



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**"MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE
CONFIABILIDAD CARTOGRÁFICA PARA LA
COBERTURA VEGETAL EN MÉXICO: APLICACIÓN
A NIVEL NACIONAL Y MUNICIPAL"**

TESIS

para obtener el título de:

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

MARTÍNEZ GONZÁLEZ ROCÍO

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Stéphane André Couturier.



Ciudad Universitaria, México, Agosto 2014.



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.

Run, rabbit run
Dig that hole, forget the sun,
And when at last the work is done
Don't sit down it's time to dig another one.

For long you live and high you fly
But only if you ride the tide
And balanced on the biggest wave
You race toward an early grave.

Pink Floyd, "Breathe", The Dark Side of the Moon, 1973.

Mamá:

Gracias por existir, yo no hubiera llegado a este punto en mi vida sin tus cuidados, sin tu amor y sin tu confianza. Aquí estoy, y yo soy la que está sumamente orgullosa de tener una madre como tú.

Papá:

Por tu enorme esfuerzo para que yo estudiara, muchas gracias.

Hermanas:

Gracias por todo su apoyo y consejos que me hicieron crecer.

Francisco:

Las pláticas que tuvimos mientras yo terminaba esta etapa académica fueron fundamentales para que yo no tirara la toalla, gracias por tus ánimos y por no dudar de mí.

Mis Abuelitas preciosas:

Gracias por cuidarme.

Concluí esta etapa gracias a ustedes.

LOS AMO

Agradecimientos

A Stéphane Couturier, asesor de esta tesis: Gracias por el apoyo, paciencia y la confianza.

A los miembros del sínodo: Dra. Luz María Oralia Tamayo Pérez, Mtra. Cecilia Gutiérrez Nieto, Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez y Mtro. José Mauricio Galeana Pizaña; gracias por sus invaluable comentarios que fortalecieron y mejoraron este trabajo de investigación, también muchas gracias por la accesibilidad que demostraron y el tiempo que me dedicaron.

Se agradece la contribución financiera al trabajo de esta tesis por la DGAPA a través de dos proyectos: PAPIIT RA30013, titulado “Confiabilidad cartográfica de procesos territoriales”; y PAPIIT IN307410, titulado “Observatorio Territorial para la Evaluación de Amenazas y Riesgos”.

Se agradece al Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Ing. Jorge L. Tamayo” por permitir que esta investigación contribuyera al proyecto FORDECYT “Desarrollo de Redes para la Gestión Territorial del Corredor Biológico Mesoamericano – México”. También agradezco al Mtro. Juan Manuel Núñez, por proporcionar material para esta tesis, entre ello, los mapas de cobertura forestal para el Municipio Marqués de Comillas, Chiapas, y por su apoyo en el trabajo de campo.

A la UNAM, mi universidad combativa, laica y gratuita, mi segunda casa. Gracias por todo lo que me brindaste intelectualmente y académicamente. Te defenderé hoy y siempre.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
<i>CAPÍTULO I.</i> <i>ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE EL CÁLCULO DE ÍNDICES DE CONFIABILIDAD</i> <i>CARTOGRÁFICA, USOS DE SUELO Y COBERTURAS VEGETALES</i>	11
1.1 Qué es la confiabilidad cartográfica	11
1.2 Uso de suelo y coberturas vegetales	13
1.3 Deforestación, Cambio Climático y REDD+	15
1.4 Insumos cartográficos	19
1.4.1 MCD12Q1	19
1.4.2 Series de vegetación del INEGI	25
1.4.3 Inventario Nacional Forestal y de Suelos	29
1.5 Descripción de Metodologías y trabajos realizados	33
1.6 Lógica Difusa	38
<i>CAPÍTULO II.</i> <i>METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA A NIVEL</i> <i>NACIONAL</i>	40
2.1 Descripción metodológica	40
2.2 Aplicación metodológica para la validación de MCD12Q1	42
2.2.1 Insumos	42
2.2.2 Diseño del muestreo	42
2.2.3 Diseño de la evaluación	46
2.2.4 Síntesis de la evaluación	55
2.3 Análisis de resultados	59
2.4 Reflexiones sobre el capítulo	72
<i>CAPÍTULO III.</i> <i>EVALUACIÓN PARA EL MAPA DE CAMBIOS DE COBERTURA VEGETAL DEL</i> <i>MUNICIPIO DE MARQUÉS DE COMILLAS, CHIAPAS.</i>	73
3.1 Evaluación de mapas de cambio de cobertura vegetal	73
3.2 Metodología	76
3.3 Zona de estudio	79
3.3.1 Características físicas	80
3.3.2 Historia del municipio Marqués de Comillas	80
3.4 Aplicación metodológica	82
3.5 Análisis de resultados	90
3.6 Reflexiones sobre el capítulo	99
CONCLUSIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	105

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de los productos MOD12Q y MCD12Q1	21
Cuadro 2. Sistemas de clasificación que se incluyen en el producto MCD12Q1	21
Cuadro 3. Adecuación de la clasificación de vegetación Serie I y II para la Serie III del INEGI	26
Cuadro 4. Métodos e insumos para las Series de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI	27
Cuadro 5. Variables recolectadas en campo para el INFyS	31
Cuadro 6. Trabajos publicados sobre evaluación cartográfica a nivel nacional o regional	35
Cuadro 7. Clases de referencia utilizadas para la evaluación	43
Cuadro 8. Agrupación de las clases del INFyS en clases de referencia	44
Cuadro 9. Asignación de etiquetas primarias y secundarias a las clases de referencia	45
Cuadro 10. Algoritmo de calibración de la información de referencia: prueba de coincidencia entre Serie III e INFyS	48
Cuadro 11. Contenido de la tabla de atributos para cada una de las clases de referencia	50
Cuadro 12. Correspondencia de la leyenda de la Serie III de INEGI con la leyenda TFP de MCD12Q1	52
Cuadro 13. Resultados de la prueba de calibración entre Serie III e INFyS	59
Cuadro 14. Resultados del algoritmo de validación por Escenario	60
Cuadro 15. Índices de confiabilidad para MCD12Q1	65
Cuadro 16. Matriz de confusión del Escenario A	67
Cuadro 17. Matriz de confusión del Escenario B	67
Cuadro 18. Matriz de confusión del Escenario C	68
Cuadro 19. Matrices de confusión para el producto MCD12Q1	71
Cuadro 20. Reporte de cifras de deforestación para México	74
Cuadro 21. Clasificación de sensores según su capacidad	78
Cuadro 22. Capacidad del sensor y proceso detectable	78
Cuadro 23. Matriz de confusión para el mapa de cambios de cobertura vegetal	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Cobertura de la clasificación PFT de MCD12Q1 para México	24
Figura 2. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación, Serie III del INEGI	28
Figura 3. Mapa de Sitios de verificación derivados del muestreo del INFyS	32
Figura 4. Ejemplo de una matriz de confusión	37
Figura 5. Lógica difusa	39
Figura 6. Síntesis de cada escenario que conforma el algoritmo de validación	47
Figura 7. Descripción gráfica del Escenario B	53
Figura 8. Query Builders para el Escenario C	55
Figura 9. Ejemplo de una matriz de confusión con números	56
Figura 10. Número de sitios de verificación correctos por escenario	62
Figura 11. Gráfica de barras de la distribución porcentual de aciertos y errores por escenario para el producto MCD12Q1	62
Figura 12. Mapa de distribución de aciertos para el producto MCD12Q1	63
Figura 13. Índice de confiabilidad por fenología para el productor	65
Figura 14. Índice de confiabilidad por fenología para el usuario	66
Figura 15. Mapa de ubicación de Marqués de Comillas, Chis	79
Figura 16. Mapa de cambios de cobertura vegetal en Marqués de Comillas	84
Figura 17. Mapa de cambios de cobertura vegetal con malla para el muestreo	85
Figura 18. Imagen Spot pancromática para el municipio de Marqués de Comillas, 2010	86
Figura 19. Imagen Spot pancromática para el municipio de Marqués de Comillas, 2012	86
Figura 20. Distribución de los sitios de verificación en Marqués de Comillas	87
Figura 21. Ejemplo de validación visual con acierto	88
Figura 22. Ejemplo de validación visual con error	89
Figura 23. Gráfica de porcentaje de cobertura vegetal para Marqués de Comillas	90
Figura 24. Índice de confiabilidad por clase de cambio de cobertura vegetal	91
Figura 25. Área por clase de cambio para el productor	93
Figura 26. Área por clase de cambio para el usuario	94
Figura 27. Distribución de errores y aciertos del mapa de cambios de cobertura vegetal	95

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Deforestación en la frontera agrícola	97
Fotografía 2. Vegetación secundaria	97
Fotografía 3. Sitio de verificación correcto	98
Fotografía 4. Sitio de verificación validado como Permanencia de bosque	98

INTRODUCCIÓN

La cartografía es una herramienta indispensable para la geografía y los manejadores de recursos naturales, dado que funciona como insumo para las evaluaciones ambientales y la toma de decisiones. Sin embargo, la mayor parte de la cartografía es realizada con información obtenida de datos finitos y parciales en el espacio. Generalmente, los usuarios que gestionan la planeación ambiental con mapas, dan por hecho que la información plasmada es correcta y no toman en cuenta los errores que pudieron ocurrir durante su elaboración; por esto, la evaluación de la confiabilidad de los mapas es importante ya que respalda los resultados de estudios que se basan en insumos generados a partir de mapas.

Básicamente, la evaluación de confiabilidad de un mapa es la cuantificación de errores en cuanto a la representación espacial y temática del mapa con respecto a la realidad. Generalmente, estas evaluaciones se realizan con imágenes de satélite debido a que éstas se han convertido en un medio indispensable para el monitoreo de la superficie terrestre. Hoy en día son pocos los trabajos que avalen estadísticamente la confiabilidad de un mapa; por lo tanto, a nivel nacional, son numerosos los trabajos y publicaciones que se basan con datos sin saber si son fiables o no.

Debido a su importancia dentro de la planeación ambiental, la cartografía de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal es la que cuenta con mayor número de evaluaciones de confiabilidad de sus datos, este tipo de cartografía destaca por ser insumo de monitoreo de recursos naturales; además, la consulta de este tipo de mapas permite, por ejemplo, saber en qué medida la cobertura del suelo y de la vegetación ha sufrido cambios. Los cambios en las coberturas de suelo y de vegetación han sido estudiadas con un énfasis especial, pues la mayoría de los cambios de cobertura tanto del suelo como de la vegetación son negativos y repercuten en la degradación ambiental que acumulada a nivel global influye en el cambio climático.

Entre los cambios de cobertura vegetal de mayor importancia a nivel mundial está la deforestación, pues ésta contribuye con el 17.4% de la emisiones de gases efecto invernadero, gases que aceleran el calentamiento global, afectando el cambio climático.

Un tercio del territorio de México está cubierto por bosques, cobertura vegetal donde se concentra la deforestación.

Los bosques son importantes en la regulación del clima ya que absorben CO_2 , por lo tanto, su conservación es importante para combatir el cambio climático pues funcionan como sumideros de carbono. La organización internacional: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático adoptó un plan llamando Reducción de Emisiones por Deforestación, Degradación y conservación de los sumideros de carbono (REDD+) y México es parte de esta estrategia, que busca disminuir las tasas de deforestación.

La presente investigación contiene dos estudios de evaluación cartográfica, cada uno a escalas diferentes. El primer estudio es a escala nacional y detalla la metodología a seguir en una evaluación cartográfica para un mapa de uso de suelo y cobertura vegetal, en este estudio básicamente se obtienen porcentajes de error y acierto de la información contenida en el mapa. El segundo estudio es a escala municipal, y trata de la evaluación de confiabilidad cartográfica en los mapas de cambios de cobertura vegetal, la importancia de este estudio es proporcionar un panorama del alcance que puede tener una evaluación cartográfica, dado que, no sólo es aplicable para obtener porcentajes de error y acierto del contenido de un mapa, con una evaluación de confiabilidad, además, se pueden obtener estadísticas de procesos de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal, como por ejemplo la deforestación, proceso que es de suma importancia para el monitoreo de los almacenes de carbono.

Ambas evaluaciones de confiabilidad cartográfica, se basan en el marco de validación cartográfica general propuesto por Stehman *et al.* (1998) y, tomando en cuenta las particularidades y características físicas del país, se retomaron las propuestas metodológicas de validación cartográfica de Couturier *et al.* (2007), Couturier (2011) y Couturier *et al.* (2012).

Los productos cartográficos a evaluar son: MCD12Q1, un mapa de usos de suelo y cobertura vegetales que se deriva de imágenes de satélite del sensor MODIS y el mapa de cambio coberturas vegetales para el municipio de Marqués de Comillas Chiapas, zona con altas tasas de deforestación en México.

El primer capítulo, presenta un marco general de la confiabilidad cartográfica; se explican conceptos básicos; se describe la relevancia de la confiabilidad cartográfica en los cambios de uso de suelo y cobertura vegetal, pues con la evaluación de confiabilidad de los cambios, se obtienen estadísticas más certeras de procesos como la deforestación en zonas tropicales y se facilita el monitoreo de las reservas de carbono; se detallan las características de los principales insumos cartográficos para el país; y, se explica el marco general de validación cartográfico.

El segundo capítulo detalla la aplicación metodológica de la evaluación cartográfica para un mapa de uso de suelo y cobertura vegetal, este mapa se obtiene del producto MCD12Q1 versión 5, y es derivado de imágenes satelitales MODIS, cuya versión 4 ha sido evaluada por Couturier (2011). Este capítulo tiene la finalidad de contribuir, por una lado, a la documentación de una metodología de evaluación cartográfica de mapas de uso de suelo y cobertura vegetal para su futura aplicación y, por otro lado, evaluar las mejoras en el producto MCD12Q1. La escala de este estudio es a nivel nacional.

En el tercer capítulo, se aplica la metodología para validar un mapa de cambios de cobertura vegetal, la finalidad de este capítulo es enfatizar que la evaluación de mapas de cambios de uso de suelo y cobertura vegetal proporciona estadísticas confiables de procesos como la deforestación y, por lo tanto, es importante para el monitoreo de dicho proceso. La escala de este estudio es municipal, se trata del municipio Marqués de Comillas ubicado en la cuenca del río Usumacinta en el estado de Chiapas; es una zona que cuenta con alto capital natural y por lo tanto, de valor estratégico en el país.

OBJETIVOS:

General:

-Evaluar la confiabilidad de la cartografía de uso de suelo y coberturas vegetales en México.

Particulares:

-Contribuir a la documentación de una metodología de validación cartográfica adecuada para las condiciones del país.

-Proporcionar una metodología con validez estadística para la evaluación de cartografía de uso de suelo y cobertura vegetal.

-Impulsar la construcción de un acervo de datos estadísticamente válidos para la cartografía del país partiendo de dar a conocer métodos de validación cartográfica que se exponen en la presente tesis de investigación.

-Dar continuidad al cálculo de índices de confiabilidad para el producto MOD12Q1.

-Contribución a la estimación de márgenes de error de tasas de deforestación en la región de Marqués de Comillas, Chiapas a partir de una evaluación de confiabilidad cartográfica.

-Promover la validación cartográfica como método estadísticamente riguroso y deseable para el reporte de estadísticas del país.

HIPÓTESIS:

La evaluación de la confiabilidad cartográfica con el uso del enfoque difuso es un método viable para evaluar los usos de suelo y coberturas vegetales del producto MCD12Q1 y los cambios en las coberturas vegetales. Se espera que los resultados del índice de confiabilidad del producto MCD12Q1 versión 5 sean más altos que el obtenido anteriormente por Couturier (2011).

Se emite la hipótesis de que la técnica utilizada para evaluar la confiabilidad de los mapas de cobertura vegetal, puede ser utilizada con buenos resultados para proyectar los cambios en la cobertura vegetal, por lo menos para una zona no muy extensa como la zona piloto de Marqués de Comillas, en la cuenca del río Usumacinta, Chiapas.

CAPÍTULO I.

ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE EL CÁLCULO DE ÍNDICES DE CONFIABILIDAD CARTOGRÁFICA, USOS DE SUELO Y COBERTURAS VEGETALES

1.1 QUÉ ES LA CONFIABILIDAD CARTOGRÁFICA

La confiabilidad cartográfica es el resultado de los cálculos estadísticos aplicados a un mapa que comúnmente es usado para la gestión ambiental; el cálculo de la confiabilidad cartográfica dota de validez estadística al mapa y proporciona tanto al productor del mapa como al usuario del mapa un porcentaje que representa la certeza o la correspondencia con la realidad de los datos expuestos en dicho mapa.

El cálculo de la confiabilidad cartográfica es la comparación de la información contenida en el mapa con información de referencia (material de verificación) que es considerado de alta fiabilidad pues representa la “realidad”. Para realizar una evaluación cartográfica es necesario el producto o mapa a evaluar y el material de referencia, que por ser considerado como la “realidad”, generalmente lo conforman fotografías aéreas e imágenes satelitales, pues contienen información de mayor precisión de la superficie terrestre.

Couturier y Mas (2009) mencionan que los datos derivados de la estadística en un mapa proveen dos índices de confiabilidad, el primero es el Índice de Confiabilidad Global (ICG), que es el porcentaje de área total del mapa en donde se representa una información correcta y el segundo es el Índice de Confiabilidad por Clase (ICC); este índice es el porcentaje de aciertos o de información correcta en la porción del mapa evaluado en donde está representada una clase.

Generalmente, los mapas que son sometidos a evaluaciones de confiabilidad cartográfica son mapas cuya temática se refiere a Usos de Suelo y Cobertura Vegetal (USCV) lo que se debe probablemente a que son ampliamente utilizados en la gestión ambiental y que de ellos se derivan algunos datos estadísticos importantes como tasas de deforestación,

tasas de emisión de carbono o tasas de cambio de uso de suelo y, además, son mapas que poseen variables con mayor dinámica. Con lo anteriormente planteado, puede surgir una duda que bien, vale la pena explicar en los siguientes renglones ¿por qué un mapa tiene errores?

Primero, es indispensable mencionar que un mapa es una representación reducida, generalizada y matemáticamente determinada de una superficie terrestre; en él se representan la distribución y los vínculos de los distintos fenómenos naturales (Salitechv, 1979). Básicamente, un mapa es una representación gráfica, un modelo de la realidad en donde se sintetiza información resultante de investigaciones previas.

En un principio, los mapas eran elaborados a partir de la observación directa del cartógrafo, quien hacía numerosos cálculos matemáticos, después, con la invención de la fotografía y el desarrollo de la aviación, la cartografía se basó en la información que la fotografía aérea le proporcionaba, marcando así un considerable avance técnico. En la actualidad el continuo desarrollo de tecnologías en el ámbito de teledetección desarrolladas durante el siglo XX ha reconocido a las imágenes de satélite como un insumo clave para la producción cartográfica.

Prácticamente a partir de los años 90's las imágenes que provienen de plataformas espaciales han demostrado ser eficaces gracias a la resolución espacial, temporal y espectral de la imagen, pues permiten distinguir fácilmente características morfológicas e hidrológicas, zonas urbanas y tipos de vegetación, por esto es su amplia aceptación para la producción de mapas. Sin embargo, al momento de clasificar o categorizar con ayuda de imágenes de satélite, debido a diferencias por la resolución espacial y espectral de la imagen se puede hacer difícil la distinción entre una categoría y otra, lo que genera errores en el mapa producto de esas imágenes. Además, el intento de establecer subdivisiones en una clase temática y pretender discriminar cubiertas que espectralmente pudieran parecer muy similares, implica un riesgo que genera errores y que en muchas ocasiones se reflejan en el mapa (Chuvieco, 2002).

Con base en lo anterior se concluye lo siguiente: los errores en los mapas se deben a que éstos no son una representación detallada sino una representación general de los fenómenos; esto quiere decir que por defecto un mapa siempre tendrá errores; y ,

actualmente la teledetección a través de imágenes satelitales ha facilitado la producción de mapas y ha mejorado la calidad de datos, empero, durante el tratamiento automatizado de las imágenes de satélite se propagan otros errores que se derivan de las diferencias espectrales y espaciales de la imagen, del método utilizado para clasificar los píxeles de la imagen y la capacidad del software para captar esas diferencias, lo que genera errores que son plasmados en el producto cartográfico final. Por ende, existe incertidumbre en el mapa.

La idea de que un mapa es una representación fiel y exacta de la realidad está difundida en la mayoría de los usuarios; Chuvieco (2002) en su libro de *Teledetección ambiental* señala y recomienda que tanto en la interpretación digital como en la interpretación visual de imágenes satelitales, el productor verifique la calidad del mapa generado, pues esto le permitirá al usuario saber el riesgo al tomar decisiones basadas en el mapa. Por esto, es importante que la cartografía se acompañe de índices de confiabilidad, pues estos índices proporcionan un porcentaje de la correspondencia de los datos del mapa con la realidad.

Cabe mencionar que el índice de confiabilidad aceptable para un mapa depende de que existan trabajos de evaluación anteriores para ese mismo mapa, pues en ese caso, se busca que la confiabilidad de una mapa sea mayor que la anterior; en caso de que el mapa no cuente con una evaluación de confiabilidad, el índice de confiabilidad para dicho mapa se espera que se mantenga por arriba del 60% pues es el promedio de los mapas evaluados a nivel nacional o regional en distintas partes del mundo (Buttner *et al.*, 2006; Couturier, 2007; Wulder *et al.*, 2007).

1.2 USO DE SUELO Y COBERTURAS VEGETALES

Desde épocas muy remotas la humanidad ha cambiado la superficie de la Tierra para proveerse de comida, agua y todos aquellos recursos que le permiten subsistir. No obstante, los cambios en la superficie terrestre han sido acelerados en los últimos 300 años y particularmente en la segunda mitad del siglo XX se han registrado altas tasas de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal (Lambin, 2001). Sin embargo, en menor proporción, los cambios en la cobertura de la vegetación también son resultado de fenómenos naturales como huracanes, incendios, deslizamientos de suelo, entre otros (Duran-Medina *et al.*, 2010).

Estos cambios, cuando son muy acentuados, se acumulan a escala global y afectan de manera significativa, ya que impactan directamente al cambio climático y la biodiversidad (Lambin, 2001). Vitousek *et al.* (1997) mencionan que la transformación del suelo por parte de los humanos es la principal causa de alteración de los ecosistemas, idea que hoy en día sigue vigente y Kolb (2013) sigue enfatizando que los cambios en los usos de suelo es el factor más importante para la degradación ambiental; por esto, la cartografía y los estudios de cambio de uso de suelo y coberturas vegetales son de suma importancia en materia ambiental.

El concepto de uso de suelo y coberturas vegetales (USCV) adoptado en esta tesis deriva del concepto de *uso de suelo y coberturas terrestres* de Lambin *et al.*, (2006). Dicho autor menciona las diferencias entre el uso de suelo y las coberturas terrestres; esclarece que la cobertura terrestre a la que cita como *Land Cover*, es el principal medio en donde se llevan a cabo un gran número de procesos biofísicos y está definida por los atributos de la superficie de la tierra, incluidas la biota, el suelo, la topografía, las aguas subterráneas y las estructuras humanas¹. Por lo tanto, una conversión de cobertura terrestre es sólo cuando se reemplaza una cobertura por otro tipo de cobertura; es decir, hay un cambio en la clasificación del suelo, ejemplo de esto, es el caso de la expansión de la agricultura sobre coberturas de bosques. Sin embargo, existen procesos que sólo modifican la cobertura terrestre y no deben ser confundidos con cambios de cobertura terrestre, ya que estas modificaciones sólo tienen efectos en las características de la cobertura, pero no son suficientes para que se lleve a cabo un cambio de clasificación en la cobertura, un ejemplo de esto es la tala selectiva, en donde una cobertura clasificada como bosque sufre alteraciones en sus características originales debido al desmonte de algunas especies². Por último, Lambin *et al.* (2006) explica que el uso de suelo al que cita como *Land Use* es definido según las actividades que los humanos desarrollan sobre una cobertura terrestre, por lo tanto, el uso de suelo se refiere a la clasificación del suelo en agrícola, pecuario, forestal, urbano, entre otros.

¹ El concepto de uso de suelo y coberturas vegetales hace énfasis en que, de todas la coberturas terrestres que existen, la de interés para este trabajo son la coberturas vegetales.

² Los procesos de modificación de coberturas terrestres dan como resultado fragmentación y degradación de coberturas terrestres dejando impactos en diferentes escalas.

Los cambios de cobertura vegetal que han tenido mayor relevancia a nivel mundial son: la deforestación tropical, las modificaciones de los pastizales (conversión de tierras para pastoreo en tierras de producción intensiva de forraje o silvicultura), la intensificación de la agricultura y la urbanización (Lambin *et al.*, 2001). De los tipos de cambio de cobertura mencionados anteriormente, la mayoría de los estudios científicos se inclinan por el estudio de la conversión de bosques tropicales en áreas agrícolas y ganaderas, debido a que este tipo de deforestación conocida como deforestación tropical, es al que se la atribuye la aportación de grandes cantidades de carbono a la atmósfera que incrementa considerablemente las concentraciones de gases efecto invernadero, detonante para el calentamiento global (Skole *et al.*, 1994).

1.3 DEFORESTACIÓN, CAMBIO CLIMÁTICO Y REDD+

Los bosques juegan un papel importante en la regulación del clima ya que tienen la capacidad de absorber y fijar CO₂ (CONAFOR, 2010), son clave en el suministro de bienes y servicios ambientales (Velázquez *et al.*, 2002), como la regulación en el ciclo del agua, protección de la biodiversidad, polinización, dispersión de semillas, mantenimiento de suelos, amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales, regulación de la calidad de aire, entre otros (CONAFOR, 2012).

Cifras de la FAO (2010) reportan que los recursos forestales a nivel mundial ocupan el 31% de la superficie terrestre, aproximadamente 3,540 millones de ha. En México, aproximadamente el 67% del total de su superficie de tierras que equivale a alrededor de 138 millones de ha, están cubiertas por vegetación forestal. La agricultura ha sido un gran catalizador de las transformaciones de la tierra, casi una tercera parte de la Tierra es usada para el crecimiento de cultivos y pastoreo (FAO, 2000); sin embargo, la deforestación es una de las más comunes y reconocidas formas de cambio de cobertura terrestre.

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) define deforestación como un cambio drástico en el uso de suelo, donde se pierde toda la cobertura forestal y pasa a otros usos de suelo. Este proceso es importante, ya que a través de la deforestación el carbono almacenado en los bosques es liberado a la atmósfera. El escenario mundial de deforestación según Velázquez *et al.* (2002), se agudizó al cuadruplicarse la densidad de

población que derivó en la pérdida de superficie forestal más grave en toda la historia de la humanidad. Además, Velázquez *et al.* (2002) puntualiza que para los años 1964-1973 existía una pérdida anual de 11 millones de hectáreas en los bosques tropicales de todo el mundo, y para el periodo de 1981 a 1990 la deforestación alcanzó 15.5 millones de ha. por año.

En México el escenario nacional de deforestación que reseña Céspedes-Flores *et al.* (2010), basado en una revisión exhaustiva e histórica, apunta que para la década de los 80's la deforestación se calculó entre los 350 y 650 mil ha por año. Un dato relevante que reportan Céspedes-Flores *et al.*, es un incremento en la tasa de deforestación de 175 mil ha por año, para el periodo de 1973 a 1993 a 319 mil ha por año, para el periodo de 1993 al 2000. Seguido de este aumento en la tasa de deforestación nacional, la FAO (2010) para México reporta una disminución de la tasa de deforestación que para el periodo de 2005 al 2010 decrece a 155 mil ha por año.

Es importante resaltar que los bosque tropicales, es donde se registran las tasas de deforestación más altas del país, Mas *et al.* (2002) reporta una tasa de deforestación a nivel nacional de 3% que en zonas tropicales se dispara a 8%. Este dato, aunado con la importancia que tiene el bosque tropical por la captura de carbono convierte a la cobertura forestal tropical como un tópico de especial relevancia en el ámbito internacional.

Las causas, consecuencias e impactos de este proceso de cambio en el tipo cobertura terrestre, identificado como deforestación, son innumerables. Lambin *et al.* (2001) agrupa las causas de deforestación en: factores económicos, que incluyen el crecimiento del mercado, la comercialización, el crecimiento industrial y la agro-tecnología, la expansión agropecuaria y la explotación comercial de madera, la inestabilidad gubernamental, los conflictos internacionales y el turismo; factores demográficos, como la inmigración, el crecimiento de la población; factores institucionales, que incluye políticas de manejo de bosques, subsidios, derechos de la propiedad, y factores culturales, como la actitud pública y la pérdida de valores y creencias.

Por otro lado, Lambin *et al.* (2001) identifica a las inundaciones, deslizamientos de laderas, pérdida de la biodiversidad, disminución en la calidad del suelo, efecto invernadero, degradación y fragmentación del paisaje y alteraciones en el ciclo

hidrológico, como las consecuencias más comunes de la deforestación que impactan, por ejemplo, en la productividad del suelo y la seguridad alimentaria.

En párrafos anteriores se refiere la importancia de los bosques tropicales en el combate al cambio climático; a nivel internacional los bosques capturan alrededor de 5 mil millones de toneladas de CO₂ de los 32 mil millones que se emiten anualmente como resultado de actividades humanas (Sabogal, 2008). El cambio climático a nivel mundial es un tema de relevancia debido al impacto negativo que causa en el ambiente. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”; por otro lado, la CONAFOR (2012) considera al calentamiento global como una manifestación del cambio climático.

Con la información anterior se plantea que la relación existente entre bosques tropicales y cambio climático es a través de la captura de dióxido de carbono (CO₂), ya que, el Co₂ forma parte de los gases efecto invernadero (GEI); estos gases son los responsables de mantener la temperatura del planeta adecuada para la existencia de la vida; sin embargo, el aumento de los estándares de las concentraciones de estos gases significa un calentamiento de la atmósfera que desestabiliza el clima a nivel mundial.

El Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) en el año 2007 notifica que las tres principales fuentes de emisiones de gases efecto invernadero son: el sector energético con 25.9%, el sector industrial con el 19.4% y el sector forestal con el 17.4%, por lo tanto, estos tres sectores aportan 62.7% al total de las emisiones de GEI. En el contexto nacional en el año 2009 la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) junto con el Instituto Nacional de Ecología (INE) notificaron que el uso de suelo, los cambios de uso de suelo y la silvicultura son la cuarta fuente emisora de GEI, antecedidos por la generación de energía, el transporte y los desechos. Por ende, la pérdida de cobertura forestal tropical, debida a procesos de cambio de cobertura y uso de suelo son factores importantes para el combate de cambio climático.

Evidentemente, las cifras presentadas con anterioridad generaron respuesta internacional y nacional ante la deforestación y degradación de los bosques³. Durante la COP 13⁴ llevada a cabo en Bali, 2007, se adoptó un plan ambicioso para llegar a un acuerdo global a largo plazo en donde se reconoce el mecanismo de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de bosques (REDD) como un mecanismo válido en la lucha contra el cambio climático. En la COP 15 se considera el papel fundamental de los bosques en la conservación y reservas de carbono y se agregó el signo “+” a REDD que significa la conservación de los sumideros de carbono.

En resumen, REDD+ es un mecanismo y política de mitigación que fomenta actividades de reducción de la deforestación, con la gestión contable en un área, región o país, de las emisiones de CO₂ a la atmósfera (CABAL, 2010; CONAFOR, 2012). El objetivo es conservar e incrementar los almacenes de carbono en los bosques, simultáneamente enfrentar la pobreza rural, ayudar a la conservación de la biodiversidad y promover el manejo sustentable del ecosistema (Parker *et al.*, 2009). Un principio elemental de REDD+ es que los esfuerzos llevados a cabo por los países menos industrializados sean apoyados por los países más industrializados.

REDD+ como política de mitigación, se establece como un mecanismo voluntario que pueden llevar a cabo los países en vías de desarrollo; sin embargo, la CMNUCC establece una serie de requisitos que los países deben sostener para ser parte de REDD+; éstos se enlistan por la CONAFOR (2012) y se presentan a continuación.

- I. Un plan de acción o estrategia que sirva de guía para la implementación de REDD+ a nivel nacional.
- II. Niveles nacionales de referencia de emisiones forestales o niveles nacionales de referencia forestal, estatus actual del balance de emisiones.
- III. Sistemas nacionales de monitoreo forestal (Sistema MRV) robustos y transparentes para reportar emisiones y absorciones asociadas a los bosques.

³ En el contexto de cambio climático, la degradación se refiere específicamente a la reducción en la cantidad de carbono almacenado en el bosque (CONAFOR, 2012).

⁴ La conferencia de Partes (COP) es la máxima autoridad de la CMNUCC, es una asociación de todos los países miembros de la convención, que a partir del año de 1995 se reúne cada año. México es país miembro de la COP.

Este sistema ayuda a reportar a la CMNUCC la contabilización de emisiones y absorciones.

- IV. Un sistema para informar cómo se están llevando las salvaguardas en el diseño de la estrategia nacional. Se refiere a la inclusión y respeto de las comunidades locales y los pueblos indígenas, así como la conservación de los ecosistemas, su biodiversidad y los servicios que proveen.

Los datos expuestos con antelación reflejan que los bosques representan un recurso vulnerable cuya conservación, manejo y restauración ofrecen una gran oportunidad para generar beneficios. En México, la presión existente sobre los bosques se refleja en las tasas de deforestación que aunque son menores que en las décadas pasadas, cualitativamente aún son muy importantes, además, el territorio nacional cuenta con innumerables procesos de deforestación y degradación (CONAFOR, 2010). Bajo este contexto, México se unió a la estrategia de mitigación REDD+ y se está preparando para desarrollar una estrategia nacional de reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques que busca desacelerar, revertir y frenar la pérdida de cobertura forestal.

1.4 INSUMOS CARTOGRÁFICOS

Como se mencionó anteriormente, para la evaluación de un mapa el verificador debe tener datos de referencia o material de verificación que son considerados como la “realidad”. En esta investigación el producto a validar es MCD12Q1 versión 5, un producto cartográfico de usos de suelo y cobertura vegetal que se deriva del sensor MODIS y los insumos que servirán como productos de referencia y que son considerados como la “realidad” son la serie III del INEGI y el INFyS. En los próximos párrafos se presenta una descripción de estos productos cartográficos.

1.4.1 MCD12Q1

En la National Aeronautic and Space Administration (NASA) existe un proyecto llamado Earth Observing System (EOS) cuyo principal objetivo es la observación continua de los cambios globales que incluye la atmósfera, el océano y la superficie terrestre. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) es un sensor remoto que forma parte del proyecto EOS y que por sus características espaciales y espectrales, es uno de los más

importantes para el monitoreo de los procesos de cambio en la Tierra. Este sensor está a bordo de dos plataformas satelitales, Terra y Aqua y ambas plataformas monitorean el total de la superficie terrestre cada uno o dos días (García-Mora *et al.*, 2011).

Con base en los datos de MODIS se elaboran una gran cantidad de productos: MOCEAN, son los productos para el estudio de los océanos; MODIS Atmosphere, son productos para el estudio de la atmósfera; y MODLAND son los productos especializados para la cubierta terrestre. Dentro de los productos MODLAND existe una subdivisión llamada MOD12 que es la que se encarga de la cobertura del suelo (García-Mora *et al.*, 2011).

MOD12Q1 es un mapa de coberturas de suelo con base en diferentes sistemas de clasificación; la versión 4 de este producto contiene datos que provienen sólo de la plataforma Terra. A partir del 2010 se difundió la nueva versión 5 de este producto, la cual contiene datos de ambas plataformas y es por esto que el producto versión 5 se encuentra disponible bajo el nombre de MCD12Q1.

Este producto, al ser una combinación de datos, se obtiene con base en una clasificación supervisada con árboles de decisión⁵, por el grado de procesamiento de los datos forma parte del nivel 3, es decir, MCD12Q1 es un producto de valor agregado que se deriva de variables geofísicas; para eso se realiza un muestreo de los datos de las bandas originales y se forman compuestos de tiempo. Las características tanto de la versión 4 y 5 se resumen en la cuadro 1.

⁵ La clasificación supervisada con árboles de decisión consiste en clasificar los píxeles de las imágenes de satélite con base en un modelo de predicción llamado árbol de decisión que está compuesto por nodos y donde cada nodo está asociado a un atributo, lo que permite clasificar de manera más correcta un píxel (Franco-Arcega *et al.*, 2008).

Cuadro 1. Características de los productos MOD12Q1 y MCD12Q1

Clave	MOD12Q1	MCD12Q1
Plataforma	Terra	Combinada (Terra-Aqua)
Resolución temporal	Anual	Anual
Resolución espacial	1000 m	500 m
Extensión espacial	Tile	Tile
Nivel	L3	L3
Versión	4	5
Capas	16	16
Periodo de producción	2001-2004	2001- 2005

Elaboración propia con base en García Mora *et al.*, 2011

Como se ha mencionado MCD12Q1 son mapas de uso de suelo y cobertura vegetal; estos mapas tienen cinco sistemas de clasificación, el primero es por el Programa Internacional Geosfera Biosfera (IGBP), el segundo es el sistema IGBP modificado por la Universidad de Maryland (UMD), el tercero corresponde a biomas basados en el LAI/FPAR⁶, el cuarto son biomas ciclo biogeoquímico (Biome-BCG) y el quinto sistema de clasificación corresponde a 12 categorías funcionales de plantas y se llama PFT. El cuadro 2 describe los sistemas de clasificación para MCD12Q1.

Cuadro 2. Sistemas de clasificación que se incluyen en el producto MCD12Q1

IGBP	UMD	Biomas LAI/FPAR	Biomas BGC	Categorías funcionales de Plantas, PFT
0 cuerpos de agua	0 cuerpos de agua	0 cuerpos de agua	0 cuerpos de agua	0 cuerpos de agua
1 Bosque perenne de coníferas	1 Bosque perenne de coníferas	1 Pastos y cultivos de cereales	1 Vegetación perenne de coníferas	1 Bosque perenne de coníferas
2 Bosque perenne de latifoliadas	2 Bosque perenne de latifoliadas	2 Matorrales	2 Vegetación perenne de latifoliadas	2 Bosque perenne de latifoliadas

⁶ Se refiere al Índice de Área Foliar que por sus siglas en ingles se denomina LAI (Leaf Area Index) y a Fracción de Radiación Activa Fotosintética que por sus siglas en ingles se denomina FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation).

Continúa cuadro 2.

IGBP	UMD	Biomás LAI/FPAR	Biomás BGC	Categorías funcionales de Plantas, PFT
3 Bosque deciduo de coníferas	3 Bosque deciduo de coníferas	3 Cultivos de latifoliadas	3 Vegetación decidua de coníferas	3 Bosque deciduo de coníferas
4 Bosque deciduo de latifoliadas	4 Bosque deciduo de latifoliadas	4 Sabana	4 Vegetación decidua de latifoliadas	4 Bosque deciduo de latifoliadas
5 Bosques Mixtos	5 Bosques Mixtos	5 Bosque perenne de latifoliadas	5 Vegetación anual de latifoliadas	5 Matorral, vegetación arbustiva
6 Matorral cerrado	6 Matorral cerrado	6 Bosque deciduo de latifoliadas	6 Vegetación herbácea anual	6 Pastizal
7 Matorral abierto	7 Matorral abierto	7 Bosque perenne de coníferas	7 Áreas sin vegetación	7 Cultivos anuales
8 Sabanas arboladas	8 Sabanas arboladas	8 Bosque deciduo de coníferas	8 Urbano	8 Cultivos perennes
9 Sabanas	9 Sabanas	9 Sin vegetación	254 No clasificado	9 Urbano/construido
10 Pastos	10 Pastos	10 Urbano		10 Nieve y hielo
11 Humedales permanentes	11 Cultivos	254 No Clasificado		11 Suelo desnudo o con vegetación escasa
12 Cultivos	12 Urbano/construido			254 No clasificado
13 Urbano/construido	13 Suelo desnudo o con vegetación escasa			
14 Mosaico de cultivos y vegetación natural	254 No clasificado			
15 Nieve y hielo				
16 Suelo desnudo o con vegetación escasa				
254 No Clasificado				

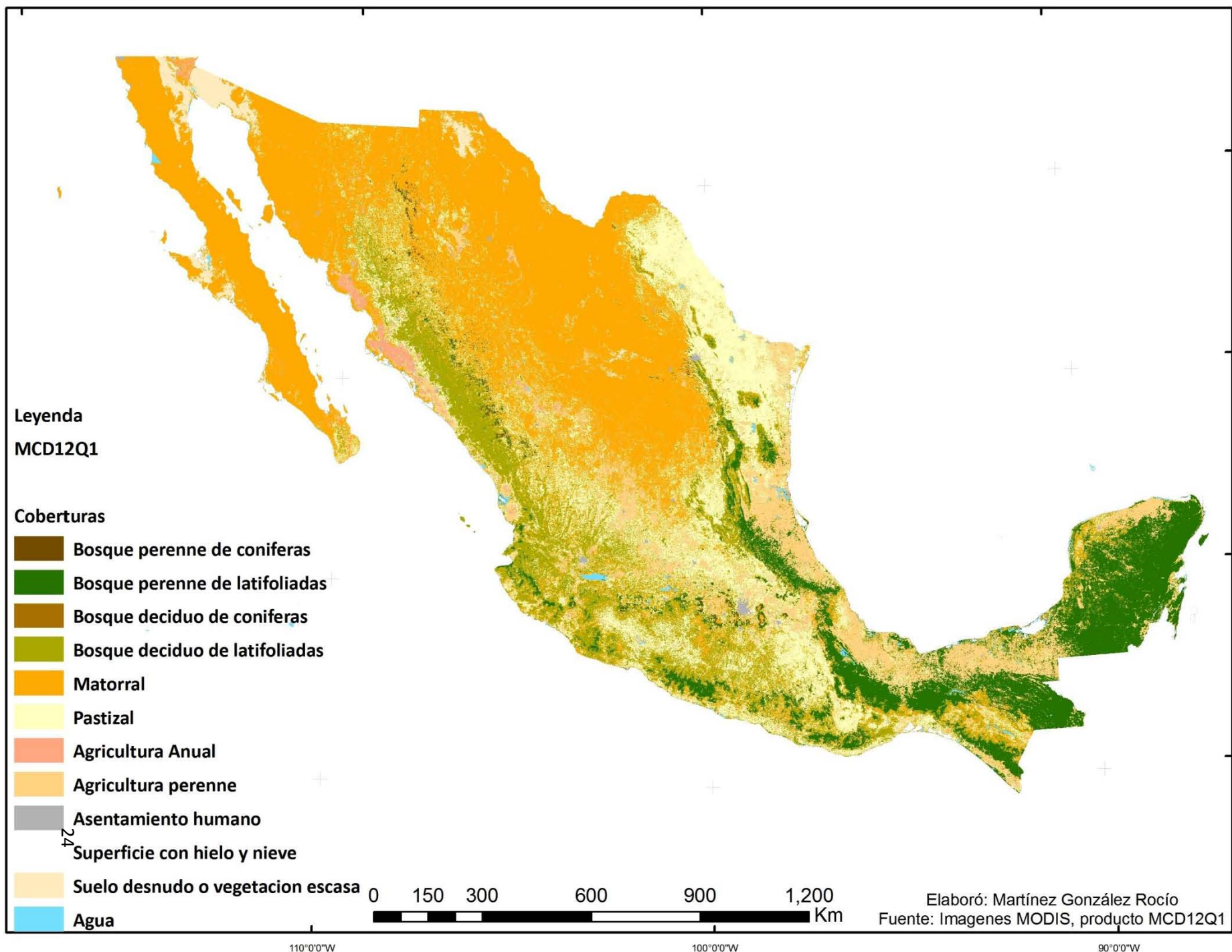
Fuente: García *et al.* (2011)

El producto MCD12Q1 es de libre acceso. Todos los productos MODIS actualmente se pueden obtener a través del portal de la NASA⁷ que se encarga de distribuir los datos MODIS, en esta página se encuentran los datos crudos; por lo tanto, tienen que calibrarse con software especializados. Actualmente, en México existe una antena en la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) dependencia de la SEMARNAT, que recibe diariamente imágenes del sensor MODIS; el portal de la CONABIO⁸ a partir de julio de 2004 a la fecha, ha puesto a disposición del usuario estas imágenes calibradas y rectificadas.

⁷ <http://reverb.echo.nasa.gov>

⁸ http://www.conabio.gob.mx/informacion/geo_espanol/modis/modis_ftp.html

Figura 1. Mapa de Cobertura de la clasificación PFT de MCD12Q1 para México



1.4.2 SERIES DE VEGETACIÓN DEL INEGI

En 1968 se crea la Comisión de Estudios del Territorio Nacional y Planeación (CETENAP) con el fin de inventariar los recursos naturales e infraestructura del país; esta comisión inicia con la elaboración de las cartas topográficas escala 1:50,000 y con la elaboración de mapas temáticos de los recursos naturales presentados como carta geológica, carta edafológica, carta de uso de suelo y carta de uso potencial. Esta comisión sufrió diferentes cambios de nombre a lo largo de 15 años, pasando a ser la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL), la Dirección General de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL) y la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (DIGETENAL), aun así, no se dejó la producción de cartas topográficas y temáticas del país. En el año de 1983 se crea el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) que absorbe a la DIGETENAL (Victoria-Hernández, 2011).

El INEGI comienza con la elaboración de las series de Uso de suelo y Vegetación en México, hasta la fecha se han elaborado cinco series: Serie I contiene datos de la década de 1980; la Serie II tiene datos de la década de 1990; la Serie III contiene información del periodo 2002-2003; la Serie IV contiene información del periodo 2007-2008 y la Serie V contiene información del periodo 2011-2013 (Victoria-Hernández, 2011).

Velázquez *et al.* (2002) mencionan que la Serie I es cartografía a escala 1:250,000 elaborada a partir de interpretación de fotografías aéreas tomadas entre los años de 1968 y 1986 y trabajo de campo, que constaba de 10,000 sitios de verificación. Su sistema clasificatorio posee más de 300 clases que incluyen diferentes tipos de vegetación con base en criterios de fisonomía, florística, fenología y estado de conservación de los tipos de suelo.

La serie II es una actualización de la cartografía de la serie I; esto se hizo con la interpretación visual de espaciomapas, éstos se derivaron de composiciones a color de imágenes LANDSAT TM del año 1993, la combinación de bandas fue 4, 3 y 2. Los espaciomapas fueron impresos a escala 1:250,000 y el sistema clasificatorio fue más detallado que la serie I (INEGI, 2005).

La serie III es la actualización de las versiones anteriores utilizando imágenes de satélite LANDSAT ETM 2000 y 2002 y respaldada con verificación de campo. Esta serie se

adecúo el sistema clasificatorio de las dos series anteriores, con el objetivo de que fuera una clasificación con mayor aplicabilidad por los usuarios (INEGI, 2009). El cuadro 4 muestra la adecuación de la clasificación para la serie III.

Cuadro 3. Adecuación de la clasificación de vegetación Serie I y II para la serie III del INEGI

Series I y II	Serie III
Tipos de comunidades vegetales clasificadas bajo el mismo concepto.	Tipos de comunidades vegetales que se basan en afinidades ecológicas florísticas y fisonómicas.
Clasificación de selvas y bosques bajo criterios florísticos, de altura y caducidad del follaje.	Separación de bosques y selvas con base en su altura y cobertura arbórea además de los criterios ecológicos y florísticos.
Falta de consistencia en los criterios que definen al matorral subtropical y a la selva baja caducifolia.	De acuerdo con la afinidad florística y el componente climático, se adecuó del concepto de matorral subtropical. Cambio del concepto a vegetación secundaria de Selva Baja Caducifolia.
121 combinaciones de tipos de agricultura.	20 combinaciones de tipos de agricultura.
El pastizal cultivado se incluye en la entidad pastizal y el bosque cultivado en la entidad bosque.	Se le asigna una entidad específica a los pastizales cultivados y bosques cultivados, incluyéndose en agricultura.
El concepto de erosión se integra a los diferentes conceptos de agricultura y vegetación.	Se traslada el concepto de erosión a la información edafológica.
Se incluyen 13 conceptos en la entidad otros tipos de vegetación.	Se incluyen únicamente tres conceptos en la entidad otros tipos de vegetación.
No se considera la vegetación inducida.	Se incorpora el concepto vegetación inducida.
Criterios generalizados para la clasificación de los mezquiales.	Se efectúa una reclasificación de los mezquiales de acuerdo a criterios climáticos.

Fuente: INEGI, 2009.

La serie IV es la actualización de la serie III a través de métodos más sofisticados que los utilizados anteriormente. En la serie IV se utilizaron imágenes SPOT V multiespectrales y ortorrectificadas del año 2007, archivos vectoriales de las series I, II y III y modelos digitales de elevación; esta serie también es respaldada con verificación de campo y continúa utilizando el sistema de clasificación de la serie III (INEGI, 2012).

La serie V también es la actualización de los datos de la Serie IV. Se utilizaron imágenes multiespectrales LANDSAT para el año 2011, el archivo vectorial de la Serie IV y modelos digitales de elevación. Para realizar la Serie V, se detectaron áreas con cambios y adecuaciones con base en la serie de vegetación anterior, dichas áreas fueron ratificadas en campo y se rectificaron. A partir del año 2013 esta serie de vegetación se encuentra

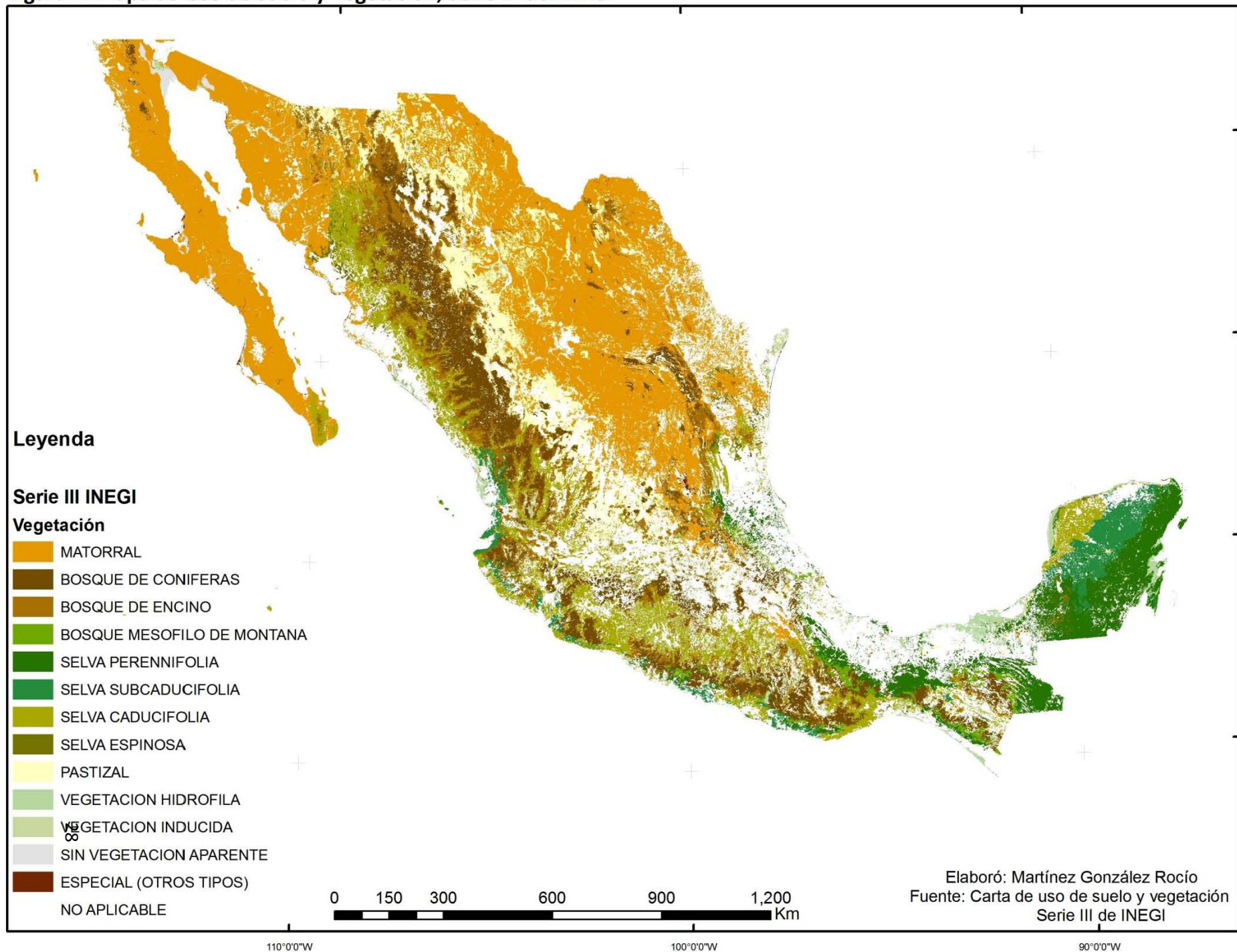
disponible a escala 1:250 000 y en formato digital en el portal del INEGI (Niño-Alcocer *et al.*, 2013).

Cuadro 4. Métodos e insumos para las Series de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI

EVENTO	FUENTE DE DATOS ESPACIALES	RESOLUCIÓN	METODOLOGÍA	Fecha de datos de campo	INTERVALO
Serie I	Fotografía aérea a escalas 1:50,000 y 1:80,000 en blanco y negro y sepia.	Grano de emulsión/ escala de vuelo	Tecnología analógica. Equipos ópticos mecánicos transferido a formato digital por digitalización manual y barrido	(1968) 1971-1986	10 años
Serie II	Compuestos espaciomapa de imágenes LANDSAT TM multiespectral	Pixel de 50 m	Tecnología analógica. Equipos ópticos mecánicos transferido a formato digital por digitalización manual y barrido	1993-1998	5 años
Serie III	Imágenes LANDSAT ETM multiespectral	Pixel de 27.5 m	Tecnología digital plataforma PC y software SIG	2002-2003	5 años
Serie IV	Imágenes Spot V multiespectral	Pixel de 10 m	Tecnología digital plataforma PC y software SIG	2007-2008	5 años
Serie V	Imágenes LANDSAT ETM multiespectral	Pixel de 30 m	Tecnología digital plataforma PC y software SIG	2011-2013	

Fuente: Victoria Hernández *et al.* (2011), modificado por Rocío Martínez.

Figura 2. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación, Serie III del INEGI



1.4.3 INVENTARIO NACIONAL FORESTAL Y DE SUELOS

El Inventario Forestal Nacional y de Suelos (INFyS) forma parte de los inventarios forestales que se han llevado en México para monitorear los recursos del país. El primer Inventario Nacional Forestal fue del año 1961 a 1985, fue realizado con el apoyo de la Food and Agriculture Organization (FAO). Los objetivos principales del este primer inventario fueron: localizar y cuantificar las principales áreas forestales del país, calcular la existencia y el incremento de madera y evaluar los daños en bosques y selvas (CONAFOR, 2012).

El segundo inventario fue el Inventario Forestal de Gran Visión 1991; su objetivo fue una actualización de la delimitación de los recursos forestales del país, utilizó como referencia la información de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:1,000,000 del INEGI, información que sirvió como marco de referencia para llevar a cabo el siguiente inventario. El Inventario Nacional Periódico 1992-1994 fue el siguiente conteo; de éste, sus objetivos principales fueron: actualizar la información de los recursos forestales, zonificar los terrenos forestales de acuerdo con sus aptitudes y sentar las bases para actualizar la información de manera permanente. Este último inventario se consideró como un gran avance en la generación de bases de datos pues, por primera vez, se usaron imágenes de satélite de mediana resolución LANDSAT TM 5 para elaborar mapas de escala 1:250,000 de todo el territorio nacional (SEMARNAT, 2012).

A la lista de inventarios se sumó el Inventario Nacional Forestal 2000; éste se comisionó a la Universidad Nacional Autónoma de México para realizarlo, los resultados fueron un mapa de vegetación y uso de suelo a escala 1:250,000 elaborado a partir de la interpretación de imágenes de satélite LANDSAT TM 7; este mapa adoptó una clasificación similar al INEGI (SEMARNAT, 2012).

Se continuó con el INFyS, uno de los principales objetivos de este inventario es poder llevar a cabo evaluaciones continuas de los recursos forestales a través de comparaciones de datos sucesivos, para poder tener un monitoreo más exacto sobre los recursos forestales. El INFyS se sustenta en el Programa Estratégico Forestal 2025, programa que plantea como objetivos la estandarización de criterios nacionales para homogenizar los inventarios forestales y la obtención de datos fidedignos sobre recursos

naturales a nivel regional, esto a través de dos estrategias, la primera es diseñar un nuevo esquema para el Inventario Nacional Forestal con una metodología unificada y la segunda estrategia es fortalecer la investigación sobre recursos forestales (SEMARNAT, 2012).

El INFyS, es entonces un instrumento que contiene la información precisa y actualizada sobre las condiciones del terreno y las especies de árboles, arbustos y hierbas por tipo de vegetación de todas las comunidades vegetales del territorio nacional (CONAFOR, 2009). El objetivo principal del INFyS es contar con información cartográfica y estadística de los suelos y ecosistemas forestales del país para apoyar la política nacional del desarrollo forestal sustentable e impulsar las actividades del sector con información de calidad. Para poder cumplir con este objetivo la SEMARNAT transfirió la gestión del INFyS a la Comisión Nacional Forestal (SEMARNAT, 2004).

La metodología utilizada para el INFyS se basó en técnicas utilizadas en Estados Unidos y Canadá. Con el fin de cumplir los objetivos del Programa Estratégico Forestal, a este inventario se le asigna un diseño de muestreo, una periodicidad y una metodología de levantamiento de datos en campo, que permitirá hacer compatible los resultados de un periodo con otro lo que facilitará el análisis y comparación de datos.

La primera etapa del INFyS 2004-2009, fue una etapa de muestreo de campo basado en la carta de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:250,000 de las series II, III y IV elaboradas por el INEGI, donde se levantaron 24,659 conglomerados que integran a su vez 81,655 sitios de muestreo distribuidos geográficamente en todas las condiciones de vegetación del país (CONAFOR, 2009; véase figura 3).

