



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE BIOLOGÍA

*ESCENARIOS DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL SUELO EN EL
CORREDOR BIOLÓGICO MESOAMERICANO - MÉXICO*

TESIS

que presenta

DIANA LUCERO RAMÍREZ MEJÍA

como requisito para obtener el título profesional de

BIÓLOGA

Asesor de Tesis: Dr. Eduardo Mendoza Ramírez

Co-asesora de tesis: M. en G. Gabriela Cuevas García

Morelia, Michoacán, México

2011



FACULTAD
DE
BIOLOGÍA

Agradecimientos

Agradezco al programa UC MEXUS-CONACyT por la beca otorgada para la realización de este trabajo como parte del proyecto “Un enfoque integral para evaluar los impactos del cambio de uso de suelo y del clima sobre la Biodiversidad tropical de México” con clave de registro 284031.

Al Dr. Eduardo Mendoza, asesor de este trabajo, le expreso mi agradecimiento y reconocimiento por el apoyo brindado.

A la M. en G. Gabriela Cuevas, co-asesora del presente trabajo, por el gran apoyo en el entendimiento y manejo del programa Dinamica EGO, por sus atenciones y disposición de siempre.

A los integrantes de la comisión revisora: Dr. Alberto Gómez-Tagle Chávez, Dra. Ma. Luisa España Boquera y Dr. Tiberio Monterrubio Rico, por sus aportaciones constructivas al presente trabajo.

Al Dr. Miguel Martínez Ramos, jefe del laboratorio de Ecología de Poblaciones y Comunidades Tropicales del Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM campus Morelia, por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Jean François Mas, del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM campus Morelia, por su gran ayuda y asesoría en el uso del programa Dinamica EGO.

Al Dr. Alejandro Flamenco, por sus valiosos comentarios y la información proporcionada.

ÍNDICE

Resumen	1
1. Introducción	2
2. Antecedentes	4
2.1 La deforestación tropical.....	4
2.2 Factores que promueven la deforestación tropical	5
2.3 Impactos negativos de la deforestación tropical	7
2.4 La deforestación en México	8
2.5 Modelado del cambio de cobertura y uso del suelo	9
3. Objetivos	12
4. Área de estudio	13
4.1 Corredor Biológico El Triunfo-Montes Azules	15
4.1.1 Localización y características fisiográficas.....	15
4.1.2 Hidrología y Clima	16
4.1.3 Suelos	16
4.1.4 Vegetación y Fauna	17
4.1.5 Aspectos socioeconómicos y culturales	18
4.2 Corredor Biológico Calakmul-Sian Ka'an	20
4.2.1 Localización y características fisiográficas.....	20
4.2.2 Suelos	21
4.2.3 Vegetación y Fauna	22
4.2.4 Aspectos socioeconómicos y culturales	23
5. Materiales y métodos	25
5.1 Bases de datos cartográficos	25
5.2 Clasificación de cobertura y uso del suelo	26

5.3 Estimación de las tasas de cambio	27
5.4 Procesamiento de datos para la construcción del modelo	27
5.5 Modelación del cambio de cobertura y uso del suelo utilizando el programa	
Dinamica EGO	29
5.5.1 Estructura del modelo	29
5.5.2 Calibración del modelo	30
5.5.2.1 Cálculo de las matrices de transición	30
5.5.2.2 Cálculo de los pesos de evidencia	31
5.5.2.3 Análisis de correlación entre las variables	35
5.5.3 Simulación	36
5.5.4 Validación	37
5.5.5 Proyección de escenarios	39
6. Resultados	41
6.1 Tasas de cambio en la cobertura y uso de suelo en el CBT-M	41
6.2 Tasas de cambio en la cobertura y uso de suelo en el CBC-S	45
6.3 Escenarios de cambio en la cobertura y uso del suelo en el CBT-M	48
6.3.1 Variables con mayor peso para explicar las transiciones entre las diferentes	
categorías de cobertura y uso del suelo	48
6.3.2 Desempeño del modelo de cambio de cobertura y uso del suelo para el CBT-M. ...	56
6.3.3 Proyección de escenarios de CCUS	58
6.3.4 Magnitud de los cambios de cobertura y uso de suelo bajo los tres escenarios	
proyectados	60
6.4 Escenarios de cambio en la cobertura y uso del suelo en el CBC-S	61
6.4.1 Variables con mayor peso para explicar las transiciones entre las diferentes	
categorías de cobertura y uso del suelo	61
6.4.2 Desempeño del modelo de cambio de cobertura y uso del suelo para el CBC-S.	68

6.4.3 Proyección de escenarios de CCUS	69
7. Discusión	73
8. Conclusión	81
Literatura citada	82
Anexos	90
Anexo 1	90
Anexo 2	91
Anexo 3	92
Anexo 4	96

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Principales factores que impulsan la deforestación tropical	6
--	----------

Figura 2. Localización de las secciones del CBM-Mx en los que este estudio se enfoca y principales áreas naturales protegidas que conecta	14
Figura 3. Diagrama de flujo del modelo elaborado para el cálculo de intervalos de los pesos de evidencia	32
Figura 4. Diagrama de flujo del modelo elaborado para el cálculo de los pesos de evidencia utilizados para calcular las probabilidades de transición	34
Figura 5. Ejemplo de los pesos de evidencia graficados	34
Figura 6. Prueba de similitud difusa	38
Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de modelación de cambio de cobertura y uso del suelo empleado en este trabajo	40
Figura 8. Cambios en la superficie de las diferentes categorías de cobertura y uso del suelo en el CBT -M para los años 1993, 2002 y 2007	41
Figura 9. Tasas de cambio en el CBT-M para los períodos 1993-2002 y 2002-2007.....	42
Figura 10. Secuencia de mapas que muestran los cambios en la cobertura y uso del suelo en CBT-M de 1993 al 2007	44
Figura 11. Cambios en la superficie de las diferentes categorías de cobertura y uso del suelo en el CBC -S para los años 1993, 2002 y 2007	45
Figura 12. Tasas de cambio en el CBC-S para los períodos 1993-2002 y 2002-2007.....	46
Figura 13. Secuencia de mapas que muestran los cambios en la cobertura y uso del suelo en el CBC-S de 1993 al 2007	47
Figura 14. Principales transiciones entre categorías de cobertura y uso del suelo identificadas durante el período de calibración 1993-2002	48
Figura 15. Pesos de evidencia calculados para la transición de selvas a selvas secundarias ..	50
Figura 16. Pesos de evidencia calculados para la transición de selvas a agrícola-pecuaria-forestal	51
Figura 17. Graficas de los pesos de evidencia calculados para la transición de agrícola-pecuario-forestal a selva secundaria	53
Figura 18. Mapas de la probabilidad de cambio para las seis transiciones identificadas en el CBT-M.....	54
Figura 19. Porcentaje de los CCUS que se dieron por expansión o creación de nuevos parches en el CBT-M	55
Figura 20. Índice de similitud entre el mapa simulado y el mapa real en función del tamaño de la ventana utilizado para hacer la comparación	56

Figura 21. Mapa de cobertura y uso de suelo observado (2007) y simulado correspondientes al CBT-M	57
Figura 22. Mapas de los escenarios agropecuario, tendencial y de conservación para 2030...	59
Figura 23. Superficie de cada categoría de cobertura y uso del suelo en 2007 y proyectada para los tres escenarios del 2030	60
Figura 24. Principales transiciones entre categorías de cobertura y uso del suelo identificadas durante el período de calibración 1993-2002	61
Figura 25. Graficas de los pesos de evidencia calculados para la transición de selvas a selvas secundarias	63
Figura 26. Pesos de evidencia calculados para la transición de selvas secundarias a agrícola-pecuaria-forestal	64
Figura 27. Mapas de probabilidades de cambio para las cuatro transiciones identificadas en el CBC-S	65
Figura 28. Pesos de evidencia calculados para la transición de selvas secundarias a selvas ..	66
Figura 29. Porcentaje de los cambios por expansión o creación de nuevos parches	67
Figura 30. Índice de similitud entre el mapa simulado y el mapa real en función del tamaño de la ventana utilizado para hacer la comparación	68
Figura 31. Mapa de cobertura y uso de suelo observado (2007) y simulado correspondientes al CBC-S	70
Figura 32. Mapas y acercamientos de los escenarios tendencial y de conservación para 2030	71
Figura 33. Superficie de cada categoría de cobertura y uso del suelo observada en 2007 y estimada por los dos escenarios para el año 2030	72
Tabla 1. Áreas naturales protegidas y áreas focales presentes en el CBT-M	15
Tabla 2. Características hidrológicas, clima y precipitación en las dos secciones del CBM-Mx que se evalúan en este estudio	17
Tabla 3. Área natural protegida y áreas focales presentes en la región de Campeche del CBC-S	20
Tabla 4. Áreas naturales protegidas y áreas focales presentes en la región de Quintana Roo del CBC-S	21
Tabla 5. Categorías utilizadas en la leyenda de los mapas de cobertura y uso del suelo utilizadas para este estudio	26

Tabla 6. Características de las fuentes cartográficas utilizadas en el modelado de cambio de cobertura y uso de suelo	28
Tabla 7. Variables seleccionadas para cada transición entre categorías de cobertura y uso del suelo	49
Tabla 8. Variables seleccionadas para cada transición entre categorías de cobertura y uso del suelo	62

RESUMEN

El Corredor Biológico Mesoamericano se extiende a través de toda Centroamérica hasta el sur de México y constituye una de las iniciativas más ambiciosas de conservación en el mundo. Dentro de sus límites incluye una proporción muy importante de la biodiversidad de México. Sin embargo, como resultado de la falta de políticas de ordenamiento claramente definidas y enfocadas a promover el desarrollo local planificado, el sureste de México se caracteriza por tener un claro rezago social y un fuerte impacto sobre sus ecosistemas naturales. Esta situación hace fundamental el contar con enfoques que permitan estimar de manera realista el impacto que distintas estrategias de desarrollo y conservación pueden tener sobre la biodiversidad existente en la región. Tomando como base la cartografía de vegetación y uso de suelo de INEGI (Serie II-1993, Serie III-2002 y Serie IV-2007) se elaboró un modelo de cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS) en donde se evaluó el peso que un conjunto de variables (i.e., distancia a carreteras, ríos y poblados, elevación, pendiente y presencia de áreas naturales protegidas) han tenido para determinar los patrones de deforestación en el Corredor Biológico Mesoamericano en su porción México (CBM-Mx). El modelo fue calibrado para el período 1993-2002, y se generó un mapa de CCUS simulado para el año 2007 que fue comparado con el mapa de INEGI Serie IV del mismo año. Posteriormente se modelaron los CCUS para el año 2030 bajo tres escenarios de deforestación: 1) tendencial, que asume que las tasas de deforestación observadas durante el período 2002-2007 se mantienen constantes; 2) de conservación, el cual supone una disminución de las tasas de deforestación y un aumento en la efectividad de las áreas naturales protegidas, y 3) agropecuario, que asume que las tasas de deforestación aumentan. Se encontró que la cercanía a poblados y carreteras son factores importantes que determinan la probabilidad de deforestación en el CBM-Mx. En contraste la presencia de áreas naturales protegidas reduce la probabilidad de deforestación. Los resultados de los escenarios muestran que de seguir las tendencias actuales estaría en riesgo de perderse 409 600 ha de selvas y 112 700 ha de bosques templados en el CBM-Mx. Este impacto se reduce marcadamente si las tasas de deforestación se abaten y se aumenta la efectividad de la reservas, tal como lo asume el escenario de conservación. El enfoque metodológico empleado en este trabajo constituye una herramienta muy útil para evaluar el impacto potencial que distintas políticas de desarrollo rural y conservación local y regional pueden tener en términos de su impacto sobre los ecosistemas naturales.

1. INTRODUCCIÓN

La deforestación y degradación forestal son dos de las principales amenazas para la biodiversidad. Además de sus efectos directos, estas fuentes de perturbación contribuyen al cambio climático global y provocan la degradación del suelo y la modificación de los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos (Turner y Meyer 1994; Lambin *et al.*, 2001). El impacto del cambio de la cobertura y uso del suelo es particularmente alarmante en los ecosistemas tropicales por ser éstos el principal repositorio de biodiversidad en el mundo. En décadas recientes la extensión de los bosques tropicales ha disminuido de forma drástica. Durante la década de los 80 se perdieron alrededor de 15.4 millones de hectáreas de bosques tropicales a nivel mundial y de 1990 a 2000 la pérdida total fue de 9.3 millones. México no escapa a este fenómeno como lo indica el hecho que anualmente se pierden entre 545 000 y 631 000 hectáreas de bosques y selvas (FAO 2002; Mas *et al.*, 2004). Como consecuencia, se estima que para el año 2002 sólo quedaba 17.5% y 26% del área de selvas húmedas y secas, respectivamente, que originalmente existían el país (Challenger *et al.*; 2009).

En virtud de la magnitud y acelerada dinámica, resulta primordial monitorear y cuantificar de manera precisa los cambios en la cobertura y uso del suelo (CCUS), particularmente en regiones que combinan gran biodiversidad y amenaza. Igualmente importante es la capacidad de contar con métodos que permitan analizar la combinación de condiciones y factores que impulsan los CCUS y hacer prospección sobre sus impactos futuros. Este estudio se centra en elaborar un modelo de cambio de cobertura y uso del suelo que permita: 1) evaluar el papel que un conjunto de variables tiene sobre los patrones de deforestación en la porción mexicana del Corredor Biológico Mesoamericano (CBM-Mx) y 2) generar escenarios futuros de las posibles trayectorias de CCUS en esta región bajo distintas condiciones de manejo y conservación.

El CBM-Mx representa >50% de la superficie total del Corredor Biológico Mesoamericano y alberga una porción mayoritaria del área remanente de algunos de los ecosistemas más diversos de México como son los bosques tropicales húmedos y el bosque mesófilo. Sin embargo, la carencia de planes de desarrollo enfocados a elevar el nivel de bienestar local considerando el impacto sobre el entorno natural ha provocado una extensa deforestación y fragmentación de bosques y selvas en la región del CBM-Mx en las décadas

recientes (Díaz-Gallegos *et al.*; 2009). La gran concentración de biodiversidad existente en el CBM-Mx y su fuerte grado de amenaza, a consecuencia de las actividades humanas, hacen que esta región forme parte de la lista de “*hotspots*” de la biodiversidad mundial (Myers *et al.*; 2000). Por tal motivo, resulta de gran importancia evaluar la magnitud, dinámica y distribución de los CCUS en la región del CBM-Mx así como evaluar su posible dinámica futura. Este tipo de información es fundamental para guiar la toma de decisiones por parte de los actores locales y las instancias de gobierno para establecer estrategias de manejo y conservación de los recursos naturales que en esta región existen.

2. ANTECEDENTES

Los bosques tropicales son los ecosistemas terrestres con la mayor diversidad biológica de la tierra (Myers, 1984). Aunque ocupan sólo el 7% de la superficie terrestre, se estima que albergan más del 60% de las especies que habitan el planeta (Myers, 1989; Mittermeier y Goettsch, 1992). Los bosques tropicales juegan un papel muy importante en la regulación del clima, la mitigación de sequías e inundaciones, el control de la erosión del suelo y el almacenamiento de carbono y otros precursores de gases de efecto invernadero. Asimismo, son centros importantes de producción primaria neta y constituyen elementos fundamentales en la regulación de los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos (Myers, 1993; Masera *et al.*, 1997; Cairns *et al.*, 2000).

Por otra parte, los bosques tropicales proporcionan bienes y servicios ambientales que contribuyen a la economía mundial (Farber *et al.*, 2002). Entre los bienes que proporcionan estos ecosistemas se encuentran: resinas, látex, fibras naturales, leña, colorantes, madera para la elaboración de muebles y la construcción, sustancias químicas que constituyen la base de productos farmacéuticos y el control biológico de plagas (Balick, 1990; Laurence, 1999). De igual forma, los ecosistemas tropicales son la principal fuente de sustento de una gran cantidad de pueblos indígenas con distintas tradiciones sociales y culturales (Alcorn, 1993).

2.1 La deforestación tropical

Los estudios sobre los procesos de cambio en la cobertura y uso del suelo son de particular relevancia para entender y conocer las tendencias de la deforestación, degradación forestal y pérdida de biodiversidad. La mayor parte de los cambios ocurridos en ecosistemas terrestres se deben a: 1) la conversión en la cobertura del terreno, 2) degradación del terreno e 3) intensificación en el uso del terreno (Lambin, 1997; Lambin *et al.*, 2001). Estos procesos, usualmente englobados en lo que se conoce como deforestación o degradación forestal producen impactos ecológicos importantes en prácticamente todas las escalas en las que se mida. El cambio de cobertura y uso de suelo es particularmente intenso en las regiones tropicales, en donde está teniendo, además de sus efectos ambientales, serias repercusiones en los ámbitos económico y social (Achard *et al.*, 1998; Kaimowitz y Angelsen, 1998).

La destrucción de los bosques tropicales a nivel mundial es alarmante. Por ejemplo, en la década de los 80, alrededor de 15.4 millones de hectáreas de estos ecosistemas desaparecieron (FAO, 1992), mientras que en el período de 1990 a 2000 la pérdida total de bosques tropicales fue de 9.3 millones. De esta manera, se calcula que se han perdido alrededor de 80% de los bosques tropicales de África, 70% de los de Asia, y 53% de los de Latinoamérica (Achard *et al.*, 2002). En particular los bosques tropicales de Centro y Sudamérica han perdido un 32% de su superficie (FAO, 2007). Aunado a los efectos drásticos de la deforestación, existen perturbaciones menos intensas que provocan cambios en la estructura y composición de la cobertura forestal (i.e., degradación forestal). Si bien este tipo de perturbaciones tienen un impacto relativamente menor sobre la estructura de los bosques tropicales, evidencia reciente indica que puede afectar su capacidad de albergar especies distintivas (Gibson *et al.*, 2011). En las zonas tropicales, la degradación de los ecosistemas representa un problema importante, especialmente cuando la extracción forestal involucra el uso de maquinaria. Se ha reportado que alrededor de 10 millones de hectáreas de bosque tropical en el mundo son perturbadas cada año por la explotación selectiva de árboles maderables y la extracción de leña y productos no forestales (Pearce *et al.*, 2003).

2.2 Factores que promueven la deforestación tropical

Se han reconocido dos niveles jerárquicos de los principales agentes causales ligados directa e indirectamente a la deforestación en los trópicos, estos son las fuerzas impulsoras subyacentes “*underlying driving forces*” y las causas próximas “*proximate causes*” (Geist y Lambin, 2001). Dentro de este marco conceptual, las causas próximas se refieren a todas las actividades humanas y las acciones que resultan directamente en una transformación de la cobertura y uso del suelo, e incluyen actividades tales como la expansión agrícola, la extracción de madera y la expansión de infraestructura (Figura 1). Por otra parte las fuerzas impulsoras subyacentes involucran procesos sociales fundamentales que dan lugar a las causas próximas que afectan el cambio de cobertura y uso del suelo, e incluyen factores económicos, demográficos, tecnológicos, políticos, y culturales. Existe también otro grupo de factores que afectan el impacto de las causas próximas. Los más comunes de estos factores son los relacionados con las características del terreno tales como la topografía, el tipo de suelo y la pendiente o fenómenos naturales como sequías, inundaciones, incendios forestales o plagas (Figura 1).

Investigaciones recientes muestran que las fuerzas subyacentes y las causas próximas del CCUS pueden variar según el contexto geográfico e histórico de cada región (Lambin *et al.*, 2001; Geist y Lambin, 2002). De esta manera, es difícil identificar factores causales únicos (como el crecimiento poblacional, la pobreza o la expansión agropecuaria) que permitan entender en su totalidad la dinámica de cambio de cobertura del suelo (Angelsen y Kaimowitz, 1999; Lambin *et al.*, 2001).

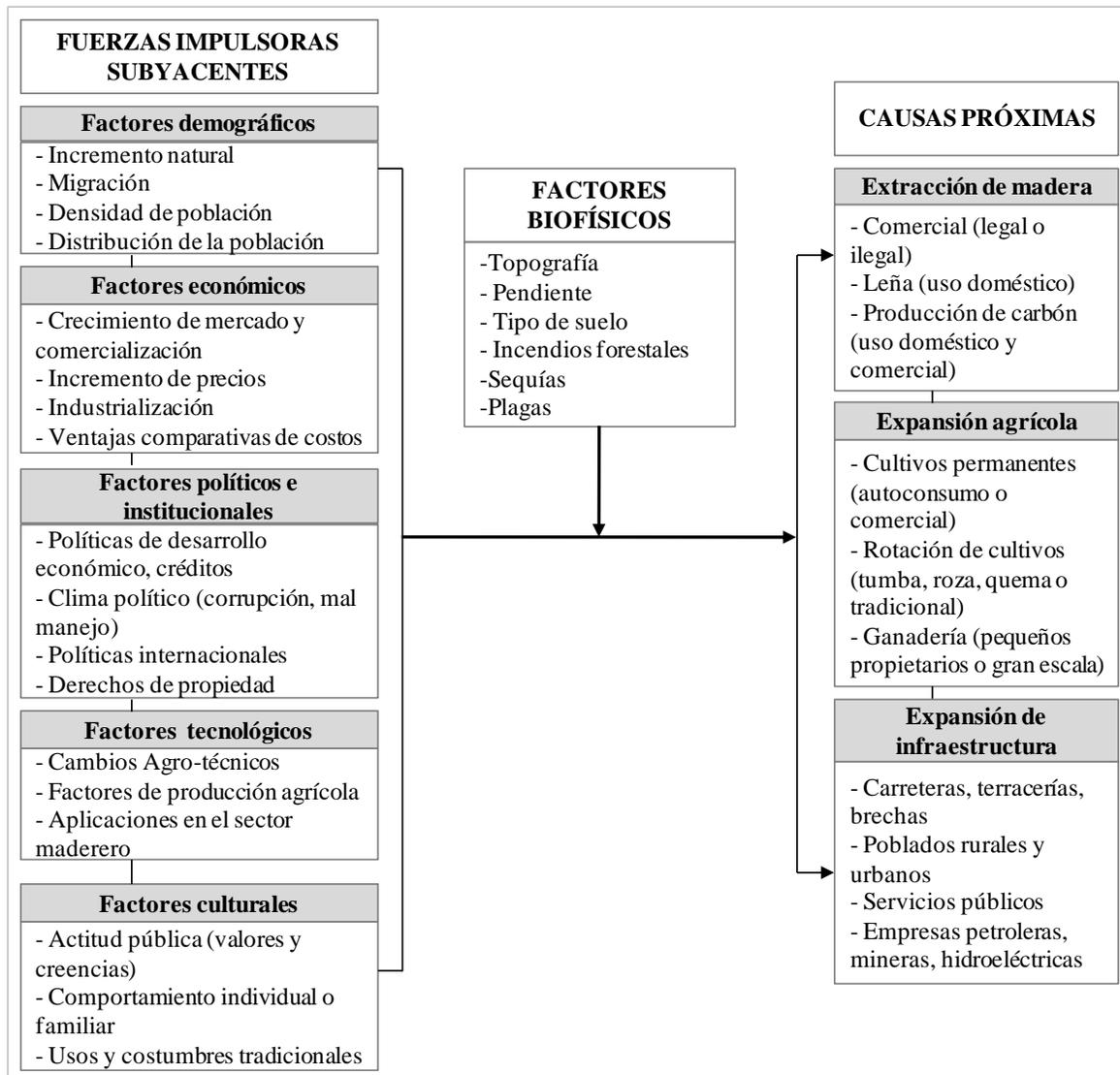


Figura 1. Principales factores que impulsan la deforestación tropical. Modificado de Geist y Lambin (2002).

Al contrario, son las variantes condiciones socioeconómicas, mediadas por factores institucionales, y el particular entorno biofísico en que éstas se producen lo que conduce a patrones particulares de CCUS. Las oportunidades y limitaciones para nuevos usos de la tierra

son creadas por la dinámica de los mercados y las políticas implementadas por instituciones gubernamentales, determinadas por factores globales, nacionales, regionales y locales (Hecht, 1985; Angelsen y Kaimowitz, 1999; Lambin *et al.*, 2001).

2.3 Impactos negativos de la deforestación tropical

El acelerado cambio de cobertura y uso del suelo de los bosques tropicales ocasiona la pérdida y perturbación del hábitat. Se estima que aproximadamente el 80% de la cobertura forestal remanente a nivel mundial se encuentra con algún grado de fragmentación, y el 70% presenta serias alteraciones en atributos tales como su estructura y composición de especies (Achard *et al.*, 1998; FAO, 2007).

La pérdida de biodiversidad, que puede involucrar desde la desaparición de poblaciones hasta el colapso de ecosistemas enteros, es una de las consecuencias más severas de la deforestación tropical ya que su efecto es muchas veces irreversible. Un indicador del impacto que la deforestación tropical puede tener es el hecho que 20 de los 34 denominados “*hotspots*” de la biodiversidad mundial (sitios que combinan una concentración inusual de especies y endemismos pero que a su vez están fuertemente amenazados por la actividades humanas) se localizan en los trópicos (Myers, 2000; Brooks *et al.*, 2002). Se estima que de mantenerse las tendencias de deforestación observadas durante las últimas décadas, podría perderse el 40% de las especies asociadas a estos 20 “*hotspots*” (Pimm y Raven, 2000). Asimismo, se estima que a nivel mundial existen aproximadamente 20 mil especies de árboles en peligro de extinción, la mayoría de las cuales son tropicales, debido principalmente a la destrucción y pérdida de su hábitat (IUCN, 2006; FAO, 2007). Las consecuencias de la deforestación van incluso más allá de la pérdida de poblaciones y especies, ya que también podrían perderse procesos ecológicos de gran importancia tales como la polinización y dispersión de semillas. Casi todas las plantas con flores que albergan los bosques tropicales son polinizadas por animales, por lo que un declive en los polinizadores que habitan en estos ecosistemas podría impedir la reproducción de las plantas no sólo en los bosques tropicales, sino también en las áreas agrícolas circundantes (Sodhi *et al.*, 2007).

Por otra parte, los bosques tropicales almacenan aproximadamente 400 mil millones de toneladas de carbono en forma de biomasa (Houghton *et al.*, 1983; Stickler *et al.*, 2009). En

consecuencia, entre 90 y 160 toneladas de carbono pueden ser liberadas por cada hectárea deforestada, lo cual puede tener un impacto muy fuerte en términos de aumentar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (FAO, 2007). La pérdida de la cobertura forestal está además incrementando la cantidad de luz solar reflejada (albedo) a nivel regional, fenómeno que tiene el potencial para alterar los patrones de precipitación y los regímenes de captación de agua de las cuencas hidrológicas (Coe *et al.*, 2009). En el caso de la cuenca del Amazonas la mitad de todas las lluvias se origina de la evapotranspiración de la vegetación local por lo que la pérdida de bosques a gran escala podría reducir la precipitación en la cuenca en un 20%, provocando una disminución de la humedad en el suelo, el aumento de las temperaturas de la superficie, estaciones secas más severas e incendios más frecuentes (Nepstad *et al.*, 1999). El efecto negativo sobre la biodiversidad de los cambios en la cobertura forestal puede entonces exacerbarse debido a los impactos asociados con el cambio climático.

Las selvas y bosques juegan un papel fundamental en la dinámica de los suelos, protegiéndolos de la erosión. Los ciclos biogeoquímicos globales también resultan severamente afectados al modificarse la composición de los microorganismos que habitan en el suelo y que ayudan a transformar la biomasa muerta en los nutrientes necesarios para las plantas (Leemas y Zuidema, 1995). Alteraciones en la composición y calidad del suelo y un aumento en la erosión podrían tener repercusiones en la productividad de las tierras (Houghton, 1994; FAO, 2002).

2.4 La deforestación en México

México es un país megadiverso pero afectado por un acelerado proceso de deterioro y pérdida de sus recursos forestales. La disminución de la cobertura forestal en México es preocupante. Un análisis de la cartografía existente a nivel nacional reporta una tasa de pérdida global de la cubierta forestal de 0.43 %/año (545,000 hectáreas) durante el período de 1976 al 2000 (Velázquez *et al.*, 2002). Asimismo, se estima que durante este mismo período hubo una pérdida total de más de 6 millones de hectáreas de bosques tropicales y que otros 5 millones de hectáreas de selvas primarias se degradaron a selvas secundarias (Velázquez *et al.*, 2002). Estimaciones de las tendencias futuras de deforestación en México indican que para el año 2020 los cultivos y pastizales incrementarán su extensión a expensas de áreas originalmente cubiertas por bosques y selvas (Mas *et al.*, 2004). Actualmente, la extensión de bosque *per*

capita en México es de solamente 0.5 ha y se proyecta que se va a reducir a 0.3 ha para el año 2025, mientras que de acuerdo con estándares internacionales se esperaría que fuera de aproximadamente 0.7 ha por individuo (Velázquez *et al.*, 2000; Mas *et al.*, 2004).

El sureste de México alberga la mayor extensión de remanentes de selvas perennifolias y subperennifolias, caducifolias y subcaducifolias del país así como una gran diversidad de flora y fauna sin embargo, enfrenta una severa crisis ambiental como consecuencia de la deforestación (Masera *et al.*, 1999; Díaz-Gallegos *et al.*, 2008). La conversión de selvas a pastizales inducidos y cultivados, y en menor grado a agricultura, ha afectado grandemente la región siendo las zonas más afectadas Quintana Roo, el norte y los altos de Chiapas y Yucatán (Díaz-Gallegos *et al.*, 2009). Se calcula que la pérdida total de la cubierta forestal en el sureste de México fue de 4.8 millones de hectáreas durante el período de 1978 a 2000. Los tipos de vegetación con las mayores tasas de deforestación son las selvas caducifolias y subcaducifolias (-1.6%/año), las selvas perennifolias y subperennifolias (-1%/año) y el bosque mesófilo de montaña (-0.8%/año); al contrario, los pastizales inducidos y cultivados así como las áreas agrícolas han tenido un incremento en su superficie del 32% y 39%, respectivamente (Díaz-Gallegos *et al.*, 2009).

2.5 Modelado del cambio de cobertura y uso del suelo

Los estudios sobre el cambio en la cobertura y uso del suelo proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación e indirectamente la pérdida de biodiversidad. Para llevar a cabo este tipo de análisis es necesario integrar datos espaciales biofísicos y socioeconómicos. La percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas poderosas que facilitan hacer análisis espaciales, ya que combinan la capacidad de detectar, cartografía y monitorear CCUS, relacionar estos cambios con bases de datos cartográficas y aplicar herramientas para el análisis estadístico a diferentes escalas espaciales y temporales (Apan y Peterson, 1998; Turner *et al.*, 2001).

En términos generales, se distinguen tres tipos principales de estudios de CCUS: los descriptivos, los explicativos y los predictivos (Briassoulis, 2000). Los estudios descriptivos tienen como objetivo principal caracterizar y cuantificar los CCUS. A pesar de su naturaleza descriptiva, estos estudios son indispensables ya que proporcionan generalmente la base para

realizar análisis espaciales de cambio más refinados. Por otra parte, los estudios explicativos buscan comprender los mecanismos mediante los cuales se presentan los CCUS y determinar las fuerzas y factores que los impulsan. Finalmente, están los estudios predictivos que permiten tener aproximaciones de los cambios futuros en la cobertura y uso del suelo que se esperaría observar bajo ciertas condiciones. Las predicciones que se realizan con estos modelos pueden ser condicionales o no-condicionales. Las predicciones no-condicionales, también llamadas extrapolaciones tendenciales, generan escenarios futuros de uso de suelo bajo el supuesto de que las tendencias presentes de CCUS se mantienen en el futuro. En contraste, las predicciones condicionales permiten generar escenarios alternativos de cambio futuro en la cobertura y uso del suelo bajo condiciones hipotéticas. Los escenarios que se obtienen a partir de modelos que utilizan predicciones condicionales son frecuentemente utilizados en el contexto del desarrollo e implementación de políticas relacionados con el uso y manejo de los recursos naturales (Briassoulis, 2000).

El poder contar con estimaciones sobre la magnitud del cambio futuro en la extensión cubierta por los distintos tipos de uso del suelo y cobertura vegetal, en un área dada, es una información sumamente útil. Los modelos de cambio de cobertura y uso del suelo permiten 1) evaluar la importancia de distintos factores biofísicos y socioeconómicos asociados al cambio y describir sus efectos cuantitativamente (Lambin, 1997; Angelsen, 1999), 2) evaluar las implicaciones ecológicas de distintas estrategias de manejo (Soares-Filho *et al.*, 2002), y 3) la elaboración de escenarios alternativos de CCUS (Soares-Filho *et al.*, 2006; Cuevas y Mas, 2008). Sin embargo, la obtención de esta información adquiere una mayor relevancia e interés práctico cuando es espacialmente explícita (Geoghegan *et al.*, 2001; Chowdhury, 2006). Los modelos de simulación de CCUS espacialmente explícitos se caracterizan por describir la magnitud y distribución de los CCUS al mismo tiempo que los ubican en el espacio. Estos modelos permiten, a su vez, la integración de distintas escalas temporales y espaciales para representar la dinámica de los patrones de cambio del paisaje (Sklar y Costanza, 1990). Asimismo, el desarrollo de modelos de deforestación espacialmente explícitos contribuye a entender mejor como ciertas variables interactúan y controlan la deforestación (Geoghegan *et al.*, 2001; Veldkamp y Lambin, 2001). De esta forma, los modelos de simulación espacialmente explícitos pueden ser utilizados para probar hipótesis específicas sobre los

cambios en la configuración espacial del paisaje bajo distintos escenarios de deforestación (Geist y Lambin, 2002; Soares-Filho *et al.*, 2002).

