



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE BIOLOGÍA

ECOLOGÍA

**MODELADO DE LOS CAMBIOS DE USOS DEL SUELO EN LAS ÁREAS DE
INFLUENCIA DE LA RESERVA DE LA BIÓSFERA CHAMELA-CUIXMALA**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

ROLANDO FLORES CASAS

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS:

DR. MIGUEL ALFONSO ORTEGA HUERTA
INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

DRA. TANIA ESCALANTE ESPINOSA
FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

MÉXICO, D.F. SEPTIEMBRE, 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE BIOLOGÍA

ECOLOGÍA

**MODELADO DE LOS CAMBIOS DE USOS DEL SUELO EN LAS ÁREAS DE
INFLUENCIA DE LA RESERVA DE LA BIÓSFERA CHAMELA-CUIXMALA**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

ROLANDO FLORES CASAS

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. MIGUEL ALFONSO ORTEGA HUERTA
INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

DRA. TANIA ESCALANTE ESPINOSA
FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

MÉXICO, D.F. SEPTIEMBRE, 2015



Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión del Subcomité por Campo de Conocimiento de Ecología y Manejo Integral de Ecosistemas del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 25 de mayo de 2015, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** del alumno **FLORES CASAS ROLANDO** con número de cuenta **405008168** con la tesis titulada **"Modelado de los cambios de usos del suelo en las áreas de influencia de la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala"**, realizada bajo la dirección del **DR. MIGUEL ALFONSO ORTEGA HUERTA**:

Presidente: DR. VÍCTOR MANUEL G. SÁNCHEZ-CORDERO DÁVILA
Vocal: DR. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER
Secretario: DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO
Suplente: DRA. TANIA ESCALANTE ESPINOSA
Suplente: DR. JEAN FRANCOIS MAS CAUSSEL

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 12 de agosto de 2015.

DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA
COORDINADORA DEL PROGRAMA



c.c.p. Expediente del (la) interesado (a).

AGRADECIMIENTOS

- Al Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo de beca recibido al CVU/becario 440681/270081
- Al Dr. Miguel Alfonso Ortega Huerta por la dirección de la tesis.
- A los miembros del comité tutor: Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento y Dra. Tania Escalante Espinosa por sus comentarios y orientación recibida en la elaboración del proyecto.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mi asesor, Dr. Miguel Alfonso Ortega Huerta, por su gran paciencia al dirigir esta tesis, así como por todas sus enseñanzas y humor que amenizaron el proceso.

Al Dr. Jean Francois Mas, Dr. Víctor Sánchez Cordero y Dr. Enrique Martínez Meyer por sus comentarios y revisiones finales de la tesis.

A la M. en C. Mayra Hernández por su gran apoyo para llevar a cabo este trabajo.

A Rocío Gonzáles Acosta por su gran apoyo en todos los procesos administrativos del posgrado.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE CUADROS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Los cambios de uso del suelo	1
1.2. Deforestación	3
1.3. Modelado de los cambios de uso del suelo	4
1.4. Bosque tropical caducifolio o selvas secas	5
1.5. El Bosque Tropical Caducifolio (BTC) en la Región Chamela-Cuixmala.....	6
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3. OBJETIVOS	8
3.1. Objetivo general	8
3.2. Objetivos particulares	8
4. ÁREA DE ESTUDIO	8
5. DATOS Y MÉTODOS	11
5.1. Elaboración de modelos de mapas de tipos de vegetación y usos del suelo (TVyUS)	11
5.1.1. Obtención de las imágenes de satélite	11
5.1.2. Pre-procesamiento y ensamblado de imágenes multi-temporales.....	12
5.1.3. Enfoque multi-temporal y obtención de las áreas de entrenamiento	13
5.1.4. Generación de firmas espectrales	18
5.1.5. Depuración de firmas espectrales	19
5.1.6. Reconstrucción del mapa de TVyUS para 1970	19
5.1.7. Algoritmos de clasificación	21
5.1.8. Generalización de las clasificaciones	23
5.1.9. Análisis de exactitud	24
5.2. Tasas de cambio	24
5.3. Matrices de transición	25
5.4. Modelado de los cambios de usos del suelo	25
5.4.1. Estandarización de mapas de TVyUS	26
5.4.2 Análisis de cambio	26

5.4.3. Transiciones potenciales y Variables explicativas	27
5.4.4. Predicciones de los cambios de uso del suelo	28
6. RESULTADOS	28
6.1. Modelos de clasificaciones de usos del suelo y tipos de vegetación	28
6.1.1. Imágenes base e imágenes compuestas (t1, t2 y t3).....	28
6.1.2. Firmas espectrales	32
6.1.3. Imágenes clasificadas	35
6.1.4. Análisis de exactitud	41
6.2. Análisis de cambio	44
6.2.1. Tasas de cambio	44
6.2.2. Matrices de transición	49
6.3 Predicciones de cambios a futuro	52
6.3.1. Pre-modelado de los cambios de uso del suelo	52
6.3.2. Modelado de los cambios de uso del suelo y variables explicativas.....	53
6.3.3. Elaboración de sub-modelos	55
6.3.4. Predicción de escenarios tendenciales.....	57
6.4. La vulnerabilidad de la RBChC y los cambios de usos del suelo.....	62
7. DISCUSIÓN.....	65
7.1 Modelos de clasificación	65
7.2. Exactitud de clasificaciones TVyUS	67
7.3. Algoritmos de clasificación	69
7.4. Análisis de cambios	71
7.5. Modelado de los cambios de uso del suelo y variables explicativas	73
7.6. Procesos de cambio en la RBChC y sus áreas de influencia: causas y consecuencias.....	75
7.7. La RBChC y áreas de vulnerabilidad a cambios de usos del suelo	77
BIBLIOGRAFÍA	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de Estudio.....	9
Figura 2. Diagrama de flujo.....	14
Figura 3. Digitalización sobre imágenes en falso color.....	18
Figura 4. Cartas de tipos de vegetación y usos de suelo escala 1:50 000.....	20
Figura 5. Ejemplos de fotografías aéreas de muy alta resolución espacial.....	21
Figura 6. Regla de decisión “Máxima Probabilidad”.....	23
Figura 7. Estructura de una red neuronal.....	26
Figura 8. Mosaico de fotografías aéreas de muy alta resolución.....	29
Figura 9. Composición de mapas de tres cartas de tipos de vegetación y uso del suelo escala 1:50 000.....	30
Figura 10. Imágenes de satélite compuestas utilizadas	31
Figura 11. Comportamiento espectral de distintos tipos de cobertura del terreno.....	33
Figura 12. Imágenes clasificadas con subcategorías redundantes.....	36
Figura 13. Clasificaciones obtenidas con base en las clases originalmente establecidas....	37
Figura 14. Composición de mapa de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 1970.....	38
Figura 15. Composición de mapa de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 1993-94.....	39
Figura 16. Composición de mapa de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 2011-12.....	40
Figura 17. Proporción de superficie ocupada por cada clase.....	46
Figura 18. Tasas de cambio anuales para cada clase durante el periodo 1970 a 1993-94...	47
Figura 19. Tasas de cambio anuales para cada clase durante el periodo 1970 a 2011-12...	48
Figura 20. Tasas de cambio anuales para cada clase durante el periodo 1993-94 a 2011- 12.....	48
Figura 21. Parámetros del sub-modelo “deforestación”.....	56
Figura 22. Transición potencial de la clase Bosque tropical caducifolio conservado a Bosque tropical caducifolio secundario entre el periodo 1970 a 2011-12.....	57
Figura 23. Modelos de predicción suave.....	59
Figura 24. Predicciones duras para el año 2030.....	60

Figura 25. Escenarios de tendencias de cambio de diversos sub-modelos analizados.....	61
Figura 26. Predicciones suaves que incluye los sub-modelos “deforestación”, “cons-sec”, “sec-cons” con acercamiento a los límites de la RBChC.....	62
Figura 27. Predicciones suaves que incluye los sub-modelos “deforestación”, “cons-sec”, “sec-cons” con acercamiento a la porción noroeste del área de estudio.....	63
Figura 28. Predicciones suaves que incluye los sub-modelos “deforestación”, “cons-sec”, “sec-cons” con acercamiento a la porción noreste del área de estudio.....	65

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Imágenes de satélite seleccionadas para la elaboración de mapas de usos del suelo y tipos de vegetación, correspondientes a las décadas 1980, 1990, 2000 y 2010.....	15
Cuadro 2. Características de las imágenes compuestas utilizadas en la obtención de clasificaciones supervisadas de los tipos de vegetación y usos del suelo.....	16
Cuadro 3. Conjunto de datos vectoriales y fotografías aéreas utilizados como material de apoyo.....	17
Cuadro 4. Estadísticos de exactitud global de la clasificación de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 1993-94.....	41
Cuadro 5. Matriz de error de la clasificación de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 1993-94.....	41
Cuadro 6. Matriz de error de la clasificación de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 2011-12.....	42
Cuadro 7. Estadísticos de exactitud para el modelo de clasificación de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 1993-94.....	43
Cuadro 8. Estadísticos de exactitud para el modelo de clasificación de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 2011-12.....	43
Cuadro 9. Superficie ocupada y Tasas de Cambio anual (TCA) calculadas para cada clase de tipo de vegetación y usos del suelo entre 1970 y 1993-94.....	44
Cuadro 10. Superficie ocupada y Tasas de Cambio anual (TCA) calculadas para cada clase de tipo de vegetación y usos del suelo entre 1970 y 2011-12.....	45
Cuadro 11. Superficie ocupada y Tasas de Cambio anual (TCA) calculadas para cada clase de tipo de vegetación y usos del suelo entre 1993-94 y 2011-12.....	45
Cuadro 12. Matriz de transición para el periodo de 1970 a 1993-94.....	50
Cuadro 13. Matriz de transición para el periodo de 1970 a 2011-12.....	50
Cuadro 14. Matriz de transición para el periodo de 1993-94 a 2011-12.....	51
Cuadro 15. Evaluación de las variables explicativas mediante el índice de Cramer	53
Cuadro 16. Evaluación de las variables explicativas mediante el índice de Cramer para cada una de las clases consideradas.....	54

RESUMEN

Por décadas, los cambios de cobertura y usos del suelo han sido reconocidos como factores que promueven cambios globales y el deterioro de la cubierta forestal. Además, es plenamente reconocido que la deforestación se constituye como uno de los principales causantes de la fragmentación de hábitats y pérdida de la biodiversidad. En México, el Bosque Tropical Caducifolio (BTC) es la segunda cubierta forestal más afectada y la costa de Jalisco representa una de las extensiones más grandes y conservadas del BTC en Mesoamérica, además de presentar la primera área protegida dedicada a proteger exclusivamente este tipo de cobertura a través de la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala (RBChC). De manera general, la evaluación mediante técnicas de percepción remota ha demostrado ser un enfoque eficiente para analizar los procesos de deforestación y cambios en la cobertura y usos del suelo. Debido a esto, el presente trabajo utiliza cartografía especializada e imágenes multitemporales – multiespectrales para generar mapas clasificados de tipos de vegetación y usos del suelo correspondientes a las últimas cuatro décadas para analizar y generar modelos de cambios de usos del suelo en la región de influencia de la RBChC. Los modelos de mapa clasificados obtuvieron una exactitud global de 77.6% y 83% para los años 1993-94 y 2011-12, respectivamente. Los análisis de cambio muestran que la clase dominante fue el BTC conservado, el cual experimentó una desaceleración en la tasa de cambio anual, mostrando incrementos en su superficie. De manera similar, los pastizales introducidos mostraron una desaceleración en la tasa de cambio. La generación de modelos de tendencias muestra que la variable elevación es la mejor asociada a los cambios ocurridos en el periodo de análisis. Los diversos submodelos generados muestran que en las inmediaciones de la reserva se encuentran zonas vulnerables a los cambios de cobertura y usos del suelo. Se puede observar en estos modelos que no existe una zona de amortiguamiento entre los límites de la reserva y las zonas con valores altos de vulnerabilidad, por lo que áreas dentro de la reserva con valores bajos de vulnerabilidad a los cambios pudieran representar zonas prioritarias de atención. No obstante a los resultados obtenidos, futuros estudios podrían incluir clasificaciones con algoritmos de clasificación más sofisticados, así como la inclusión de variables del medio socio-económico que pudieran relacionar la influencia de las poblaciones humanas con los patrones de cambio detectados en la región. Sin embargo, este estudio sienta las bases para investigaciones sobre la fragilidad de los ecosistemas en la región de Chamela.

ABSTRACT

For decades, land use and land cover change have been considered as factors that promotes global change and forest cover deterioration. Furthermore, deforestation constitutes one of the major drivers of habitat fragmentation and loss of biodiversity. In México, Tropical Dry Forest (TDF) is the second most affected forest cover and the coast of Jalisco represents the most extensive and best preserved TDF cover in Mesoamerica, as well as being the first protected area aimed to protect exclusively this type of cover through the Reserva de la Biósfera Chamela Cuixmala (RBChC). In general, evaluations through remote sensing techniques have proven efficient to analyze deforestation processes and land use-land cover changes. Therefore, the present work uses specialized cartography and multitemporal-multispectral satellite images to generate classified land use-land cover maps corresponding to the last four decades to analyze and generate land use change models in the region of influence of the RBChC. Classified map models obtained a global accuracy of 77.6% y 83% for the periods 1993-94 and 2011-12, respectively. Change analysis shows preserved TDF as the dominant cover type in the region, which experienced a deceleration in the annual exchange rate, increasing its surface. In a similar fashion, introduced pastureland showed a deceleration in the annual exchange rate. Generation of tendency models shows that elevation is the variable best associated to land use-land cover changes in the period of analysis. Other sub-models generated suggest areas of high vulnerability to land use-land cover changes near the RBChC. As it can be observed, there is no buffer zones between the limits of the reserve and high vulnerability zones, so areas with low vulnerability within the reserve may represent high priority areas for attention. Nevertheless, future studies could include sophisticated classification algorithms as well as incorporation of socio-economic variables that may relate more directly the influence of human populations with the tendencies of change detected in the region. However, this work settle the basis for future research concerning ecosystem fragility in Chamela region.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Los cambios de uso del suelo

El uso del suelo generalmente ha sido considerado un problema ambiental local, pero se ha transformado en una fuerza global de mayor importancia. Tierras de cultivo, pastizales y áreas urbanas alrededor del mundo se han expandido en las últimas décadas, acompañadas de un consumo excesivo de energía, agua y fertilizantes junto con pérdidas considerables de la biodiversidad (Foley, 2005); además de afectar el clima, atmósfera, hidrología, ciclo de nutrientes, productividad, y en general la sustentabilidad de los sistemas productivos (Turner *et al.*, 1994). Los cambios de uso del suelo están plenamente reconocidos como factores implicados en promover cambios globales, alterando procesos y ciclos tanto físicos como biológicos; tales cambios pueden tener implicaciones importantes sobre las condiciones climáticas, lo que a su vez afecta subsiguientes cambios de uso del suelo (Lambin *et al.*, 1999; Agarwal *et al.*, 2000). Los patrones de uso del suelo, conducidos por una variedad de causas sociales, afectan la biodiversidad, los balances de agua y radiación, la emisión de gases y otros procesos que acumulativamente, afectan globalmente el clima y la atmósfera (Riebsame *et al.*, 1994). Para agravar el problema, se ha determinado que las tasas actuales de desertificación y pérdida y/o degradación del suelo producto del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo amenazan el suministro mundial de alimentos, haciendo crucial la evaluación de los impactos derivados de tales cambios, con el fin de sostener las demandas futuras de los recursos (Meyer & Turner, 1996); estos cambios determinan en parte la vulnerabilidad de ciertas regiones o poblaciones ante perturbaciones climáticas, económicas y socio-políticas (Kasperson *et al.*, 1995).