Las variables que en campo fueron recolectadas son de carácter cualitativo y cuantitativo y se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 5. Variables recolectadas en campo para el INFyS

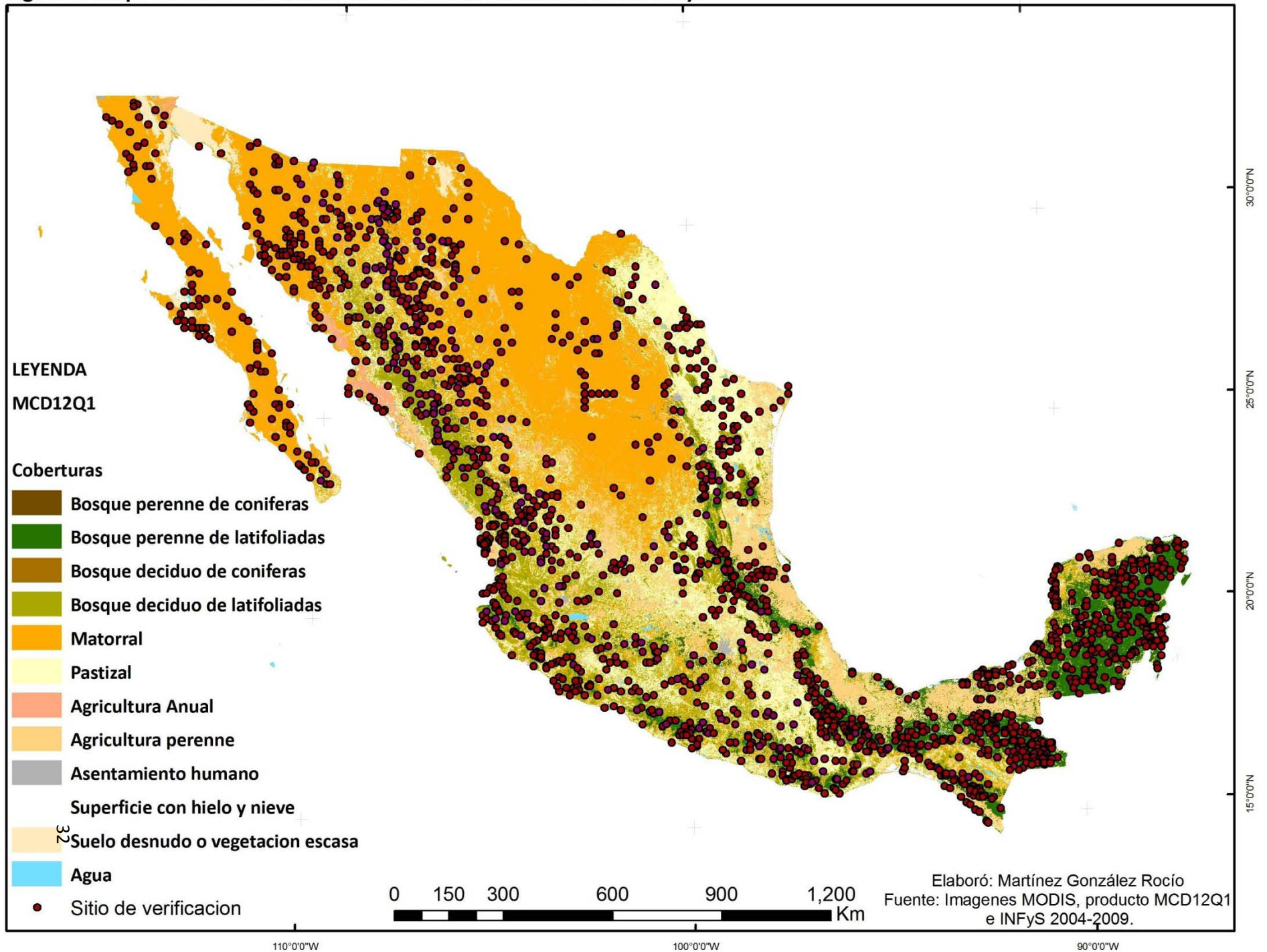
Variables cuantitativas	Variables cualitativas
Género	Altura sobre el nivel del mar
Especie	Pendiente promedio
Nombre común	Fisiografía
Condición	Exposición
Diámetro normal	Uso actual del suelo
Diámetro de copa	Cobertura de la vegetación
Altura total	Profundidad del Suelo
Altura de fuste limpio	Evidencias de erosión
Daño (por agente causal)	Tipo de vegetación predominante
Registro de tocones	Especies dominantes
Diámetro en la base del tocón	Etapas sucesionales
Grupo taxonómico	Especies raras, endémicas, o en
Incremento y calidad de arbolado	peligro de extinción
Diámetro basal	Incendios, plagas o tala clandestina
Edad	

Fuente: CONAFOR, 2009.

El INFyS también utilizó el sistema de clasificación del INEGI que se publicó en la carta de Uso de Suelo y Vegetación a escala 1:250,000 de la serie III ya que es un sistema de clasificación aceptado a nivel nacional e incluye de manera adecuada todas las condiciones de vegetación del territorio (SEMARNAT, 2012). Por lo tanto, el INFyS es una valiosa base de datos que contiene la información necesaria para realizar planeación y evaluaciones periódicas pues a partir del 2009 se inició la segunda etapa, INFyS 2009-2014 que permitirá actualizar la información⁹.

⁹ La información generada por el INFyS se encuentra en la página de la CONAFOR <http://www.conafor.gob.mx>

Figura 3. Mapa de Sitios de verificación derivados del muestreo del INFyS



1.5 DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍAS Y TRABAJOS REALIZADOS

El cálculo de la confiabilidad cartográfica de mapas de uso de suelo y cobertura vegetal comenzó a tomar interés a partir del año 2000. Una de las primeras evaluaciones se hizo en Estados Unidos y fue publicada por Stehman *et al.* (2003), el proyecto de validación consistía en evaluar seis mapas de la región occidental del National Land Cover Data 1992 (NLCD 1992). Se utilizó el método de muestreo probabilístico, combinando tres niveles de estratificación y dos etapas de selección. Los resultados fueron, un alto grado de confusión entre clases y un ICG de 70%, si se toma en cuenta que este fue uno de los primeros trabajos sobre evaluación cartográfica, los resultados son buenos, pues funciona como base para futuros estudios.

En Canadá se llevó a cabo una evaluación publicada por Wulder *et al.* (2007), la verificación utilizó información en video para evaluar la base de datos Earth Observation for Sustainable Development (EOSD), la videografía resultó ser una herramienta rentable y aplicable a grandes zonas, con resultados de alrededor del 71% de precisión.

Otra evaluación es, por ejemplo, el proyecto Corine Land Cover 2000 (CLC 2000) realizado en la Unión Europea, fue publicado por Butner y Maucha (2006). Su propósito fue evaluar la exactitud temática del CLC 2000 por medio de la interpretación de imágenes de satélite LANDSAT basadas en códigos de uso de suelo y cubierta forestal; la precisión media temática fue de 74.8%.

En México, Couturier (2007) presentó los resultados de la evaluación del mapa del Inventario Forestal Nacional 2000 (IFN 2000) en cuatro áreas eco-geográficas del país. Este estudio fue la primera evaluación estadísticamente válida en una zona megadiversa; en parte, fue una evaluación parcial debido a que se utilizaron cuatro zonas eco-geográficas como muestra del total del IFN 2000; sin embargo, la evaluación se desarrolló con un marco estadísticamente riguroso y el índice global de confiabilidad reportado fue entre 64 y 78% debido a que fue un estudio a nivel comunidad con grado de modificación.

Existen aún más trabajos realizados sobre la medición de confiabilidad en mapas; de manera generalizada, en el cuadro 6 se presenta un resumen de estos trabajos. Es conveniente recalcar que la mayoría de las evaluaciones de confiabilidad cartográfica revelan que el mapa o base de datos evaluado, poseen un ICG más bajo de lo esperado y

presentan un alto grado de confusión entre clases temáticas. También, es importante mencionar que las evaluaciones parciales obtienen un ICG más alto que las evaluaciones basadas en un diseño probabilístico.

En los proyectos de evaluación cartográfica se utilizan diferentes metodologías, un ejemplo de esto son los anteriores proyectos brevemente explicados. En pocas palabras, la metodología aplicada a una evaluación cartográfica tiene que ser *ad hoc* y efectiva para el tamaño de la zona a evaluar, el número de clases temáticas del mapa, el material con el que se va verificar, la fecha de los datos, la calidad de los mismos, la disposición del material de verificación y no cabe duda que la metodología también depende de los objetivos del verificador y del total del presupuesto; igualmente, en la mayoría de las propuestas de evaluación cartográfica se considera la forma de economizar los costos y tiempo para que sea rentable y/o aplicable a otros lugares.

Una metodología o protocolo comúnmente aplicado en la validación de mapas fue planteado por Stehman y Czaplewski (1998) que proponen tres etapas básicas para el cálculo de la confiabilidad de mapas temáticos. Estas etapas, se han convertido en un procedimiento a seguir durante la evaluación de mapas; por lo tanto, forman un eje que ha sido tomado en la presente investigación y a continuación se describe.

1. Diseño de muestreo
2. Diseño de la verificación
3. Síntesis de la evaluación.

1. El diseño del Muestreo. Consiste primero, en la selección del tamaño de la unidad de muestreo también conocido como sitio de verificación y segundo, en la selección de los datos de verificación a través de un muestreo. El diseño de muestreo es el protocolo por el cual las unidades de muestreo son seleccionadas, cuando se implementa un diseño probabilístico se agrega peso científico a la evaluación y para que un muestreo sea de carácter probabilístico, las probabilidades de inclusión de la unidad de muestreo no deben ser igual a cero. Si por ejemplo, algunas unidades de muestreo representan una inclusión igual a cero, la evaluación no representará rigurosamente la región deseada del mapa.

Cuadro 6. Trabajos publicados sobre evaluación cartográfica a nivel nacional o regional

REGIÓN DEL MUNDO	PROYECTO Y AÑO DE LA CARTOGRAFIA	AMBIENTE PREVALESCIENTE	NUMERO DE CLASES		NIVEL TAXONÓMICO CORRESPONDIENTE	RESOLUCION ESPACIAL Y SENSOR SATELITAL	DISEÑO DE EVALUACION	ÁREA EVALUADA
			TOTAL	BOSQUES				
Suroeste EUA	GAP 2000	Templado seco	85 evaluadas de un total de 125	18 evaluadas de 27 clases de bosque)	Asociación con grado de modificación	30 m, Ladsat TM	Parcial (cerca de carreteras)	1.4 m. de Km ²
México 4 áreas eco-geograficas	IFN 2000	Mega-diverso	32 evaluadas de un total de 75	19 evaluadas 29 clases de bosque	Comunidad con grado de modificación	1 km Landsat TM	Probabilístico	1.95 m. de Km ²
Unión Europea	Corine LC 2000	Templado	22 evaluadas de un total de 44	3 clases de bosque	Comunidad	1 km, SPOT Vegetation	Probabilístico	2.68 m. Km ²
Sur y Sureste de Asia	TREES 2000	Mega-diverso	4 clases de formación evaluadas de un total de 40	17 clases de bosque evaluadas	Comunidad con grado de modificación	1 km, SPOT Vegetation	Probabilístico para nivel formación	4.5 m. Km ²
América del Sur	TREES 2000	Mega-diverso	6 clases de formación evaluadas de un total de 39	20 clases de bosque evaluada	Comunidad con grado de modificación	1 km, SPOT Vegetation	Parcial	17.8 m. Km ²
India	ISRO-GBP 1999	Mega-diverso	35	14	Comunidad	188 m, WiFS IRS	Parcial (en 3 estados del país)	3.3 m. Km ²
América del – norte y Central	GLC 2000	Mega-diverso	28	9	Tipo	1 km, SPOT Vegetation	Parcial	11.7 m. Km ²
EUA	NLDC 1992	Templado	21	3	Comunidad	30 m, Landsat TM	Probabilístico	9.1 m. Km ²
Cánada Isla Vancouver	EOSD-Forest 2000	Templado	18	10	Comunidad con densidad	25 m, Landsat TM	Probabilístico	31,000 km ²
Amazonia Legal, Brasil	GLC 2000	Tropical húmedo y seco	5	3	Tipo	1 km, SPOT Vegetation	Parcial	5 m. Km ²

Fuente: Couturier *et al.*, 2009; modificado por Rocío Martínez.

Existen diferentes tipos de muestreo, pueden ser aleatorios o sistemáticos, estratificados o por conglomerados. La elección del muestreo se hará valorando el que mejor se adecúe a las características del mapa y logre representarlo conjuntamente; de no lograrse esto, el muestreo puede calificarse con inclinación optimista y, por lo tanto, sin validez estadística; por esto, es indispensable conocer los distintos tipos de muestreo y seleccionar el que mejor se represente al mapa. En esta etapa también se incorpora el cálculo del tamaño de la muestra que se refiere al número total de sitios unidades de muestreo que son necesarios para evaluar la confiabilidad del mapa.

2. *Diseño de la evaluación.* Esta etapa permite asignar una o varias clases del mapa correspondiente a cada sitio de verificación, es decir, se asocia el sitio de verificación a las clases temáticas propuestas en el mapa con base en una evaluación obtenida de datos que representan la realidad para el verificador. En esta fase es muy común caracterizar cada sitio de verificación a una sola clase temática; sin embargo, es recomendable, sobretodo en el momento de evaluar clases de vegetación, asignar una segunda etiqueta, pues en el sitio de verificación pueden encontrarse diferentes tipos de vegetación o bien, el sitio puede encontrarse en una zona de transición entre un tipo de vegetación y otra y, por lo tanto, asignar sólo una clase temática al sitio convertiría la evaluación en subjetiva y se sobreestimaría la confiabilidad del mapa. El calificar un sitio con dos posibles etiquetas en la literatura es llamado enfoque “*Fuzzy*”, es decir, un enfoque difuso, este tema será explicado y detallado posteriormente.

3. *Síntesis de la evaluación.* Es la última etapa propuesta por Stehman y Czaplewski (1998) para el protocolo de evaluación de mapas. Esta fase trata sobre el análisis de datos; generalmente este análisis se hace a través de una matriz de confusión y el cálculo de los índices de confiabilidad como el IGC y el ICC. Una matriz de confusión es una tabla que permite confrontar los resultados de la evaluación del mapa, se llama matriz de confusión o matriz de error ya que en ella se vacían los errores que hay entre las categorías. Como todas las matrices, ésta también posee filas y columnas, las columnas indican las clases de referencia y las filas las clases del mapa, la diagonal de la matriz representa la cantidad de datos que son un acierto, es decir, qué tanto el dato del mapa como el dato del sitio de verificación concuerda y los datos que se encuentran en los márgenes son datos que suponen errores, a pesar de esto, el verificador puede construir

la matriz de confusión basado en el etiquetado que utilizó durante la etapa de diseño de la evaluación (Stehman y Czaplewski, 1998; Chuvieco, 2002). Véase figura 4.

Figura 4. Ejemplo de una matriz de confusión

		<i>Reference</i>				
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>...</i>	<i>q</i>	
<i>Map</i>	<i>1</i>	p_{11}	p_{12}	\dots	p_{1q}	p_{1+}
	<i>2</i>	p_{21}	p_{22}	\dots	p_{2q}	p_{2+}
	\vdots	\vdots	\vdots	\dots	\vdots	\vdots
	<i>q</i>	p_{q1}	p_{q2}	\dots	p_{qq}	p_{q+}
		p_{+1}	p_{+2}	\dots	p_{+q}	

Fuente: Stehman *et al.*, 1998.

A partir de la matriz de confusión se pueden obtener diferentes índices de confiabilidad; los principales son descritos por Stehman y Czaplewski (1998), los llaman parámetros de exactitud y se describen a continuación:

1. Porcentaje total del mapa clasificado correctamente. Es un parámetro que muestra la probabilidad de que un punto seleccionado al azar esté clasificado correctamente en el mapa también conocido como Índice de Confiabilidad Global (ICG).
2. Exactitud del usuario. Es un parámetro que sirve al usuario del mapa y es la probabilidad de que un punto escogido al azar de una categoría represente realmente esa categoría, basada en los datos de referencia y equivale al Índice de Confiabilidad de Clase para el usuario del mapa (ICCU).
3. Exactitud del productor. Es la probabilidad de que un punto escogido al azar para una categoría represente realmente esa categoría, con base en la información del mapa y corresponde al Índice de Confiabilidad de Clase para el productor del mapa (ICCP).

4. Error de comisión. Es un parámetro que proporciona la probabilidad de que un punto al azar de la categoría “X” sea representado por la categoría “Y”, basados en los datos de referencia.

5. Error de omisión. Es la probabilidad de que un punto escogido al azar y clasificado como categoría “X” por los datos de referencia sea clasificado como “Y” por los datos del mapa.

Con el análisis de la matriz de confusión y la obtención de índices que muestren y den rigor estadístico al mapa evaluado, el protocolo para la evaluación de mapas planteado por Stehman y Czaplewski (1998) termina.

1.6 LÓGICA DIFUSA

Durante la evaluación cartográfica, específicamente en la etapa de diseño de evaluación, se debe asignar una etiqueta al sitio de verificación para asociarlo con el mapa a evaluar. Es muy común asociar el sitio de verificación a una sola categoría en la leyenda del mapa; sin embargo, no es conveniente limitarse a una clase única para caracterizar el sitio de verificación, ya que el sitio de verificación puede localizarse en una zona de transición espacial entre dos tipos de vegetación, o puede localizarse en un área fragmentada donde se encuentran varias categorías o también puede corresponder a un estadio de transición temporal entre categorías. Esto tiene como resultado una estimación errónea de la confiabilidad del mapa evaluado, por lo que es recomendable caracterizar el sitio con dos posibles etiquetas; a este tipo de caracterización de los sitios de verificación se le llama enfoque difuso o lógica difusa¹⁰.

Gopal y Woodcock (1994) mencionan que el concepto de conjuntos difusos fue introducido por Zadeh para describir la imprecisión característica de la mayor parte del razonamiento humano, particularmente en temas como reconocimiento de patrones y la abstracción, actualmente la teoría de los conjuntos tiene bastantes aplicaciones y una de ellas es en la validación de mapas proporcionando distintos grados de pertenencia a las clases temáticas.

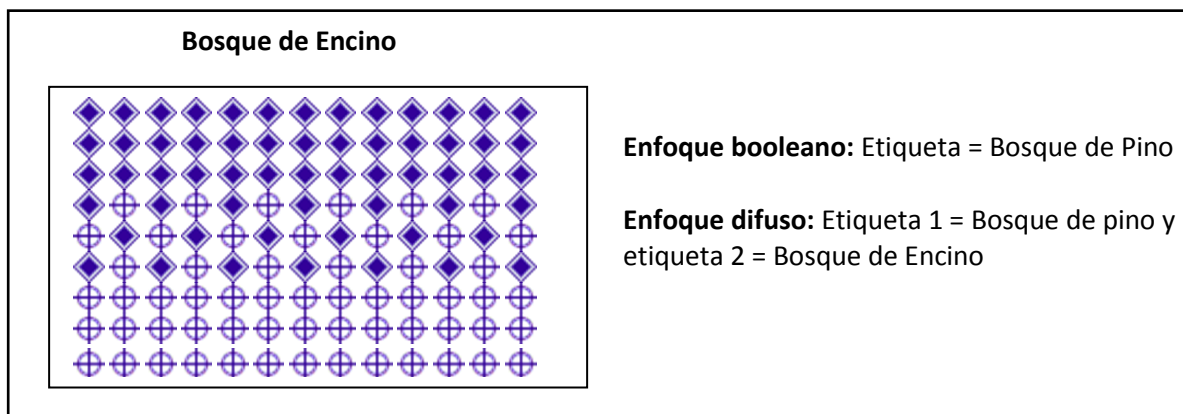
¹⁰ El Enfoque booleano es lo contrario al enfoque fuzzy; en el enfoque booleano no se puede caracterizar a un sitio de verificación con más de un tipo de clase de pertenencia.



Gopal y Woodcock (1994) proponen el uso de una terminología lingüística para evaluar un punto que tiene diferentes grados de pertenencia con expresiones que generalmente se usan para evaluar las etiquetas *in situ* en términos cualitativos. Estos autores construyeron una escala lingüística con base en la experiencia de más de 10 años en la validación de mapas. Dicha escala lingüística es la siguiente:

1. *Absolutamente equivocado*. Es una etiqueta para el sitio de verificación inaceptable. Muy mala.
2. *Comprensible pero equivocado*. No es una buena etiqueta, hay algo en el sitio que existe claramente una mejor etiqueta para el sitio de verificación. No es correcta.
3. *Razonable o aceptable respuesta*. Tal vez no sea la mejor etiqueta posible pero es aceptable. Es correcto.
4. *Buena respuesta*. Se ha encontrado una etiqueta que corresponde al mapa. Muy correcto.
5. *Absolutamente correcto*. No hay duda acerca de la etiqueta. Es perfecto.

Esta escala lingüística se convierte generalmente a una escala numérica (1-5) y con estos valores se califica la etiqueta del sitio de verificación, los cuales después son analizados en una matriz de confusión. El concepto de lógica difusa se ejemplifica en la figura 5.

Figura 5. Lógica Difusa



Concepto de Lógica difusa. La imagen ejemplifica un sitio de verificación que en el mapa es tematizado como bosque de encino, sin embargo, información considerada como “real” indica que en el sitio hay pinos  y encinos . El enfoque difuso permite asignar una segunda etiqueta, lo que ayuda a estimar un mejor índice de confiabilidad.

CAPÍTULO II.

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA A NIVEL NACIONAL

Uno de los objetivos particulares de esta investigación es dar continuidad al cálculo de índices de confiabilidad del producto MOD12Q1, cuya versión 4 fue evaluada por Couturier (2011). Para una continuidad adecuada de la evaluación para la versión 5 de este mismo producto, que es distribuido por la NASA a partir del año 2010, y que los resultados de ambas evaluaciones sean equiparables, es necesario aplicar la misma metodología que se empleó en el estudio de Couturier (2011). Dicho trabajo es considerado como el primer trabajo de evaluación a nivel nacional en México de un producto derivado del sensor MODIS y contempla un enfoque difuso, en donde se combinan la información del terreno del muestreo nacional del Inventario Nacional Forestal y de Suelos y la cartografía 1:250, 000 de cobertura vegetal del INEGI, Serie III.

2.1 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

Brevemente se explica la metodología que Couturier (2011) aplica en la primera evaluación del mapa derivado del sensor MODIS. Esta descripción se hará con base en las tres etapas propuestas por Stehman y Czaplewski (1998) que se han descrito en el capítulo anterior y que son aplicadas por Couturier (2011).

1. El diseño de muestreo. Es una evaluación estadísticamente exhaustiva para la totalidad del territorio mexicano cubierto por vegetación y no se incluye el uso agropecuario; por lo tanto, aproximadamente 1 millón de km² es la totalidad de territorio que se evalúa¹¹.

En esta etapa, el primer paso es la conversión de leyenda, en donde se agrupan las clases de vegetación del INFyS y de la Serie III¹² a una leyenda resumida, manejable y que concuerda con la leyenda tipo 5 PFT de MOD12Q1. Esta leyenda, tiene menor precisión taxonómica pero es representativa de las clases de vegetación en México. Una

¹¹ El total de área bajo estudio es de 1,000,000 km² que corresponde exclusivamente a la cobertura vegetal, sin incluir áreas agrícolas de acuerdo con el INFyS.

¹² Se utiliza el INFyS y la Serie III del INEGI como insumos de verificación debido a la compatibilidad temporal con el producto MCD12Q1; los datos INFyS pertenecen a la primera etapa 2004-2007, la Serie III son datos del 2002-2003 y el producto MCD12Q1 contiene datos del año 2004.

vez adaptada la leyenda, se aplica un muestreo aleatorio estratificado simple para seleccionar a partir del INFyS (que consta de 24,659 puntos de control) 140 sitios de verificación¹³ por cada clase de vegetación de la leyenda adaptada.

2. *Diseño de la evaluación.* Uno de los problemas que surgen al evaluar grandes extensiones de territorio en un país con alta diversidad vegetal como México es la posibilidad de clasificar erróneamente un sitio, para esto, Couturier (2011) plantea una estrategia que se basa en un algoritmo de validación difuso, donde existen tres niveles de tolerancia: temporal, temática y de posición.

En la primera etapa del algoritmo de validación a cada sitio de verificación se le asigna una etiqueta primaria¹⁴ y, en algunos casos, una etiqueta secundaria¹⁵; primero, se verifica que el sitio de verificación corresponde con la etiqueta primaria; en caso de haber un error se verifica que ese mismo sitio corresponda con la etiqueta secundaria.

En la segunda etapa, cada uno de los sitios de verificación se compara con la información del mapa a evaluar con base en tres escenarios: el primero, es de verificación estricta, en donde se calibra la información de referencia, es decir, el INFyS y la serie III del INEGI; el segundo, es con tolerancia de posición, en donde se verifica la información adyacente al sitio de verificación; y, el tercer escenario incluye tolerancia temática y temporal, pues se valida la etiqueta secundaria de los sitios de verificación y se confronta los sitios que contienen información del año 2004 con la Serie III del INEGI que tiene información para el periodo 2002 y 2003.

3. *Síntesis de la evaluación.* En esta fase se realiza el análisis de los datos; a través de una o varias matrices de confusión, se obtienen índices de confiabilidad global e índices de confiabilidad por clase, además, se obtienen índices para el productor del mapa e índices para el usuario. Posteriormente, en este capítulo, en el subtema de análisis de

¹³ Un sitio de verificación, es un punto seleccionado con base en el INFyS, que permitirá verificar el contenido del producto MCD12Q1 (véase figura 3, pág. 32).

¹⁴ La etiqueta primaria es la clase a la que un sitio de verificación debería de pertenecer debido a su ubicación, es decir, si un sitio de verificación está ubicado en la clase de vegetación Bosque de coníferas, su etiqueta primaria sería bosque de coníferas.

¹⁵ La etiqueta secundaria se asigna cuando una clase de vegetación tiende a confundirse con otra clase, así al sitio de verificación se le da la posibilidad de estar calificado como su etiqueta primaria o como su etiqueta secundaria; asignar una etiqueta secundaria forma parte de utilizar un enfoque difuso para validar mapas.

datos, se comparan los resultados obtenidos con esta metodología por Couturier (2011) y los resultados obtenidos para el producto MCD12Q1 Versión 5 en la presente investigación

2.2 APLICACIÓN METODOLÓGICA PARA LA VALIDACIÓN DE MCD12Q1

Como ya se mencionó en el primer capítulo, se hace énfasis que la versión 5 del producto MOD12Q1 cuya combinación de datos proviene de dos sensores remotos que son Aqua y Terra; por lo tanto, en esta versión, el producto se llama MCD12Q1. Por otra parte, este apartado tiene la finalidad de describir exhaustivamente la metodología aplicada para la evaluación de este producto, con el objetivo de darla a conocer y que sirva como línea base o marco de referencia para futuras evaluaciones.

2.2.1 INSUMOS

- ✓ Producto a evaluar: cartografía derivada del sensor MODIS, MCD12Q1 Versión 5 para el año 2004; la leyenda que se utilizó fue la leyenda tipo 5, categorías funcionales de plantas PFT¹⁶ (véase figura 1, pág. 24).
- ✓ Material de referencia, considerado como la realidad: primea etapa del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004-2007 (véase figura 3, pág. 32) y cartografía de la Serie III del INEGI, años 2002-2003 (véase figura 2, pág. 28).

2.2.2 DISEÑO DEL MUESTREO

Para el muestreo se utilizaron como sitios de verificación los puntos de control de INFyS que en total son 24,659 puntos distribuidos en toda la República Mexicana. Esta base de datos se basa en la clasificación del INEGI para la vegetación; por lo tanto, taxonómicamente se habla de más de 600 clases existentes; entre más clases se tengan que verificar existirán más sitios de verificación a evaluar, lo que requiere más tiempo y, por lo tanto, el proceso de muestreo y evaluación se vuelve agotador. Para que la evaluación sea efectiva a la totalidad del territorio mexicano y contrarrestar la diversidad taxonómica del país, se hace una simplificación de leyenda del INFyS.

¹⁶ Se escogió la clasificación PFT debido a que contiene características de la fisionomía de la vegetación; además, incluye la categoría matorral o vegetación arbustiva que permite verificar la clase vegetación secundaria y que predominantemente es arbustiva; y el INEGI indica, que dicha clase, se encuentra ampliamente distribuida en México.

El primer paso es seleccionar las clases que representan la totalidad del país; estas clases son llamadas clases de referencia (véase cuadro 7). Se prosigue con la simplificación de la leyenda del INFyS, en donde las clases del inventario son agrupadas en las catorce clases seleccionadas en el cuadro 7. La agrupación de las clases se muestra en el cuadro 8.

Cuadro 7. Clases de referencia utilizadas para la evaluación

Nombre de la clase	Área por clase en km²
Bosque de coníferas	27,141
Bosque de Pino-Encino	42,712
Bosque de Encino-Pino	27,362
Bosque de Encino	66,612
Bosque Mesófilo de Montaña	9,475
Selvas Perennifolias	19,501
Selvas Sub-Perennifolias	32,879
Selvas Sub-Caducifolias	24,204
Selvas Caducifolias	105,131
Matorrales	565,996
Mezquitales y Huizachales	27,638
Vegetación Secundaria	11,033
Vegetación Higrófila	14,542
Vegetación Halófila	31,775
Total	1,006,000¹⁷

Fuente: Elaboración propia con base en el INFyS.

Una vez que se realizó la simplificación de la leyenda del INFyS y que se obtuvieron las clases de referencia, se hace una conversión de etiquetas con base en el código que MODIS asigna a cada clase de la leyenda tipo 5. Es decir, a cada clase de referencia se le asigna su código MODIS equivalente, a esta primera asignación se le llama etiqueta primaria y en caso de que la clase de referencia pudiera ser representada por otro código MODIS, se contempla un enfoque difuso y se asigna una etiqueta secundaria (véase cuadro 9).

¹⁷ Tanto para en la evaluación de Couturier (2011) como para esta evaluación, sólo se tomó en cuenta el terreno con cobertura vegetal.

