

# ¿Qué tan confiable es una tasa de deforestación? ¿Cómo evaluar nuestros mapas con rigor estadístico?

Stéphane Couturier<sup>1</sup> y Jean-François Mas<sup>2</sup>

## Resumen

Conocer la confiabilidad de la cartografía es crucial al momento de presentar resultados derivados de la misma, por ejemplo, una tasa de deforestación o de cambio de uso de suelo. La evaluación de confiabilidad estadísticamente válida de cartografía detallada se ha reportado solamente en países industrializados en zonas con biodiversidad baja. Se presentan los resultados de la evaluación del mapa del Inventario Forestal Nacional 2000 de México en cuatro zonas ecogeográficas, como primer estudio estadísticamente válido de cartografía detallada en una zona megadiversa. Se propone este método para evaluar la calidad de los productos cartográficos en zonas de alta biodiversidad.

## Palabras clave

Cartografía, biodiversidad, bosque tropical, confiabilidad, muestreo doble, alta taxonomía, fotografía aérea.

## Abstract

Statistical information on the quality of cartographic products is critical because it provides error margins for the derived trends of land use change or deforestation. The accuracy assessment of detailed maps has only been reported for highly industrialized countries, in areas of relatively low biodiversity. This paper presents the results of the accuracy assessment of the 2000 National Forest Inventory map in four eco-geographical zones, as the first statistically robust assessment of detailed cartography in a megadiverse area. The method described is proposed for the assessment of the quality of cartographic products in areas of high biodiversity.

## Key words

Cartography, biodiversity, tropical forest, two stage sampling, high taxonomy, aerial photography.

<sup>1</sup> Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Circuito Exterior s/n, Coyoacán 04510, México DF, México, Tel: (52-55) 56 22 43 34, Fax: (52-55) 56 16 21 45. Correo-e: andres@igg.unam.mx

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, CP 58190, Morelia, Michoacán, México, Tel: (52-443) 322 38 35, Fax: (52-443) 322 38 80. Correo-e: jfmas@ciga.unam.mx

## INTRODUCCIÓN

### Importancia de la evaluación de mapas

La cartografía temática es un insumo científico útil para estudiar la evolución del patrón paisajístico en el tiempo y espacio. Generalmente, lo esencial de la cartografía se consigue en la agencia gubernamental de un país o grupo de países, a escala geográfica regional, intermedia entre lo local (> 1:50,000) y lo continental (1:5,000,000). Por ejemplo, en México, la cartografía de cobertura vegetal y usos de suelo (CVUS) y las relacionadas tasas de deforestación anual se adquieren actualmente a escala regional (1:250,000), con cobertura nacional continua, desde la página internet de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2008), dependencia de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

El proceso de clasificación de imágenes de satélite, que se ha vuelto desde 1990 una base de la producción cartográfica, demostró ser altamente eficaz a escala regional por sus cualidades sinópticas. Sin embargo, este proceso está afectado por errores de distintos tipos (Green y Hartley: 2000), asociados en parte por la limitada capacidad de discernimiento del sensor remoto (sistema óptico que captura la imagen). La difícil distinción, en la imagen de satélite, entre ciertas categorías de la leyenda (o clases temáticas) puede resultar en muchos errores en un mapa, especialmente en los mapas de alto nivel taxonómico (alto número de clases temáticas). Por lo tanto, conocer la confiabilidad de la cartografía es crucial al momento de presentar o utilizar productos derivados de la misma —por ejemplo unas estadísticas de superficie, una tasa de deforestación o de cambio de uso de suelo— sin lo cual el resultado carece de margen de error y, por lo tanto, de validez estadística.

### Confiabilidad de mapas en áreas de alta biodiversidad

A partir del año 2000 se han publicado en el mundo las primeras estimaciones estadísticamente válidas sobre la confiabilidad de cartografía regional de CVUS. Laba et al. (2002) y Wickham et al. (2004), presentan la evaluación de varios mapas elaborados en 1992 en Estados Unidos de América (EUA) que representan, respectivamente, 29 clases (temáticas) del Gap Analysis Project (GAP) y 21 clases del National Land Cover Data (NLCD). Wulder et al. (2007) publican la confiabilidad del mapa de la isla de Vancouver, Canadá, del año

2000, para las 18 clases del programa canadiense Earth Observation for Sustainable Development (EOSD). Estos estudios resaltan la presencia de numerosas confusiones entre clases, que resultan en un porcentaje de confiabilidad global del mapa (porcentaje de área en donde el mapa presenta una información correcta) de entre 38 y 70%. Por lo tanto, estos estudios de confiabilidad constituyen una valiosa información para el uso de los mapas evaluados y para inducir estrategias de mejoramiento de la futura cartografía.

La cartografía de los países ubicados en áreas de alta biodiversidad está caracterizada por un mayor número de clases, de nivel taxonómico igual, que las cartografías evaluadas anteriormente. Por ejemplo, en México el mapa del Inventario Forestal Nacional (IFN) del año 2000 contiene 75 clases de CVUS, incluyendo 29 clases de bosque a nivel subcomunidad del sistema clasificatorio (Palacio et al., 2000). El nivel subcomunidad del IFN es comparable al nivel subclase del National Vegetation Classification System (NVCS) en EUA (véase FGDC, 1997) en el cual está basado el mapa del NLCD de 21 clases.

Sin embargo, al igual que la cartografía de la casi totalidad de los países ubicados en áreas de alta biodiversidad, los mapas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y de la SEMARNAT en México, carecen hasta la fecha de información estadística sobre su confiabilidad. Esto significa que las instancias federales en México publican, acerca de sus datos cartográficos, cifras oficiales sin una evaluación de su margen de error.

Este artículo presenta los resultados globales de una evaluación estadísticamente rigurosa del mapa del IFN 2000 en cuatro zonas ecogeográficas de México, y relaciona estos resultados con los resultados publicados de evaluación de cartografía regional en el mundo. En otra publicación se encuentra una descripción completa de este método de evaluación, diseñado para áreas de alta biodiversidad (Couturier et al. 2008).

El objetivo central de este artículo es contrastar la calidad, evaluada por primera vez, de un producto cartográfico regional en México, como es el IFN 2000, con respecto a la calidad de otros productos cartográficos evaluados en el mundo. Otro objetivo del presente artículo es la valoración de posibles estrategias de evaluación de confiabilidad de los presentes y futuros productos cartográficos (incluyendo temas que no sean CVUS) publicados en agencias gubernamentales, actualmente

sin respaldo estadístico, como las de la SEMARNAT o del INEGI en México. La motivación sería que se vuelva una práctica el manejo cartográfico con validez estadística en las áreas de alta biodiversidad en México.

En la sección 2 se presentan los principios de una evaluación de confiabilidad tal como está practicada en la actualidad para mapas regionales y un panorama mundial de las publicaciones de cartografía evaluada, desde la perspectiva del conocimiento de la biodiversidad. En la sección 3 se hace un resumen del método de confiabilidad aplicado para el IFN 2000 de México, y de los insumos para las cuatro áreas evaluadas. En la sección 4, los resultados globales de la evaluación de confiabilidad del IFN 2000 y de la evaluación de mapas regionales en otras áreas del mundo, están relacionados con la biodiversidad y comparados entre sí. La sección 5 discute los resultados con respecto a la confiabilidad de la cartografía internacional. Se derivan recomendaciones para la evaluación de la futura cartografía en México y las estrategias para su evaluación.

## EVALUACIÓN DE CONFIABILIDAD DE LA CARTOGRAFÍA REGIONAL

### Fundamentos de una evaluación de confiabilidad

La información cuantitativa sobre la confiabilidad de un producto cartográfico provee al usuario una estimación de su correspondencia con la realidad. Esta estimación puede servir como la medida de un riesgo asumido por una instancia de toma de decisiones al momento de usar el mapa. Además, esta información permite la modelación de la propagación de errores a través de un Sistema de Información Geográfica o SIG (Burrough, 1994).