A través de los análisis de cambio de uso de suelo, no solamente es posible cuantificar la extensión de cambio de los bosques en un territorio, sino además generar modelos espacio-temporales que permiten determinar la dinámica de los procesos de cambio (Briassoulis, 2002; Turner & Meyer, 1994). Tradicionalmente, la medición de cambios en la cobertura vegetal y usos del suelo se realiza a partir de las evaluaciones generadas mediante técnicas de percepción remota, ya que ha demostrado ser un enfoque eficiente para detectar y monitorear la transformación del uso del suelo (Longley, 2002). Los avances en el mapeo de la vegetación han fortalecido las investigaciones de los cambios de coberturas y usos del suelo, proporcionando evaluaciones precisas de la extensión y

condiciones sanitarias de los bosques, pastizales y tierras de cultivo (Bocco *et al.*, 2001 y Zubair, 2006). La recolección de imágenes satelitales ha facilitado los análisis sobre procesos geológicos y patrones geográficos en la distribución de recursos naturales del planeta, a múltiples escalas tanto temporales como espaciales (e.g., local, regional y global). Los datos de imágenes de satélite también proveen un enlace directo entre las investigaciones ecológicas y ambientales a diferentes escalas, incluyendo los esfuerzos nacionales e internacionales para el manejo y conservación de la biodiversidad (Wilkie y Finn, 1996).

Los análisis de los cambios de uso del suelo giran en torno a dos preguntas centrales e interrelacionadas: ¿Cuáles son los factores conductores o causantes del cambio de uso del suelo? y ¿Cuáles son los impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo? (Peña & Fuentes, 2007). Aunque las causas pueden ser muy diversas, Meyer & Turner (1992) consideran la interacción entre factores ecológicos, socioeconómicos y políticos como principales variables conductoras. Por otra parte, Veldkamp y Fresco (1996) sugieren que el uso del suelo y sus cambios están determinados por la interacción espacial y temporal de factores biofísicos (e.g., barreras) tales como suelo, clima, topografía, etc., y factores humanos como el tamaño de la población, la tecnología, las condiciones económicas, etc. Un ejemplo de esta consideración es el trabajo realizado por Xiuhong *et al.* (2006), en el que mostraron mediante el análisis de imágenes satelitales que la principal causa del cambio de uso de suelo en la planicie tibetana se debió al desarrollo socioeconómico durante la década 1990-2000, además de que el cambio climático ha favorecido el desarrollo de tierras de cultivo en la región. Relaciones más puntuales se han identificado como factores conductores de cambio, tales como el caso de Pineda *et al.* (2009), quienes encontraron que las zonas agrícolas de temporal en el Estado de México, México, incrementaron su superficie durante el periodo 1993-2002, mientras que aquellas de las zonas boscosas disminuyeron.

Para conocer la naturaleza de los procesos de cambios, es necesario relacionar tales cambios con variables biofísicas y/o socioeconómicas (Evangelista *et al.*, 2010). El entendimiento de cuáles son las variables causales es determinante para establecer las direcciones de cambio de uso/ cobertura del suelo. Se requiere ir más allá de los “mitos” o simplificaciones que son empíricamente difíciles de respaldar, pero que han ganado suficiente apoyo popular para influenciar las políticas ambientales y de desarrollo

(Lambin *et al.*, 2001 & Turner *et al.*, 1993). Un ejemplo de estos casos es la formulación “IPAT” (Impacto (sobre ambiente o recurso) = Población x Afluencia x Tecnología (Ehrlich & Holdren, 1974). Sin embargo, autores como Lambin *et al.* (2001) consideran que, a nivel de estudio de caso o regional, tomar en cuenta el crecimiento poblacional, la pobreza y la infraestructura no aportan un entendimiento suficiente de los procesos de cambio de uso del suelo. Por muchos años los actores locales y sus actividades asociadas han sido considerados como la mayor amenaza para la biodiversidad y la cobertura vegetal nativa (Mangel *et al.*, 1996). Por esta razón, estudios como el de Durán *et al.* (2002), han tenido como propósito entender las interacciones entre las comunidades rurales y su ecosistema; en el que comparan las tasas de cambio de cobertura entre comunidades con manejo forestal y áreas naturales protegidas, concluyendo que no hay diferencias significativas entre las categorías y reconocen que, a pesar de tratarse de modelos de conservación bien diferenciados, ambos permiten mantener coberturas de vegetación nativa.

1.2. Deforestación

Actualmente, existe información suficiente para determinar que se ha presentado un deterioro acelerado global de la cubierta forestal en los últimos años. También se acepta ampliamente que gran parte de esta degradación es de origen antrópico (Cincotta *et al.*, 2000; Lambin *et al.*, 2001 & Vitousek, 1997). La deforestación se constituye así como uno de los principales causantes de desertificación, fragmentación de hábitats y la pérdida de la biodiversidad. Las magnitudes de tales procesos son particularmente aceleradas en los bosques tropicales, donde la cobertura vegetal natural tiende a ser predominantemente antrópica (FAO, 1996; Noble & Dirzo, 1997).

México se encuentra entre los países con los índices de deforestación más elevados a nivel mundial; entre los años 1988 y 2005, las estimaciones de la tasa de deforestación en el país han oscilado entre las 316 mil y las 800 mil hectáreas de bosques y selvas por año (Maser *et al.*, 1997). Los patrones de deforestación varían notablemente por regiones, con cerca del 80% concentrado en las regiones centro y sur del país (Maser, 1996). En el contexto mundial, México fue el único país miembro de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) que durante el periodo 1990-2000, perdió significativamente superficies forestales. En Latinoamérica, México fue uno de los países con la mayor tasa, tan sólo por debajo de Brasil, Costa Rica, Guatemala y El

Salvador (FAO, 2005). Después de las selvas húmedas, la selva estacional o bosque tropical caducifolio (BTC) es el más afectado por la cantidad de superficie que se desmonta al año y con las tasas de deforestación más aceleradas (1.9% al año) (Masera *et al.* 1992).

1.3. Modelado de los cambios de uso del suelo

Los modelos pueden ser considerados como abstracciones, aproximaciones de la realidad que se logran mediante la simplificación de relaciones complejas del mundo real, al punto que pueden ser entendibles y analíticamente manejables (Briassoulis, 2002). En lo que respecta a la evaluación de los cambios de uso del suelo, existe un gran número de modelos aplicados para la medición de tales cambios; por ejemplo, Agarwal *et al.* (2000), realizaron una revisión de 19 modelos utilizados en la evaluación de los cambios de uso del suelo, incluyendo algoritmos como las cadenas Markov, la función logística, modelos de regresión, econométricos, sistemas dinámicos, simulación espacial, planeación linear, planeación matemática no linear, modelos mecánicos en SIG, y modelos de autómatas celulares.

Recientemente, ha aumentado el interés en utilizar modelos espacialmente explícitos. A un nivel básico, la identificación de los cambios en la cobertura se basa en el análisis de dos imágenes multi-espectrales de la misma ubicación y extensión geográfica, correspondientes a dos periodos distintos, cuyos resultados pueden tener aplicaciones muy diversas (Agarwal, 2000; Emil *et al.*, 2012). Por ejemplo, a escalas regionales, son utilizados para modelar la dinámica del paisaje y cambios en el uso del suelo y cobertura de la vegetación; mientras que a pequeña escala se utilizan para modelar cambios en las poblaciones de algún organismo de interés, además del monitoreo de contaminantes, la valoración de la deforestación, entre otros (Baltzer *et al.*, 1998; D'Addabbo *et al.*, 2004; Gueguen *et al.*, 2010; Singh, 1989). Debido a la creciente necesidad y disponibilidad de datos, diversos métodos para la detección de cambios en la cobertura han sido desarrollados en los últimos años (Paola & Schowengerdt, 1995). Por ejemplo, las redes neuronales artificiales (RNA) son una herramienta importante para el análisis de imágenes de satélite y ofrecen las siguientes ventajas sobre otros algoritmos: (1) Las RNA son automatizadas y adaptativas, ya que se pueden autoajustar a los datos sin especificación funcional del modelo; (2) proveen de aproximaciones funcionales universales; y (3) los clasificadores neuronales no requieren de hipótesis iniciales sobre

la distribución de los datos y son capaces de aprender datos discontinuos no lineales (Pacifiçi *et al.*, 2007). El uso de RNA ha demostrado ser una alternativa eficiente para generar modelos espacialmente explícitos. Por ejemplo, Emil *et al.* (2012) realizaron una comparación de diversos métodos para modelar los cambios en la cobertura mediante el uso de imágenes satelitales a través de la evaluación de diversos parámetros (e.g., tasa de detección correcta, tasa de rechazos correcta, tasa de falsos positivos, tasa de fallos, aproximación de la tasa de éxito total), encontrando que el desempeño obtenido mediante técnicas neuronales es mayor que el obtenido si se utilizan técnicas estadísticas.

1.4. Bosque tropical caducifolio o selvas secas

Actualmente, 97% del área existente de BTC en el mundo, se encuentra amenazado por los procesos conocidos genéricamente como “cambio global”, los cuales incluyen la degradación y cambio de uso del suelo, la invasión de especies exóticas y el cambio climático, siendo este último relativamente significativo en el continente americano (Maass, 1995 & Miles *et al.*, 2006). Las áreas con mayor extensión de BTC se encuentran en México, Cuba, Venezuela, Colombia y Brasil, encontrándose este tipo de vegetación seriamente amenazada en México y Chiquitania, Bolivia (Miles *et al.*, 2006).

El BTC comprende el 42% de la totalidad de áreas boscosas a nivel mundial, sin embargo los estudios realizados en este tipo de vegetación son considerablemente menores que los realizados en bosques tropicales húmedos (Mooney *et al.*, 1995; Sánchez-Azofeifa *et al.*, 2005). De acuerdo con Janzen (1988), el BTC es el más amenazado de los ecosistemas tropicales. En América, a la llegada de los españoles, el BTC presentaba aproximadamente una extensión 550 000 km²; en la actualidad, solamente el 1% de esa cobertura está protegida bajo algún estatus de conservación y menos del 2% se encuentra lo suficientemente intacto para llamar el interés de conservacionistas (Janzen, 1988 & Sánchez-Azofeifa *et al.*, 2005). Se ha estimado que los únicos sitios protegidos de BTC que contribuyen al sostenimiento de estos ecosistemas naturales, se encuentran en los Parques Nacionales Santa Rosa y Palo Verde en Costa Rica, y en las Reservas de la Biósfera Zicuirán Infiernillo, Michoacán, y Chamela-Cuixmala, Jalisco en México (Hartshorn, 1988; Janzen, 1988 & Quesada y Stoner, 2004).

En México, el BTC es el tipo de vegetación tropical predominante, cubriendo más del 60% del área total de vegetación tropical. Aunque la presencia humana se remonta a miles de años, la mayor parte de la deforestación es reciente. De acuerdo con Trejo y Dirzo

(2000), solamente se conserva en buen estado el 27% de la cobertura original. A pesar de esto, existen pocas áreas naturales destinadas a la conservación de estos ecosistemas (Arizmendi *et al.*, 2000).

El BTC ha sido destruido o convertido en diferentes unidades de vegetación como consecuencia del uso humano, principalmente en la costa sur del Pacífico y la península de Yucatán, ya sea para establecimiento de comunidades humanas o la realización de actividades como la producción de plantas y animales domésticos (Trejo & Dirzo, 2000; Hernández *et al.* 1990); en ocasiones, dichas perturbaciones llegan a tener un impacto severo, aunque no existe una clara distinción entre vegetación secundaria y madura (Aubréville 1938; Whittaker 1972; Clark 1996). Tras las perturbaciones, el bosque tropical caducifolio pierde su identidad y se convierte en asociaciones secundarias ecológica y fisonómicamente estables (tales como matorrales y pastizales), lo que limita la regeneración de este tipo de vegetación (Rzedowski & Calderón, 1987; Yetman & Búrquez, 1994; Eliason & Allen, 1997).

1.5. El Bosque Tropical Caducifolio (BTC) en la Región Chamela-Cuixmala

La Costa de Jalisco ha sido tradicionalmente considerada como una de las extensiones de selva estacional más grandes y mejor conservadas en Mesoamérica (Ceballos, 1995). Sin embargo, en la región existen evidentes indicaciones del avance de la deforestación y perturbaciones ambientales; como ejemplo podemos referir la existencia de áreas con erosión severa en suelos someros, con una estabilidad ambiental categorizada de mesoestable a inestable. A principios de los años noventa se consideraba que los tamaños de población humana ejercían una presión mediana sobre los recursos naturales. El proceso de deforestación en la región Costa de Jalisco, resultado de los cambios de usos del suelo, es descrito como un proceso relativamente reciente con tasas cada vez más aceleradas (Miranda 1997).

Se ha determinado que en el BTC de la región Chamela-Cuixmala existen ecosistemas tropicales frágiles, con elevados índices de diversidad biológica, endemidad y riqueza de especies; habitan especies consideradas como endémicas, raras, amenazadas o en peligro de extinción; existe un gran número de especies vegetales de importancia económica, medicinal o de ornato; y finalmente, en esta área se localiza el Río Cuitzmala y una serie de frágiles lagunas, venas y esteros asociados, que representan hábitats únicos

en la región. Debido a la importancia ecológica de estos ecosistemas, en 1993 se decreta un área de 13,142 ha como la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala, una de las primeras áreas protegidas en establecerse en la costa del Pacífico Mexicano, y la primera en proteger exclusivamente al BTC y hábitats asociados. En la reserva se protegen 10 diferentes tipos de vegetación, incluido el bosque tropical caducifolio, la selva mediana subperennifolia y hábitats acuáticos extremadamente vulnerables. (Ceballos *et al.*, 1999).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con base a lo anterior, el presente trabajo intenta responder a preguntas relacionadas con la naturaleza y proyecciones a futuro de los procesos de cambios de uso del suelo en las áreas de influencia de la reserva de la biósfera Chamela-Cuixmala (región de Chamela), con el particular interés de dilucidar los procesos y conocer las causas (variables de cambio) que han determinado los cambios de uso del suelo en las áreas de influencia de la reserva de la biósfera Chamela Cuixmala, durante las últimas cuatro décadas.

Según datos de la SEMARNAT (2005), los inventarios forestales realizados hasta la fecha presentan inconsistencias y difieren sustancialmente uno del otro, dando como resultado registros poco confiables sobre la estimación de las tasas de deforestación. Por otra parte, tales inventarios corresponden a la escala del país y por lo tanto se carece de análisis regionales a mayores resoluciones espaciales. Miranda (1998) desarrolló un análisis regional que abarca toda la costa del estado de Jalisco, en el cual estimó tasas de deforestación para dicho periodo. Considerando que las áreas de influencia de la RBChC incluyen solamente una parte de las costas de Jalisco y que aparentemente se ha dado una desaceleración de los desmontes masivos en varias regiones del país, el presente estudio trata de responder a la pregunta sobre las dimensiones reales del proceso de deforestación en aquellas áreas próximas a la RBChC. Al mismo tiempo, la obtención de proyecciones sobre los futuros escenarios de los usos del suelo y cobertura vegetal, haría posible identificar cuáles son las áreas más vulnerables dentro y en las proximidades de la RBChC y cuáles son las áreas identificadas como importantes para la conservación regional.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Modelar los procesos de cambios de uso del suelo de las últimas cuatro décadas y generar escenarios futuros en las áreas de influencia de la reserva de la biosfera Chamela-Cuixmala.

3.2. Objetivos particulares

- a) Elaborar mapas de los tipos de vegetación y usos del suelo (TVyUS) correspondientes a las décadas 1970's, 1990's y 2010.
- b) Analizar los cambios de uso del suelo y cubierta del terreno a nivel de formación vegetal.
- c) Identificar los factores principales que explican los cambios de uso del suelo y cubierta del terreno a partir de la incorporación de variables causales potenciales.
- d) Con base en las proyecciones a futuro de los cambios de uso del suelo y cobertura del terreno, identificar la vulnerabilidad de la RBChC y sus áreas adyacentes.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en la costa sur del estado de Jalisco, particularmente corresponde a la región donde se encuentra la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala; región delimitada por el río San Nicolás al norte y por el río Purificación al sur. Respecto a la delimitación longitudinal, la línea costera resulta el límite natural occidental, mientras que en el límite oriental se identifican las elevaciones al nivel del mar representadas por formaciones de vegetación de origen templado como los bosques de encino y pino-encino (Figura 1).