Entre las herramientas disponibles para la elaboración de modelos de simulación de CCUS espacialmente explícitos esta el programa Dinamica EGO (Soares-Filho *et al.*, 2002), desarrollado en el Centro de Sensoramiento Remoto de la Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil. Dinamica EGO es un programa especializado en la simulación de cambios en la cobertura del suelo que ha sido aplicado a una gran variedad de estudios ambientales tales como el modelado de la deforestación en la región del Amazonas (Soares-Filho *et al.*, 2006), la dinámica del crecimiento urbano (Almeida *et al.*, 2003; Godoy y Soares-Filho, 2008), el cambio de cobertura y uso del suelo en la Mata Atlántica (Texeira *et al.*, 2009) y en regiones del bosque tropical seco de México (Cuevas y Mas, 2008), el efecto de la tala en la Amazonía (Merry *et al.*, 2009) y el riesgo de incendios en bosques (Silvestrini *et al.*, 2011).

Dinamica EGO es un modelo de simulación que emplea un autómata celular. La aplicación de los autómatas celulares a los análisis que incorporan fenómenos biofísicos y socio-económicos constituye una aproximación muy atractiva, ya que ofrecen una plataforma flexible y dinámica para representar una gran variedad de interacciones entre los diversos componentes de los sistemas espaciales y el desarrollo de patrones complejos a través de reglas simples (White y Engelen, 1994). En el caso de la modelación de CCUS en Dinamica EGO, la aplicación del autómata celular permite definir la forma y tamaño de los parches de los distintos tipos de cobertura y uso del suelo que se forman conforme se da la expansión y contracción de los elementos del paisaje estudiado. Algunas de las ventajas adicionales que presenta el programa Dinamica EGO en contraste con otros enfoques para el modelado del cambio de cobertura y uso de suelo tales como CLUE-S o GEOMOD y *Land Change Modeler* del programa IDRISI, es que Dinamica EGO es una una plataforma muy flexible para el desarrollo de una gran variedad de modelos espacio-temporales. La aplicación de modelos de simulación espacialmente explícitos para analizar posibles escenarios de CCUS en el sureste de México ha sido poco explorada, no obstante que la presentación de diferentes escenarios a las autoridades y encargados de las tomas de decisiones puede ser un instrumento muy útil para guiar e impulsar la implementación de políticas de desarrollo rural y conservación local en esta región sumamente biodiversa y amenazada.

3. OBJETIVOS

Objetivo general

- Elaborar un modelo de cambio de cobertura y uso de suelo espacialmente explícito para la región del Corredor Biológico Mesoamericano-México (CBM-Mx) que permita caracterizar la dinámica reciente de cambio del paisaje y generar escenarios futuros de CCUS bajo condiciones de manejo y conservación alternativas.

Objetivos particulares

1. Caracterizar cuantitativamente la dinámica de CCUS en el Corredor Biológico Mesoamericano-México.
2. Identificar la influencia que los siguientes factores: 1) elevación y pendiente del terreno, 2) presencia de áreas naturales protegidas, 3) distancia a carreteras, terracerías, brechas, ríos principales y poblados, y 4) tipo de suelo tienen sobre los patrones de deforestación.
3. Elaborar escenarios alternativos de CCUS asumiendo que: a) la dinámica de cambio de cobertura y uso de suelo reciente se mantiene en el futuro, b) las tasas de deforestación disminuyen y la efectividad de las áreas naturales protegidas para detener la deforestación aumenta y c) las tasas de deforestación aumentan como consecuencia de una intensificación en las prácticas agrícolas y ganaderas extensivas.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El CBM tiene una extensión aproximada de $\sim 76.8 \times 10^6$ ha, equivalente al 0.5% de la superficie terrestre del planeta y se estima alberga aproximadamente el 8% de la biodiversidad global (Miller *et al.*, 2001). La región delimitada por el CBM incluye una gran variedad de ecosistemas naturales como manglares, arrecifes de coral, humedales, bosques tropicales perennifolios, bosques caducifolios, bosques mesófilos de montaña y praderas, entre otros. Los objetivos del CBM son: proteger sitios clave de biodiversidad, conectar estos sitios mediante corredores que permitan el movimiento y dispersión de animales y plantas, y promover a su interior y en su área de influencia formas de desarrollo social y económico equitativas (Miller *et al.*, 2001).

En la porción que corresponde a México (CBM-Mx), el CBM tiene una extensión cercana a las 21.3×10^6 ha, equivalente al 10.8% del territorio nacional. La diversidad de especies registradas en el CBM-Mx es muy elevada e incluye aproximadamente 75% de las aves residentes de México, cerca del 60% de mamíferos, 30% de las especies de anfibios y 30% de las especies de reptiles (Escalante, 2003; Ochoa-Ochoa y Flores-Villela, 2006). El CBM-Mx se divide en tres zonas principales: 1) las áreas de corredor, que constituyen terrenos con diferentes grados de uso de suelo situados entre las áreas naturales protegidas, 2) las áreas focales, que comprenden zonas prioritarias para la conservación y el desarrollo sustentable, y 3) áreas de transición, que representan las zonas adyacentes a las áreas focales. El CBM-Mx se extiende a través de los estados de Campeche, Chiapas, Quintana Roo y Yucatán y se divide en tres secciones. La primera se localiza en los estados de Campeche y Quintana Roo uniendo las reservas de la biosfera de Calakmul y Sian Ka'an (CBC-S). La segunda sección se localiza en el estado de Chiapas uniendo dos regiones, la "Selva Maya-Zoque" (norte de Chiapas) y la "Sierra Madre del Sur" (CBT-M). Finalmente, la tercera sección corre por la parte norte del estado de Yucatán. Este estudio se centra en las dos primeras secciones del CBM-Mx ya que son las de mayor extensión y biodiversidad (Figura 2). Se estima que alrededor del 40% de la población que habita dentro de estas dos áreas es indígena (lacandones, zoques, mayas, choles, etc.) (Miller *et al.*, 2001; Toledo, 2003).

El CBM-Mx está sujeto a una acelerada pérdida de sus recursos naturales como consecuencia de la continua deforestación (Díaz-Gallegos *et al.*, 2008).

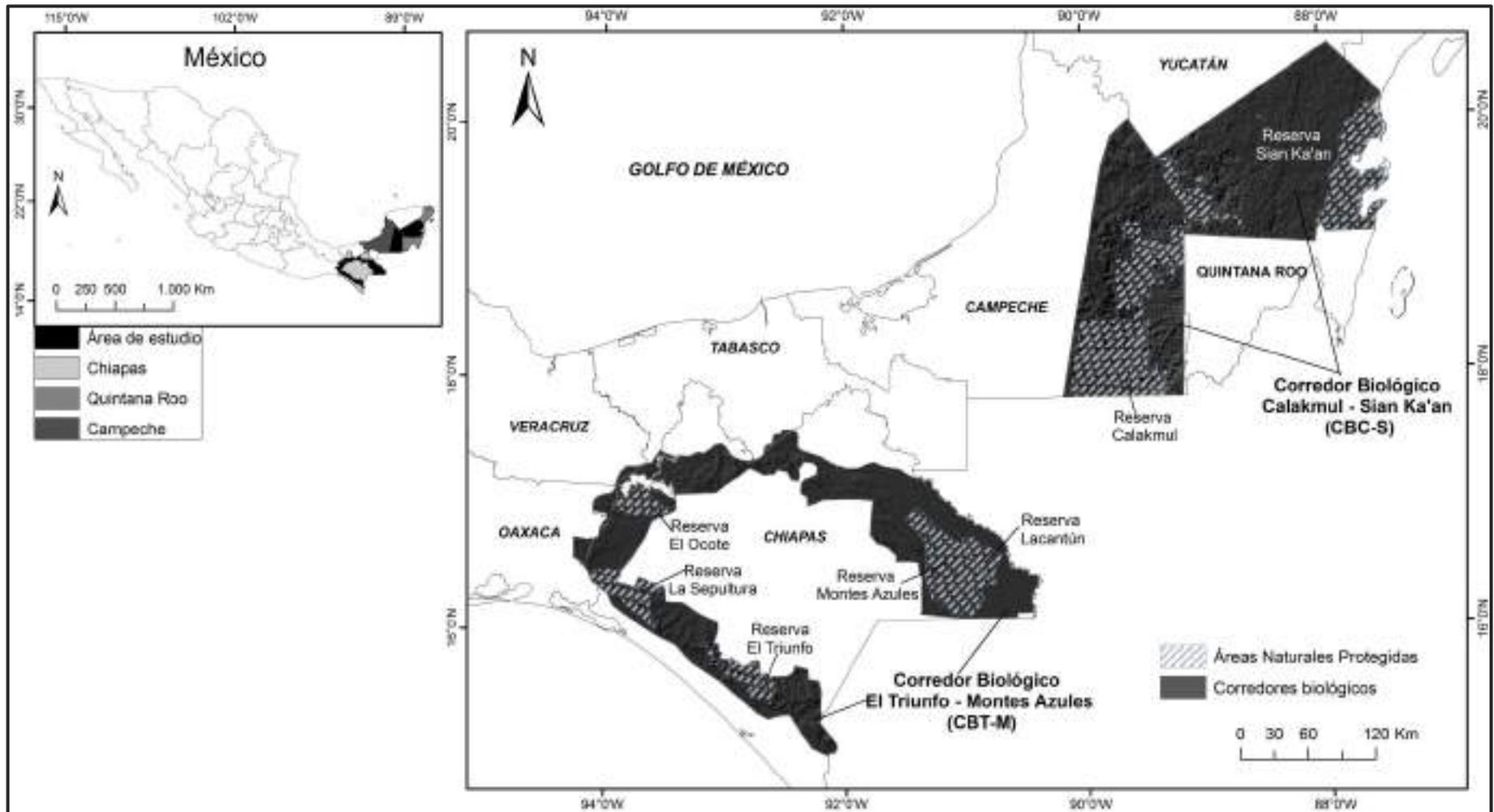


Figura 2. Localización de las secciones del CBM-Mx en los que este estudio se enfoca y principales áreas naturales protegidas que conecta.

La pobreza extrema, la subutilización y el uso no planificado de los recursos naturales han afectado los sistemas productivos y naturales y, consecuentemente, el desarrollo de la región (Miller *et al.*, 2001).

4.1 CORREDOR BIOLÓGICO EL TRIUNFO-MONTES AZULES

4.1.1 Localización y características fisiográficas

El corredor biológico El Triunfo-Montes Azules (CBT-M) se distribuye en su totalidad en el estado de Chiapas, tiene una extensión de $\sim 3.2 \times 10^6$ ha y conecta a las reservas de la Biosfera de Montes Azules, El Ocote, La Sepultura y El Triunfo (Figura 2). Se extiende a través de 37 municipios donde se asientan 50 comunidades, las cuales ocupan una superficie de 446 090 ha. En este corredor están incluidas 11 áreas naturales protegidas y ocho áreas focales (CCDA, 2002) (Tabla 1).

Tabla 1. Áreas naturales protegidas y áreas focales presentes en el CBT-M

	Nombre	Superficie (ha)	Total (ha)
Áreas naturales protegidas	RB ¹ Lacantún	61,873	809,804
	RB Montes Azules	331,200	
	RB La Sepultura	167,309	
	RB El Triunfo	119,177	
	APFF ² Chan-kin	12,184	
	MN ³ Bonampak	4,357	
	MN Yaxchilan	2,621	
	APFF Cascada de Agua Azul	2,580	
	RB Selva El Ocote	101,288	
	APFF Metzabok	3,368	
	APFF Nahá	3,847	
Área Focales	Ixcan	23,011.2	3'261,219.5
	Norte Cho'ol	65,574.1	
	Norte Zoque	48,912.5	
	Cojolita	51,296.9	
	Nahá-Metzabok	27,489.3	
	Cintalapa	69,313.0	
	Pico del Loro-Sierra Madre	86,529.4	
	La Frailecana	73,966.0	
Zona de transición	2'815,127.1		
Total			4'071,023.5

¹Reserva de la Biosfera, ²Área de protección de flora y fauna, ³Monumento natural.

De las siete regiones fisiográficas identificadas en el estado de Chiapas, en el CBT-M se diferencian cuatro: la Llanura Costera del Pacífico, la Sierra Madre de Chiapas, las Montañas

del Oriente y las Montañas del Norte. La Llanura Costera del Pacífico es una franja dispuesta en forma paralela al océano, constituida por material de depósito proveniente de la sierra. Presenta un relieve uniformemente plano, del cual sobresale el cerro Bernal al sur del municipio de Tonalá. La Sierra Madre de Chipas corre paralela a la Llanura costera del pacífico. En ella se registran las mayores altitudes del estado, siendo el volcán Tacaná la mayor elevación con 4 093 m.s.n.m., y está constituida en su mayoría por rocas de origen volcánico. Las Montañas del Oriente se localizan al este del estado y están constituidas principalmente por rocas calizas y areniscas. La altitud es variada y fluctúa entre los 500 y 1 500 m.s.n.m. Las Montañas del Norte están delimitadas por la Planicie Costera del Golfo al norte y la Depresión Central de Chiapas al sur. La disposición de las montañas permite que capten gran parte de la humedad que traen consigo los vientos que provienen del Golfo de México, lo que propicia un clima cálido húmedo con lluvias durante todo el año. En algunos sitios, la altitud modifica las condiciones térmicas, siendo ligeramente más fresco sobre los 1 800 m.s.n.m.

4.1.2 Hidrología y Clima

La región del CBT-M es una entidad con grandes volúmenes de agua superficial y subterránea en contraste con la región del CBC-S, en la cual el agua es un recurso escaso por la ausencia de escurrimientos superficiales (Tabla 2). El CBT-M se caracteriza por la presencia de un clima con temperaturas altas frecuentes y abundantes lluvias, lo que explica la importante presencia de bosques tropicales húmedos (Tabla 2).

4.1.3 Suelos

De acuerdo con la carta de edafología escala 1:250 000 publicada por INEGI, en el CBT-M existen 13 clases taxonómicas dominantes, de los cuales los litosoles, rendzinas y acrisoles ocupan el 53% del territorio como clases dominantes (INEGI, 2001; PEOT, 2005). Los litosoles son más frecuentes presentándose generalmente sobre sierras, laderas y barrancas; se caracterizan por tener profundidades menores a 10 cm y ocupan un 20% de esta región. Las rendzinas son suelos poco profundos, se caracterizan por poseer una capa superficial abundante en humus que descansa sobre roca caliza o algún material rico en cal, y ocupan el 17% de la superficie del CBT-M; los rendimientos de estos suelos en usos agropecuarios son

bajos y cuando se localizan en laderas o lomas su riesgo de erosión es sumamente alto. Los acrisoles son típicos de regiones templadas con alta precipitación y ocupan una superficie del 16.2 %; presentan acumulaciones de arcillas en el subsuelo y en usos agropecuarios producen rendimientos muy bajos siendo el uso forestal el más adecuado (INEGI, 2001; PEOT, 2005).

Tabla 2. Características hidrológicas, clima y precipitación en las dos secciones del CBM-Mx que se evalúan en este estudio

	<i>EL TRIUNFO-MONTES AZULES</i>	<i>CALAKMUL-SIAN KA'AN</i>
<i>Hidrografía</i>	Comprende tres regiones hidrológicas, la región Costa de Chiapas, la de Coatzacoalcos y la región Grijalva-Usumacinta (constituye el 85.53% de la superficie estatal).	En la región del estado de Campeche el ambiente cárstico no permite escurrimientos superficiales permanentes y sólo las lagunas y aguadas con suelos impermeables abastecen este recurso. En la porción que corresponde al estado de Quintana Roo el sistema hidrológico es principalmente subterráneo. El Río Hondo es la corriente superficial más importante.
<i>Clima y precipitación</i>	Incluye dos grandes grupos climáticos: los cálido-húmedos (A) y los templado-húmedos (C) y temperatura media anual entre 18 y 35 °C. La precipitación varía entre 1 000 y 4 500 mm anuales.	La posición geográfica del de la región de Calakmul dentro del trópico determina la presencia de climas cálidos-húmedos (A) y subhúmedos (Aw) con lluvias en el verano con una temperatura promedio anual entre 24 y 26°C. La precipitación varía entre 1000 y 1300 mm anuales. Los climas predominantes de la región correspondiente a Sian Ka'an son los cálidos-subhúmedos (Aw), con precipitaciones medias anuales entre 1100 y 1300 mm. La temperatura promedio oscila entre 25.5° y 26.5 °C.

4.1.4 Vegetación y Fauna

La sección del CBT-M constituye una de las regiones con mayor diversidad biológica en el país debido a su ubicación geográfica y en especial a que se encuentra en la zona de transición entre las regiones biogeográficas Neártica y Neotropical. La flora del CBT-M es muy diversa,

se destacan los helechos, orquídeas, gramíneas, rubiáceas y leguminosas. En esta región existen los más extensos remanentes de selva alta perennifolia del país, además de selvas subperennifolias, caducifolias y subcaducifolias, bosque mesófilo de montaña y bosques de coníferas. Se calcula que las selvas del CBT-M contienen ~80% del total de las especies de árboles tropicales de México (Mittermeier y Goettsch, 1992).

En el CBT-M se puede encontrar también una alta diversidad faunística. Entre las especies endémicas de anfibios registradas para esta región se encuentran *Plectrohyla pycnochila*, *Dendrotriton megarhinus*, e *Ixalotriton niger*. Asimismo, el CBT-M es una de las regiones con mayor diversidad de reptiles de México al estar registradas para el área 218 especies de las cuales 16 especies son endémicas para el estado de Chiapas (CONABIO, 2008). Por otra parte, en este corredor se puede encontrar el 65% de las 380 especies de aves registradas en el país. Entre estas especies se incluyen varias en inminente peligro de extinción local como: el zopilote rey (*Sarcoramphus papa*), el águila arpía (*Harpia harpyja*), el quetzal (*Pharomachrus moccino*), diversas especies de Psitacidos como las guacamayas (*Ara macao* y *Ara militaris*) y algunas especies de Strigiformes como el búho de anteojos (*Pulsatrix perspicillata*). En cuanto a la fauna de mamíferos, en el CBT-M se encuentra representado el 44 % del total nacional de especies con 198 (Navarrete *et al.*, 1996). Varias de estas especies han experimentado importantes reducciones de sus poblaciones como: el jaguar (*Panthera onca*), el ocelote (*Leopardus pardalis*), el pecarí labiado (*Tayassu pecari*), el tapir (*Tapirus bairdii*) y varias especies de conejos (*Sylvilagus floridanus* y *S. brasiliensis*) (CONABIO, 2008).

4.1.5 Aspectos socioeconómicos y culturales

El CBT-M cuenta con una población de ~2'255,806 habitantes (INEGI, 2010). La población de Tuxtla Gutiérrez, capital del estado de Chiapas, creció 30% en 10 años (durante el período 1995-2005), llegando a medio millón de habitantes (INEGI, 2006). Junto a San Cristóbal de las Casas (al Este) y Ocozocoautla (al Oeste), Tuxtla Gutiérrez constituye un núcleo poblacional que supera los 800 mil habitantes en 10 municipios. Por otra parte, el incremento de la dispersión de la población en localidades menores a 2 500 habitantes ha sido particularmente notorio, ya que mantuvo sólo 20% de la población en ciudades mayores a 50 mil habitantes y 30% en localidades de 2 500 a 50 mil habitantes. De esta manera, la mitad de

la población del estado se distribuye en más de 18 mil localidades menores a 2,500 habitantes. La población indígena en el CBT-M es muy diversa ya que incluye grupos como: lacandones, tzeltales, tojolabales, zoques, tzotziles, entre otras. Sin embargo, esta región presenta el mayor grado de marginación social y económica del país, siendo los grupos indígenas la población más afectada (Toledo, 2003; Boege, 2005). En el 2010 el 13.6% de la población económicamente activa en áreas urbanas se dedicaba a las actividades primarias (agropecuarias), el 23.9% al sector secundario y el 61.9% al terciario (INEGI, 2010). En comparación en el medio rural (poblaciones de menos de 15 mil habitantes) la población ocupada en el sector primario fue de 70.25%, 9.64% en el secundario y 20% en el terciario.

En todo el corredor existen sistemas tradicionales de agricultura. Entre los pequeños propietarios prevalece el sistema de roza, tumba y quema para producir cultivos de maíz y frijol principalmente. La mayor fuente de ingresos para los campesinos de la montaña es la producción de café, mientras que en las tierras bajas es la ganadería (Moguel y Toledo, 1999). Por otra parte, las políticas gubernamentales han promovido frecuentemente la crianza de ganado, incluso en donde existían bosques maduros que han sido devastados debido a la fuerte deforestación (Boege, 2005). Las principales causas del deterioro ambiental en este corredor son: a) la ganadería extensiva, b) el sistema agrícola basado en la milpa de roza-tumba-quema en conjunto con la expansión de la frontera agrícola a tierras no aptas para estas actividades y c) la sobreexplotación forestal y el inadecuado manejo de bosques y selvas por las compañías privadas. La región del corredor de la Selva Maya-Zoque cuenta con estructuras de toma de decisiones comunitarias que están demostrando ser efectivas, sin embargo la presencia de grupos paramilitares lo convierten en una zona de conflicto (Toledo, 2001). En algunas regiones de este corredor se está produciendo y comercializando café, tanto a nivel local como para exportación (CONABIO, 2007). No obstante, el incremento en la producción sustentable del café se ve limitado debido a la falta de instituciones y recursos para lograr la certificación necesaria para acceder a los mercados internacionales (Eccardi, 2008). Los servicios como agua entubada, electricidad, salud, educación y vivienda son aún deficientes, particularmente para el corredor Selva Maya-Zoque (CNA, 2003).

4.2 CORREDOR BIOLÓGICO CALAKMUL - SIAN KA'AN

4.2.1 Localización y características fisiográficas

En la región correspondiente al estado de Campeche el corredor biológico cuenta con una superficie de $\sim 1.2 \times 10^6$ ha y abarca dos municipios, Calakmul y Hopolchén, en donde se distribuyen 25 comunidades que ocupan una superficie de 300 mil ha. A su vez, incluye el área natural protegida de Calakmul y dos áreas focales, entre las cuales existen aproximadamente 215 mil hectáreas de uso comunitario para actividades forestales (CCDA, 2002) (Tabla 3).

Tabla 3. Área natural protegida y áreas focales presentes en la región de Campeche del CBC-S.

	Nombre	Superficie (ha)	Total (ha)
Área Natural Protegida	RB ¹ Calakmul	723,185	723,185
Áreas Focales	Xpujil-Zohlaguna	154,775.8	1'218,388.7
	La Montaña	93,386.8	
	Zona de transición	970,226.1	
Total			1'941,573.7

¹Reserva de la Biosfera

La región del municipio de Hopolchén está caracterizada por pequeñas elevaciones de relieve calcáreo, que alcanzan una altitud máxima de 350 m.s.n.m. El resto de su extensión son planicies donde se presenta la faja calcárea alterna con extensas hondonadas. En el municipio de Calakmul no existen elevaciones de importancia; la altura máxima sobre el nivel medio del mar se encuentra en el cerro Champerico con 390 m.s.n.m.

En el estado de Quintana Roo, el corredor biológico abarca una superficie de $\sim 2.1 \times 10^6$ ha, dentro del cual se localizan dos áreas naturales protegidas y dos áreas focales. Asimismo, incluye tres municipios donde habitan 30 comunidades que ocupan una extensión de 595 mil hectáreas (Tabla 4).

La porción del corredor que se ubica en el estado de Quintana Roo se encuentra localizada en la Provincia Fisiográfica de la Península de Yucatán y se distribuye en tres subprovincias: 1) el Carso Yucateco, que abarca más del 50% en el centro y norte del estado y constituye una llanura con piso rocoso o cementado y hondonadas someras, 2) el Carso y Lomeríos de Campeche, en el suroeste colindando con Campeche, compuesta por lomeríos bajos con

hondonadas, y 3) la Costa Baja de Quintana Roo, en el sur adyacente a Belice y sobre la línea de costa al este y sureste de la entidad, que constituye una llanura inundable. El área ocupada por esta región presenta una gran planicie. Al sur del CBC-S, en los límites con Campeche y Guatemala, se localizan las mayores elevaciones, con altitudes cercanas a los 245 m.s.n.m.

Tabla 4. Áreas naturales protegidas y áreas focales presentes en la región de Quintana Roo del CBC-S.

	Nombre	Superficie (ha)	Total (ha)
Áreas Naturales Protegidas	RB ¹ Sian Ka'an	528,000	733,598
	ÁPF ² Uaymil	89,118	
	RB Balan Kaáx	116,480	
Áreas Focales (Corredor biológico)	Felipe Carrillo Puerto	649,538.3	2'170,876.2
	José María Morelos	289,830.5	
	Zona de transición	1'231,507.4	
Total			2'904,474.2

¹Reserva de la Biosfera, ²Área de protección de flora y fauna

4.2.2 Suelos

En la parte del CBC-S correspondiente a Campeche se encuentran 6 distintos tipos de suelo, destacando por su predominancia las rendzinas, con 52.62% del territorio y los gleysoles vérticos, con 36.34%; los restantes tipos de suelo (luvisol crómico, nitosol éútrico, litosol y vertisol crómico) se presentan en extensiones inferiores al 7% de la superficie de la región (INEGI, 2001). Si bien las rendzinas son suelos con buena fertilidad, su escasa profundidad y vulnerabilidad a la erosión no las hacen especialmente favorables a las actividades agrícolas, aunque pueden aprovecharse para pastizales. Los gleysoles son de textura fina y drenaje lento, suelen estar inundados y su contenido de materia orgánica va de moderado hasta alto, presentan poca susceptibilidad a la erosión. Por su parte, los suelos presentes en la región de Sian Ka'an son en su mayoría delgados, de textura arcillosa y drenaje de lento a moderado. Hay cinco clases taxonómicas dominantes: gleysol, litosol, rendzina, regosol y solonchak, este último caracterizado por presentar un alto contenido de sales. En general, estos suelos son muy pobres y no aptos para la agricultura por lo que los rendimientos de la milpa son aceptables solamente durante los primeros dos o tres años. Durante el primer año una hectárea produce 600 kg de maíz, que se reduce el año siguiente a 300 kg, lo mismo sucede con otros cultivos como el frijol y el chile verde. Para recuperar la fertilidad del suelo es necesario dejar descansar el terreno por lo que se requiere de abrir nuevas tierras constantemente (INEGI, 2001).

4.2.3 Vegetación y Fauna

Dentro de los tipos de vegetación presentes en la zona del CBC-S correspondiente a Campeche se incluyen: selva espinosa, selva caducifolia, selva perennifolia, selva subcaducifolia y vegetación. En la selva alta perennifolia y subperennifolia son comunes las asociaciones de *Manilkara achras-Brosimum alicastrum-Talisia olivaeformis*. En la selva mediana y baja subperennifolia las especies dominantes son *Vitex gaumeri*, *Lonchocarpus* sp., *Malmea depressa*, *Croton reflexifolius*, *Caesalpinia yucatanensis*, *Manilkara achras*, *Brosimum alicastrum*, *Bucida buceras*, *Haematoxylum campechianum*, entre otras (Pennington y Sarukhán, 2005). En cuanto a la vegetación acuática, se dan asociaciones entre especies flotantes como *Pistia stratiotes-Eichhornia crassipes* y *Nymphaea ampla-Salvinia auriculata*.

Los tipos de vegetación presentes en esta zona del corredor correspondiente a Quintana Roo incluyen la selva espinosa, selva perennifolia y subcaducifolia, humedales y dunas costeras. La flora incluye alrededor de 1,500 especies, entre las que se destacan el chicozapote (*Manilkara zapota*), pukté (*Bucida buceras*), caoba (*Swietenia macrophylla*), chacá roja (*Bursera simarouba*), tzalam (*Lysiloma bahamensis*), chechen negro (*Metopium brownei*), ramón (*Brosimum alicastrum*), sak-chacá (*Dendropanax arboreum*), chacte kok (*Sickigia salvadorensis*), katalox (*Swartzia cubensis*), pasa'ak (*Simarouba glauca*), cedro rojo (*Cedrela odorata*) y amapola (*Pseudobombax ellipticum*) (Pennington y Sarukhán, 2005).

La herpetofauna de la región de Calakmul está compuesta por 60 especies, 17 de anfibios y 43 de reptiles. Entre los anfibios, la familia Hylidae es la mejor representada. En el caso de los reptiles, las culebras son el grupo mejor representado, con 17 especies (Ochoa-Ochoa y Flores-Villela, 2006). En total se han registrado 235 especies de aves: 179 residentes y 56 migratorias. Algunas especies endémicas son el pavo ocelado (*Agriocharis ocellata*), la troglodita yucateca (*Thryothorus albinucha*), la chara yucateca (*Cyanocorax yucatanica*) y el mímido negro (*Melanoptila glabrirostris*) (Navarro y Sánchez-González, 2003). Se estima que hay 94 especies de mamíferos silvestres en la región de Calakmul, convirtiéndola en una región de alta diversidad. En Calakmul habitan seis de las siete especies de marsupiales de México; tres de primates; dos de los cuatro edentados, y cinco de los seis felinos. Existen especies en peligro de extinción en esta región como son: el tucán pico de canoa (*Ramphastos sulfuratus*), el hocofaisán (*Crax rubra griscomi*), el saraguato (*Alouatta pigra*), el tlacuache

dorado (*Caluromys derbiannus*), el mono araña (*Ateles geoffroyi*), el hormiguero arborícola (*Tamandua mexicana*), el grisón (*Galictis vittata*), la nutria (*Lutra longicaudis*) y el tapir (*Tapirus bairdii*), entre otras.

En la zona que corresponde a Sian Ka'an se han registrado 326 especies de aves que incluyen 219 que son residentes y 85 que son migratorias. Algunas de las especies de aves que se pueden encontrar en Sian Ka'an son la cigüeña jabirú (*Jabiru mycteria*), la paloma cabeciblanca (*Columba leucocephala*), el hocofaisán (*Crax rubra*) y el pavo ocelado (*Agriocharis ocellata*) (Navarro y Sánchez-González, 2003). Asimismo, Sian Ka'an es el área protegida con mayor extensión de hábitat de cocodrilos (*Crocodylus moreletti* y *C. acutuen*) en el país (Ochoa-Ochoa y Flores-Villela, 2004). Finalmente en esta reserva se han registrado 96 especies de mamíferos entre los que destacan 39 de murciélagos, dos de delfín y cuatro de ballenas.

4.2.4 Aspectos socioeconómicos y culturales

La porción del corredor ubicada en el estado de Campeche cuenta con una población total de ~64 659 habitantes (INEGI, 2010). Estudios sobre la dinámica migratoria de la región indican que ha habido de tres a cuatro oleadas migratorias (Boege y Murguía, 1989; Ericson *et al.*, 1998). Las dos primeras oleadas sucedieron a fines del siglo XIX y durante las primeras décadas del siglo XX, respectivamente, coincidiendo con el establecimiento de campamentos chicleros para extraer la resina de los árboles de chicozapote (*Manilkara zapote*) y el surgimiento de compañías madereras, para el aprovechamiento de maderas preciosas como la caoba (*Swietenia macrophylla*) y el cedro americano (*Cedrela odorata*). La tercera oleada de migrantes llegó a la región en los años sesentas como resultado de las nuevas políticas de colonización de la reforma agraria que fomentaba la formación de nuevos centros de población ejidales impulsando el desarrollo de actividades agrícolas (Boege y Murguía, 1989). Es a partir de la tercera oleada de migrantes que la conformación social y económica de la región se vuelve más heterogénea ya que la mayoría de ellos son choles, tzotziles y tzeltales del estado de Chiapas y Mayas yucatecos. Dos condiciones principales propiciaron la cuarta oleada. Por un lado, los problemas sociales en el estado de Chiapas que tuvieron sus inicios a partir de la década de los 90, y por el otro, la llegada de trabajadores gubernamentales y de la industria de servicios, el fortalecimiento de las infraestructuras rurales y el desarrollo del turismo en la

región consecuencia de la creación del municipio de Calakmul. Actualmente, la mayoría de los pueblos indígenas se encuentran inmersos en una economía de mercado y son partícipes de las dinámicas propias de cada área.

La explotación de los recursos naturales de la selva, en especial los forestales, ha sido la principal actividad económica de la región. Desde finales del siglo XIX, se talaron árboles de palo de Campeche (*Haematoxylon campechianum*) para extraer materia para hacer tinte. Por otra parte, a principios del siglo XX, la demanda internacional de goma de mascar propició la explotación de los árboles de chicozapote (*Manilkara zapota*) para extraer su resina, convirtiéndose la zona en una de las principales proveedoras de chicle natural a nivel mundial. Esta situación, se revertió con la aparición de sustitutos sintéticos a finales de 1940. En esos años también se construyeron campos para la extracción y explotación de maderas preciosas como la caoba (*Swietenia macrophylla*) y el cedro (*Cedrela odorata*). Hasta la década de los 70, la explotación de estos recursos forestales fue del dominio casi exclusivo de las compañías madereras privadas (Ericson *et al.*, 1998).

Actualmente, los volúmenes de aprovechamiento forestal se han reducido y se regulan a través de un plan de manejo. Además de la caoba y el cedro, se explotan otras especies consideradas de menor valor comercial como el jabón (*Piscidia piscipula*), chaká (*Bursera simaruba*), chakté (*Sweetia panamensis*), tzalam (*Lysiloma bahamense*) y granadillo (*Dalbergia* sp.). Otras actividades presentes en la región son la agricultura de subsistencia (maíz, frijol) y con fines comerciales (p.ej., el chile verde). Además, es común la ganadería bovina, porcina, caprina, ovina, la extracción de miel y el comercio.