Cuadro 8. Agrupación de las clases del INFyS en clases de referencia

Nombre de la clase de referencia	Clases del INFyS	Total de puntos
Bosque de Coníferas	Bosque de Oyamel, Bosque de Cedro Bosque de Táscate, Bosque de Pino, Bosque de Ayarín.	1,830
Bosque de Pino-Encino	Bosque de Pino-Encino	2,919
Bosque de Encino-Pino	Bosque de Encino-Pino	1,889
Bosque de Encino	Bosque de Encino	4,682
Bosque Mesófilo de Montaña	Bosque Mesófilo de Montaña	614
Selvas Perennifolias	Selva Alta Selva Mediana Perennifolia Selva Baja Perennifolia	1,205
Selvas Sub-Perennifolias	Selva Alta Subperennifolia Selva Mediana Subperennifolia Selva Baja Subperennifolia	2,278
Selvas Sub-Caducifolias	Selva Mediana Subcaducifolia Selva Baja Subcaducifolia	1,661
Selvas Caducifolias	Selva Mediana Caducifolia Selva Baja Caducifolia	1,793
Matorrales	Matorral Crasicaule, Matorral Desértico, Matorral Microfilo, Matorral Rosetofilo, Matorral Espinoso, Matorral Sarcocaula, Matorral Sarcocrasicaule, Matorral Submontano y Chaparral.	2,782
Mezquites y Huizachales	Mezquital	252
Vegetación Secundaria	Vegetación Secundaria Arbórea, arbustiva y herbácea	741
Vegetación Higrófila	Manglar, Popal, Tular y Vegetación de Galería	442
Vegetación Halófila	Vegetación Halófila Xerófila Vegetación Halófila Hidrófila	66

Elaboración propia

Cuadro 9. Asignación de etiquetas primarias y secundarias a las clases de referencia

Clases de la leyenda PFT MCD12Q1	Código MODIS asignado	Clase de referencia	Etiqueta primaria	Etiqueta secundaria
Bosque Perenne de Coníferas	1	Bosque de Coníferas	1	-
Bosque Perenne de Latifoliadas	2	Bosque de Pino-Encino	1	4
Bosque Deciduo de Coníferas	3	Bosque de Encino-Pino	4	1
Bosque Deciduo de Latifoliadas	4	Bosque de Encino	4	-
Matorral o vegetación arbustiva	5	Bosque Mesófilo de Montaña	2	-
Pastizal	6	Selvas perennifolias	2	-
Agricultura Anual	7	Selvas Subperennifolias	2	4
Agricultura perenne	8	Selvas Subcaducifolias	4	2
Urbano	9	Selvas Caducifolias	4	-
Superficie con nieve o hielo	10	Matorrales	5	-
Suelo desnudo o vegetación escasa	11	Mezquitales y Huizachales	5	-
Agua	0	Vegetación Secundaria	5	1-4 por tipo de bosque
		Vegetación Higrófila	2	6
		Vegetación Halófila	5	6

La primera columna corresponde a la leyenda PFT del producto MCD12Q1, la segunda columna corresponde al código que MODIS ha asignado a cada clase (véase cuadro 2, pág. 21), la tercera columna son las clases de referencia, es decir, la agrupación de las clases existentes en el país según el INFyS, esto con la finalidad de facilitar el manejo de clases; y, la quinta y sexta columna corresponden a la etiqueta primaria y secundaria, en donde a cada clase de referencia se le asigna el código MODIS, para su verificación, por ejemplo, la clase de vegetación pino-encino tiene en etiqueta primaria el 4 y en etiqueta secundaria el 1, lo que significa que puede un sitio de verificación para la clase bosque de pino encino, puede ser validado como bosque perenne de coníferas o bosque deciduo de latifoliadas.

Lo siguiente de la conversión de leyenda y asignación de etiquetas es escoger los sitios de verificación, son 140 sitios por cada clase de referencia y se seleccionan con un muestreo aleatorio simple por estrato. El total de sitios de verificación para esta evaluación es de 1,886 sitios (véase figura 4, pág. 23). Se escogieron 140 sitios de verificación debido a que es el número de sitios necesarios para obtener un confiabilidad mínima de 60%, se calculó con base en la fórmula:

$$B = z_{\alpha / 2} \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$$

en donde B , es el intervalo de confianza; p , la fiabilidad; n , el número de unidades de muestreo. Entre más grande sea la muestra, el intervalo de confianza es más pequeño, por lo tanto, la evaluación es más precisa (Mas *et al.*, 2011).

2.2.3 DISEÑO DE LA EVALUACIÓN

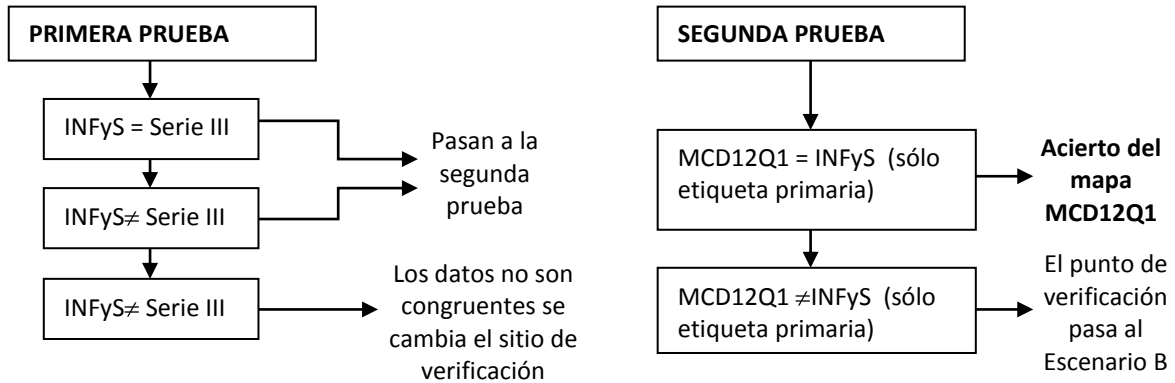
En esta etapa, como se describió en el primer subtema de este capítulo, Couturier (2011) aplicó una estrategia basada en un algoritmo de asignación de etiquetas primarias y secundarias, después el sitio de verificación se comparó con la información del mapa de acuerdo a tres escenarios que van ligados, el primer escenario es una verificación estricta, el segundo escenario es una verificación con tolerancia de posición y el tercer escenario es una verificación con tolerancia temática y de posición. Este algoritmo sistematizado se detalla en la figura 6.

Los sitios de verificación que pasaron por cada una de los escenarios fueron en total 1,886. Para llevar a cabo este algoritmo se utilizó el Software ArcMap 9.3 y su aplicación se describe en los siguientes párrafos.

Figura 6. Síntesis de cada escenario que conforma el algoritmo de validación

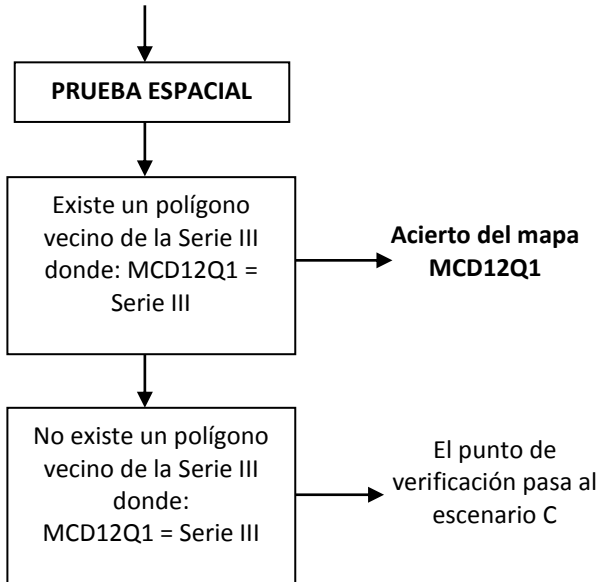
ESCENARIO A

Sitios de verificación que proceden del muestreo aleatorio estratificado simple



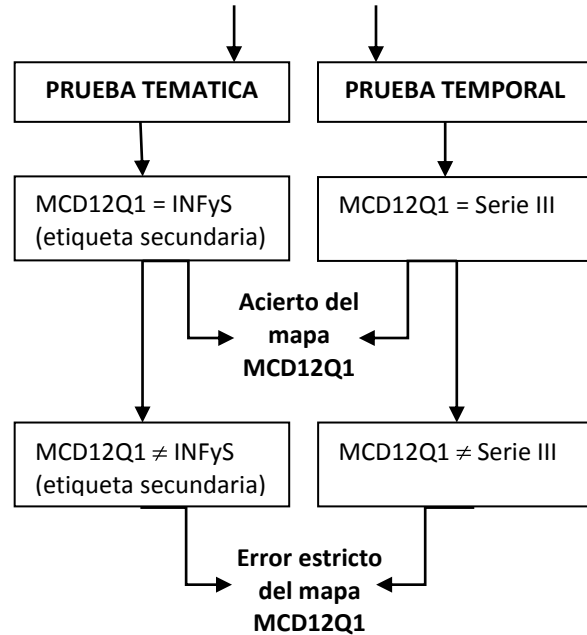
ESCENARIO B

Sitios de verificación que proceden del Escenario A



ESCENARIO C

Sitios de verificación que proceden del Escenario B



Escenario A, Verificación Estricta

Con base en la figura 6, se observa que esta prueba consta de dos etapas, que son llamadas verificaciones estrictas o de enfoque booleano, ya que, sólo se califica la etiqueta primaria. La primera etapa del Escenario A consiste en calibrar la información de referencia a través de una prueba de coincidencia y se confronta la información del INFyS con la serie III. Esta confrontación de datos se realizó de manera semi-automatizada y se utilizó un lenguaje binario para destacar la etiqueta que mejor describe al punto de verificación (véase cuadro 10), las etiquetas posibles son tres: 1) el INFyS es igual a la Serie III; 2) el INFyS \neq Serie III es decir, existe un posible cambio de cobertura y 3) el INFyS \neq Serie III, es decir, un cambio de vegetación improbable¹⁸.

Cuadro 10. Algoritmo de calibración de la información de referencia: prueba de coincidencia entre Serie III e INFyS

Sitio de verificación	Tipo de vegetación esperada (Serie III)	Tipo de vegetación en campo (INFyS)	Etiquetas		
			INFyS = Serie III	INFyS \neq Serie III	INFyS \neq Serie III ¹⁹
1	BQ (bosque encino)	BQ	1	0	0
2	BQ (bosque encino)	BQ	1	0	0
3	SMQ (Selva mediana Subperennifolia)	BQ	0	0	1
4	BPQ (bosque de Pino-Encino)	BQ	0	1	0

Elaboración propia

Trabajar los datos en Excel, facilitó hacer el conteo de los puntos que son un acierto (sitios marcadas con 1) y de los que resultaron ser incongruentes (sitios marcados con 1 en la última columna). Obtenidos los sitios de verificación que resultaron ser un acierto en esta prueba de calibración, se comienza con la prueba de verificación estricta del escenario A, en donde el punto de verificación ahora se compara con la información del mapa de MCD12Q1.

¹⁸ Para realizar la confrontación semi-automatizada se trabajó en una base de datos del INFyS en Excel, cuya base contiene la información presentada en el cuadro 10. En Excel la información se filtró por clases de vegetación lo que ayudó a encontrar las celdas de coincidencia entre el INFyS y Serie III o celdas de no coincidencia que fueron identificadas con el número 1 y 0 respectivamente.

¹⁹ Los puntos que caen en esta columna se consideran como un cambio de cobertura vegetal improbable, se quitan de la lista y se añade otro sitio de verificación de manera aleatoria simple.

Esta segunda prueba es más automatizada, pues se trabaja con el software ArcMap versión 9.3, que permite realizar “*query builders*”²⁰ con base en tablas de atributos. Estas tablas de atributos fueron fáciles de construir con los datos del INFyS disponibles en tablas de Excel. Con cada uno de los sitios de verificación que se trabajaron en la prueba de coincidencia se construyeron *shape files*²¹ de puntos por cada clase de referencia, el resultado fue 14 shapefiles de vegetación que representan el territorio mexicano y las clases forestales más significativas. Cada shapefile en su tabla de atributos contiene la información del cuadro 11.

²⁰ Generadores de consultas.

²¹ Formato de tipo vectorial (punto, línea, polígono) que almacena información de elementos geográficos y sus atributos.

Cuadro 11. Contenido de la tabla de atributos para cada una de las clases de referencia²²

Nombre de la clase de referencia							
ID.	Latitud	Longitud	Tipo de vegetación Serie III	Tipo de vegetación INFyS	Código MODIS	Etiqueta primaria	Etiqueta secundaria
Un identificador único que se le asigna a cada uno de los sitios de verificación	Coordenada en formato decimas de grado que corresponde a la latitud del sitio de verificación.	Coordenada en formato decimas de grado que corresponde a la longitud del sitio de verificación.	Código del tipo de vegetación que se espera encontrar en campo con base en la serie III del INEGI.	Código del tipo de vegetación que se encontró en campo. Esta columna representa los resultados del INFyS.	Código asignado con base en la ubicación espacial del sitio de verificación sobre el mapa MCD12Q1	Etiqueta asignada con base en el cuadro 10.	Etiqueta asignada con base en el cuadro 10.

²² La tabla de atributos de cada shapefile para cada clase de vegetación fue resultado de la prueba de calibración entre el INFyS y la Serie III. Debido a que se realizó con la base de datos del INFyS, posee una columna con los datos de la Serie III y una columna con los datos del INFyS, hay que recordar que el INFyS es un inventario con información recolectada en campo, en donde los datos de la Serie III fueron los datos que se esperaban encontrar en campo. La columna *Código MODIS* se obtuvo a partir de realizar en ARCMAP 9.3 un Spatial Join o unión espacial de datos, entre el INFyS y MODIS; las columnas de *etiqueta primaria* y *secundaria* también son resultado de la prueba de calibración.

Cuando una tabla de atributos contiene la información necesaria, explícita y cada columna se determina con un nombre único, realizar un query builder es sencillo. Un query builder consiste en seleccionar datos de un shapefile que respondan a preguntas sobre el comportamiento espacial de los datos. La aplicación de esta herramienta ayuda a obtener los resultados de la prueba estricta del escenario A, en donde importa seleccionar los sitios de verificación que tanto en MCD12Q1 y en el INFyS poseen la misma etiqueta.

Con esta consulta, ArcMap 9.3 selecciona por medio de la tabla de atributos todos los puntos de verificación en donde existe una coincidencia entre el código MODIS y la etiqueta primaria. A los puntos que resultaron ser una coincidencia se les agrega un identificador²³. Con este procedimiento es posible obtener de una manera más eficaz la totalidad de puntos correctos y también tener los puntos que pasan al Escenario B.

Escenario B, Verificación con Tolerancia de Posición

En la figura 6 donde se presenta el algoritmo de validación, se muestra que los errores que provinieron del escenario A, pasan a este segundo escenario en donde se les aplica una prueba con tolerancia de posición. La tolerancia que se aplica para cada sitio de verificación es de 1 km a la redonda, es decir, en este escenario, se valida si la información que está a 1km alrededor del sitio de verificación coincide con la información que el sensor MODIS detecta y reporta en su mapa.

El insumo de referencia que se utiliza en esta prueba y que es considerado como la realidad es la Serie III de vegetación del INEGI, por ende, la información de MCD12Q1 en esta prueba es confrontada con dicho insumo. Para atribuir un 1 km a la redonda a cada sitio de verificación se aplica en ArcMap 9.3 un buffer²⁴.

La serie III está disponible en formato shapefile, por lo que la sobreposición de estos shapefiles permite saber en qué clase de la serie III cae cada uno de los sitios de verificación. En este escenario, lo que se pretende saber con el buffer es, en qué clasificación se encuentra el área de 1km de influencia de cada sitio de verificación, por lo

²³ El identificador para los tres escenarios será binario, con uno se marcarán todos los aciertos y con cero todos los errores.

²⁴ Área de influencia.

tanto, puntualmente no se confronta el sitio de verificación con la Serie III sino que se confronta la zona de influencia del sitio de verificación con la serie III, lo que permite agregar una tolerancia de posición al sitio de verificación.

La tabla de atributos de la Serie III cuenta con los datos de la formación vegetal y el nombre de cada uno de los tipos de vegetación que se presentan en el shapefile. Con esta información se hace una correspondencia de leyenda serie III con la Leyenda tipo 5 deMCD12Q1 al igual que se hizo la correspondencia del INFyS con MCD12Q1.

Cuadro 12. Correspondencia de la leyenda de la Serie III de INEGI con la leyenda TFP de MCD12Q1

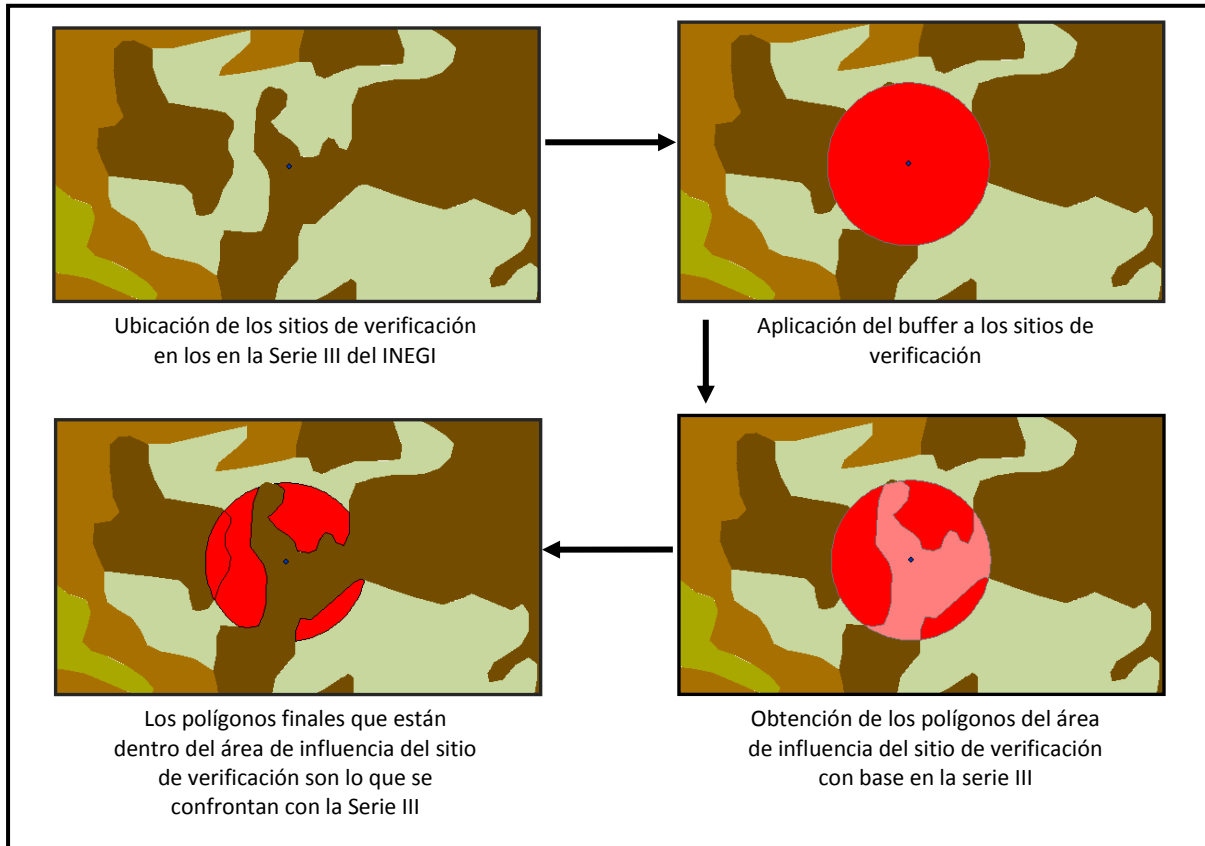
Serie III	MCD12Q1
BOSQUE DE CONIFERAS	1
BOSQUE DE ENCINO	4
BOSQUE MESOFILO DE MONTAÑA	2
MATORRAL XEROFILO	5
PASTIZAL	6
SELVA CADUCIFOLIA	4
SELVA ESPINOSA	5
SELVA PERENNIFOLIA	2
SELVA SUBCADUCIFOLIA	4
SIN VEGETACION APARENTE	11 (SUELO DESNUDO O VEG. ESCASA)
VEGETACION HIDROFILA	2
VEGETACION INDUCIDA	6

Elaboración propia

El escenario B se sintetiza de la siguiente manera:

1. Ubicación de los sitios de verificación en los datos de la serie III del INEGI
2. Aplicación del buffer a los sitios de verificación
3. Obtención de los polígonos del área de influencia del sitio de verificación con base en la serie III
4. Aplicación del query builder para obtener los puntos que son correctos en este escenario.

Figura 7. Descripción gráfica del Escenario B



Elaboración propia

Escenario C, Verificación con Tolerancia Temática y Temporal

En caso de no existir en el sitio de verificación un polígono vecino donde MCD12Q1 sea igual a Serie III, el sitio de verificación pasa al Escenario C. Éste es el último escenario del algoritmo de validación implementado por Couturier (2011), es un escenario que cuenta con una validación doble, es decir, el punto es verificado dos veces o con dos tipos de datos. La importancia de este escenario radica en que en esta etapa se aplica una prueba con tolerancia temática y otra prueba con tolerancia temporal.

Principalmente son dos consultas las que se hacen en este escenario; la primera consulta es, qué datos de MCD12Q1 en su etiqueta secundaria son iguales a los datos del INFyS y

la segunda consulta es, qué datos de MCD12Q1 son iguales a la serie III²⁵. Si la etiqueta secundaria del sitio de verificación es igual a la información de la leyenda tipo 5 de MDC12Q1 se tienen aciertos del mapa derivado de MODIS con tolerancia temática, es decir, que el sensor MODIS puede detectar tipos de vegetación fragmentados y que pueden confundirse con otro tipo de vegetación. Por ejemplo, es fácil que suceda que la categoría de pino-encino del INFyS pueda ser captada por un sensor como bosque de pino o bosque de encino; un sitio de verificación que es marcado en su etiqueta primaria como bosque de pino-encino puede tener como etiqueta secundaria bosque de encino, en este Escenario C se permite dar esa tolerancia temática al sitio de verificación, tolerancia que permite que el punto pueda ser considerado en dos clasificaciones, esto en el primer capítulo es llamado enfoque difuso.

Por otro lado, la segunda parte de la aplicación del Escenario C indica que si el sitio de verificación tiene información de MC12Q1 igual a la información de la serie III del INEGI, se tiene un acierto en el mapa derivado de MODIS con tolerancia temporal. Esta tolerancia temporal se debe a que existe una diferencia entre la adquisición de los datos de la serie III y la adquisición de los datos del INFyS. Básicamente la idea es, son un acierto los sitios de verificación que con base en la leyenda del INFyS no coinciden pero con base en la Serie III sí. Esto se permite porque tanto el INFyS y la Serie III son los insumos que se están considerando como la realidad²⁶.

La automatización de este Escenario C es a partir de query builders, debido a que es el último escenario dentro del algoritmo, la tabla de atributos contiene los datos de las demás pruebas, lo que simplifica la construcción de consultas y extracción de datos. Los query builders que se realizan son los siguientes:

1. Se hace un query builder y se le indica al software que seleccione todos los datos de la etiqueta secundaria que son iguales a los datos de MODIS, para esto, existe una columna dentro de la tabla de atributos de nombre etiqueta secundaria con los

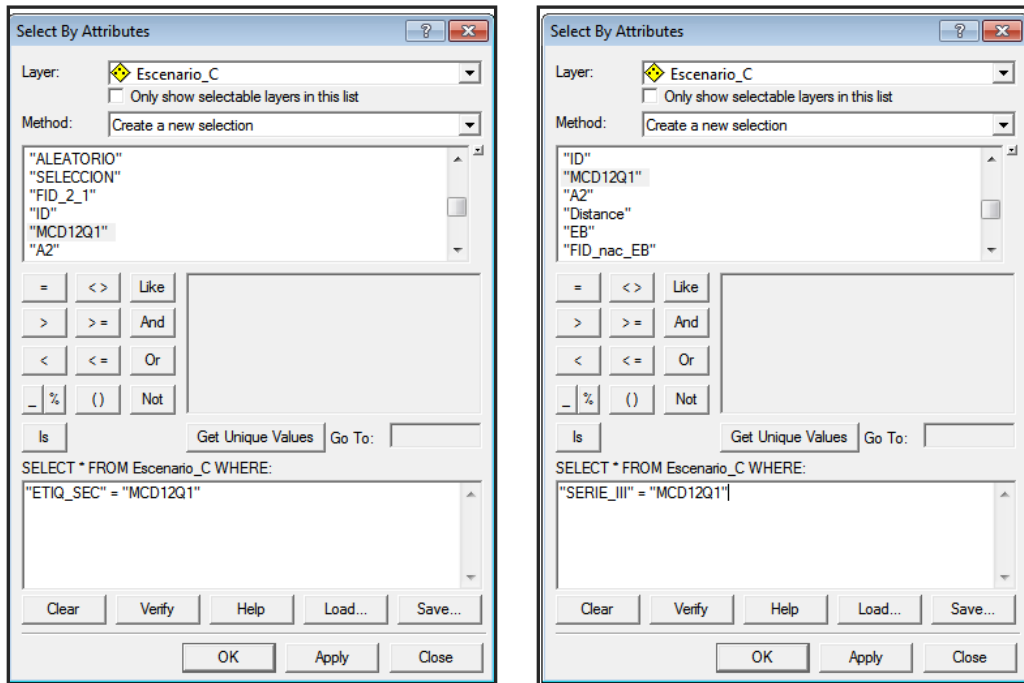
²⁵ En esta prueba sí se toma en cuenta la información puntual del sitio de verificación para comparar con la serie III y no su área de influencia o buffer.

²⁶ Todos los sitios de verificación que resulten ser un error y no pasen de tanto la prueba de tolerancia como la prueba temporal que conforman el escenario C serán considerados como un error estricto en el mapa de MCD12Q1.

datos de todos los sitios de verificación, y también una columna con los datos de MCD12Q1; con base en la selección se agrega un identificador para los aciertos.

2. Se hace un query builder y se le indica al software que seleccione todos los datos de la serie III que coinciden con la información de MCD12Q1.

Figura 8. Query Builders para el Escenario C



2.2.4 SÍNTESIS DE LA EVALUACIÓN

En esta etapa los datos que se analizan son los obtenidos en cada uno de los escenarios descritos previamente. Este análisis de datos se hace a través de una matriz de confusión. En la matriz se confronta la información de los sitios de verificación con la información del mapa. Como en todas las matrices, las matrices de confusión están ordenadas en filas y columnas, en donde las filas van a representar las clases de referencia y las columnas va a representar las clases del mapa, la diagonal que se forma en la matriz de error, expresa el número de sitios en donde hay concordancia entre las clases de referencia y las clases del mapa, es decir, la diagonal expresa aciertos en la evaluación (véase figura 9).

Stehman *et al.* (1998) menciona que a partir de la construcción de una matriz de error se pueden obtener diversos índices de confiabilidad, sólo es necesario conocer el diseño de muestreo. Los índices que en esta etapa se obtienen son: el Índice de confiabilidad global (ICG), el Índice de confiabilidad por Clase (ICC), mismos que existen para el productor del mapa (ICCP) y para el usuario del mapa (ICCU) y las estimaciones de error o intervalos de confianza de cada uno de los índices.

Figura 9. Ejemplo de una matriz de confusión con números

Sitios \ Mapa	A	B	C
A	8	1	0
B	1	7	0
C	1	2	10
Suma	10	10	10

Fuente: Mas *et al.*, 2011.

Para la metodología aplicada en esta investigación, se elaboraron tres matrices de confusión normalizadas²⁷, una para cada escenario, el tipo de muestreo que se utilizó fue un muestreo aleatorio estratificado simple. Mas *et al.*, (2011) han difundido las fórmulas estadísticas que son necesarias para la obtención de los índices y la estimación del intervalo de error.

El índice confiabilidad global se obtiene con la sumatoria de los valores de la diagonal de la matriz normalizada, (véase fórmula 1).

$$P_c = \sum_{k=1}^q P_{kk} \quad 1)$$

Donde P_c es igual a ICG; y P_{kk} es igual al valor de la celda en la diagonal, es decir, donde la clase de los sitios de validación (renglón) se cruza con su clase de referencia

²⁷ Una matriz normalizada es la corrección de la misma debido al muestreo estratificado, en donde se pondera el número de sitios de verificación por la superficie de cada categoría en el mapa (Mas *et al.*, 2011)

(columna); por ejemplo, en la figura 9 el valor de P_{kk} para la clase “B” es 7, pues en el valor de la celda donde la clase “B” (segundo renglón; figura 9), se cruza con su clase de referencia “B” en el mapa (segunda columna; figura 9).

El índice de confiabilidad global puede ocultar importantes diferencias entre categorías (Chuvieco, 2002) sobre todo cuando cada clase en el mapa tiene diferente probabilidad de inclusión²⁸ como en el muestreo aleatorio estratificado simple, por esto, es necesario profundizar en el análisis de la matriz de confusión y calcular otros índices como los índices de confiabilidad por clase.

Los índices de confiabilidad por clase se calculan con base en los errores en el mapa. Existen dos tipos de errores, Chuvieco (2002) menciona que los errores que se encuentran en las zonas marginales de una columna en un matriz de confusión son errores en donde los sitios de verificación pertenecen a una categoría y no fueron incluidos en ella, este error Chuvieco (2002) lo nombra como error de omisión y está ligado directamente con la confiabilidad de la clase para el productor; los errores marginales de las filas son sitios de verificación que se incluyeron a una determinada categoría y que pertenecen realmente a otra categoría, este error se llama error de comisión y está directamente ligado con la confiabilidad para el usuario.

Las ecuaciones que permiten calcular los índices de confiabilidad por clase, que por ende, proporcionan las índices de fiabilidad para el usuario (fórmula 2) y para el productor (fórmula 3) son las siguientes:

$$FU_k = \frac{P_{kk}}{P_{+k}} \quad 2)$$

Donde FU_k es la confiabilidad del usuario ICCU, P_{kk} es el valor de la celda en la diagonal y P_{+k} son los valores marginales en el renglón.

$$FP_k = \frac{P_{kk}}{P_{k+}} \quad 3)$$

²⁸ La probabilidad de inclusión según Mas *et al.*, (2011), es la probabilidad de selección de un sitio de verificación, y en un muestreo probabilista todas las unidades de muestreo en el mapa tienen una probabilidad conocida superior a cero de ser seleccionadas.

Donde FP_k es la confiabilidad del productor ICCP, P_{kk} es el valor de la celda en la diagonal y P_{+k} son los valores marginales en la columna.

En toda la estadística cada uno de los datos tiene una probabilidad de acierto y los intervalos de confianza son las cifras que permiten conocer la probabilidad de certeza de una estimación. El cálculo de estos intervalos de confianza también dependen del tipo de muestreo que como se indicó anteriormente en un muestreo estratificado el número de sitios verificados por categoría no son proporcionales a la superficie de cada categoría.