La región de Chamela-Cuixmala se ubica al noreste de la provincia fisiográfica denominada Planicie Costera Suroccidental, dentro de la subprovincia Sierras de la Costa de Jalisco y Colima (INEGI, 1981). Es una región predominantemente montañosa y su relieve está dominado por lomeríos y algunas planicies aluviales que se presentan especialmente cerca de la desembocadura de arroyos y ríos (De Ita, 1983).

El clima es eminentemente tropical y perteneciente a los cálido-húmedos. Se caracteriza por una temperatura media anual de 24.9 °C y una marcada estacionalidad con períodos de lluvias (julio-octubre) y de seca (noviembre-junio). La precipitación media anual es de 748mm en Chamela y 782mm en Cuixmala (Bullock, 1986).

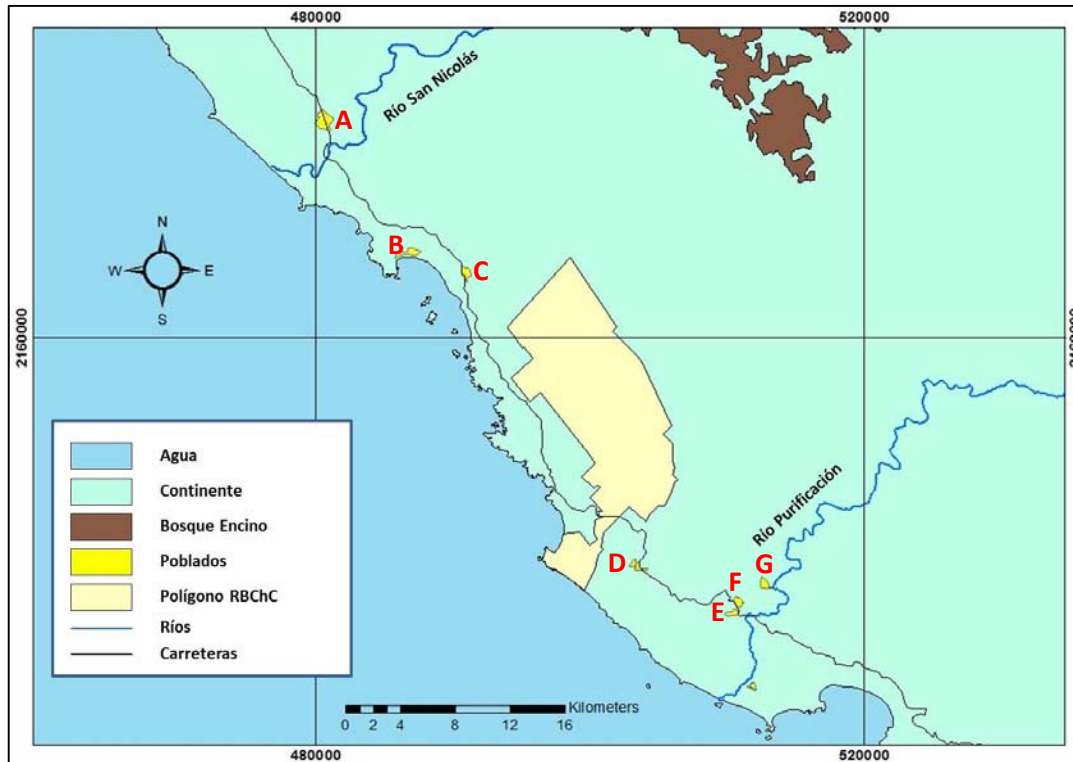


Figura 1. Área de estudio (Proyección UTM Zona 13N, Datum WGS 1984), delimitada al norte por el Río San Nicolás, al sur por el Río Purificación, al oeste por la costa del Pacífico y al este por las áreas de transición entre bosque tropical caducifolio y los bosques de afinidades templadas (encinos). La Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala (RBChC) constituye la parte central del área de estudio. Los polígonos amarillos representan los asentamientos humanos; A) José María Morelos, B) Pérula, C) San Mateo, D) Emiliano Zapata, E) Agua Caliente, F) Miguel Hidalgo Nuevo, G) Miguel Hidalgo Viejo. La línea negra representa la carretera federal 200 Melaque/ Barra de Navidad a Puerta Vallarta.

De acuerdo con Durán *et al.* (2002) y la Guía para la interpretación de cartografía Serie IV del INEGI (2012), los tipos de vegetación pertenecientes a la región de Chamela son los siguientes:

Selva baja caducifolia: Es el tipo de vegetación dominante en la región y agrupa formaciones vegetales arbóreas de climas tropicales con adaptaciones a condiciones de aridez estacional. Se caracteriza principalmente porque aproximadamente el 75% de las especies que la integran pierden sus hojas en la época seca del año. La altura promedio de los árboles se encuentra entre 5 y 10 metros. Además de las cactáceas, existen pocos árboles y arbustos espinosos. Las familias con más especies arbóreas son Leguminosae y Euphorbiaceae. Las formas arbustivas (e.g. *Achatocarpus gracilis*, *Bromelia palmeri*,

Croton roxanae) no son mayores a 4 o 5 metros de altura. Por su parte, las plantas herbáceas (e.g. *Euphorbia humayensis*, *Phyllanthus hexadactylus* y *P. standleyi*.) son evidentes durante la temporada de lluvias. En las laderas destacan especies que toleran condiciones más secas (e.g. *Agave angustifolia*, *A. colimana*, *Amphipterygium adstringens*, entre otras) (INEGI, 2012; Miranda, 1997; Durán *et al.*, 2002).

Selva mediana subcaducifolia: Se ubica en valles amplios asociados a ríos y arroyos principales. Este tipo de vegetación también es designada como vegetación de arroyo y agrupa formaciones vegetales arbóreas de climas tropicales en donde el 50 y 75% de las especies pierden sus hojas en la época más seca del año (INEGI, 2012). En contraste con la selva baja, la selva mediana presenta follaje más oscuro. El dosel mide alrededor de 20 metros de altura, aunque algunos árboles llegan a alcanzar los 30 m. Las especies arbóreas características de este tipo de vegetación son: *Astronium graveolens*, *Brosimum alicastrum*, *Bursera arborea*, *Coccoloba babadensis*, *Ficus insipida*, *Sideroxylon camiri*, *Tabebuia rosea*, entre otras (Durán *et al.*, 2002). En el sotobosque, los árboles y arbustos miden menos de 4 o 5 metros de altura. El estrato herbáceo es en general escaso.

Matorral espinoso: Ceballos y Miranda (1986) ubican la presencia de este tipo de vegetación en sitios cercanos a la costa y en las desembocaduras de los ríos. Se cree que este tipo de vegetación podría corresponder a una fase secundaria de la selva baja, debido a la abundancia de especies típicas de lugares perturbados (Ceballos & Miranda, 1986; Lott, 1993). Las especies que dominan son arbustos espinosos caducifolios como *Acacia cochliacantha*, *A. farnesiana*, *A. pennatula*, *Mimosa acantholoba*, *M. arenosa*, entre otras.

Vegetación riparia: Encontrada en los lechos de los arroyos y ríos principales. Las especies arbóreas más comunes en este tipo de vegetación son *Astianthus viminalis*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Ficus spp.* y *Salix gooddingii*. Se reconocen algunas especies de lianas como *Celtis iguanaza*, *Combretum laxum*, entre otras. Son característicos también una gran variedad de arbustos y herbáceas que florecen prácticamente todo el año; esto debido a la humedad disponible en los bancos de arena.

Manglar: Se desarrollan cerca de la costa, en las lagunas costeras y en las desembocaduras de los ríos. De acuerdo con Miranda y Hernández (1963), se caracteriza por ser una selva uniforme, cuya especie dominante es el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), árbol conocido

por tener raíces aéreas en forma de zancos. Entre otras especies características de este lugar se encuentran, *Avicennia germinans* y *Conocarpus erecta*.

Zonas agropecuarias. Localizadas principalmente en las planicies aluviales de los arroyos de la región. Los tipos de agricultura que se practican son: agricultura de temporal con cultivos permanentes, agricultura de temporal con cultivos anuales y agricultura de riego, y entre los principales cultivos se encuentran frutos y legumbres como papaya, plátano, mango, sandía, coco, calabaza, maíz, sorgo, cebolla, chile y frijol (Ceballos *et al.*, 1999). Los usos pecuarios se encuentran establecidos principalmente en las zonas de lomeríos (Durán *et al.*, 2002).

Zonas urbanas. Corresponden a los centros poblacionales existentes en la región (Figura 1).

Aguirre-Orozco (2012), aplicando procedimientos de clasificación supervisada en imágenes SPOT del año 2008, elaboró un mapa actualizado de la distribución de los distintos tipos de vegetación y usos de suelo en la región de Chamela, siendo estos los siguientes: : 1) Selva baja caducifolia, 2) Selva baja caducifolia perturbada, 3) Selva mediana subcaducifolia, 4) Manglares, 5) Bosques templados, 6) Agricultura de cultivos de temporal, 7) Agricultura de cultivos permanentes, 8) Áreas pecuarias, 9) Asentamientos humanos y 10) Cuerpos de agua.

5. DATOS Y MÉTODOS

5.1. Elaboración de modelos de mapas de tipos de vegetación y usos del suelo (TVyUS)

5.1.1. Obtención de las imágenes de satélite

En este estudio se utilizaron imágenes satelitales con múltiples bandas espectrales (e.g., azul, verde, rojo, infra-rojo cercano, infra-rojo medio) Landsat Multi Spectral Scanner (MSS), Landsat-Thematic Mapper (ETM), Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+), SPOT 4 y SPOT 5 para generar mapas de los diferentes escenarios de la cubierta vegetal y usos del suelo correspondientes a las últimas cuatro décadas. Las imágenes satelitales Landsat fueron obtenidas a través del catálogo Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), mientras que las imágenes SPOT fueron provistas por dos sistemas: a) Estación de Recepción México de la constelación Spot (ERMEXS), sistema para la adquisición y distribución de imágenes SPOT manejada

por la Secretaría de Marina con apoyo de la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) y el INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática); y b) Estación de Recepción México Nueva Generación (ERMEX NG) manejada por la SAGARPA y la SEDENA (Secretaría de la Defensa Nacional).

Aunque la búsqueda de imágenes estuvo orientada a la representatividad de los regímenes estacionales (secas y lluvias), su selección estuvo finalmente determinada por su calidad (i.e., ausencia de problemas de origen tales como bandeo, así como nubosidad), encontrando prácticamente imposible encontrar imágenes limpias de nubes durante los periodos de lluvias (julio a septiembre).

5.1.2. Pre-procesamiento y ensamblado de imágenes multi-temporales

A pesar de que las imágenes seleccionadas, tanto Landsat como SPOT, fueron adquiridas con un nivel de procesamiento que incluía la georreferenciación al sistema de coordenadas UTM, éstas mostraron inexactitudes que variaron de decenas a cientos de metros. Por lo tanto, se tuvieron que aplicar procedimientos de rectificación o registro geométrico, con lo cual se aseguró no solamente la precisa asignación de coordenadas métricas, sino también la correspondencia pixel a pixel de las diferentes imágenes utilizadas para ensamblar las imágenes compuestas.

Ya que la extensión del área de estudio se encuentra cubierta por dos trayectorias de los satélites, llamadas path (trayectoria) y row (fila) (Cuadro 1), fue necesario rectificar dos escenas para cada una de las fechas seleccionadas. Por ejemplo, para el caso de las imágenes SPOT, cada fecha incluyó dos escenas con los path/row 576/311 y 577/311. La rectificación se llevó a cabo en respectivos recortes de las escenas, generando entre 80 y 100 puntos de control, y utilizando ecuaciones polinomiales de tercer orden para el remuestreo de píxeles. Posteriormente se elaboró una imagen en mosaico y se hizo un recorte final correspondiente al área de estudio.

El proceso de generación de mapas de TVyUS estuvo basado en la utilización de imágenes “compuestas”. Es decir, se integraron diferentes imágenes correspondientes a diferentes fechas y estados fenológicos de la vegetación dentro de una sola imagen para conformar el esquema multi-temporal. Más aún, estas imágenes compuestas incluyeron como banda adicional el Modelo Digital de Elevación (MDE) con el propósito de

restringir la identificación de ciertos tipos de vegetación, cuya distribución está limitada a ciertas alturas (e.g., manglar, el cual se desarrolla a no más de 30 msnm). El Cuadro 1 muestra las imágenes satelitales que de manera preliminar formaron parte de este estudio. El Cuadro 2 muestra las características de las imágenes compuestas sometidas al análisis de clasificación.

5.1.3. Enfoque multi-temporal y obtención de las áreas de entrenamiento

Con la finalidad de generar los mapas de TVyUS para cada fecha o periodo de tiempo, se llevaron a cabo procedimientos de clasificación supervisada de imágenes bajo un esquema multi-temporal expresado en las imágenes compuestas descritas en el apartado anterior. Es decir, mediante la generación de sitios de entrenamiento, se extrajeron los estadísticos de las características espectrales de cada pixel en las imágenes compuestas para posteriormente ser clasificados con base a una regla de decisión o algoritmo matemático (ERDAS, 2010), con la finalidad de obtener una mayor separación entre las respuestas espectrales al aprovechar la diferenciación en los ritmos fenológicos de la vegetación.

No obstante que la obtención de los mapas de TVyUS fue realizada mediante la aplicación de métodos de clasificación supervisada, se generaron clasificaciones no supervisadas (Jensen, 1996) mediante los clasificadores ISOCLUST e ISODATA con el objetivo de explorar el comportamiento espectral de los datos. Estos clasificadores utilizan la regla de decisión (algoritmo) “*Iterative Self Organizing Data Analysis*” el cual divide una imagen de n-dimensiones en cúmulos de pixeles utilizando la distancia espectral como criterio. Creando centroides (“semillas”) al azar para cada clase, los pixeles son clasificados a su centro más cercano y se asigna a un conglomerado (clase), recalcula los nuevos centros e iterativamente continúa el proceso hasta que los patrones espectrales para cada clase quedan definidos (Ball & Hall, 1965; Tou & González, 1974; Eastman, 2009). La figura 2 muestra un diagrama de flujo que describe los procedimientos aplicados para elaborar los mapas de TVyUS.

