fiabilidad es mayor al que comúnmente se obtiene con cartografía regional (60%; Couturier, 2007) y al encontrado en otros mapas del estado de Michoacán, con fiabilidades del 70% (Couturier *et al.* 2008).

El bajo nivel de fiabilidad entre clases primaria y secundaria de bosques mesófilos y bosques de oyamel se puede deber a la dificultad de detectar dichos estadíos en vegetaciones muy modificadas o fragmentadas, además que sus respuestas espectrales pueden ser muy similares siendo difíciles de distinguir (Wulder *et al.* 2007; Couturier y Mas, 2009). Tal es el caso de dichas clases en el estado de Michoacán las cuales se han visto afectadas en los últimos años por la tala ilegal, incendios forestales, pastoreo y el establecimiento de grandes extensiones de cultivos perennes, principalmente del aguacate (CONABIO,2005).

A pesar de la escala del mapa (1:50,000), es posible realizar la comparación con los puntos de campo, debido a que la unidad mínima cartografiada del mapa fue de 1 ha, igual que la superficie de muestreo de los puntos de COFOM. La comparación entre la cartografía con los puntos de campo de COFOM en bosques y selvas permitió observar las discrepancias y entender sus causas. Estas incongruencias posiblemente se puedan atribuir a los sistemas clasificatorios y a los criterios con los que fueron definidos. De igual manera a la escala utilizada, la fecha de elaboración, así como las temporalidades de los datos recolectados en campo y los diferentes métodos e insumos utilizados, así como los procesos empleados para elaborar la cartografía (corrección geométrica, análisis, captura y representación de las imágenes, así como la calidad de los datos). La comparación entre estos datos de campo y el mapa no permite el cálculo de índices de fiabilidad temática, puesto que los puntos no fueron seleccionados con base a un muestreo estadísticamente robusto basado en los límites del mapa.

Derivado de la comparación de los puntos de campo de COFOM y la cartografía se identificaron inconsistencias temáticas (de etiqueta). Esto se puede deber a diferencias en los sistemas clasificatorios empleados, criterios para definir cuando un parche pertenece a una clase o directamente a errores al asignar la categoría. Sin embargo, también se encontraron problemas geométricos y de ambigüedad, los cuales pueden asumirse como errores temáticos directos del mapa si no se hace una verificación visual como la que se llevó a cabo. Los errores geométricos (de posición), pueden ocurrir en cualquier parte del mapa, pero tienen mayor consecuencia en zonas de mosaico, ya que es alta la probabilidad de encontrar errores de clasificación en zonas donde se intersectan varias cubiertas distintas. Los errores derivados de zonas heterogéneas están directamente relacionados a la complejidad del paisaje observado en las imágenes, ya que no existe uniformidad en la composición y estructura de los objetos de la superficie, lo que produce ambigüedad entre clases, aumentando en zonas con existencia de ecotonos. En dichos casos el foto-intérprete asigna la categoría que cubre mayor proporción del polígono desde la perspectiva aérea. En cambio, en la verificación de campo, la apreciación de las CUS es distinta, debido a la perspectiva in situ.

La integración de información de bases de datos geográficos de distintas fuentes es importante para comparar y evaluar la calidad de la información. Para esto resulta importante que los sistemas clasificatorios sean comparables. Los datos de campo de COFOM permitieron realizar una inspección detallada de los tipos de inconsistencias que pueden surgir al comparar distintas bases de datos. Derivado de esto se encontró que gran proporción de las inconsistencias no se deben a errores temáticos en el mapa, si no a diferencias causadas por la escala, dificultad al delimitar zonas de transición forestal, sistema clasificatorio y heterogeneidad del paisaje.

Capítulo II: Evaluación de la fiabilidad de cambios de cubierta/uso de suelo del estado de Michoacán

Introducción

En los últimos años, gran parte de la superficie terrestre del planeta se ha transformado por la conversión de los paisajes naturales para el uso humano. Estos cambios han tenido como consecuencia la disminución y degradación de los bosques, mediante la expansión de los centros urbanos y la intensificación de la agricultura (DeFries *et al.*, 2004; Foley *et al.*, 2005). A pesar de que las dinámicas relacionadas con dichos procesos son variables en las distintas regiones del planeta, la manera en que se obtienen los recursos para satisfacer las necesidades humanas actuales tiene como resultado impactos negativos en las condiciones ambientales a nivel local y global (Foley *et al.*, 2005).

Los impactos negativos en los recursos forestales son un ejemplo del efecto de las actividades de CCUS, principalmente por la expansión agrícola y la extracción de madera, que han causado una pérdida neta aproximada de 7 a 11 millones de km² de bosques en los últimos 300 años (FAOSTAT, 2004). Dicha pérdida forestal en el mundo es alarmante, ya que se estima que han desaparecido alrededor del 80% de los bosques de África, 70% los bosques de Asia, y en Latinoamérica el 53% ha reducido su cobertura original (FAO, 2007). Países como México, presentan una fuerte presión antrópica sobre sus ecosistemas forestales, pues exhibe altas tasas de CCUS. Se han reportado tasas de deforestación de 0.43% (545, 000 ha/año) en el periodo 1990–2000, y en el periodo 2005–2010 de 0.2% (155 000 ha/año) por parte de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2010).

A pesar de que hay diversos estudios que ayudan a entender los procesos de CCUS en el país a nivel nacional (Velázquez *et al.*, 2002; Mas *et al.*, 2004; Sánchez *et al.*, 2009) y regional (Bocco *et al.*, 2001; Rosete *et al.*, 2008; Mas *et al.*, 2017), existe una gran diversidad

e inconsistencias significativas en las tendencias de cambio publicadas (Mas *et al.*, 2009). Esto es, en parte natural, debido a que cualquier base de datos geográfica presenta un grado de incertidumbre, que, depende principalmente de la calidad de los insumos y de la metodología adoptada para su elaboración (Mas *et al.*, 2004). Generalmente la manera en que se realizan estos análisis cartográficos de CCUS es a través del uso de información de percepción remota, y sus resultados finales derivan de comparar mapas de diferentes fechas. Esta comparación cartográfica es una operación simple dentro de un sistema de información geográfica (SIG): consiste en hacer una sobreposición de mapas de distintas fechas y con esto obtener los tipos de cambio, su superficie y localización (Mas *et al.*, 2003; Mas y Fernández, 2003; Mas *et al.*, 2009).

Este tipo de comparación considera que la información de las cubiertas está correctamente clasificada en los mapas, es decir, que no existe error o la ambigüedad con respecto a su clasificación y delimitación (Mas y Fernández, 2003). Sin embargo, los mapas de cambio son muy sensibles en cuanto a la calidad de su información, tanto debido a características de las imágenes de origen (como la presencia de nubes o ruido atmosférico) como en su precisión geométrica al delimitar los polígonos (Aspinall y Pearson, 1995). Por lo tanto, en muchas ocasiones, los métodos de clasificación llevan a producir falsos cambios, ya que los errores que surgen al etiquetar polígonos con atributos incorrectos (temáticos) y de delimitación imprecisa (posición), producen una sobre-estimación de los cambios (Mas y Fernández, 2003).

Por esto, evaluar la fiabilidad de los CCUS es una tarea de suma importancia. No obstante, estas evaluaciones se consideran particularmente un desafío. La dificultad proviene de algunos problemas como: 1) la gran cantidad de categorías que resultan de la combinación entre las categorías de las diferentes fechas, 2) la imposibilidad de realizar verificación de campo, al menos para la fecha más antigua, además de la dificultad para encontrar fuentes apropiadas de información de alta calidad para las dos o más fechas abordadas por un mapa de cambio, que pueden no estar disponibles para toda el área de interés y/o para todos los períodos de tiempo, 3) el hecho de que las categorías de cambio

representan generalmente una pequeña proporción del área cartografiada, causando una serie de problemas estadísticos que incluyen cuestiones de muestreo y análisis, y estos se magnifican cuando se trabaja con más de un par de imágenes y 4) la identificación de los CCUS a partir de las imágenes digitales requieren de la toma de decisiones subjetivas de acuerdo a las diferencias observadas entre una fecha y otra, así que los mapas de cambio resultan de procesos subjetivos que incluyen una incertidumbre inherente (Mas *et al.*, 2003; Lu *et al.*, 2004; Lowell *et al.*, 2005).