Tradicionalmente, una barra de error, a veces reflejando el Área Mínima Cartografiable (AMC), representa una estimación de los errores espaciales resultado del proceso de producción del mapa. En la cartografía actual basada en la clasificación digital de imágenes de satélite, la institución que elabora la cartografía tiende a asociar este margen de error espacial con la resolución de la imagen (por ejemplo, el tamaño de un pixel de la imagen). En realidad, este tipo de información indica una parte muy reducida de la confiabilidad temática de un mapa (Green y Hartley, 2000). Así, solamente tener a disposición del usuario la imagen de satélite en internet, no hace que un producto cartográfico derivado de esta imagen sea confiable; por ejemplo, la identificación de clases temáticas

en la imagen puede no resultar trivial y, sobre todo, le sería imposible a un usuario, por simple acceso visual a las imágenes, evaluar la calidad global de la cartografía. Entonces, en caso de ausencia de mayor información, el único elemento de referencia sobre la confiabilidad del mapa es cualitativo, considerando (cuando está disponible y claramente especificada) la calidad de los datos empleados para su producción.

Por ejemplo, uno puede esperar que los mapas de CVUS de la serie I del INEGI en México (INEGI: 1980) sean muy confiables desde un punto de vista temático, por la calidad y cantidad del trabajo de campo, pero su coherencia temporal es baja (datos colectados entre 1968 y 1986). Al contrario, los mapas de la serie II de CVUS del INEGI tienen una alta coherencia temporal (años 1990-1993). Sin embargo, su confiabilidad es probablemente más baja que la de la serie I, porque la serie II es una actualización de la distribución de las 642 clases temáticas de la serie I, basada en la clasificación visual de imágenes del satélite Landsat, mismas que tienen mucho menor capacidad de discernimiento que las fotografías aéreas de la serie I para la muy alta precisión taxonómica que se requería (642 clases), además de que careció de una verificación sistemática en campo.

Más allá de la evaluación cualitativa, ilustrada previamente, Stehman y Czaplewski (1998) distinguen dos niveles de evaluación cuantitativa. Primero, una evaluación cuantitativa parcial (enfocada en un área parcial del mapa, ej. campo de validación), comúnmente empleada en las geociencias para, por ejemplo, validar un método de clasificación automática en una imagen de satélite. Segundo, una evaluación estadísticamente rigurosa, es decir, basada en un diseño de muestreo probabilístico (Stehman: 2001), asociado a todo el área del mapa. La característica fundamental de un muestreo probabilístico es que para cada punto del área, la probabilidad de estar incluido en la muestra de verificación debe ser mayor a cero (se dice que su *probabilidad de inclusión* debe ser mayor a cero). La evaluación con diseño probabilístico está recomendada por los autores, y luego ampliamente reconocida, como la única con validez estadística en materia de medición de confiabilidad de un mapa. A escala regional, la evaluación es mucho más difícil que a escala local por las restricciones presupuestales y la distribución de numerosas clases en una porción extensa del territorio. Por lo tanto, sólo recientemente se han construido y aplicado métodos comprensivos de evaluación de confiabilidad de cartografía a escala regional o continental

en EUA (Zhu et al. 2000; Laba et al. 2002; Stehman et al. 2003; Wickham et al. 2004), en Europa (Büttner y Maucha 2006), en Canadá (Wulder et al. 2007), en México (Couturier 2007) y en Asia del Sur y Sureste (Stibig et al. 2007). La confiabilidad está medida por medio de un muestreo de sitios de referencia en el área del mapa, mismos que sirven para verificar el contenido del mapa. El diseño de la evaluación se construye en tres fases (Stehman y Czaplewski 1998):

- 1 Selección representativa de los sitios de referencia (el diseño de muestreo)
- 2 Clasificación confiable de los sitios de referencia (el diseño de verificación)
- 3 Comparación de la información del mapa con la del sitio de referencia (la síntesis de la evaluación)

En todos los estudios arriba citados, la clasificación (proceso de caracterización en función de clases temáticas) de los sitios de referencia se operó con base en imágenes más precisas (es decir, con resolución espacial más fina) que las imágenes que sirvieron para elaborar el mapa. Por ejemplo, todos los mapas estudiados excepto el de Asia del Sur y Sureste fueron elaborados a partir de imágenes Landsat (resolución espacial de 30 metros), y evaluados a partir de fotografías aéreas (resolución espacial más fina que 3 metros) o videografía aérea (Canadá). El mapa de Asia del Sur y Sureste fue elaborado a partir de imágenes del sensor SPOT-VEGETATION (resolución espacial de 1 km) y evaluado a partir de imágenes Landsat.

Primera fase de la evaluación: El diseño de muestreo consiste generalmente en dos etapas (el muestreo en dos etapas, o muestreo doble, véase el manual de estadística de Cochran 1977, capítulo 12, p.327-345; citado por Mas y Couturier 2009). Primero, se selecciona un muestreo de fotografías (en su caso, imágenes) de referencia, de acuerdo con un esquema estadístico preestablecido que varía entre los estudios arriba citados. Segundo, se seleccionan los sitios de referencia adentro de estas imágenes de referencia. Esta técnica de muestreo doble limita eficientemente la dispersión de los sitios de referencia en el mapa (Zhu et al. 2000) y entonces reduce significativamente los costos de la evaluación. Sin embargo, es más compleja que el muestreo aleatorio simple, estratificado o no, comúnmente empleado para una evaluación parcial, en un área restringida del mapa.

La síntesis de la evaluación (tercera fase de la evaluación) es una recopilación de las coincidencias y dis-

crepancias entre la información contenida en el mapa y la información colectada en los sitios de referencia, a través de una matriz con 2 entradas (mapa y datos de referencia), a la cual se refiere, en la literatura, como matriz de error o matriz de confusión. Esta recopilación, una vez completada, permite obtener el porcentaje de aciertos del mapa (porcentaje de área total en donde el mapa presenta una información correcta), o índice global de confiabilidad. La evaluación en los estudios arriba citados contempla, además de la confiabilidad global, la confiabilidad de la porción del mapa ocupada por cierta(s) clase(s), lo que tiene gran relevancia si el uso del mapa está orientado a estimaciones de biodiversidad. A los porcentajes de acierto de estas porciones del mapa se les llama índices de confiabilidad por clase. A partir de la recopilación de coincidencias y discrepancias, se hace el cálculo de los índices global y por clase. Este cálculo es función de la probabilidad de inclusión de cada sitio de referencia en el muestreo (Stehman: 2001) que se deriva esencialmente del esquema estadístico empleado en la primera fase (véanse ejemplos prácticos de cálculo para varios esquemas estadísticos en Mas y Couturier 2009).