Las fórmulas que se utilizan para calcular los intervalos de confianza en un muestreo aleatorio estratificado simple son las siguientes: intervalo medio de confianza para la confiabilidad global, formula 4; intervalo medio de confianza para confiabilidad del productor, formula 5; intervalo medio de confianza para la confiabilidad del usuario, fórmula 6.

$$B_{Glob} = z_{\alpha/2} \sqrt{\sum_{j=1}^q p'_{jj} (\pi_j - p'_{jj}) / n_{+j}} \quad 4)$$

Donde: B_{Glob} es igual a intervalo medio de confianza de la confiabilidad global, $z_{\alpha/2}$ es igual a 1.96 para una α de 0.05 de confianza; n , es el tamaño de la muestra y π_j es al total de área para la clase.

$$B_{Prod,i} = z_{\alpha/2} \sqrt{p'_{ii} p'_{+i}^{-4} \left[(p'_{ii} \sum_{j \neq i}^q p'_{ij} (\pi_j - p'_{ij}) / n_{+j}) + (\pi_i - p'_{ii}) (p'_{+i} - p'_{ii})^2 / n_{+i} \right]} \quad 5)$$

Donde B_{prod} es igual al intervalo medio de confianza de la confiabilidad del productor, donde: n , es el tamaño de la muestra y π_j es al total de área para la clase, π_i es el total de área validada según el material de referencia; la j son renglones y la i son columnas.

$$B_{Us,j} = z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p'_{jj} (\pi_j - p'_{jj})}{\pi_j^2 n_{+j}}} \quad 6)$$

Donde B_{us} es igual al intervalo medio de confianza de la confiabilidad del usuario, donde: n , es el tamaño de la muestra y π_j es al total de área del mapa, π_i es el total de área validada según el material de referencia.

En el siguiente apartado de resultados, se exponen las matrices con sus respectivos índices y medios intervalos de confianza para posteriormente analizarlos.

2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En total se validaron 14 clases, de cada clase se seleccionaron 140 sitios de verificación con excepción de la clase de vegetación Halófila donde el tamaño de muestra es de 66 sitios de verificación, en total son 1886 sitios de verificación.

En el cuadro 13 se exponen los resultados de la primera prueba del Escenario A donde se confrontaron los datos de la Serie III del INEGI con los datos del INFyS. Los resultados globales de la prueba de coincidencia para los 1,886 sitios de verificación dice que:

- El INFyS es igual a la Serie III en alrededor de 66.64%
- El INFyS es diferente a la Serie III en alrededor de 27.46%
- El INFyS marca errores estrictos de incongruencia con la Serie III en alrededor de 5.88%²⁹

Cuadro 13. Resultados de la prueba de calibración entre Serie III e INFyS

Tipo de Vegetación	INFyS = Serie III	INFyS≠ Serie III	Errores
Bosque de Coníferas	57.85%	29.30%	12.85%
Bosque de Pino-Encino	42.85%	56.43%	0.72%
Bosque de Encino-Pino	33.85%	65%	1.42%
Bosque de Encino	50.72%	42.14%	7.14%
Bosque Mesófilo	80%	17.15%	2.85%
Matorral	27.14%	59.28%	13.58%
Mezquital Huizachal	66.42%	17.86%	15.72%
Selvas perennifolias	81.42%	17.86%	0.72%
Selvas	81.42%	17.14%	1.43%
Subperennifolias			
Selvas Subcaducifolias	80%	15%	5%
Selvas Caducifolias	67.14%	20.72%	12.14%
Vegetación Secundaria	100%		
Vegetación Higrófila	90%	6.42%	3.58%
Vegetación Halófila	83.34%	12.12%	4.54%

²⁹ Un error estricto o de incongruencia es cuando, por ejemplo, se tiene un sitio de verificación clasificado en el INFyS como conífera y en la Serie III como Selva perenne, el cambio de vegetación es incongruente, por lo tanto el sitio se vuelve a seleccionar por estrato y de manera aleatoria simple.

El cuadro 14 tiene los resultados de la prueba de verificación en el *Escenario A*, donde se confronta la información de MCD12Q1 con INFyS; también tiene los datos del *Escenario B* resultados de la prueba espacial; y, los resultados del *Escenario C* que son los aciertos de la prueba temática y temporal; la última columna son los sitios de verificación que resultaron ser un error del mapa derivado de la leyenda tipo 5 de MCD12Q1.

Cuadro 14. Resultados del algoritmo de validación por Escenario

Tipo de Vegetación	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Errores
CONIFERAS	3	14	7	116
PINO-ENCINO	1	15	24	100
ENCINO-PINO	33	1	2	104
ENCINO	37	7	9	87
BOSQUE MESOFILO	122	0	2	16
SELVA PERENNE	130	0	0	10
SELVA SUBPERENNIFOLIA	125	1	4	10
SELVA SUBCADUCIFOLIA	26	5	73	36
SELVA CADUCIFOLIA	62	2	12	64
MATORRALES	103	1	1	35
MEZQUITALES Y HUIZACHALES	93	0	0	47
VEGETACIÓN SECUNDARIA	21	21	46	52
VEGETACIÓN HIGROFILA	42	14	11	73
VEGETACIÓN HALOFILA	40	1	8	17
TOTAL	838	82	199	767 = 1,886

Con base en el cuadro 14 se observa la cantidad de aciertos para cada clase de vegetación y por escenario. Por ejemplo, para la clase selva subcaducifolia se tiene 62 aciertos en el escenario A, 2 aciertos en el escenario B, 12 aciertos en el escenario C y 64 errores, que sumados dan 140, que es el total de sitios de verificación para cada clase.

Los aciertos para el escenario A, significa el número de sitios de verificación en donde la información de MCD12Q1 coincide con el INFyS; los aciertos para el escenario B significa la coincidencia con tolerancia espacial entre MCD12Q1 y la Serie III, es decir, que en la distancia máxima de 1 km, alrededor del sitio de verificación existe vegetación donde MCD12Q1 coincide con la Serie III; los aciertos para el escenario C corresponde a la información donde MCD12Q1 coincide con el INFyS en la etiqueta secundaria, por lo tanto existe tolerancia temática, además, los aciertos de este escenario significa que MCD12Q1 coincide con la Serie III, por lo tanto existe tolerancia temporal pues el periodo de datos de la serie III es del 2002 y 2003. Los sitios que aparecen en la columna de error del cuadro 14, son errores del mapa derivado de MCD12Q1, es decir, son sitios que están mal clasificados.

La figura 10 corresponde a una gráfica donde se aprecia la distribución de los aciertos de cada escenario, con base en dicha gráfica se puede observar que el Escenario A, donde se confronta la información directamente con los insumos de referencia INFyS y Serie III, es la prueba con mayor importancia de todos los escenarios. Globalmente se puede decir que de los 1,886 sitios de verificación con los que se empezó la validación cartográfica 838 sitios resultaron correctos en el Escenario A, 82 sitios de verificación resultaron certeros en el Escenario B y 199 sitios de verificación resultaron certeros en el Escenario C, en total 1,119 puntos se validaron como correctos contra 767 errores estrictos.

En la figura 11 se puede apreciar de manera gráfica la distribución de los aciertos de cada escenario en el algoritmo de validación aplicado. Además, en la figura 11 se aprecia la distribución espacial de los aciertos para la cobertura TFP del producto MCD12Q1 a nivel nacional.

Figura 10. Número de sitios de verificación correctos por escenario

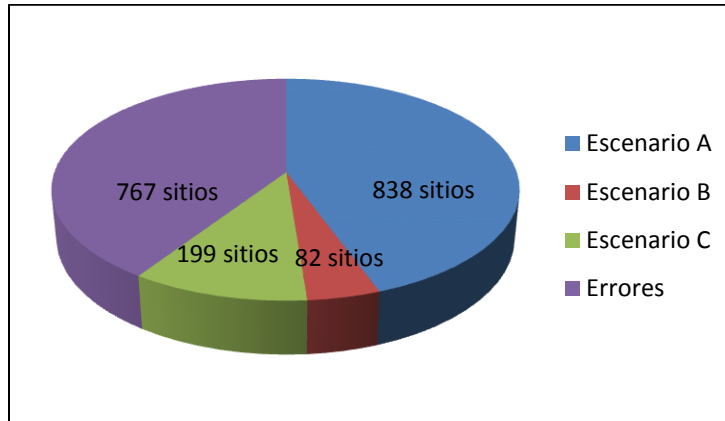
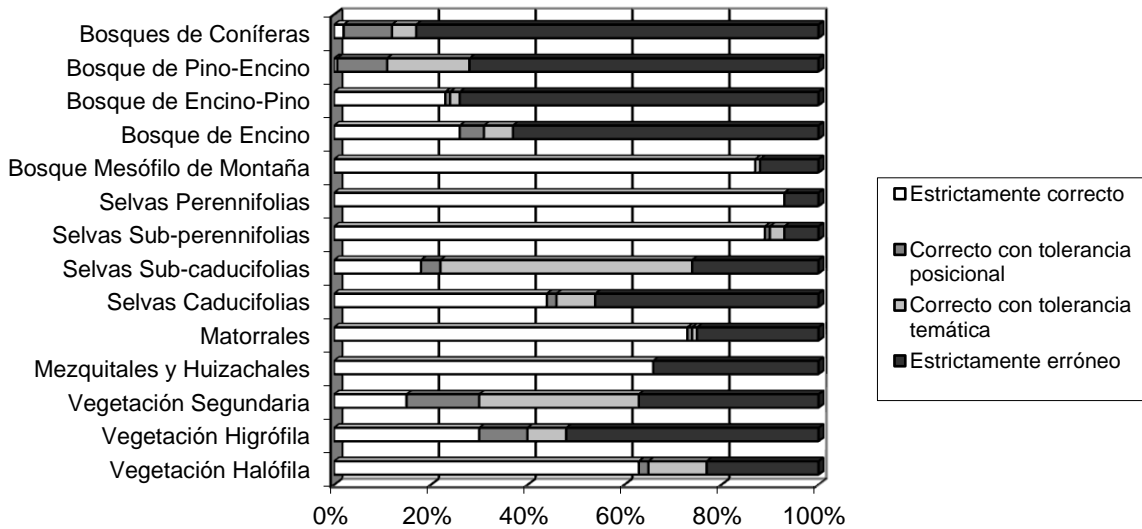
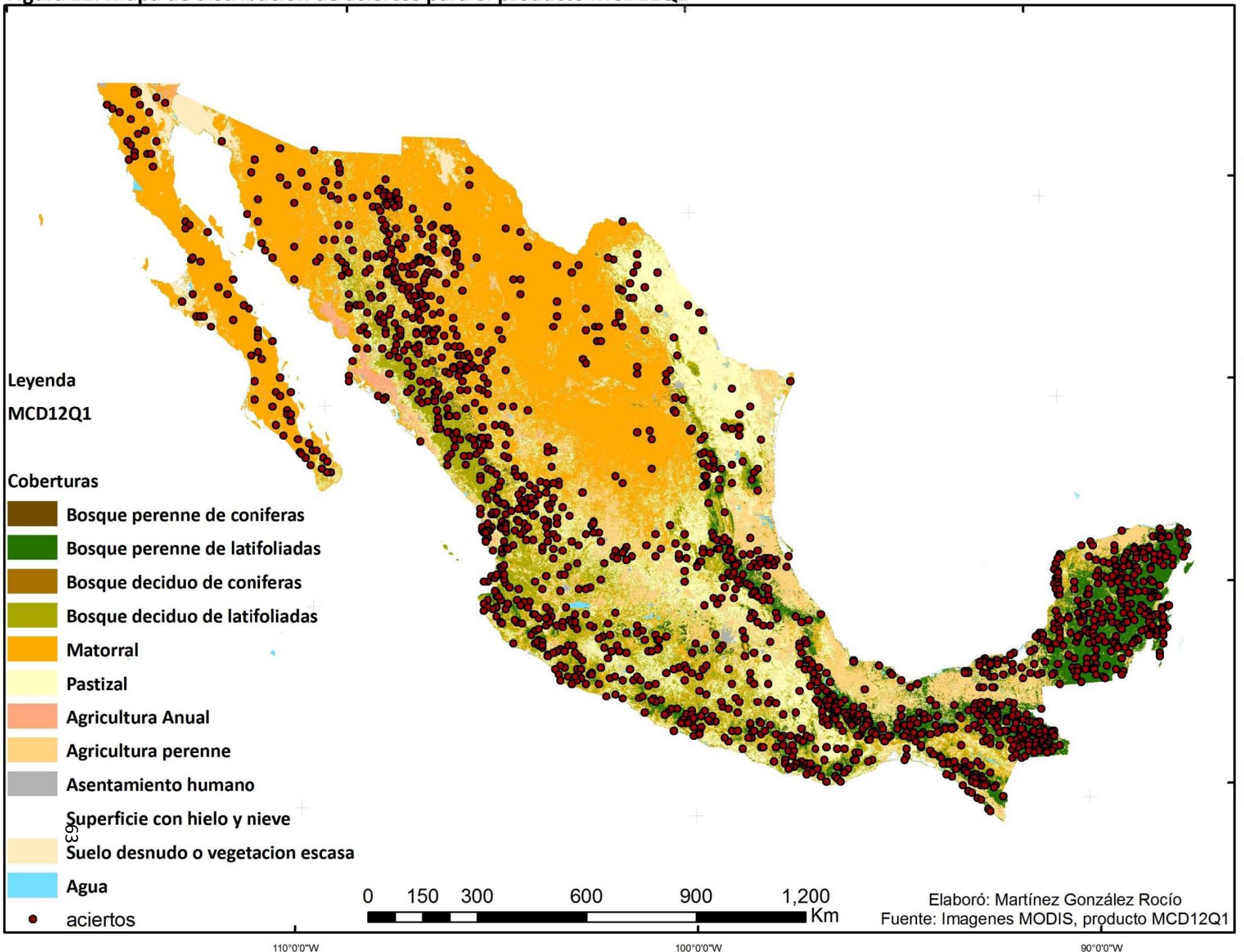


Figura 11. Gráfica de barras de la distribución porcentual de aciertos y errores por escenario para el producto MCD12Q1



Grosso modo de la figura 11 se aprecia que las categorías selva perennifolia y selva subperennifolia son las que tienen el porcentaje de aciertos más alto, y por ende menor porcentaje de errores. La categoría bosque de coníferas es la categoría con mayores errores encontrados, a pesar de que se utilizó un enfoque creciente de tolerancia en cada uno de los escenarios. Otra categoría con un bajo porcentaje de errores es la clase matorral. La figura 12 muestra la distribución espacial de los aciertos para el mapa derivado del producto MCD12Q1, cabe resaltar que del total 1,886 sitios de verificación 1,119 son sitios correctos.

Figura 12. Mapa de distribución de aciertos para el producto MCD12Q1



Los Índices de confiabilidad Global (ICG) y los índices de confiabilidad por clase (ICC) tanto para el productor (ICCP) como para el usuario (ICCU) se presentan en los siguientes cuadros: 15, 16 y 17, que corresponde a las matrices de confusión.

Hay que recapitular que una matriz de confusión organiza los datos de un muestreo de tal manera que aparecen resumidos los resultados, las filas representan las etiquetas en el mapa evaluado y las columnas representan los datos de referencia, todo lo que está afuera de la diagonal de la matriz son errores del mapa, si los errores de una fila para cierta etiqueta se compilan se estarán sumando los errores de comisión, es decir, sitios que incurren o caen en otras clases y están cartografiados en el mapa³⁰, información fundamental para el usuario de dicho mapa; por otro lado, si los errores de una columna para cierta clase de referencia se compilan, se estarán sumando los errores de omisión, es decir, sitios que no fueron contemplados dentro de una categoría siendo, por lo tanto es información omitida³¹.

Las matrices que se reportan están normalizadas, es decir los segmentos de la matriz representan una fracción del área que se evaluó³², presentar de esta manera los datos permite un mejor análisis, ya que, es fácil encontrar los patrones de confusión entre clases. Se obtuvieron 3 matrices de confusión y los datos que revelan estas matrices son por escenario. El escenario A, en donde los datos de MCD12Q1 se verifican con el INFyS, la confiabilidad global es de 61.28%; se espera que en el escenario B la confiabilidad aumente, ya que, cada escenario es parte de un algoritmo de validación que proporciona un grado de tolerancia creciente. El escenario B tiene una confiabilidad global de 63% y finalmente el escenario C tiene una confiabilidad de 67% (véase cuadros: 16 - 18).

Por otro lado, la ventaja de utilizar la leyenda tipo 5 del PFT es que los resultados pueden agruparse por fenología de hoja, es decir, si es perenne o decidua, lo que facilita el análisis de las categorías de vegetación. Todas las clases se agruparon en: bosque de coníferas; bosques perennes, donde se agruparon los bosques de latifoliadas dominados por árboles perennes, como las selvas perennifolias y subperennifolias; bosques deciduos,

³⁰ Este dato es de relevancia para el usuario del mapa.

³¹ Este dato es de relevancia para el productor.

³² El total de área bajo estudio es de 1,000,000 km² que corresponde exclusivamente a la cobertura vegetal, sin incluir áreas agrícolas de acuerdo con el INFyS.

en donde se agruparon bosques dominados por latifoliadas deciduas como selvas caducifolias y subcaducifolias.

Las figura 13, muestra el índice de confiabilidad del productor y la figura 14 muestra el índice de confiabilidad del usuario, ambas por clase fenológica. El cuadro 15 presenta las cifras del Índice de Confiabilidad por Clase para el productor (ICCP) y el Índice de Confiabilidad por Clase para el Usuario (ICCU).

Cuadro 15. Índices de confiabilidad para MCD12Q1

Clase	ICCP	ICCU
B. Coníferas	24.16%	75.92%
B. Perennes	87.89%	63.67%
B. Deciduos	44.20%	76.75%
Matorrales	74.68%	88%

Figura 13. Índice de confiabilidad por fenología para el productor

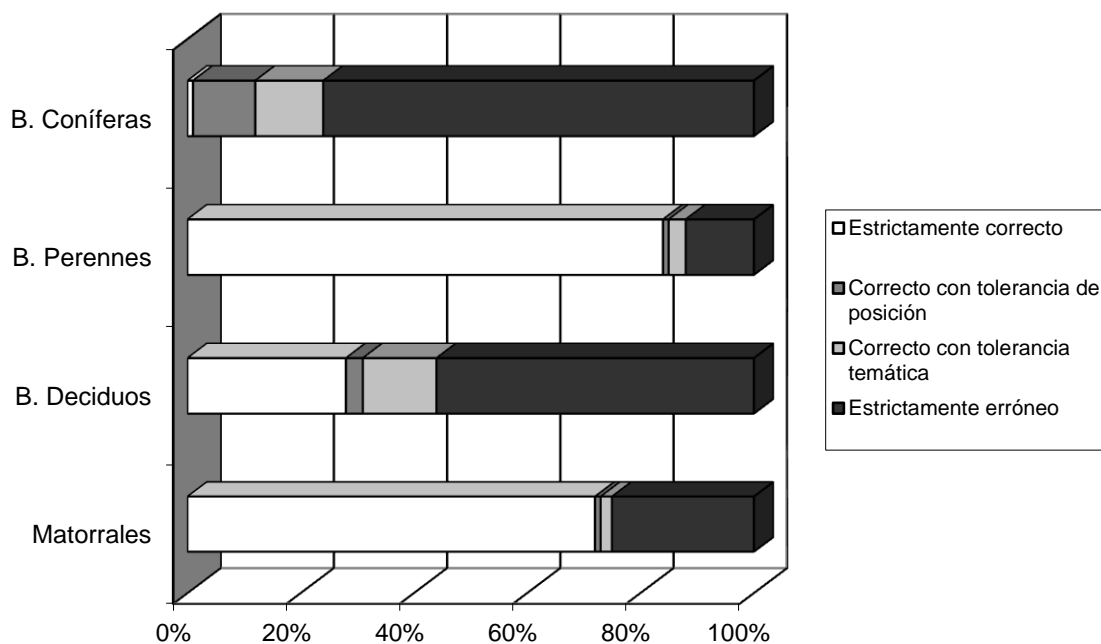
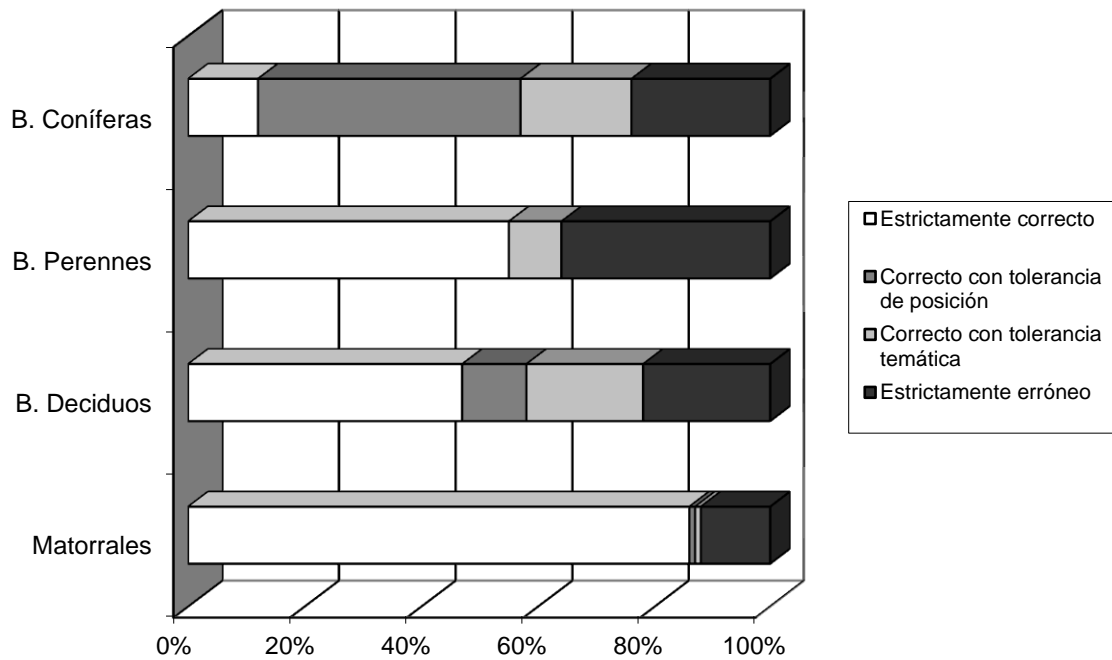


Figura 14. Índice de confiabilidad por fenología para el usuario



Observar las figuras 13 y 14 permite una mejor apreciación de la confiabilidad de las clases de vegetación. En cuanto al productor, los índices demuestran que las categorías con mayor confiabilidad son los bosques perennes y los matorrales, lo que significa que el producto MCD12Q1 con alta confiabilidad detecta los bosques perennes y subperennifolios y también los matorrales. En cuanto los índices de usuario, la confiabilidad más alta es para los matorrales y bosques deciduos, esto quiere decir que son las categorías mejor cartografiadas por el sensor MCD12Q1.

Cuadro 16. Matriz de confusión del Escenario A

Cod5	Coníferas	Perennes	Deciduos	Matorrales	6	7	8	11	agua	n	área	ICCP	Error	ICG
Coníferas	0.00090	0.014	0.015	0.031	0.007	0	0.00050	0	0	280	7.12	1.26	0.006	0.090
Perennes	0.00018	0.057	0.003	0.001	0.0007	0.00044	0.00363	9.47-05	0.0008	560	6.81	84.17	0.015	5.734
Deciduos	0.00161	0.028	0.041	0.050	0.024	0	0.00335	0	0	560	15.04	27.78	0.018	4.180
matorrales	0.00477	0.002	0.027	0.512	0.114	0.00989	0.01542	0.0223	0	483	70.94	72.28	0.020	51.281
n	14	632	310	583	235	13	59	20	17	1883				
área	0.74	10.31	8.85	59.68	14.67	1.033	2.29	2.24	0.08		99.92			
ICCU	12.06	55.63	47.18	85.91	NA	NA	NA	NA	NA			61.28	0.011	
error	0.087	0.019	0.028	0.014	NA	NA	NA	NA	NA					

Cuadro 17. Matriz de confusión del Escenario B

Cod5	Coníferas	Perennes	Deciduos	Matorrales	6	7	8	11	agua	n	área	ICCP	Error	ICG
Coníferas	0.0083	0.0129	0.0090	0.0302	0.01018	0	0.00050	0	0	280	7.12	11.70	0.019	0.83
Perennes	0.00018	0.0582	0.0028	0.0010	0.00084	0.00053	0.00373	4.73E-05	0.00056	560	6.81	85.50	0.014	5.82
Deciduos	0.0014	0.0329	0.0467	0.0437	0.02221	0	0.00335	0	0	560	15.04	31.09	0.019	4.67
matorrales	0.0047	0.0020	0.0215	0.5194	0.11372	0.00989	0.01582	0.022794	0	483	70.94	73.22	0.020	51.94
n	42	643	277	571	239	15	66	18	12	1883				
Área	1.47	10.62	8.03	59.44	14.69	1.04	2.34	2.21	0.05		99.92			
ICCU	56.70	54.83	58.25	87.38	NA	NA	NA	NA	NA			63.28	0.011	
error	0.076	0.019	0.029	0.013	NA	NA	NA	NA	NA					

Cuadro 18. Matriz de confusión del Escenario C

Cod5	Coníferas	Perennes	Deciduos	Matorrales	6	7	8	11	agua	n	área	ICCP ³³	Error	ICG
Coníferas	0.0172	0.013	0.0029	0.0290	0.0079	0	0.0005	0	0	280	7.12	24.16	0.025	1.72
Perennes	0.0001	0.059	0.0020	0.0009	0.0003	0.00044	0.0036	4.7E-05	0.00056	560	6.81	87.89	0.013	5.98
Deciduos	0.0005	0.020	0.0665	0.0422	0.0176	0	0.0033	0	0	560	15.04	44.20	0.020	6.65
matorrales	0.0047	0.0003	0.0151	0.5298	0.1118	0.00989	0.0154	0.0220	0	483	70.94	74.68	0.019	52.98
n	70	571	329	610	201	13	59	18	12	1883				
Área	2.26	9.40	8.66	60.21	13.77	1.03	2.29	2.21	0.056		99.92			
ICCU	75.92	63.67	76.75	87.99	NA	NA	NA	NA	NA			67.34	0.010	
error	0.051	0.020	0.023	0.013	NA	NA	NA	NA	NA					

³³ Sólo en esta evaluación las columnas representan los errores de comisión y las filas representan los errores de omisión, por lo tanto, los Índices de confiabilidad para el productor se encuentran en la columna ICCP y los índices de confiabilidad para el usuario se encuentran en la fila ICCU. Esto se explica porque en este estudio se usaron como insumos de referencia los sitios el INFyS y la Serie III de INEGI y en las columnas se incluyen los errores que están mal cartografiados en MCD12Q1 y en las filas están los datos que se omitieron, es decir lo que MCD12Q1 no está detectando correctamente. También las fórmulas para calcular dichos índices se invierten.

Si se observa la matriz de confusión para los bosques perennes (véase la versión 5 del cuadro 19), se deduce que es una clase con alto grado de confusión, la mayor confusión de los bosque perennes es con bosques deciduos, lo que significa que MCD12Q1 detecta con alta confiabilidad los bosques perennes y, además, los bosques perennes pueden aparecer como bosques deciduos en el mapa. otro dato que respalda una alta confusión de los bosques perennes es, si se compara el dato del área que corresponde a bosques perennes de 6.8% con el área cartografiada de 9.4% se deduce que hay sobre-representación cartográfica de la clase bosque perenne y todas las clases tienden a confundirse con bosque perenne.

La categoría con menor índice de confiabilidad por clase para el productor (ICCP) es bosque de coníferas, seguido de bosque deciduo, es decir, son las categorías que MCD12Q1 detecta deficientemente; Por otro lado, el índice de confiabilidad por clase para el usuario (ICCU) señala que los bosques perennes y el bosque de coníferas son las categorías con menor índice de confiabilidad por clase, es decir no están correctamente cartografiados.

Como se explicó en páginas anteriores, el índice del usuario proporciona una idea de la cantidad de área cartografiada como dicha clase. Si se observa la matriz de confusión (véase cuadro 19, versión 5), tanto la columna y renglón “área” para bosque de coníferas, se distingue correcta para la clase coníferas es de 7.12% que equivale a aproximadamente 71,200 km² y cartográficamente se están representando un 2.26% que equivale 22, 600km² es decir, existen aproximadamente 48,600 km² no cartografiados como bosque de coníferas, por lo tanto, el bosque de conífera tiende a no ser cartografiado.

El bosque deciduo es la otra categoría que está mal cartografiada, con base en la matriz de confusión, para esta clase se tiene que un 15.04% del área que equivale a 150,400 km² pertenecen a bosque deciduo; sin embargo, aparecen cartografiadas 8.66% equivalentes a 86,600 km² en decir 63,800 km² no están cartografiados cómo bosque deciduos.

Debido a que el presente trabajo es una validación del producto MCD12Q1, la nueva versión de MODIS, es conveniente comparar los resultados de esta validación con la que

realizó Couturier (2011). A grande rasgos, el trabajo de Couturier (2011) reporta una confiabilidad global difusa de $65\% \pm 1\%$, la confiabilidad difusa obtenida en esta investigación para MCD12Q1 es de $67\% \pm 1\%$, lo que refleja que efectivamente existe una mejora entre las versiones 4 y 5 de MCD12Q1, sin embargo el patrón de confusiones se sigue presentando, ya que Couturier también reporta una baja confiabilidad para bosque de coníferas y bosque deciduo, además están clases también aparecen mal cartografiadas.

Las matriz de confusión reportada por Couturier (2011), reporta que para el caso de bosque de coníferas le corresponde una extensión de $69,400 \text{ km}^2$ y se cartografiaron aproximadamente $43,600 \text{ km}^2$ estos datos revelan que $25,800 \text{ km}^2$ de bosque de coníferas no se mapean. Si comparamos los $25,800 \text{ km}^2$ no representados que se dedujeron a partir de la investigación de Couturier (2011), con los $48,600 \text{ km}^2$ reportados en esta investigación podemos concluir que la versión 5 de MCD12Q1 sigue con la misma tendencia e incluso aumenta significativamente el error de no cartografiar la clase bosque de coníferas (véase cuadro 19, versión 4).

Para el bosque deciduo, se tiene que los datos obtenidos a partir de la matriz de confusión reportada por Couturier (2011), arroja que $221,900 \text{ km}^2$ deberían estar cartografiados como bosque deciduo y sólo $98,900 \text{ km}^2$ son los que terminaron cartografiándose, esto quiere decir que $123,000 \text{ km}^2$ del área de bosques deciduos no se cartografían y aparecen como bosque perenne, clase que esta sobre-representada. Por el contrario, la versión 5 no cartografía $63,800 \text{ km}^2$ de bosques deciduos, por lo tanto, se concluye que la versión 5 mejoró tanto en su proceso de clasificación como de representación cartográfica de la categoría bosques deciduos, sin embargo, los patrones de confusión se siguen presentando.