Debido a lo anterior, gran cantidad de la información y estudios previos sobre la evaluación de CCUS no logra proporcionar un análisis estadísticamente robusto de los resultados de la investigación (Lu *et al.*, 2004). Pese a esta complejidad, Olofsson *et al.* (2014) realizaron una síntesis de la información que consideran de mayor utilidad para la evaluación de los mapas de CCUS, y mencionan como uno de los puntos clave de esta metodología la clasificación de la información de referencia (datos para evaluar el mapa), ya que consideran que en las evaluaciones de fiabilidad de CCUS es importante centrarse en la identificación de las fuentes de error, para hacer recomendaciones que beneficien y mejoren los métodos para poder reducir los casos de incertidumbre.

Esto se torna más complicado cuando se evalúan CCUS en zonas de gran heterogeneidad. Este es el caso del estado de Michoacán, el cual cuenta con una gran diversidad de tipos de vegetación y usos de suelo con diferentes niveles de degradación (lo que causa confusión espectral al clasificar la CUS). Además, esta región contiene paisajes con alto grado de fragmentación (compuesto por pequeños parches y fragmentos de vegetación secundaria) y los usos del suelo son múltiples (áreas de agricultura de temporal y bosques degradados también son usados para la ganadería). Michoacán también cuenta con cubiertas forestales que presentan diferentes grados de perturbación, lo cual complica definir su estado de conservación/degradación con base en información espectral. Así mismo, esta zona del país se caracteriza por su paisaje dinámico que presenta cambios en diferentes escalas de tiempo (cambios fenológicos, quemados, rotaciones de cultivos o cambios permanentes; Mas *et al.*, 2016; Mas *et al.*, 2017), e históricamente se considera un

lugar con intensos procesos de CCUS principalmente por deforestación y degradación forestal.

Debido a esto, el presente trabajo se enfocó en realizar una evaluación de la fiabilidad de la cartografía de cambios en la cubierta forestal de Michoacán generado por Mas *et al.* (2016), correspondiente al periodo 2004—2014. Además, con el fin de identificar los tipos de incongruencias entre los datos del mapa y la información de referencia, se realizó una inspección visual de los mismos sobre imágenes de alta resolución.

Metodología

Diseño de la evaluación de fiabilidad de CCUS

Debido a que el interés de este análisis fue evaluar la fiabilidad de cambios en la cubierta forestal del mapa de Michoacán elaborado por Mas *et al.*, (2016), fue necesario complementar la muestra de cambios respecto al mapa, ya que estas categorías por lo general cubren una proporción pequeña del área cartografiada. El aumentar el número de sitios para la muestra permite tener mejor representatividad del área, así como evaluar posibles cambios que no se encuentran detectados en la cartografía. Para esto se emplearon los límites correspondientes a CCUS de la cartografía generada por Hansen *et al.* (2013), los cuales funcionaron como apoyo para la estratificación de los cambios. Para esto, primero fue necesario recategorizar ambas bases de datos con la finalidad de enfocarse sólo en las cubiertas forestales, haciendo ambas bases de datos comparables entre ellas. Para ello se extrajeron de las distintas capas de Hansen *et al.* (2013) y Mas *et al.* (2016) solo los años de estudio correspondientes al periodo 2004—2014.

En el caso de la cartografía de Hansen *et al.* (2013), se unieron sus distintos mapas para obtener las categorías etiquetadas como: *Forest cover*, *Forest loss* y *Forest gain*. Dichas capas fueron generadas con base en una clasificación por pixel, teniendo un importante efecto “sal y pimienta”. Por lo anterior se aplicó un filtro mayoritario, el cual genera clusters

a partir de grupos de píxeles adyacentes que presentan el mismo valor en el mapa, ayudando de esta manera a limpiar este efecto. Con el objetivo de que la resolución entre la información fuera comparable, se eliminaron grupos de píxeles que tuvieran un área menor a una hectárea, que es el área mínima del mapa de Mas *et al.* (2016).

Posteriormente se realizó una simplificación de las categorías para que la información fuera lo más comparable posible. Las categorías forestales finales para el mapa de Mas *et al.* (2016) fueron: pérdida, degradación, ganancia, recuperación, estasis forestal y estasis no forestal. Sin embargo, con la cartografía de Hansen no fue posible generar todas las clases, debido a que dicha información no diferenció categorías de cambio intermedias (primario y secundario), por lo que las clases finales de dicho mapa fueron: ganancia, pérdida, estasis forestal y estasis no forestal. Se define a continuación el criterio empleado para definir cada una de estas categorías:

- Pérdida: Parches de cubierta forestal que sufrieron un grado de deforestación tal, que su categoría final no es forestal.
- Degradación: Parches de cubierta forestal que pasaron de bosque primario a secundario.
- Ganancia: Parches inicialmente sin vegetación arbórea donde se estableció cubierta forestal.
- Recuperación: Parches de cubierta forestal que pasaron de secundario a primario.
- Estasis Forestal: Parches cubiertos por bosques que no sufrieron cambios durante el periodo de estudio.
- Estasis no Forestal: Parches sin cubierta forestal que no sufrieron cambios durante el periodo de estudio.

Se prosiguió a hacer una intersección entre ambos mapas para identificar las combinaciones que presentaban entre sí, y de esta manera obtener un mapa que combinara y presentara los límites de ambos. Estas combinaciones se utilizaron para realizar el muestreo aleatorio estratificado. Para ello se definieron aproximadamente 20 puntos por combinación, de

acuerdo a la disponibilidad, dependiendo el número de parches de cada combinación y que tuvieran un área mínima a 1 ha (área mínima cartografiable).

Los puntos aleatorios estratificados obtenidos se foto-interpretaron, utilizando imágenes SPOT 5 fusionadas del 2004 y 2014 e imágenes de Google Earth (alta resolución), logrando de esta manera visualizar y clasificar los datos en las distintas clases de cambios entre fechas. Después se interseccionaron los puntos foto-interpretados con el mapa combinado de Mas *et al.* (2016) y Hansen *et al.* (2013), para obtener una matriz con las categorías de cada productor y el total de los puntos verificados (342). Finalmente se verificaron los puntos inconsistentes entre los datos del intérprete y el mapa, usando los límites que representan los cambios en el mapa, para poder comparar y explicar de esta manera las posibles incongruencias que sugirieron entre la información cuantificando los diferentes tipos de incongruencias (temáticas, geométricas y de heterogeneidad). Finalmente se generaron algunas capturas de imágenes que ejemplifican cada tipo de incongruencia entre la información.

Resultados

Comparación del mapa y los datos de referencia

La tabla 8 muestra el área en km² que cubre cada combinación en el mapa y en la tabla 9 se puede observar el número de puntos aleatorios estratificados asignados por cada una de estas combinaciones entre el mapa de Mas *et al.* (2016) y Hansen *et al.* (2013). A pesar de que el número de puntos era 20, no en todas las combinaciones se logró este objetivo, debido a que determinadas combinaciones solo tenían polígonos menores a la unidad mínima cartografiable del mapa, por lo tanto, no se les asignó ningún punto (relleno rojo). En otras combinaciones solo un polígono (relleno amarillo) cumplía con la unidad mínima del mapa y en otros casos se agregaron solo 10 puntos por ser clases de menor interés respecto al objetivo del estudio (relleno verde).

Tabla 8. Área en km² de las combinaciones utilizadas para la estratificación de la información de Mas *et al.* (2016) y Hansen *et al.* (2013).

MAPA DE MAS ET AL., (2016)	HANSEN ET AL., (2013)				
	Clase	Ganancia	Pérdida	Estasis forestal	Estasis no forestal
	Degradación	0.01	1.99	343.68	196.34
	Ganancia	0	0.01	12.34	17.49
	Pérdida	0.09	5.56	320.20	206.33
	Recuperación	0.01	0.03	56.60	15.82
	Estasis forestal	5.96	19.93	27574.01	10540.82
Estasis no forestal	8.25	40.97	6006.06	20279.15	

Tabla 9. Puntos aleatorios estratificados asignados por combinación.