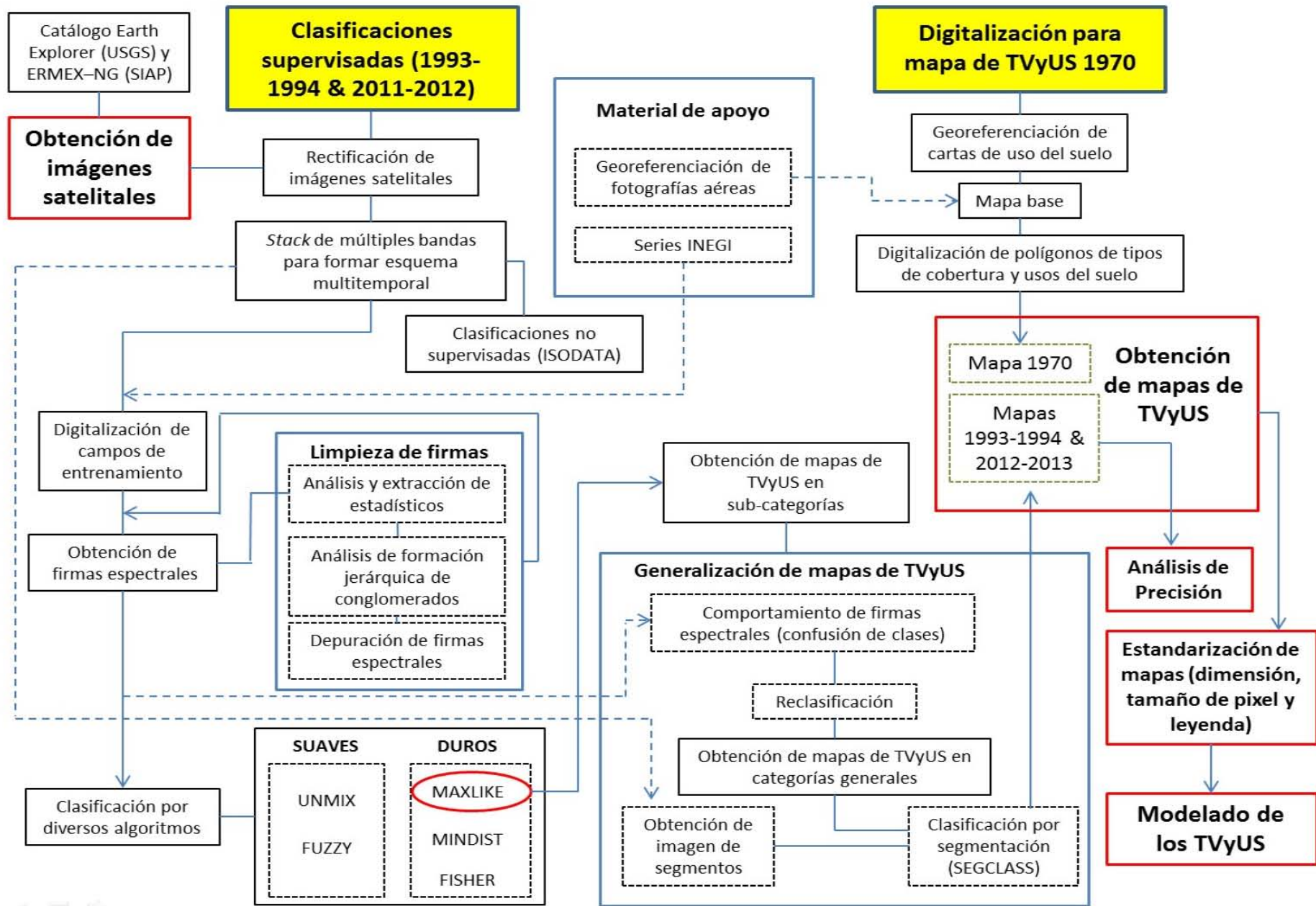


Figura 2. Diagrama de flujo que describe los procedimientos aplicados para la elaboración de los mapas de TVyUS

Cuadro 1. Imágenes de satélite seleccionadas para la elaboración de mapas de usos del suelo y tipos de vegetación, correspondientes a las décadas 1980, 1990, 2000 y 2010.

Tiempo	Satélite	Sensor	Fecha (aaaa/mm/dd)	Trayectoria de vuelo Path/Row	Longitud de onda μm (Bandas)	Resolución espacial (m)
1978-1980	Landsat3	MSS	1978/11/01	32/46	Verde 0.50-0.60 (Banda 4) Roja 0.60-0.70 (Banda 5) Cercano IR 0.80-1.10 (Banda 7)	60
	Landsat2	MSS	1980/06/08	32/46	4,5,7	60
	Landsat2	MSS	1980/12/05	32/46	4,5,7	60
1993-1994	Landsat5	TM	1993/02/18	30/46	Azul-Verde 0.45-0.52 (Banda 1) Verde 0.52-0.60 (Banda 2) Roja 0.63-0.69 (Banda 3) Cercano IR 0.76.-090 (Banda 4) Medio IR 1.55-1.75 (Banda 5) Medio IR II 2.08-2.35 (Banda 7)	30
	Landsat5	TM	1993/02/18	30/47	1,2,3,4,5,7	30
	Landsat5	TM	1993/11/17	30/46	1,2,3,4,5,7	30
	Landsat5	TM	1993/12/03	30/47	1,2,3,4,5,7	30
	Landsat5	TM	1994/05/12	30/46	1,2,3,4,5,7	30
	Landsat5	TM	1994/05/12	30/47	1,2,3,4,5,7	30
	Landsat5	TM	1999/03/23	30/46	1,2,3,4,5,7	30
	Landsat5	TM	1999/03/23	30/47	1,2,3,4,5,7	30
	Landsat5	TM	1999/07/29	30/46	1,2,3,4,5,7	30
	Landsat5	TM	1999/07/29	30/47	1,2,3,4,5,7	30
1999-2000	Landsat7	ETM+	1999/11/26	30/46	Azul 0.45-0.51 (Banda 1) Verde 0.525-0.605 (Banda 2) Roja 0.63-0.69 (Banda 3) Cercano IR 0.75-0.90 (Banda 4) Medio IR 1.55-1.75 (Banda 5) Medio IR II 2.09-2.35 (Banda 7)	28.5
	Landsat7	ETM+	1999/11/26	30/47	1,2,3,4,5,7	28.5
	Landsat5	TM	2000/01/21	30/46	1,2,3,4,5,7	30
	Landsat5	TM	2000/01/21	30/47	1,2,3,4,5,7	30

Cuadro 1. Imágenes de satélite seleccionadas para la elaboración de mapas de usos del suelo y tipos de vegetación, correspondientes a los periodos 1980, 1990, 2000 y 2010. (Continuación)

Tiempo	Satélite	Sensor	Fecha (aaaa/mm/dd)	Trayectoria de vuelo Path/Row	Longitud de onda μm (Bandas)	Resolución espacial (m)
2011/2012	SPOT	HRVIR	2011/04/08	576/311 577/311	Azul 0.50-0.59 (Banda 3) Verde 0.61-0.68 (Banda 2) Roja 0.78-0.89 (Banda 4) SWIR (Shortwave Infrared) 1.58-1.75 (Banda 1)	20
	SPOT	HRVIR	2011/12/24	576/311 577/311	1,2,3,4	20
	SPOT	HRVIR	2012/05/02	576/311 577/311	1,2,3,4	20

Cuadro2. Características de las imágenes compuestas utilizadas en la obtención de clasificaciones supervisadas de los tipos de vegetación y usos del suelo (TVyUS). MDE = modelo digital de elevación.

Periodo	Fechas	Bandas (por fecha)	Total de bandas de imagen compuesta
1993-1994	18-feb-93	Azul, Verde, Roja, Cercano IR	18+MDE
	17-nov-93	Medio IR, Medio IR II	
	05-may-94		
2011-2012	24-dic-11	Azul, Verde, Roja, Cercano IR	8+MDE
	02-may-12		

Debido a que ciertas bandas para la fecha 1999-2000 presentaban cierto grado de nubosidad, esta fecha fue excluida del análisis ya que no se pudo obtener una imagen clasificada confiable. Del mismo modo y debido a que las imágenes Landsat para la fecha 1978-1980 presentaron una resolución espacial gruesa (60 m) así como problemas de bandeo, se optó por no utilizar estas imágenes para obtener una imagen clasificada. Para la obtención de una imagen clasificada correspondiente a la fecha 1970, se aplicó un enfoque distinto, el cual se describe en el punto 5.1.6 de esta sección.

Con la finalidad de llevar a cabo clasificaciones supervisadas, se obtuvieron sitios o áreas de entrenamiento mediante la digitalización en pantalla de polígonos correspondientes a las diferentes clases de tipos de vegetación y usos del suelo. Debido a que la clasificación supervisada se basa en el entrenamiento del software mediante la selección de píxeles que representen los diferentes patrones de TVyUS (ERDAS, 2010; Hord, 1982), la localización de las áreas de entrenamiento fue determinada con el apoyo de información cartográfica contenida en las Series INEGI y fotografías aéreas de muy alta resolución (Cuadro 3). Mediante la utilización de los sistemas de información geográfica (ERDAS Imagine 9.2, IDRISI Taiga) fue posible sobreponer los polígonos de TVyUS a las diferentes imágenes compuestas, con la finalidad de visualizar la correspondencia entre la identidad de los polígonos de la información cartográfica de apoyo y las condiciones, tanto puntuales como estacionales, de la cubierta del terreno mostradas en las imágenes de satélite (Figura 3). A partir de esta correspondencia (identidad de polígonos vs características visuales de las imágenes), la utilización de información cartográfica, así como conocimiento general del área, fue posible obtener las áreas de entrenamiento, a partir de las cuales se generaron firmas espectrales preliminares para cada TVyUS, proceso que se describe en la siguiente sección.

Cuadro 3. Conjunto de datos vectoriales y fotografías aéreas utilizados como material de apoyo para localizar y generar áreas de entrenamiento.

Producto INEGI	Datos utilizados para su elaboración	Escala	Metodología	Fecha de datos de campo
Serie I	Fotografía aérea 1:50 000 a 1:80 000 (1968-1986) B/N y Sepia	Grano de emulsión/escala de vuelo	Tecnología analógica: equipos óptico-mecánicos. Transferido a formato digital por digitalización manual y de barrido.	1971-1986
Serie II	Compuestos de imágenes Landsat TM (1993) Multiespectral	1:250 000		1993-1998
Serie III	Imágenes Landsat ETM (2002) Multiespectral	1:250 000	Tecnología Digital: Plataforma PC y software SIG	2002-2003
Serie IV	Imágenes SPOT (2007 y 2008) Multiespectral	1:250 000		2007-2008

5.1.4. Generación de firmas espectrales

Para correr los algoritmos de clasificación supervisada es necesario obtener un archivo de firmas espectrales correspondientes a las diferentes clases de TVyUS de interés. Se generaron firmas espectrales preliminares a partir de las áreas de entrenamiento cuyo tamaño fue de 10x10 píxeles en promedio. Una vez que se obtuvieron las áreas, se les asignó un identificador único (ID) y finalmente mediante el software ERDAS Imagine 9.2, se extrajeron las firmas espectrales en archivos individuales para cada clase de TVyUS.

Posteriormente, una vez que se aplicó el procedimiento de depuración de firmas espectrales descrito en el siguiente apartado, las áreas de entrenamiento correspondientes fueron importadas al software IDRISI Taiga y se procedió a generar las firmas a partir de las diferentes bandas que conforman las imágenes compuestas.

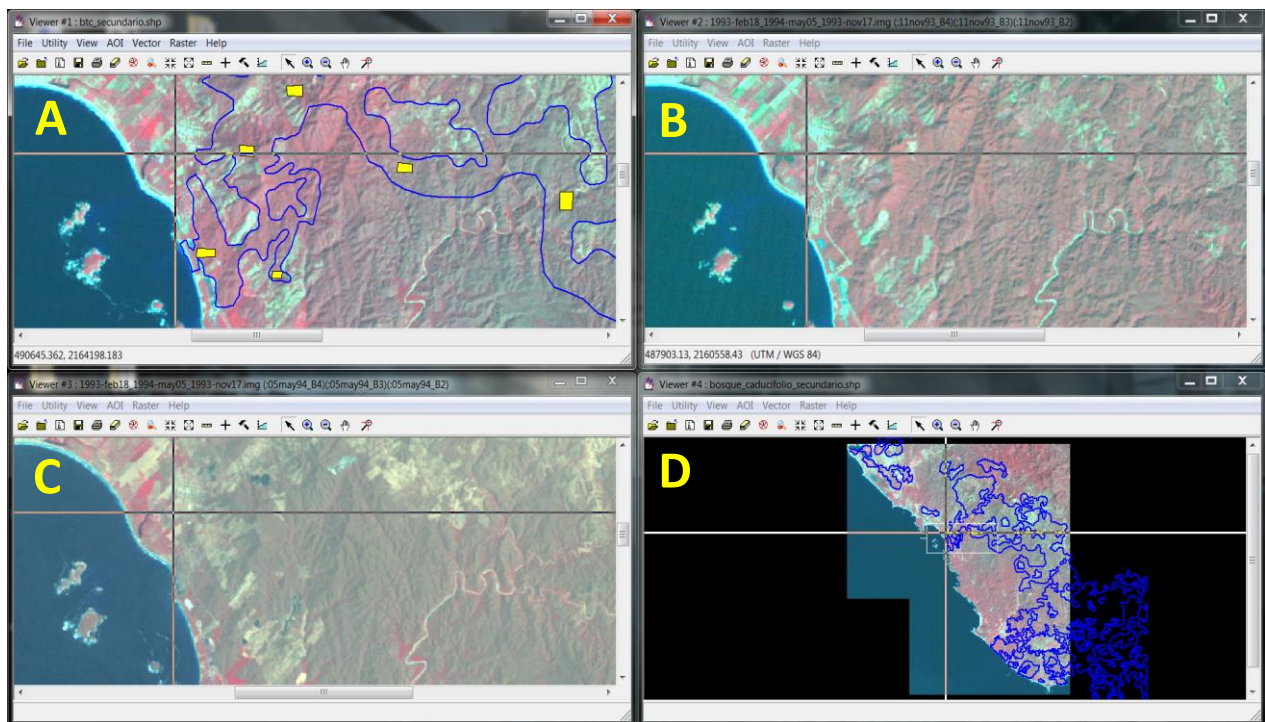


Figura 3. Digitalización sobre imágenes en falso color. La sincronización de varias ventanas (viewers) posibilita visualizar las características de los elementos del paisaje contenidos en diferentes imágenes (bandas del mismo lugar pero con diferentes fechas). En la figura se muestran cuatro ventanas con imágenes correspondientes al periodo 1993-94: A) 18-febrero-1993, B) 11-noviembre-1993, C) 5-mayo-1994, D) Extensión total del área de estudio, con fin de localizar las diferentes áreas donde se trazan las áreas de entrenamiento (polígonos amarillos) para la extracción de firmas espectrales. Además en las ventanas A y D se muestran los polígonos de los tipos de vegetación y usos del suelo de la Serie II del INEGI como auxiliar a la localización de clases generales de coberturas del terreno.

5.1.5. Depuración de firmas espectrales

Tomando en cuenta que existe variabilidad en las respuestas espectrales de los distintos tipos de cobertura identificados y que se ponen de manifiesto en las firmas espectrales extraídas de cada TVyUS, se examinaron sus estadísticos (media y covarianza) y fueron exportados para aplicarles métodos estadísticos de clasificación de grupos de datos. La aplicación del método de conglomerados jerárquicos con el programa SPSS v. 18 posibilitó la identificación de patrones característicos contenidos en los grupos de firmas espectrales de cada TVyUS. Este procedimiento redundó, tanto en la formación de subgrupos de firmas espectrales como en su limpieza, descartando aquellas firmas menos representativas. Posteriormente y debido a que se contaba con un nuevo agrupamiento de firmas espectrales (depuradas), utilizando el identificador único de cada firma espectral, se seleccionaron las AOIs (áreas de interés por sus siglas en inglés) asociadas a los nuevos grupos de firmas espectrales y se convirtieron en archivos “shape”. Finalmente, se importaron los polígonos de estos archivos en el software IDRISI Taiga para generar las firmas espectrales características de cada TVyUS, las cuales fueron utilizadas para aplicar los diferentes algoritmos de clasificación supervisada.

5.1.6. Reconstrucción del mapa de TVyUS para 1970

Con el propósito de reconstruir las condiciones de los tipos de vegetación y usos del suelo en la región de estudio correspondiente al tiempo de inicio (1970s), se decidió por utilizar una clasificación ya existente y generada a partir de mapas históricos de alta resolución, en lugar del uso de imágenes de satélite Landsat MSS. Esto debido a la poca disponibilidad de imágenes que representaran las diferentes condiciones fenológicas de la vegetación, así como las limitaciones de resolución espacial y espectral de las imágenes Landsat disponibles para ese periodo. Por lo tanto, la reconstrucción del escenario de los tipos de vegetación y usos de suelo correspondientes al año 1970 se realizó a partir de la digitalización manual de polígonos contenidos en las cartas de uso del suelo y tipos de vegetación escala 1:50 000, elaboradas por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). Éstas corresponden a un esfuerzo del gobierno federal para generar datos con alto grado de detalle y precisión temática en materia de recursos naturales, particularmente las cartas de uso del suelo de las cuales se generaron alrededor de 806 hojas impresas (Hernández-Arturo *et al.*, 2011). Las cartas fueron obtenidas como imágenes escaneadas de mapas (E13A29, E13B21 y E13B31) con proyección UTM y datum NAD27; sin embargo, la georreferenciación de las tres cartas no bastó para obtener un ajuste correcto entre éstas, por lo que fue necesario utilizar métodos de rectificación

geométrica con proyección UTM zona 13 y datum WGS84 para generar un mosaico completo y correctamente ajustado.