La población total la región del corredor que corresponde al estado de Quintana Roo es de ~111 205 habitantes (INEGI, 2010). Las principales actividades económicas que practica la población son la agricultura (cultivos de caña de azúcar, cítricos, arroz, papaya, mango y plátano), extracción de madera, explotación del chicle, producción de carbón vegetal, apicultura y ganadería (explotación de ganado bovino, ovino, caprino y porcino). Se han desarrollado proyectos de agricultura y forestales con el fin de mejorar la situación económica de las comunidades rurales sin embargo, estos no han contemplado la diversidad socio-económica y cultural existente en la región (Miller *et al.*, 2001; Toledo, 2003; Boege, 2005).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Bases de datos cartográficos

Para caracterizar cuantitativamente los procesos de cambio en el Corredor Biológico Mesoamericano-México y elaborar el modelo de cambio de cobertura y uso de suelo se utilizó como base la cartografía digital de uso del suelo y vegetación elaborada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) Serie II (1993), Serie III (2002) y Serie IV (2007) todas a la escala 1: 250 000.

Cartografía INEGI SERIE II (1993-1996)

La Serie II es la versión modificada de la información temática contenida en la carta de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 Serie I. La modificación consiste en la adecuación y actualización de la información temática por medio de interpretación visual de imágenes de satélite (espacio-mapas impresos de 1993), verificación de campo (1994-1996), revisión bibliográfica sobre la distribución geográfica y características florísticas de la vegetación en diferentes partes del país y la recopilación de información sobre las áreas agrícolas con productores y agencias oficiales. El sistema de clasificación utilizado es más detallado que el utilizado en la serie I ya que incluye más de 600 categorías para todo el país. Los datos se encuentran únicamente en formato digital.

Cartografía INEGI SERIE III (2002)

La Serie III, contiene información geográfica de la condición de la vegetación de la República Mexicana actualizada para los años 2002-2003. La información de la cubierta vegetal y uso agrícola utilizada en esta cartografía fue obtenida a partir de la interpretación visual de imágenes Landsat ETM con una resolución de 25 metros (año 2002) y el apoyo de la interpretación visual de espacio-mapas generados a partir de imágenes Landsat con una resolución de 30 metros. Para verificar las clasificaciones se hizo trabajo de campo en los años 2002, 2003 y 2004.

Cartografía INEGI SERIE IV (2007)

Esta cartografía, contiene información obtenida con técnicas de fotointerpretación aplicadas a imágenes del satélite Spot tomadas en la primavera y otoño de 2007 y escenas complementarias tomadas en la primavera del 2008. La interpretación de las imágenes se apoya con trabajos de campo realizado en otoño de 2007 y primavera-verano de 2008.

5.2 Clasificación de cobertura y uso del suelo

Para estimar lo cambios en la cobertura y uso del suelo se simplificó la leyenda utilizada en la cartografía de uso de suelo y vegetación de INEGI con el fin de hacerla equivalente y comparable entre las tres series. Este procedimiento se llevó a cabo usando el software ArcGIS 9.3 (ESRI). Para evaluar los procesos de cambio se consideró importante diferenciar la vegetación primaria y secundaria, ya que esto permite medir el grado de recuperación o degradación de las categorías de selvas y bosques. La leyenda utilizada para evaluar los procesos de cambio en el CBM-Mx se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Categorías utilizadas en la leyenda de los mapas de cobertura y uso del suelo utilizadas para este estudio.

Uso/cobertura del suelo	Abreviación
Bosques	B
Bosques secundarios ¹	BS
Selvas	S
Selvas secundarias ¹	SS
Agrícola-Pecuaria-Forestal ²	APF
Otras coberturas ³	OC
¹ Incluye vegetación secundaria de tipo herbácea, arbustiva y arbórea. ² Incluye pastizales inducidos y cultivados y agricultura de riego y temporal. ³ Incluye vegetación hidrófila, cuerpos de agua y asentamientos humanos.	

La categoría de vegetación secundaria incluye tanto procesos de sucesión que resultan de perturbaciones naturales así como antropogénicas. Por otra parte, en las series de INEGI se establece una categoría única denominada APF (Agrícola, Pecuaria, Forestal), que incluye a

las áreas agrícolas clasificadas de acuerdo al tipo de riego y la duración de los cultivos, el bosque cultivado (plantaciones de árboles establecidas con diferentes fines) y el pastizal cultivado. En este estudio se incluyó en la categoría APF los pastizales inducidos.

5.3 Estimación de las tasas de cambio

Para obtener las estadísticas del cambio de la cobertura y uso del suelo se obtuvieron las áreas de las diferentes coberturas y usos del suelo, para cada fecha, y se calcularon las tasas de cambio para los períodos 1993-2002 y 2002-2007 de acuerdo con la fórmula utilizada por la FAO (1996):

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

Donde t es la tasa de cambio de cobertura/uso de suelo para un intervalo de tiempo definido, S_1 es la superficie de un tipo dado de cobertura/uso en el tiempo 1, S_2 es la superficie de la misma cobertura en el tiempo 2, y n es el número de años transcurridos entre el tiempo 1 y el tiempo 2.

5.4 Procesamiento de datos para la construcción del modelo

Se recopiló la información cartográfica disponible de carreteras principales, terracerías y brechas, poblados, ríos principales, tipos de suelo y ubicación de áreas naturales protegidas (Tabla 6). Asimismo se obtuvieron modelos digitales de elevación (ASTER GDEM) (Tabla 6). Estos insumos cartográficos fueron seleccionados como variables explicativas ya que describen rasgos frecuentemente relacionados con los cambios de cobertura y uso del suelo (Mas *et al.*, 2004; Soares-Filho *et al.*, 2005).

El conjunto de datos cartográficos de carreteras principales, terracerías y brechas, poblados y ríos principales fueron transformados de formato vectorial a raster y generalizados a una resolución espacial de 1 km², escala 1:1,000,000 (Tabla 6). Posteriormente se calculó la distancia euclidiana (distancia geométrica entre dos puntos en un plano) a carreteras, a poblados y a ríos principales utilizando el software ArcGIS 9.3. Las áreas naturales protegidas también se convirtieron a formato raster y se transformaron en una variable binaria (i.e.,

presencia o ausencia de la reserva). A partir de los modelos digitales de elevación del terreno ASTER GDEM se generaron mapas de pendiente del terreno utilizando el software ArcGIS 9.3. Las variables fueron homologadas al mismo sistema de coordenadas y proyección (UTM zona 15N para el CBT-M y 16N para el CBC-S, WGS84). Las capas de información generadas a partir de los datos cartográficos se importaron en formato GeoTiff al programa Dinamica EGO, donde se generó un archivo multicapa (*stack*) con todas las capas de información seleccionadas como variables explicativas.

Tabla 6. Características de las fuentes cartográficas utilizadas en el modelado de cambio de cobertura y uso de suelo. Dada la disponibilidad de datos a diferentes escalas, todos los insumos cartográficos fueron generalizados a una resolución espacial de 1km², escala 1:1,000,000.

Fuentes de los datos utilizados	Insumos cartográficos (formato raster) utilizados en la modelación derivados de las fuentes de datos
Conjunto de datos vectoriales del mapa de carreteras, terracerías y brechas, elaborado por el Instituto Mexicano del Transporte, escala 1:250,000 (fecha 2001).	Mapa de distancia a carreteras principales y a terracerías y brechas.
Conjunto de datos vectoriales de poblados (fecha 1990 y 2000), carreteras (fecha 1990) y ríos principales (fecha 2000) de la serie topográfica de INEGI, escala 1:1,000,000.	Mapa de distancia a poblados y a ríos principales.
Conjunto de datos vectoriales de carreteras (fecha 2009) elaborado por el Laboratorio de Análisis de Información Geográfica y Estadística (LAIGE), escala 1:250,000	Mapa de distancia a carreteras principales y a terracerías y brechas
Conjunto de datos vectoriales de las áreas naturales protegidas ubicadas dentro del CBM-Mx elaborado por la CONANP (fecha 2003), escala 1:1,000,000.	Mapa binario de presencia/ausencia de áreas naturales protegidas.
Conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica de INEGI, escala 1:250,000.	Mapa de tipos de suelos.
Modelos digitales de elevaciones ASTER GDEM, resolución 30 m.	- Modelo digital de elevaciones - Mapa de pendientes

La cartografía digital de uso del suelo y vegetación de INEGI Serie II (1993), Serie III (2002) y Serie IV (2007) fue transformada de formato vectorial a formato raster con una resolución de 1 km², escala 1:1,000,000 y se importó al programa Dinamica EGO para hacer el cálculo de la matrices de transición (ver apartado siguiente).

5.5 Modelación del cambio de cobertura y uso del suelo utilizando el programa Dinamica EGO

5.5.1 Estructura del modelo

Dinamica EGO es un programa diseñado para simular la dinámica del paisaje y que emplea un autómata celular. Los autómatas celulares constituyen un modelo matemático de un sistema espacial dinámico que evoluciona en pasos de tiempo discretos. Consiste en un arreglo con disposición regular de celdas n -dimensional que interactúan entre sí dentro de una cierta vecindad, de acuerdo a un conjunto de reglas de transición. Así, en el modelo del autómata celular, el estado de cada celda en el arreglo depende de los estados previos de las celdas dentro del vecindario, en el cual todas las celdas son actualizadas simultáneamente en pasos de tiempo discretos. El algoritmo usado para que las celdas interactúen entre sí localmente es conocido como regla local del autómata celular, el cual emplea funciones de transición especialmente diseñadas para reproducir las dimensiones y formas de los cambios en el paisaje (Almeida *et al.*, 2003).

En términos generales, los modelos que emplean autómatas celulares consisten de cinco componentes básicos: 1) un plano n -dimensional dividido en un número de celdas homogéneas, 2) una vecindad definida para cada celda que consiste en un conjunto contiguo de celdas, 3) un conjunto discreto de estados para cada celda, 4) un conjunto de reglas de transición que determina el estado de cada celda dependiendo del estado previo de su vecindad, y 5) pasos discretos de tiempo que actualizan simultáneamente los estados de todas las celdas (White *et al.*, 2000).

Dinamica EGO utiliza como archivos de entrada para elaborar este tipo de modelos mapas de cobertura y uso del suelo para, por lo menos, tres fechas (las dos primeras fechas permiten calibrar el modelo y la tercera permite evaluar un mapa simulado por el modelo) y mapas de variables explicativas del cambio (p.ej., de características físicas, de infraestructura, tenencia

de la tierra, etc.). El proceso de modelado utilizando Dinamica EGO consiste de cuatro etapas principales: calibración, simulación, validación y proyección de escenarios, que se describen a continuación de manera detallada.

5.5.2 Calibración del modelo

5.5.2.1 Cálculo de las matrices de transición

Para llevar a cabo esta etapa de la modelación se utilizan los mapas de cobertura y uso del suelo para las dos primeras fechas. Con base en estos mapas, se calculan las matrices de probabilidad de cambio, derivadas por medio del método de cadenas de Markov.

La matriz de Markov es un modelo matemático simple que describe los cambios de un sistema a través de períodos discretos de tiempo, en los cuales el valor de cualquier variable (p. ej., cada categoría de cobertura y uso del suelo) en un período dado, es la suma de los porcentajes fijos del valor de las variables en el período de tiempo previo (ecuación 2):

$$\pi(t + 1) = P\pi(t) \quad (2)$$

donde $\pi(t)$ es la columna vector, con n elementos, que representa el estado del sistema en un tiempo dado t (p. ej., el porcentaje de áreas de cada n_i categoría de cobertura y uso de suelo), $\pi(t + 1)$ es el vector que representa la ocupación de n estados en un momento dado en el futuro $t + 1$, y P es la matriz de probabilidad de transición.

La suma de fracciones a lo largo de las columnas de la matriz es igual a uno. La línea diagonal de la matriz de transición no necesita ser especificada, ya que Dinamica EGO no modela el porcentaje de celdas que no cambian. Para poder realizar proyecciones anuales en vez de utilizar un paso de tiempo igual al período utilizado para elaborar la primera matriz de probabilidad, se puede anualizar la matriz (ecuación 3) para contar con las tasas anuales de probabilidad de transición (Soares-Filho *et al.*, 2002). Dinamica EGO calcula directamente dos matrices de probabilidad de cambio, una para todo el período de análisis (en el caso de este trabajo 9 años) y otra que calcula las tasas de probabilidad de transición anualizadas.

$$P^t = HV^t H^{-1} \quad (3)$$

Donde P es la matriz de probabilidad transición original, H es la matriz de vectores propios (*eigenvector*), V es la matriz de valores propios (*eigenvalue*), y t es el número de años del período correspondiente a la matriz original.

El cálculo de las matrices de probabilidad de cambio para las dos secciones del CBM-Mx se realizó utilizando los mapas de cobertura y uso del suelo de INEGI para 1993 y 2002. Se utilizó la matriz de transición con probabilidades anuales como insumo para elaborar los mapas prospectivos de CCUS.

5.5.2.2 Cálculo de los pesos de evidencia

Para identificar las áreas más propensas a experimentar los CCUS se compara la distribución espacial de los cambios, para cada transición, respecto a las diferentes variables explicativas. Esta comparación permite establecer una relación entre el potencial de cambio y las variables explicativas. En Dinamica EGO, esta relación se establece por medio del método de los pesos de evidencia con el fin de producir un mapa de probabilidades de transición, el cual muestra las áreas donde el cambio es más propenso a ocurrir.

Dado que el método de los pesos de evidencia sólo es aplicable a variables categóricas, es necesario categorizar las variables continuas (p.ej., mapas de distancias, elevación, pendiente). En Dinamica EGO el proceso de categorización de las variables continuas se lleva a cabo a través de un modelo que permite escoger los intervalos que delimitan las categorías que tienen un efecto diferencial sobre los cambios. El modelo da como resultado los intervalos óptimos para categorizar cada variable continua para todas las transiciones contempladas. Estos resultados son utilizados posteriormente como insumo de entrada para el cálculo de los pesos de evidencia (Figura 3).

El método de los pesos de evidencia, utilizado para el cálculo de las probabilidades de transición, se basa en el teorema Bayesiano de probabilidad condicional. En términos generales, las probabilidades condicionales indican la probabilidad de que un evento ocurra (p.ej., cambio de una categoría de cobertura/uso del suelo a otra), dada la presencia de cierta evidencia (variable explicativa). La probabilidad de que de que ocurra un evento D (p.ej., el cambio de selvas a áreas agropecuarias), dada la presencia de cierta evidencia B (p.ej., un área natural protegida) puede expresarse por:

$$P(D|B) = \frac{P(D \cap B)}{P(B)} \quad (4)$$

donde $P(D|B)$ es la probabilidad de que un evento D ocurra, dada la presencia de la evidencia B . En el teorema de Bayes, las ecuaciones son expresadas en forma de “odds”, es decir, la razón de probabilidad que un evento ocurra entre la probabilidad de que no ocurra.

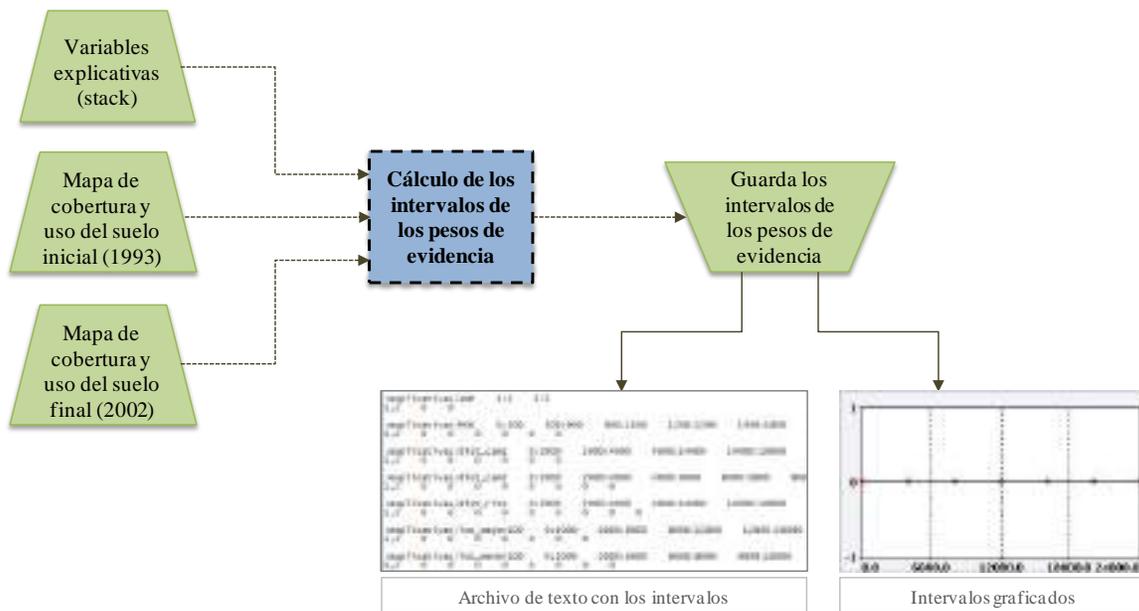


Figura 3. Diagrama de flujo del modelo elaborado para el cálculo de intervalos de los pesos de evidencia.

El método de los pesos de evidencia utiliza el logaritmo natural de los *odds*, denominado *log odds* o *logits*. De esta manera, ciertas manipulaciones algebraicas permiten obtener pesos positivos y negativos mediante la siguiente expresión:

$$w^+ = \ln \left[\frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \right] \quad (5)$$

$$w^- = \ln \left[\frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} \right] \quad (6)$$

donde,

D= presencia de un evento

\bar{D} = ausencia de un evento

B= presencia de evidencia (factor condicional)

\bar{B} = ausencia de evidencia (factor condicional)

W^+ indica la importancia de la presencia de un factor (variable explicativa) para la ocurrencia de un evento. Si es positivo, la presencia del factor es favorable para la ocurrencia del evento y si es negativo, no es favorable.

W^- indica la importancia de la ausencia de un factor para la ocurrencia del evento, cuando es positivo la ausencia del factor es favorable para la ocurrencia del evento y si es negativo, no lo es.

Por otra parte, el enfoque de los pesos de evidencia permite combinar diferentes patrones de forma simultánea en una única ecuación para el cálculo de probabilidad. Para esto, el supuesto de independencia condicional entre los mapas de variables explicativas es requerido. De esta forma, la probabilidad espacial de que ocurra una transición $i \rightarrow j$ dado un conjunto de variables explicativas se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$P(i \rightarrow j | B \cap A \cap \dots \cap C_i) = \frac{e^{\sum w_i^+}}{1 + e^{\sum w_i^+}} \quad (7)$$

donde $P(i \rightarrow j | B \cap A \cap \dots \cap C_i)$ es la probabilidad de que ocurra la transición $i \rightarrow j$, cumpliendo con las condiciones B , A , y demás condiciones (C_i), y representadas por sus pesos W_i^+ .

Para el cálculo de los pesos de evidencia, Dinamica EGO recibe como archivos de entrada las variables explicativas (*stack*), los dos mapas de cobertura y uso de suelo utilizados para el cálculo de la matriz de probabilidad de cambio y los intervalos calculados para los pesos de evidencia (Figura 4). El modelo da como resultado los pesos de evidencia graficados (Figura 5) y un archivo de texto que indica la transición de cobertura y uso del suelo y la variable explicativa con sus intervalos y pesos correspondientes. Un aspecto importante es que Dinamica EGO permite la edición y modificación de los pesos de evidencia, lo cual permite rebasar un enfoque puramente estadístico e incorporar conocimiento experto en la calibración del modelo (Cuevas y Mas, 2008).

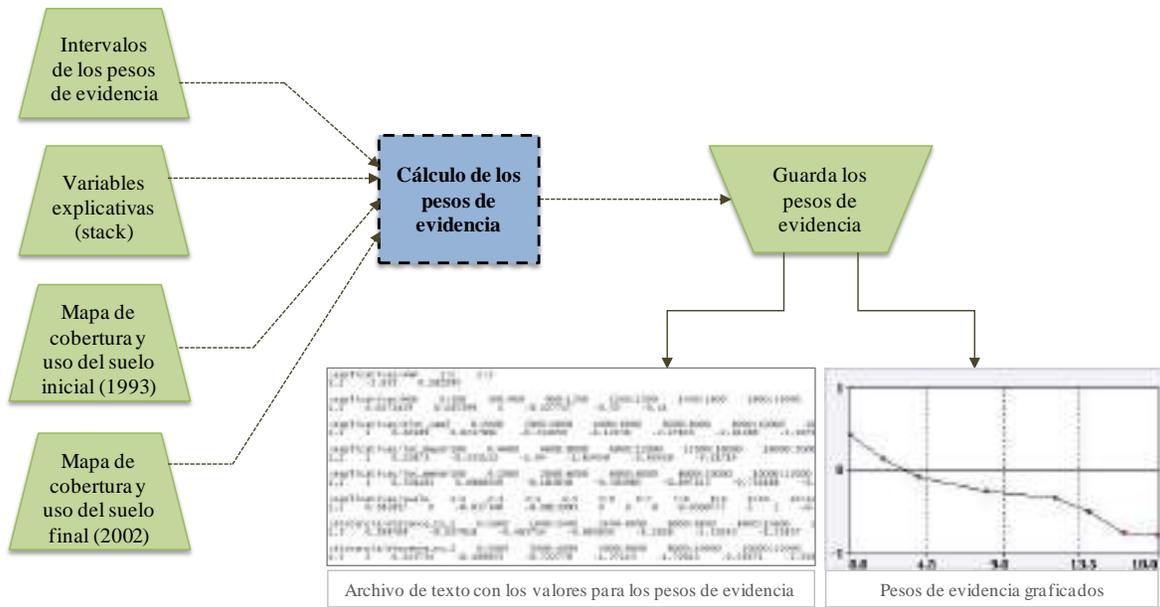


Figura 4. Diagrama de flujo del modelo elaborado para el cálculo de los pesos de evidencia utilizados para calcular las probabilidades de transición.

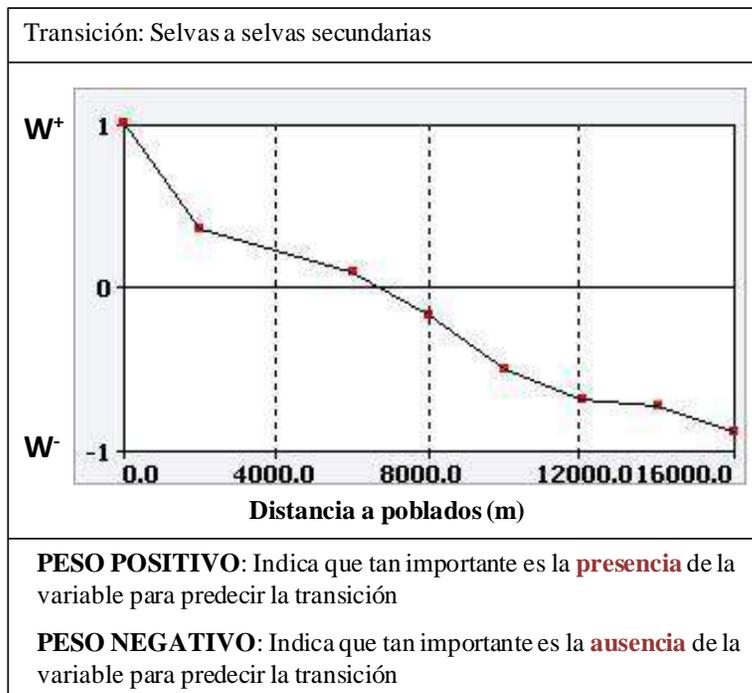


Figura 5. Ejemplo de los pesos de evidencia graficados. Cuando $W < 0$ la ausencia de la variable contribuye a la ausencia de la transición; $W = 0$ la variable no es relevante para explicar la transición; $W > 0$ la presencia de la variable contribuye a la presencia de la transición

Es igualmente importante mencionar que Dinamica EGO maneja dos tipos de variables: 1) variables estáticas que no sufren cambios a lo largo de la simulación (elevación, tipo de suelo, distancia a ríos, etc.) y 2) variables dinámicas que se modifican durante la simulación (i.e. mapa de distancia a cierta categoría de cobertura y uso del suelo). Las variables dinámicas se actualizan a cada paso de la simulación.

Para evaluar el efecto de las variables explicativas sobre las probabilidades de transición en el CBT-M se calcularon los pesos de evidencia para cada transición. Las variables estáticas utilizadas durante el proceso de calibración para explicar las transiciones de cambio de cobertura y uso de suelo fueron: 1) elevación, 2) pendiente, 3) áreas naturales protegidas, 4) distancia a ríos principales, 5) distancia a carreteras, terracerías y brechas (fecha 1990), 6) distancia a poblados (fecha 1990) y 7) tipo de suelo (ver Anexo 1). Las variables dinámicas fueron la distancia a diferentes tipos de cobertura y uso del suelo del mapa de 1993 (selvas, selvas secundarias, bosques secundarios y agrícola-pecuaria-forestal). Por otra parte, con el fin de determinar si los poblados con un número reducido de habitantes constituyen un factor importante para explicar los CCUS, se generaron dos variables de distancia a poblados, una que incluye únicamente a los poblados menores a 100 habitantes y otra que incluye a las localidades mayores a 100 habitantes.

Las variables explicativas utilizadas durante el proceso de calibración en el CBC-S fueron: 1) áreas naturales protegidas, 2) pendiente, 3) elevación, 4) distancia a carreteras, terracerías y brechas (fecha 1990), 5) distancia a poblados (fecha 1990), 6) tipo de suelo, y 7) distancia a diferentes tipos de cobertura y uso del suelo del mapa de 1993 (selvas, selvas secundarias, y agrícola-pecuario-forestal) (ver Anexo 2).

5.5.2.3 Análisis de correlación entre las variables

Dado que el método de los pesos de evidencia está basado en el Teorema Bayesiano de probabilidad condicional, la selección de las variables que serán utilizadas posteriormente en el proceso de modelado debe tomar en cuenta el supuesto de independencia condicional entre los pares de variables elegidas para explicar cada transición de CCUS.

Para verificar la independencia espacial de las variables explicativas este modelo utiliza el índice de Crammer (V), el cual opera con valores reales de áreas de sobreposición entre

diferentes categorías de dos mapas con el fin de validar la existencia de correlación o asociación espacial entre ambos mapas. Esto se realiza para todas las posibles combinaciones de pares de mapas respecto a un mismo tipo de transición y para todas las transiciones encontradas en el cálculo de la matriz de probabilidad de transición. Los valores de este índice varían entre cero y uno, 0 indicando variables totalmente independientes y 1 totalmente correlacionadas. El límite de tolerancia de correlación adoptado en este trabajo para el índice de Crammer fue de 0.45.

5.5.3 Simulación

Con base en las probabilidades de cambio de cobertura y uso de suelo, calculadas a través de los pesos de evidencia, y junto con las matrices de probabilidad de cambio se elaboran mapas de prospectivos de CCUS. Para que los cambios modelados tengan una configuración espacial realista, Dinamica EGO utiliza un autómata celular. La regla local del autómata celular empleado por Dinamica EGO permite manejar dos funciones de cambio: “*expander*”, que simula cambios por expansión (como la expansión de la frontera agrícola) y “*patcher*”, que crea nuevos parches de cambio (como desmontes aislados en un bosque).

La función de *expander* es un algoritmo dedicado la extracción o contracción de parches previos de cierta clase, en el cual las transiciones de un estado i a un estado j son realizadas cuando las vecindades contiguas de las celdas tienen un estado j . La función de *patcher* es un algoritmo que genera nuevos parches a través de un mecanismo de semillero, es decir, a partir de la selección de una celda denominada semilla, que crece mediante agregación de celdas vecinas similares en valor de probabilidad de cambio. El algoritmo de esta función realiza transiciones de un estado i a un estado j cuando las vecindades contiguas de celdas tienen un estado diferente de j (Almeida *et al.*, 2005). Las dos funciones emplean un mecanismo de selección estocástico. El algoritmo aplicado consiste en leer en primer lugar el mapa de cobertura y uso del suelo para seleccionar las celdas con las mayores probabilidades de transición y posteriormente colocarlas ordenadamente en una matriz de datos. La selección de las celdas se lleva a cabo aleatoriamente en la matriz en dirección de arriba a abajo. En un segundo paso, el mapa de cobertura y uso del suelo es leído nuevamente para ejecutar las transiciones seleccionadas. En caso de que la función de *expander* no ejecute la cantidad de transiciones requerida, se pasa a la función *patcher* un número residual de transiciones de

modo que el número total de transiciones siempre alcance el valor esperado. Dinamica EGO divide el mecanismo de selección de celdas dentro de este proceso y para cada transición se debe definir el porcentaje de transición ejecutada por la función *expand*, el porcentaje restante será para la creación de nuevos parches. Asimismo, para que los cambios modelados presenten patrones espaciales de cambio realistas, Dinamica EGO permite controlar el tamaño promedio, la varianza y la isometría de las dos funciones de cambio (ver Soares-Filho *et al.*, 2002).

La simulación de CCUS en las dos secciones del CBM-Mx se llevo a cabo tomando como base la matriz de transición anual (calibrada para el período 1993-2002). Para generar los mapas de probabilidades, y posteriormente elaborar los mapas de cobertura y uso del suelo prospectivos para el año 2007 (mapas simulados), se actualizó la información de los mapas de carreteras (fecha 2001) y poblados (fecha 2000). La simulación para las dos secciones del CBM-Mx se llevo a cabo tomando como fecha de inicio el mapa de cobertura y uso de suelo de 2002.

Para calcular los parámetros que utiliza Dinamica EGO para la expansión y creación de nuevos parches se sobrepusieron los mapas de 1993 y 2002 y se identificaron los fragmentos en que se dividieron los polígonos existentes en el 2002. Posteriormente, con el fin de identificar el tipo de cambio (expansión o parches) para cada polígono, se elaboró un programa utilizando el lenguaje de programación Arc Macro Language (AML) del SIG ArcInfo 8.2 (ESRI, 2002) (ver Anexo 3). Con este programa fue posible generar de manera automática los valores de cambio por expansión o parches para la totalidad de polígonos (ver Cuevas, 2005).

5.5.4 Validación

Para evaluar el desempeño del modelo prospectivo de cambio de cobertura y uso del suelo, se comparan los mapas simulados con los mapas observados (reales) de la misma fecha. Esta comparación se basa únicamente en los cambios ya que generalmente un mapa simulado y uno real presentan un alto grado de coincidencia debido a las áreas que no cambian (Paegelow y Camacho-Olmedo, 2005). Por otra parte, debido a que un mapa simulado no presenta una coincidencia espacial perfecta con los cambios observados, se han desarrollado métodos de

comparación difusa que permiten establecer cierto grado de flexibilidad al momento de realizar la comparación entre la localización de los cambios simulados y los reales. Para realizar esta comparación Dinamica EGO utiliza el método de similitud difusa de ventanas múltiples. Este método emplea una función de decaimiento constante dentro de un tamaño de variable de ventana. La prueba de similitud difusa se basa en el concepto de localización difusa, en la que la representación de una celda está influida por la celda en sí misma, y, en menor medida, por las celdas de su vecindario. En términos generales, este método consiste en definir un área de influencia (zona difusa) alrededor de los cambios simulados y tomar como coincidencia los cambios observados que entran dentro de esta área (Figura 6). Posteriormente, se procede de manera inversa y se aplica el área de influencia alrededor de los cambios observados y este mapa se compara con los cambios simulados.

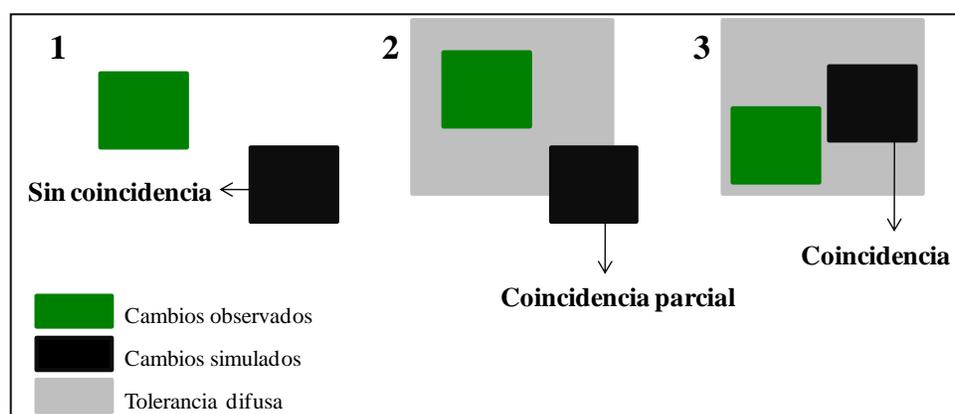


Figura 6. Ejemplo de la coincidencia espacial entre los CCUS simulados y observados utilizando la prueba de similitud difusa. 1) Sin tolerancia difusa no existe coincidencia espacial entre los CCUS simulados y los CCUS observados, 2) con tolerancia difusa se observa que un parche de cambio coincide parcialmente y 3) coincide totalmente con los CCUS observados.

La similitud total del par de mapas se calcula promediando los valores de similitud de las dos comparaciones para todas las celdas del mapa y se elige el valor mínimo de los dos valores de coincidencia obtenidos, para evitar la sobreestimación de los valores de similitud (ver Hagen, 2003). Esta operación se puede realizar con base en diferentes tamaños de ventanas.