MAPA DE MAS ET AL., (2016)	HANSEN ET AL., (2013)				
	Clase	Ganancia	Pérdida	Estasis forestal	Estasis no forestal
	Degradación	0	20	20	20
	Ganancia	0	1	20	20
	Pérdida	20	20	20	20
	Recuperación	0	1	20	20
	Estasis forestal	20	20	10	10
Estasis no forestal	20	20	10	10	

Rojo= Combinaciones sin la unidad mínima del mapa, Amarillo= Un polígono en la combinación que cumplía con la unidad mínima y verde= Combinaciones de menor interés en el estudio.

La tabla 10 corresponde a la matriz bruta entre las distintas clases del mapa y los datos del intérprete. La fiabilidad global de los cambios del mapa es de 72%, esta fiabilidad incluye la corrección por el sesgo del área, de acuerdo con Card (1982). Se observa que las categorías con mayor coincidencia son: estasis forestal (39), estasis no forestal (50) y pérdida (46) y categorías como: degradación (37), recuperación (25) y ganancia (20) son las del menor número de concordancias.

Tabla 10. Matriz bruta entre la cartografía y los datos verificados por el intérprete.

MAPA DE MAS ET AL. (2016)

Datos de Referencia							
Clase	Estasis forestal	Estasis no forestal	Degradación	Pérdida	Recuperación	Ganancia	Total
Estasis forestal	39	3	6	4	5	3	60
Estasis no forestal	2	50		5		3	60
Degradación	7	4	37	11	1		60
Pérdida	11	8	3	46	6	6	80
Recuperación	12	3		1	25		41
Ganancia	6	10	3	1	1	20	41
Total	90	91	39	68	33	21	342

La tabla 11 con los datos de inconsistencias entre el mapa y los datos del intérprete, representa la información solo para las clases de degradación y pérdida, ya que son las de mayor interés para este estudio. Se observa que la combinación degradación (mapa) - pérdida (intérprete) es la que contiene la mayor cantidad de inconsistencias, seguido de la combinación estasis forestal (mapa) - degradación (intérprete). En la tabla 12 se observan las incongruencias encontradas entre las combinaciones de degradación y pérdida, divididas por el número y tipo de inconsistencia: temático, geométrico y heterogeneidad. Las inconsistencias derivadas de la heterogeneidad del paisaje representan 44.11% del total de errores, seguidas por los de tipo geométrico con 29.47% y los errores temáticos con 26.47%.

Tabla 11. Matriz entre la cartografía y los datos verificados por el intérprete solo para las inconsistencias de interés.

MAPA MAS ET AL. (2016)	Datos de Referencia			
	Clase	Degradación	Pérdida	Total
	Degradación		11	11
	Ganancia	3	1	4
	Pérdida	3		3
	Recuperación		1	1
	Estasis forestal	6	4	10
	Estasis no forestal		5	5
	Total	12	22	34

Tabla 12. Número y tipo de incongruencias encontradas para cada combinación entre la cartografía y los datos verificados por el intérprete.

MAPA MAS ET AL. (2016)	Datos de Referencia			
	Clase	Degradación	Pérdida	Total
	Degradación		8 (H) 2 (G) 1 (T)	11
	Ganancia	2 (T) 1(G)	1 (G)	4
	Pérdida	2 (H) 1 (G)		3
	Recuperación		1 (T)	1
	Estasis forestal	1 (T) 1 (G) 4(H)	1(G) 1 (H) 2 (T)	10
	Estasis no forestal		3 (G) 2(T)	5
	Total	12	22	34

H=errores de heterogeneidad, G=errores geométricos y T= errores temáticos.

Verificación visual de las inconsistencias

Derivado de la revisión de las inconsistencias entre los datos del intérprete y el mapa para los datos de CCUS, se identificaron diversos ejemplos de los tipos de error entre las combinaciones. A continuación, se observan algunas capturas tomadas en el periodo 2004 (imagen izquierda) y 2014 (imagen derecha) de estas inconsistencias. En estos ejemplos se puede ver que la mayoría de los errores temáticos son principalmente entre las categorías de estasis forestal y estasis no forestal con la categoría de pérdida. Dichos casos surgieron al clasificar erróneamente como cultivos perennes áreas cubiertas por bosques primarios y secundarios (Fig. 12), así como zonas donde los cultivos de menor tamaño se confunden con zonas de bosque muy degradadas (Fig.13) y otras con zonas boscosas que limitaban con campos de cultivo (Fig.14).

Inconsistencias temáticas:

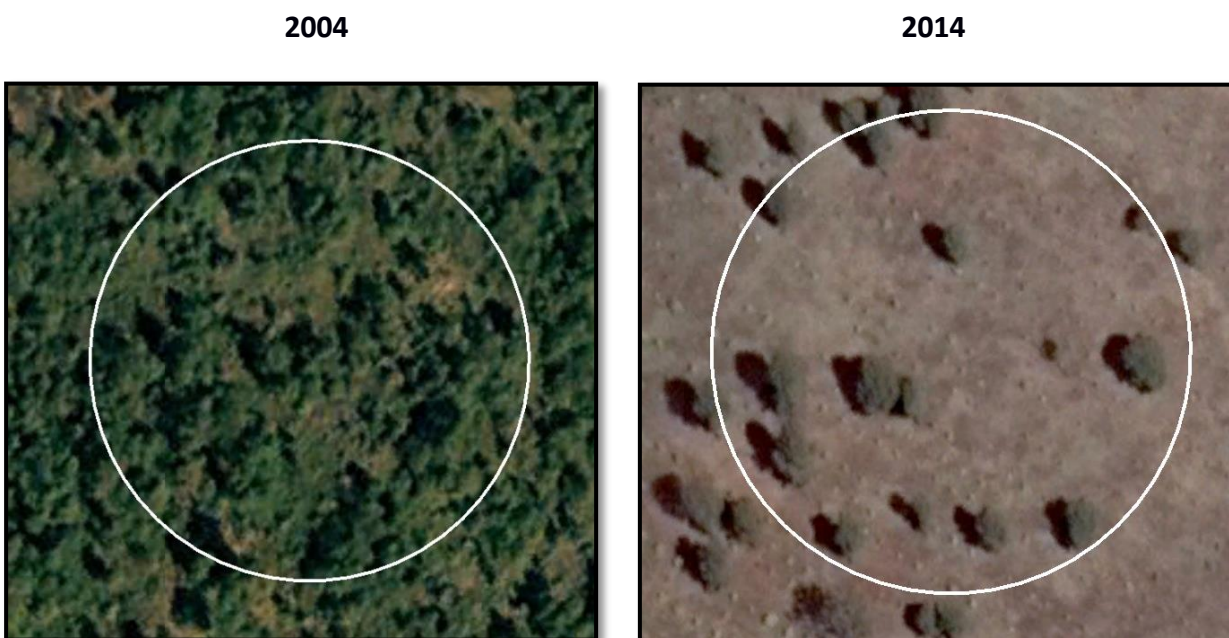


Figura 12. Inconsistencia entre la cartografía (Estasis forestal) y los datos de referencia (Pérdida) del periodo 2004—2014.