Por otra parte, se obtuvo un catálogo de fotografías aéreas del INEGI de muy alta resolución correspondiente al año de 1971, mismo que fue utilizado por la CETENAL para la elaboración de las cartas 1:50 000. Éste catálogo consistió de un total de 48 fotografías a color (tres bandas, RGB) con una resolución espacial de 60cm. Cada una de estas fotografías fue georreferenciada y posteriormente se remuestrearon las imágenes para obtener un mosaico con un tamaño de pixel de 5x5 m. Este mosaico de imágenes fue utilizado como material de apoyo para resolver dudas sobre la identidad de las clases contenidas en cartas de TVyUS, así como para adecuar éstas al esquema de clasificación adoptado para este estudio (Figura 5).



Figura 4. Cartas de tipos de vegetación y usos de suelo escala 1:50 000 (CETENAL) para la fecha 1970.

No obstante al sistema de clasificación adoptado por la CETENAL para elaborar estas cartas y, considerando que la zona de estudio no comprende la extensión total de las

mismas, el mapa reconstruido para este estudio no incluyó el total de las clases de TVyUS utilizadas por la CETENAL.



Figura 5. Ejemplos de fotografías aéreas de muy alta resolución (<1 m) utilizadas como material de apoyo para la reconstrucción del mapa de TVyUS para la fecha de 1970.

Durante la digitalización en pantalla de polígonos, a cada polígono trazado se le asignó un valor único (ID) así como la descripción del TVyUS. Finalmente se ajustó la extensión geográfica de la cobertura de polígonos (shape file de ArcGIS) para que correspondiera al tamaño de la extensión geográfica de la zona de estudio.

Considerando que la evaluación que se realiza en este estudio sobre los cambios de los TVyUS utiliza datos con formato de trama o “raster”, la cobertura de vectores (shape) fue convertida a formato de imagen con un tamaño de pixel de 30 m, lo cual coincide con la resolución espacial de las imágenes Landsat.

5.1.7. Algoritmos de clasificación

Como se mencionó en los puntos 1.4 y 1.5, es necesario contar con archivos de firmas espectrales para correr los algoritmos de clasificación. Una vez que se ha obtenido un juego confiable de archivos de firmas espectrales, se procede al proceso de clasificación de la imagen, en el cual cada pixel es evaluado independientemente (ERDAS, 2010). Los

estadísticos de cada pixel son examinados y comparados con aquellos de las firmas espectrales de acuerdo a la regla de decisión o algoritmo utilizado; finalmente cada pixel es asignado a la clase correspondiente de las firmas espectrales consideradas en el proceso de clasificación (Eastman, 2009; ERDAS, 2010; Jensen, 1996; Kloer, 1994)

Se procedió a clasificar la imagen utilizando diversos algoritmos de clasificación, tanto clasificadores duros (Paralelepípedo (PIPED); Distancia mínima a las medias (MINDIST); Máxima Probabilidad (MAXLIKE); Análisis discriminante lineal (FISHER); Clasificación por segmentación (SEGCLASS)), así como clasificadores suaves (Clasificación difusa (FUZZCLASS) y Desmezcla espectral lineal (UNMIX)). Sin embargo, los clasificadores suaves no arrojan una decisión definitiva sobre la clase a la que pertenece cada pixel, sino más bien el grado de pertenencia de dicho pixel a cada una de las clases de TVyUS siendo consideradas, por lo que no ofrecieron un enfoque práctico para generar mapas de TVyUS. En contraste, los clasificadores duros arrojan decisiones definitivas sobre la clase a la que pertenece cada pixel. En particular, el clasificador MAXLIKE, que utiliza la regla de decisión Máxima Probabilidad, se desempeña de manera óptima cuando los campos de entrenamiento constituyen una muestra representativa (e.g., 10 veces más pixeles que el número de bandas utilizadas) y además están bien definidos (Eastman, 2009; ERDAS, 2010; Jensen, 1996).

Este clasificador se basa en la función de densidad de probabilidad asociada a un grupo particular de firmas de entrenamiento, de tal manera que los pixeles son asignados a su clase más probable (tomando en cuenta la media y la covarianza) respecto a la comparación de la probabilidad de que el pixel evaluado pertenezca a cada una de las firmas que están siendo consideradas (Figura 6). Debido a esto, y considerando que la regla de decisión Máxima Probabilidad minimiza las deficiencias encontradas en otros algoritmos como Paralelepípedo (e.g., sobre-posicionamiento de cajas de distribución de datos) y Distancia mínima a las medias (e.g., baja variabilidad de datos), se optó por utilizar el clasificador MAXLIKE como método de clasificación supervisada para generar los mapas de TVyUS (Eastman, 2009; Soofi, 2005).

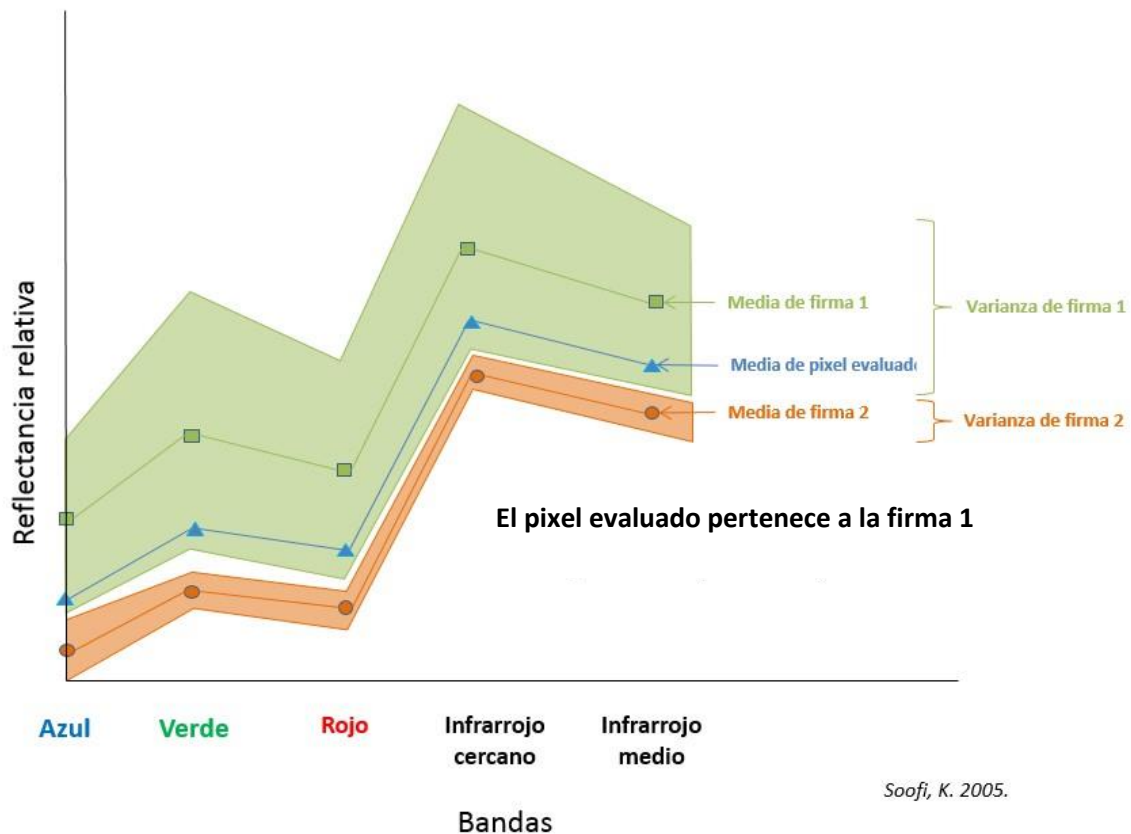


Figura 6. Regla de decisión del clasificador “Máxima Probabilidad”. Tras ser examinada la respuesta espectral de un determinado pixel, ésta se compara con aquellas respuestas espectrales de las firmas siendo consideradas y posteriormente se asignará a la clase más probable. (Figura tomada de Soofi, 2005. “Satelite Remote Sensing Lecture”).

5.1.8. Generalización de las clasificaciones

Los mapas generados mediante el algoritmo Máxima Probabilidad consistieron de una clasificación compuesta en subclases, producto de la depuración de las firmas espectrales, por lo que es necesario agrupar las subclases dentro de las clases originalmente definidas. Del mismo modo, se procedió a examinar la imagen para determinar cuáles clases presentaban confusión espectral (respuestas espectrales compartidas por más de una clase). Considerando lo anterior, fue necesario hacer una reclasificación de los mapas obtenidos para ajustar el número de clases y obtener categorías bien diferenciadas.

Posterior a la clasificación y reclasificación de los mapas generados a partir del algoritmo Máxima Probabilidad, se aplicó una técnica de generalización con la finalidad de obtener mayor continuidad espacial de las diferentes clases. Esto fue llevado a cabo por medio de la utilización de un clasificador por segmentación, el cual emplea un delineamiento de clases; en un determinado pixel de la imagen, este clasificador toma en cuenta a los pixeles vecinos, agrupándolos en segmentos y marcando límites de acuerdo con su

similitud espectral (Meyer F., 2012; Eastman, 2009). Para correr este clasificador es necesario contar con una imagen clasificada, así como una imagen de segmentos de entrenamiento la cual fue obtenida mediante el módulo SEGMENTATION del software IDRISI, en el cual es necesario incorporar las bandas que serán analizadas, así como delimitar la ventana de generalización (i.e., 3x3 píxeles) y el umbral de tolerancia de similitud (valor = 5) . La aplicación de este método hizo posible mejorar o limpiar la clasificación pixel por pixel mediante la eliminación del efecto de dispersión de píxeles y produciendo una imagen suavizada en cuanto a su configuración espacial.

Este método de generalización fue aplicado a las clasificaciones supervisadas de las imágenes compuestas Landsat y SPOT correspondientes a los años de 1993-94 y 2011-12, respectivamente.

5.1.9. Análisis de exactitud

Las clasificaciones generadas fueron evaluadas mediante análisis de exactitud, consistente en la elaboración de una matriz de error así como los cálculos del coeficiente de Kappa y los errores de omisión (falso negativo) y comisión (falso positivo). Se generaron 300 puntos al azar sobre los mapas elaborados y posteriormente se les asignó a cada uno de los puntos un valor categórico del tipo de vegetación o uso del suelo al que pertenece para así conformar los datos de referencia para los análisis. La asignación de este valor se determinó auxiliándose de la información vectorial escala 1:250 000 de las series del INEGI, así como mediante la observación de las imágenes satelitales compuestas correspondientes a cada fecha (cambios estacionales de la vegetación) y reconocimiento del terreno. Una vez que se generaron estos juegos de puntos de referencia, y teniendo como imagen clasificada los mapas elaborados mediante el algoritmo “Máxima Probabilidad”, se utilizó la extensión “Kappa-Cohen” del software ArcView 3.2 para generar los reportes de estadísticos de exactitud. Las matrices de error, así como los estadísticos derivados de ellas se describen en la sección de Resultados.

5.2. Tasas de cambio

Una vez que se obtuvieron las áreas por clase para cada periodo de tiempo, se utilizó la siguiente ecuación para calcular las tasas de cambio anuales:

$$TC = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{1/t} - 1$$

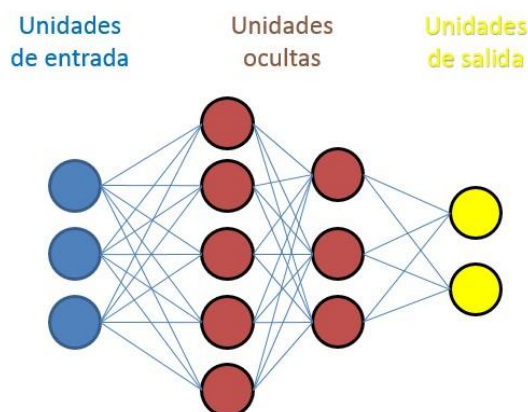
Donde TC es la tasa de cambio anual, A_1 es el área ocupada para una clase en el tiempo 1, A_2 es el área para el tiempo 2 y t es el número de años para el periodo del análisis (Velázquez *et al.*, 2002).

5.3. Matrices de transición

Se generaron matrices de transición para cada uno de los periodos evaluados (e.g., 1970 VS 1993-94, 1970 VS 2011-12, 1993-94 VS 2011-12). Éstas matrices permiten identificar aquellas clases que presentaron cambios en su superficie hacia otras clases, así como aquellas que permanecieron sin alteraciones. Del mismo modo, las matrices permiten identificar aquellas transiciones inverosímiles que pudieran deberse tanto a errores de clasificación de los modelos de TVyUS generados (algoritmos de clasificación), así como por la utilización de sistemas de clasificación provenientes de diversas fuentes de información (CETENAL-1970 VS INEGI serie IV- 2008).

5.4. Modelado de los cambios de usos del suelo

El modelado de los cambios de usos de suelo se realizó mediante la aplicación del módulo “Land Change Modeler for Ecological Suitability” del software IDRISI Taiga. Este paquete permite modelar las diversas transiciones potenciales mediante la utilización la red neuronal “Multi-Layer Perceptron” (MLP), una de las redes neuronales mayormente utilizadas en la clasificación y modelado (Agarwal, *et al.*, 2000; Eastman, 2009; Emil *et al.*, 2012; Gardner y Dorling, 1998). Aunque la arquitectura de una red MLP es variable y existen diversas fuentes que describen a detalle su funcionamiento (Eastman, 2009; Emil *et al.*, 2009; Pérez-Vega *et al.*, 2012), de manera general consiste de un sistema de neuronas (nodos) interconectadas (Figura 7): 1) las unidades de entrada (*input layers*), las cuales no tienen un rol de cómputo de datos, sino que sirven para llevar los datos de entrada a la red; 2) las unidades ocultas (*hidden layers*), que son un juego de datos de cómputo; y 3) las unidades de salida (*output layers*).



Gardner & Dorling, 1998

Figura 7. Estructura general de una red neuronal Multi-Layer Perceptron (MLP).

Ahora bien, se entiende que existen diversos paquetes y algoritmos para modelar los cambios de cobertura y usos del suelo, cada uno con cualidades que pudieran adecuarse a las necesidades del estudio y al conocimiento experto por parte del investigador (Agarwal *et al.*, 2000; Mas *et al.*, 2011; Pérez-Vega *et al.*, 2012). Por lo tanto, es necesario mencionar que el presente estudio no busca comparar y/o evaluar el desempeño de los diversos paquetes de modelación respecto al problema planteado en este trabajo. La elección de este paquete (LCMES) se basó principalmente por presentar la ventaja de ser un proceso automatizado, así como por las cualidades de utilizar una red neuronal que es ampliamente reconocida por su utilidad y desempeño.

A continuación se detalla tanto los procedimientos utilizados como el procesamiento sobre los modelos de mapas de TVyUS generados para correr los análisis de modelado.

5.4.1. Estandarización de mapas de TVyUS

Para correr el modelado, las imágenes a ser evaluadas deben estar espacialmente conformadas y tener el mismo formato. Debido a que las imágenes satelitales Landsat y SPOT, utilizadas para obtener las imágenes clasificadas presentan una resolución espacial de 30 m y 20 m, respectivamente, las segundas fueron re-formateadas para que todas tuvieran el mismo número de filas y columnas, es decir con un tamaño uniforme de pixel (30x30 m) y con una misma leyenda, es decir una codificación única sobre la identidad de los tipos de vegetación y usos del suelo.