Para evaluar el desempeño del modelo prospectivo de cambio de cobertura y uso del suelo en el CBC-T y en el CBC-S, se compararon los mapas simulados para el 2007 con los mapas de

INEGI de ese año. Esta comparación se realizó con el método de similitud difusa, utilizando ventanas de 1 a 21 celdas (píxeles).

5.5.5 Proyección de escenarios

Los modelos de simulación constituyen una aproximación heurística útil que permite evaluar el impacto potencial de diferentes trayectorias de CCUS (Soares-Filho *et al.*, 2002). En sentido estricto, los escenarios que se producen no son predicciones, sino representaciones de las posibles configuraciones de CCUS bajo ciertos supuestos. Dinamica EGO brinda herramientas para elaborar escenarios en los cuales los patrones de cambio pueden ser modificados debido a cambios ambientales y socioeconómicos (p.ej., nuevas políticas agropecuarias o de conservación).

Se proyectaron tres escenarios para el año 2030: 1) “escenario tendencial”, que asume que las tasas de probabilidad de cambio observadas durante el período 2002-2007 se mantienen constantes, 2) “escenario de conservación”, que supone una disminución en las tasas de probabilidad de deforestación y un aumento en la efectividad de las áreas naturales protegidas para frenar la deforestación. Para construir este escenario se incluyeron los polígonos de todas las áreas naturales protegidas presentes dentro de los dos corredores y 3) “escenario agropecuario” que asume las tasas de probabilidad de cambio aumentan como consecuencia de una intensificación en las prácticas agrícolas y ganaderas extensivas. Para construir estos escenarios se agregó el mapa de carreteras, terracerías y brechas actualizado a 2009. En la figura 7 se ilustra el esquema metodológico empleado este trabajo para llevar a cabo el proceso de modelado de cambio de cobertura y uso de suelo utilizando como ejemplo el CBT-M.

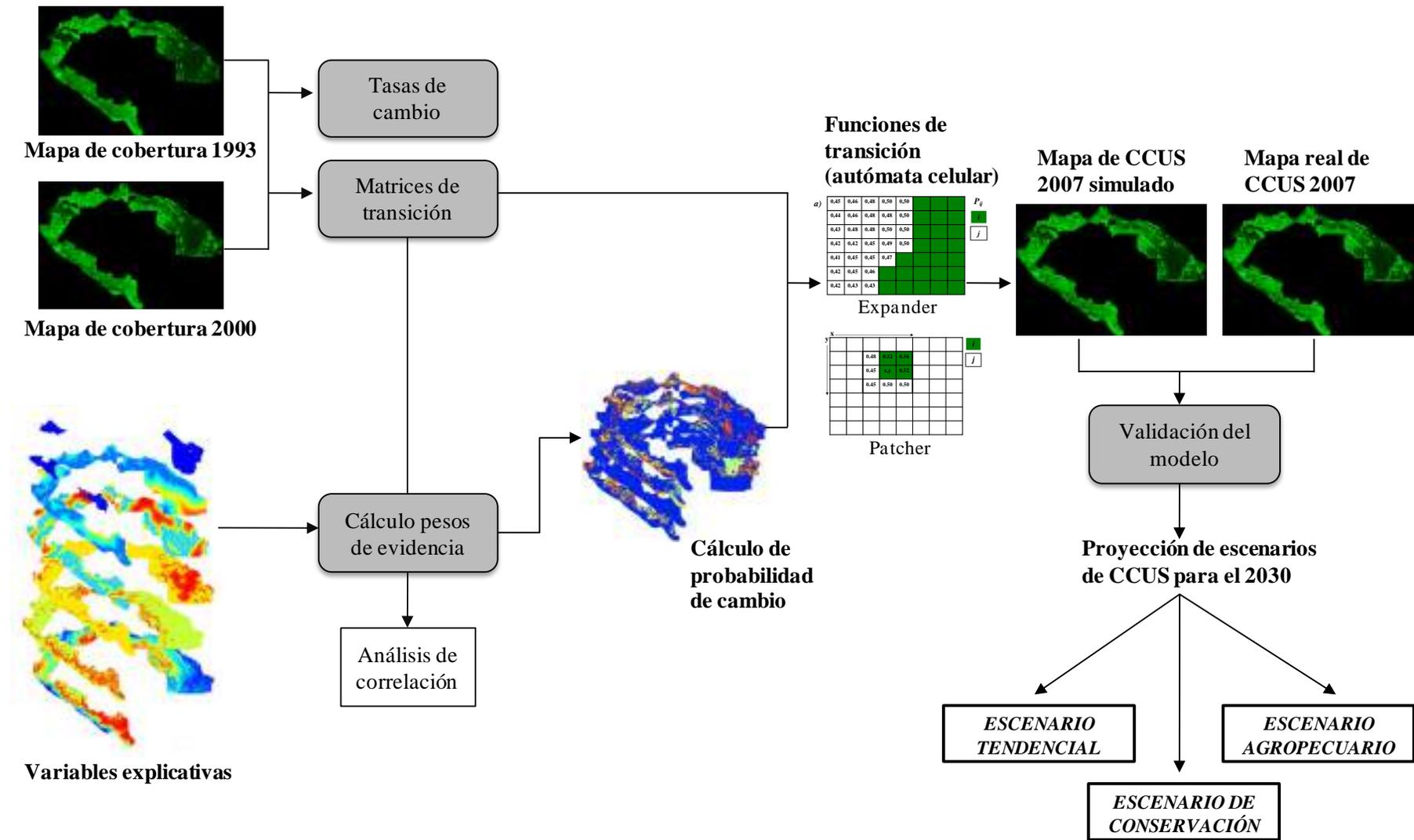


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de modelación de cambio de cobertura y uso del suelo empleado en este trabajo.

6. RESULTADOS

6.1 Tasas de cambio en la cobertura y uso de suelo en el CBT-M

Los procesos de cambio que han predominado en el CBT-M son la degradación de selvas y bosques y, en menor medida, la conversión de selvas a áreas agrícola-pecuaria-forestales (Figura 8). Los cambios observados entre 1993 y 2002 fueron, en general, más intensos que los registrados en el periodo 2002-2007.

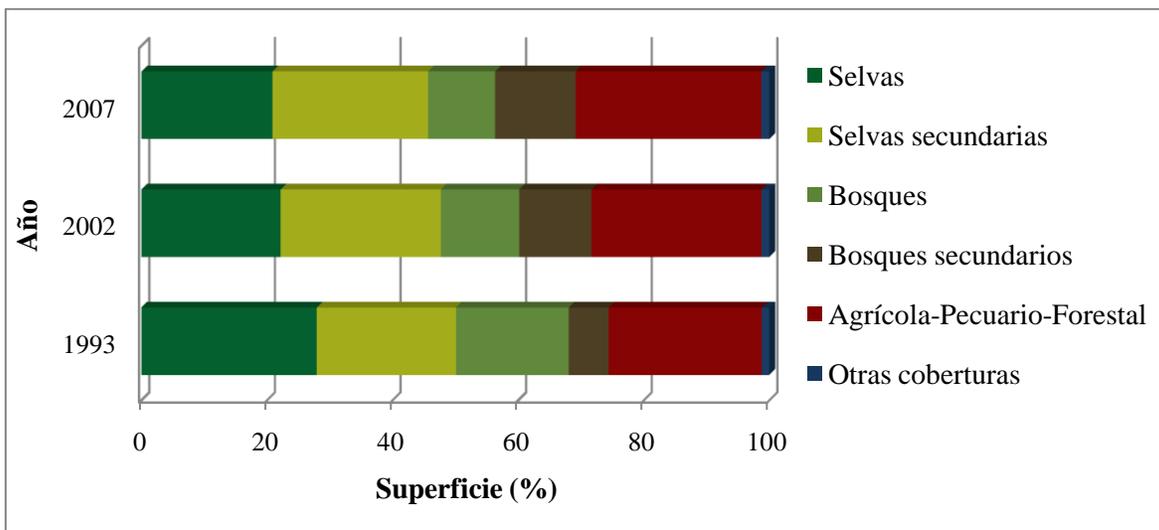


Figura 8. Cambios en la superficie de las diferentes categorías de cobertura y uso del suelo en el CBT -M para los años 1993, 2002 y 2007.

Entre 1993 y 2007 la superficie ocupada por selvas se redujo en un 7% y la ocupada por bosques en 7.3%, esto representó una pérdida combinada de 427 600 ha. En contraste, los bosques secundarios aumentaron de forma notoria en ambos períodos, prácticamente duplicando su extensión al pasar del 6% (190 200 ha) al 13% (383 400 ha) (Figura 7). Asimismo, las áreas agrícola-pecuaria-forestales (APF) tuvieron una ganancia de 155 200 ha (5.2%) en su superficie. Para el segundo período analizado (2002-2007) se observó una tendencia de disminución en las tasas de deforestación al pasar de -2.52%/año a -1.21%/año (Figura 8). De esta manera, el área de selva que se perdió fue de 39 000 ha, muy por debajo a la superficie perdida durante el primer período de análisis (171 400 ha). De igual manera, la disminución en la extensión de los bosques durante el segundo periodo (53 900 ha) fue cuatro veces menor que la calculada durante el primer período (163 300 ha). El contraste entre los

cambios observados durante los dos períodos evaluados fue también evidente en la tasa de cambio de los bosques secundarios ya que ésta disminuyó de 6.81%/año a 2.19%/año (Figura 9). Aún tomando en cuenta los cambios en dirección de la regeneración, los resultados muestran una transformación muy rápida a bosques secundarios y a áreas agropecuarias en el CBT-M.

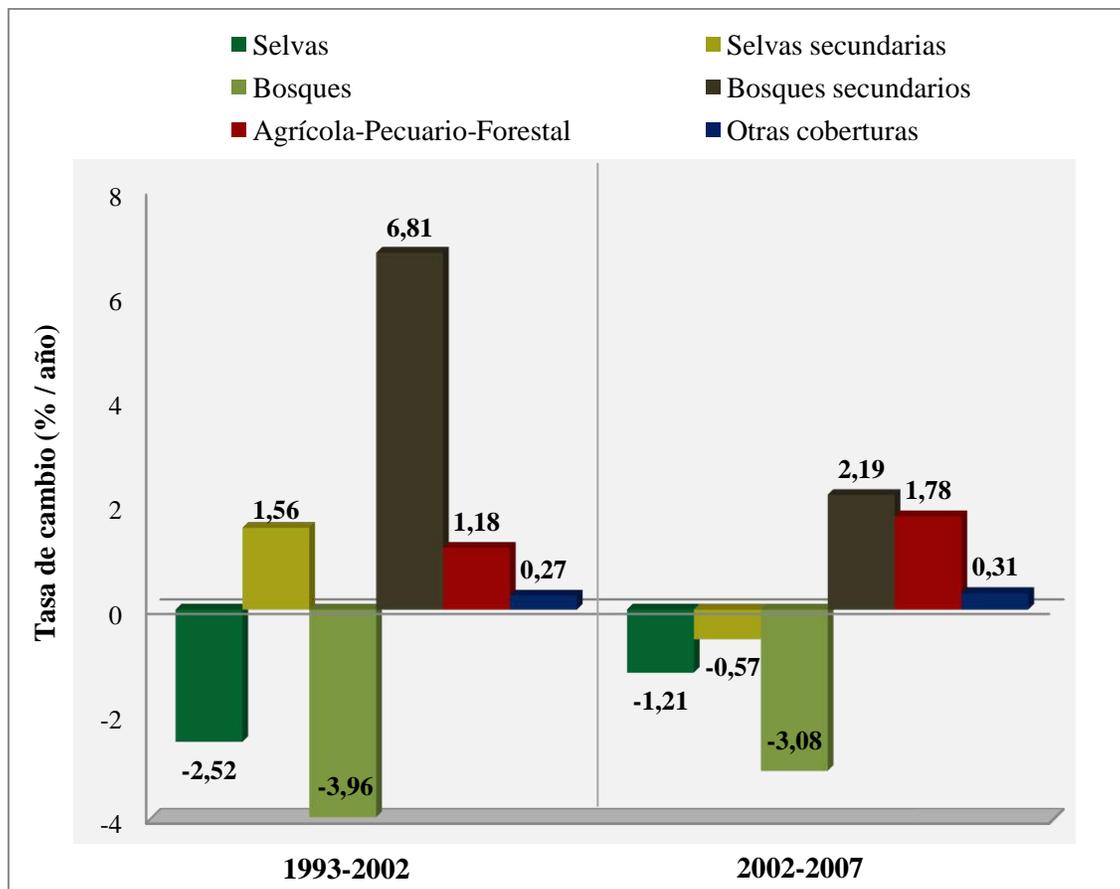


Figura 9. Tasas de cambio en el CBT-M para los períodos 1993-2002 y 2002-2007.

Al inicio del primer período evaluado (1993) las selvas tenían una amplia distribución en el CBT-M, destacando la región de la reserva de Montes Azules y sus alrededores, así como la región del Ocote (Figura 10). Sin embargo, para el año 2007 las selvas experimentaron una fuerte reducción, restringiéndose principalmente a remanentes asociados a la reserva de Monte Azules. Por otra parte, las principales áreas de bosque en el CBT-M en 1993 se localizaban en la Sierra Madre de Chiapas, abarcando las reservas de la Biosfera de La Sepultura y El Triunfo y la zona de protección forestal La Frailescana. Sin embargo, la distribución del bosque fue drásticamente modificada durante la década de los 90, y para el

año 2007 los fragmentos de bosques más importantes se ubicaban casi exclusivamente dentro de las Reservas de la Biosfera de El Triunfo y La Sepultura, ubicadas en la región de la Sierra Madre de Chiapas.

La superficie de las selvas y bosques secundarios han aumentado considerablemente dentro del CBT-M en las últimas décadas. En 1993 las selvas secundarias se concentraban al norte de la zona de la selva Lacandona con pequeños parches cerca de la reserva de Montes Azules, en gran parte de la Llanura Costera y en la zona del Soconusco. Sin embargo, para el año 2007, la cobertura de selvas secundarias presentó un gran incremento, sustituyendo grandes áreas originalmente cubiertas por vegetación primaria, principalmente en las zonas circundantes a la reserva de Montes Azules, El Ocote y sus alrededores. Las áreas agrícola-pecuaria-forestales en la década de los 90 se concentraban en la región noroeste del corredor y gran parte de la zona del Soconusco. Sin embargo, estas áreas experimentaron una rápida expansión para en el año 2007 llegar a ser comunes en todo el corredor con excepción de las áreas naturales protegidas.

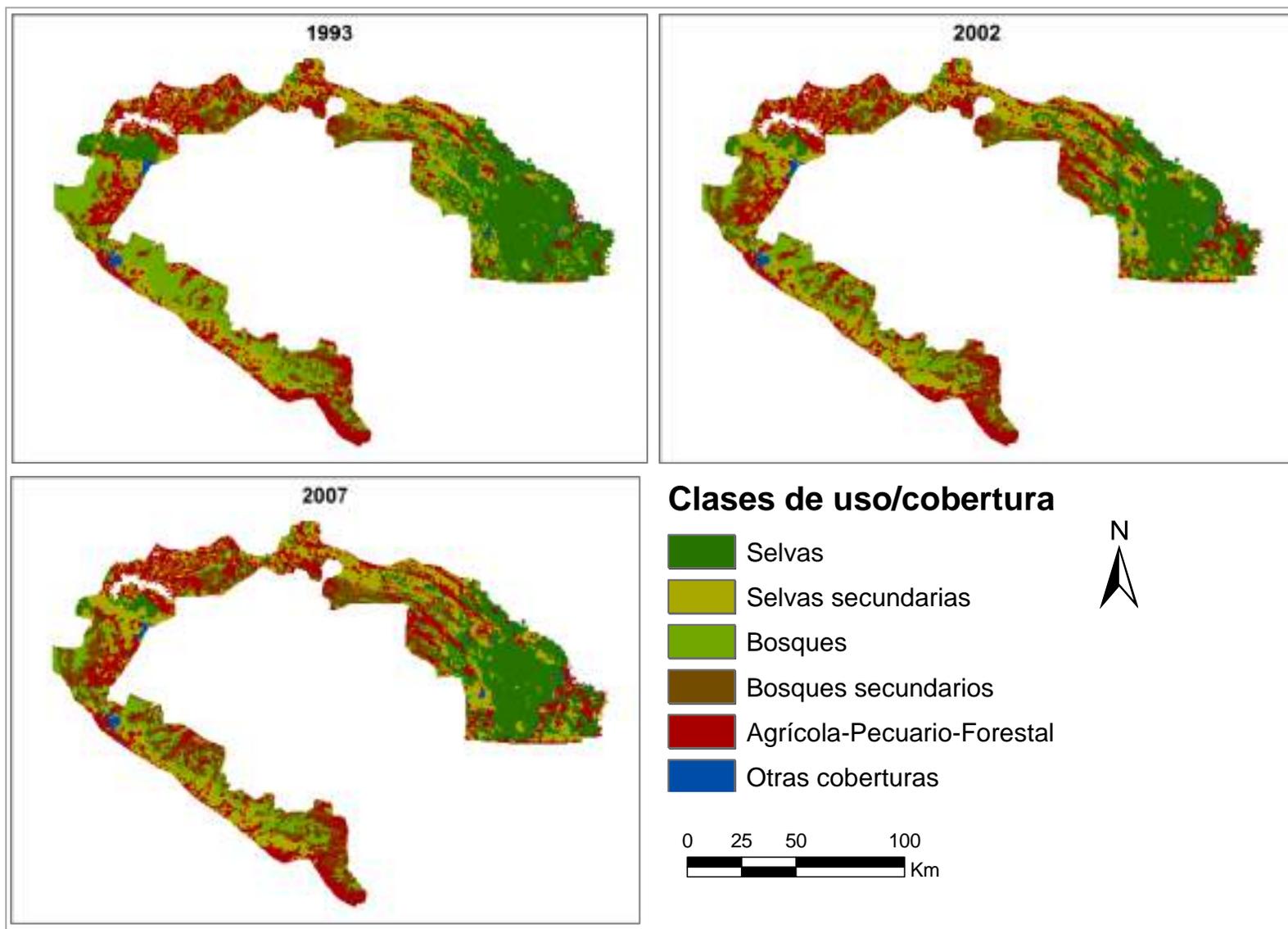


Figura 10. Secuencia de mapas que muestran los cambios en la cobertura y uso del suelo en CBT-M de 1993 al 2007.

6.2 Tasas de cambio en la cobertura y uso de suelo en el CBC-S

En el CBC-S, los cambios de cobertura y uso del suelo fueron menos severos que los observados en el CBT-M. No obstante, durante el primer período (1993-2002) las áreas agropecuarias aumentaron claramente, intensificándose la magnitud de este cambio durante el período 2002-2007 (Figura 11). La tasa de deforestación anual disminuyó al pasar de -0.76%/año a -0.48%/año para el segundo período de análisis esto a pesar de que, como se indicó anteriormente, existió una mayor tasa de conversión a áreas agropecuarias (Figura 12).

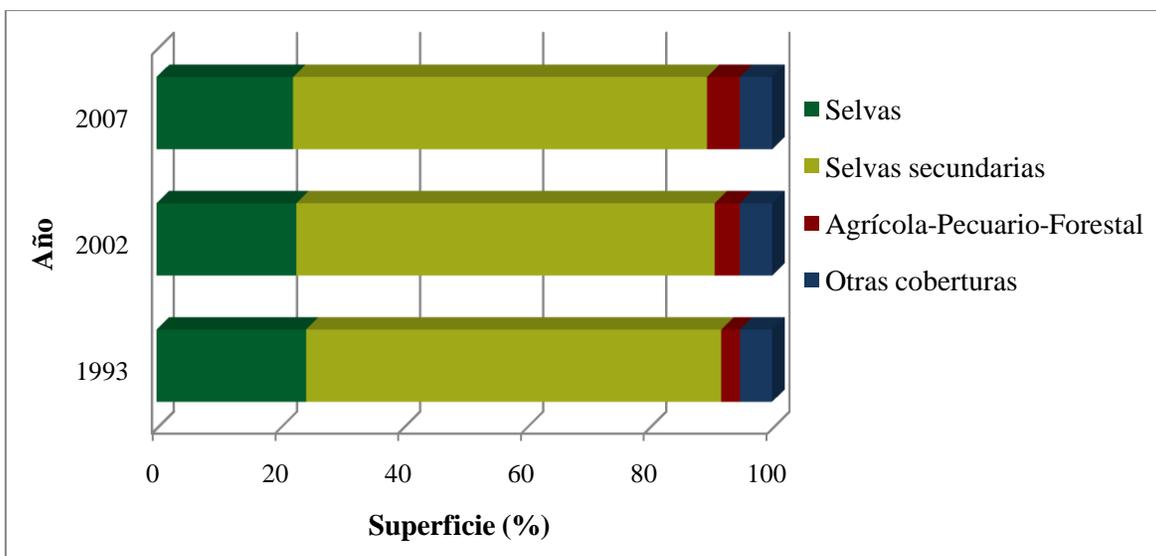


Figura 11. Cambios en la superficie de las diferentes categorías de cobertura y uso del suelo en el CBC -S para los años 1993, 2002 y 2007.

Gran parte del área del CBC-S está ocupada por selvas secundarias con diferentes grados de regeneración (vegetación secundaria herbácea, arbustiva o arbórea), y esta característica se mantuvo sin cambios marcados durante las tres fechas analizadas (Figura 13). Las extensiones más importantes de selva primaria se encuentran en la parte suroeste del estado de Campeche, en la región de la reserva de la Biosfera de Sian Ka'an y en la Zona Maya ubicada en el centro de Quintana Roo con algunos fragmentos de selva dispersos en otras zonas del corredor. Al igual que las selvas secundarias, la distribución de este tipo de vegetación a lo largo de los períodos analizados experimentó muy pocos cambios, lo que se refleja en las tasas de deforestación relativamente bajas.

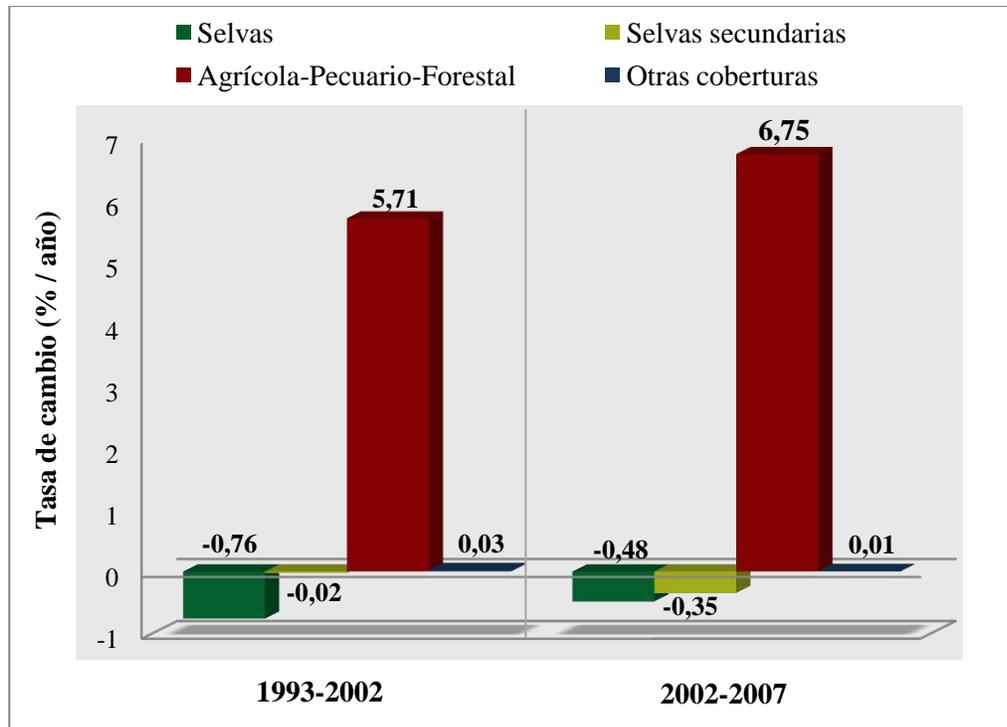


Figura 12. Tasas de cambio en el CBC-S para los períodos 1993-2002 y 2002-2007.

Las áreas agrícola-pecuaria-forestales son las que presentaron el cambio más notorio en su distribución espacial. En la primera fecha de análisis (1993), gran parte de estas áreas se concentraban en la región centro-norte del corredor, con algunos fragmentos aislados en sureste del estado de Campeche, principalmente las zonas circundantes a la Reserva de la Biosfera de Calakmul. Sin embargo, para el año de 2002 la extensión de las zonas agropecuarias aumentó hasta alcanzar las zonas aledañas a la reserva de Calakmul. En 2007, la presencia de las áreas APF aumentó también en la región noreste del corredor, así como en la parte centro-norte.

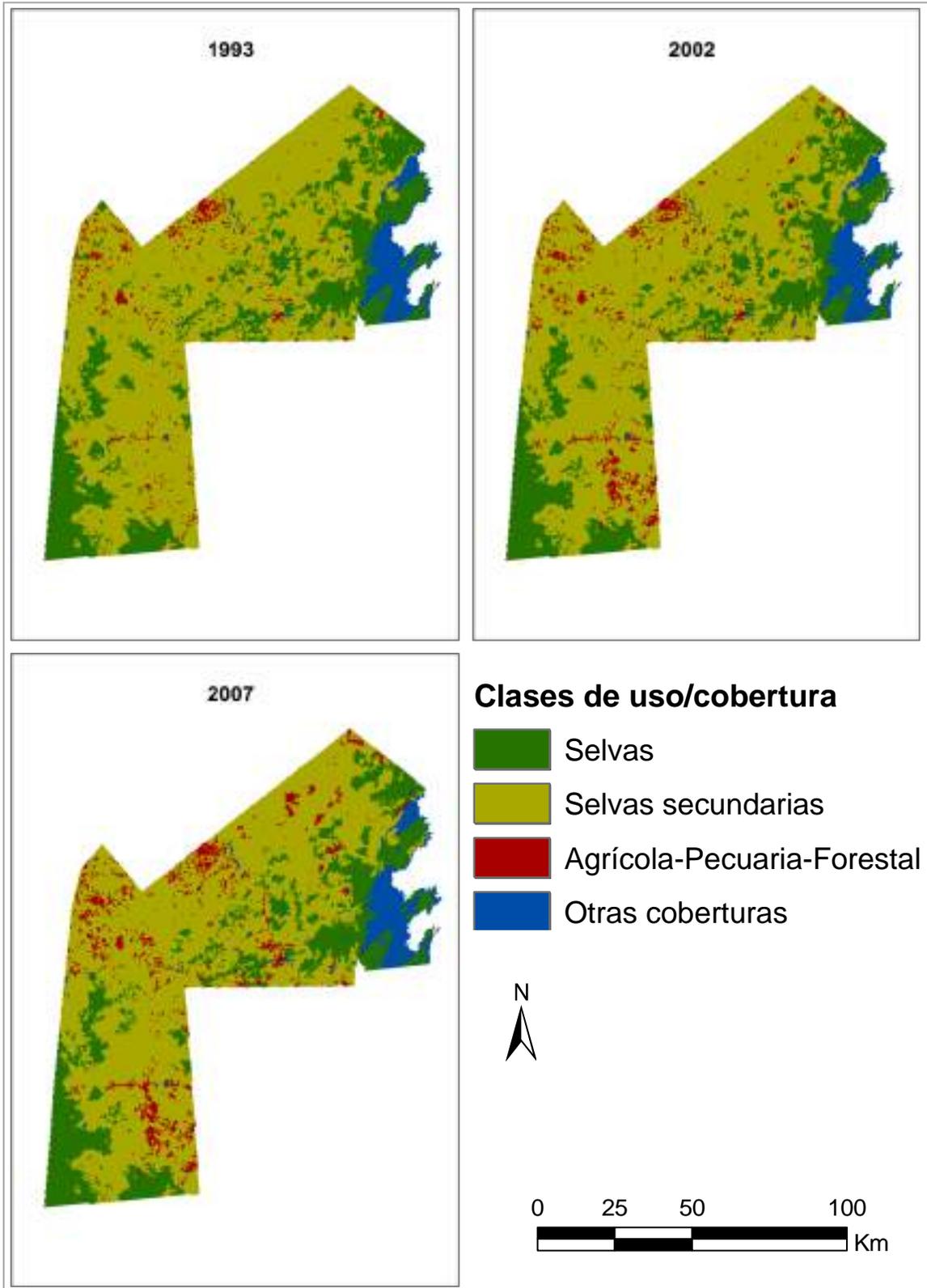


Figura 13. Secuencia de mapas que muestran los cambios en la cobertura y uso del suelo en el CBC-S de 1993 al 2007.

6.3 Escenarios de cambio en la cobertura y uso del suelo en el CBT-M

Se identificaron seis transiciones principales entre categorías de cobertura y uso del suelo para este corredor (Figura 14). De estas transiciones 3 fueron en la dirección de la deforestación, 2 en la de degradación y sólo 1 en la de regeneración. Las probabilidades de cambio anual más altas corresponden a las transiciones que se dan en dirección de la degradación. Se encontró que la mayor tasa de cambio durante el período 1993-2002 es la que va de bosques a bosques secundarios (0.0480), seguida por la transición de selvas a selvas secundarias (0.0249). En contraste, las menores probabilidades de cambio corresponden a la transición de bosque a agrícola-pecuario-forestal (0.0032) y selva a agrícola-pecuario-forestal (0.0037).

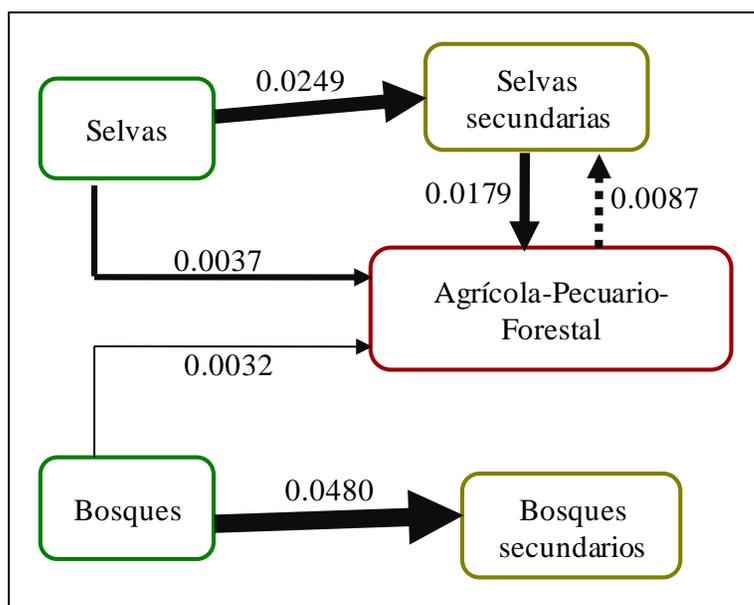


Figura 14. Principales transiciones entre categorías de cobertura y uso del suelo identificadas durante el período de calibración 1993-2002. Las líneas continuas indican las transiciones en dirección de la deforestación y la línea punteada indican la transición que se dan en dirección de la regeneración. Los valores indican la probabilidad de cambio.

6.3.1 Variables con mayor peso para explicar las transiciones entre las diferentes categorías de cobertura y uso del suelo

Se analizó la correlación para cada posible combinación de par de variables y de acuerdo al límite de tolerancia adoptado para el índice de Cramer ($V > 0.45$) se encontró un grado de correlación relativamente alto entre las variables: presencia de áreas naturales protegidas y distancia a terracerías ($V=0.53$) así como entre la presencia de las áreas naturales protegidas y

la distancia a poblaciones humanas ($V=0.55$). Sin embargo, dado que estas variables constituyen factores explicativos importantes no se excluyeron al momento de realizar las simulaciones y proyecciones de escenarios. Las variables explicativas seleccionadas para cada transición se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Variables seleccionadas para cada transición entre categorías de cobertura y uso del suelo. S = selvas, SS = selvas secundarias, APF = agrícola-pecuaria-forestal, B= bosques, BS = bosques secundarios.

Variable \ Transición	S a SS	S a APF	SS a APF	B a BS	B a APF	APF a SS
Elevación	•		•	•	•	•
Pendiente		•	•			
Áreas Naturales Protegidas	•	•	•	•	•	•
Distancia a ríos			•	•	•	•
Distancia a caminos pavimentados			•	•	•	•
Distancia a terracerías y brechas	•	•			•	
Distancia a localidades (>100)	•	•				•
Distancia a localidades (<100)	•	•	•	•	•	•
Tipo de suelo	•	•	•	•	•	
Distancia a S						•
Distancia a SS	•	•				•
Distancia a BS				•		
Distancia a APF	•	•	•		•	

Para las transiciones que implican degradación, la proximidad a poblados mayores a 100 habitantes, así como la cercanía a terracerías y brechas constituyen variables importantes para explicar el cambio de bosques y selvas primarias a vegetación secundaria. (Figura 15). Igualmente, la cercanía a vegetación secundaria o áreas previamente deforestadas es un factor que favorece el cambio. Por otra parte, las elevaciones bajas, que van de los 300 a los 900 m.s.n.m. representan las áreas con una mayor probabilidad de experimentar cambios de bosques y selvas primarias a vegetación secundaria. Al contrario, las áreas naturales

protegidas representan un factor que tiende a inhibir la degradación de la cobertura forestal madura (Figura 15).