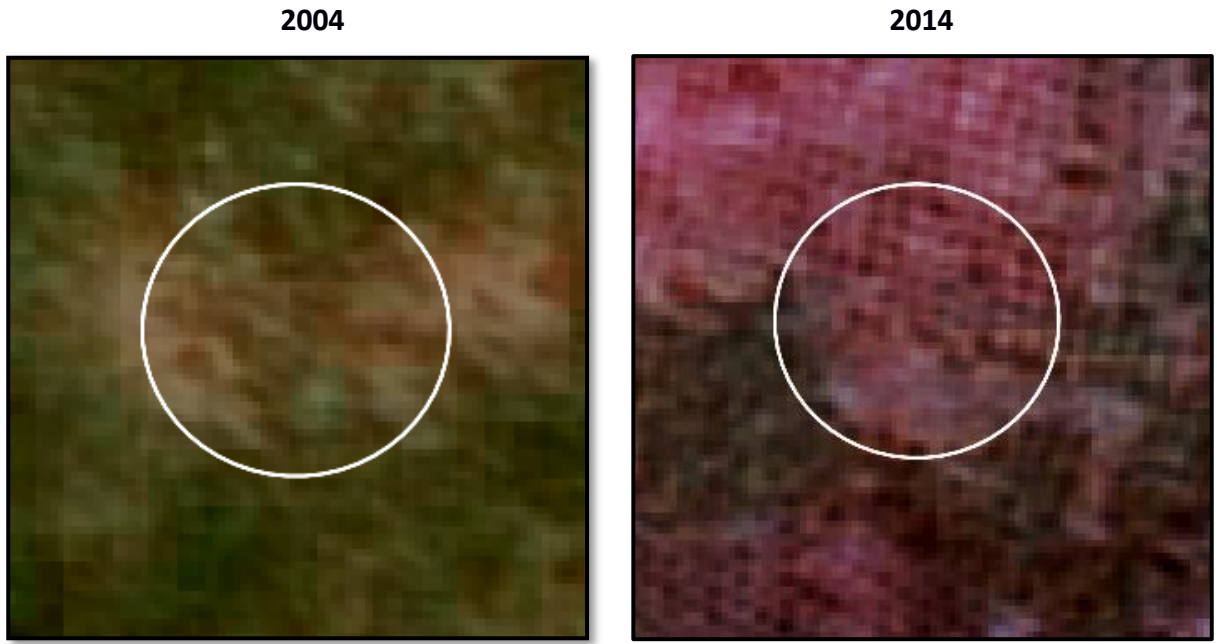


Figura 13. Inconsistencia entre la cartografía (Estrías no forestal) y los datos de referencia (Pérdida) del periodo 2004—2014.

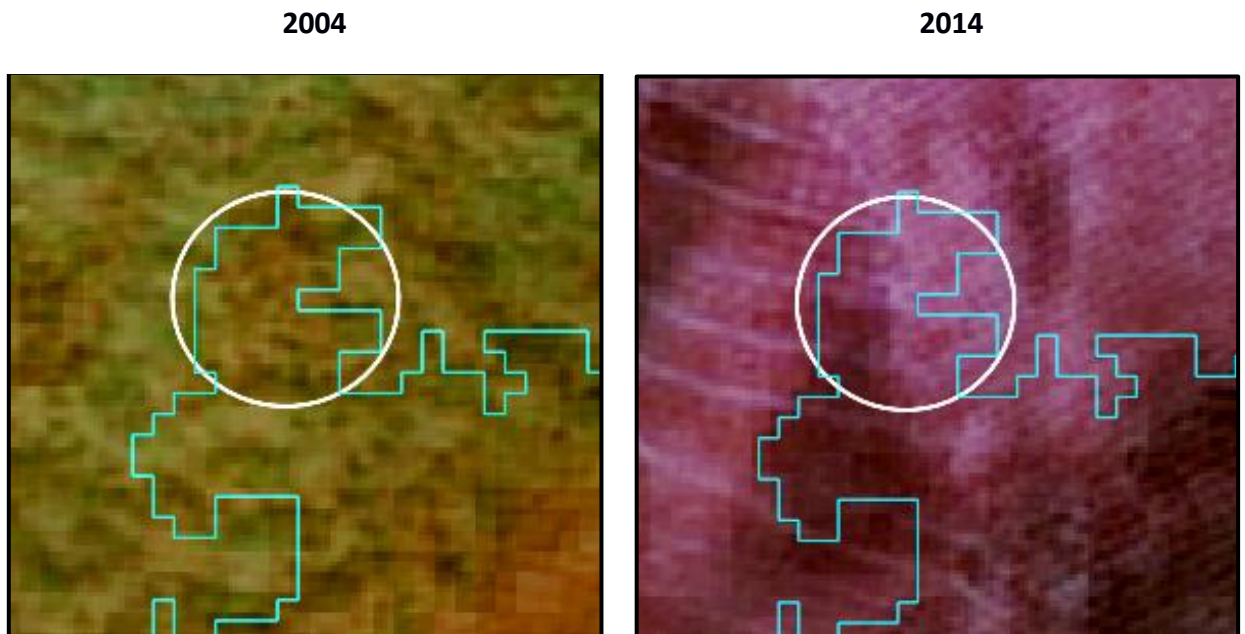


Figura 14. Inconsistencia entre la cartografía (Estrías no forestal) y los datos de referencia (Pérdida) del periodo 2004—2014.

Se observan errores geométricos, principalmente en los límites entre diferentes categorías, tanto del mapa como del intérprete. Esto se presenta, por ejemplo, en casos en los que el mapa clasifica con la categoría de ganancia y el intérprete como degradación (Fig. 15), donde la mitad de la zona verificada mantiene su vegetación en el periodo de tiempo y la mitad restante exhibe cierto grado de degradación. Otro ejemplo se observa cuando la cartografía clasifica este periodo de cambio como estasis no forestal y el dato del intérprete señala pérdida de vegetación (Fig. 16). Sin embargo, la imagen muestra que la mitad del área verificada coincide con la pérdida y la otra con la estasis forestal. Así mismo, otra combinación entre la cartografía (degradación) y el intérprete (pérdida), es un ejemplo más de este tipo de error (Fig. 17), apreciando de esta manera cómo el límite divide la zona a verificar de tal manera que se pueden cumplir cualquiera de las dos categorías asignadas.

Inconstancias geométricas:

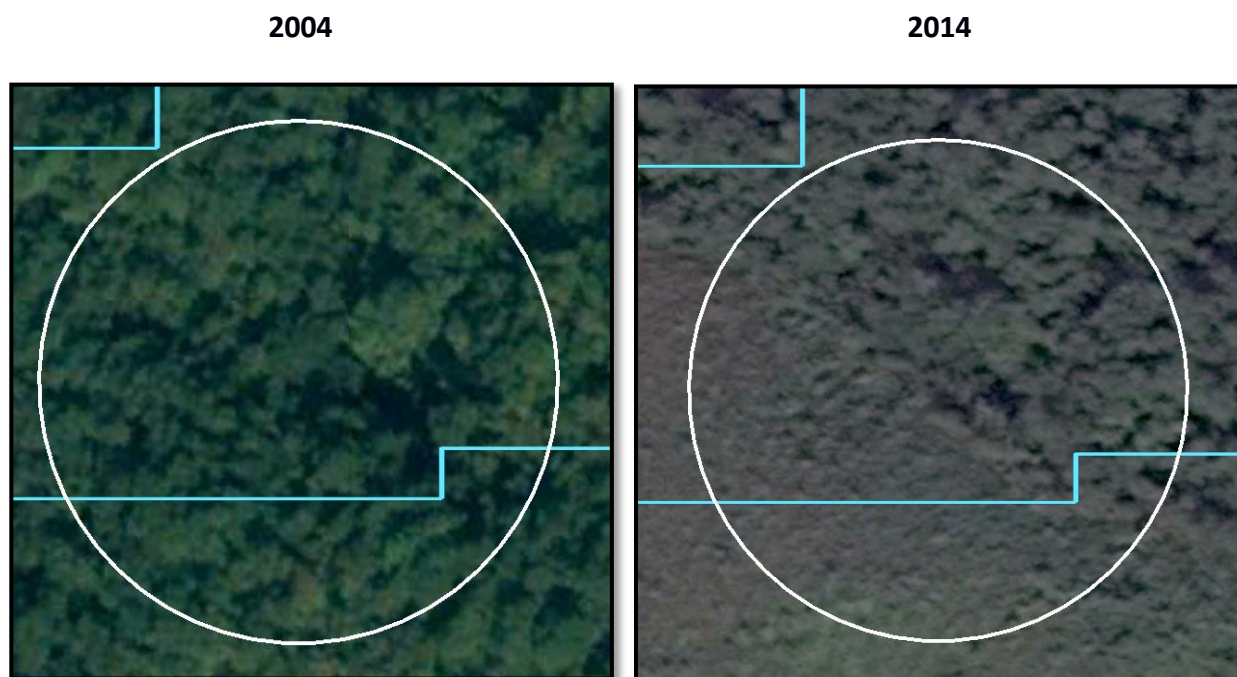


Figura 15. Inconsistencia entre la cartografía (Ganancia) y los datos de referencia (Degradación) del periodo 2004—2014.