5.4.2 Análisis de cambio

Estos análisis consistieron en evaluar las transiciones de una clase a otra y entre dos fechas determinadas (i.e., t_1 vs t_2). Para ello es necesario establecer las imágenes clasificadas

que representan los tiempos t_1 y el t_2 . También se requiere indicar el área mínima (e.g., hectáreas) que será considerada en las transiciones con la finalidad de filtrar aquellas transiciones menores que puedan ser producto de errores de clasificación, aquellas que se consideren insignificantes a los propósitos del estudio, o aquellas que se consideren inverosímiles (e.g., selva mediana a bosque de encino, etc.). Así mismo, y para auxiliar en la decisión de cuáles transiciones serán incluidas en el modelado, es posible generar mapas individuales que muestren la permanencia de cada clase, ganancias y pérdidas, así como los cambios entre una y las otras clases.

5.4.3. Transiciones potenciales y Variables explicativas

A fin de poder predecir a futuro los cambios de uso del suelo, se modelaron aquellas transiciones más relevantes. Se generaron modelos en forma de mapa que describen el potencial específico de cambio sobre transiciones particulares en función al tiempo. Generar estas transiciones es la base para correr las predicciones a futuro. Debido a la posibilidad de que una o varias transiciones se encuentren asociadas a las mismas fuerzas conductoras, se contempló el agrupamiento de varias transiciones dentro de un sub-modelo determinado; por ejemplo, los cambios de las clases “Bosque Tropical Caducifolio conservado” y “Bosque Tropical Secundario” a “Pastizal”.

Con base en lo anterior, este estudio aplicó las capacidades analíticas del módulo LCMES para agrupar diversas transiciones dentro de un submodelo, con la finalidad de experimentar la creación de modelos independientes que describen diferentes procesos de cambio. Para ello se agruparon las distintas transiciones consideradas afines y se incluyeron aquellas variables consideradas como fuerzas conductoras de los cambios a los modelos. Posteriormente, y una vez que se determinaron los sub-modelos a evaluar, se asignaron las siguientes variables (a manera de capas de información) consideradas como fuerzas conductoras: Tipos de cobertura (probabilidad de evidencia), Modelo Digital de Elevación. Pendiente, Sombreado topográfico, Aspecto, Relieve (probabilidad de evidencia), Distancia a poblados y Distancia a la RBChC. La selección de estas variables se basó principalmente en la influencia de los factores topográficos en relación con los usos del suelo, así como también el papel de la localización tanto de la RBChC como de los centros de población para influir en los patrones de cambio de uso del suelo. Estas variables fueron evaluadas mediante el Índice de Cramer (Cramer's V). Esta evaluación se basa en el coeficiente de Chi cuadrada para medir la asociación entre dos

variables. Por ejemplo, evaluar la asociación entre la variable MDE vs la distribución de las diferentes clases en el modelo de clasificación para el t2. El valor de este índice varía de 0 a 1, donde “cero” indica una no asociación entre las variables (i.e., son independientes una de la otra), y “1” indica una completa asociación entre las variables. El valor de “1” solamente se obtiene cuando las dos variables evaluadas son las mismas. Finalmente, cada sub-modelo fue modelado utilizando el algoritmo Multilayer Perceptron Neural Network (MLP), el cual permite modelar varias transiciones a la vez (Emil *et al.* 2012 & Pacifici *et al.* 2007).

5.4.4. Predicciones de los cambios de uso del suelo

Teniendo a los mapas de transiciones potenciales como base, se procedió a realizar la predicción de los cambios de cobertura para los años 2020, 2030, 2040 y 2050 utilizando como algoritmo las cadenas Markov. Una cadena Markov se refiere a la secuencia de estados variables, mediante las cuales se describe un proceso con propiedades markovianas. Es decir, en una cadena de Markov se asume que la probabilidad de que un evento en un estado “x” cambie a un estado “y” es la misma sin importar los estados previos a “x” (Levin *et al.*, 2005). Estas predicciones permiten observar (predecir) cuánto territorio podría esperarse que cambiara de t₁ a una fecha determinada a futuro o t₂ basado en una proyección de las transiciones potenciales obtenidas. De esta manera, una vez obtenidas las transiciones potenciales e incorporadas las variables explicativas mencionadas en el punto anterior, se utilizaron las cadenas de Markov para generar escenarios de predicción. Los mapas de predicción se obtuvieron como clasificaciones duras y clasificaciones suaves.

6. RESULTADOS

Los resultados que se presentan incluyen tanto los obtenidos de la aplicación de procedimientos para la preparación de datos e información necesarios en los análisis, como aquellos directamente derivados de los análisis sobre los cambios en los tipos de vegetación y usos del suelo (TVyUS).

6.1. Modelos de clasificaciones de usos del suelo y tipos de vegetación

6.1.1. Imágenes base e imágenes compuestas (t1, t2 y t3)

La Figura 8 muestra el mosaico geo-referenciado elaborado a partir de la rectificación geométrica de las fotografías aéreas de muy alta resolución y que sirvió de apoyo para

corroborar la identidad de las clases de TVyUS contenidas en las cartas de tipo de vegetación y usos del suelo escala 1:50 000, digitalizadas para obtener la cobertura del terreno del escenario t_1 (año 1970) para los análisis de cambio (Figura 9).

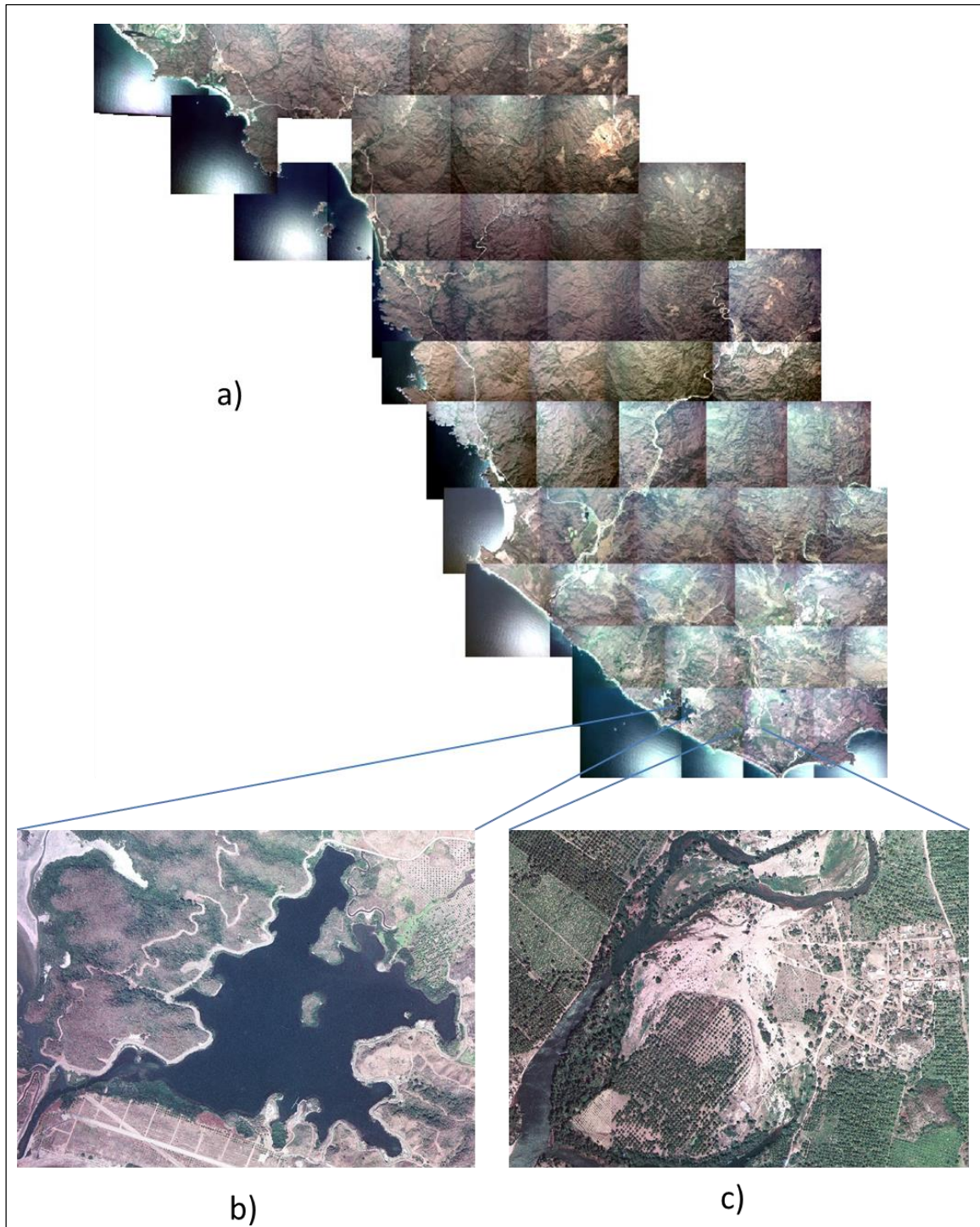


Figura 8. Mosaico de fotografías aéreas de muy alta resolución para la fecha de 1970 utilizadas como material de apoyo para la reconstrucción del mapa de TVyUS: a) mosaico completo del catálogo remuestreado a 5 m de resolución espacial; b) y c) ejemplos de acercamiento a las fotografías con 60cm de resolución espacial.

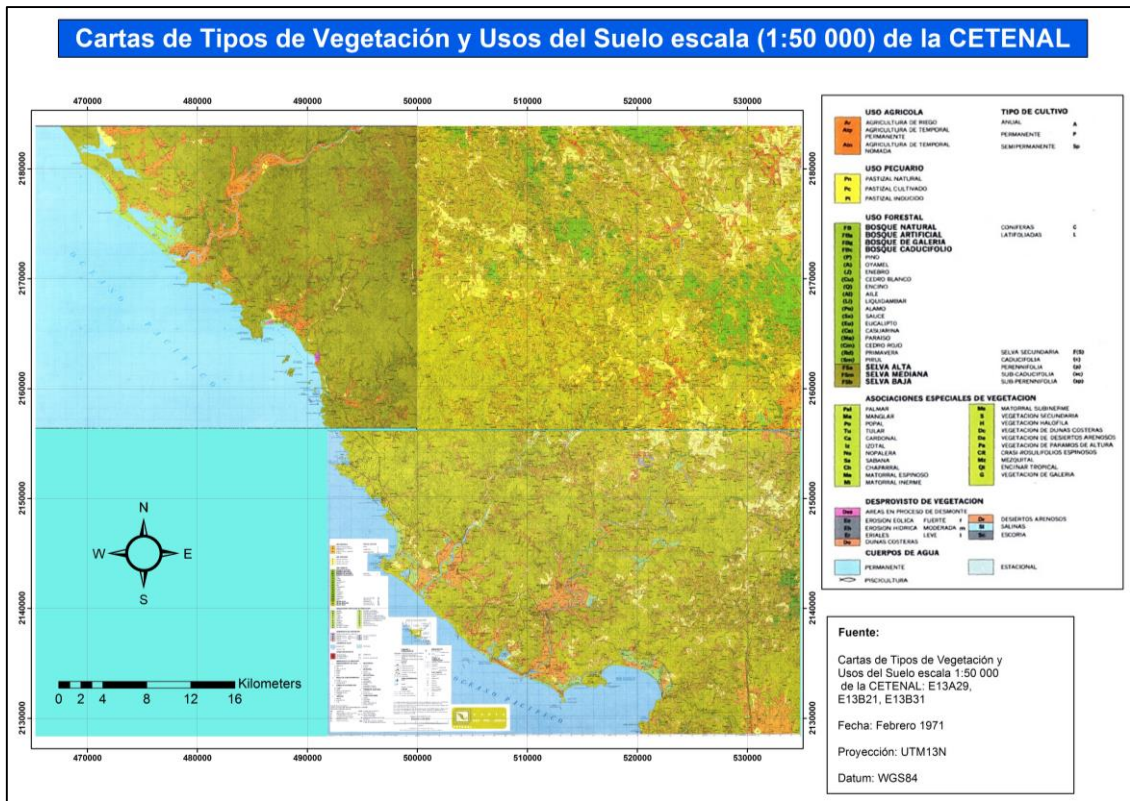
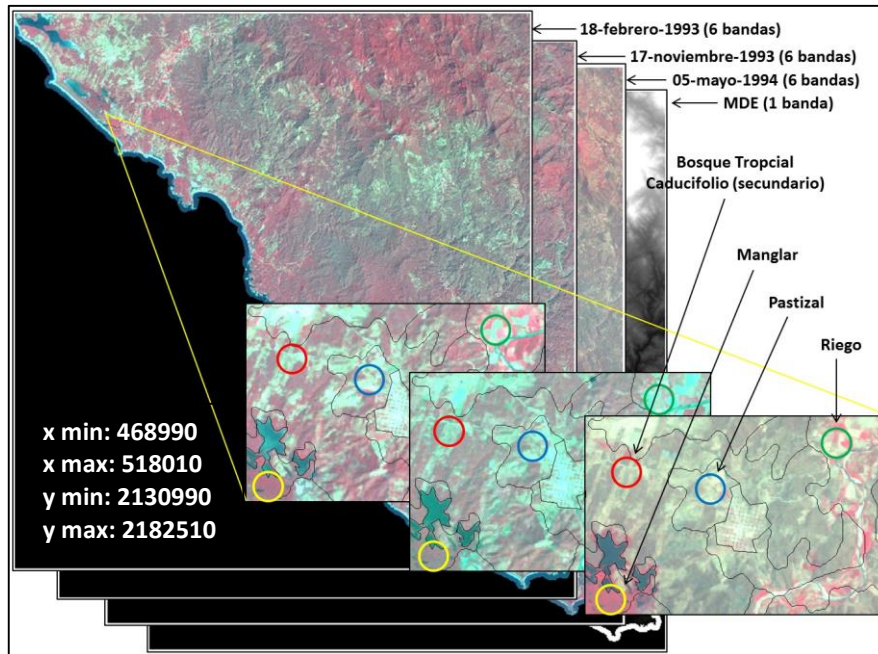


Figura 9. Composición de mapas del mosaico de tres cartas de tipos de vegetación y uso del suelo escala 1:50 000 (CETENAL) para la fecha 1970 después de la rectificación geométrica. Para fines ilustrativos, se incluye la leyenda original de las cartas.