Por último, el patrón de que la vegetación perenne es detectada con una alta confiabilidad se conserva en ambas versiones de MODIS, pero, la versión 5 además de continuar con el patrón de detectar bien los bosques perennes, los representa mejor cartográficamente que la versión 4.

Cuadro 19. Matrices de confusión para el producto MCD12Q1

Versión 4

Cod5	Coníferas	Perennes	Deciduos	Matorrales	6	7	8	11	agua	n	área	ICCP	Error
Coníferas	0.0319	0.014	0.0048	0.0095	0.0075	0	0.0009	0	0	248	6.94	46	3.2
Perennes	0.0023	0.067	0.0012	0.0014	0.0001	0.0005	0.0026	0.0001	0.0001	603	7.59	88.9	1.3
Deciduos	0.0037	0.055	0.0871	0.0199	0.0392	0.0009	0.0023	0.0093	0	521	22.19	39.2	2.1
matorrales	0.0056	0.011	0.0058	0.4360	0.1119	0.0003	0.0106	0.0188	0	481	60.34	72.3	2.0
n	148	745	244	438	269	8	64	37	2	1963			
Área	4.36	14.93	9.89	46.75	18.62	0.17	1.67	2.92	0.01		100		
ICCU	73	45	88	93	NA	NA	NA	NA	NA			65	1.1
error	4.0	2.0	2.0	1.0	NA	NA	NA	NA	NA				

Versión 5

Cod5	Coníferas	Perennes	Deciduos	Matorrales	6	7	8	11	agua	n	área	ICCP	Error
Coníferas	0.017	0.013	0.003	0.029	0.0079	0	0.0005	0	0	280	7.12	24.16	2.5
Perennes	0.0001	0.059	0.002	0.0009	0.0003	0.00044	0.0036	4.7E-05	0.00056	560	6.81	87.89	1.3
Deciduos	0.0005	0.020	0.066	0.042	0.0176	0	0.0033	0	0	560	15.04	44.20	2.0
matorrales	0.004	0.0003	0.015	0.523	0.1118	0.00989	0.0154	0.0220	0	483	70.94	74.68	2.0
n	70	571	329	610	201	13	59	18	12	1883			
Área	2.26	9.40	8.66	60.21	13.77	1.03	2.29	2.21	0.056		99.92		
ICCU	75.92	63.67	76.75	87.99	NA	NA	NA	NA	NA			67.34	1.0
error	0.051	0.020	0.023	0.013	NA	NA	NA	NA	NA				

2.4 REFLEXIONES SOBRE EL CAPÍTULO

Se concluye que las mayores aciertos por clase de cobertura vegetal para el producto MCD12Q1 son para selvas y bosques perennes, con alrededor de 92% de sitios calificados como aciertos. Las coberturas vegetales de coníferas, pino-encino, encino-pino y encino son las que reportan la menor cantidad de aciertos. Esto se traduce a que el mapa derivado de MODIS presenta las tendencias de: clasificar mayoritariamente como bosque perenne y, sobre-cartografiar como bosque perenne, por esto, la alta cantidad de aciertos para clases como bosque mesófilo, selva perennifolia y selva subperennifolia.

Por otro lado, el índice de confiabilidad global de 67% para la versión 5 de MCD12Q1 refleja el peso de la confiabilidad para la clase matorral, la cual posee una confiabilidad de clase de 74%. Debido a la baja confiabilidad de las clases bosque de conífera y bosque deciduos se recomienda que MODIS ponga énfasis en la mejora de su clasificador.

El enfoque difuso utilizado en este estudio se aplicó de dos maneras: con la asignación de dos etiquetas a los sitios de verificación (etiqueta primaria y secundaria) y con la construcción de tres escenarios de verificación por los que pasaron cada uno de los sitios de verificación; al reflejarse en cada matriz de confusión un ICG más alto que el escenario anterior, se concluye que, efectivamente el enfoque difuso proporciona mayor robustez a la validación de sitios de verificación. Por lo tanto, un enfoque difuso es indispensable en la validación cartográfica.

La metodología presentada para evaluar la confiabilidad cartográfica de mapas de uso de suelo y cobertura vegetal puede ser extendida a cualquier otro mapa de uso de suelo y cobertura vegetal en México,

Por último, los resultados de investigación se suman al acervo de trabajos de validación cartográfica, por lo que sirven de referencia para futuras evaluaciones del clasificador MODIS.

CAPÍTULO III.

EVALUACIÓN PARA EL MAPA DE CAMBIOS DE COBERTURA VEGETAL DEL MUNICIPIO DE MARQUÉS DE COMILLAS, CHIAPAS

En este último capítulo se aborda el tema de la confiabilidad cartográfica aplicado a mapas de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal, se pretende demostrar la factibilidad de la evaluación de dichos mapas para validar procesos de cambio de uso de suelo, como la deforestación. La metodología también está basada en el marco general de Stehman *et al.* (1998) y Couturier *et al.* (2012). La escala a la que se realiza este estudio es a nivel municipal, la zona corresponde al municipio Marqués de Comillas, ubicado en el sureste de Chiapas, por lo tanto, la deforestación a la que se refiere en este capítulo responde a la dinámica de una zona tropical.

3.1 EVALUACIÓN DE MAPAS DE CAMBIO DE COBERTURA VEGETAL

Con el contexto presentado en el apartado 1.2 y 1.3 del capítulo I, se reconoce la importancia de los cambios de uso de suelo y coberturas vegetales en el cambio climático, por lo tanto, se reitera la importancia de monitorear los cambios de cobertura, particularmente la deforestación tropical. Cuantificar la contribución de los cambios en las coberturas vegetales a las tasas de emisiones de carbono requiere de mapeo y mediciones de las coberturas vegetales a nivel mundial, es por esto que los estudios sobre los cambios de uso de suelo y cobertura vegetal son fundamentales, pues proporcionan la base para conocer la tendencia de los procesos de deforestación, degradación (Lambin *et al.*, 2006).

Los mapas de cambios de uso de suelo y cobertura vegetal según Strahler *et al.* (2006) son resultado del cruce de información de dos mapas de la misma zona en tiempos diferentes. Duran-Medina *et al.* (2007) refiere que análisis de cambios de coberturas de vegetación y usos de suelo técnicamente es la comparación de dos o más mapas de coberturas y usos de suelo para una misma área correspondientes a cuando menos dos fechas distintas.

Los datos de deforestación a nivel nacional e internacional provienen del análisis de cambios de cobertura y uso de suelo (Couturier *et al.*, 2012), la cuantificación del cambio de la cobertura vegetal entre diferentes fechas proporciona el dato de tasa de deforestación. En México, los inventarios forestales y las series de vegetación del INEGI son las fuentes oficiales de donde se obtienen los datos históricos y actuales de la deforestación, por lo tanto, las tasas de deforestación varían cuantiosamente, pues las fuentes de referencia varían en método, leyenda e insumos (Fernández, 2006). El cuadro 20 tomado de Couturier *et al.* (2012), muestra las discrepancias entre las cifras de deforestación reportadas para México.

Cuadro 20. Reporte de cifras de deforestación para México

DATOS ACADEMICOS		FUENTES OFICIALES	
Autor/año	Ha/año	Fuente/año	Ha/año
Grainger, 1984	1,600,000	FAO, 1988	615,000
Repetto, 1988	460,000	SARH, 1992	365,000
Castillo <i>et al.</i>, 1989	746,000	SARH, 1994	370,000
Myers, 1989	700,000	FAO, 1995	678,000
Toledo, 1989	1,500,000	FAO, 1997	508,000
Masera <i>et al.</i>, 1997	668,000	CONAFOR, 2004	260,000
Velázquez <i>et al.</i>, 2002	550,000	FAO (Torres, 2004)	775,800
Sánchez-Colon <i>et al.</i>, 2008	484,000	SEMARNAT, 2006	365,000
Total	6,708,000	Total	3,936,800
Promedio	838,500	Promedio	492,100
Desv. St.	± 451,417	Desv. St.	± 181,851

En el cuadro 20 se puede observar la existencia de diferencias significativas entre los reportes de fuentes oficiales y los reportes académicos. Estas variaciones, como se mencionó anteriormente, se deben a diferencias entre escalas, leyendas e insumos, y además, a que algunas cifras son resultado del análisis de cambios de mapas de la SEMARNAT e INEGI, instituciones que hasta la fecha carecen de la evaluación de precisión de sus datos. Es importante atender el tema debido a que, al presentarse tasas de deforestación contradictorias, éstas repercuten en la credibilidad de la distintas fuentes y refuerza la debilidad institucional en la regulación del cálculo de las tasas (Couturier *et al.*, 2012).

Por otro lado, es conveniente remarcar nuevamente, que los sensores remotos juegan un papel importante en la elaboración de mapas y por lo tanto, también son importantes en la documentación de cambios de cobertura terrestres. Pero, la limitación de los sensores remotos se debe a la capacidad espectral y espacial que tienen para distinguir entre una cobertura y otra, ya que reconocen un conjunto limitado de tipos de cobertura de suelo, esto es una de las causas que generan errores en los mapas, por lo tanto, también generan errores en los datos que se reportan en esos mapas.

Entonces, hasta el momento, con la información presentada, se identifican dos tipos de errores dentro de los mapas que afectan el análisis de cambio de coberturas, los primeros son, los errores causados por el uso de diferentes insumos, en donde se engloban las diferencias de escala, proyecciones y metodologías para obtener las categorías de clasificación de vegetación, y el segundo tipo de error, es resultado del sensor remoto y su capacidad espectral y espacial.

Con base en este entorno de discrepancias entre cifras, urge contar con estimaciones precisas y trabajar en la construcción de datos consistentes y métodos conceptuales (Velázquez *et al.*, 2002) que permitan dar credibilidad a las tasa de deforestación. Couturier *et al.* (2012) recalcan que existen numerosas investigaciones que abordan el tema de la deforestación tropical y degradación, y puntualiza la existencia de poca información sobre la precisión de las estimaciones de las tasas de cambio, lo que deja demasiada incertidumbre a nivel nacional y mundial.

En México, como poseedor de una superficie de 34.19% del total del territorio en bosques tropicales que (Villers *et al.*, 2004) y como parte de la estrategia REDD+ es de vital importancia la validación de mapas de cambio de cobertura, ya que, en el caso de la deforestación, los datos derivados de la validación de cambios reducen la incertidumbre en la contabilidad de las reservas de carbono (Couturier *et al.*, 2012) y además, la validación de estos cambios de cobertura, contribuyen al marco de monitoreo forestal, requisitado por la estrategia REDD+, llamado MRV (monitoreo, reporte y verificación), que exige datos robustos y transparentes de las emisiones de carbono.

Por último, y para dar mayor peso a la importancia de la validación de los mapas de cambios de cobertura terrestres, la CONAFOR³⁴ (2010), admite contar con bases metodológicas para el análisis de cambios de uso del suelo, y reconoce la necesidad de avanzar en el tema de la cuantificación y valoración cualitativa de estos procesos de cambio, como parte de la estrategia de mejorar los instrumentos de evaluación y la precisión de las estimaciones de cambio de coberturas.

3.2 METODOLOGÍA

Definir los diferentes estados de la cobertura es de suma importancia para la validación de cambios de uso de suelo. La propuesta metodológica planteada por Couturier *et al.* (2012) es parte de un esfuerzo conjunto con Velázquez *et al.* (2011)³⁵ y está enfocada en la detección de cambios de cobertura para bosques tropicales. Además, está basada en la validación cartográfica bajo el marco Stehman *et al.* (1998) que establece tres etapas: diseño de muestra, diseño de verificación y síntesis de la evaluación.

Esta metodología de verificación de cambios de cobertura reconoce la existencia de diferencias entre los insumos cartográficos del país, estas diferencias están asociadas a dos tipos de errores que se generalizan en la capacidad de discriminación del sensor y la diferencia entre conceptos para mapear. Con base en estas ideas, la propuesta metodológica de Couturier *et al.* (2012) es definir en primer orden, los conceptos en cuanto al tema de deforestación y en segundo orden definir las capacidades de los sensores remotos.

En primera instancia y bajo el reconocimiento de México como parte de la estrategia REDD+, esta metodología propone la adopción de los conceptos de FAO para bosque y con base en éste se define el concepto de deforestación. Este punto es importante, ya que, al apearse a los conceptos definidos por la FAO se habla de que las futuras aplicaciones de esta metodología paulatinamente eliminarán la inconsistencia entre datos reportados como deforestación, lo que elevará la credibilidad de los mismos.

³⁴ Institución que a partir del año 2001 se encarga de la publicación de datos oficiales referente al sector forestal.

³⁵ Couturier, S. y Núñez, J.M. (2012) son autores de la propuesta presentada en conjunto con Velázquez y Bocco (2011).

El concepto de la FAO para bosque es el siguiente:

“Bosque: son tierras que se extienden por más de 0.5 ha, con árboles que posean una cubierta de dosel superior al 10-30% y que pueden alcanzar altura superior de 2-5 metros in situ”

Con base en este concepto, se define al proceso de deforestación como:

“El cambio de cobertura bosque a no bosque en una superficie de 0.5 ha o más”

Por lo tanto, la reforestación es:

“El cambio de cobertura de no bosque a bosque en una superficie de 0.5 ha o más”

Y por último, el concepto de degradación se define como:

“Permanencia de bosque pero con una pérdida de más del 30% de cubierta del dosel”

Estas definiciones conllevan una serie de retos para la vigilancia forestal, implica, por ejemplo, establecer una unidad mínima cartografiada de 0.5 ha. Con base en estas definiciones, la metodología sugerida por Couturier *et al.* (2012) para la validación de mapas de cambios de cobertura en bosques tropicales pasa a la siguiente propuesta, que se refiere a identificar la capacidad de discernimiento de los sensores remotos para detectar cambios en la cobertura forestal, bajo términos FAO.

Finalmente se aterriza esta propuesta para relacionar la capacidad de los sensores remotos que se utilizan en la elaboración de mapas de cambio con la capacidad de discernimiento de éstos para detectar los conceptos de cobertura forestal de acuerdo a los estándares internacionales de la FAO. Se identifican tres tipos de sensores, dependiendo de la utilización de un sensor u otro, se detectará un proceso diferente (Velázquez *et al.*, 2011).

El cuadro 21 tomado de Couturier *et al.* (2012) muestra la clasificación de sensores, según su capacidad. Dependiendo de la utilización de un sensor u otro de detectará un proceso diferente, la deforestación por ejemplo, se puede detectar con sensores de resolución mediana o alta al igual que la degradación. También es importante recalcar

que los estudios con base en la utilización de sensores capacidad 1 son más económicos que estudios con capacidad 2 y a su vez, estos son más económicos que los estudios que usan sensores con capacidad 3 (Velázquez *et al.*, 2011).

Cuadro 21. Clasificación de sensores según su capacidad

CAPACIDAD DEL SENSOR	ÁREA MÍNIMA DETECTABLE (HA)	FRECUENCIA TEMPORAL DEL SENSOR	ACCESIBILIDAD/COSTO EN MÉXICO
CAPACIDAD 1 Resolución 250-1000 m Ej. MODIS, AVHRR Resolución baja	6-100	Diaria	Gratis
CAPACIDAD 2 Resolución 10-30m Ej. Landsat, ASTER, SPOT multiespectral Resolución mediana	0.05-0.30	3 días	Gratis/ USD \$250 por escena de 180 x 180 km ²
CAPACIDAD 3 Resolución 0.5-5 m Ej. Quickbird, GeoEye Resolución alta	0.01	3 días	USD \$20 por km ²

Fuente: Couturier *et al.* (2012).

En consecuencia, el método consiste en elegir el tipo de proceso que se desea reportar, deforestación, deforestación extensiva, reforestación y con base en esto elegir el sensor que conviene para la detección de dicho proceso. El cuadro 22 resume las capacidades de los sensores y los procesos que puede detectar.

Cuadro 22. Capacidad del sensor y proceso detectable

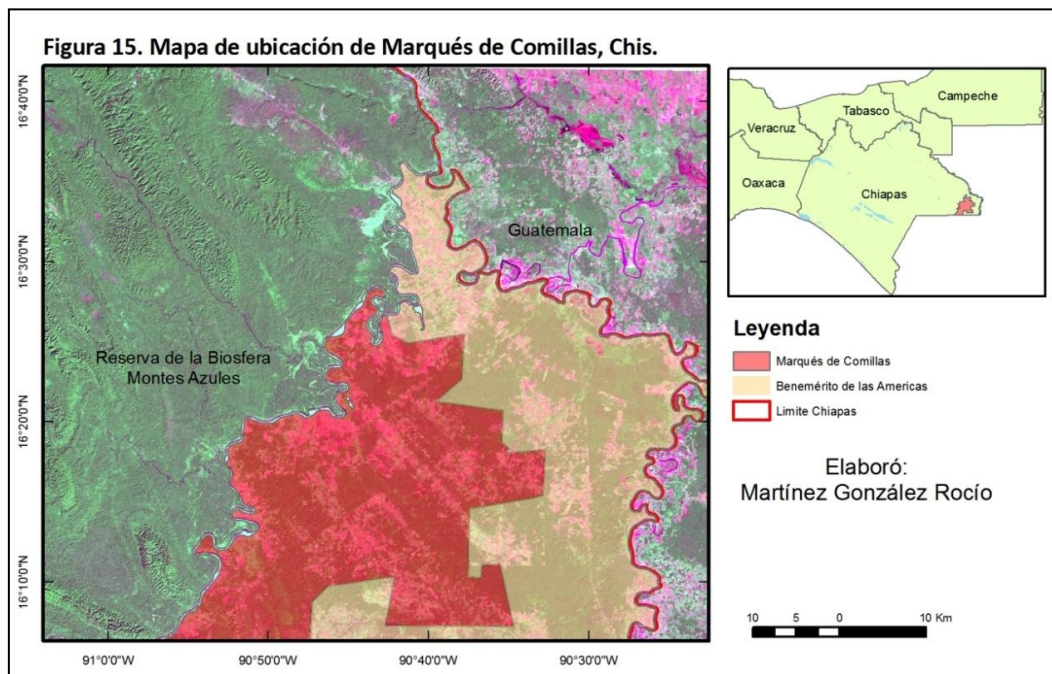
SENSORES CAPACIDAD 1	SENSORES CAPACIDAD 2	SENSORES CAPACIDAD 3
-Deforestación extensiva	-Deforestación bajo términos FAO	-Deforestación bajo términos FAO
-Reforestación extensiva consolidada	-Reforestación consolidada	-Reforestación consolidada
-Permanencia extensiva de bosque	-Recuperación	-Recuperación
-Permanencia extensiva de no bosque	-Permanencia de bosque	-Permanencia de bosque
	-Permanencia de no bosque	-Permanencia de no bosque

Elaboración propia con base en Couturier *et al.* (2012).

La última propuesta de esta metodología es el diseño de muestreo de las clases de cambio de cobertura, basado en un esquema híbrido de dos etapas, donde se emplea el muestreo estratificado proporcional para las clases de cambio que resultan raras o escasas (Couturier *et al.*, 2012). Se continúa con la selección de los sitios de verificación, el procesamiento de estos sitios, la comparación de la etiqueta del mapa con la etiqueta de referencia³⁶ y la construcción de la matriz de confusión³⁷.

3.3 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio es la totalidad del municipio Marqués de Comillas, en el estado de Chiapas. Está conformado por 25 comunidades y tiene una superficie territorial de 94,389 ha que representa el 1.23% de la superficie estatal. El municipio de Marqués de Comillas se ubica al sureste de la región de la Selva Lacandona. Los municipios colindantes son: al norte y este, Benemérito de las Américas; al sur, Guatemala y al oeste Maravilla Tenejapa y Ocosingo.



³⁶ Para evaluar la confiabilidad de un proceso de cambio de cobertura forestal requiere utilizar un sensor de capacidad más alta que el que se usó para detectar el cambio.

³⁷ Estas fases, forman parte del marco de evaluación de confiabilidad, basado en Stheman (1998) y se sintetizan en diseño de la muestra, diseño de la verificación y síntesis de la evaluación y se describieron en este proyecto de investigación en el capítulo 2.

3.3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

En cuanto a las características del relieve, el 98.68% del municipio lo conforman lomeríos con llanuras y el 1.32% cuerpos de agua. La altura del relieve varía desde los 140 hasta los 260 msnm. En las partes más bajas se ubican las planicies aluviales, que presentan suelos fértiles, en la parte norte y hasta el centro del municipio se presentan lomeríos suaves y a medida que se avanza hacia el sur estos relieves se transforman gradualmente a colinas más abruptas. El río Lacantún es el río principal del municipio, éste forma la sub-cuenca hidrográfica del Lacantún que forma parte de la cuenca del río Usumacinta, a nivel regional la sub-cuenca del río Lacantún es de las mejores conservadas, lo que significa para Marqués de Comillas relevancia en cuanto a los servicios ambientales que el municipio puede ofrecer.

En cuanto a características geológicas, prevalecen las rocas sedimentarias lutita y caliza. Las características edafológicas que dominan en Marqués de Comillas son, suelos aluviales y acrisoles, caracterizados por poseer un subsuelo muy profundo, enriquecido con arcilla, son frágiles a procesos erosivos, y se compactan; además, son suelos vulnerables ante la falta de vegetación lo que los lleva a reducir su rendimiento rápidamente.

El clima que predomina en el municipio es, cálido sub-húmedo con lluvias en verano y la precipitación fluctúa entre los 1,400 y 2,600 mm en la época de lluvias. Según datos oficiales del gobierno estatal la vegetación presente y predominante en el municipio Marqués de Comillas es: selva alta perenne y selva mediana subperennifolia, 44 .34%; selva alta mediana y selva alta perennifolia con vegetación arbustiva y herbácea 9.43%; y popal, tular y palmares, 0.73%. Las plantas características son: el corozo, la caoba, el canshan o volador, la chapaya el gaupaque, la maca blanca y el tzotzash. Aunado a estos porcentajes, el uso de suelo es: 43.53% pastizal cultivado, 0.41% agricultura de temporal y 0.12% viviendas (Plan de Desarrollo Municipal Marqués de Comillas 2011-2012).

3.3.2 HISTORIA DEL MUNICIPIO DE MARQUÉS DE COMILLAS

En la época prehispánica, la región de Marqués de Comillas al igual que toda la zona Lacandona fue habitada por pueblos mayas. Durante la época colonial fue una zona aparentemente inhóspita, que solo era habitada en las porciones ribereñas del río

Usumacinta, esta zona junto con lo que hoy se conoce como Selva Lacandona era conocido en esa época como el desierto del Lacandón. A partir de 1850 toda la zona toma importancia internacional debido a la presencia de maderas preciosas como la caoba, posteriormente el presidente Porfirio Díaz a través de concesiones vendió extensas áreas de selva a extranjeros (Plan de Desarrollo Municipal Marqués de Comillas 2011-2012).

En el año de 1934 el gobierno federal intentó expropiar las tierras de la región, pero, debido a la existencia de latifundios extranjeros, la expropiación se tornó difícil y fue hasta el año de 1961 que finalmente las tierras del desierto Lacandón que eran explotadas por empresas extranjeras, pasaron al dominio del gobierno federal. Además, entre las décadas de 1950 y 1960 también surgieron políticas de colonización en la zona, los chiapanecos que trabajaron en los latifundios extranjeros adquirieron su porción de tierra, y estas familias fueron los fundadores de los primeros ejidos y poblados de la zona Lacandona, sin embargo, no era la cantidad suficiente de población, por lo que el Departamento de Asuntos Agrarios y Colonización fomentó en todo el sureste del país, específicamente en el sur de la selva Lacandona, la creación de nuevos centros de población ejidal con campesinos y agricultores provenientes del norte, occidente y centro de México (Plan de Desarrollo Municipal Marqués de Comillas 2011-2012).

Una nueva oleada de colonización se presenta en los años 70's debido a que la paraestatal PEMEX inicia tareas de prospección en toda la selva³⁸. Este evento trajo una fuerte migración al municipio de Marqués de Comillas porque su principal centro de operaciones se establece en Zamora Pico de Oro. Además, llegaron cientos de indígenas zoques que fueron reubicados en la región, después de la erupción del volcán del Chichonal, también llegaron decenas de familias chinantecas afectadas por las construcciones de la presa Cerro de Oro en Oaxaca. Actualmente, según el censo de población y vivienda 2010, en Marqués de Comillas hay un total de 9,857 habitantes (Plan de Desarrollo Municipal Marqués de Comillas 2011-2012).

³⁸ Se abren 11 pozos de prospección que hasta la fecha están abandonados e inician la construcción de la carretera Palenque-Benemerito-Comitan.

3.4 APLICACIÓN METODOLÓGICA

Este estudio de caso consiste en detectar los cambios de cobertura forestal³⁹ en dos fechas, 2010-2012 para el municipio de Marqués de Comillas, para poder proceder con la validación de datos y proporcionar validez estadística a los cambios ocurridos en la zona de Marqués de Comillas que históricamente ha presentado una dinámica forestal elevada.

La metodología se divide en dos partes. La primera parte corresponde a la propuesta por Couturier *et al.* (2012) que menciona la adopción de conceptos de deforestación y capacidad del sensor para validar deforestación y, la segunda parte, trata del marco de verificación Stehman *et al.* (1998) con diseños de muestreo, diseño de verificación y síntesis de la evaluación.

Descripción de Insumos

Mapas de cobertura forestal: En este capítulo se menciona que los cambios en las coberturas forestales se detectan a partir del traslape de dos mapas de coberturas para la misma fecha y zona, en este es caso los insumos para construir un mapa de cambios de cobertura forestal son los dos mapas de cobertura forestal binaria⁴⁰, del municipio de Marqués de Comillas elaborados por Centro-Geo⁴¹, se usaron estos mapas debido a que la metodología que utilizaron para obtener la cobertura forestal se apega a los estándares FAO. Una breve descripción del cómo obtuvieron un mapa de cobertura forestal para el municipio de Marqués de Comillas se describe a continuación.

El primer paso fue definir el concepto de bosque, se acoplaron a la siguiente definición: Zonas de extensión mínima de una hectárea, donde, la proyección vertical de las copas de los árboles cubren mínimo entre el 10 y 20% de la superficie del terreno y, que en

³⁹ Se habla de cobertura forestal, pues se adoptó en concepto de bosque; La CONAFOR (2009) dice que lo forestal es todo lo concerniente a bosques. Debido a que *bosque* es un tipo de cobertura vegetal, se hace explícito que sólo en este capítulo cobertura vegetal y cobertura forestal se usan sin distinción.

⁴⁰ Es decir, sólo presentan las categorías bosque y no bosque en su leyenda.

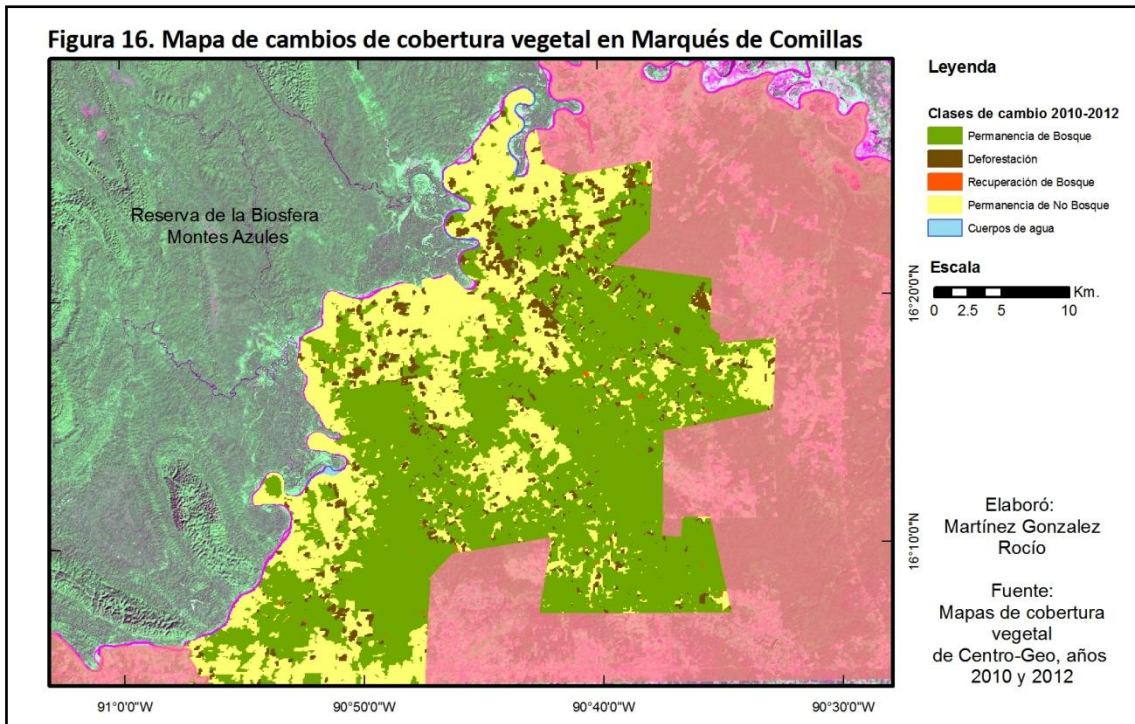
⁴¹ Centro de investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo", A.C.

promedio los árboles ahí presentes tienen una altura mínima de cinco metros *in situ* (Núñez *et al.*, 2012)⁴².