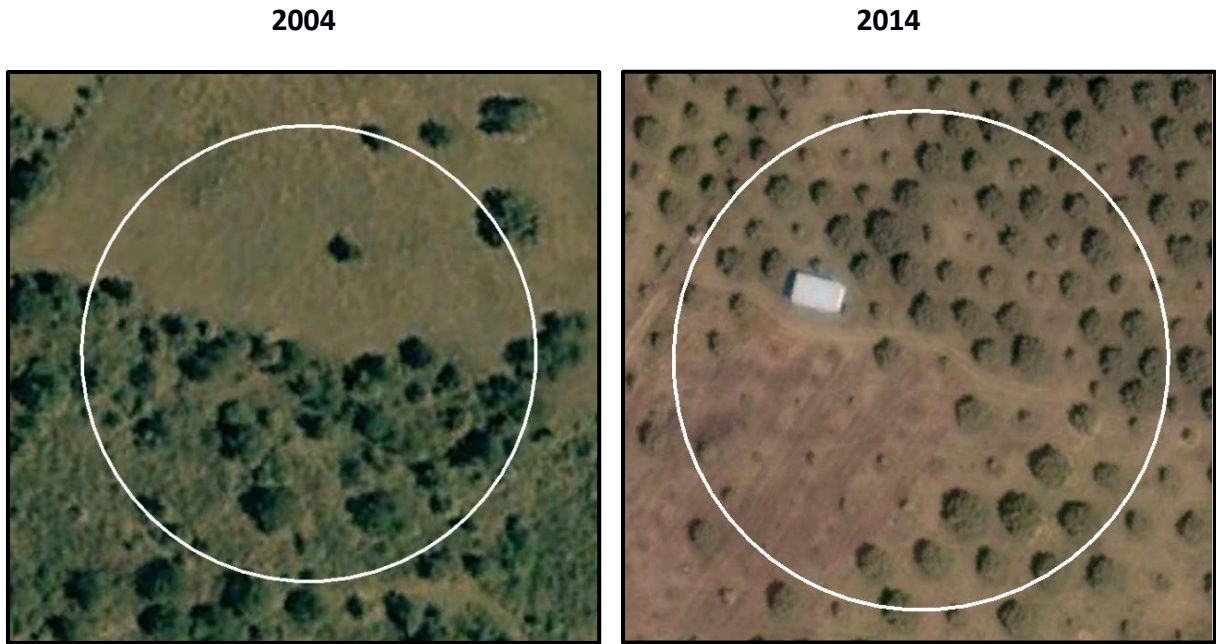


Figura 16. Inconsistencia entre la cartografía (Estrías no forestal) y los datos de referencia (Pérdida) del periodo 2004—2014.

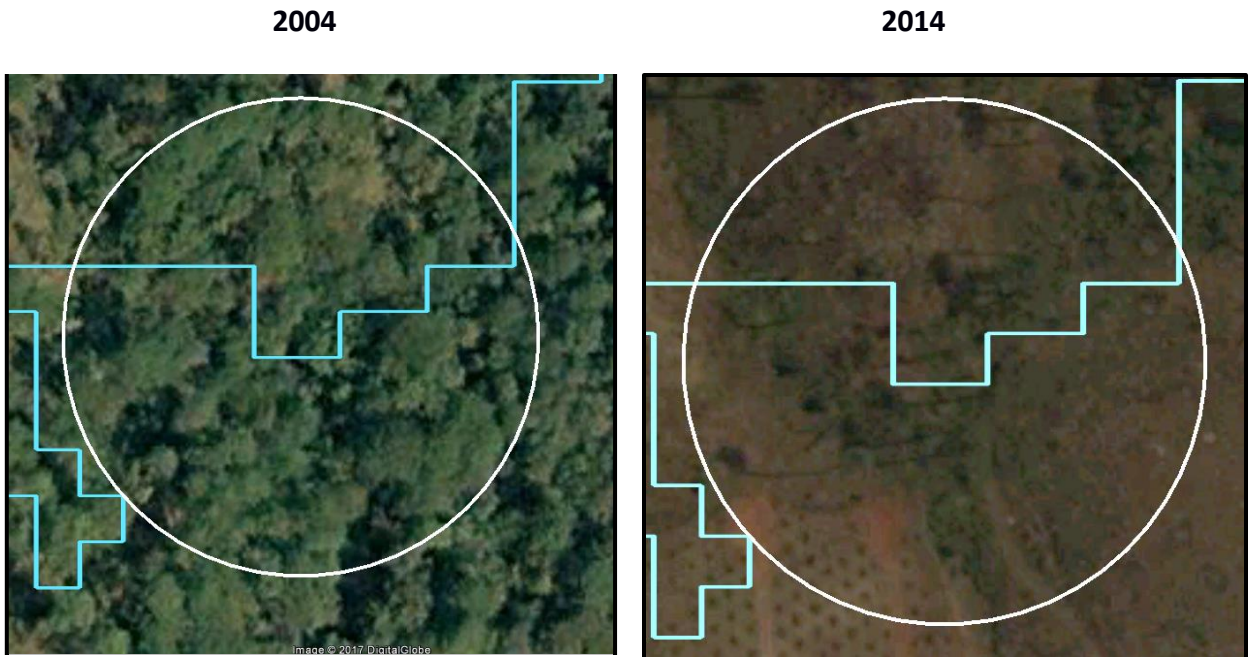


Figura 17. Inconsistencia entre la cartografía (degradación) y los datos de referencia (Pérdida) del periodo 2004—2014.

Los errores de heterogeneidad fueron los que se presentaron en mayor número dentro de las combinaciones. Estos se percibieron en algunas zonas de transición, principalmente donde hay vegetación forestal (Fig. 18). En este caso el mapa indica que no hubo un cambio (estasis forestal) y el dato de referencia señala el parche como degradación. Lo mismo ocurre en áreas con paisajes muy fragmentados. Tal es el caso que se muestra en la figura 19, donde la cartografía clasifica como pérdida y la información de referencia menciona que hay degradación. Por último, se observan estos errores en casos donde existen múltiples cubiertas. En los cuales el mapa asigna que hay degradación y el dato de referencia pérdida (Fig. 20).

Inconsistencias de heterogeneidad:

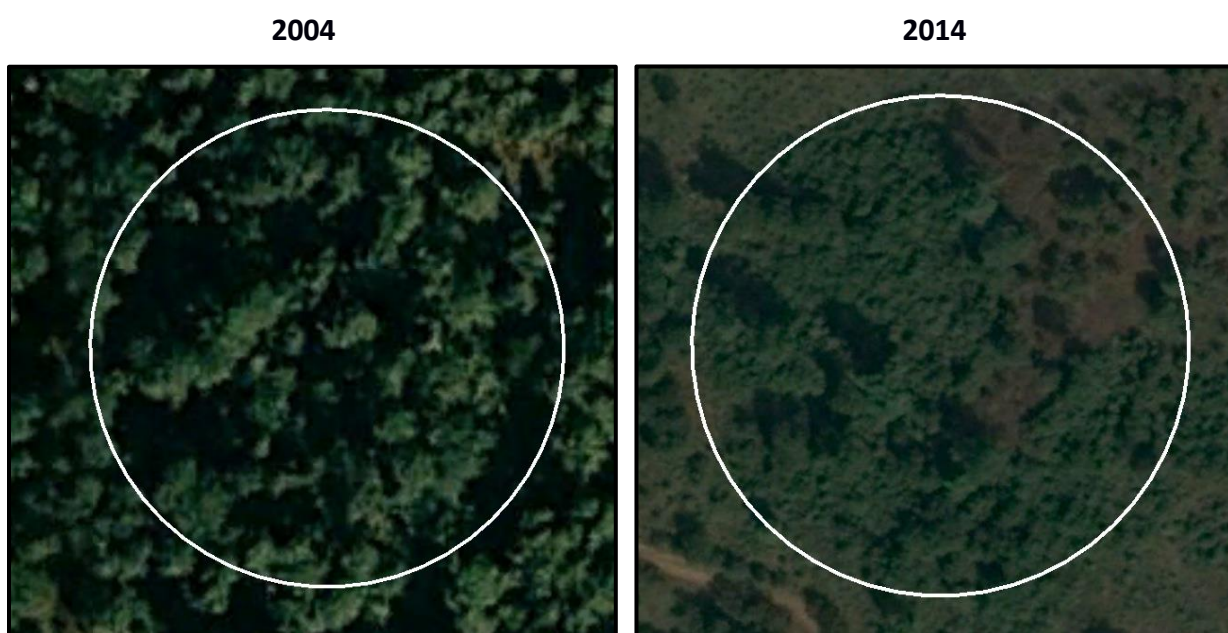


Figura 18. Inconsistencia entre la cartografía (Estasis forestal) y los datos de referencia (Degradación) del periodo 2004-2014.