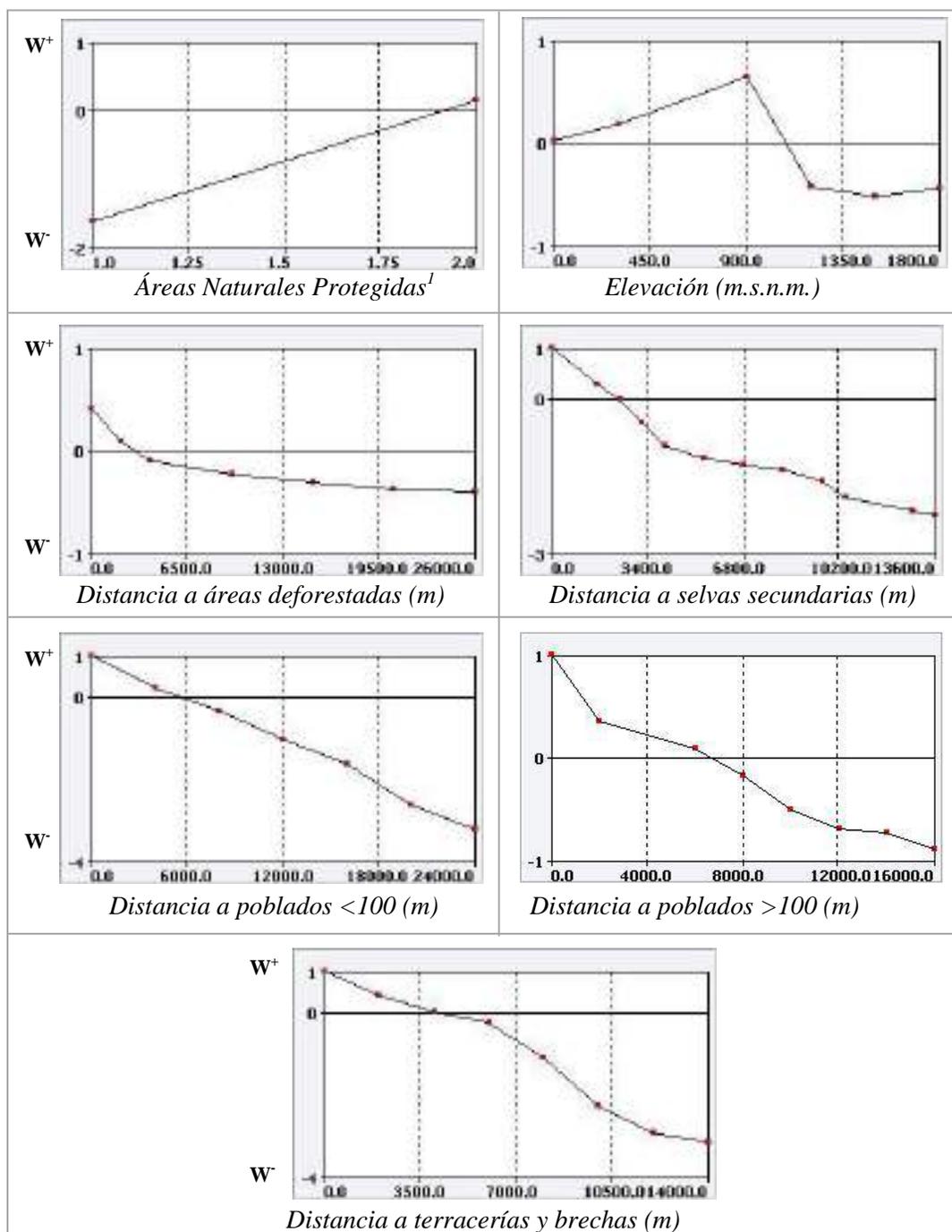


Figura 15. Pesos de evidencia calculados para la transición de selvas a selvas secundarias.
¹Donde 1 indica presencia y 2 ausencia.

En el caso de las transiciones que implican deforestación, la presencia de áreas naturales protegidas constituye uno de los factores más importantes para inhibir este cambio; al

contrario, la ausencia de áreas naturales protegidas favorece, en menor medida, la deforestación (Figura 16). Las pendientes bajas o moderadas (entre 0° y 3°) son las que presentan mayor probabilidad de ser deforestadas.

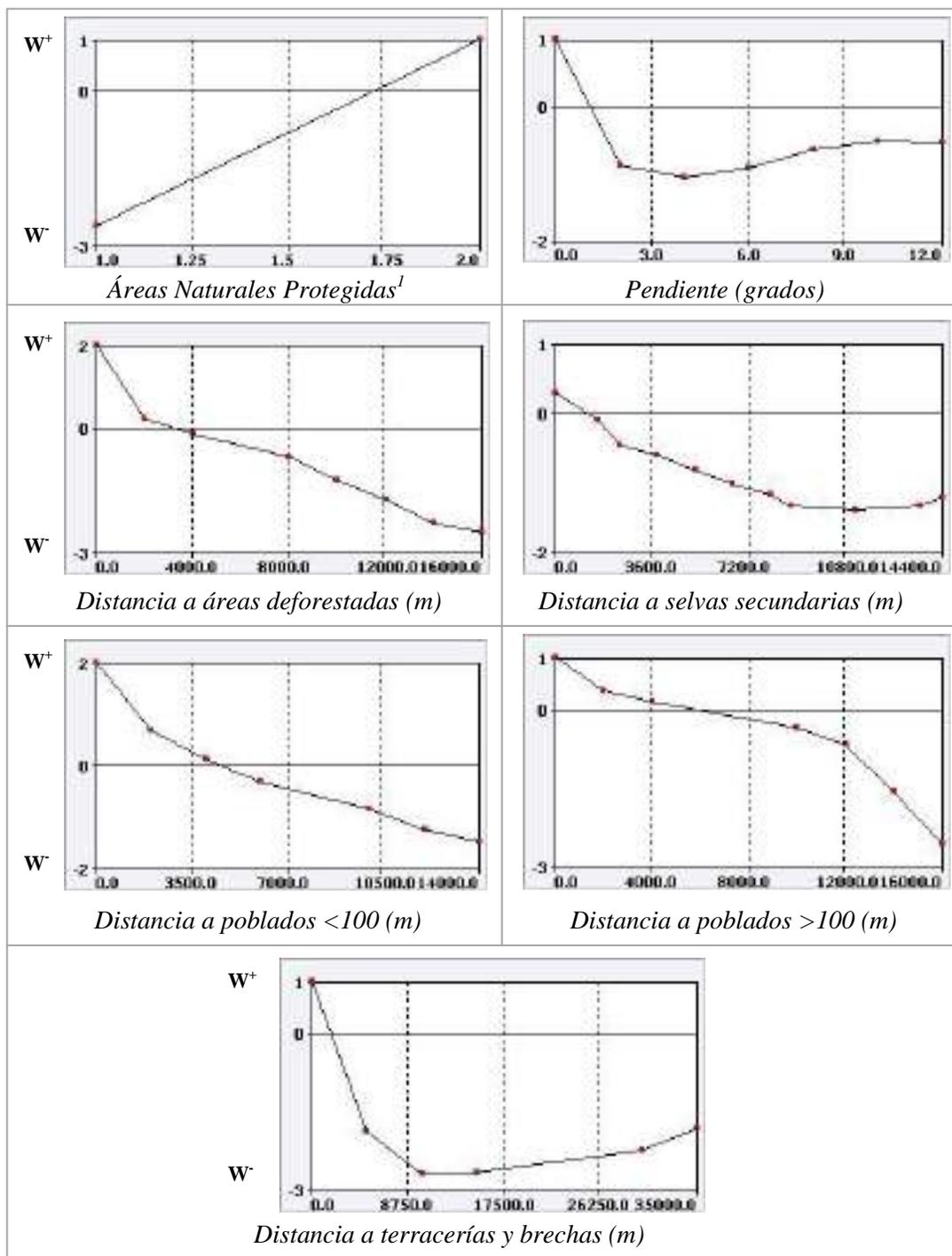


Figura 16. Pesos de evidencia calculados para la transición de selvas a agrícola-pecuaria-forestal.
¹Donde 1 indica presencia y 2 ausencia.

Un aspecto importante es que para estas transiciones la cercanía a terracerías y brechas fue identificada como uno de los factores explicativos más fuertes, en contraste con la distancia a caminos pavimentados, variable que no fue considerada para explicar estas transiciones por presentar un valor explicativo muy bajo y valores altos de correlación con las otras variables. De igual forma, la proximidad a poblados favorece la deforestación. Los valores de los pesos para los poblados mayores a 100 habitantes favorecen esta transición de forma más evidente que la distancia a poblados menores a 100, aún así, la cercanía a poblados aparece como factor que impulsa la deforestación. La cercanía a zonas previamente deforestadas (APF), constituye igualmente una variable que favorece de manera evidente la transición de selvas y bosques a áreas agropecuarias y forestales.

Para la transición de áreas agrícola-pecuaria-forestales a selvas secundarias, las áreas con mayor probabilidad de presentar regeneración son las que se encuentran lejos de poblados y de los caminos pavimentados (Figura 17).

Las elevaciones bajas (entre 0 y 600 m.s.n.m.) y la cercanía a ríos son factores que favorecen la regeneración de zonas agropecuarias a selvas secundarias. Asimismo, la presencia de áreas naturales constituye un factor favorable para la regeneración. Los mapas de probabilidades de cambio para las seis transiciones identificadas en el CBT-M se muestran en la Figura 18.

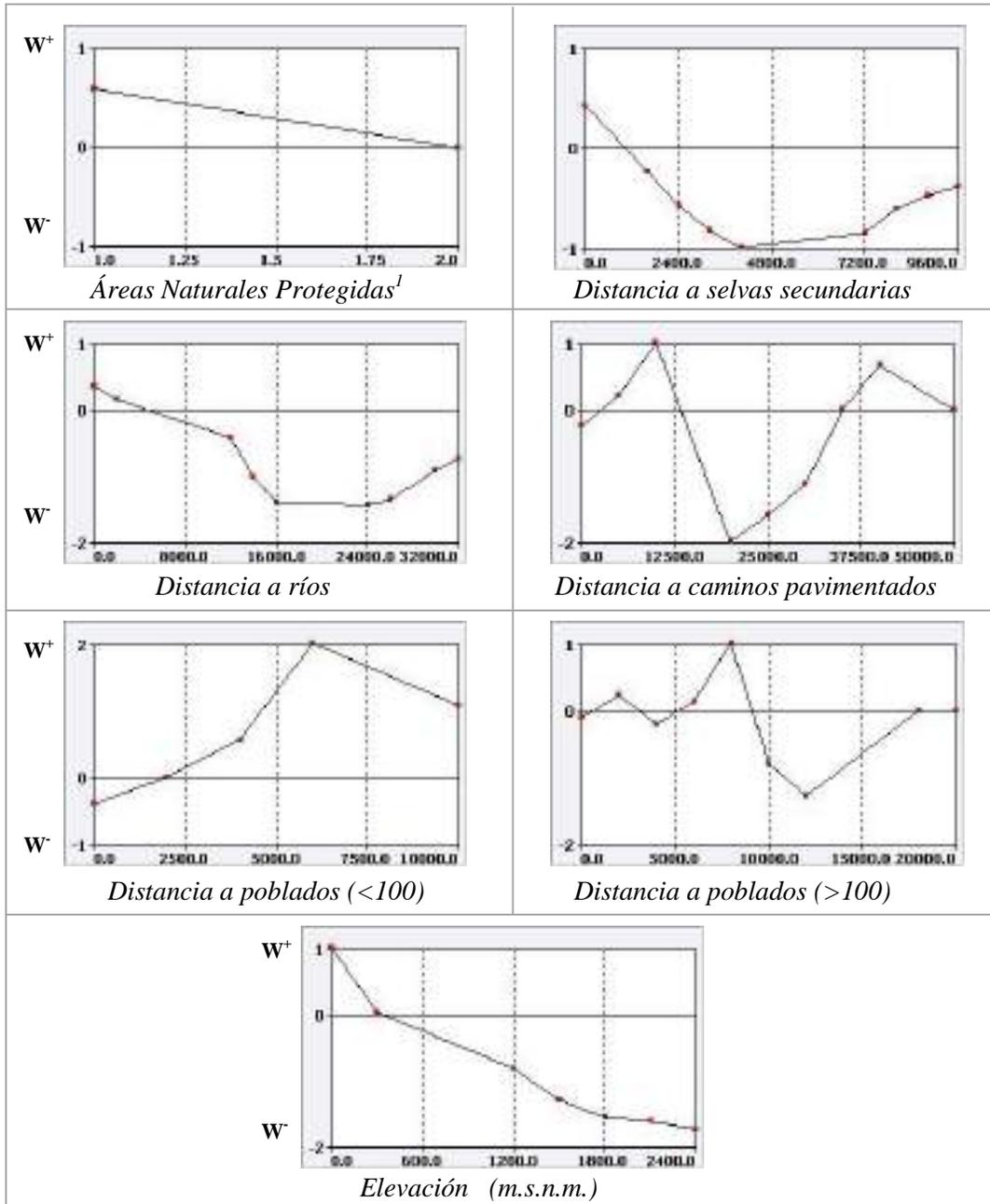


Figura 17. Graficas de los pesos de evidencia calculados para la transición de agrícola-pecuario-forestal a selva secundaria. ¹Donde 1 indica presencia y 2 ausencia.

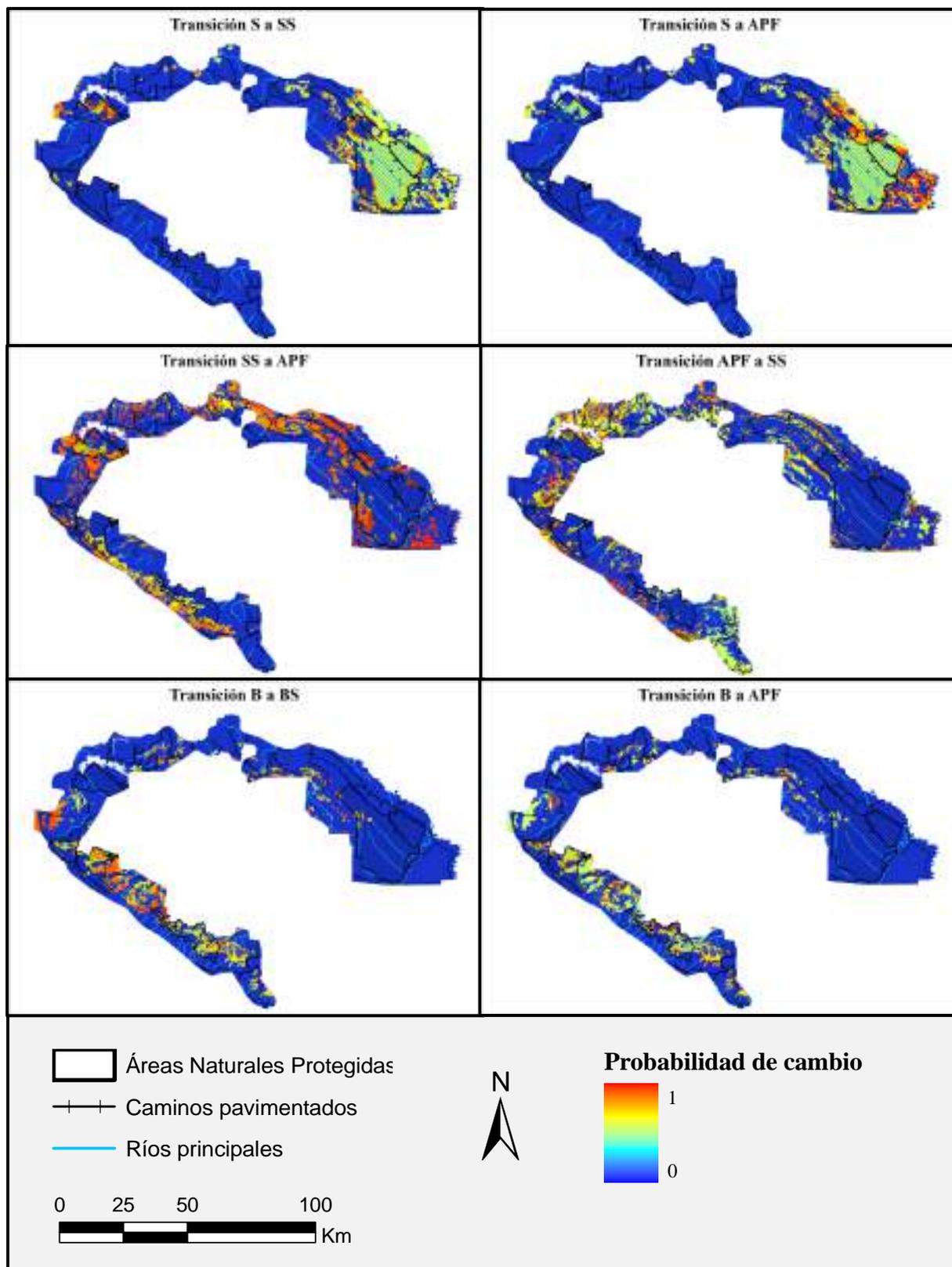


Figura 18. Mapas de la probabilidad de cambio para las seis transiciones identificadas en el CBT-M. Un valor de 0 indica que la probabilidad de cambio es nula y 1 que el cambio ocurre.

Para todas las transiciones la mayor proporción de cambios sucedió por expansión de áreas previamente deforestadas o que han sufrido algún tipo de degradación (Figura 19). Para el caso de las transiciones de selvas a selvas secundarias y selvas secundarias a agrícola-pecuario-forestal esto es particularmente notorio ya que el 89% y 83% de los cambios observados se dio por expansión y únicamente el 11% y 17%, respectivamente, se generó por creación de nuevos parches.

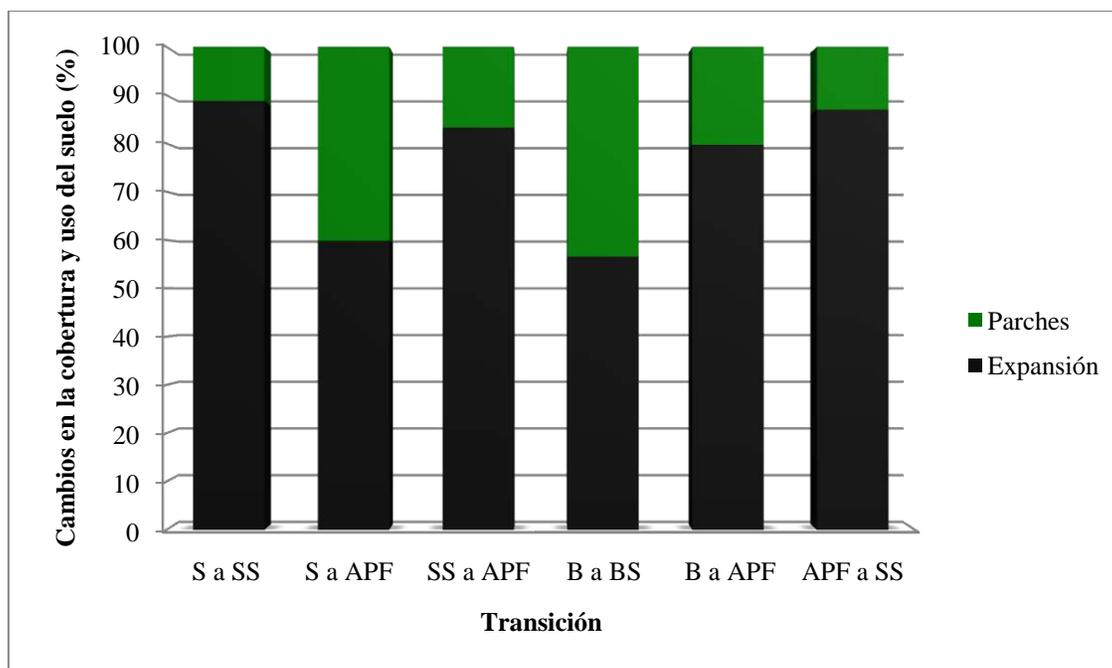


Figura 19. Porcentaje de los CCUS que se dieron por expansión o creación de nuevos parches en el CBT-M. S= selvas, SS= selvas secundarias, APF= agrícola-pecuaria-forestal, B= bosques, BS= bosques secundarios.

6.3.2 Desempeño del modelo de cambio de cobertura y uso del suelo para el CBT-M

Como resultado de la validación del modelo simulado para 2007 tomando como referencia el mapa de INEGI de 2007 se encontró que existió una coincidencia baja entre los cambios simulados y observados (10%) utilizando una ventana de 1x1 pixel (tolerancia nula). Sin embargo, esta comparación es muy rigurosa debido a que sólo las coincidencias exactas entre los cambios simulados y observados son consideradas correctas. Al contrario, empleando una ventana más grande (9x9 pixeles) se puede observar que la simulación alcanza un índice de similitud del 60% (Figura 20). Si se toma en cuenta que la resolución de los pixeles es de 1 km² y el radio de la ventana de búsqueda es la mitad de la resolución, este resultado indica que el modelo puede predecir los cambios de manera correcta en un 60%, posicionando el cambio dentro de una ventana con radio de búsqueda de 4.5 km² con referencia al cambio real. En la Figura 21 se puede comparar el mapa simulado para 2007, previamente calibrado para el período 1993-2002, con el mapa de INEGI del mismo año.

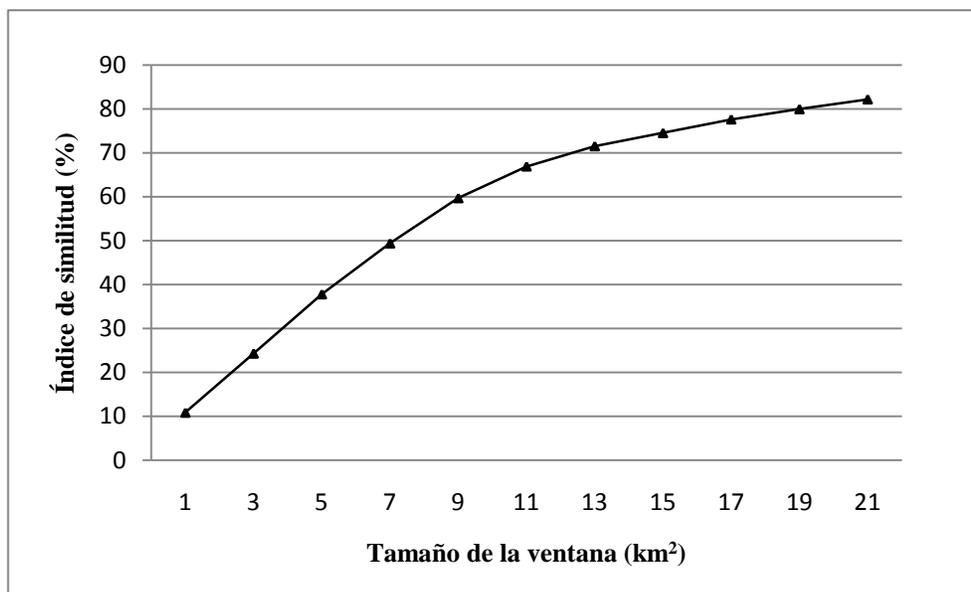


Figura 20. Índice de similitud entre el mapa simulado y el mapa real en función del tamaño de la ventana utilizada para hacer la comparación.

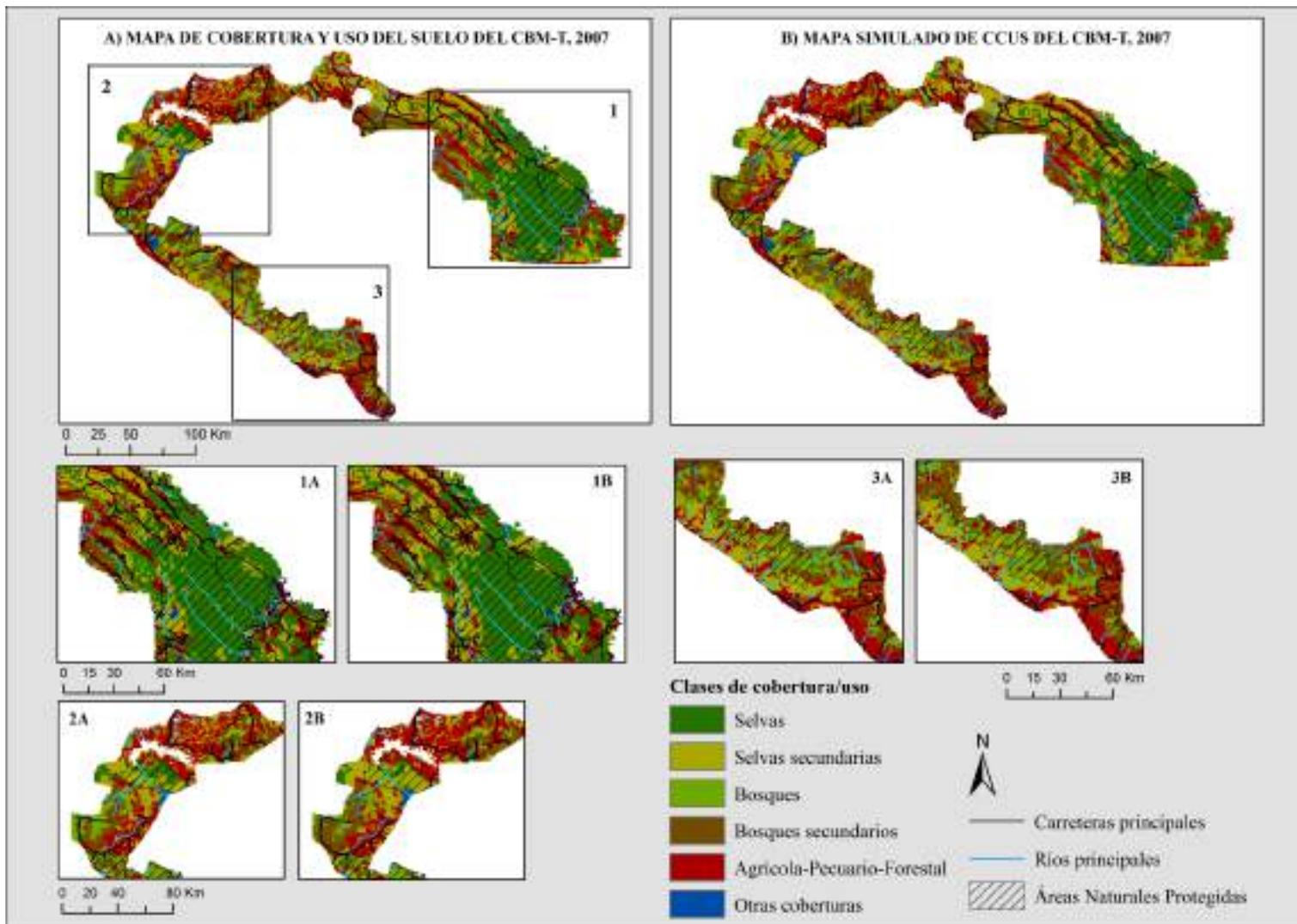


Figura 21. Mapa de cobertura y uso de suelo observado (2007) y simulado correspondientes al CBT-M. Los acercamiento corresponden a: A) la región de la selva Lacandona que abarca la reserva de la Biosfera de Montes Azules, B) la región oeste del CBT-M que abarca la Reserva de la Biosfera El Ocote y parte de la Reserva de la Biosfera de La Sepultura, y C) la reserva de la Biosfera de El Triunfo.

6.3.3 Proyección de escenarios de CCUS

El “escenario tendencial” parte del supuesto que las tasas de cambio calculadas en el período (2002-2007) se mantienen constantes en el futuro. Por otra parte, para el “escenario agropecuario” se asumió que las tasas de cambio calculadas durante el período 1993-2002 se mantendrían constantes hasta el 2030, ya que durante este período las tasas de cambio de selvas a selvas secundarias y bosques a bosques secundarios fueron muy elevadas y la tasa de deforestación fue mayor que la observada durante el período 2002-2007. Este escenario hipotético se generó para tener una aproximación de lo que podría suceder si volviera ocurrir una intensificación en las prácticas agrícolas y ganaderas extensivas. La mayor diferencia entre los dos escenarios se observa en la extensión de las selvas y bosques secundarios proyectada para el año 2030, ya que en el escenario agropecuario la expansión de estos tipos de cobertura vegetal llega a rebasar los límites de las áreas naturales protegidas, especialmente la reserva de Montes Azules y El Ocote (Figura 22). En el caso de la reserva de El Ocote la cobertura forestal madura es sustituida completamente por selvas secundarias. El modelo agropecuario indica que se presentaría también una reducción drástica en la superficie de los bosques templados. En este escenario también se observa una gran expansión de las áreas agrícola-pecuaria-forestales.

Por su parte el escenario de conservación resulta en una configuración espacial de la cobertura y uso del suelo muy similar a la observada en el mapa de 2007. Esto sugiere que una disminución en las tasas de cambio, así como un aumento en la efectividad de las áreas naturales protegidas, constituirían acciones con un impacto importante para disminuir el acelerado cambio de cobertura y uso de suelo que afecta a esta región (Figura 22).

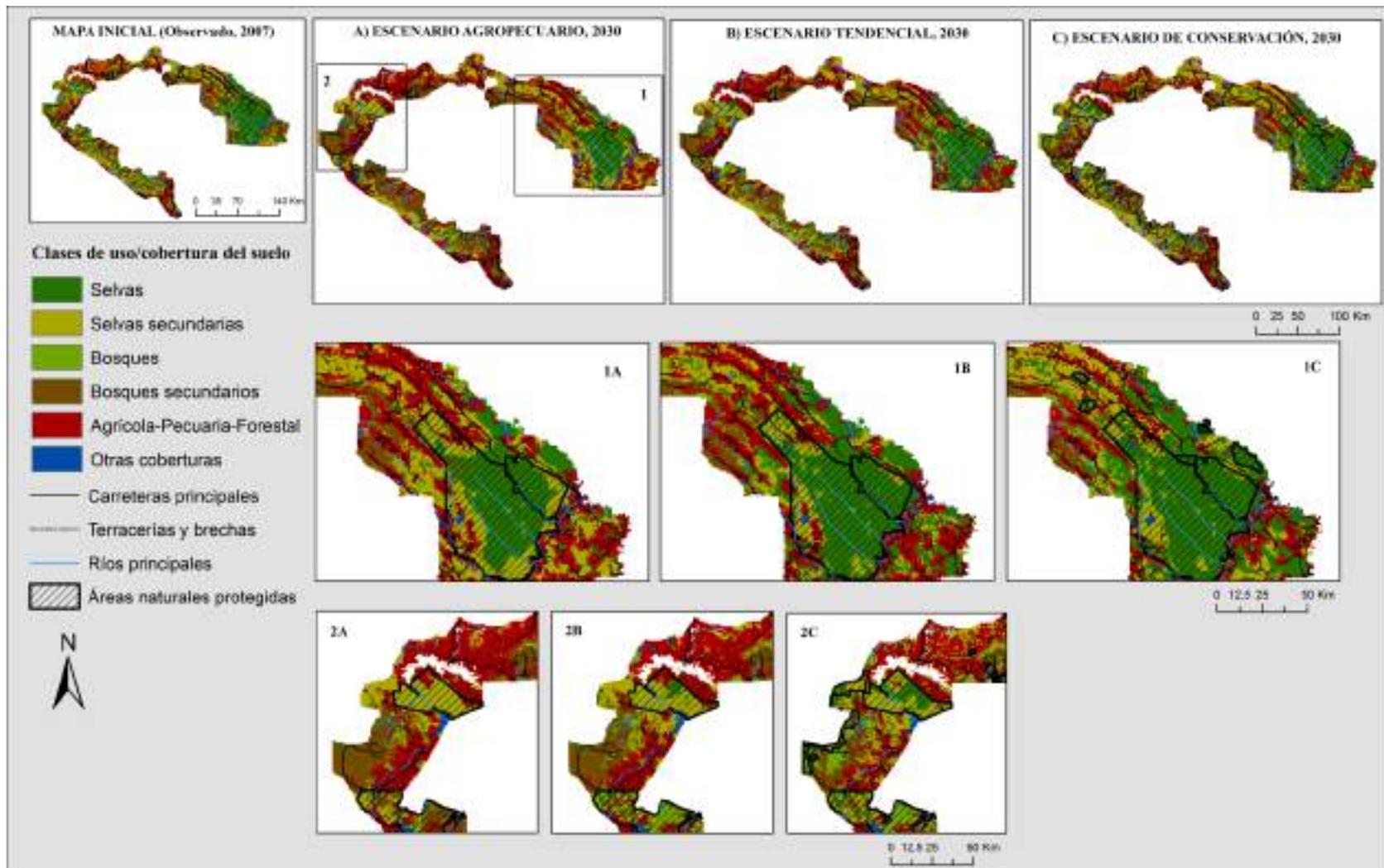


Figura 22. Mapas de los escenarios agropecuario, tendencial y de conservación para 2030. Los acercamientos corresponden a: 1) la región de la selva Lacandona y 2) la región oeste del CBT-M que abarca la Reserva de la Biosfera El Ocote y parte de la Reserva de la Biosfera de La Sepultura.

6.3.4 Magnitud de los cambios de cobertura y uso de suelo bajo los tres escenarios proyectados

Los CCUS más drásticos se presentan en el escenario agropecuario, ya que este predice una pérdida del 48% (300 800 ha) en la extensión de selvas para el 2030 (Figura 23).