La Figura 10 esquematiza las características multi-temporales de las imágenes compuestas utilizadas para llevar a cabo la clasificación supervisada correspondiente a los años 1993-94 (Landsat TM) y 2011-12 (SPOT 5). Éstas imágenes se muestran en una composición en falso color con la siguiente asignación de bandas (RGB): Banda infrarroja en color rojo; Banda roja en color verde; Banda verde en color azul. Sobrepuesto a las imágenes se muestra la información vectorial escala 1:250 000 de los TVyUS del INEGI, pudiéndose observar las diferencias espectrales existentes para los tipos de cobertura y usos del suelo en los distintos periodos estacionales. Por ejemplo, en la Figura 9a se observa al manglar en tonos rojos brillantes durante todo el año; es decir, la vegetación verde perenne refleja la mayor parte de la porción del infrarrojo del espectro electromagnético. Por otra parte, en la Figura 9b se puede apreciar que el bosque tropical caducifolio (BTC) conservado refleja una amplia porción del infrarrojo para el periodo posterior a la estación lluviosa (24-diciembre), mientras que esta disminuye considerablemente en la temporada de secas (02-mayo). Similarmente a lo descrito para el manglar y en contraste con el BTC, la selva mediana subcaducifolia (SMSC) muestra tonos rojos intensos debido a que su follaje se mantiene verde a lo largo del año (Figura

10b). Incluso los diferentes tipos de áreas dedicadas a la agricultura pueden diferenciarse visualmente en las imágenes compuestas basados en sus diferentes respuestas espectrales (Figura 10a).

a)



b)

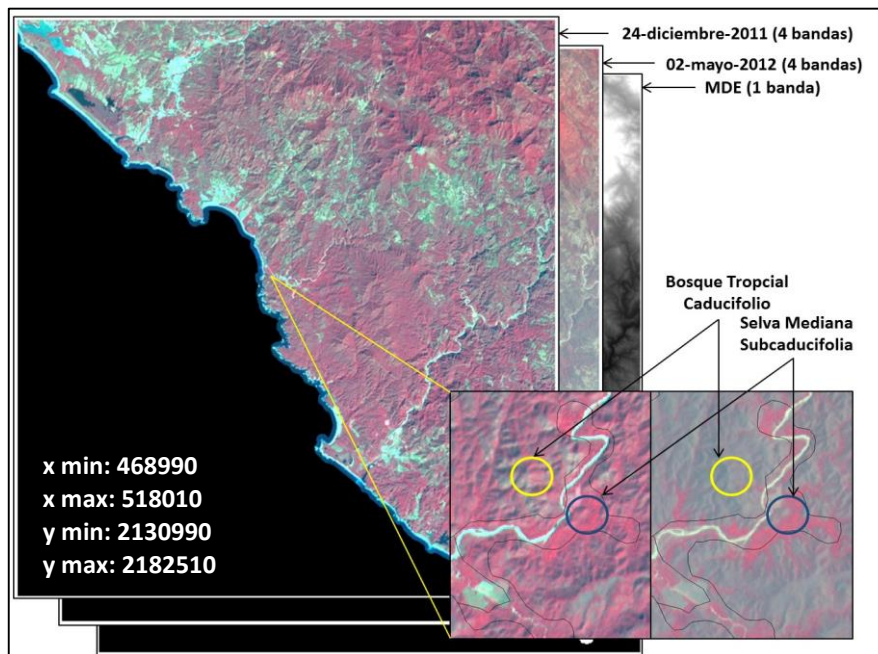


Figura 10. Imágenes de satélite compuestas utilizadas para la obtención de clasificaciones supervisadas: a) Imagen Landsat (1993-94) con un total de 18 bandas; b) Imagen SPOT (2011-12) con un total de 9 bandas.

6.1.2. Firmas espectrales

Las características multi-espectrales y multi-temporales de las imágenes compuestas ensambladas permitieron describir la representación visual de los diferentes elementos del paisaje. El análisis de las firmas espectrales, por otra parte, representa una etapa crítica en el proceso de selección de los sitios representativos de cada clase de TVyUS, y a partir de los cuales se calibraron los métodos de clasificación aplicados.

La aplicación de los procedimientos de selección y depuración de firmas espectrales descritos en la sección de Métodos, hizo posible obtener firmas espectrales características de subclases como las que se muestran en la Figura 11.

Como puede apreciarse, las clases originalmente establecidas fueron representadas por dos o tres firmas espectrales (subclases), con variaciones en los niveles de diferenciación entre subclases. Por ejemplo, mientras clases como “agua”, “pastizales” y “encinos secundarios” mostraron una aparentemente más clara diferenciación espectral en la imagen compuesta SPOT (2011-2012) respecto a la imagen Landsat (1993-94), en otros casos como el “BTC conservado”, “manglar” y “agricultura de riego” tal diferenciación resultó opuesta; es decir, fue mayor en la imagen compuesta Landsat. Otras clases de TVyUS como la “selva mediana subcaducifolia conservada” mostraron subclases cuyas firmas espectrales promedio mostraron diferencias visualmente poco significativas.

a) 1993-94

b) 2011-12

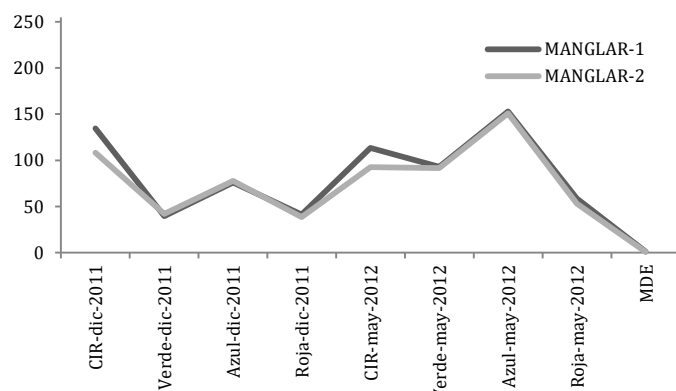
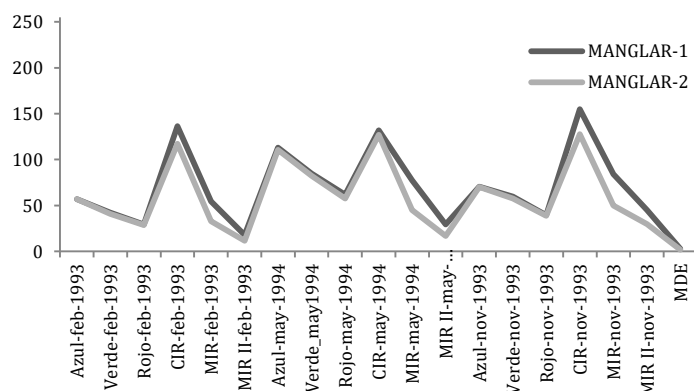
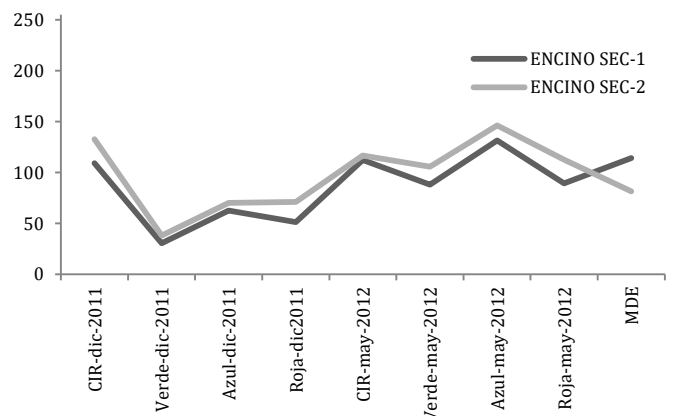
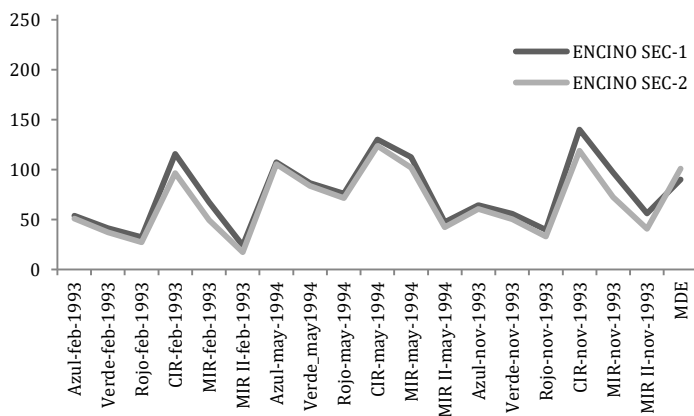
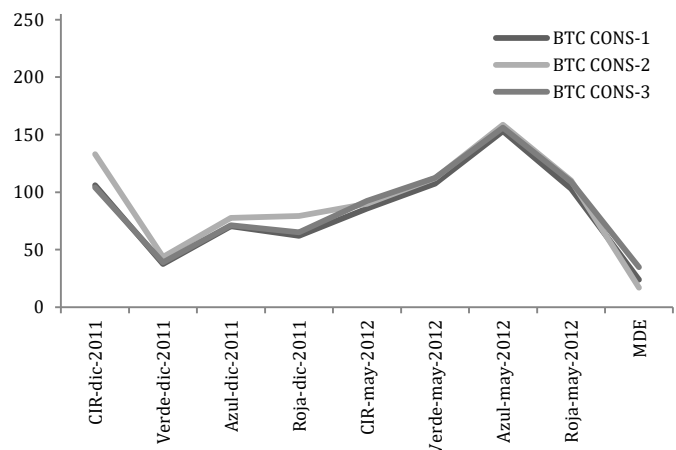
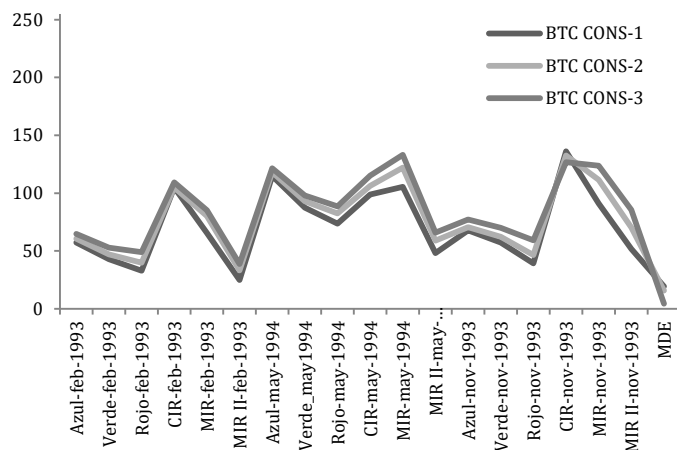
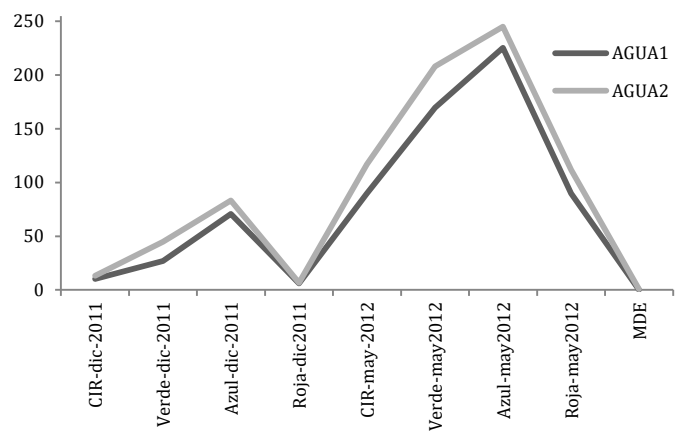
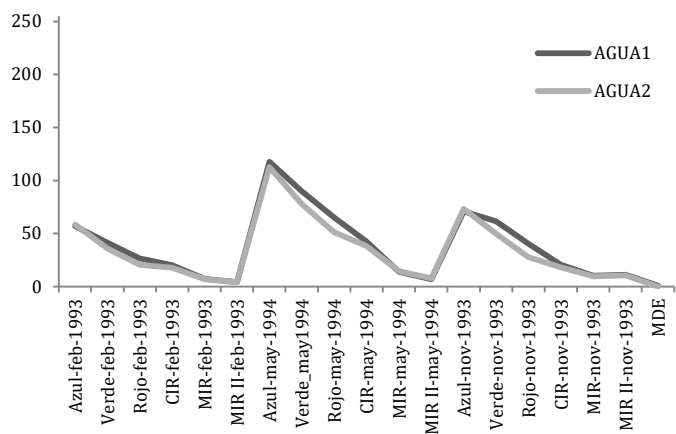


Figura 11. Comportamiento espectral de distintos tipos de cobertura del terreno para los años 1993-94 y 2011-2012. La imagen 1993-94 incluye 19 bandas: febrero 1993 (temporada seca), mayo 1994 (inicio de lluvias), noviembre 1993 (final de lluvias). La imagen 2011-2012 incluye un total de 9 bandas: diciembre 2011 (posterior a lluvias) y mayo 2012 (inicio de lluvias).

a) 1993-94

b) 2011-12

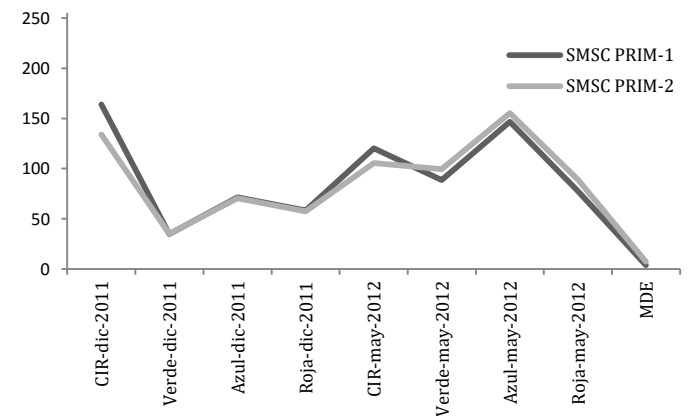
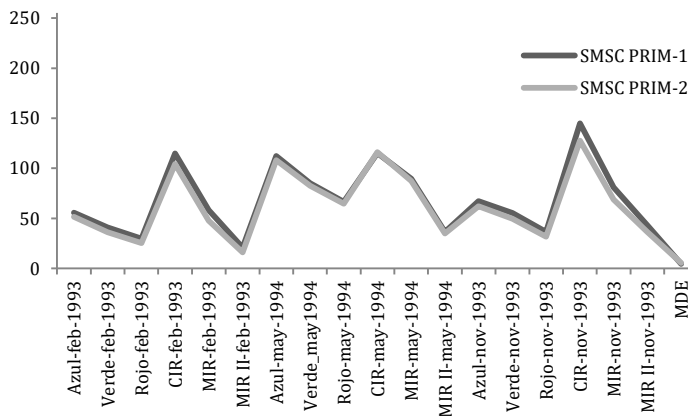
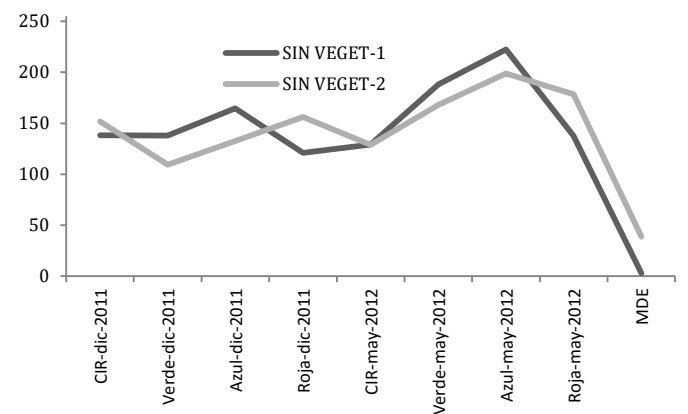
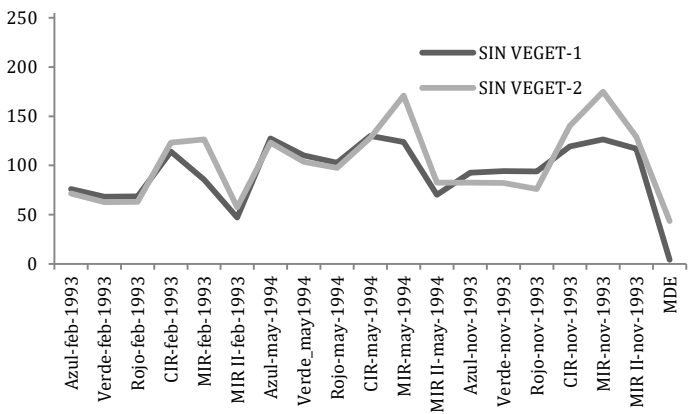
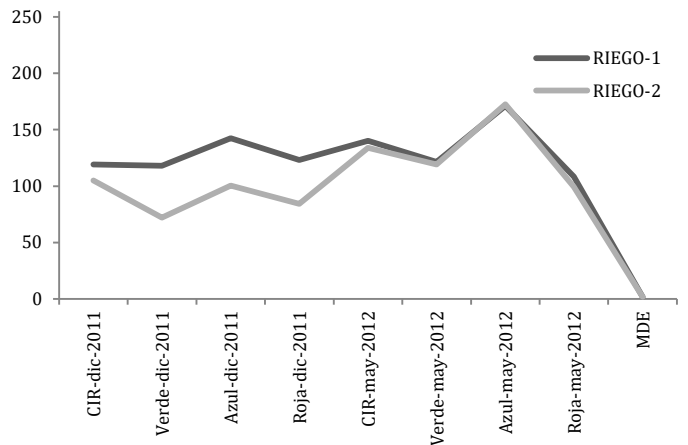
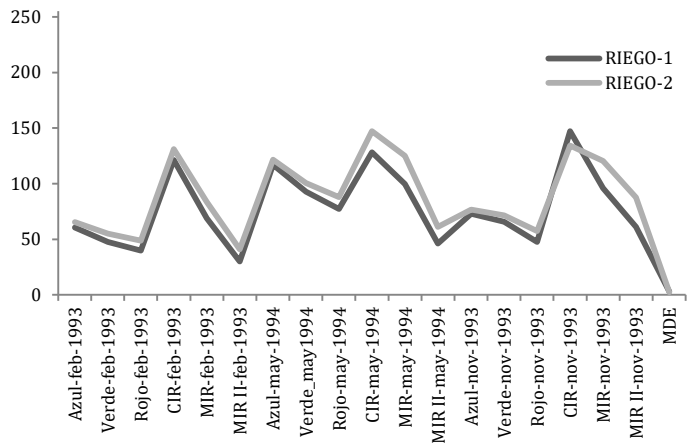
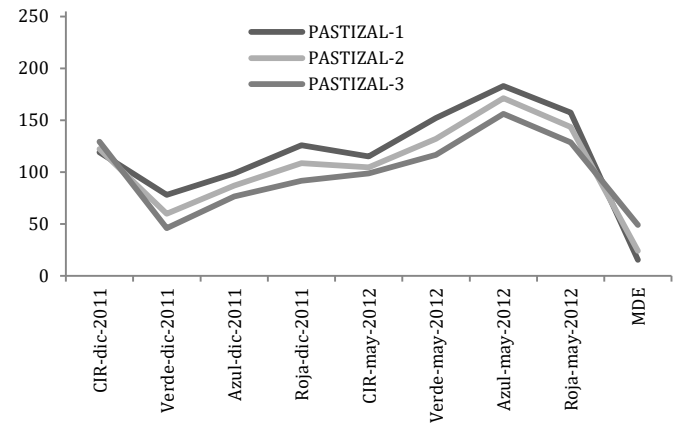
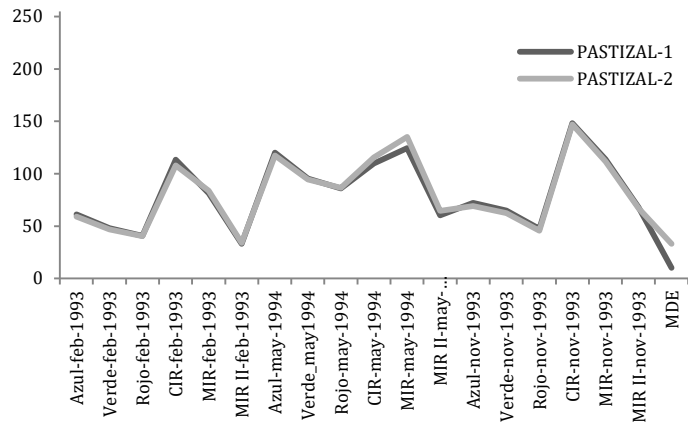