### Panorama mundial de la cartografía evaluada

El cuadro 1 presenta una lista de estudios cartográficos regionales de CVUS que incluyen una evaluación cuantitativa de confiabilidad, ordenada en función de la riqueza temática (número total de clases) de la cartografía. Los trabajos de evaluación estadísticamente válida —cuyo diseño es probabilístico y no parcial— están resaltados en negrita (seis estudios de los 13 listados). Por resultar de una revisión de bibliografía internacional extensa, se piensa que la lista incluye casi la totalidad de los trabajos estadísticamente válidos publicados hasta la fecha, omitiendo solamente trabajos derivados de los proyectos GAP y NLCD en EUA, a parte de los que están listados en el cuadro . A pesar del carácter muy reciente de las publicaciones (ocho publicaciones posteriores a 2005), los trabajos atienden una cartografía anterior al año 2001, reflejando la dificultad del ejercicio de evaluación de cartografía regional. Resalta el número de proyectos cartográficos con evaluación de confiabilidad en el continente americano (ocho proyectos) en comparación con los publicados para el resto del mundo. La cartografía del continente africano está solamente representada por un trabajo con evaluación parcial en Nigeria; en particular,

Tabla 1. Lista de trabajos publicados en el mundo sobre evaluación de mapas regionales de cobertura vegetal y uso de suelo. Esta lista incluye de manera casi exhaustiva a las publicaciones en el mundo que contemplan una evaluación con diseño probabilístico. La lista está ordenada por el número total de clases en la cartografía

Región del mundo	Siglas del proyecto y año de cartografía	Ambiente prevaliente	Diseño de evaluación	Número de clases		Nivel taxonómico equivalente	Resolución espacial y sensor satelital	Área evaluada del mapa	Referencia
				Total	Bosques				
Suroeste EUA	GAP 2000	Templado seco	Parcial (cerca de carreteras)	125 (85 evaluadas)	27 (18 evaluadas)	Asociación con grado de modificación	30 m (Landsat TM)	¿? (1.4 M km <sup>2</sup> )	Lowry et al. (2007)
México (4 áreas)	IFN 2000	Megadiverso	Probabilístico	75 (32 evaluadas)	29 (19 evaluadas)	Comunidad con grado de modificación	1 km (Landsat TM)	19,500 km <sup>2</sup> (1.95 M km <sup>2</sup> )	Couturier (2007)
Unión Europea	CorineLC 2000	Templado	Probabilístico	44 (22 evaluadas)	3	Comunidad	30 m (Landsat TM)	2.68 M km <sup>2</sup>	Buttner y Maucha (2006)
Asia del Sur y Sureste	TREES 2000	Megadiverso	Probabilístico para nivel formación	40 (= 4 clases evaluadas de formación)	17 (sólo clase "bosque" evaluada)	Comunidad con grado de modificación	1 km (SPOT-VEGETATION)	4.5 M km <sup>2</sup>	Stibig et al. (2007)
América del Sur	TREES 2000	Megadiverso	Parcial	39 (= 6 clases evaluadas de formación)	20 (solo clase "bosque" evaluada)	Comunidad con grado de modificación	1 km (ATSR, SPOT-VEGETATION)	¿? (17.8 M km <sup>2</sup> )	Eva et al. (2004)
India	ISRO-GBP 1999	Megadiverso	Parcial (en 3 estados del país)	35	14	Comunidad	188 m (WIFS, IRS)	¿? (3.3 M km <sup>2</sup> )	Joshi et al. (2006)
América del Norte y Central	GLC 2000	Megadiverso	Parcial	28	9	Tipo	1 km (SPOT-VEGETATION)	¿? (11.7 M km <sup>2</sup> )	Latifovic et al. (2004)
EUA	NLCD 1992	Templado	Probabilístico	21	3	Comunidad	30 m (Landsat TM)	9.1 M km <sup>2</sup>	Stehman et al. (2003)
Canadá (1 área)	EOSD- Forest 2000	Templado	Probabilístico	18	10	Comunidad con densidad	25 m (Landsat TM)	31,000 km <sup>2</sup>	Wulder et al. (2007)

Tabla 1. Continúa

Región del mundo	Siglas del proyecto y año de cartografía	Ambiente prevaleciente	Diseño de evaluación	Número de clases		Nivel taxonómico equivalente	Resolución espacial y sensor satelital	Área evaluada del mapa	Referencia
				Total	Bosques				
Costa de Zhejiang, China	2001	Templado	Parcial	9	2	Formación	30 m (Landsat TM)	¿? (34,000 km <sup>2</sup> )	Ding et al. (2007)
Nigeria	1990	Tropical húmedo	Parcial	8	3	Formación	1 km (NOAA AVHRR)	¿? (904,000 km <sup>2</sup> )	Rogers et al. (1997)
Amazona Legal, Brasil	GLC 2000	Tropical húmedo y seco	Parcial	5	3	Tipo	1 km (SPOT-VEGETATION)	¿? (5.0 M km <sup>2</sup> )	Carreira et al. (2006)

EUA: Estados Unidos de América.

Ambiente prevaleciente: si existen amplias áreas en ambientes diversos, de tendencia templada a subtropical, seco y/o húmedo, se indica "megadiverso".

Diseño de evaluación: "probabilístico" si el diseño está asociado a la totalidad del mapa, y "parcial" sino; el diseño es probabilístico según el criterio de rigor estadístico establecido por Stehman (2001).

Nivel taxonómico equivalente: equivalente a la escala del sistema clasificatorio del Inventario Forestal Nacional 2000 en México. Los niveles son Formación, Tipo, Comunidad, Comunidad con grado de modificación (o subcomunidad), ordenados del más general al más fino (Palacio et al. 2000). Se consideró un nivel adicional más detallado: Asociación con grado de modificación. Puede incluir un nivel más detallado de densidad (de la vegetación).

Área evaluada del mapa: M km<sup>2</sup> = millones de kilómetros cuadrados. En caso de diseño de evaluación parcial, los autores no suelen comunicar suficiente información que permita conocer el área evaluada real del mapa; de ser así se indica "¿?"; y la cifra entre paréntesis representa la cobertura total del mapa.

la cartografía regional derivada del proyecto Africover 2000 (parte del proyecto Global Land Cover, o GLC) permanece sin publicación de su confiabilidad.

En términos de diversidad taxonómica (número de clases cartografiadas), el trabajo sobre el mapa del IFN 2000 en México aparece con especial importancia en el mundo. En efecto, esta cartografía tiene la segunda diversidad taxonómica más alta (y la primera de las zonas megadiversas), y entre las evaluaciones estadísticamente válidas, es el trabajo que considera el mayor número de clases (32 clases evaluadas contra 22 clases de la cartografía de Europa, en segundo lugar). Para fines de comparación, se indicó el nivel taxonómico equivalente de cada mapa, de acuerdo con los cuatro niveles de agregación (formación, tipo, comunidad y comunidad con grado de modificación, llamado también subcomunidad) considerados para el sistema clasificatorio del IFN 2000 (Palacio et al. 2000), más un nivel de agregación (asociación con grado de modificación, el más detallado de todos). El nivel de detalle de los mapas considerados en la lista resulta en general muy relevante para aplicaciones sobre biodiversidad (ocho mapas son de nivel comunidad, comunidad con alteración o asociación con alteración, que son los tres niveles más detallados); sin embargo, el estudio del IFN 2000 es la única evaluación estadística por clase de este nivel de detalle en una zona megadiversa (las demás evaluaciones detalladas son las de EUA, Europa y Canadá), lo que posibilita un manejo cartográfico estadístico en términos de dinámica de la biodiversidad. Otro estudio estadístico muy destacado en zonas megadiversas fue sobre la cartografía detallada de Asia del Sur y del Sureste (Stibig et al. 2007), pero su evaluación se obtuvo solamente a nivel formación. Una evaluación a nivel formación ya permite un estudio de deforestación (cambios 'bosque-no bosque') con margen de error, pero no permite un estudio estadístico de cambios más detallados de la cobertura vegetal (por ejemplo, cambio "bosque poco modificado-bosque muy modificado"), también importantes en estudios de biodiversidad.

Sin embargo, la evaluación del IFN 2000 en cuatro zonas ecogeográficas distintas de México sigue siendo un estudio piloto, con dimensiones limitadas, en una zona megadiversa. La extensión del área evaluada es de 19,500 km<sup>2</sup>, mucho menor que la mayoría de los demás estudios (cuatro de los 6 estudios estadísticos y cinco de los 7 estudios parciales atienden una cartografía que abarca territorios mayores al millón de km<sup>2</sup>). En efecto,

la mayor diversidad taxonómica, combinada con paisajes altamente dinámicos, acentúa la dificultad de la evaluación de mapas en áreas megadiversas (Couturier et al. 2009), lo que probablemente contribuye a explicar la escasez de estudios en tales áreas hasta la fecha.