Se utilizaron imágenes SPOT multi-espectrales, ortorectificadas y con corrección atmosférica. Se determinaron parámetros biofísicos como índice de área foliar y cobertura sobre el suelo para, a su vez, obtener información sobre la composición del bosque ya que, estas variables son consideradas de alto criterio en estudios de vegetación. Se aplicó un análisis de regresión logística multivariada para generar estimaciones de cobertura forestal, este método se emplea cuando el número de variables explicatorias es mayor a uno, ya que, permite mostrar la relación entre una variable, en este caso cubierta forestal, y una serie de variables que la definen, determinadas en este caso a partir de las transformaciones necesarias para la extracción de rasgos espectrales de las imágenes empleadas y variables topográficas extraídas de un modelo digital de elevación (Núñez *et al.*, 2010). Todos estos procesos se utilizaron como herramienta descriptiva de los patrones de reflectancia y absorción de los diferentes rasgos de la superficie terrestre que permite la identificación de diferentes tipos de superficies de la cobertura forestal. En resumen, la regresión logística multivarada es: la probabilidad de que un pixel pueda ser considerado como cobertura forestal a partir de los parámetros explicados con anterioridad (Núñez *et al.*, 2010). La obtención de estas probabilidades se plasman en un mapa y el resultado es, mapas de cobertura forestal. Bajo este método Centro-Geo obtuvo los mapas de Bosque y No Bosque para los años 2010 y 2012. Se continuó con el traslape de ambos mapas para obtener del mapa de cambios⁴³ (véase figura 16).

⁴² Si bien, esta definición no es igual a la definición de bosques por la FAO, se deduce que la definición que adopta Centro-Geo retoma las características fundamentales de caracterización de bosque por la FAO, por lo tanto, esta definición es aceptable.

⁴³ El proceso de cruce de información y obtención del mapa de cambios fue de elaboración propia y se llevó a cabo con el software ENVI 4.7 y ARC-GIS 9.3

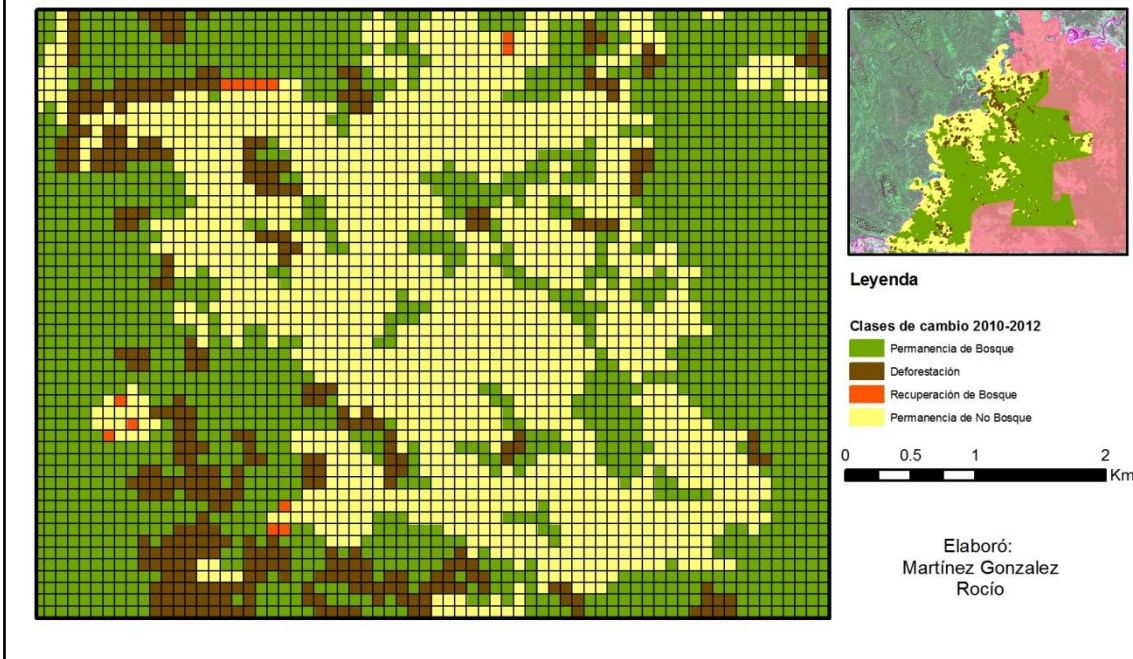


Los mapas de cobertura forestal elaborados por Centro-Geo son mapas binarios, por lo tanto, son mapas con dos categorías: Bosque y No Bosque. El mapa de cambios que se obtuvo no tiene esta característica, está constituido de 4 categorías: *Permanencia de bosque* (categoría donde tanto en el año 2010 y 2012 Centro-Geo a través de sus mapas reporta la existencia de bosque); *Permanencia de No bosque*, categoría donde en el año 2010 se reporta la existencia de No bosque y para el año 2012 se continúa reportando No bosque); *Deforestación*, categoría donde en el año 2010 se reporta la existencia de bosque y para el año 2012 se reporta como No bosque y, *Recuperación forestal*, donde en el año 2010 se reporta la existencia de No Bosque y en el año 2012 se reporta Bosque.

Obtenido el mapa de cambios se construye una malla de 90x90m y se une con el mapa de cambios, la malla sirve para obtener la unidad mínima cartografiada⁴⁴ y con base en la malla se realizará el muestreo (véase figura 17).

⁴⁴ La unidad mínima cartografiada está definida por el tamaño de pixel del mapa de cambios de cobertura, que es de 90x90m, se recuerda al lector, que esta unidad se especificó por Centro-Geo con base en los conceptos de bosque tomados en cuenta antes de realizar los mapas de cobertura forestal.

Figura 17. Mapa de cambios de cobertura vegetal con malla para muestreo



La siguiente etapa es definir qué tipo de imágenes satelitales servirán como insumo de referencia, para esto y como lo señala la metodología expuesta, es necesario reconocer el tipo de proceso que se desea validar, con base en esto, se decide la capacidad del satélite que se ajusta a nuestras necesidades (véase cuadros 21 y 22). El concepto de deforestación FAO es el proceso en el que se centra este estudio de caso, con base en el cuadro 22, se observa que las imágenes provenientes de satélites con capacidad 2 y 3 son las ideales para llevar a cabo la validación.

Para este estudio de caso, la elección del sensor fue con base a la accesibilidad de las imágenes. Los sensores con capacidad 2 (Landsat, Aster) son de libre acceso y SPOT que también es clasificado como capacidad 2 tiene un costo de \$250 dólares. Los sensores capacidad 3, no son gratuitos y el costo por 1 km² de información es de \$20 dólares. El sensor que se seleccionó fue SPOT pancromático⁴⁵ debido a que el Instituto

⁴⁵ Se usaron imágenes SPOT pancromáticas, ya que estas tienen una mayor resolución espacial que las imágenes SPOT multiespectral. Además, SPOT multiespectral no puede ser usada como insumo de validación, ya que se usó como insumo de extracción de datos para el mapa base.

de Geografía de la UNAM tiene un convenio con la Estación de Recepción México (Ermex)⁴⁶.

Se seleccionaron las escenas Spot pancromático para la zona de Marqués de Comillas, para los años 2010 y 2012, ambas con menos del 20% de nubosidad. Se georreferenciaron en ARC.GIS 9.3 con base en las imágenes que sirvieron como referencia geométrica para realizar los mapas de cobertura, con la finalidad de no tener desfases entre los datos de los insumos de referencia y los insumos de verificación (véase figuras 18 y 19⁴⁷).

La segunda parte de la aplicación metodológica, se aplica un diseño de muestreo estratificado proporcional, debido a que las coberturas forestales no son de la misma proporción, como se observa en el mapa de cambios (figura 16) que la clase de cambio que predomina espacialmente es: Permanencia de No bosque, seguida de la clase de cambio Permanencia de Bosque, continua la clase de cambio deforestación y por último, recuperación forestal. Este tipo de muestreo, otorga el mismo peso a cada clase.

Figura 18. Imagen Spot pancromática para el municipio de Marqués de Comillas, 2010.

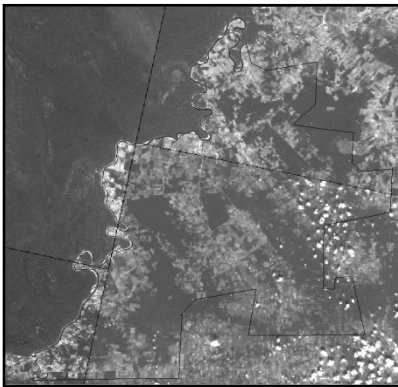
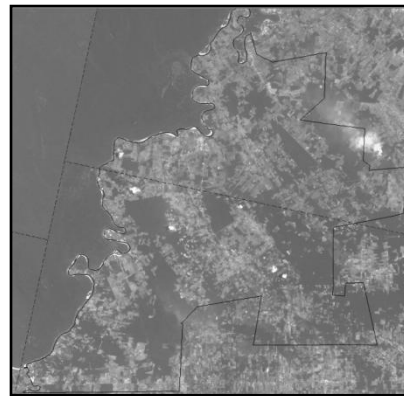


Figura 19. Imagen Spot pancromática para el municipio de Marqués de Comillas, 2012.

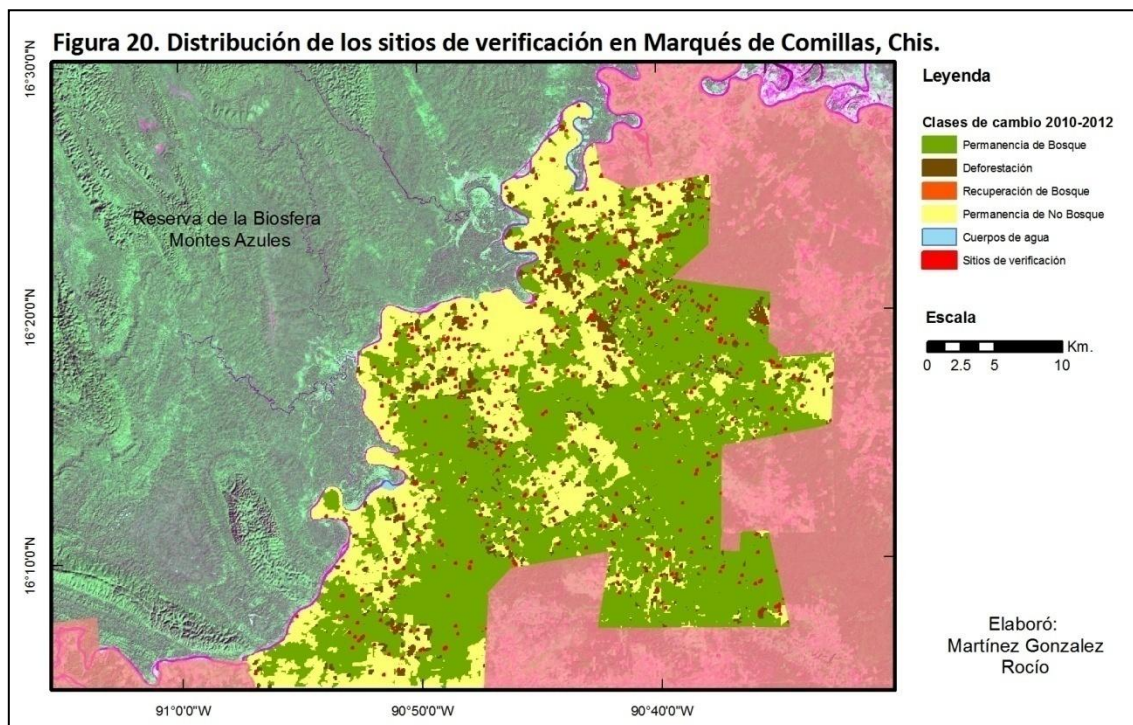


⁴⁶ Institución que suministra de imágenes SPOT actualizadas a las investigaciones científicas y académicas llevadas a cabo en el Instituto de Geografía.

⁴⁷ En las imágenes Spot pancromáticas se observa la cantidad de imágenes que se necesitaron para cubrir la zona y además, se puede ver cuál es el límite del municipio de Marqués de Comillas, Chis.

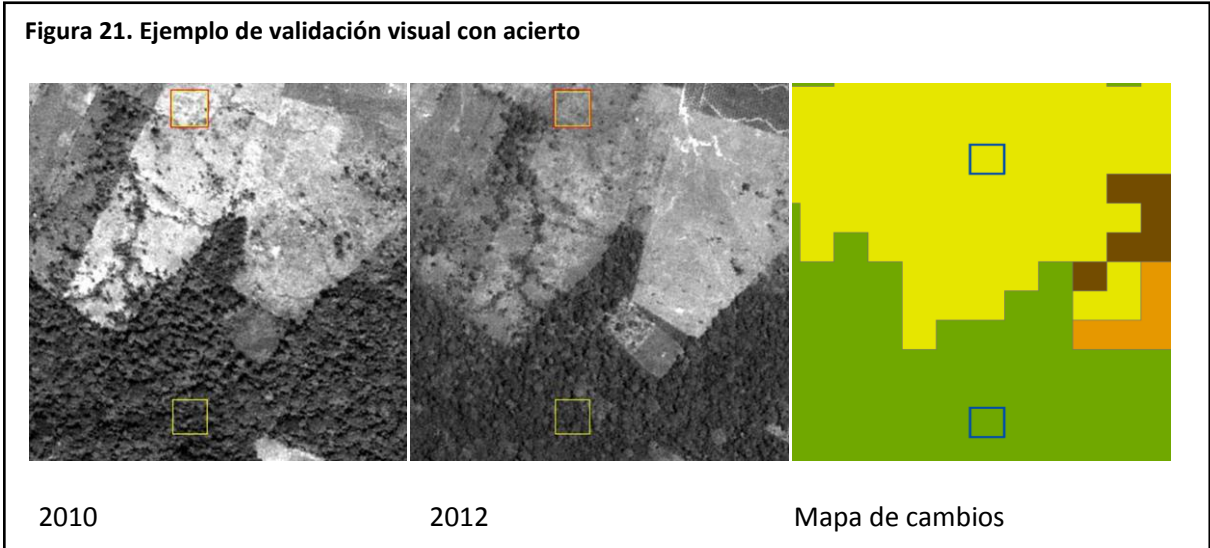
Los sitios de verificación son cada una de las celdas de 90x90m que se unieron al mapa de cambios de cobertura. Se escogieron 400 sitios de verificación, o 100 sitios para cada clase de cambio, los sitios están distribuidos de manera aleatoria en cada una de las clases de cambio, lo que asegura una buena representación espacial de cada categoría del mapa de cambios. Con estos 400 sitios se creó un shapefile de sitios de verificación (véase figura 20). Los insumos están listos para empezar la validación del mapa de cambio de cobertura forestal.

Se evalúan cada uno de los 400 sitios de verificación, con base en la interpretación visual de las imágenes Spot pancromáticas 2010 y 2012. Las ventajas de utilizar un método visual son variadas, Bocco *et al.* (2001) menciona que una de las formas de evaluación de los cambios en el uso de suelo es a partir de la medición de la cobertura vegetal y no vegetal del mismo, por lo tanto, una interpretación visual de una imagen con alta resolución espectral, provee una idea bastante acertada en cuanto a la presencia de bosque y no bosque. Además, en la interpretación visual de una imagen de satélite, el intérprete utiliza criterios como textura, forma, ubicación de los objetos, y su conocimiento, lo que limita parcialmente el problema de confusión espectral.



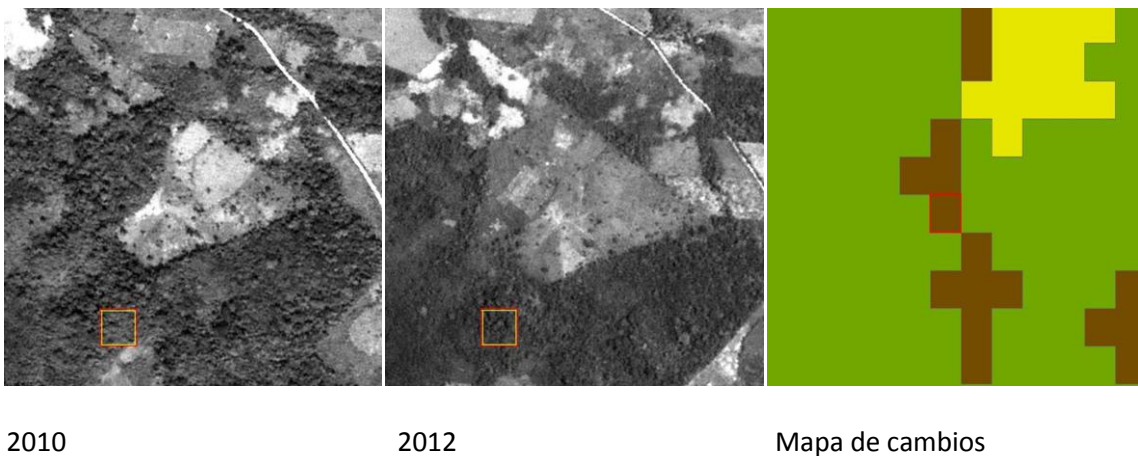
Para la evaluación de cada sitio de verificación se utilizó el software ENVI 4.7 en donde se confrontaron el shapefile de los 400 sitios de verificación con las imágenes SPOT pancromáticas del año 2010 y 2012. En un primer enfoque, se asigna una etiqueta al sitio de verificación, con base en la interpretación visual de la imagen Spot año 2010, la etiqueta que se asigna al sitio solo puede ser bosque o no bosque, seguido de este proceso, el mismo sitio se interpreta visualmente para el año 2012 y dependiendo de la cobertura que se encuentre para el 2012 es el tipo de cambio que se registra. Es decir, un sitio de verificación en su interpretación visual del año 2010 es validado como cobertura de bosque y con la interpretación de la imagen 2012 ese mismo sitio es calificado como No bosque, entonces a ese sitio de verificación se le asigna la clase de cambio deforestación debido al cambio en la clasificación de bosque a no bosque.

Un ejemplo de validación visual tanto para calificar a un sitio como acierto y como error se ilustra a continuación:



Con base en las imágenes Spot, ambos sitios de verificación están validados como acierto debido a que están bien clasificados, por ejemplo, se observa que el sitio de verificación inferior para el año 2010 se califica como bosque, ese mismo sitio para el año 2012 sigue siendo bosque, por lo tanto, ese sitio en el mapa aparece en la categoría permanencia de bosque.

Figura 22. Ejemplo de validación visual con error



El sitio de verificación para el año 2010 se encuentra en bosque y para el año 2012 continúa como categoría bosque, pero en el mapa de cambios de cobertura vegetal el mismo sitio está clasificado como deforestación, por lo tanto, es un error en el mapa, ya que las imágenes Spot evidencian que el sitio ser cartografiado como permanencia de bosque.

Una vez confrontado cada uno de los 400 sitios de verificación y que se les ha asignado una etiqueta con base en insumos de mayor resolución espectral, se finaliza con el conteo de sitios que fueron correctos para cada una de las clases de cambio y se construye la matriz de confusión.

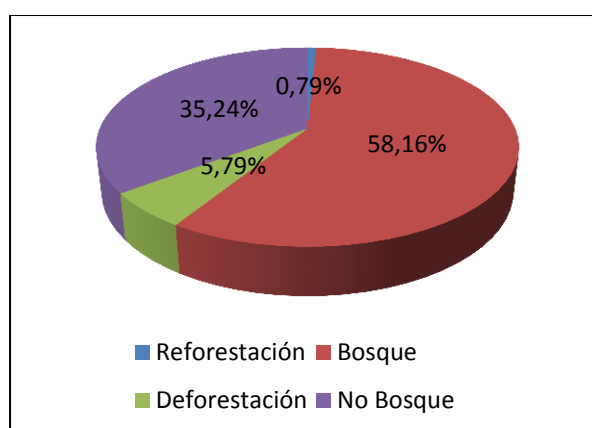
Con los resultados que arrojó la matriz de confusión se organizó una visita de campo al municipio de Marqués de Comillas, para corroborar algunos de los sitios en donde se detectaron errores y aciertos en el cambio de cobertura⁴⁸. Para la visita a campo se elaboró un mapa con la totalidad de sitios verificados como acierto y como error. Se puso énfasis en visitar los sitios identificados como recuperación vegetal y deforestación para corroborar el tipo de cobertura existente en campo y poder analizar de mejor manera los errores del mapa de cambios de cobertura.

⁴⁸ Debido a la lejanía entre sitios de verificación, inaccesibilidad y tiempo de verificación in situ, no fue posible visitar todos los sitios identificados como error en el mapa.

3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir del mapa de cambios de cobertura forestal, se determinó que de las 94,389 ha totales para el municipio Marqués de Comillas, 754.92 ha corresponden a la clase de cambio Recuperación forestal; 5,473.98 ha corresponden a la clase de cambio Deforestación; 33,263 ha corresponden a la clase Permanencia de no bosque y 54,896 ha pertenecen a la clase Permanencia de bosque. La proporción en porcentaje de las categorías en el mapa de cambio de cobertura forestal se refleja en la siguiente gráfica:

Figura 23. Gráfica de porcentaje de cobertura vegetal para Marqués de Comillas, Chis.



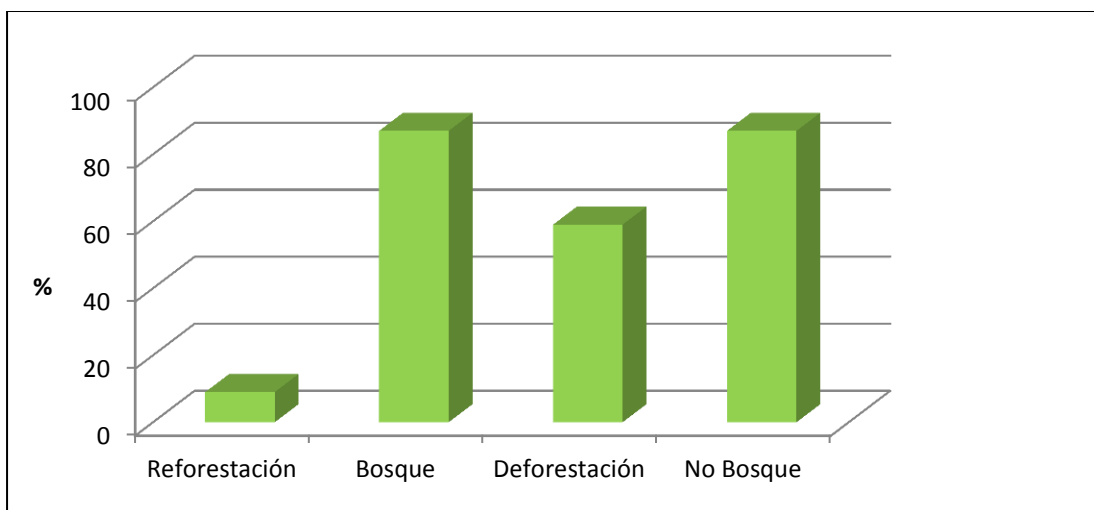
El total de área que se validó es de 324 ha. La matriz de confusión que se construyó a partir de la verificación de los sitios es la siguiente:

Cuadro 23. Matriz de confusión para el mapa de cambios de cobertura vegetal

clase	recuperación	bosque	deforestación	no bosque	n	área	ICCU	Error	ICG
recuperación	0.0007	0.0024	0.0012	0.0035	100	0.79	9	0.028	0.07
bosque-bosque	0	0.5059	0.0174	0.0581	100	58.16	87	0.033	50.59
deforestación	0	0.0052	0.0342	0.0185	100	5.79	59	0.049	3.42
no bosque	0.0070	0.0035	0.0352	0.3065	100	35.24	87	0.033	30.65
n	11	128	88	173	400				
área	0.77	51.72	8.81	38.68		100			
ICCP	9.26	97.83	38.80	79.25			84.75	0.017	
error	0.026	0.044	0.030	0.037					

A partir de la matriz se obtuvo la siguiente grafica de los índices de confiabilidad (véase figura 24 y la columna ICCU del cuadro 23).

Figura 24. Índice de confiabilidad por clase de cambio de cobertura vegetal



La confiabilidad global de mapa de cambios de cobertura forestal es de $84\% \pm 1\%$, las clases que mayor peso a este índice global de confiabilidad son: permanencia de bosque y permanencia de no bosque, sin embargo, entender que la probabilidad de consultar aleatoriamente un punto en el mapa de cambios de cobertura forestal y que este tenga una probabilidad de $84\% \pm 1\%$ de ser correcto es una manera muy ambigua de reportar la confiabilidad de un mapa, por esto, es preferible reportar los índices de exactitud por clase para comprender el comportamiento de los datos del mapa de cambios de coberturas forestales.

Se observa que las clases con mayor índice de confiabilidad para el usuario son las clases de cambio permanencia de bosque y permanencia de no bosque, lo cual proporciona una idea general de la calidad de los datos de los mapas usados por Centro-Geo para los años 2010 y 2012. Ambas clases presentan un $87\% \pm 3\%$ de confiabilidad, por lo tanto se deduce que la cartografía de cobertura forestal que Centro-Geo ha elaborado para el monitoreo forestal es aceptable y tiene un alto grado de coincidencia con la realidad.

El índice de usuario, representa la confiabilidad de las categorías mapeadas. La clase de cambio deforestación obtuvo un 59% de confiabilidad⁴⁹ ± 5% de intervalo de error, lo que quiere decir que al momento de consultar la clase de cambio deforestación en el mapa de cambios de cobertura forestal, tenemos la probabilidad de 59% de que el dato consultado sea correcto. La confiabilidad de la deforestación de 59% es una confiabilidad aceptable si se toma en cuenta que en México no existen trabajos que reporten la confiabilidad del proceso de deforestación.

Por otro lado, la matriz de confusión revela que la clase de cambio deforestación tiende a confundirse con la clase permanencia de no bosque, es decir, en el mapa de cambios de cobertura forestal aproximadamente un 32%⁵⁰ del territorio etiquetado como deforestación es cartografiado como permanencia de no bosque. Por lo tanto, esta cifra demuestra que debe de ponerse mayor énfasis en la detección de bosque. Debido a que la confiabilidad de bosque es de 87% esto puede indicar posible ambigüedades en método de evaluación visual de la clase bosque⁵¹.

La clase recuperación de cobertura forestal fue la más baja con 9% ± 3% de confiabilidad para el usuario, tener una confiabilidad baja en la recuperación forestal no significa que los datos que arroja el mapa de cambios de cobertura son erróneos, ya que el concepto de recuperación forestal es bastante complejo, y evaluar una recuperación forestal en dos años es bastante ambiguo, por ejemplo, la CONAFOR (2009) menciona que la recuperación natural forestal es un proceso que requiere un periodo largo que puede variar de cientos a miles de años. Por lo tanto, el dato de 9% ± 3% de confiabilidad en la clase recuperación de cobertura habla de que en Marqués de Comillas sí existen zonas en donde se permite la recuperación de la selva, lo cual es alentador en una región donde la tala de bosque ha sido intensa.

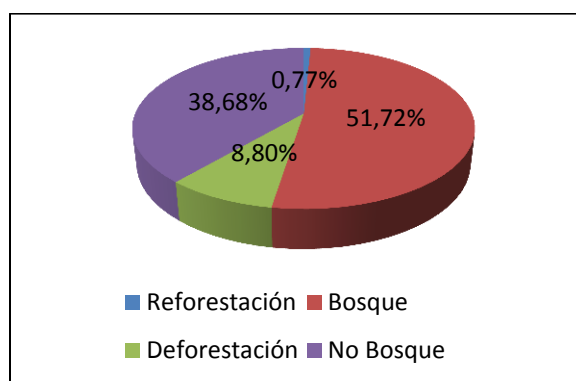
⁴⁹ Los índices de confiabilidad para el usuario están representados en la matriz de error en la columna de nombre ICCU del cuadro 23.

⁵⁰ Este dato se obtuvo de multiplicar en valor de la celda que corresponde a columna *no bosque* y renglón *deforestación* por el total de territorio validado como deforestación.

⁵¹ Uno de los aspectos que pudo haber ocasionado datos con baja confiabilidad en el método de validación visual es que la imágenes SPOT de referencia no cubren la totalidad del tiempo de estudio, la imagen que se usó para validar el año 2010 fue una SPOT pancromática de noviembre del 2009 y para el año 2012 se usó una SPOT pancromática de abril del 2012.

En cuanto a los índices del productor⁵², que son los que representan la cantidad de información omitida, es decir, la información que no aparece en el mapa, es la proporción reportada a partir de la clasificación de referencia, y por lo tanto estos datos son considerados como lo más cercano a la realidad. En otras palabras, la clasificación de referencia para este estudio de caso son las imágenes SPOT, según la validación visual de imágenes SPOT, la distribución de las clases de cambio de cobertura forestal corresponde a la siguiente grafica (véase figura 25).

Figura 25. Área por clase de cambio para el productor



La comparación de ambas graficas demuestra que, por ejemplo, la clase de permanencia de bosque está sobre-cartografiada en el mapa de cambios de cobertura forestal, ya que, según datos de Centro-Geo, esta clase ocupa un 58.16% en el mapa y los datos de referencia reportan que en realidad un 51.72% del total de territorio de Marqués de Comillas está representado por bosque. Para la clase de cambio permanencia de no bosque sucede lo contrario, los datos de referencia demuestran que la clase permanencia de no bosque representa una superficie de 38.68% y que es cartografiada sólo un 35.24%, por lo tanto, la clase no bosque que está representada cartográficamente en el mapa de cambios está sub-estimada.

La clase de cambio recuperación forestal en términos generales no sufre sub o sobre estimaciones, ya que, cartográficamente esta clase es representada con un 0.79% y los datos de referencia reportan un área de 0.77%. Sin embargo, la clase de cambio

⁵² Reportado en el renglón ICCP, para cada una de las clases en el cuadro 23.

deforestación, que es la clase que más interesa en este estudio de caso si reporta una variabilidad mayor que las otras clases. Los datos de referencia reportan que este clase de cambio corresponde a un 8.80% del total de territorio de Marqués de Comillas y en el mapa de cambios de cobertura forestal es cartografiado un 5.79%. Estos datos demuestran que la deforestación está subestimada cartográficamente.