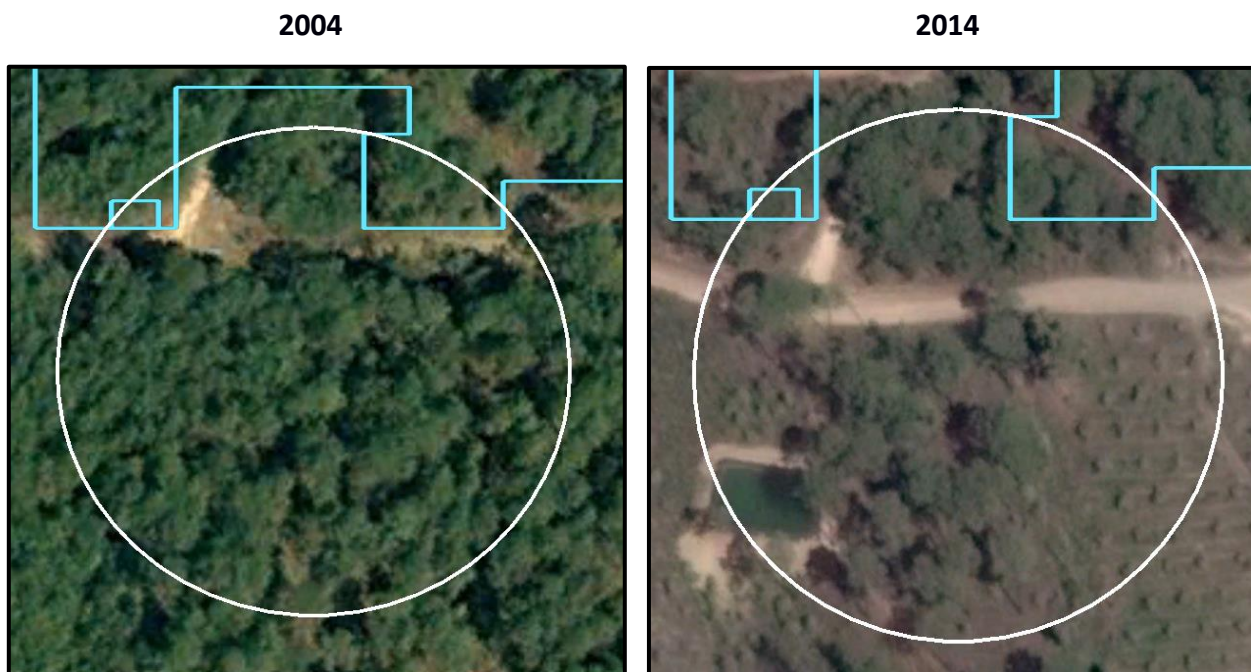


Figura 19. Inconsistencia entre la cartografía (Pérdida) y los datos de referencia (Degradación) del periodo 2004-2014.

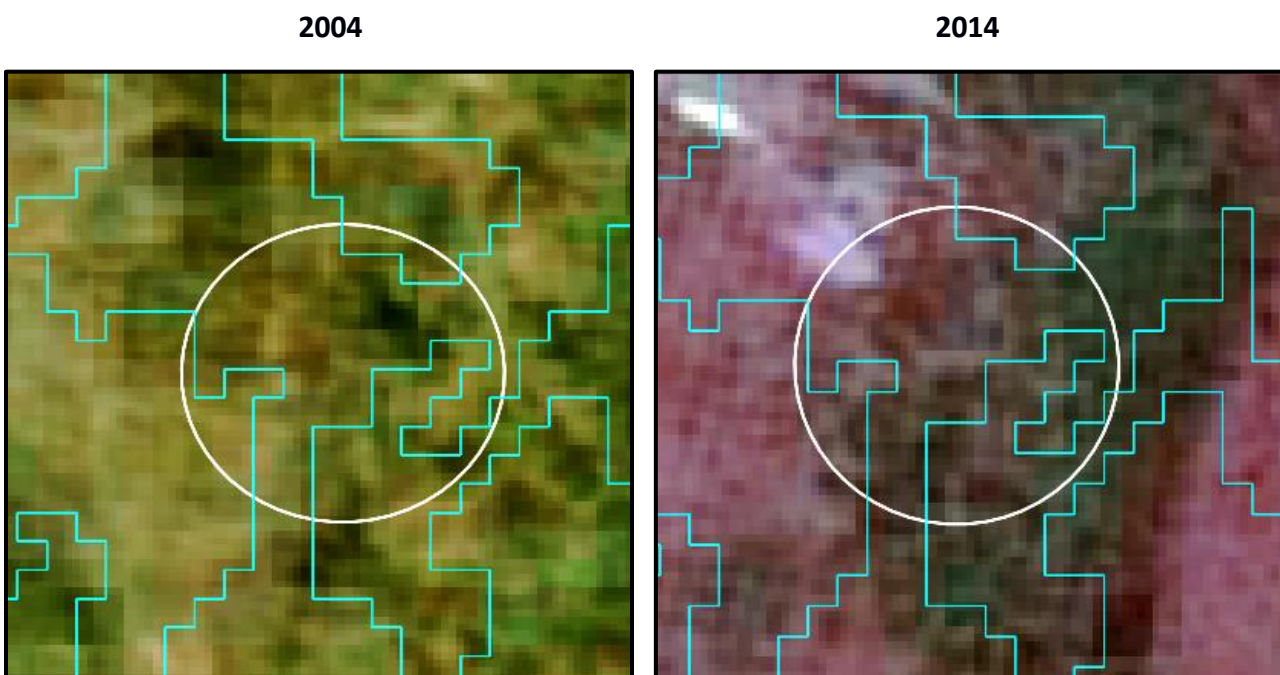


Figura 20. Inconsistencia entre la cartografía (Degradación) y los datos de referencia (Pérdida) del periodo 2004-2014.

Discusión y conclusiones

El objetivo de este capítulo fue evaluar la fiabilidad de los CCUS detectados en la cartografía de Mas *et al.* (2016), utilizando un muestreo estratificado con el objetivo de proporcionar información que ayude a determinar la existencia de problemas generales al elaborar esta cartografía. La evaluación entre los CCUS del mapa y la información de referencia para el estado de Michoacán indica una fiabilidad global de 72%. Sin embargo, al verificar visualmente en las imágenes de alta resolución las inconsistencias correspondientes a cambios en cubiertas forestales, se puede notar que la mayor parte de estas diferencias no son realmente errores de clasificación, sino que son inconsistencias de tipo geométrico y de heterogeneidad, más que errores temáticos, como generalmente se asume.