## EVALUACIÓN DEL MAPA DEL INVENTARIO FORESTAL NACIONAL 2000

### La cartografía y el método de evaluación

La cartografía del Inventario Forestal Nacional (IFN) 2000 se coordinó desde el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y se elaboró con base en mapas anteriores del INEGI y en la interpretación visual a escala 1:125,000 de imágenes satelitales Landsat del año 2000 (Mas et al. 2002) aplicando una AMC de 1 km<sup>2</sup>. Una de las características principales del proyecto IFN 2000 fue la propuesta de una escala de análisis y de un sistema de clasificación jerárquico de CVUS, como un estándar conveniente para la futura cartografía de México que reflejaría las aptitudes de discernimiento de los tipos de cobertura vegetal en la imagen de satélite. Inmediatamente después de la elaboración del mapa, una evaluación parcial de su confiabilidad fue reportada para ciertas clases abundantes, y de distribución homogénea, en el norte del país (Mas et al. 2002). Sin embargo, la evaluación utilizaba técnicas básicas de muestreo (sistemático, estratificado por clase), y no estaba planeada para abarcar, dentro de costos razonables, la diversidad de clases del mapa y la complejidad de su distribución en las distintas zonas ecogeográficas del territorio nacional.

En 2003 se inició un proyecto de investigación en el Instituto de Geografía, UNAM, destinado a desarrollar capacidad académica para la evaluación estadística de mapas de CVUS en México. En un primer momento, se aplicaron técnicas de muestreo doble ya existentes, empleadas en países caracterizados por una biodiversidad más baja (EUA y Canadá), pero estos diseños de muestreo resultaron poco eficientes por la abundancia de clases escasamente representadas en el mapa del IFN. Por lo tanto, se decidió separar el proceso de muestreo de clases con cobertura extensa (fracción del área total arriba del 5%), del proceso de muestreo de clases con cobertura escasa (fracción del área total debajo del 5%). De esta manera, se aseguró el control de la dispersión de los sitios de muestreo

Figura 1. Ubicación de las áreas piloto del proyecto: La evaluación de confiabilidad se hizo para las cuatro zonas ecogeográficas rellenas de gris



para cada clase, conservando la validez estadística del estudio (Couturier et al. 2007).

Con base en este nuevo diseño de muestreo y un diseño de verificación en acuerdo con los materiales disponibles (coberturas espacial de fotografías aéreas), capacidades técnicas (foto-interpretación y su restitución digital), y recursos disponibles en México, se desarrolló un marco metodológico y se aplicó en un conjunto de cuatro áreas ecogeográficas distintas del territorio (Couturier et al. en prensa). Las áreas presentan diferentes situaciones de cobertura vegetal y de uso de suelo, representando, hasta cierto punto, la complejidad del territorio nacional (véanse figura 1 y cuadro 2).

#### Áreas ecogeográficas evaluadas del IFN 2000

Dos áreas mayoritariamente templadas, la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo (referida después como Cuitzeo), y la región del pico de Tancítaro, un área que abarca el Parque Nacional Pico de Tancítaro y la zona de producción de aguacate en parte de los municipios de Uruapan, Peribán, Tancítaro y Nuevo San Juan (re-

gión referida después como Tancítaro), están ubicadas en el estado de Michoacán. Estas áreas están cubiertas por vegetación subhúmeda y semiárida. Una tercera área incluye la zona núcleo y de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera de Los Tuxtlas, en Veracruz (referida después como Los Tuxtlas). Esta área presenta condiciones ecológicas cálido-húmedas y hacia templado húmedas en la parte alta de sus montañas volcánicas. La cuarta zona de estudio está inscrita en la cuenca del río Candelaria y abarca una parte de la Reserva de la Biosfera de Calakmul en el estado de Campeche (después referida como Candelaria). Esta última presenta condiciones ecológicas cálido-húmedas y subhúmedas. Las áreas del Tancítaro y de Candelaria se caracterizan por una cobertura arbórea extensa (con y sin manejo intensivo humano, respectivamente) mientras la mayor parte de Cuitzeo y de Los Tuxtlas está cubierta con uso agrícola no arbolado (cultivo anual y uso agropecuario, respectivamente).

El insumo base para la verificación en cada área ecogeográfica fue la fotografía aérea. Sus características están descritas en el cuadro 3. Por ejemplo, la primera fila indica que 244 fotografías aéreas cubren el área de Cuitzeo a la escala 1: 37,000, adquiridas

Tabla 2. Distribución de las clases del inventario forestal nacional (nivel comunidad con grado de modificación y formación) en las cuatro zonas ecogeográficas

Código	Nombre de la clase		Cuitzeo			Tancítaro		Tuxtlas		Candelaria		Área total por clase (km <sup>2</sup> )
	Nivel sub-comunidad	Nivel formación	Frac. área	Área (km <sup>2</sup> )								
100	Agricultura de riego	Agricultura	0.1411	564.97	0.0106	13.45						578.42
110	Agricultura de humedad		0.0048	19.04								19.04
130	Pastizal cultivado						0.6058	1839.75	0.1708	1908.25		3748.01
200	Agricultura de temporal permanente		0.0021	8.27	0.2904	367.70	0.0129	39.16				415.13
210	Agricultura de temporal anual		0.2356	943.14	0.0803	101.69	0.1765	535.84	0.0070	77.85		1658.51
300	Plantación forestal		0.0071	28.24								28.24
410	Bosque de oyamel	Bosque templado	0.0037	14.72								14.72
420	Bosque de pino		0.0041	16.32	0.1658	209.99	0.0011	3.36				229.67
421	Bosque de pino & veg. sec.		0.0036	14.31	0.0634	80.23	0.0011	3.37				97.90
510	Bosque de pino-encino		0.0958	383.34	0.1907	241.47						624.82
511	Bosque de pino-encino & veg. sec.		0.0325	130.29	0.1284	162.54	0.0028	8.48				301.31
600	Bosque de encino		0.0232	92.88			0.0011	3.44				96.32
601	Bosque de encino & veg. sec.		0.0553	221.54	0.0017	2.16	0.0041	12.49				236.20

Tabla 2. Continúa

Código	Nombre de la clase	Cuitzeo			Tancítaro		Tuxtías		Candelaria		Área total por clase (km <sup>2</sup> )
		Nivel formación	Frac. área	Área (km <sup>2</sup> )							
700	Bosque mesófilo de montaña	Bosque tropical	0.0029	11.73			0.0035	10.78			22.51
800	Selva med. y alta perennifolia						0.1213	368.43			368.43
801	Selva med. y alta perennifolia & veg. sec.						0.0292	88.56			88.56
820	Selva med. y alta sub-perennifolia								0.5010	5595.31	5595.31
821	Selva med. y alta sub-perennifolia & veg. sec.								0.0880	982.82	982.82
830	Selva baja sub-perennifolia								0.1765	1971.60	1971.60
831	Selva baja sub-perennifolia & veg. sec.								0.0025	27.57	27.57
920	Matorral sub-tropical	Matorral	0.0194	77.58							77.58
921	Matorral sub-tropical & veg. sec.		0.0768	307.25							307.25
1000	Mezquital		0.0004	1.51							1.51
1200	Chaparral										0.00

Tabla 2. Continúa

Código	Nombre de la clase	Cuitzeo		Tancitaro		Tuxtlas		Candelaria		Área total por clase (km <sup>2</sup> )
		Nivel formación	Frac. área	Área (km <sup>2</sup> )	Frac. área	Área (km <sup>2</sup> )	Frac. área	Área (km <sup>2</sup> )	Frac. área	
1320	Sábana	Pastizal						0.0108	120.13	120.13
1330	Pastizal inducido		0.1594	638.04	0.0032	4.02	0.0004	1.08	0.0039	43.65
1400	Manglar	Vegetación higrófila					0.0066	20.15	0.0060	66.93
1410	Popal-tular		0.0209	83.50			0.0019	5.86	0.0225	251.24
1510	Vegetación halófila	Otro tipo de vegetación	0.0069	27.78					0.0039	43.56
1600	Sin vegetación aparente	Otro tipo de cobertura			0.0390	49.43	0.0007	2.11		51.54
1700	Asentamiento humano		0.0250	100.02	0.0265	33.59	0.0065	19.82	0.0009	10.19
1800	Cuerpo de agua		0.0796	318.75			0.0244	74.01	0.0063	70.11
	Total		1.0000	4003.23	1.0000	1266.28	1.0000	3036.69	1.0000	11169.21
										19475.41