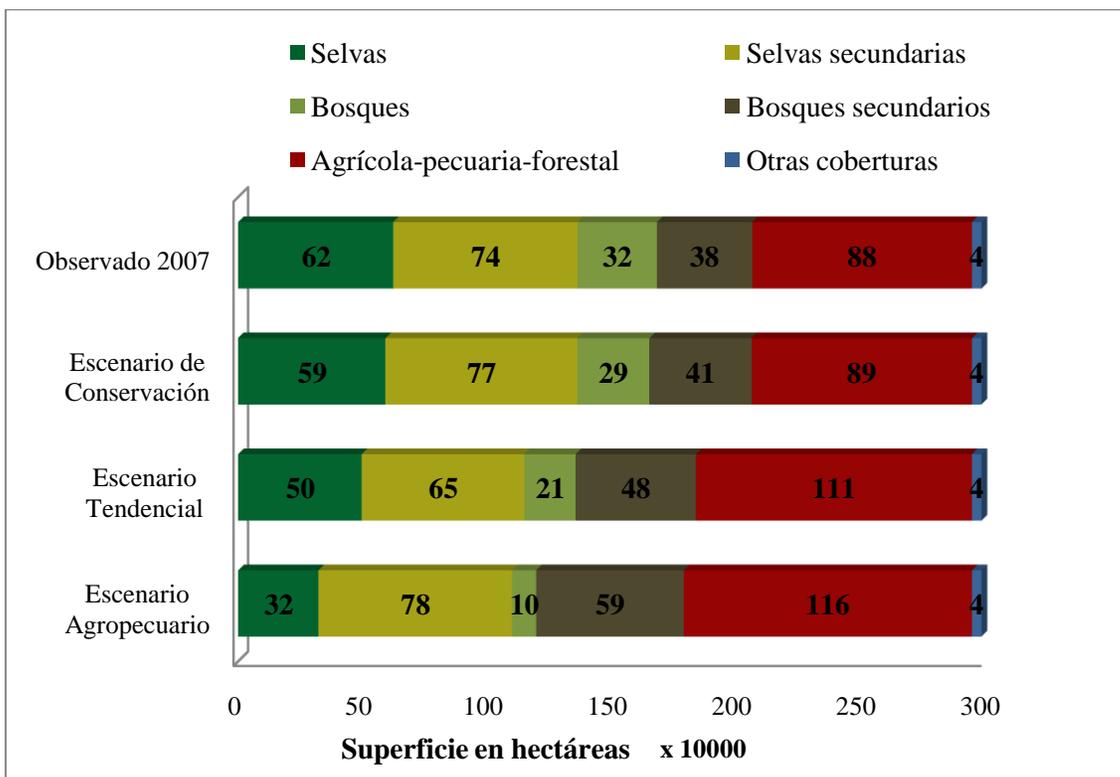


Figura 23. Superficie de cada categoría de cobertura y uso del suelo en 2007 y proyectada para los tres escenarios del 2030.

Asimismo, la superficie de bosques presentaría una pérdida de 220 900 ha y la superficie de las áreas agrícola-pecuaria-forestales presentaría un incremento importante, pasando de 882 000 ha en 2007 a $1,16 \times 10^6$ ha en 2030. El escenario tendencial también proyecta cambios que afectarían de manera importante la extensión de selvas y bosques, aunque no tan drásticamente como los que estima el escenario agropecuario. En cuanto a las áreas agrícola-pecuaria-forestales, de seguirse las tendencias asumidas por este mismo escenario, su extensión presentaría una ganancia de 226 800 ha. En el escenario de conservación se observa que, si bien se siguen presentando cambios en dirección de la degradación y deforestación, su magnitud es muy pequeña. Por ejemplo, en el caso de las selvas, se esperaría una pérdida de

31 400 ha. Asimismo, el incremento de las áreas APF sería también muy bajo, ya que correspondería a un aumento de 3 200 ha en 23 años.

6.4 Escenarios de cambio en la cobertura y uso del suelo en el CBC-S

Para esta región del corredor se identificaron cuatro transiciones principales (Figura 24). Dos de las cuatro transiciones identificadas se dan en la dirección de la regeneración, una en la de la deforestación y la restante en la de la degradación. La mayor probabilidad de cambio durante este período corresponde a la regeneración de áreas agrícola-pecuaria-forestales a selvas secundarias (0.0155), mientras que la transición en dirección de la deforestación (SS a APF) tiene una probabilidad menor (0.035). La menor probabilidad de cambio corresponde a la transición de selvas secundarias a selvas (0.0010).

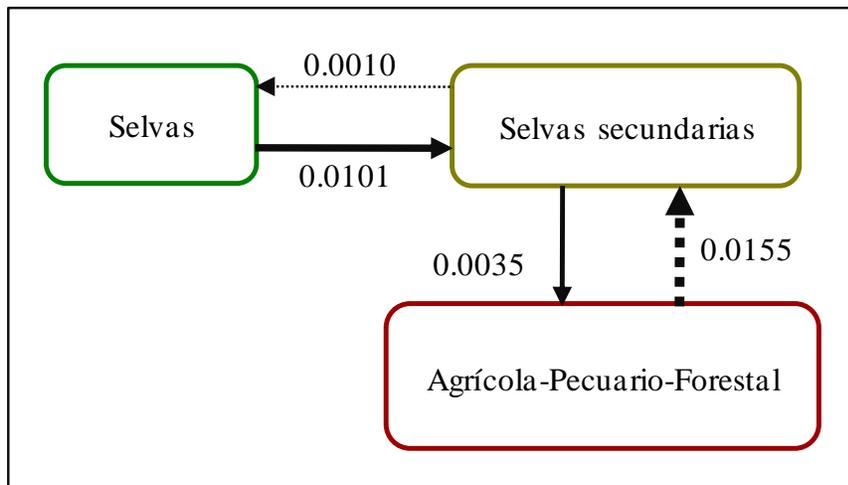


Figura 24. Principales transiciones entre categorías de cobertura y uso del suelo identificadas durante el período de calibración 1993-2002. Las líneas continuas indican las transiciones en dirección de la deforestación y las líneas punteadas indican las transiciones que se dan en dirección de la regeneración. Los valores indican la probabilidad de cambio.

6.4.1 Variables con mayor peso para explicar las transiciones entre las diferentes categorías de cobertura y uso del suelo

Los resultados de los análisis de correlación entre las variables muestran que, al igual que con el modelo para la región del CBT-M, existe una similitud entre los efectos que las áreas naturales protegidas y la distancia a terracerías ($V=0.55$) tienen sobre los CCUS así como entre los efectos de las áreas naturales protegidas y la distancia a poblados ($V=0.63$). Sin

embargo, como en el caso anterior, estas variables no se excluyeron del análisis dado su importante valor explicativo. Las variables explicativas seleccionadas para cada transición se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Variables seleccionadas para cada transición entre categorías de cobertura y uso del suelo. S = selvas, SS = selvas secundarias, APF = agrícola-pecuaria-forestal.

Transición Variable	S a SS	SS a S	SS a APF	APF a SS
Elevación		•		•
Pendiente	•	•	•	
Áreas Naturales Protegidas	•	•	•	•
Distancia a caminos pavimentados	•	•	•	•
Distancia a terracerías y brechas	•		•	•
Distancia a terracerías y brechas2			•	
Distancia a localidades (>100)		•		
Distancia a localidades (<100)	•		•	•
Tipo de suelo	•	•	•	•
Distancia a S		•		
Distancia a SS	•			•
Distancia a APF	•	•	•	

Los pesos de evidencia para la transición que implica degradación (selvas a selvas secundarias) muestran que la proximidad de áreas previamente deforestadas o selvas secundarias favorece en gran medida este cambio de cobertura (Figura 25). De igual forma, la cercanía a caminos pavimentados y a terracerías y brechas constituye un factor importante que contribuye a la degradación de las selvas.

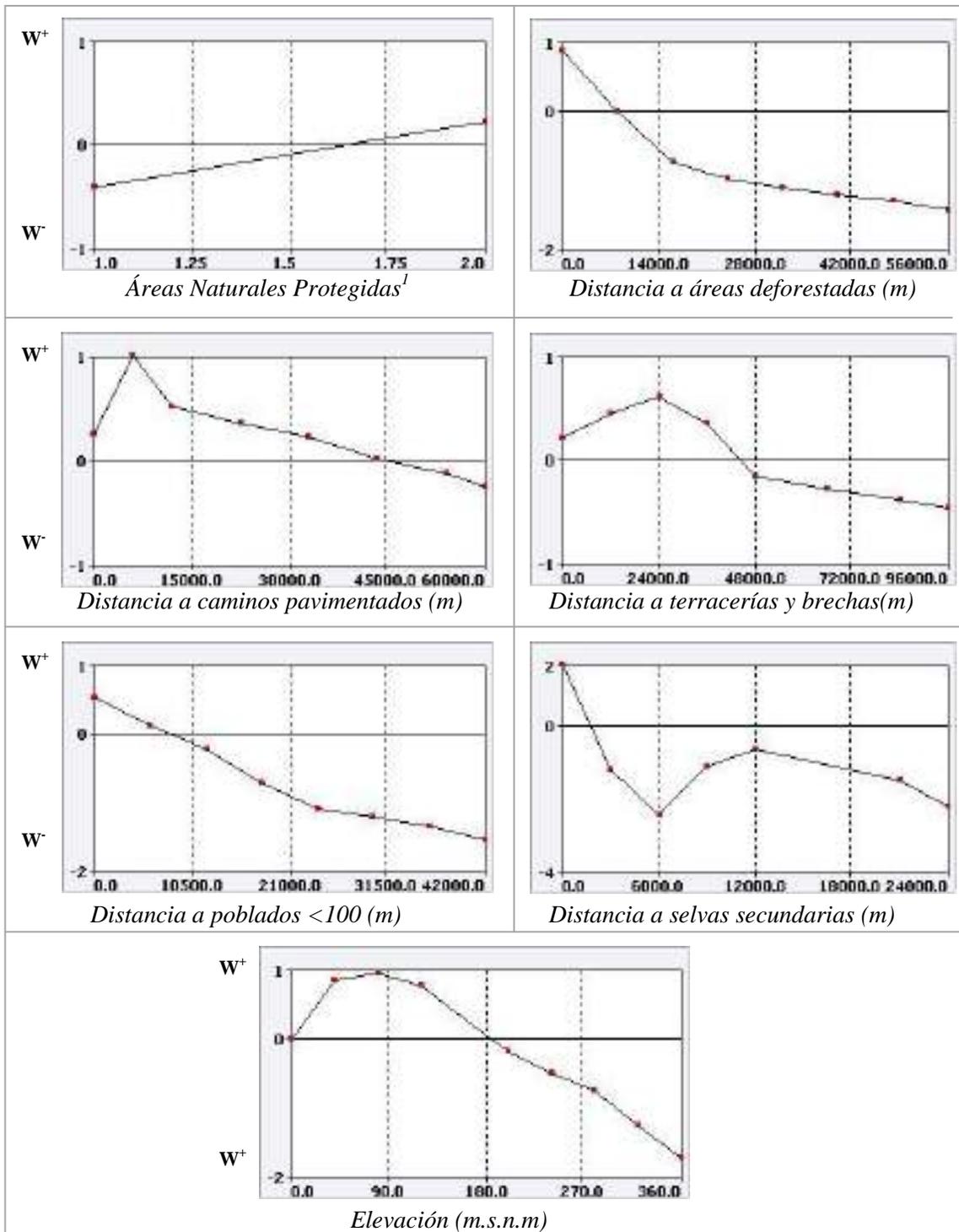


Figura 25. Graficas de los pesos de evidencia calculados para la transición de selvas a selvas secundarias. ¹Donde 1=presencia y 2=ausencia.

Las elevaciones bajas, entre 40 y 130 m.s.n.m. son las áreas con mayor probabilidad de experimentar cambios. La presencia de áreas naturales protegidas tiende a inhibir la degradación, al contrario en su ausencia se favorece la conversión de selvas a selvas

secundarias. La cercanía a áreas agrícola-pecuaria-forestales favorece fuertemente la transición que involucra deforestación, y lo mismo sucede con la proximidad a poblados y carreteras, que resulta uno de los factores más importantes que se asocian con la pérdida de la cobertura forestal (Figura 26). Las selvas localizadas en sitios con pendientes bajas son las que presentan mayor probabilidad de conversión.

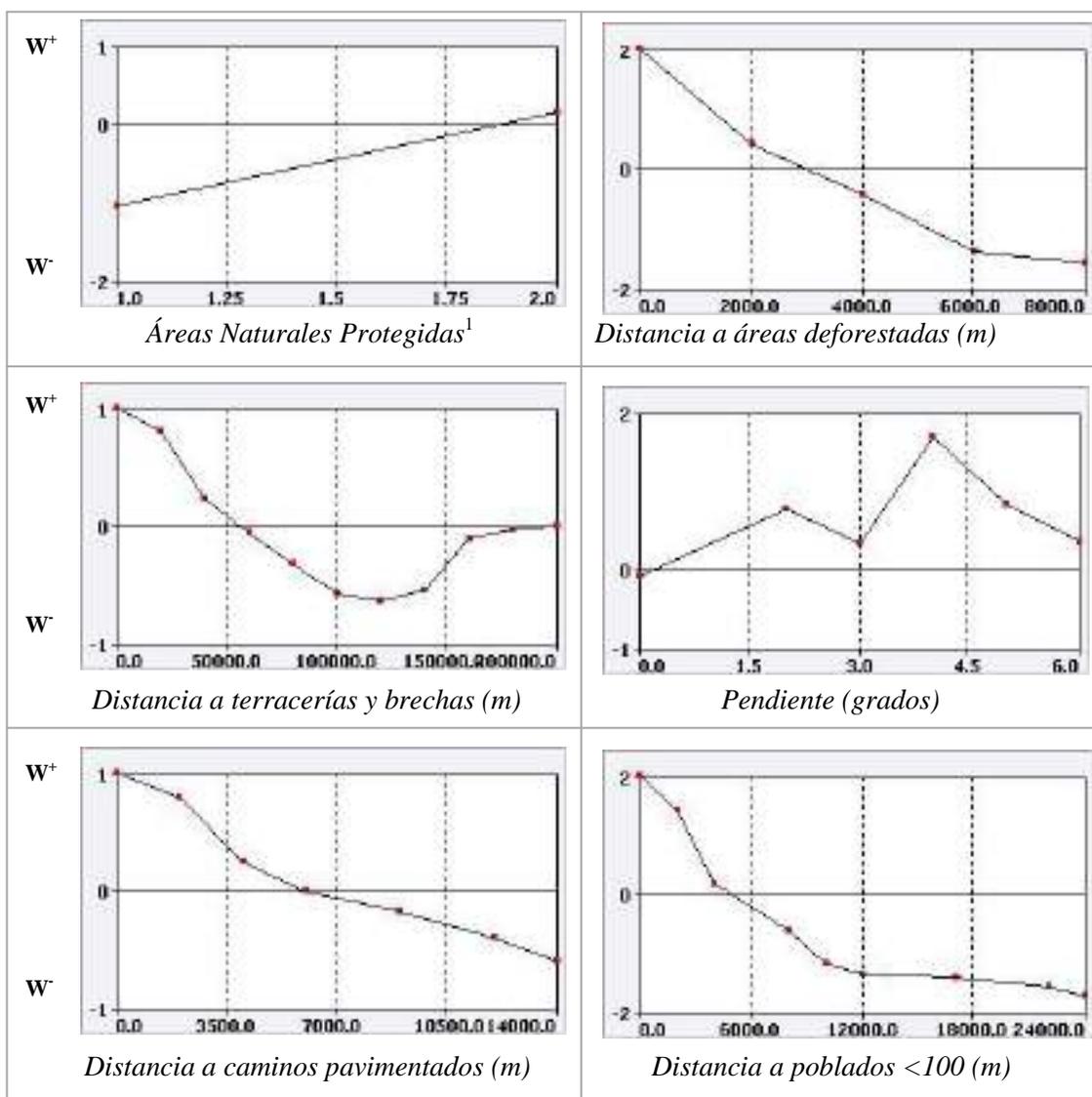


Figura 26. Pesos de evidencia calculados para la transición de selvas secundarias a agrícola-pecuaria-forestal. ¹Donde 1=presencia y 2=ausencia.

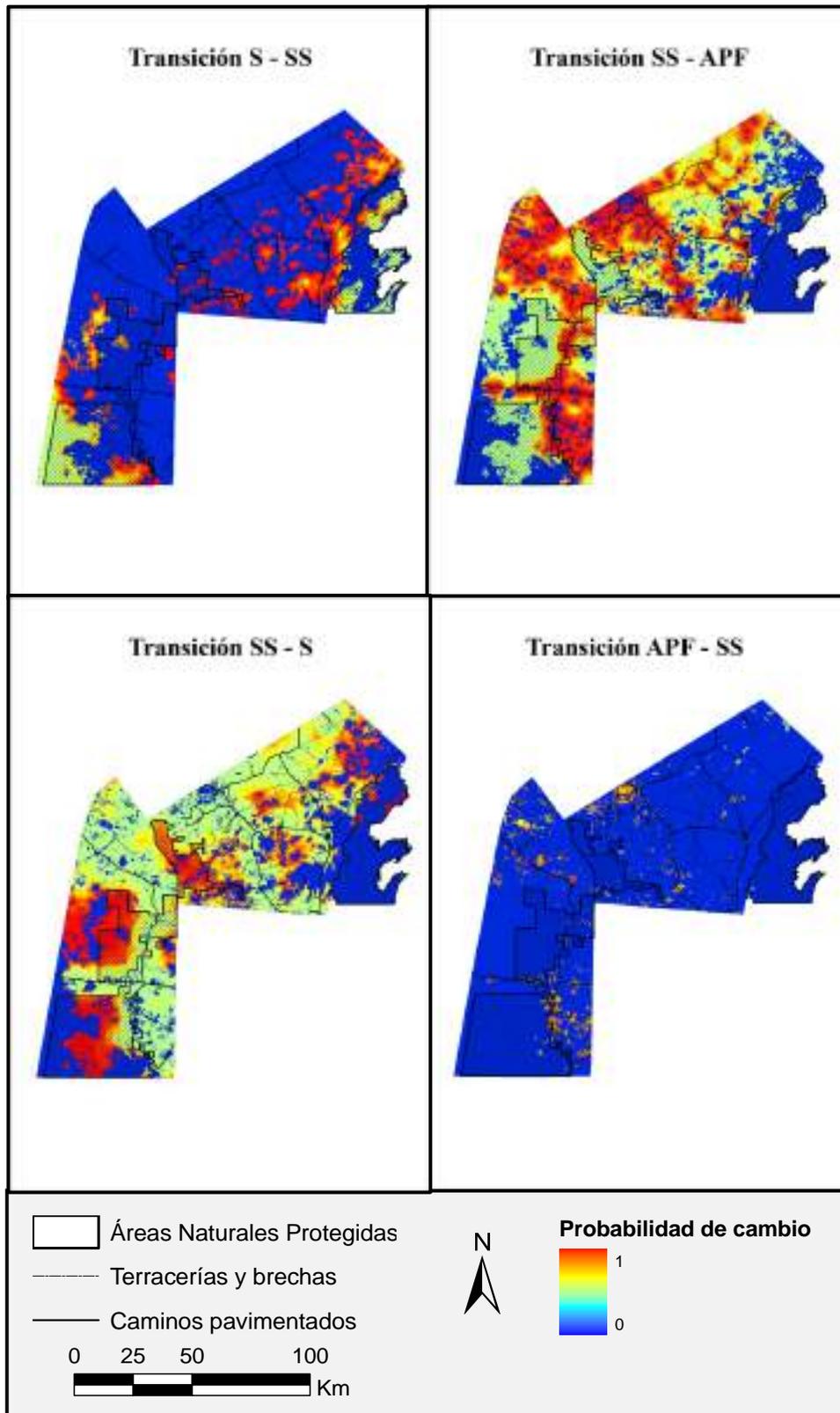


Figura 27. Mapas de probabilidades de cambio para las cuatro transiciones identificadas en el CBC-S. Un valor de 0 indica que la probabilidad de cambio es nula y 1 que el cambio ocurre.

Al igual que con la transición de selvas a selvas secundarias, la presencia de áreas naturales protegidas disminuye la probabilidad de deforestación. En el mapa de probabilidades de cambio para la transición que involucra deforestación los alrededores de la Reserva de la Biosfera de Calakmul y la zona norte de Campeche resaltan como las áreas con la mayor probabilidad de experimentar este cambio (Figura 27).

Para las transiciones que favorecen la regeneración, la presencia de áreas naturales protegidas aumenta la probabilidad de este cambio, mientras que en su ausencia la probabilidad es menor (Figura 28).

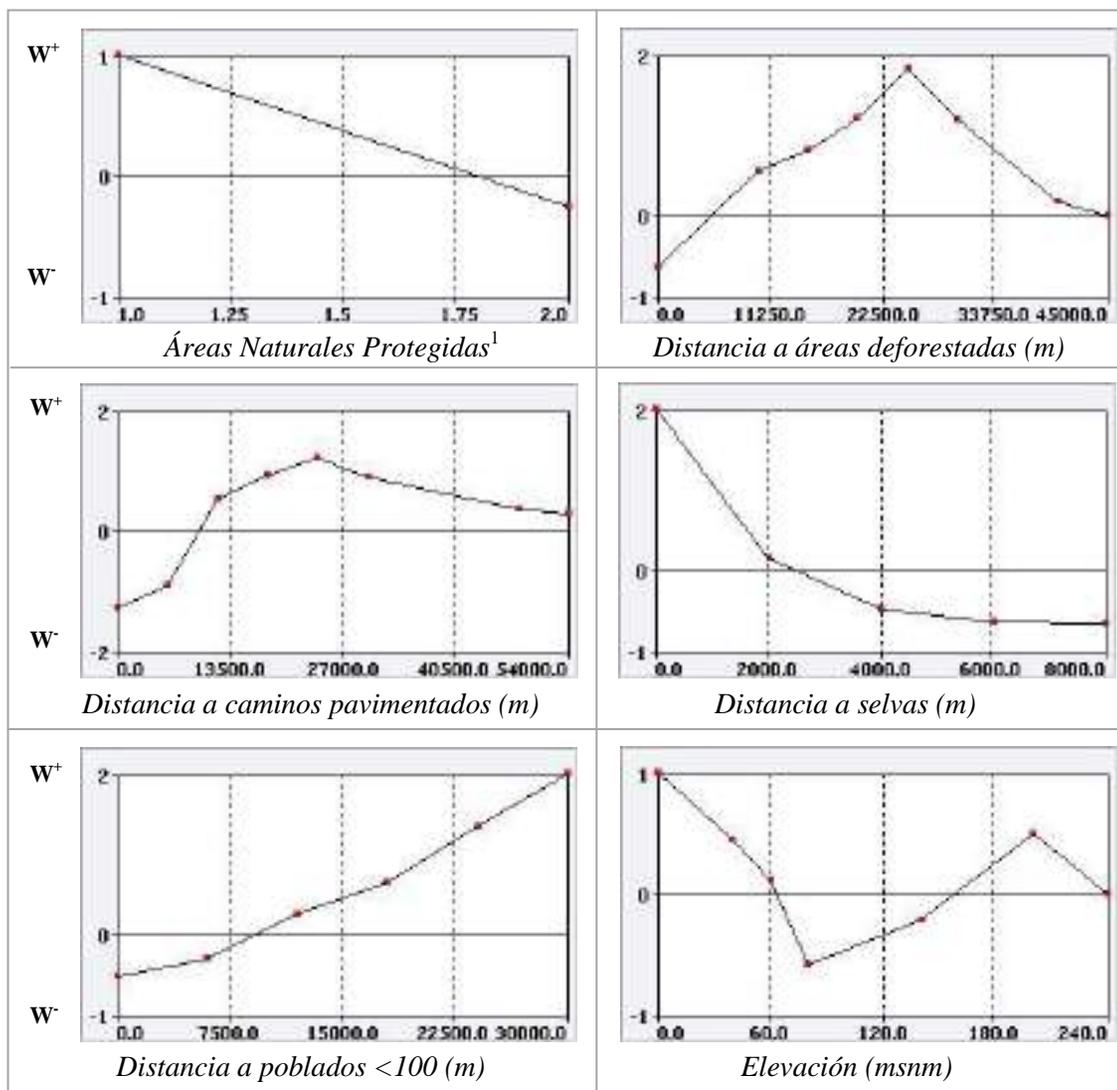


Figura 28. Pesos de evidencia calculados para la transición de selvas secundarias a selvas. ¹Donde 1=presencia y 2=ausencia.

Asimismo, la lejanía a áreas agropecuarias y forestales y la cercanía a selvas primarias son factores fuertemente relacionados con la regeneración. Las elevaciones bajas, entre 0 y 50 m.s.n.m. son las que tienen una influencia más importante, pero también las elevaciones entre 180 y 200 m.s.n.m. son favorables para la regeneración de la vegetación (Figura 28).

En los mapas de probabilidades se puede observar que la probabilidad de cambio de selvas secundarias a selvas fue mayor en las áreas naturales protegidas, ya que este proceso parece ser parte de la sucesión natural; por el contrario la transición de APF a SS ocurrió en zonas ligadas a las prácticas agropecuarias y forestales, que corresponden a las selvas medianas subperennifolias y subcaducifolias (Figura 27).

La proporción de cambios que se da por expansión en esta región del corredor es mayor que el porcentaje de cambios que surgen por creación de nuevos parches, llegando a ser incluso nulos para la transición de agrícola-pecuaria-forestal a selvas secundarias (Figura 29). La transición de selvas secundarias a agrícola-pecuaria-forestal es la que presenta el mayor porcentaje de cambios que se dan por surgimiento de nuevos parches (33%), aún así los cambios que se dan por expansión se presentan en mayor proporción (67%).

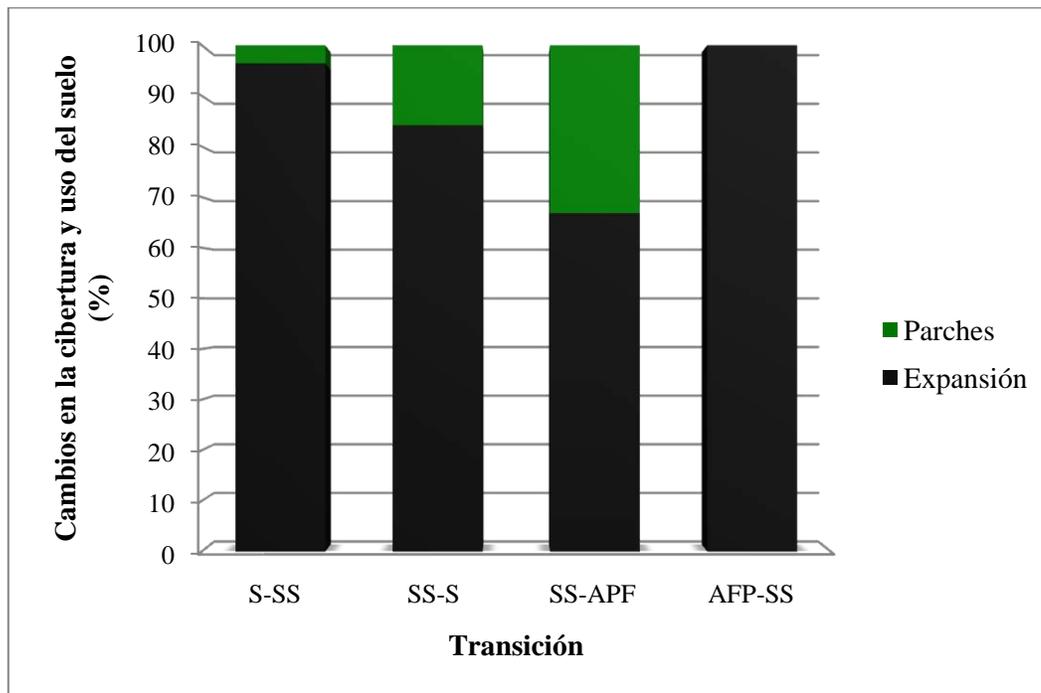


Figura 29. Porcentaje de los cambios por expansión o creación de nuevos parches. S= selvas, SS= selvas secundarias, APF= agrícola-pecuaria-forestal.

6.4.2 Desempeño del modelo de cambio de cobertura y uso del suelo para el CBC-S

Esta región del corredor presentó cambios muy evidentes en los patrones de CCUS entre el período utilizado para calibrar el modelo y el período de simulación, lo cual se refleja en una menor coincidencia entre los cambios simulados y observados que en el caso del CBT-M. Menos del 5% de los cambios simulados coinciden perfectamente con los cambios observados utilizando una ventana de 1x1 píxeles. Para el caso de este corredor, el modelo de simulación logra alcanzar un índice de similitud del 50% utilizando una ventana de 11x11 píxeles (Figura 30), lo que indica que el modelo puede posicionar correctamente el cambio en un 50% dentro de una ventana con radio de búsqueda de 5.5 km². En la Figura 31 se puede comparar el mapa simulado para 2007, previamente calibrado para el período 1993-2002, con el mapa de INEGI del mismo año.

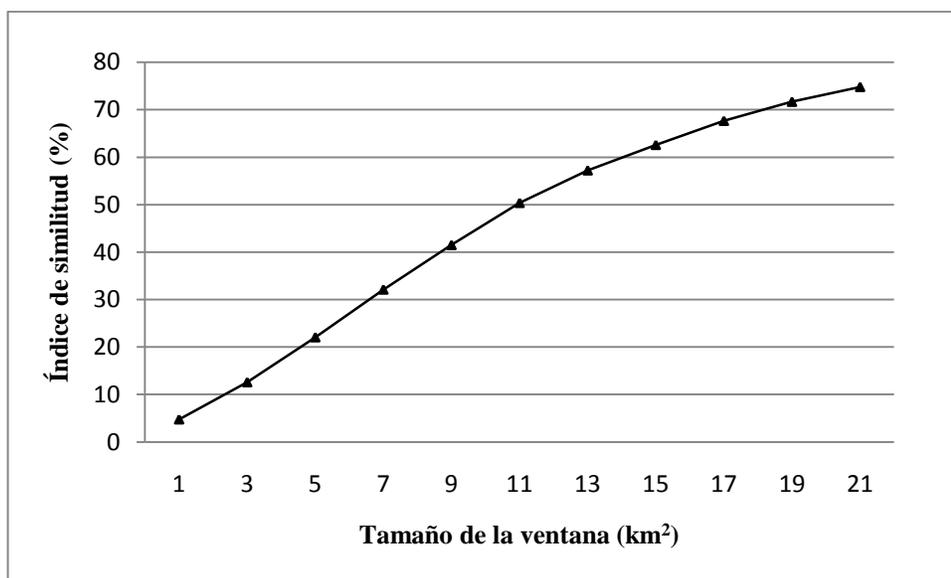


Figura 30. Índice de similitud entre el mapa simulado y el mapa real en función del tamaño de la ventana utilizado para hacer la comparación.

6.4.3 Proyección de escenarios de CCUS

Debido a que los CCUS observados en esta porción del corredor para los períodos analizados no presentaron una dinámica de cambio en dirección de la degradación y deforestación tan drástica como fue el caso del CBT-M, se decidió generar únicamente el escenario tendencial (tomando como base el segundo período) y el escenario de conservación. La configuración futura del paisaje presenta cambios drásticos para el escenario tendencial (Figura 32). Si se asume la dinámica de uso de suelo observada durante el segundo período (2002 -2007), las áreas agropecuarias aumentarían considerablemente, pasando de ocupar una superficie del 5% al 10% del área total de este corredor, lo que correspondería a una ganancia de 197 000 ha (Figura 33).

Bajo este mismo escenario, las selvas presentarían una pérdida de 46 200 ha y el área que ocupan las selvas secundarias mostraría una reducción de 142 800 ha.

En contraste, los resultados para el escenario de conservación muestran que de mantenerse la dinámica que asume este escenario en el año 2030 la configuración espacial de los cambios de cobertura y uso de suelo sería muy similar a la que se observa en el 2007 (Figura 32). Aunque se perciben cambios en dirección de la deforestación, estos representan sólo una cuarta parte (46 500 ha) de los que se esperarían para esta misma región en el escenario tendencial. Por último este modelo predice una recuperación de 46 200 ha en la extensión cubierta por selvas (Figura 33).