Este trabajo se enfocó en evaluar las categorías de pérdida y degradación, por esto, la revisión de las incongruencias entre los datos de CCUS del mapa y la información del intérprete se concentró en las combinaciones que incluían estas categorías. Esto permitió identificar la presencia de diferentes tipos de error. Usualmente se asume que los errores en un mapa son de tipo temático. Es importante considerar otros tipos de error en la elaboración de la cartografía de cambios, para entender los distintos casos de incongruencias que pueden generar falsos CCUS al sobreponer distintos mapas (Mas *et al.*, 2004; Mas, 2005). Los resultados que se obtuvieron mostraron los errores temáticos y geométricos con el menor porcentaje de ocurrencia, esto se puede deber a la utilización del método de interpretación interdependiente (FAO, 1998), lo que permitió supervisar visualmente los cambios. Sin embargo, detectar cambios en zonas de alta heterogeneidad representa gran dificultad, incluso cuando se foto-interpretan visualmente los cambios. Aunque no se encontró un estudio que haya cuantificado este tipo de error de manera particular, algunos autores mencionan el efecto que tiene la heterogeneidad y/o el aumento de la fragmentación del paisaje en la fiabilidad, provocando que esta tenga una disminución significativa (Smith *et al.*, 2000).

La ocurrencia de estos tipos de error en la cartografía de CCUS se puede atribuir a la presencia de zonas de transición entre cubiertas sin bordes definidos (por ejemplo, un bosque primario y un cultivo perenne), áreas fragmentadas; donde se pueden encontrar múltiples cubiertas (pastizales, bosques primarios, áreas de cultivo, cuerpos de agua) y estadíos de transición temporal entre tipos de vegetación. Se considera que la incertidumbre al definir las clases provoca un mayor efecto en la ocurrencia de estos errores a la hora de interpretar. Lo anterior, sumado con la complejidad del paisaje, el cual por naturaleza presenta casos ambiguos tanto de origen natural como antrópico, deriva en una alta probabilidad de que las áreas a verificar se ubiquen en bordes entre clases o zonas altamente heterogéneas. Lo anterior se multiplica cuando se trabaja con cambios, especialmente cuando se incluyen categorías de difícil interpretación, como es la degradación (FAO, 2011).

Las categorías de CCUS representan una proporción pequeña del área cartografiada, debido a esto el tamaño de la muestra de los sitios a verificar en los estudios de evaluación de fiabilidad de CCUS es uno de los mayores problemas a la hora de evaluar dicha información. A pesar de esto, el número de sitios que se utilizaron para este trabajo (342) nos permitió encontrar diversos tipos de incongruencias presentes en los mapas del estado de Michoacán gracias a la estratificación apoyada en los límites de la cartografía de Hansen et al. (2013).

Conclusiones finales

La evaluación de la fiabilidad de la cartografía elaborada por Mas *et al.* (2016) del estado de Michoacán escala 1:50,000 con el diseño estadístico utilizado, indicó una fiabilidad arriba del 80%, además permitió identificar las debilidades (baja fiabilidad en clases muy perturbadas) y fortalezas (alta fiabilidad en vegetación primaria, cultivos y zonas urbanas) del mapa. Esta información es de utilidad a la hora de tomar decisiones, ya que, en los

últimos años es más frecuente que estos insumos sean utilizados para el diseño de políticas de conservación y planeación del territorio.

En el caso de la evaluación con información de campo de COFOM, ésta integración de datos geográficos ayudó a identificar las diferentes incongruencias que pueden existir que no necesariamente se deben considerar errores del mapa, ya que son diferencias causadas por la escala, el uso de diferentes sistemas clasificatorios no compatibles, la heterogeneidad del paisaje y la dificultad al delimitar zonas de transición forestal.

La evaluación de la fiabilidad de los mapas de CCUS resulta tener un mayor grado de complejidad que la evaluación de mapas estáticos, debido a la dificultad de obtener información precisa en cuanto a la temporalidad y cantidad de los cambios, por ser eventos que regularmente cubren una proporción muy pequeña de los mapas, por la disponibilidad de imágenes de calidad para realizar foto-interpretación de las distintas fechas y por la limitante de sólo poder realizar verificación en campo para la fecha actual. Sin embargo, en caso de ausencia de mayor información, es aceptable el uso de una evaluación como la realizada en este trabajo, la cual permite un acercamiento para conocer la fiabilidad de cambios. En este caso específico, permitió contrastar la información del mapa con los datos de referencia mediante la complementación de posibles parches de cambio detectados por Hansen et al. (2013), obteniendo de esta manera una mayor cantidad de límites para verificar que no son posibles cuando se emplean los cambios detectados por un solo productor.

Verificar visualmente las inconsistencias entre los diferentes datos ayudó a cuantificar el porcentaje de los distintos tipos de inconsistencias, con la finalidad de identificar cuáles corresponden a errores de clasificación del mapa o inconsistencias derivadas de la geometría o heterogeneidad del paisaje. Por otro lado, puede ser importante incluir los polígonos del mapa (en caso de evaluaciones vectoriales) con los sitios a verificar al momento de realizar la inspección visual, con la finalidad de contar con mayor comparabilidad en términos geométricos. De este modo dicho factor se sumará a la

experiencia del foto-intérprete, la definición adecuada de los sistemas clasificatorios y el conocimiento del impacto que tiene la composición del paisaje (*e.g.*, heterogeneidad), con el fin de obtener resultados menos subjetivos y disminuir la cantidad de sesgos en las evaluaciones de fiabilidad cartográfica.

El presente trabajo representa un acercamiento a la evaluación de fiabilidad de mapas de CUS estáticos y de CCUS, así como la identificación de los tipos de inconsistencias que se pueden encontrar al comparar los puntos de verificación para realizar las evaluaciones y la cartografía. Resulta importante explorar más a fondo este tipo de factores, ya que afectan el resultado final de la evaluación cartográfica de forma importante. De esta forma es posible generar propuestas de verificación estandarizadas que disminuyan dichas inconsistencias, las cuales no necesariamente representan errores de clasificación, con el fin de mejorar las técnicas de verificación y en consecuencia de evaluación de fiabilidad cartográfica.

Bibliografía

- Aspinall, R. y D. M. Pearson. (1995), "Describing and managing uncertainty of categorical maps in GIS", Fisher, P. (ed.), Innovations in GIS 2, Taylor & Francis, London, pp. 71-83.
- Bocco, G., M. Mendoza y O. Masera. (2001). La dinámica del cambio Del uso del suelo en Michoacán. Investigaciones Geográficas, 44:18-38.
- Büttner, G. y G. Maucha. (2006). The thematic accuracy of CORINE Land Cover 2000: Assessment using LUCAS. Reporte técnico de la Unión Europea, Report No7. Disponible en: [http:// reports.eea.europa.eu](http://reports.eea.europa.eu). Consultado en marzo de 2016.
- Card, H. D. (1982). "Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48 (3):431-439.