Veg sec: 'Vegetación herbácea, arbustiva y/o secundaria'. Frac área: fracción del área de la zona eco-geográfica. El nivel comunidad con grado de modificación se refiere al nivel sub-comunidad en Palacio et al. (2000)

Tabla 3. Características del material fotográfico para la evaluación de la confiabilidad de los mapas del Inventario Forestal Nacional 2000

Área	Tipo de datos / Interpretación	Escala/Resolución	Año	Número de fotografías
Cuitzeo	Impreso/estereoscópico	1:37 000	1999	244
Tancítaro	Impreso/estereoscópico	1:24 000	1996	152
Tuxtlas	Digital/en pantalla	1:75 000 / 1.5 m grano	2000 1996	12 14
Candelaria	Impreso/estereoscópico	1:75 000	Enero 2000-Marzo 2002	174

en el año 1999, se usaron para la clasificación de los sitios de referencia por medio de interpretación estereoscópica. Un primer intérprete (con larga experiencia en fotointerpretación de CVUS en México) hizo la delineación de polígonos homogéneos a escala 1:125, 000 (escala más grande que la escala del mapa del inventario, y adecuada para foto-interpretación). Se indicó el grado de certidumbre de la fotointerpretación, para prever una corroboración parcial en campo de los puntos de verificación con incertidumbre alta. Alternativamente, en el caso de dos áreas (Cuitzeo y Candelaria), una fotointerpretación más detallada, con la ayuda de información intensiva de terreno y conducida de manera independiente por otros intérpretes en el ámbito de otros proyectos, sirvió de corroboración. La figura 2 ilustra la distribución de las fotografías seleccionadas en la cuenca del lago de Cuitzeo como resultado del diseño de muestreo sobre la carta del IFN 2000. Para referencia, Couturier et al. (2007) proporciona mayor detalle sobre todos los aspectos del método empleado.

## RESULTADOS DE LAS EVALUACIONES DEL IFN 2000 Y DE OTRA CARTOGRAFÍA

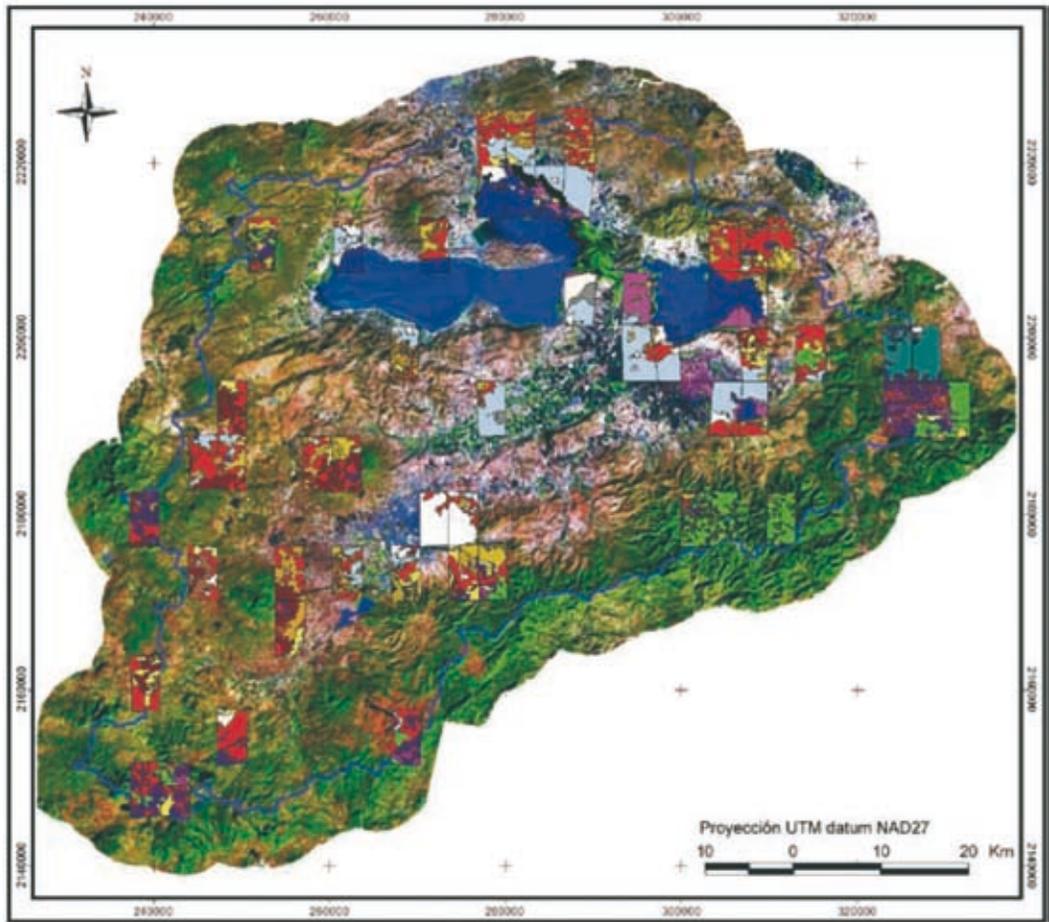
### Confiabilidad del mapa IFN 2000

En el cuadro 4 se presentan los índices globales y por clase para cada área ecogeográfica, con el fin de analizar el contenido y la calidad de la cartografía en relación con la biodiversidad existente en cada caso analizado. Los patrones de confusión entre clases fueron estudiados a partir de matrices de confusión en Couturier (2007, capítulo 2). Los índices globales de confiabilidad (IGC) al nivel de subcomunidad por área ecogeográfica oscilan entre 64.4% (Candelaria) y 77.9% (Los Tuxtlas). El IGC fue más bajo en las áreas cuyas clases dominantes son bos-

ques (Candelaria: 64.4%, Tancítaro: 67.3%) que en las zonas no dominadas por extensiones arboladas (Cuitzeo: 74.6%, Los Tuxtlas: 77.9%). Una probable razón de esa diferencia es la abundancia de clases de bosques (sujetas a más confusiones) en el sistema clasificatorio del IFN con respecto a otros tipos de clases.

En cuanto a índices de confiabilidad por clase (ICC) al nivel de subcomunidad, los valores de confiabilidad para el usuario (columna "usuario") se refieren a la calidad de lo que está cartografiado, mientras los valores de confiabilidad para el productor (columna "productor") se refieren a la correspondencia en el mapa de las clases observadas en los sitios de verificación. Observamos que las clases "manglar" y "otros tipos de cobertura" (sin vegetación aparente, cuerpo de agua y asentamiento humano) están cartografiados con muy alta confiabilidad (generalmente superior a 79%). Por lo contrario, se pueden registrar altos niveles de error en las clases de vegetación acuática no-arbolada (popal-tular y vegetación halófila). En contraste con las altas confiabilidades generalmente obtenidas para las clases cartografiadas de vegetación poco modificada (clases sin "vegetación secundaria"), numerosos errores afectan las clases de vegetación muy modificada (clases denominadas "con vegetación secundaria"). Por ejemplo, en Cuitzeo, las clases matorral subtropical (78%), bosque de pino-encino (97%), bosque de encino (92%), bosque de pino (79%) y bosque de oyamel (76%) se encuentran muy confiables, mientras las clases de bosque de encino con vegetación secundaria (46%), pino con vegetación secundaria (12%) y bosque mixto con vegetación secundaria (45%) están cartografiadas con baja confiabilidad. Tanto desde el punto de vista taxonómico como de elementos del paisaje, las clases de vegetación muy modificada se encuentran cercanas a clases de uso de suelo y a clases de vegetación poco modificada. Por lo tanto, son más propicias a confusión con otras clases que las clases de vegetación