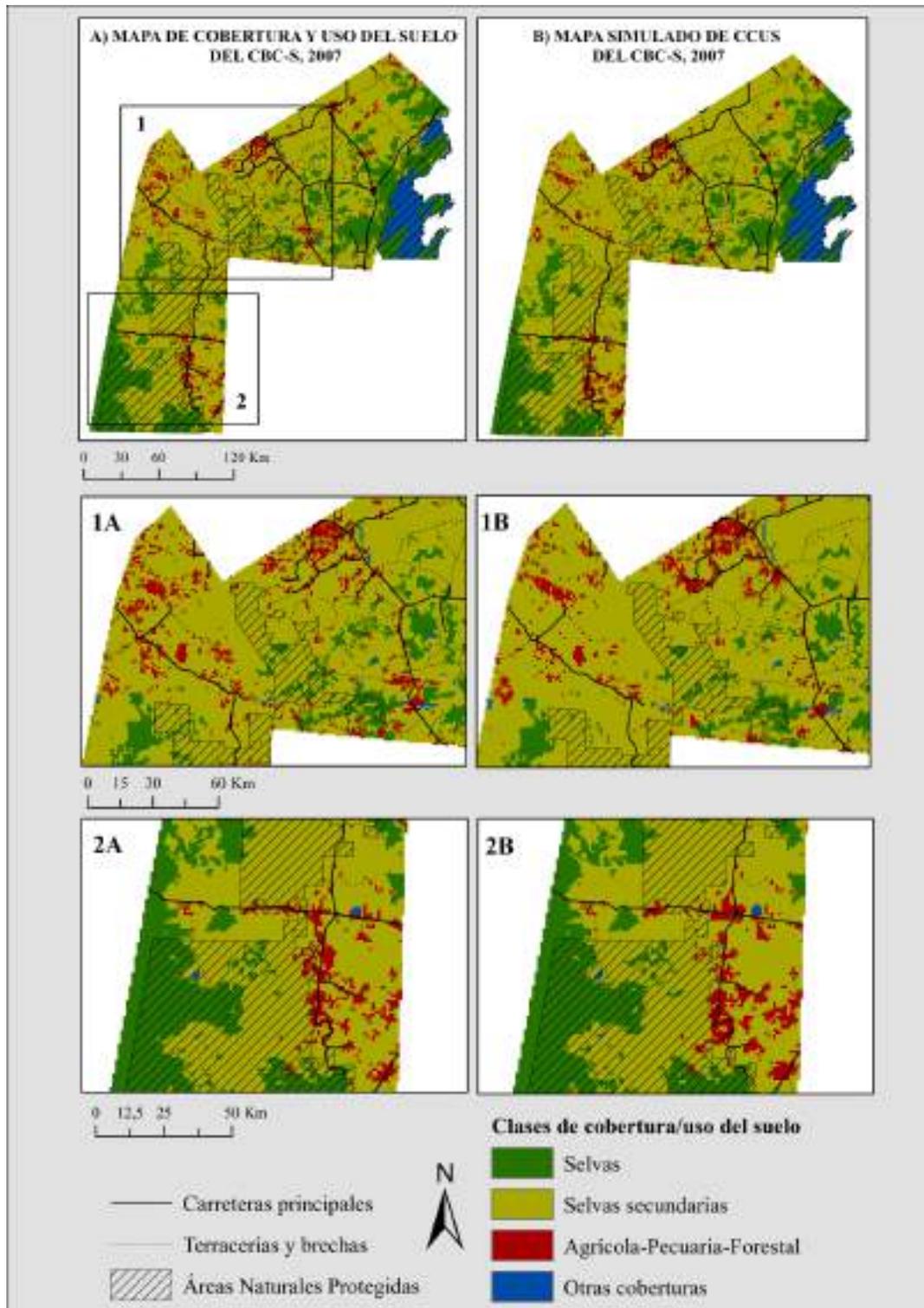


Figura 31. Mapa de cobertura y uso de suelo observado (2007) y simulado correspondientes al CBC-S. Los acercamientos corresponden a: A) la zona Maya ubicada al este del CBC-S en el estado de Quintana Roo y parte de la región noroeste del estado Campeche, y B) la reserva de la Biosfera de Calakmul y zonas de amortiguamiento.

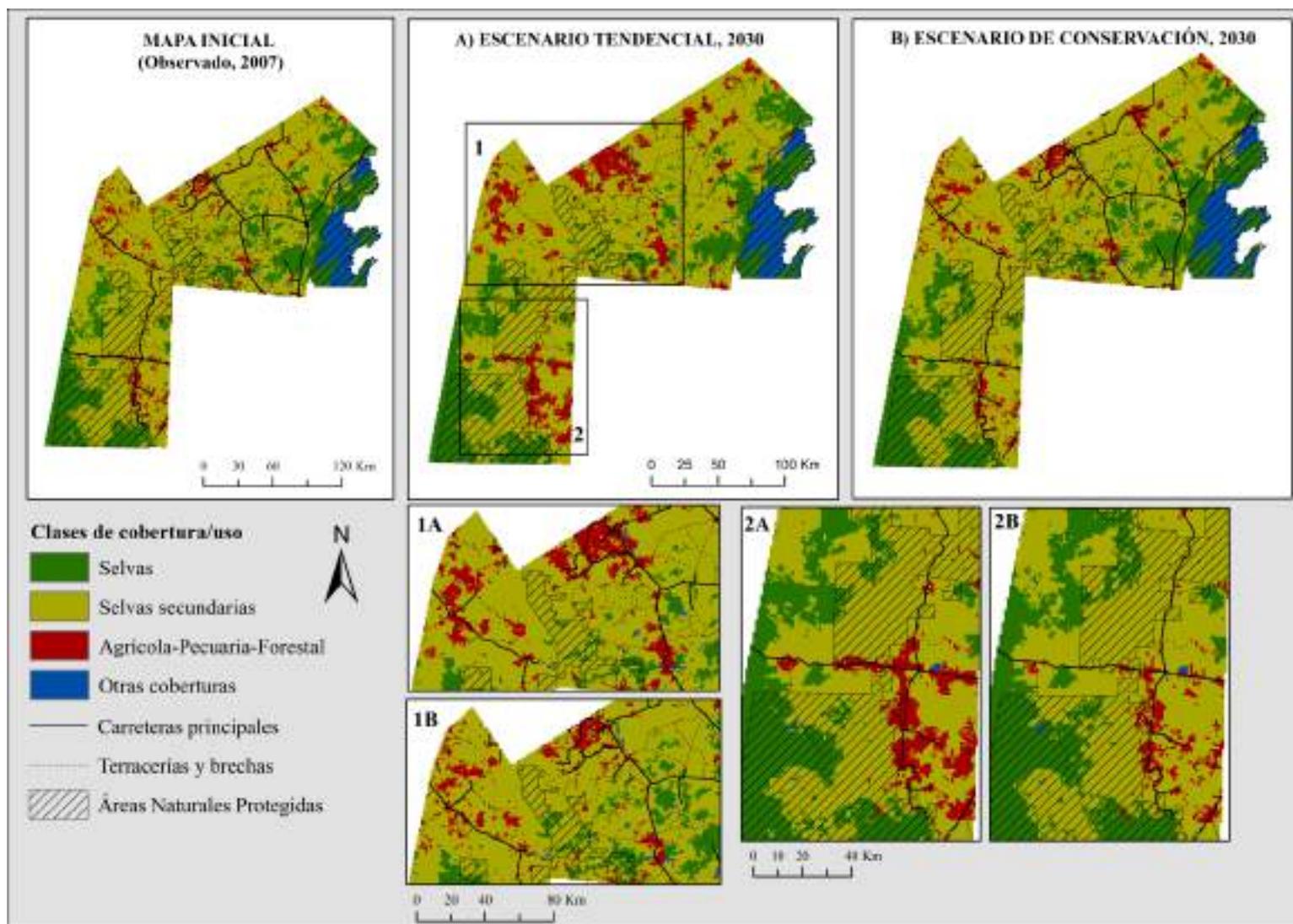


Figura 32. Mapas y acercamientos de los escenarios tendencial y de conservación para 2030. Los acercamientos corresponden a: A) la zona Maya ubicada al este del CBC-S en el estado de Quintana Roo y parte de la región noroeste del estado Campeche, y B) la reserva de la Biosfera de Calakmul y zonas de amortiguamiento.

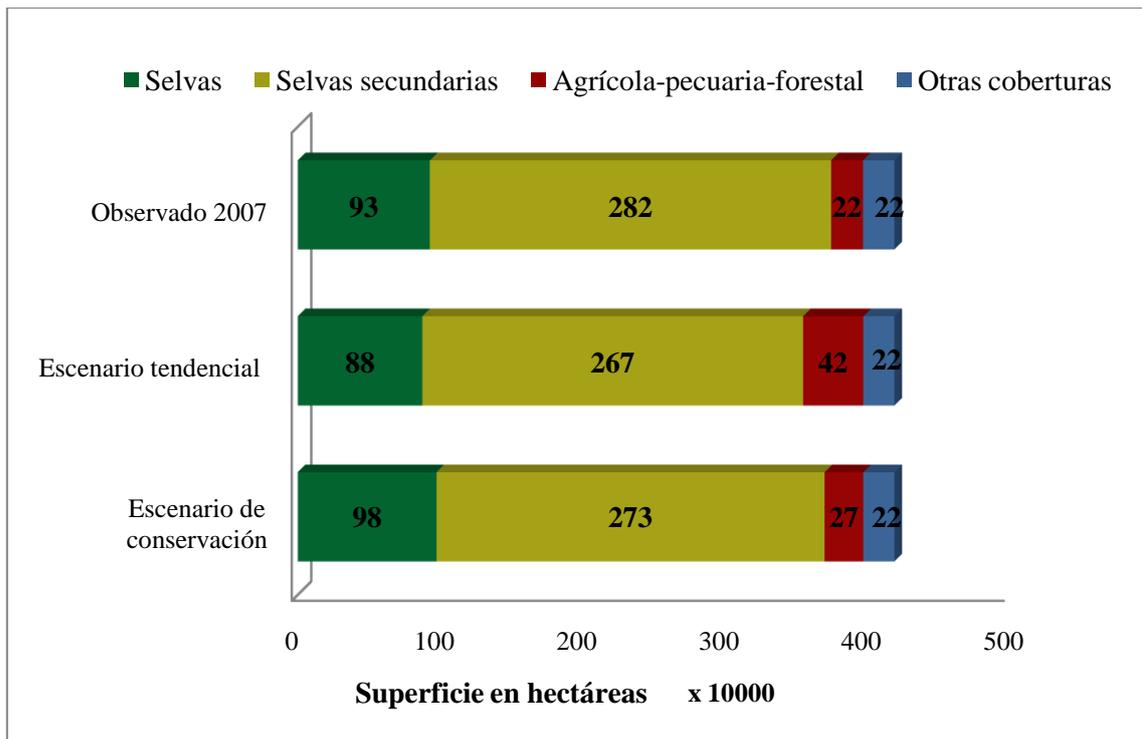


Figura 33. Superficie de cada categoría de cobertura y uso del suelo observada en 2007 y estimada por los dos escenarios para el año 2030.

7. DISCUSIÓN

Este estudio pone en evidencia el acelerado cambio de cobertura y uso de suelo que ha experimentado la región del CBM-Mx en las décadas recientes. Asimismo, muestra que el proceso de deforestación en el CBM-Mx combina diferentes dinámicas, ya que dentro de éste se presentan diferentes tasas de deforestación en diferentes zonas y en diferentes períodos. Por ejemplo, mientras que el CBT-M los tipos de cobertura que aumentaron más marcadamente su extensión fueron los bosques y selvas secundarias, en el CBC-S las áreas que más aumentaron fueron las agrícola-pecuaria-forestales. En términos de la variación temporal, las tasas de deforestación para las dos secciones del CBM-Mx presentaron una disminución evidente para el período 2002-2007. Al mismo tiempo que existieron contrastes entre las dos secciones del CBM-Mx también hubo elementos comunes como fue el caso de que en ambas la dinámica de cambio llevó a la formación de paisajes con una conformación muy heterogénea y en los cuales los parches de vegetación secundaria fueron predominantes, especialmente en el CBC-S.

En el caso del CBT-M, el acelerado proceso de degradación y deforestación observado durante el primer período de análisis parece estar ligado principalmente al impulso generalizado de políticas gubernamentales que favorecieron la explotación ganadera así como al otorgamiento de concesiones a empresas privadas para la extracción forestal, la prospección petrolera y minera y la construcción de la infraestructura que estas actividades demandaban (Maserá *et al.*, 1997; Chowhury *et al.*, 2006). En el CBC-S existieron diferencias evidentes en las dinámicas de uso del suelo entre los dos estados que lo conforman, determinadas por una combinación de factores institucionales e históricos tales como las migraciones de refugiados Mayas, el establecimiento de mercados de chicle y empresas forestales comunitarias, y las interacciones institucionales entre los mercados y las políticas gubernamentales de la reforma agraria (Bray *et al.*, 2004; Porter-Bolland *et al.*, 2007).

Velázquez y colaboradores (2002) calcularon para un período similar al primero de este estudio (1993-2000) una tasa nacional de deforestación de -1.02%/año para los bosques y de -2.06 %/año para las selvas. En comparación, las tasas de deforestación que se registraron para los bosques y selvas en el CBT-M durante el período 1993-2002 fueron -3.96%/año y -

2.52%/año, respectivamente. Otros estudios, realizados a un nivel más local, han encontrado de manera similar tasas de deforestación altas como en el caso de la Reserva de la Biosfera El Ocote y zonas circundantes, donde se estimaron tasas de deforestación de -2.38%/año para los bosques y -6.76 %/año para las selvas (Flamenco *et al.*, 2007).

En contraste, la tasa de deforestación obtenida en este trabajo para todo el CBC-S durante el segundo período de análisis fue de tan sólo 0.48%/año. Esta tasa de deforestación se asemeja a la reportada para la reserva de la Biosfera de Calakmul, y sus zonas de amortiguamiento, equivalente a 0.29%/año durante el período 1987-1997 (Turner *et al.*, 2001; Chowdhury y Schneider, 2004). Asimismo, en la Zona Maya del estado de Quintana Roo, caracterizada por ser un área bajo manejo forestal comunitario, se estimó una tasa de deforestación de 0.4%/año, durante 1976-1984, y de 0.1% durante 1984-2000 (Bray *et al.*, 2004).

En la porción chiapaneca del CBM-Mx, la ganadería extensiva constituye la principal actividad productiva para los campesinos, ejidatarios y pequeños empresarios, debido a que es una alternativa que es incentivada por políticas gubernamentales y que produce un beneficio económico en corto plazo. Sin embargo, estas prácticas extensivas de uso de suelo tienen un fuerte impacto negativo en los recursos naturales. Asimismo, en la región del estado de Campeche los procesos de degradación y deforestación de las selvas están relacionados con el reciente crecimiento poblacional, que se expresa en una expansión mayor de las actividades agropecuarias, las cuales son el resultado de los apoyos de programas gubernamentales (Díaz-Gallegos *et al.*, 2000; Klepeis y Vance, 2003).

Se estima que en el 2002 solamente el 33% de extensión de las selvas húmedas del país estaba constituida por vegetación en buen estado de conservación mientras que el restante 66% estaba constituido por vegetación secundaria bajo diferentes grados de perturbación (INEGI, 2002). Asimismo, la extensión total de las selvas secas (selvas bajas y medianas caducifolias y subcaducifolias, así como las selvas espinosas) en el 2002 se estimaba que estaba constituida en un 38% por vegetación primaria y en un 62% por vegetación secundaria (INEGI, 2002). En este trabajo se encontró que en el CBT-M las selvas con vegetación primaria en 2007 representaban el 45% de la superficie total de este tipo de vegetación, y en el CBC-S sólo el 25%. Estos resultados indican que las selvas del CBM-Mx, especialmente en la

región del CBC-S, si bien mantienen una importante extensión, se encuentran dominadas por vegetación secundaria.

Existe una creciente atención sobre el papel que las selvas y bosques secundarios pueden desempeñar en la conservación de la biodiversidad debido a la rápida expansión que están experimentando y a que presentan un menor contraste en estructura y composición de la vegetación que otras alternativas de uso del suelo (p. ej., plantaciones forestales) (Wright, 2005). En este sentido, hay evidencia de que una proporción importante de especies que habitan en selvas y bosques primarios pueden ser encontradas también en áreas dominadas por vegetación en regeneración (Sayer *et al.*, 2005; Barlow *et al.*, 2007). Sin embargo, también se ha demostrado que para algunos grupos de especies los niveles de biodiversidad son más bajos que los presentes en áreas con vegetación primaria (Gibson *et al.*, 2011).

Las diferentes prácticas de manejo y uso del suelo dentro de las secciones de CBM-Mx se reflejan en la existencia de distintas probabilidades de cambio entre las categorías de cobertura y uso del suelo. Mientras que para el CBT-M las transiciones con mayor probabilidad de cambio son las que se dan en sentido de la degradación (selvas a selvas secundarias y bosques a bosques secundarios), en el CBC-S la transición en dirección de la regeneración (agrícola-pecuaria-forestal a selvas secundarias) fue la que presentó la mayor probabilidad de cambio. En el caso del CBT-M, la fuerte degradación de bosques y selvas durante el período de calibración obedece en gran medida a que durante este período hubo levantamientos armados en esta región, lo que puso fin a la veda forestal que había restringido durante varios años el manejo de los bosques y selvas por unas cuantas empresas. Como consecuencia de estas acciones, las invasiones a terrenos forestales y la subsecuente conversión a áreas agropecuarias y forestales tuvieron una gran expansión en diferentes regiones del estado de Chiapas (Maser *et al.*, 1997; Toledo, 2001). Por otra parte, el hecho de que en el CBC-S la transición con mayor probabilidad de cambio se diera en dirección de la regeneración está relacionado con las políticas implementadas durante la década de los 70 que fomentaron el desmonte de extensas áreas de selva para establecer pastizales pero que terminaron por abandonarse al no llegar el apoyo prometido (Durán-Medina *et al.*, 2007). Otro aspecto interesante es que en el CBT-M las transiciones en dirección de la deforestación (bosques a agrícola-pecuaria-forestal y selvas a agrícola-pecuaria-forestal) fueron las que

presentaron las probabilidades menores, lo cual posiblemente se debe a que los bosques y selvas maduros remanentes se encuentran en pendientes pronunciadas, con acceso restringido (por aspectos relacionadas con la tenencia de la tierra o la presencia de áreas naturales protegidas) y también porque resulta menos complicado desmontar un área con vegetación secundaria que un área con cobertura forestal madura (Mendoza *et al.*, 2005; Flamenco *et al.*, 2007; Cuevas y Mas, 2008). Resulta interesante que para la transición de selvas a agrícola-pecuaria-forestal, la cercanía a terracerías y brechas fue identificada como uno de los factores explicativos más relevantes mientras que la distancia a caminos pavimentados no tuvo un efecto importante. Esto se puede explicar si se toma en cuenta nuevamente que las áreas que cuentan con vegetación primaria se encuentran en zonas con acceso muy restringido, y sólo es posible aproximarse a través de pequeñas terracerías o brechas lo cual se conjuga con el hecho de que muchas de las áreas con remanentes de selvas primarias están protegidas, lo que restringe aún más el acceso.

Se ha encontrado que, además de la proximidad a los caminos y a poblados, el tipo de suelo y su relación con la agricultura son variables importantes para explicar los procesos de CCUS (Porter-Bolland *et al.*, 2007). En el CBT-M los tipos de suelo que se asociaron más con la degradación de selvas fueron los acrisoles, luvisoles y nitosoles. Los acrisoles, a pesar de ser suelos pobres en nutrientes, son generalmente adecuados para la explotación forestal, al igual que los nitosoles, y para el establecimiento de pequeños cultivos de subsistencia. Por otra parte, los luvisoles se encuentran principalmente distribuidos en la región del norte del CBT-M, una zona que ha sufrido una fuerte degradación del suelo, y donde se encuentran los aserraderos más importantes del país y zonas de rendimiento moderado en cultivos como el de café (INEGI, 2004). En lo que respecta al CBC-S, los suelos que exhibieron mayor cambio fueron las rendzinas. Gran parte del área del CBC-S está cubierta por rendzinas, las cuales presentan buenos rendimientos en cultivos, principalmente de caña o arroz y en plantaciones forestales (INEGI, 2004).

A pesar de que se esperaba que la regeneración de la vegetación fuera más probable en zonas alejadas de ríos y con pendientes elevadas, en este estudio se encontró lo contrario en el caso del CBT-M. Una explicación posible de este resultado es que la mayor parte de las áreas agropecuarias se concentran en zonas con elevaciones y pendientes bajas y cercanas a los ríos,

las cuales son abandonadas por ciertos períodos para permitir la recuperación del suelo. Esto coincide con el hecho de que éstas mismas zonas están dominadas por el tipo de suelo feozem, que resulta particularmente favorable para la recuperación de la vegetación. En el CBC-S los mapas de las probabilidades de transición muestran que el cambio de selvas secundarias a selvas fue mayor dentro de las áreas naturales protegidas. En contraste, la transición de agrícola-pecuaria-forestal a selvas secundarias ocurrió en zonas ligadas a prácticas agropecuarias y forestales. Es probable que la recuperación en las áreas naturales protegidas siga procesos naturales de regeneración, mientras que en los ejidos la regeneración de la cobertura forestal sea más el producto de acciones de manejo de la tierra por parte de la gente local con el fin de combatir incendios, reforestar y controlar el pastoreo (Vester y Navarro-Martínez, 2007).

Los factores que propician y controlan los patrones espaciales del proceso de deforestación interactúan de manera muy compleja y se expresan a diferentes escalas espaciales y temporales, por lo que la elaboración de modelos capaces de capturar esta dinámica representa un importante reto. En el caso de CBC-S, se presentaron cambios marcados en los patrones espaciales de los CCUS entre el período utilizado para calibrar el modelo y el período de simulación. Para incorporar esta heterogeneidad se hicieron modificaciones en los pesos de evidencia de manera que los cambios reflejaran de manera más cercana la dinámica existente. Esta posibilidad de modificar los pesos de evidencia para hacer más precisos los cambios modelados es una ventaja que ofrece el método empleado.

Por otra parte, el modelo de CCUS realizado no integra de manera explícita varios de los factores que se sabe pueden estar fuertemente ligados con el proceso de deforestación en el CBM-Mx, como por ejemplo, el aumento en la densidad poblacional, el índice de marginación de las poblaciones, las condiciones de los mercados nacionales e internacionales, las presiones relacionadas con la tenencia de la tierra y las políticas gubernamentales, entre otras. La incorporación de variables socio-económicas seguramente enriquecería el modelo y permitiría profundizar en los factores que conducen el CCUS en la región del CBM-Mx. En este sentido, el modelo realizado en este estudio debe verse como una aproximación que permite poner en evidencia cómo ciertos factores biofísicos y de infraestructura influyen sobre los patrones de deforestación en el CBM-Mx. Es importante, por lo tanto, tener en consideración que los

resultados de los modelos elaborados no son exactos y deben interpretarse en el contexto de las suposiciones y limitaciones asociadas al método empleado y la información utilizada. Teniendo esto en cuenta es posible utilizar los resultados presentados para entender los patrones generales de deforestación en el CBM-Mx y para hacer comparaciones entre escenarios alternativos que favorecerían la conservación de la biodiversidad y de los recursos forestales. Una posibilidad interesante, es que dada la gran heterogeneidad de dinámicas que se conjugan dentro del CBM-Mx, en el futuro algunas zonas del mismo presenten una dinámica similar al escenario de conservación (p.ej., Zona Maya en Quintana Roo), otras se asemejen más al escenario tendencial (p. ej., región de la selva Lacandona) y finalmente, otras presenten una patrón más cercano al que se observa en el escenario agropecuario (p. ej., región de la reserva de La Sepultura y zonas de amortiguamiento).

El impacto del CCUS sobre los hábitats naturales del CBM-Mx ha sido considerable, y, a pesar de que se muestra una aparente disminución en las tasas de deforestación, las tendencias predominantes indican que existe la amenaza de que el impacto continúe. A este respecto, el escenario tendencial proyecta cambios que afectarían de manera importante las zonas de amortiguamiento de las reservas de la biosfera y gran parte de las zonas de transición del CBM-Mx, lo que constituiría una seria amenaza para la conectividad ecológica de los bosques y selvas de todo el corredor. Aún así, este escenario se puede considerar “conservador” ya que no considera el impacto de la expansión y construcción de nueva infraestructura (p.ej., la construcción de nuevas carreteras o caminos de terracería), los incendios forestales o el impacto potencial del cambio climático (Sala *et al.*, 2000; Stickler *et al.*, 2009; Silvestrini *et al.*, 2011).

Por otra parte, el escenario agropecuario resulta plausible si se toma en cuenta que las presiones ejercidas por las industrias madereras, la minería y en especial la agricultura y ganadería a gran escala aparecen actualmente como las causas dominantes de la pérdida de cobertura forestal (Nepstad *et al.*, 2006; Rudel, 2007). Es importante resaltar que, en el caso de que la región del CBT-M experimentara una dinámica cercana a la descrita en el escenario agropecuario, los cambios rebasarían los límites de las áreas naturales protegidas. Las reservas de la biosfera que se verían más afectadas son Montes Azules, El Ocote y la Reserva de Calakmul, las cuales se ubican en zonas con pendientes poco pronunciadas, cercanas a

carreteras o terracerías y con suelos relativamente fértiles. En este sentido, se ha reportado la permanencia de usos antrópicos principalmente en las porciones de las áreas naturales protegidas donde el acceso es más fácil, la topografía es relativamente plana y la calidad del suelo favorece la agricultura o la ganadería (Smith, 2002). Asimismo se ha sugerido que particularmente en los trópicos, con algunas excepciones, la mayoría de las áreas naturales protegidas no parecen asegurar el sostenimiento de la biodiversidad que mantienen (Hansen *et al.*, 1991; Velázquez *et al.*, 2001).

Se ha propuesto que un escenario de conservación se debería caracterizar por presentar tasas de deforestación bajas (menores al 0.5% anual) y una regeneración de la cobertura de selvas y bosques mayor a la nueva deforestación (Perz y Skole, 2003). Algunos estudios indican que este tipo de dinámica se está dando en algunas porciones de la Zona Maya del CBC-S (Bray *et al.*, 2004; Durán *et al.*, 2005) y que se asocia con iniciativas institucionales e innovaciones organizativas, como es el caso de Plan Piloto Forestal (PPF), que promueven una forma de manejo forestal más responsable y participativa (Vester y Navarro-Martínez, 2007). En los escenarios de conservación generados en este trabajo se puede observar que aumentar la efectividad de las áreas naturales protegidas constituiría una acción importante para mitigar o disminuir el cambio de cobertura dentro de estas zonas. Sin embargo, a pesar de que la integración de la conservación y el desarrollo de áreas naturales protegidas ha tenido un gran avance y resultados satisfactorios, el establecimiento de políticas de conservación y desarrollo en las áreas naturales protegidas puede tener impactos sociales negativos no deseados, como son los conflictos entre el ganado y los animales silvestres, el desplazamiento de las poblaciones locales, los conflictos armados y las desigualdades de distribución generadas por proyectos de desarrollo en comunidades internamente diferenciadas (Chowdhry *et al.*, 2006). En este sentido, el uso de suelo y manejo forestal comunitario puede considerarse una estrategia complementaria para la conservación de la biodiversidad, debido a que la mayor parte de los bosques del país se encuentran en tierras que pertenecen a comunidades y ejidos, es decir, son de propiedad común (Alcorn y Toledo, 1998; Thoms y Betters, 1998). Además, se ha visto que una sólida organización social tiene un efecto positivo sobre el mantenimiento de las coberturas de bosque y otros tipos de vegetación. Esto porque aun con decretos de protección (áreas naturales protegidas) y asignación de recursos financieros, es un hecho que si la estructura social comunitaria es debilitada puede ocurrir mayor pérdida de bosques

(Ochoa, 2000; Velázquez *et al.*, 2001; García *et al.*, 2002). Es en esta perspectiva que proyectos como el CBM-Mx, cuya estrategia busca articular las zonas de conservación como las áreas naturales protegidas con zonas bajo manejo humano, podrían convertirse en un modelo innovador de conservación y desarrollo social. No obstante, por estar ubicado en regiones de alta densidad de población indígena y de gran conflictividad social y política, el CBM-Mx constituye una tarea excepcional. La problemática que enfrenta la iniciativa del CBM-Mx resalta la complejidad que implica la conservación de la biodiversidad en las regiones tropicales, un hecho al que hay que hacer frente con nuevos marcos conceptuales, enfoques, y planteamientos metodológicos (Miller *et al.*, 2001; Rosenzweig, 2003; Halfpter, 2005).

Los factores que conducen el cambio de uso del suelo son frecuentemente lejanos en el espacio y tiempo respecto a los cambios observados, y comúnmente involucran transformaciones macroeconómicas y cambios políticos que son difíciles de anticipar (Serneels y Lambin, 2001). Por lo tanto, para comprender el complejo fenómeno de deforestación en los trópicos es necesario un enfoque multiescalar e integral. En este sentido, la modelación de los CCUS toma en cuenta características locales o regionales que permiten generar cambios realistas de la configuración del paisaje. Sin embargo, las aproximaciones basadas en el análisis de información a través de los sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota deben ser complementadas por las aportaciones de otras disciplinas que consideran aspectos sociales, económicos y culturales que no se expresan de manera espacialmente explícita.

8. CONCLUSIÓN

La dinámica de cambio descrita para el CBM-Mx, se caracteriza por una marcada conversión de los bosques y selvas primarias a vegetación secundaria y a usos agropecuarios-forestales. Dado el importante impacto que ya se ha dado sobre los ecosistemas naturales en la región existe un grave riesgo de perder la gran biodiversidad aún existente en el CBM-Mx así como los servicios ecosistémicos que ésta genera a nivel local y regional. El enfoque utilizado en este trabajo permitió poner de manifiesto los derroteros contrastantes que se pueden seguir en el mediano plazo si se impulsan o se dejan de tomar acciones en favor de la conservación y el manejo sustentable de los ecosistemas presentes en la región. Asimismo, este estudio llama la atención sobre la urgencia de implementar una amplia serie de medidas para mitigar el impacto futuro del CCUS en el CBM-Mx. Un paso fundamental dentro de estas medidas va a ser vincular la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos con acciones que permitan tener un impacto directo sobre el bienestar social y económico de las comunidades locales. El Corredor Biológico Mesoamericano está jugando y seguirá jugando un papel fundamental para impulsar estrategias de desarrollo dentro de la región sin embargo, la compleja serie de factores que guían la dinámica económica, social y política en la región hacen necesario el trabajo conjunto desde muy diversas instancias (federales, estatales, municipales, no gubernamentales, civiles, etc.). Bajo este escenario es crítica la existencia de un programa rector que permita la coordinación efectiva de las diversas instancias involucradas en la región de manera que se evite caer en situaciones ya experimentadas con anterioridad en donde una gran número de instituciones y organizaciones han tratado de impulsar actividades en la región de manera inconexa y muchas veces contradictoria. En este sentido el enfoque metodológico desarrollado en este estudio es una herramienta que puede tener un impacto positivo en el ordenamiento y planeación regional del desarrollo sostenible en esta importante región.

LITERATURA CITADA

- Alcorn J. B. y V.M. Toledo. 1998. **Resilient resource management in Mexico's forest ecosystems: The contribution of property rights.** En: F. Berkes y C. Folke (Ed). **Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience.** Cambridge University Press, 216-249.
- Angelsen A. y D. Kaimowitz. 1999. **Rethinking the Causes of Deforestation: Lessons from Economic Models.** *The World Bank Research Observer*, 14(1):73-98.
- Almeida, C., M. Batty, M. Monteiro, G. Câmara, B. Soares-Filho, G. Cerqueira y C. Pennachin. 2003. **Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation.** *Computers, Environment and Urban Systems*, 27: 481-509.
- Apan A. A. y J. A. Peterson. 1998. **Probing tropical deforestation: The use of GIS and statistical analysis of georeferenced data.** *Applied Geography*, 18(2):137-152.
- Boege E. y R. Murguía. 1989. **Diagnóstico de las actividades humanas que se realizan en la Reserva de la Biosfera de Calakmul, estado de Campeche.** PPY, México.
- Boege E. 2005. **La diversidad de los pueblos indígenas de México: Hacia la conservación in situ de la biodiversidad y agro-biodiversidad.** SEMARNAT. México.
- Bonham-Carter G. F. 1994. **Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS.** New York, Pergamon.
- Bray, D. B., E. A. Ellis, N. Armijo-Canto y C. T. Beck. 2004. **The institutional drivers of sustainable landscapes: a case study of the Mayan Zone in Quintana Roo, Mexico.** *Land Use Policy*, 21(4):333-346.
- Briassoulis H. 2000. **Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches.** En: S. Loveridge (Ed), **Web Book of Regional Science.** Regional Research Institute, West Virginia University.
- Cairns, M. A., P. K. Haggerty, R. Alvarez, H. J. Jong y I. Olmsted. 2000. **Tropical Mexico's recent land-use change: a region's contribution to the global carbon cycle.** *Ecological Applications* 10 (5): 1426-41.
- Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD). 2002. **El Corredor Biológico Mesoamericano: Una plataforma para el desarrollo sostenible regional.** Serie técnica 01. 2002.
- Chowdhury R., L. Schneider, Y. Ogneva-Himmelberger, P. Macario-Mendoza, S. Cortina-Villar y A. Barker-Plotkin. 2004. **Land Cover and Land Use: Classification and Change Analysis.** En: Turner II B. L., Geoghegan J. y Foster D. R. (Ed). **Integrated**

Land-Change Science and Tropical Deforestation in the Southern Yucatan: Final Frontiers. Oxford University Press. United States. pp. 105-141.

Chowdhury R. 2006. **Driving forces of tropical deforestation: The role of remote sensing and spatial models.** *Singapore Journal of Tropical Geography*, 27(1):82-101.

Coe. M., M. Costa y B. S. Soares-Filho. **The Influence of Historical and Potential Future Deforestation on the Stream Flow of the Amazon River - Land Surface Processes and Atmospheric Feedbacks.** *Journal of Hydrology*, 369, 165–174 2009.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2007. **Comercio sustentable. Por un consumo responsable y comprometido con el medio ambiente.** Corredor Biológico Mesoamericano México. Programa de Recursos Biológicos Colectivos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2008. **Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad.** Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, pp. 621.

Comisión Nacional de Población (Conapo). 2006. **La situación demográfica de México 2006.** Comisión Nacional de Población, México.

Cuevas G. 2005. **Pronóstico del cambio de uso del suelo en áreas forestales del estado de Michoacán.** Tesis de licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México. 110 pp.

Cuevas G. y J. F. Mas. 2008. **Land use scenarios: a communication tool with local Communities.** En: Paegelow M. y M. T. Camacho (Ed.) **Modelling Environmental Dynamics**, Springer-Verlag.

Díaz-Gallegos J. R. 2000. **Uso del suelo y transformación de selvas en un ejido de la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche.** Tesis de Maestría, el Colegio de la Frontera Sur. Chiapas, México. 57 pp.