Al principio de este subtema se reporta que el total de área cartografiada como clase de cambio deforestación entre los años 2010 y 2012 es de 5,473.98 ha, la clase referencia reporta que la clase de cambio deforestación en realidad corresponde a 8,306.2 ha, esto corresponde a una omisión de 2,832.2 ha para la clase de cambio deforestación. Sin embargo, resalta que la matriz de error reporta un índice de confiabilidad para el productor de $39\% \pm 3\%$, lo que señala que el error está distribuido de una manera relativamente proporcional en las demás clases, por lo tanto es necesario revisar y mejorar el método de validación visual para los sitios de verificación.

Figura 25. Área por clase de cambio para el productor

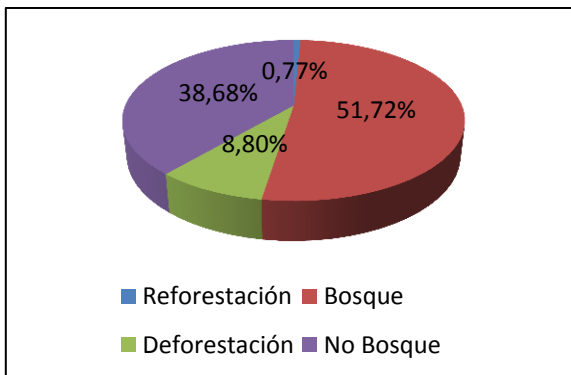
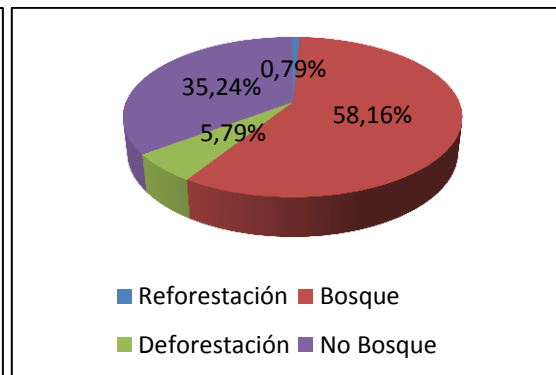


Figura 26. Área por clase de cambio para el usuario

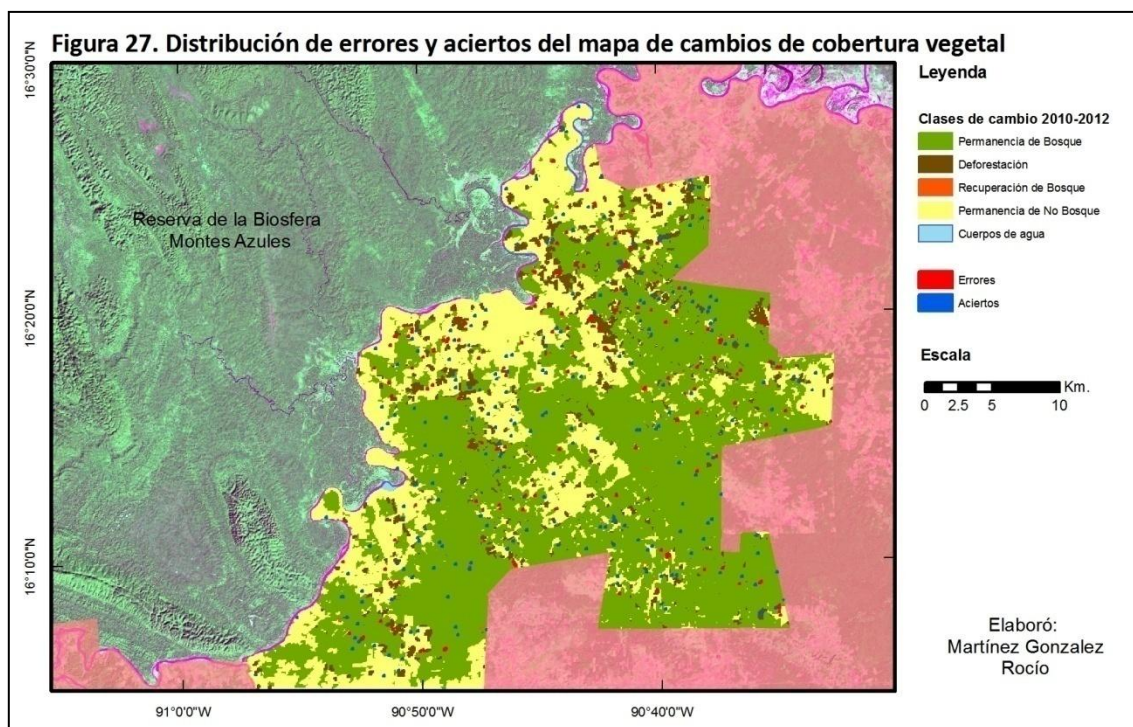


Por último, la visita a campo se realizó del 1 al 4 de mayo del año 2013. Se realizó un mapa de la distribución de todos los sitios de verificación que resultaron con un error durante la verificación (véase figura 27), esto con la finalidad de localizar la existencia de algún patrón que incida en el error.

Debido a la poca disponibilidad de tiempo, sólo se seleccionaron 10 errores para cada clase, no se pudieron visitar cada uno de los sitios de verificación por cuestiones de accesibilidad, ya que varios se localizaban en propiedad privada, otros se encontraban

alejados de la carretera y en otros se necesitaba la ayuda de un guía para poder acceder a la selva. A pesar de esto en campo se pudo identificar que:

Los pocos errores que pertenecen a la clase de permanencia de bosque puede deberse a la presencia de acahuales. El acahual es un tipo de vegetación secundaria que presenta diferentes grados de madurez, es un sistema rotacional y también es conocido como barbecho (Soto-Pinto *et al.*, 2011), la SEMARNAT lo define como vegetación forestal que surge de manera espontánea en terrenos que estuvieron en uso agrícola o pecuario en zonas tropicales. Por lo tanto, con la visita a campo se concluye que este tipo de vegetación es detectada y reportada como bosque por Centro-Geo pero bajos los términos de clasificación visual, este no reúne los requisitos suficientes para ser considerado bosque, sin embargo los sitios que fueron un error en el mapa son pocos y en estos los acahuales son de baja estatura.



Los errores que pertenecen a las clases de cambio permanencia de no bosque y deforestación se concentran en zona de frontera agrícola, es decir, lugares que están justo en la línea entre bosque y zonas pecuarias o agrícolas (véase fotografía 1), por lo tanto, se deduce que un sitio de referencia que cae en la frontera agrícola tiene a ser

etiquetado por el contorno que prevalezca, es decir, si se trata por ejemplo, del caso de un sitio de verificación que pertenece a la clase no bosque y es rodeado por bosque este tiende a ser clasificado como bosque y viceversa, si un sitio de referencia de la clase bosque rodeado de no bosque tiende a ser calificado como no bosque.

En campo los sitios identificados como recuperación forestal fueron los que tuvieron poca accesibilidad, debido a que eran puntos rodeados de bosque y en la mayoría de los casos de propiedad ejidal. Los resultados de los sitios visitados fueron que las zonas que presentan recuperación forestal efectivamente no tienen la presencia de bosque, pero sí una cubierta de vegetación secundaria de aproximadamente menos de 2 m de altura (véase fotografía 2), además, un sitio de verificación de la clase de recuperación forestal se encontró cubierto de zacatillo, una planta que espectralmente se confunde con el bosque por la alta densidad de cobertura que ésta presenta.

Por último, con base en los sitios de verificación visitados que pertenecen a la categoría Permanencia de No Bosque y que son un acierto del mapa, se concluye que efectivamente no tienen bosque y que la presencia de vegetación tipo pastizal y arbustos son la evidencia de que al menos en el periodo 2010-2012 no hay cambiado de categoría (véase fotografía 3). Otro fenómeno importante detectado en campo fueron los repentinos cambios de clases, pues existieron sitios de verificación de Permanencia de Bosque calificados correcto para el periodo 2010-2012 pero que en la visita a campo (mayo 2013) se encontraron con un proceso de deforestación reciente (véase fotografía 4). Esto es otro punto a favor de la validación de cambios de coberturas vegetales en un periodo corto (2 años), pues permite cuantificar procesos de cambios en áreas pequeñas lo que permite el monitoreo puntual del fenómeno de deforestación.



**Fotografía 1. Deforestación en frontera agrícola.
Autor: Rocío Martínez.**



**Fotografía 2. Vegetación secundaria encontrada en
sitios validados como Recuperación forestal.
Autor: Rocío Martínez**



Fotografía 3. Sitio de verificación correcto, validado como Permanencia de No Bosque. Autor: Rocío Martínez.



Fotografía 4. Sitio de verificación validado como Permanencia de Bosque, en la foto se observa que hubo un proceso de deforestación reciente, por lo tanto no pertenece al cambio 2010-2012. Autor: Rocío Martínez.

3.6 REFLEXIONES SOBRE EL CAPÍTULO

En general se puede decir que el método de validación de cambios de coberturas es relevante para el reporte de datos de deforestación, ya que, por un lado, se obtiene el porcentaje de confianza y su intervalo de error, datos importantes si se requiere reportar una tasa de deforestación y, por otro lado, se obtiene el número de hectáreas que se están sobre-estimando o sub-estimando para la clase deforestación. En este estudio de caso, la diferencia entre el total de hectáreas cartografiadas y el total de hectáreas que corresponden a la realidad es de 2,832.2 ha, este dato, que es identificado como un sesgo en la clase de cambio deforestación, es fundamental para el productor del mapa, ya que, la mejora del proceso de clasificación de una categoría sólo se sabrá si en la próxima validación este sesgo disminuye.

Con base en los resultados, también se infiere que este método sirve como marco de referencia para llevar a cabo el esquema Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) del programa REDD+, ya que, en primera instancia es aplicable a una localidad; en segunda instancia, permite identificar sitios de cambios de cobertura e identificar sitios de deforestación y recuperación forestal, por lo tanto, facilita el monitoreo de la cobertura forestal. Por otro lado, este método reporta la cantidad de cobertura que se pierde (deforestación) y que se recupera, por lo que, con los datos de dasimetría de los árboles y una metodología adecuados para la estimación de carbono, se puede deducir la cantidad de carbono que se pierde y almacena en periodos cortos de tiempo, por ejemplo cada año o dos años. Por último, la ventaja de aplicar esta metodología a una escala local y si se anexa la información de distribución ejidal para el municipio en donde se requiera aplicar esta metodología, se podrá identificar la población que tiene derecho al pago por servicios ambientales y por reservas de carbono.

En cuanto a la metodología de Centro-Geo para realizar los mapas, se concluye que el método de algoritmo utilizado para la clasificación de categorías bosque y no bosque es adecuado, sin embargo, puede mejorar. También se concluye que la metodología de Centro-Geo tiene dificultades para identificar procesos puntuales en las coberturas de bosque o no bosque, se recomienda que eleven la calidad de los insumos en cuanto a resolución espacial para que tengan un mejor reconocimiento y cartografía de las coberturas forestales.

Se determina que en general los sensores de capacidad 2 pueden ser utilizados para la validación de procesos de deforestación FAO. En futuros trabajos donde se aplique esta metodología, se recomienda que el proceso de validación visual mejore, por ejemplo, agregando más variables o un método de clasificación supervisada a las imágenes de referencia, por no contar con datos empíricos de otras validaciones visuales, el enriquecimiento del método en la validación visual se deja a criterio de la persona que pretenda aplicar esta metodología. También se recomienda que de tener acceso a sensores de capacidad 3 estos se utilicen para elevar la calidad de la confiabilidad de los datos. Es importante mencionar que la fecha de los insumos de referencia de preferencia debe de cumplir con la resolución temporal más alta, que permita tener datos los más cercanos a la fecha de inicio y de término de la validación.

En cuanto al muestreo, se determina que en un mapa de cambios de coberturas un índice global de confiabilidad no dice mucho sobre el comportamiento de las clases de cambio y de los errores, por lo que el análisis de índices de productor y de usuario son fundamentales, para esto, también es importante un muestreo estratificado por clase que proporciona la seguridad de que las clases raras son evaluadas con el mismo peso que las demás clases.

Se aconseja que esta metodología para la validación de mapas de cambio de cobertura forestal se acompañe de una visita a campo para poder entender el comportamiento de los errores en el mapa, lo que permite obtener un panorama general que ayuda a comprender la dinámica de la deforestación.

Por último, los datos obtenidos en este estudio de caso para el Municipio de Marqués de Comillas son datos estadísticamente válidos, por lo tanto, pueden ser parte de un acervo de datos de deforestación que sirvan para la estrategia MRV de REDD+.

CONCLUSIONES

La validación cartográfica es un método que permite confrontar los datos representados en un mapa con datos que se asemejen altamente a la realidad, con la finalidad de obtener un dato, reportado como índice de confiabilidad global (ICG), que informa tanto al usuario del mapa como al productor la correspondencia con la realidad de dicho mapa, por lo tanto, la validación cartográfica es un método que permite mejorar los procesos de representación cartográfica y los métodos de obtención y clasificación de datos. Además, una evaluación cartográfica proporciona credibilidad científica a los datos resultantes de un mapa.

En el estudio de escala nacional, la evaluación del mapa de uso de suelo y coberturas vegetales derivado del producto MDC12Q1 refleja tendencias de clasificar las coberturas vegetales como bosques perennes, estos datos deducidos a través de un estudio de confiabilidad cartográfica, refleja la importancia de llevar a cabo dicho estudio, pues, permiten al usuario saber a qué grado utilizar los datos que se derivan de un mapa y, por otro lado, permite a los productores del mapa detectar los errores, que se traduce en mejoras al producto cartográfico.

El estudio a escala municipal, es un ejemplo de la aplicabilidad de la evaluación cartográfica, ya que, fue utilizada para saber los aciertos y errores en un mapa de cambios de cobertura vegetal, pero, además, se utilizó para demostrar que con un estudio de confiabilidad se pueden evaluar estadísticamente procesos de cambio en las coberturas vegetales y que la evaluación de estos procesos de cambio, como la deforestación, forma parte del monitoreo de la cubierta terrestre, que se traduce a, por ejemplo, encaminar una localidad a un programa de pagos por servicios ambientales bajo el esquema REDD+, en donde contar con exactitud de cifras reportadas como pérdida de bosque o recuperación de bosque es importante para otorgar recursos económicos a las comunidades que cuidan de los bosques.

Otro punto a resaltar es que la validación de mapas es un método, que por lo menos en la cartografía oficial de la República Mexicana no se ha aplicado, por lo tanto, los datos obtenidos de mapas realizados por la SEMARNAT carecen de validez estadística. Se

concluye que un mapa que carezca de validez estadística es una hipótesis de la realidad no probada.

Con base en lo anterior, se propone unificar las metodologías para la creación de mapas en México, o por lo menos en las instituciones dedicadas a la cartografía, y que dentro de esa metodología se incluya la validación cartográfica como último paso en la realización de un mapa. Se invita a los productores del mapa y a las organizaciones de financiación a proporcionar datos estadísticos de precisión de los datos que cartografían.

Se destaca que es de suma importancia que el geógrafo este enterado de estos métodos de validación cartográfica y los aplique, dado que, la geografía es profesión fundamental en la producción cartográfica. Con esta tesis, se le proporciona al geógrafo las bases necesarias para poder aplicar una evaluación cartográfica, al menos, para los mapas de usos de suelo y cobertura vegetal.

Se recalca que contar con datos confiables de mapas de uso de suelo y cobertura vegetal, además de beneficiar al productor y usuario inmediato del mapa, permite, que las poblaciones beneficiadas directamente de algún tipo de cobertura vegetal, o que practiquen algún uso de suelo, puedan contar con un material que defienda su patrimonio, por ejemplo, contar con datos confiables de uso de suelo y vegetación puede ayudar a la defensa del territorio por parte de las comunidades que lo habitan, o a la creación de nuevos espacios de conservación.

A manera de que la presente investigación de tesis sea utilizada como guía para la validación cartográfica, se propone aplicar el marco teórico de Stehman (1998) para la validación de mapas que consta de las siguientes etapas: 1) diseño de muestreo, 2) diseño de verificación y 3) síntesis de la evaluación. Por lo tanto, los aspectos más importantes de cada etapa en una validación cartográfica que se identificaron con base en los resultados que se presentan, se sintetizan a continuación y se recalca que son aspectos de suma importancia, que de no ser tomados en cuenta durante una validación cartográfica, ésta puede carecer de validez estadística.

1) Diseño de muestreo: se debe de diseñar un muestreo probabilístico para que los datos tengan validez estadística. El muestreo debe de satisfacer los objetivos de la evaluación y

al mismo tiempo debe de minimizar costos. Esta etapa es importante ya que, forma la base de la evaluación. El muestro puede ser por estratos, por conglomerados o aleatorio y debe representar cada una de las clases a validar.

2) Diseño de verificación: la importancia de esta etapa radica en elegir las fuentes de referencia correctas para validar los sitios de referencia, es primordial que las fuentes de referencia contengan la resolución temporal, espacial y espectral correctas para validar los sitios de verificación; es una regla que los insumos de referencia sean más precisos que el mapa a validar. En esta etapa se recomienda la aplicación de un enfoque difuso para la evaluación de los sitios de referencia pues otorga peso a la validación y permite una mayor correspondencia con la realidad.

3) Síntesis de evaluación: en esta etapa, los datos obtenidos en la verificación se resumen y analizan en una matriz de error, lo que permite reportar los índices de confiabilidad global, índices de confiabilidad por clase y sus respectivos intervalos de confianza. Si la matriz de error no está expresada en proporción, no será posible estimar los para metros que otorgan la validez estadística al mapa.

Si lo que se requiere es llevar a cabo una validación de cambios en las coberturas forestales y específicamente, se requiere validar la deforestación; se puntualiza que antes de aplicar las tres etapas anteriormente descritas se tiene que definir el concepto de deforestación y el tipo de deforestación a validar, a partir de estas ideas se puede elegir el material de referencia más adecuada para la validación y continuar con las tres etapas de validación cartográfica.

Cuando se trata de validar deforestación, se propone que el concepto de la FAO se adopte como parte de una metodología estandarizada para detectar deforestación, ya que esto permitirá que gradualmente la incertidumbre en los datos de deforestación publicada por organismos internacionales y nacionales disminuya. Se agrega que, el hecho de estandarizar una metodología de evaluación cartográfica y aplicarla para la validación de deforestación, proporciona las bases para la adopción de un programa de monitoreo reporte y verificación para la cuantificación de emisiones de carbono y de aplicarse esta metodología a mediano plazo se puede formar parte de una estrategia a nivel mundial

para disminuir el calentamiento global a través de la reducción de gases efecto invernadero.

Por último, cada vez que se realice una validación cartográfica tanto de un mapa temático de uso de suelo y cobertura vegetales, como de un mapa de cambios de coberturas vegetales, este debe de reportarse con su matriz de error y con sus índices de confiabilidad que avalen estadísticamente la validación cartográfica.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía de referencias

Bocco, G. *et al.*, (2001) “La dinámica del cambio de uso de suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación” en *Investigaciones Geográficas*, núm. 44, pp. 18-38.

Büttner, G. *et al.*, (2006) “The CORINE Land Cover Project”. Artículo en línea.

CABAL (2010) Bosques, deforestación y monitoreo de carbono: Una valoración del potencial de REDD+ en mesoamerica. Brasil. Prisma.

Céspedes-Flores, S.E., *et al.*, (2010) “Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación en las entidades federativas de México” en *Investigación Ambiental* 2(2), pp. 5-13.

Chuvieco, S.E. (2002) *Teledetección ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio*, Ariel, España.

CONAFOR (2009) *Inventario Nacional Forestal y de Suelos, México 2004-2009*. México, SEMARNAT.

CONAFOR' (2009) *Restauración de sistemas forestales: guía básica para comunicadores*. México, SEMARNAT.

CONAFOR (2010) *Servicios Ambientales y cambio climático*. México, SEMARNAT.

CONAFOR (2010) *Visión de México sobre REDD+, hacia una estrategia nacional*. México, SEMARNAT.

CONAFOR (2012) *Bosques, cambio climático y REDD+ en México, Guía básica*. México, SEMARNAT.

Couturier (2007) *Evaluación de errores de cartas de cobertura vegetal y usos de suelo con enfoque difuso y con simulación de imágenes de satélite*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.

Couturier, S., *et al.*, (2009) “An accuracy index with positional and thematic fuzzy bounds for Land Use and Land Cover map” en *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 75, No. 7, 789-805.

Couturier, S., *et al.*, (2009) “¿Qué tan confiable es una tasa de deforestación? Cómo evaluar nuestros mapas con rigor estadístico” en *Investigación Ambiental*, Vol.1, Núm: 1, pp. 6-16.

Couturier, S., (2011) "Evaluación de la cobertura vegetal en México: Aciertos y sesgos del mapa derivado de MODIS" en Mas, J.F. (coord.) *Aplicaciones del Sensor MODIS para el monitoreo del Territorio*. México, INE-SEMARNAT.

Couturier, S. *et al.*, (2012) "Measuring Tropical Deforestation with Error Margins: A Method for REDD Monitoring in South-Eastern Mexico" en *Tropical Forests*. Cap 14, pp. 269 – 293.

Duran-Medina, E. *et al.*, (2010) "Cambios en las coberturas de vegetación y usos del suelo en regiones con manejo forestal comunitario y áreas naturales protegidas de México" en Bray, D. *et al.*, (edits) *Los Bosques Comunitarios de México*. México, INE-SEMARNAT.

FAO (2000) *Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂*. Artículo en línea.

FAO (2010) *Situación de los bosques del mundo*. FAO.

Fernández, T. (2006) *Estimación de la confiabilidad en mapas de uso de suelo y vegetación*. Tesis de licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, Geografía, UNAM.

Franco-Arcega, A., *et al.*, (2013) "Clasificadores basados en árboles de decisión para grandes conjuntos de datos" en *Computación y Sistemas*, Vol. 17 No.1, pp. 95-102.

García Mora, J.T., *et al.*, (2011) "Modland: los productos de superficie terrestre MODIS" en Mas, J.F. (coord.) *Aplicaciones del Sensor MODIS para el monitoreo del Territorio*. México, INE-SEMARNAT.

Gopal, S., *et al.*, (1994) "Theory and Methods for accuracy assessment of thematic maps using fuzzy sets" en *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60:181-188.

INEGI (2005) *Guía para la interpretación de cartografía, impresa y digital de uso de suelo y vegetación*. México.

INEGI (2009) *Guía para la interpretación de cartografía, uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000 Serie III*. México.

INEGI (2012) *Guía para la interpretación de cartografía, uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000 Serie IV*. México.

Kolb, M., (2013) *Dinámica del uso de suelo y cambio climático en la planeación sistémica para la conservación: un caso de estudio en la cuenca Grijalva-Usumancinta*. Tesis de doctorado. México, Universidad Nacional Autónoma de México – Université de Toulouse.

Lambin, E.F. *et al.*, (2001) "The causes of land-use and land cover change: moving beyond the myths" en *Global Environmental Change*. Número 11, pp. 261- 269.

Lambin, E.F. y Geist, H. (2006) *Land use and land cover change: local process and global impacts*. Berlin, SpringerVerlag.

Mas, J.F. et al., (2002) "Monitoreo de los cambios de cobertura en México" en *Memorias del II seminario latinoamericano de Geografía Física*, Maracaibo, Venezuela.

Mas, J.F. et al., (2003) "Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión" en *Investigaciones Geográficas*, Núm. 51, pp. 53-72.

Mas, J.F. et al., (2009) "La evaluación de los cambios de cobertura/Uso de suelo en la República Mexicana" en *Investigación Ambiental*, 1(1): 23-39.

Mas, J.F. et al (2011) "Evaluación de bases de datos cartográficas" en *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*

Núñez, J.M. (coord.) (2012) *Estrategia para la estimación de cubierta arbórea en la RUM, 107 comunidades en el Corredor Biológico Mesoamericano – México*. Centro-Geo.

Niño-Alcocer, M. et al (2013) Información de Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250,000, Serie V, Conjunto Nacional. Artículo en línea.

Plan de Desarrollo Municipal Marqués de Comillas 2011-2012.

Parker, C., et al., (2009) *The Little REDD+ Book*. UK, Global Canopy Foundation.

Sabogal, C. et al. (edits), (2008) *Manejo forestal comunitario en América Latina. Experiencias, lecciones aprendidas y retos para el futuro*. Indonesia, CIFOR.

Salitechv, K.A. (1979) *Cartografía*. La Habana. Pueblo y educación.

SEMARNAT (2004) *Documento estratégico rector del Inventario Nacional Forestal y de Suelos*. México, SEMARNAT.

SEMARNAT (2012) Inventario nacional forestal y de suelos, Informe 2004-2009. México.

Skole, D.L. (1994) "Data on global land cover change: acquisition, assessment and analysis" en Meyer, W.B. and Turner, B.L. (edits) *Changes in land use and land cover: a global perspective*, Cambridge University.

Soto-Pinto, L., et al., (2011) *El acahual mejorado, un prototipo agroforestal*. México, El Colegio de la Frontera Sur.

Stehman, S.V., et al., (1998) "Design and analysis for thematic map accuracy assessment: Fundamental principles" en *Remote Sensing of Environment*, 64: 331-344.

Stehman, S.V., et al., (2003) "Thematic accuracy of the 1992 National land cover data for the eastern United States: Statistical methodology and regional results" en *Remote Sensing of Environment*, 86: 500-516.

Strahler, H.A., *et al.*, (2006) *Global land cover validation: recommendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps*. Luxemburg: office for official publications of the European communities.

Velázquez, A. *et al.*, (2002) "Patrones y tasas de cambio de uso de suelo en México" en *Gaceta Ecológica*. Número 62, pp. 20-37.

Velázquez, A. *et al.*, (2002) "Estado actual y dinámica de los recursos forestales de México" en *Biodiversitas*. Num 41, pp. 8-15.

Velázquez, A. *et al.*, 2011. *Propuesta metodológica para normar la evaluación de la tasa de deforestación y degradación forestal en México*. WWF, CCMSS, TNC, Centro Geo y CIGA UNAM.

Victoria-Hernández, A., *et al.*, (2011) Generación de Información de uso de suelo y vegetación, proyectos y convenios escala 1:50,000. Artículo en línea.

Vitousek, P.M., *et al.*, (1997) "Human domination of Earth's Ecosystems" en *Science*, Vol. 277, num. 5325, pp. 494-499.

Villers Ruiz, L., *et al.*, (2004) "Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales" en SEMARNAT, *Cambio Climático: una visión desde México*, Santillana.

Wulder, M. A., *et al.*, (2007) "Validation of a large area land cover product using purpose-acquired airborne video" en *Remote Sensing of Environment*, 106: 480-491.

Bibliografía Consultada

Bray, D. *et al.*, (2007) *Los Bosques Comunitarios de México*. México, INE-SEMARNAT.

Canran, L. *et al.*, (2007) "Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy" en *Remote Sensing of Environment*, num. 107, pp.607-616.

Cochran, W.G. (1980) *Técnicas de muestreo*. México, Cecsca.

Congalton, R.G., (1991) "A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data" en *Remote Sensing of Environment*, num 37, pp. 35-40.

CONAFOR (2011) *Panorámica sobre REDD+ en México*. México, SEMARNAT.

Couturier, S. *et al.*, (2008) "Evaluación de confiabilidad del mapa del Inventario Forestal Nacional 2000: diseños de muestro y caracterización difusa del paisaje" en *Investigaciones Geográficas*, núm. 67, pp. 20-38.

Couturier, S., *et al.*, (2009) "An accuracy index with positional and thematic fuzzy bounds for Land Use and Land Cover map" en *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 75, No. 7, 789-805.

Couturier, S. (2010) "A fuzzy-based method for the regional validation of global maps: the case of MODIS derived phenological classes in a mega diverse zone" en *International Journal of Remote Sensing*, 31:22, 5797-5811.

Díaz-Gallegos, J.R. *et al.*, (2010) "Trends of tropical deforestation in southeast México" en *Singapore Journal of Tropical Geography*, 31: 181-196.

Foody, G.M. (1999) "The continuum of classification fuzziness in Thematic Mapping" en *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, (4): 443-451.

Foody, G.M. (2002) "Status of land cover classification accuracy assessment" en *Remote Sensing of Environment*, 80: 185-201.

García Mora, J.T. *et al.*, (2008) "Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso de suelo en el sureste de México" en *Investigaciones Geográficas*, num. 67, pp. 7-19.

Gómez Escobar, M.C. (2004) *Métodos y técnicas de cartografía temática*. México, Instituto de Geografía, UNAM.

Mass, S.F. y M.E. Valdez (2003) *Principios básicos de cartografía y cartografía automatizada*. México, Universidad Autónoma del Estado de México.

Mas, J.F. *et al.*, (2001) "Elaboración de una base de datos cartográfica sobre recursos forestales: El Inventario Forestal Nacional 2001 de México" en *Revista de Ciencias Forestales Quebracho*, núm. 9, pp. 151-156.

Mas, J.F. *et al.*, (2003) "Evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas" en *Investigaciones Geográficas*, Num. 51, pp. 73-87.

Mas, J.F., *et al.*, (2004) "Assessing land use cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico" en *Internacional Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*, 5: 249-264.

Mas, J.F. *et al.*, (2005) Change estimates by map comparison: A method to reduce erroneous changes due to positional error en *Transactions in GIS*, 9 (4): 619-629.

Olofsson, P. *et al.*, (2013) "Making Better Use of Accuracy Data in Land Change Studies: Estimating Accuracy and Area Quantifying Uncertainty Using Stratified Stimulation" en *Remote Sensing of Environment*, 129(15), pp. 122-131.

Palacio, J.L., *et al.*, (2000) "La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000" en *Investigaciones Geográficas*, 43: 183-203.

Robinson, A., *et al.* (1987) *Elementos de cartografía*. España, Ediciones Omega, S.A.

SEMARNAT (2010) Manual y procedimientos para el re-muestreo de campo: Inventario Nacional Forestal y de Suelos. México, SEMARNAT.

Stehman, S.V. (2001) "Statistical rigor and practical utility in thematic map accuracy assessment" en *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 67, No. 6, pp. 727-734.

Woodcock, C. *et al* (2000) "Fuzzy set theory and thematic maps: accuracy assessment and area estimation" en *International Journal of Geographical information Science*, 14(2): 153-172.

Dudas o comentarios: rocmargon@gmail.com