Figura 2. Diseño de verificación del mapa del Inventario Forestal Nacional 2000 en la cuenca del lago de Cuitzeo. En fondo aparece un espacio-mapa de la cuenca con base en un mosaico de imágenes Landsat. Y están sobrepuestos los cuadros fotográficos seleccionados de acuerdo con el diseño estadísticamente robusto y su clasificación con base en interpretación fotográfica



**Legenda:**

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #d3d3d3; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Agricultura de Riego</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Agricultura de Humedad</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #ffff00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Pastizal Cultivado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #008000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Cultivo de Temporal Permanente</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #000080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Cultivo de Temporal Anual</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #808000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Plantación</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #90ee90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Bosque de Pino poco modificado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #32cd32; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Bosque de Pino muy modificado</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #800000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Bosque de Pino-Encino poco modificado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #4b0082; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Bosque de Pino-Encino muy modificado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #800000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Bosque de Encino poco modificado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #4b0082; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Bosque de Encino muy modificado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #d2691e; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Matorral Subtropical poco modificado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #800000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Matorral Subtropical muy modificado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #d2b48c; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Mezquital o Huizachal poco modificado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #800000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Mezquital o Huizachal muy modificado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #ffff00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Pastizal Inducido</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #800080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Popal-Tular</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #ffffff; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Vegetación Halofila</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #000000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Sin Vegetación Aparente</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Asentamiento Humano</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #000080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Cuerpo de Agua</li> </ul> |
|--|---|

poco modificada. Esta baja confiabilidad arroja retos de mejoramiento de la futura cartografía por la importancia que reviste la vegetación muy modificada en estudios de degradación de los ecosistemas.

**Comparación con la confiabilidad de otra cartografía**

El cuadro 5 presenta los índices globales de confiabilidad (IGC) resultando de cada estudio listado en el

Tabla 4. Índices de confiabilidad (del usuario y del productor) por clase del mapa del IFN 2000 (nivel comunidad con grado de modificación) en las cuatro zonas ecogeográficas

Código	Nombre de la clase		Cuitzeo		Tancítaro		Tuxtlas		Candelaria		Área total por clase (km <sup>2</sup> ):
	Nivel sub comunidad	Nivel formación	Usuario	Pro-ductor	Usuario	Pro-ductor	Usuario	Pro-ductor	Usuario	Pro-ductor	
100	Agricultura de riego	Agricultura	87	90	22	23					578.42
110	Agricultura de humedad		63	75							19.04
130	Pastizal cultivado						83	90	69	78	3748.01
200	Agricultura de temporal permanente		99	100	86	84	57	9			415.13
210	Agricultura de temporal anual		71	78	87	64	52	99	75	9	1658.51
300	Plantación forestal		83	33							28.24
410	Bosque de oyamel	Bosque templado	76	100							14.72
420	Bosque de pino		79	59	41	44	85	31			229.67
421	Bosque de pino y veg. sec.		12	5	8	44	0	-			97.90
510	Bosque de pino-encino		96	92	77	67					624.82
511	Bosque de pino-encino y veg. sec.		45	68	56	55	6	83			301.31
600	Bosque de encino		92	40		-	28	32			96.32
601	Bosque de encino y veg. sec.		46	95	5	100	70	82			236.20
700	Bosque mesófilo de montaña	Bosque tropical	0	-			100	100			22.51
800	Selva med. y alta perennifolia						92	66			368.43
801	Selva med. y alta perennifolia y veg. sec.						63	42			88.56
820	Selva med. y alta sub-perennifolia								70	89	5595.31

Tabla 4. Continúa

Código	Nombre de la clase		Cuitzeo		Tancítaro		Tuxtlas		Candelaria		Área total por clase (km <sup>2</sup> ):
	Nivel sub comunidad	Nivel formación	Usuario	Pro-ductor	Usuario	Pro-ductor	Usuario	Pro-ductor	Usuario	Pro-ductor	
821	Selva med y alta sub-perenn y veg. sec.								55	45	982.82
830	Selva baja sub-perennifolia								52	61	1971.60
831	Selva baja sub-perennifolia y veg. sec.								32	1	27.57
920	Matorral sub-tropical	Matorral	78	29							77.58
921	Matorral sub-tropical y veg. sec.		88	63							307.25
1000	Mezquital		0	-							1.51
1200	Chaparral			-							0.00
1320	Sábana	Pastizal							22	-	120.13
1330	Pastizal inducido		60	91	36	66	69	11	67	26	686.80
1400	Manglar	Vegetación higrófila					86	99	87	96	87.08
1410	Popal-tular		47	68			53	100	70	44	340.60
1510	Vegetación halófila	Otro tipo de vegetación	25	21					9	41	71.34
1600	Sin vegetación aparente	Otro tipo de cobertura		0	82	92	87	100			51.54
1700	Asentamiento humano		100	63	97	88	92	92	80	72	163.62
1800	Cuerpo de agua		89	92			100	98	48	96	462.87
	Total		74.6		67.3		77.9		64.4		19475.41

cuadro 1. Reconociendo la dificultad de cartografiar las coberturas forestales, la lista del cuadro 5 está ordenada por número de clases de bosque que cuentan con evaluación en el estudio. Con excepción del estudio del GAP2000 (cartografía extremadamente detallada), las evaluaciones parciales (no probabilísticas) obtienen un IGC más alto (rango de 74.5% a 88%) que las evaluaciones basadas en un diseño probabilístico (en ne-

grita: rango de 46% a 74.8%). Sin embargo, aquellas evaluaciones parciales, por no tener validez estadística sobre todo el mapa, son posiblemente afectadas por un sesgo optimista, sin que ese mismo se pueda estimar (Stehman y Czaplewski: 1998). Entre las evaluaciones estadísticamente válidas, el IGC del IFN2000 en las dos áreas densamente forestadas (Tancítaro y Candelaria), de 64.4% y 67.3%, es comparable con el

Tabla 5. Índices globales de confiabilidad de mapas regionales de cobertura vegetal y uso de suelo, derivados de los principales trabajos publicados en el mundo. La lista está ordenada por número de clases de bosque evaluadas

Región del mundo	Siglas del proyecto y año de cartografía	Ambiente prevaleciente	Diseño de evaluación	Número de clases evaluadas		Índice global de confiabilidad	Referencia bibliográfica
				Bosques	Total		
México	IFN 2000	Mega-diverso	Probabilístico	19 (29)	32 (75)	64-78%	Couturier (2007)
Suroeste EUA	GAP 2000	Templado seco	Parcial (cerca de carreteras)	18 (27)	85 (125)	61%	Lowry et al. (2007)
India	ISRO-GBP 1999	Megadiverso	Parcial (en 3 estados del país)	14	35	81%	Joshi et al. (2006)
Canadá	EOSD- Forest 2000	Templado	Probabilístico	10	18	67%	Wulder et al. (2007)
América del Norte y Central	GLC 2000	Megadiverso	Parcial	9	28	79% (con respecto a otros mapas)	Latifovic et al. (2004)
Unión Europea	CorineLC 2000	Templado	Probabilístico	3	22 (44)	74.8%	Buttner y Maucha (2006)
EUA	NLCD 1992	Templado	Probabilístico	3	21	46-66% (por región administrativa)	Stehman et al. (2003)
Nigeria	1990	Tropical húmedo	Parcial	3	8	74.5%	Rogers et al. (1997)
Amazona Legal, Brasil	GLC 2000	Tropical húmedo y seco	Parcial	3	5	88%	Carreira et al. (2006)
Costa de Zhejiang, China	2001	Templado	Parcial	2	9	84%	Ding et al. (2007)
América del Sur	TREES 2000	Megadiverso	Parcial	1 (20)	6 (39)	76% (a nivel formación)	Eva et al. (2004)
Asia del Sur y Sureste	TREES 2000	Megadiverso	Probabilístico para nivel formación	1 (17)	4 (40)	72% (a nivel formación)	Stibig et al. (2007)
México	NALC 1973 - 1993	Megadiverso	Probabilístico (evaluación global solamente)	0 (5)	0 (12): solo evaluación global	60% (con respecto a cartografía INEGI)	Lunetta et al. (2002)