Díaz-Gallegos, J. R, J. F. Mas y A. Velázquez. 2008. **Monitoreo de los patrones de deforestación en el Corredor Biológico Mesoamericano, México.** *Interciencia* 33(12):882-890.

Díaz-Gallegos, J. R, J. F. Mas y A. Velázquez. 2009. **Patterns and trends of deforestation of tropical forest in southeast Mexico.** *Singapur Journal of Tropical Geography*. En prensa.

Durán-Medina, E., J. F. Mas y A. Velázquez. 2007. **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. B., Merino, L. P. y D. Perry (Ed). **Los bosques comunitarios de México; manejo sustentable de paisajes forestales.** INESEMARNAT. México, D. F.

- Eccardi F. 2008. **Biodiversidad y consumo responsable. Corredor Biológico Mesoamericano -México.** Conabio, Semarnat, Fomento Ecológico Banamex, Gaia (Ed), México, D.F.
- Ericson, J., E. Boege y M. Freudenberger. 1998. **Dinámica poblacional, migración y el futuro de la reserva de la Biosfera de Calakmul.** Pronatura, WWF, Population-Environment Fellows Program, University of Michigan.
- Escalante E. T. 2003. **Patrones biogeográficos de la masto-fauna mexicana.** Tesis que para obtener el grado académico de Doctora en Ciencias. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Farber, S., R. Costanza y M. Wilson. 2002. **Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services.** *Ecological Economics*, 41:375-392.
- Ochoa-Ochoa L. M. y O. Flores-Villela.. **Áreas de diversidad y endemismo de la herpetofauna mexicana.** UNAM-CONABIO, México. 211pp.
- Flamenco, A., M. Martínez-Ramos y O. R. Maser. 2007. **Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest.** *Biological Conservation*, 138:131-145.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2002. **State of the world forest 2001.** 181 pp.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2007. **Situación de los bosques del mundo 2007.** 143 pp.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2010. **Situación de los bosques del mundo 2007.** 143 pp.
- García G.G., I. March y M. Castillo. 2002. **Transformación de la vegetación por cambio de uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche.** Investigaciones Geográficas. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 46:45-57.
- Geist H. J. y E. F. Lambin. 2002. **Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation.** *Bioscience* 52: 143–50.
- Geoghegan, J., S. Villar, C. Klepeis, P. Mendoza, P.M. Ogneva-Himmelberger, Y. Chowdhury, R. Turner II y C. Vance. 2001. **Modeling tropical deforestation in the southern Yucatán peninsular region: comparing survey and satellite data.** *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3):25-46.
- Gibson, L., T. Lee, M. Koh, L. P. Brook, B. W. Gardner, T.A. Barlow, J. Peres, C.A. Bradshaw, C.J.A. Laurance, W. F. y T.E. Lovejoy. 2011. **Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity.** *Nature*, (10.1038/nature10425).

- Gobierno del Estado de Chiapas. **Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio (PEOT) Chiapas**. 2005. Secretaria de Planeación y Finanzas del Estado de Chiapas-SEDESOL-SEMARNAP. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 406 pp.
- Godoy M. M. G. y B. S. Soares-Filho. 2008. **Modelling intra-urban dynamics in the Savassi neighbourhood, Belo Horizonte city, Brazil**. En: Paegelow M. y Camacho Olmedo M.T. (Ed) **Modelling Environmental Dynamics**, Springer-Verlag.
- Halfpeter G. 2005. **Towards a culture of biodiversity conservation**. *Acta Zoológica Mexicana*, 21:133-153.
- Hagen A. 2003. **Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps**. *International Journal of Geographical Information Science*, 17 (3): 235–249.
- Hansen, A.J., T.A. Spies, F. J. Swanson y J.L. Omán. 1991. **Conserving biodiversity in managed forests: Lessons from natural forests**. *Bioscience* 41:382-392.
- Houghton R.A., J. E. Hobbie, J. M. Melillo, B. Moore, B. J. Peterson, G. R. Shaver y G. M. Woodwell. 1983. **Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1960: a net release of CO² to the atmosphere**. *Ecological Monographs*, 53:235-262.
- Houghton R.A. 1994. **The worldwide extent of land-use change**. *BioScience*, 44(5):305-313.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1993. **Cartografía de uso de suelo y vegetación. Serie II**. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2001. **Conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica, escala 1:250 000**. Aguascalientes, Ags., México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2002. **Cartografía de uso de suelo y vegetación. Serie III**. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2006. **VIII Censo General de Población y Vivienda, 2006**. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. **Cartografía de uso de suelo y vegetación. Serie IV**. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. **XIII Censo General de Población y Vivienda, 2010**. México.
- Klepeis P. y C. Vance. 2003. **Neoliberal Policy and Deforestation in Southeastern Mexico: An Assessment of the PROCAMPO Program**. *Economic Geography*, 79:221-240.
- Lambin E. F. 1997. **Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions**. *Progress in Physical Geography* 22:375-393.

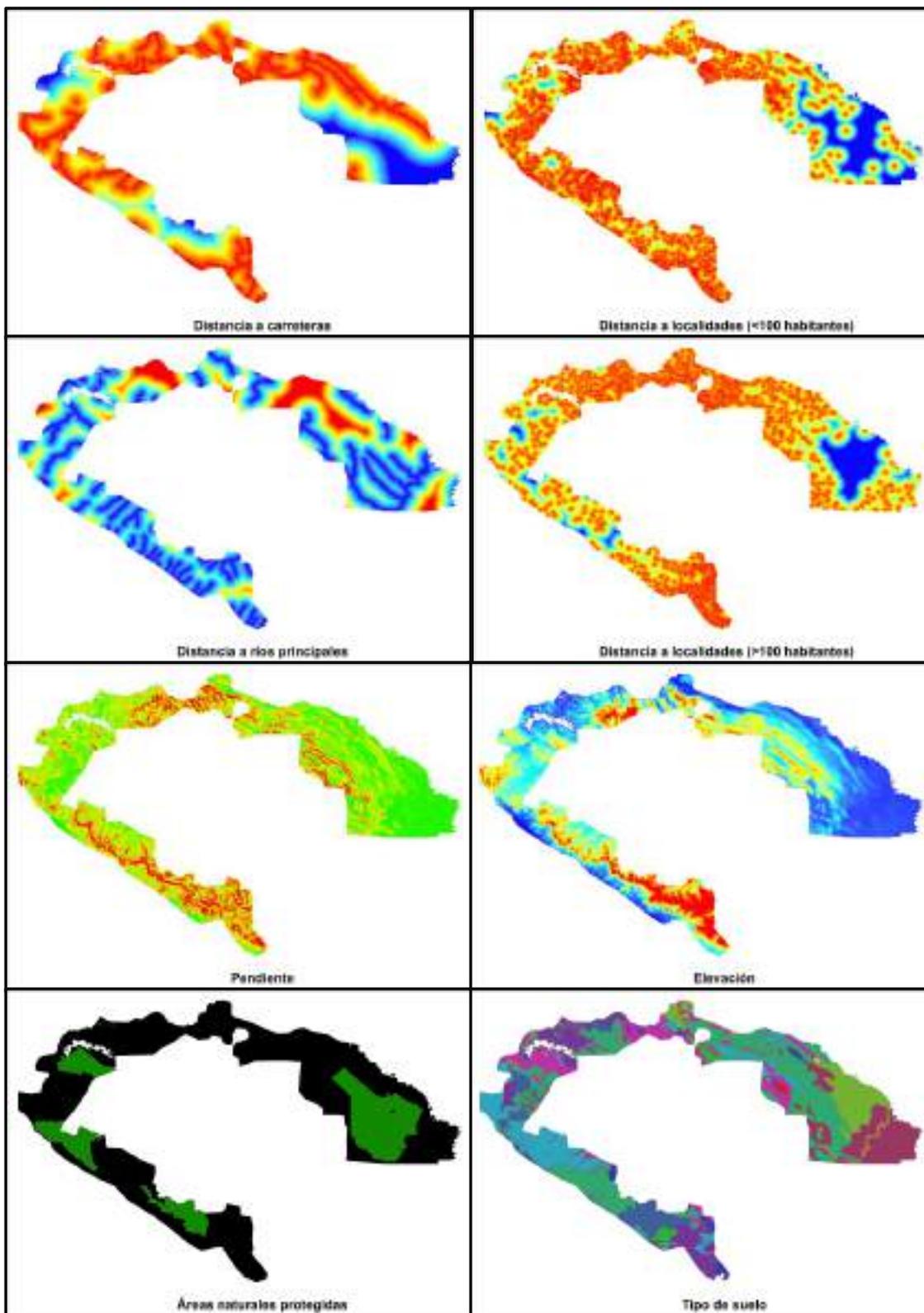
- Lambin, E. F., B. L. Turner, H. J. Geist, S. B. Agbola, A. Angelsen, J. W. Bruce, O. T. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer y C. Folke. 2001. **The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths.** *Global Environmental Change*, 11:261-269.
- Leemans R. y G. Zuidema. 1995. **Evaluating changes in land cover and their importance for global change.** *Trends in Ecology & Evolution*, 10:76-81.
- Mas J. F. y H. Puig. 2001. **Modalités de la déforestation dans le sud-ouest de l'État du Campeche, Mexique.** *Canadian Journal of Forest Research*, 31(7):1280-1288.
- Mas, J. F., A. Velázquez, A. Schmitt y R. Castro. 2003. **Una evaluación de los efectos del aislamiento, la topografía, los suelos y el estatus de protección sobre las tasas de deforestación en México.** *Revista Espacio Geográfico*. Revista de la Universidad Federal do Paraná, Brasil 6:61-73.
- Mas, J. F., A. Velázquez, J. R. Díaz-Gallegos., R. Mayorga-Saucedo, C. Alcántara, G. Bocco, R. Castro, T. Fernández y A. Pérez-Vega. 2004. **Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5:249-261.
- Masera, O., M. J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. **Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios.** *Climatic Change* 35:265-295.
- Merry, F., B. S. Soares Filho, D. Nepstad, G. Amacher y H. Rodrigues. 2009. **Balancing Conservation and Economic Sustainability: The Future of the Amazon Timber Industry.** *Environmental Management*, 44: 395-407.
- Miller, K., E. Chang y N. Johnson. 2001. **Defining Common Ground for the Mesoamerican Biological Corridor.** World Resources Institute. 45 pp.
- Mittermeier R. C. y C. Goettsch. 1992. **La Importancia de la Diversidad Biológica de México.** En: Sarukhán, J. y R. Dirzo (Comps) **México ante los Retos de la Biodiversidad.** Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Mexicana (CONABIO). México. 251-258 pp.
- Moguel P. y V. M. Toledo. 1999. **Biodiversity conservation in traditional coffee systems in Mexico.** *Conservation Biology* 13: 1-11.
- Montgomery M. 2003. **Cities Transformed: Demographic Change and Its Implications in the Developing World.** National Academy Press.
- Myers N. 1984. **The Primary Source: Tropical Forests and Our Future.** W. Norton, New York.
- Myers N. 1989. **Deforestation rates in tropical forest and their climatic implications.** Friends of the Earth Report, Londres, RU.

- Myers N. 1993. **Tropical forests: the main deforestation fronts.** *Environmental Conservation*, 20: 9-16.
- Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G.A. da Fonseca y J. Kent. 2000. **Biodiversity hotspots for conservation priorities.** *Nature*, 403:853-858.
- Navarro A. y L.A. Sánchez-González. 2003. **La diversidad de las aves.** En: H. Gómez de Silva y A. Oliveras de Ita (Ed). **Conservación de aves: experiencias en México.** Conabio, Cipamex. México. pp. 24-85.
- Nepstad, D. C., A. Verssimo, A. Alencar, C. Nobre, E. Lima, P. Lefebvre, P. Schlesinger, C. Potter, P. Moutinho y E. Mendoza. 1999. **Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire.** *Nature*, 398(6727):505-508.
- Nepstad, D.C., C. M. Stickler y O. T. Almeida. 2006. **Globalization of the Amazon soy and beef industries: opportunities for conservation.** *Conservation Biology*, 20:1595-1603.
- Ochoa S. 2000. **El proceso de fragmentación de los bosques en los altos de Chiapas y su efecto sobre la diversidad florística.** Tesis Doctoral, UNAM.
- Paegelow M. y M.T. Camacho-Olmedo. 2005. **Possibilities and limits of prospective GIS land cover modeling a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain).** *International Journal of Geographical Information Science* 19: 697-722.
- Pennington T. D. y J. Sarukhán. 2005. **Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies.** UNAM-Fondo de Cultura Económica. México, 523 pp.
- Perz S.G. y D.L. Skole. 2003. **Secondary forest expansion in the Brazilian amazon and the refinement of forest transition theory.** *Society and Natural Resources* 16: 277-294.
- Porter-Bolland, L., E. A. Ellis y H. L. Gholz. 2007. **Land use dynamics and landscape history in La Montaña, Campeche, Mexico.** *Landscape and Urban Planning*, 82:198-207.
- Rudel T. K. 2007. **Changing agents of deforestation: From state-initiated to enterprise driven processes, 1970-2000.** *Land Use Policy*, 24(1):35-41.
- Rosenzweig M. L. 2003. **Reconciliation ecology and the future of species diversity.** *Oryx* 37: 194-205.
- Sala, O. E., S. F. Chapin, J. J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, , L. F. Huenneke y R. B. Jackson. 2000. **Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100.** *Science*, 287:1770-1774.

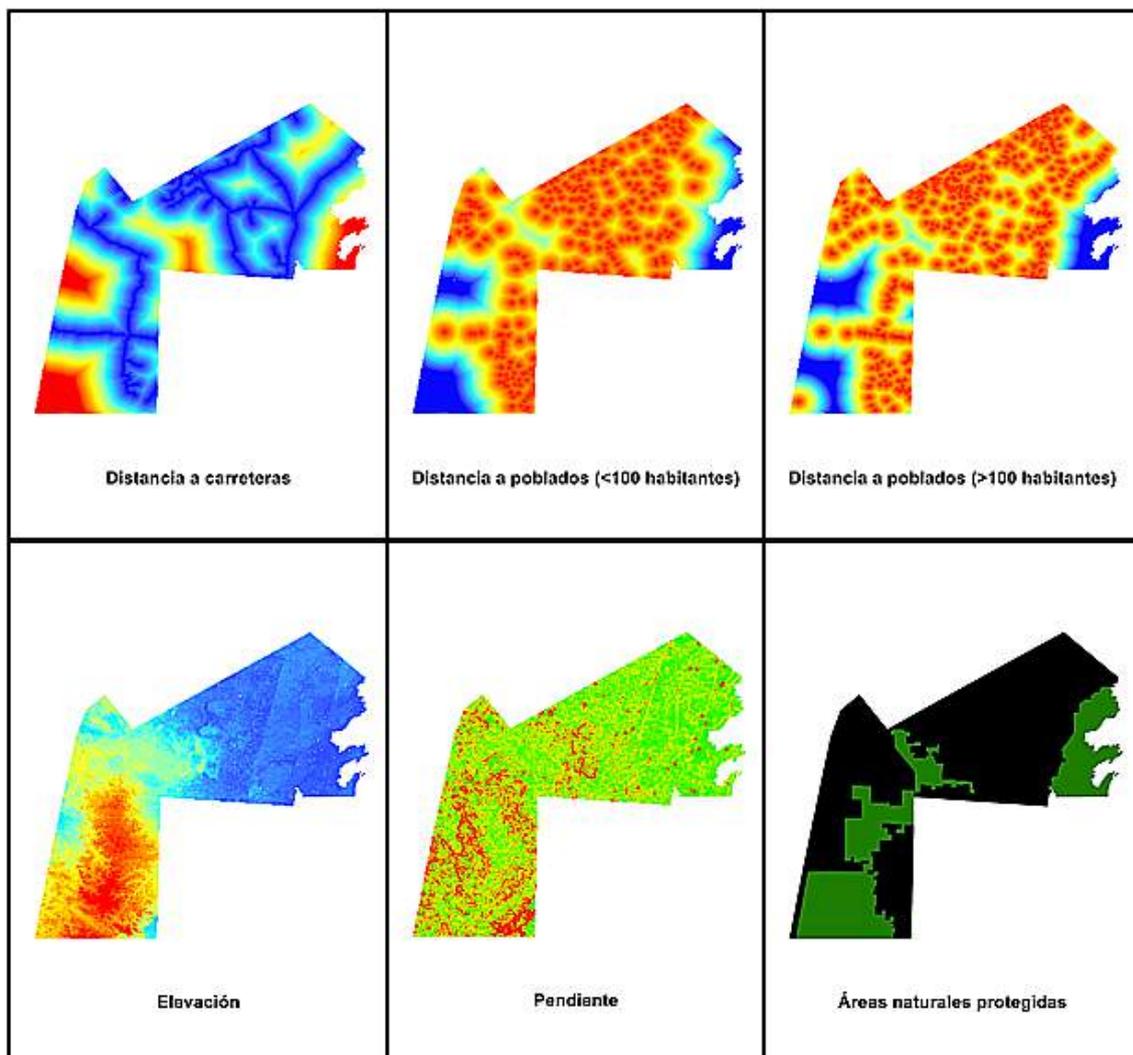
- Sayer J. y S. Maginis. 2005. **Forests in Landscapes: Ecosystem Approaches to Sustainability**. Earthscan, London.
- Serneels S. y E. F. Lambin. 2001. **Proximate causes of land-use change in Narok District, Kenya: a spatial statistical model**. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85:65-81.
- Silvestrini, R.A., B. S. Soares-Filho, D. Nepstad, M. Coe, H.O. Rodrigues y R. Assunção. 2011. **Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation**. *Ecological Applications*, 21:1573–1590.
- Sklar F. H. y R. Costanza. 1990. **The development of dynamic spatial models for landscape ecology: a review and prognosis**. En: Turner, G.M., Gardner, R.H. (Ed) **Quantitative Methods in Landscape Ecology: The Analyses and Interpretation of Landscape Heterogeneity**. Springer, New York. 239.288 pp.
- Smith A. 2002. **Evaluation de l'efficacité du système des aires naturelles protégées au Mexique d'après l'étude des changements de végétation et d'usage du sol pour deux périodes (1976-1993 et 1993-2000)**. Master's thesis, Université Paris XII Val de Marne.
- Soares-Filho, B. S., C. L. Pennachin y G. Cerqueira. 2002. **DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier**. *Ecological Modelling* 154(3): 217 – 235.
- Soares-Filho, B.S., D. Nepstad, L. Curran, E. Voll, G. Cerqueira, R.A. Garcia, C. A. Ramos, A. McDonald, P. Lefebvre y P. Schlesinger. 2006. **Modeling conservation in the Amazon basin**. *Nature* 440: 520-523
- Stickler, C., D. Nepstad, M. Coe, D. Macgrath, H. Rodrigues, E. Davidson y B. Soares-Filho. 2009. **The potential ecological costs and co-benefits of REDD: a critical review and case study**. *Global Change Biology*, 15 (12): 2803-2824.2009.
- Texeira, A. M., B. S. Soares-Filho, S. Freitas y J. P. Metzger. 2009. **Modeling landscape dynamics in an Atlantic Rainforest region: Implications for conservation**. *Forest Ecology and Management* 257(4): 1219-1230.
- Thoms C.A. y D.R. Betters. 1998. **The potential for ecosystem management in Mexico's forest ejidos**. *Forest Ecology and Management* 103:149-157.
- Toledo V. M., 2001. **Biodiversity and indigenous peoples**. En: S. Levin et al. (Ed) **Encyclopedia of Biodiversity**. Academic Press:1181-1197.
- Toledo V. M. 2003. **Los pueblos indígenas, actores estratégicos para el corredor biológico mesoamericano**. *Biodiversitas* 47:8-14.

- Turner II B. L. y W. B. Meyer. 1994. **Global land-use and land-cover change: an overview.** En: Meyer, W.B., Turner II, B.L. (Ed) **Changes in Land use and land cover: a global perspective.** Cambridge University Press, GB. 380 pp.
- Turner, M. G., R. H. Gardner y R. V. O'Neill. 2001. **Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process.** Springer, New York. 497 pp.
- United Nations (UN). 2004. **World Urbanization Prospects: The 2003 Revision.** UN Population Division.
- Velázquez, A., G. Bocco y A. Torres. 2001. **Turning scientific approaches into practical conservation actions: The case of Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, México.** *Environmental Management* 5:216-231.
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio. 2002. **Patrones y tasas de cambio del uso del suelo en México.** *Gaceta Ecológica INE* 62: 21-37.
- Veldkamp A. y E. F. Lambin. 2001. **Predicting land-use change.** *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3):1-6.
- Vester H. F. M. y M. A. Navarro-Martínez. 2007. **Aspectos ecológicos en el manejo comunitario de bosques tropicales en Quintana Roo.** En: Bray, D. B., Merino, L. P. y D. Perry (Ed). **Los bosques comunitarios de México; manejo sustentable de paisajes forestales.** INE-SEM[1-22]ARNAT. México, D. F.
- White R. y G. Engelen. 1994. **Urban systems dynamics and cellular automata: Fractal structures between order and chaos.** *Chaos, Solitons & Fractals*, 4(4):563-583.
- Wright S. J. 2005. **Tropical forests in a changing environment.** *Trends in Ecology & Evolution*, 20(10):553-560.

ANEXO 1. Variables explicativas utilizadas para elaborar el modelo de cambio de cobertura y uso de suelo en el CBT-M.



ANEXO 2. Variables explicativas utilizadas para elaborar el modelo de cambio de cobertura y uso de suelo en el CBC-S.



ANEXO 3. Programación en Arc Macro Language (AML)

Cuevas García, G. 2011. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM campus Morelia.

```
/* parches.aml
```

```
/* OBJETIVO: ESTE PROGRAMA FUE CREADO PARA CLASIFICAR LOS PARCHES DE
/* CAMBIO DE USO/COBERTURA DEL SUELO EXPERIMENTADO ENTRE
/* DOS FECHAS, DEPENDIENDO SI SU CREACIÓN FUE POR EXPANSIÓN O
/* SE TRATA DE NUEVOS PARCHES, PARA QUE POSTERIORMENTE SE
/* GENEREN LAS ESTADÍSTICAS DE LOS PARCHES. DATOS QUE SON
/* EMPLEADOS PARA CALIBRAR EL MODELO DE SIMULACIÓN DE
/* CAMBIO EN DINAMICA-EGO
```

```
/* COBERTURAS: inter_Z15.pat y inter_Z16.pat (mapas que contienen la intersección entre
/* las dos fechas estudiadas PARA CADA UNA DE LAS DOS ZONAS DE
/* ESTUDIO)
```

```
/* ARCHIVOS INFO: %trans% (SE CREA UN ARCHIVO POR CADA TRANSICIÓN)
```

```
/* TXT: transiciones.txt ESTE ARCHIVO CONTIENE EL CODIGO CON QUE
```

```
/* IDENTIFICAMOS CADA TRANSICIÓN (VER LISTA EN ARGUMENTOS DE ESTE
/* PROGRAMA), ASÍ COMO LOS TIPOS DE USO/COBERTURA INICIAL Y FINAL,
/* SEPARADOS CON COMAS (EJEMPLO: 'S-Ss','Selvas','Selvas secundarias')
```

```
/* parche_%trans%_%zon%.txt ESTE ARCHIVO SE CREA PARA ALMACENAR LOS
/* VALORES DE PARCHE NUEVO (1) o POR EXPANSIÓN(2)
```

```
/* ARGUMENTOS
```

```
&args zon trans
```

```
/* donde zona = z15 o z16 y transición = bs-c, pz-ss, s-o, s-pz, s-ss ó ss-pz
```

```
/* SE REALIZAN DOS COPIAS DE LA TABLA DE ATRIBUTOS DE POLÍGONOS DE
```

```
/* MAPA CON LA SOBREPOSICIÓN DE LAS DOS FECHAS PARA SER USADO EN LA
```

```
/* CONSULTA DE VECINOS DEL LADO DERECHO Y UNO OTRA PARA LOS VECINOS
```

```
/* IZQUIERDOS
```

```
copyinfo INTER_%zon%.pat rpol_%zon%
```

```
copyinfo INTER_%zon%.pat lpol_%zon%
```

```
/* SE DEPURAN LAS TABLAS Y SE CAMBIA EL NOMBRE DEL CAMPO QUE
```

```
/* ALMACENA EL NUMERO INTERNO DE CADA POLÍGONO POR EL DEL CAMPO QUE
```

```
/* IDENTIFICA A LOS POLÍGONOS DERECHOS E IZQUIERDOS EN LA TABLA DE
```

```
/* ATRIBUTOS DE ARCOS (ES DECIR, RPOLY# Y LPOLY# )
```

```
tables
```

```
sel rpol_%zon%
```

```
dropitem rpol_%zon% area perimeter inter_%zon%-id /*COB_93 COB02
```

```
alter inter_%zon%#, rpoly#,,,
```

```
sel lpol_%zon%
```

```
dropitem lpol_%zon% area perimeter inter_%zon%-id /*COB_93 COB02
```

```
alter inter_%zon%#, lpoly#,,,
```

```
QUIT
```

```
/** ABRE LECTURA TRANSICIONES.TXT
```

```
&sv abre1 = [OPEN transiciones.txt abrest -read]
```

```
&sv leest = 1
```

```
&sv lee1 = [READ %abre1% leest ]
```

```
/* CICLO POR TRANSICIÓN
```

```
&do &while %leest% ne 102
```

```
/* ASIGNA VALORES LAS VARIABLES: trans, v76 y v00 (transición, uso inicial y uso final)
```

```
&sv trans = [UNQUOTE [EXTRACT 1 [UNQUOTE %lee1% ]]]
```

```
&sv v76 = [UNQUOTE [EXTRACT 2 [UNQUOTE %lee1% ]]]
```

```
&sv v00 = [UNQUOTE [EXTRACT 3 [UNQUOTE %lee1% ]]]
```

```
&TYPE ***** TRANSICIÓN %TRANS% %V76% A %V00%
```

```
*****
```

```
/* Abre un archivo para escribir si es parche nuevo (1) o POR expansión (2)
```

```
&sv abrew [OPEN parche_%trans%_%zon%.txt abrestatw -APPEND]
```

```
&if %abrestatw% <> 0 &then
```

```
&pause
```

```
copyinfo %zon%93_02.pat %trans%_%zon%
```

```
additem %trans%_%zon% %trans%_%zon% area_ha 8 18 f 5
```

```
tables
```

```
sel %trans%_%zon%
```

```
calc area_ha = areakm / 10000
```

```
/* CREA TABLA PARA ALMACENAR VECINO Y EXPANSIÓN
```

```
define %trans%_%zon%_exp
```

```
%zon%93_02#;4;5;b
```

```
vec#;4;5;b
```

```
exp;4;5;b
```

```
~
```

```
quit
```

```
/* CREA RELACIÓN ENTRE TOPOLOGÍA DE POLÍGONOS Y DE ARCOS
```

```
relate add
```

```
/* POLÍGONO DERECHO
```

```
rel_r
```

```
rpol_%zon%
```

```
info
```

```
rpoly#
```

```
rpoly#
```

```
linear
```

```
rw
```

```
/* POLÍGONO IZQUIERDO
```

```
rel_l
```

```
lpol_%zon%
```

```
info
```

```
lpoly#
```

```
lpoly#
```

```
linear
```

```
rw
```

```
~
```

```
/* Se crea un archivo con los números internos de los parches nuevos
```

```
&if [EXISTS %trans%_%zon%.txt -file] &then
```

```
&sv del [DELETE %trans%_%zon%.txt -file]
```

```
&else
```

```
&do
```

```

tables
sel %trans%_%zon%
res COB93 = [quote %v76%] and COB02 = [quote %v00%]
unload %trans%_%zon%.txt %zon%93_02#
nset
purge
y
quit
&end

```

/*abre para lectura el archivo que contiene los números internos de los polígonos

```

&sv abre_trans = [OPEN %trans%_%zon%.txt abrestat0 -read]
&if %abrestat0% <> 0 &THEN
  &type No abrió /*&THEN &TYPE ABRIÓ SIN PROBLEMA

```

```

&sv lee0 = [READ %abre_trans% leest_tr]

```

```

  &if %leest_tr% <> 0 &THEN &type no leyó /*&THEN &TYPE LEYÓ CORRECTAMENTE

```

/*Inicia un ciclo para cada polígono

```

&do &while %leest_tr% ne 102

```

```

  &sv parche = 0

```

/*Abre un cursor para procesar arco por arco

```

  cursor arco declare %zon%93_02.aat info rw rpoly# = %lee0% or lpoly# = %lee0%

```

```

  cursor arco open

```

/* CICLO PARA PROCESAR TODOS LOS ARCOS DE UN POLÍGONO

```

&do &while %:arco.aml$next% = .TRUE.

```

/*ubica el número interno del polígono del arco seleccionado y calcula sus atributos

/* SI EL VECINO ES DERECHO

```

  &if %:arco.rpoly#% ne %lee0% &then &do

```

```

    &sv vecino = %:arco.rpoly#%

```

```

    &Type vecino = %vecino%

```

/* ABRE CURSOR PARA CONOCER TIPO DE VECINO

```

    cursor poli declare %zon%93_02.pat info rw %zon%93_02# = %:arco.rpoly#%

```

```

    cursor poli open

```

```

    &sv tipo_vec = %:poli.COB93%

```

/* SI EL VECINO ES POR EXPANSIÓN CALCULA EL TIPO COMO "2"

```

    &if [quote %tipo_vec%] = [quote %v00%] &then &DO

```

```

      &sv parche = 2

```

```

      &type tipo_vec = %tipo_vec% = v00 = %v00%

```

```

    &END

```

/* SI EL VECINO ES NUEVO PARCHES ASIGNA EL VALOR DE "1" AL TIPO

```

    &else &do

```

```

      &sv parche = 1

```

```

      &type tipo_vec = %tipo_vec% = v00 = %v00%

```

```

    &end

```

/*CIERRA OPCIÓN VECINO DERECHO

```

&end

```

/* SI EL VECINO ES IZQUIERDO

```

&else &do

```

```

  &sv vecino = %:arco.lpoly#%

```

```

  &Type vecino = %vecino%

```

```

  cursor poli declare %zon%93_02.pat info rw %zon%93_02# = %:arco.lpoly#%

```

```

  cursor poli open

```

```

  &sv tipo_vec = %:poli.COB93%

```

```

  &if [quote %tipo_vec%] = [quote %v00%] &then &do

```

```

        &sv parche = 2
        &type tipo_vec = %tipo_vec% = v00 = %v00%
        &end
    &else &do
        &sv parche = 1
        &type tipo_vec = %tipo_vec% = v00 = %v00%
        &end
    /* CIERRA OPCIÓN VECINO IZQUIERDO
    &end
    &IF %parche% = 2 &then
    /* ESCRIBE LOS ATRIBUTOS EN CASO DE SER TIPO EXPANSIÓN
        &SV ESCRIBE [WRITE %abrew% %lee0%,%vecino%,%parche%]
    /*avanza el cursor para procesar el arco siguiente
    cursor arco next
    cursor poli remove
    /* CIERRA CICLO QUE PROCESA LOS ARCOS DE UN POLÍGONO
    &end

    &TYPE abrestatw = %abrestatw%
    &TYPE ESCRIBE ----- %abrew% %lee0%,%vecino%,%parche% -----

    &sv parche = 0
    cursor arco remove
    /* LEE EL SIGUIENTE NUMERO INTERNO DE POLÍGONO
    &sv lee0 = [READ %abre_trans% leest_tr ]
    /* CIERRA CICLO DE POLÍGONOS POR TRANSICIÓN
    &end
    &sv cierra1 [close %abrew%]
    &sv cierra2 [close %abre_trans%]

    /* LEE LA SIGUIENTE TRANSICIÓN
    &sv lee1 = [READ %abre1% leest ]
    /******&sv lee0 = [READ %abre_trans% leest_tr ]
    /* CIERRA CICLO DE TRANSICIONES
    &end

    /* Guarda los valores (almacenados en un archivo de texto) de número interno del polígono, del
    vecino y del tipo de expansión en una tabla INFO por transición tables
    sel %trans%_%zon%_exp
    add %zon%93_02# vec# exp FROM parche_%trans%_%zon%.txt
    quit
    /* une la tabla anterior a la tabla por transición
    joinitem %trans%_%zon% %trans%_%zon%_exp %trans%_%zon% %zon%93_02# area_ha
    &sv cierra [close -all]

    &return

```

ANEXO 4. Parámetros que utilizan los autómatas celulares para la expansión o creación de nuevos parches de cambio.

CBT-M

	EXPANSIÓN			PARCHES		
Transición	Área (Ha)	Tamaño medio de los parches (Ha)	Varianza (Ha)	Área (Ha)	Tamaño medio de los parches (Ha)	Varianza (Ha)
S a SS	148 783	1 710	25 873 987	5 306	482	108 280
S a APF	24 237	307	737 958	9 840	186	102 797
SS a APF	80 488	330	1 143 954	12 702	259	94 402
B a BS	126 172	1 829	21 194 711	42 860	809	1 459 632
B a APF	15 838	134	41 263	3 902	130	22 787
APF a SS	43 216	259	188 971	5 537	221	107 466

CBC-S

	EXPANSIÓN			PARCHES		
Transición	Área (Ha)	Tamaño medio de los parches (Ha)	Varianza (Ha)	Área (Ha)	Tamaño medio de los parches (Ha)	Varianza (Ha)
S a SS	80 768	502	1 610 719	6 126	1 021	1 842 922
SS a S	21 943	1 371	3 645 930	1 592	530	78 445
SS a APF	54 776	236	364 536	20 087	174	67 495
AFP a SS	34 880	122	93 020	0	0	0