- COFOM (Comisión Forestal del Estado de Michoacán). (2014). Inventario Estatal Forestal y de Suelos, Michoacán de Ocampo, México. 377 p.
- CONABIO (Comisión Nacional de Biodiversidad). (2005). La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2011). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. SEMARNAT. México. 58 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2013). Inventario Estatal Forestal y de Suelos, Michoacán de Ocampo, México. 170 p.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2007). Regiones Hidrológicas. Escala 1:250,000.
- Couturier, S. (2007). Evaluación de errores de cartas de cobertura vegetal y uso del suelo con enfoque difuso y con la simulación de imágenes de satélite. Programa de Doctorado en co-tutela UNAM–UPS (Universidad P. Sabatier, Francia). Doctorado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Couturier, S. y Mas., J.-F. (2009). ¿Qué tan confiable es una tasa de Deforestación? Cómo evaluar nuestros mapas con rigor estadístico. *Investigación ambiental* 1(2).
- Couturier, S., A. Vega, J. F. Mas, V. Tapia y E. López-Granados. (2008). Evaluación de confiabilidad del mapa del Inventario Forestal Nacional 2000: diseños de muestreo y caracterización difusa de paisajes. *Investigaciones Geográficas (UNAM)* 67:20-38.
- DeFries, R. S., Foley, J. A. and Asner, G. P. (2004), Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2: 249–257. doi:10.1890/1540-9295(2004)002[0249:LCBHNA]2.0.CO;2
- Food and Agriculture Organization, FAOSTAT Forestry Database (2004).
- Food and Agriculture Organization. (2007). Situación de los bosques del mundo 2007. Food and Agriculture Organization, 143 p.
- Goodchild, M. F., S. Gouquing y Y. Shiren. (1992). "Development and test of an error model for categorica data", *International Journal of Geographical Information Systems*, 6:87-104.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2011). Cuéntame. Información por entidad. Michoacán de Ocampo. Panorama Sociodemográfico de México Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [En línea]. Fecha de consulta 1 de marzo de 2017. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mich/territorio/default.aspx?tema=me&e=16>.
- J. A. Foley, R. Defries, G. P. Asner, C. Barford, G. Bonan, S. R. Carpenter, F. S. Chapin, M. T. Coe, G. C. Daily, H. K. Gibbs, J. H. Helkowski, T. Holloway, E. A. Howard, C. J. Kucharik, C. Monfreda, J. A. Patz, I. C. Prentice, N. Ramankutty, P. K. Snyder, Global consequences of land use. *Science* 309, 570–574 (2005). doi:10.1126/science.1111772pmid:16040698
- Janssen, L. F. y F. J. van der Wel. (1994). "Accuracy assessment of satellite derived landcover data, a review", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(4):419-426.
- Laba, M., S. K. Gregory, J. Braden, D. Ogurcak, E. Hill, E. Fegraus, J. Fiore and S. D. DeGloria. (2002). "Conventional and fuzzy accuracy assessment of the New York Gap Analysis Project land cover map". *Remote Sensing of Environment*, no. 81, pp. 443-455.
- Lambin, E. F. (1997). "Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions", *Progress in Physical Geography*, 21, 3:375-393.
- Lambin, E. F., B. L. Turner II, H. Geist, S. Agbola, A. Angelsen, J. W. Bruce, O. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E. F. Moran, M. Mortimore, P. S. Ramakrishnan, J. F. Richards, H. Skånes, W. Steffen, G. D. Stone, U. Svedin, T. Veldkamp, C. Vogel y J. Xu. (2001). *The Causes of Land-Use and -Cover Change: Moving bey*.
- Lowell KE, Richards GP, Woodgate P, Jones S, Buxton L. (2005). Fuzzy Reliability assessment of multi-period land-cover change maps. *Photogramm Eng Remote Sens* 71:939–945
- Lu, D., P. Mausel, E. Brondízio, and E. Moran. (2004). "Change Detection Techniques." *International Journal of Remote Sensing* 25: 2365–2401. doi:10.1080/0143116031000139863.

- Luneta, R., R. G. Congalton, L. K. Fenstermaker, J. R. Jensen, K. C. McGw y L. R. Tinney. (1991). "Remote sensing and geographic information systems data integration: error sources and research issues", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(6): 677-687.
- M. C. Hansen, P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, J. R. Townshend, High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science* 342, 850–853 (2013). doi:10.1126/science.1244693 pmid:24233722
- Mas, J.-F. A. Velázquez, J.R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, C. Alcántara, G. Bocco, R. Castro, T. Fernández y A. Pérez-Vega. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5(4):249-261
- Mas, J.-F. y Fernández, T. (2003): "Una evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, nº 51, pp. 73-87. Disponible en: <http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/boletin/bol51/b51art5.pdf>
- Mas, J.-F. y Morales L.M. (2011). Una Revisión De Las Tendencias Recientes En El Análisis De Datos De Percepción Remota. Centro De Investigaciones En Geografía Ambiental (CIGA). Universidad Nacional Autónoma De México (UNAM).
- Mas, J.-F., Couturier, S. (2011). Evaluación de los datos cartográficos. En F. Bautista Zuñiga y J.L. Palacios (Eds.). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (pp.675-705). México.
- Mas, J.-F., Lemoine-Rodríguez, R. y González, R. (2016). Monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el Estado de Michoacán: un análisis de cambios mediante sensores remotos a escala regional. Morelia. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-Universidad Nacional Autónoma de México. 16 pp. Disponible en: http://www.ciga.unam.mx/wrappers/proyectoActual/monitoreo/files/informe_final_fomix.pdf

- 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*.
- 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. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1155/2014/372349>
- Mas, J.-F., Velázquez A., Couturier S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/Usos del suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental* (pp 23-39).
- Mas, J.-F.; Couturier, S.; Paneque-Gálvez, J.; Skutsch, M.; Pérez-Vega, A.; Castillo-Santiago, M.A.; Bocco, G. 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 Sens.* (2016), 8, 533.
- Mas, J.-F., J. R. Díaz-Gallegos y A. Pérez-Vega (2003). "Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 51, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 53–72.
- 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.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Stehman, S. V. and 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.
- 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.
- R. Powell, N. Matzke, C. de Souza, M. Clark, I. Numata, L. Hess, D. Roberts Sources of error in accuracy assessment of thematic land-cover maps in the Brazilian Amazon *Remote Sensing of Environment*, 0 (2) (2004), pp. 221-234

- R. Tropek, O. Sedláček, J. Beck, P. Keil, Z. Musilová, I. Šímová, D. Storch, Comment on “High-resolution global maps of 21st-century forest cover change”. *Science* 344, 981 (2014); www.sciencemag.org/content/344/6187/981-d.
- Rosete, F., J.L. Pérez-Damián y G. Bocco. (2008). Cambio de uso el suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones Geográficas* 67:39-58.
- Rzedowski, J. (1991). Diversidad y Orígenes de la Flora Fanerógamica de México. *Acta Botánica Mexicana*, 14:3-21.
- Sánchez Colón, S., A. Flores Martínez, I.A. Cruz-Leyva y A. Velázquez. (2009). Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas, en *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio, México, pp. 75-129.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). (1994). Inventario Nacional Periódico, Memoria Nacional, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2011). Anuario estadístico de la producción nacional forestal. Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos.
- Smith, J. H., J. D. Wickham, S. V. Stehman, and L. Yang. (2002). Impacts of Patch Size and Land Cover Heterogeneity on Thematic Image Classification Accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68 (1): 65–70.
- Steffen, W., Sanderson, R.A., Tyson, P.D., Jäger, J., Matson, P.A., Moore III, B., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H.J., Turner, B.L., Wasson, R.J. (2004). *Global change and the earth system. A planet under pressure. The IGBP series.* Springer, Nueva York. USA.
- Stehman, S. V., J. D. Wickham, J. H. Smith and L. Yang. (2003). “Thematic accuracy of the 1992 National Land-Cover Data for the eastern United-States: Statistical methodology and regional results”, *Remote Sensing of Environment*, no. 86, pp. 500-516.
- Stehman, S.V y Czaplewski, R.L. (1998). “Desing and analysis for thematic map accuracy assessment: Fundamental principles. *Remote Sensing Enviromental* Vol. 64, pp. 331-344.

- Velázquez, A., J.-F. Mas, G. J. Díaz, S.R. Mayorga, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio. (2002). "Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México", *Gaceta Ecológica*, núm. 62, INE, México, pp. 21–37.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J., Melillo, J.M. (1997). Human domination of Earth's ecosystem. *Science* 277: 494-499.
- Wickham, J. D., S. V. Stehman, J. H. Smith and L. Yang. (2004). "Thematic accuracy of the 1992 National Land-Cover Data for the western United-States", *Remote Sensing of Environment*, no. 91, pp. 452-468.
- Woolcock C y Gopal, S. (2000). "Fuzzy set theory and thematic maps: accuracy assessment and area estimation". *International Journal Geographical Information Science*, Vol. 14, No. 20, pp. 153-172.
- Wulder, M. A., J. C. White, S. Magnussen y S. McDonald. (2007). Validation of a large area land cover product using purposeacquired airborne video. *Remote Sensing of Environment* 106: 480-491.
- Z. Zhu, C.E. (2014). Woodcock Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data *Remote Sens. Environ.*, 144, pp. 152-171
- Zhu, Z., L. Yang, S.V. Stehman and R. L. Czaplewski. (2000). "Accuracy assessment for the U.S. geological survey regional land-cover mapping program: New York and New Jersey Region", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, no. 66, pp. 1425-1435.