resultado del otro estudio con alto número de clases de bosque, en Canadá (67%). Por otra parte, los valores de IGC en las áreas en donde prevalecen clases de uso de suelo (Cuitzeo y Los Tuxtlas), de 74.6% y 77.9%, son comparables con el resultado del estudio de la cartografía CorineLC 2000, enfocada en usos de suelo, en Europa (74.8%), y con el resultado de TREES2000 en Asia del Sur y Sureste (72%), y superan el rango

de los demás estudios estadísticamente válidos (46% a 66%). La cartografía del IFN2000 es de resolución espacial comparable con la de TREES2000 en Asia (1 km<sup>2</sup>); pero la evaluación de TREES2000 se hizo a nivel formación (solamente 4 clases evaluadas en total), mientras el reto cartográfico del IFN2000 en lograr una buena confiabilidad es mayor (nivel comunidad con grado de modificación, 32 clases evaluadas).

El IFN 2000 está también caracterizado por una diversidad taxonómica mayor que los otros mapas con evaluación estadísticamente válida, en México, EUA, Canadá y Europa. A cambio, la AMC de estas otros mapas es del orden del pixel Landsat (30 m x 30 m o 60 m x 60 m), lo que constituye un reto mayor para lograr una buena confiabilidad, comparado con el IFN2000 (AMC de 1 km<sup>2</sup>). Considerando estos factores compensatorios (riqueza taxonómica mayor pero AMC más grande), el IFN2000 logra registrar una confiabilidad comparable o más favorable que las cartografías citadas, en áreas limitadas del territorio mexicano, pero que reflejan varios escenarios de complejidad cartográfica dentro de este territorio.

### Las clases de vegetación muy modificada

En cuanto a la observación de errores en las clases de vegetación muy modificada, las otras experiencias cartográficas nos brindan enseñanzas útiles. La dificultad de cartografiar niveles de densidad de árboles en bosques a partir de imágenes Landsat fue observada en el proyecto EOSD de Canadá, y Wulder et al. (2007) que concluyen que esta dificultad es probablemente la mayor fuente de errores en su mapa. Las posibles ambigüedades en la imagen de Landsat están probablemente acentuadas, en el caso del IFN2000, por la múltiple inclusión de la vegetación secundaria en el sistema clasificatorio (dos grados de modificación por cada clase de bosque, véase el cuadro 4). Esta inclusión está simplificada en numerosos proyectos en el extranjero como el GAP2000 y el TREES2000, o en el IFN del año 1994 en México, que contemplan muchas clases de bosque, pero agrupan los bosques muy modificados bajo un número reducido de clases. Un objetivo importante del sistema clasificatorio del IFN 2000 fue su compatibilidad con la cartografía anterior del INEGI. La baja confiabilidad de las clases de vegetación muy modificada detectada por nuestro análisis aparece tal vez como una limitación necesaria para cumplir con ese criterio de compatibilidad. Sin embargo, existe la opción de agrupar las clases de los subtipos de vegetación, por ejemplo al nivel formación (clase "bosque templado con vegetación secundaria" y "bosque tropical con vegetación secundaria", etc.), para ajustar mejor el sistema clasificatorio a la capacidad de discriminación del sensor Landsat.

## DISCUSIÓN

Los mapas del IFN2000 fueron generados a partir de la interpretación visual a 1:125,000 de compuestos de color de imágenes Landsat (Mas et al. 2002), mientras la otra cartografía basada en la imágenes Landsat en México, EUA, Canadá y Europa fue generada por medio de una clasificación automática de fina resolución. La confiabilidad resultó comparable o más favorable, pareciendo indicar la adecuación del método de clasificación empleado, considerando la alta precisión taxonómica del IFN2000 a comparación de los otros mapas y las fuertes restricciones de tiempo (interpretación de más de 120 imágenes Landsat en 8 meses) impuestas para el proyecto. Este resultado preliminar es importante si uno considera que una característica esencial del IFN2000 para sus usuarios es la necesidad de acceder a la representación de una biodiversidad elevada. En particular, viendo el nivel de confiabilidad de la otra cartografía a resolución más fina, es probable que el usuario se beneficie de un grado de confiabilidad significativamente mayor que si el mapa fuese concebido para una resolución espacial más fina.

En cuanto a perspectivas de evaluación de mapas en México, una extensión de este método, con el mismo diseño de muestreo (doble), es aplicable a la cartografía detallada de todo el territorio nacional, utilizando una cobertura sistemática de fotografías aéreas, en la medida de que esa cobertura es representativa de la totalidad del territorio (Mas et al. 2002). Existe tal cobertura de fotografías aéreas para el año 2000 (financiada por SEMARNAT para el proyecto IFN2000), así que sería posible medir la confiabilidad del IFN2000 a nivel nacional, exceptuando a las clases escasas que no encontrarían una representación suficiente en la cobertura sistemática.

Desde el año 2003, el monitoreo de la cobertura vegetal en México utiliza imágenes de satélite del sensor MODIS (CONAFOR 2008), comparable por su resolución y capacidad de discernimiento con el sensor SPOT-VEGETATION utilizado por Stibig et al. (2007) en Asia. La evaluación de su confiabilidad podría entonces contemplar la utilización del mismo insumo (imágenes Landsat) que Stibig et al. (2007). A este efecto, el diseño de muestreo descrito en este trabajo (que incluye clases con distribución escasa) podría ser utilizado para evaluar un número más alto de clases que las cuatro del nivel formación en el estudio de Stibig et al. (2007).

## CONCLUSIÓN

En la gran mayoría de las agencias gubernamentales del mundo, la calidad de la cartografía está resumida, típicamente, en una simple mención de la resolución espacial de la imagen y de su temporalidad, dejando la impresión que los errores asociados a confusión entre clases en la imagen de satélite son despreciables. Por ejemplo, la única referencia en el servidor de la CONAFOR, a la calidad de su cartografía, está incluida en esta frase: "La CONAFOR le recuerda que las imágenes sólo pueden ser precisas de acuerdo con la fecha en las que fueron tomadas y no incluyen los cambios subsecuentes" (CONAFOR, 2008). No hay mención alguna sobre la confiabilidad, por ejemplo, de un insumo clave del producto de tasa de deforestación anual, que es la carta de la serie III del INEGI, en donde se estimó la masa forestal inicial para los cálculos. El presente trabajo, por un lado, recuerda la presencia sustancial de errores debidos a confusiones en la interpretación de las imágenes de satélite, de acuerdo con los estudios de confiabilidad de la cartografía internacional. Por otro lado, este artículo presenta los resultados de una estimación de confiabilidad de un producto cartográfico detallado (el IFN2000) en México. La evaluación presentada aquí es el primer ejercicio estadísticamente válido de evaluación de cartografía en una zona megadiversa a este nivel de detalle taxonómico (75 clases).

Resalta que la calidad del IFN2000 (confiabilidad de 64% a 78%) es de estándar internacional, un logro conmensurable considerando su nivel taxonómico superior al de la cartografía internacional evaluada, las limitaciones en el proceso de clasificación basado en la interpretación visual de imágenes de satélite, y la fuerte restricción de tiempo ejercida en la producción del mapa final. La mayor parte de las clases de usos de suelo (tierras cultivadas) y vegetación poco alterada está caracterizada por niveles de confiabilidad arriba de 70%. En contraste, destaca un patrón de confiabilidad baja para clases de vegetación muy modificada. Se sugiere ajustar el sistema clasificatorio para aumentar la confiabilidad de la cartografía en su representación de ecosistemas alterados.

Quedaría pendiente la extensión del método a nivel nacional en México, con base en una cobertura de fotografías aéreas para los productos de alto nivel taxonómico, generados por el sensor Landsat, como el IFN2000 o la serie III del INEGI (año 2003), o con base en una cobertura Landsat (o sensor de resolución equivalente) para los productos más recientes, de precisión taxonó-

mica más baja (nivel formación), generados a partir de sensores como MODIS o SPOT VEGETATION.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue elaborado en el marco del proyecto "Evaluación del sensor MODIS para el monitoreo anual de la vegetación forestal de México" financiado por los Fondos Sectoriales CONACYT-CONAFOR (número 14741), y durante el proyecto posdoctoral del primer autor.

## BIBLIOGRAFÍA

- Burrough, P. A. 1995. Accuracy and error in GIS. En D. R. Green y D. Rix (eds.). *The AGI Sourcebook for Geographic Information Systems*. AGI, Londres. Pp. 87-91.
- Büttner, G. y G. Maucha. 2006. The thematic accuracy of CORINE Land Cover 2000: Assessment using LUCAS. Reporte técnico de la Unión Europea. Report/No7/2006. Disponible en: <http://reports.eea.europa.eu>. Consultado en abril de 2007.
- Carreiras, J., J. Pereira, M. Campagnolo e Y. Shimabukuro. 2006. Assessing the extent of agriculture/ pasture and secondary succession forest in the Brazilian Legal Amazon using SPOT VEGETATION data. *Remote Sensing of Environment* 101: 283-298.
- Cochran, W. G. 1977. *Sampling Techniques*. John Wiley and Sons (3ra ed.), Nueva York. 428 p.
- CONAFOR. Cartografía de cobertura vegetal y usos de suelo en línea. Disponible en: <http://www.cnf.gob.mx:81/emapas>. Consultado en marzo de 2008.
- Couturier, S. 2007. Evaluación de errores de mapas de cobertura vegetal y usos de suelo con enfoque difuso y con la simulación de imágenes de satélite. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, Université Toulouse III (Francia), México, D.F. 276 p.
- Couturier, S., J. F. Mas, Á. Vega y V. Tapia. 2007. Accuracy assessment of land cover maps in sub-tropical countries: a sampling design for the Mexican National Forest Inventory map. *Online Journal of Earth Sciences* 1(3): 127-135.
- 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.
- Couturier, S., J. F. Mas, E. López-Granados, J. Benítez, V. Tapia, y A. Vega. 2009. Accuracy assessment of the Mexican National Forest Inventory map: a study in four eco-geographical areas. *Singapore Journal of Tropical Geography*, en prensa.

- Couturier, S., J. F. Mas, G. Cuevas, J. Benítez, A. Vega-Guzmán y V. Coria-Tapia. 2009. An accuracy index with positional and thematic fuzzy bounds for land-use/land-cover maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 75(7): 243-259.
- Ding, H., R. C. Wang, J. P. Wu, B. Zhou, Z. Shi y L. X. Ding. 2007. Quantifying land use change in Zhejiang coastal region, China, using multi-temporal Landsat TM/ ETM+ images. *Pedosphere* 17(6): 712-720.
- Eva, H. D., A. S. Belward, E. E. de Miranda, C. M. di Bella, V. Gond, O. Huber, S. Jones, M. Sgrenzaroli y S. Fritz. 2007. A land cover map of South America. *Global Change Biology* 10: 731-744.
- Informe del Comité FGDC (Federal Geographic Data Committee) de los Estados Unidos, Subcomité de Vegetación (VS). FGDC vegetation classification and information standard. Esbozo de informe el 3 de junio de 1996 por la Secretaría del FGDC-VS, Reston, Virginia, 1997.
- Green, D. R. y W. Hartley. 2000. Integrating photo-interpretation and GIS for vegetation mapping: some issues of error. En: R. Alexander y A. C. Millington (eds.). *Vegetation Mapping from Patch to Planet*. John Wiley and Sons, Nueva York. Pp. 103-134.
- Informe del INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1980. Sistema de clasificación de tipos de agricultura y tipos de vegetación de México para la cartografía de uso de suelo y vegetación del INEGI, escala 1:125 000. INEGI; Aguascalientes, Ags., México.
- Joshi, P. K., P. S. Roy, S. Singh, S. Agrawal y D. Yadav. 2006. Vegetation cover mapping in India using multi-temporal IRS Wide Field Sensor (WiFS) data. *Remote Sensing of Environment* 103: 190-202.
- Laba, M., S. K. Gregory, J. Braden et al. 2002. Conventional and fuzzy accuracy assessment of the New York Gap Analysis Project land cover map. *Remote Sensing of Environment* 81: 443-455.
- Latifovic, R., Z. L. Zhu, J. Cihlar, C. Giri e I. Olthof. 2004. Land cover mapping of North and Central America – Global Land Cover 2000. *Remote Sensing of Environment* 89: 116-127.
- López E., G. Bocco, M. Mendoza, A. Velázquez y R. Aguirre-Rivera. 2006. Peasant emigration and land-use change at the watershed level: A GIS-based approach in central Mexico. *Agricultural Systems* 90: 62-78.
- Lowry, J., R. D. Ramsey, K. Thomas et al. 2007. Mapping moderate-scale land-cover over very large geographic areas within a collaborative framework: A case study of the Southwest Regional Gap Analysis Project (SWReGAP). *Remote Sensing of Environment* 108: 59-73.
- Lunetta, R. S., R. Álvarez, C. M. Edmonds, J. G. Lyon, C. D. Elvidge, R. Bonifaz y C. García. 2002. NALC/Mexico land-cover mapping results: implications for assessing landscape condition. *International Journal of Remote Sensing* 23 (16): 3129-3148.
- Mas, J. F., A. Velázquez, J. L. Palacio-Prieto, G. Bocco, A. Peralta y J. Prado. 2002. Assessing forest resources in Mexico: Wall-to-wall land use/cover mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68 (10): 966-969.
- Mas, J. F. y S. Couturier. 2008 (aceptado). Evaluación de la fiabilidad temática de bases de datos cartográficas. En: F. Bautista Zuñiga, H. Delfín González y J. L. Palacio Prieto (eds.). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología, México. 510 p.
- Palacio-Prieto, J. L., G. Bocco, A. Velázquez, J. F. Mas, F. Takaki-Takaki, A. Victoria, L. Luna-González et al. 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. *Investigaciones Geográficas* 43: 183-202.
- Rogers, D. J., S. I. Hay, M. J. Packer y G. R. Wint. 1997. Mapping land-cover over large areas using multispectral data derived from the NOAA-AVHRR: a case study of Nigeria. *International Journal of Remote Sensing* 18 (15): 3297-3303.
- Stehman, S. V. y R. L. Czaplewski. 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing of Environment* 64: 331-344.
- Stehman, S. V. 2001. Statistical rigor and practical utility in thematic map accuracy assessment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67: 727-734.
- Stehman, S. V., J. D. Wickham, J. H. Smith y 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* 86: 500-516.
- Stibig, H. J., A. S. Belward, P. S. Roy, U. Rosalina-Wasrin et al. 2007. A land-cover map for South and Southeast Asia derived from SPOT-VEGETATION data. *Journal of Biogeography* 34: 625-637.
- Wickham, J. D., S. V. Stehman, J. H. Smith y L. Yang. 2004. Thematic accuracy of the 1992 National Land-Cover Data for the western United-States. *Remote Sensing of Environment* 91: 452-468.
- Wulder, M. A., J. C. White, S. Magnussen y S. McDonald. 2007. Validation of a large area land cover product using purpose-acquired airborne video. *Remote Sensing of Environment* 106: 480-491.
- Zhu, Z., L. Yang, S. V. Stehman y 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* 66: 1425-1435.