Figura 11. Continuación.

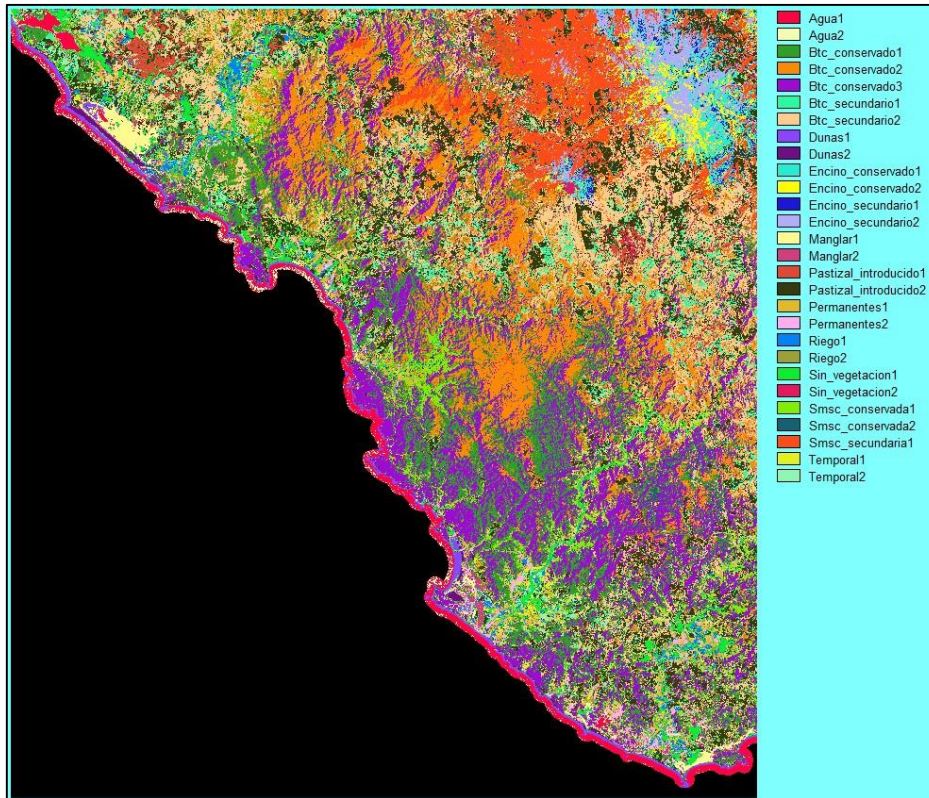
6.1.3. Imágenes clasificadas

Las clasificaciones obtenidas con el algoritmo de Máxima Probabilidad (Figura 12) estuvieron basadas en la utilización de un total de 28 firmas espectrales o subclases para la imagen compuesta Landsat de 1993-94, y de 25 firmas para la imagen compuesta SPOT. Debido a que cada imagen fue analizada por separado, generando firmas espectrales de acuerdo a la separabilidad estadística, las imágenes clasificadas de la Figura 12 muestran su heterogeneidad espectral y por lo tanto éstas no pueden ser comparables, por ejemplo asignando colores para cada subclase. Una vez que las subclases fueron reclasificadas en sus correspondientes clases, se obtuvieron imágenes clasificadas basadas en las categorías establecidas desde el inicio del proceso (Figura 13).

Debido a los elevados niveles de confusión en las respuestas espectrales de algunas clases, se decidió conjuntar clases en dos casos; “dunas costeras” y “sin vegetación” por un lado, y “selva mediana subcaducifolia conservada” y “selva mediana subcaducifolia secundaria” por el otro. De esta manera, la clasificación final estuvo compuesta de doce clases de TVyUS (Figura 12): 1) Agua, 2) Bosque Tropical Caducifolio (BTC) conservado, 3) BTC secundario, 4) Encino conservado, 5) Encino secundario, 6) Manglar, 7) Pastizal Introducido, 8) Cultivos permanentes, 9) Cultivos de riego, 10) Sin vegetación aparente, 11) Selva Mediana Subcaducifolia y 12) Cultivos temporales.

Las clasificaciones mostradas en la Figura 13 muestran niveles significativos de píxeles intermezclados (conocido como efecto de dispersión de píxeles), es decir las áreas continuas de las diferentes clases contienen píxeles dispersos de otras clases, lo cual confiere mayor confusión a la separación espectral entre clases. Por lo tanto, y a manera de limpiar y generalizar las clasificaciones obtenidas, se generó una capa de información de segmentos aplicando una ventana de generalización de 3x3 píxeles. Esta capa de segmentos, así como la clasificación pixel por pixel (Figuras 13a y 13b) es necesaria para generar la clasificación por segmentación. Las Figuras 15 y 16 muestran las composiciones de mapas correspondientes a los modelos finales de los TVyUS para los años 1993-94 y 2011-12, respectivamente, posterior a la técnica de segmentación aplicada. Estas imágenes muestran niveles de generalización comparables con la clasificación correspondiente al modelo de TVyUS 1970 (Figura 14), el cual se obtuvo mediante la digitalización de una carta de alta resolución, escala 1:50 000.

a)



b)

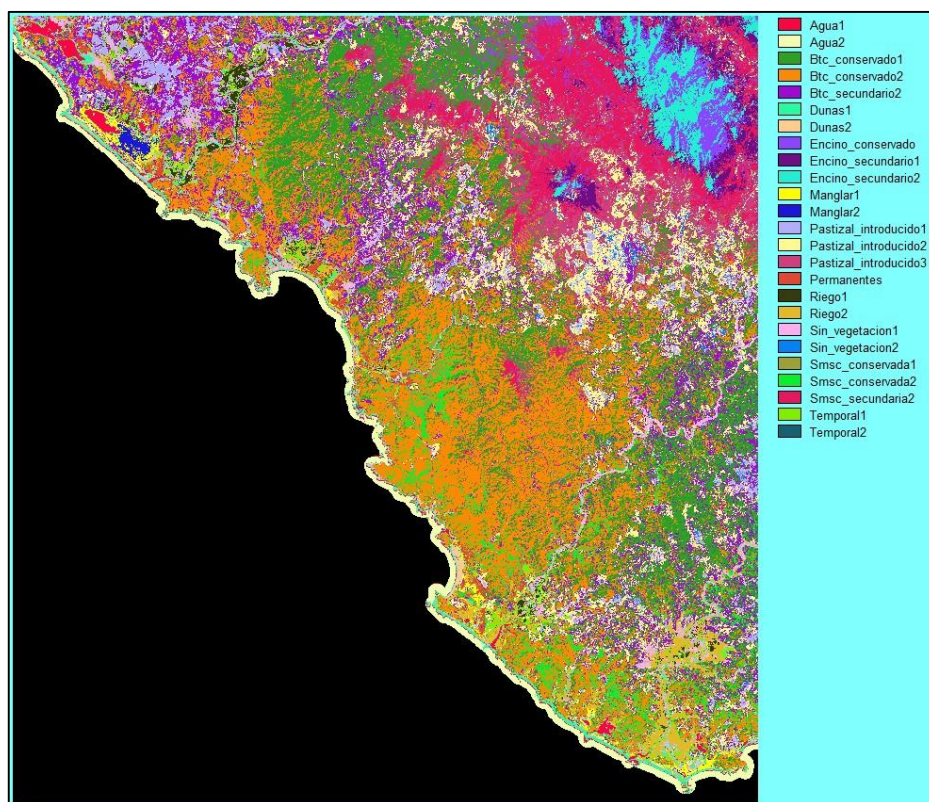
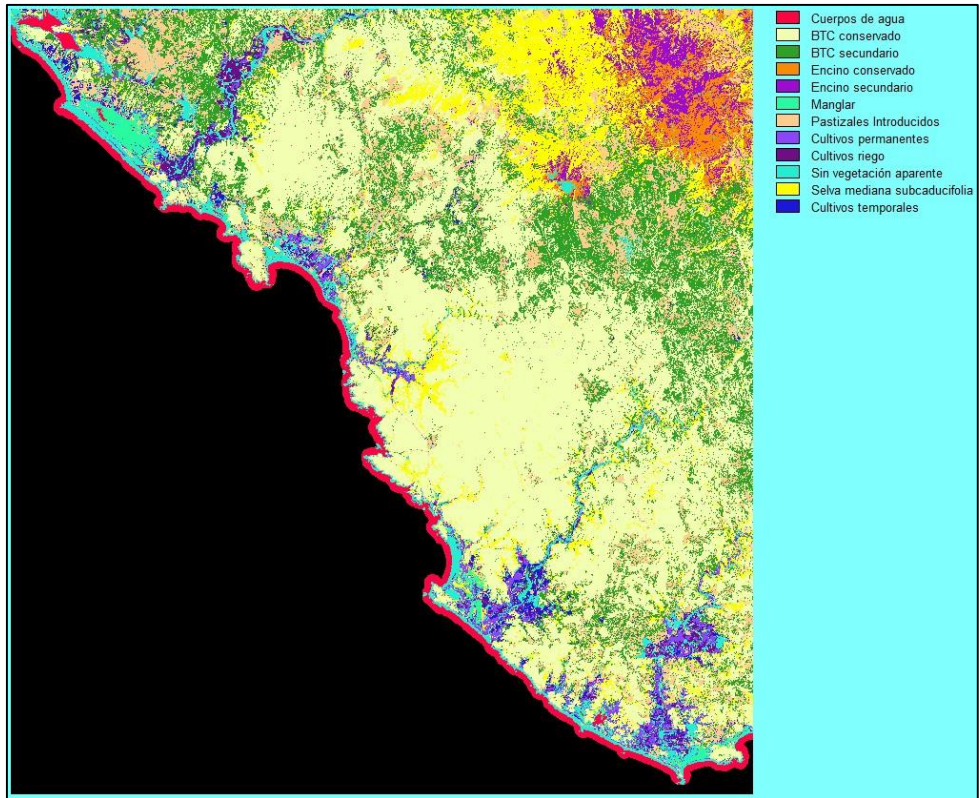


Figura 12. Imágenes clasificadas obtenidas mediante el uso del algoritmo Máxima Probabilidad con subcategorías redundantes: a) Clasificación 1993-94 (28 subclases); y b) Clasificación 2011-12 (25 subclases).

a)



b)

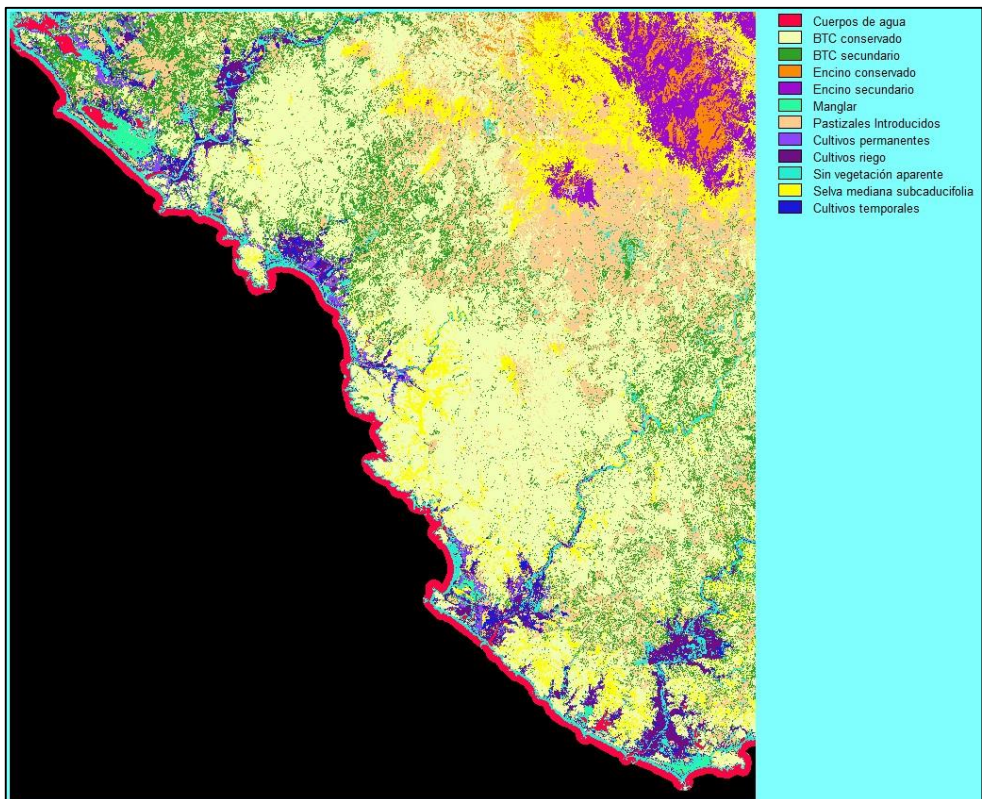


Figura 13. Clasificaciones obtenidas mediante la unión de las subclases correspondientes a las clases originalmente establecidas: a) Clasificación 1993-94 y b) Clasificación 2011-12.

Modelo de Clasificación de Tipos de Vegetación y Usos del Suelo para el año 1970

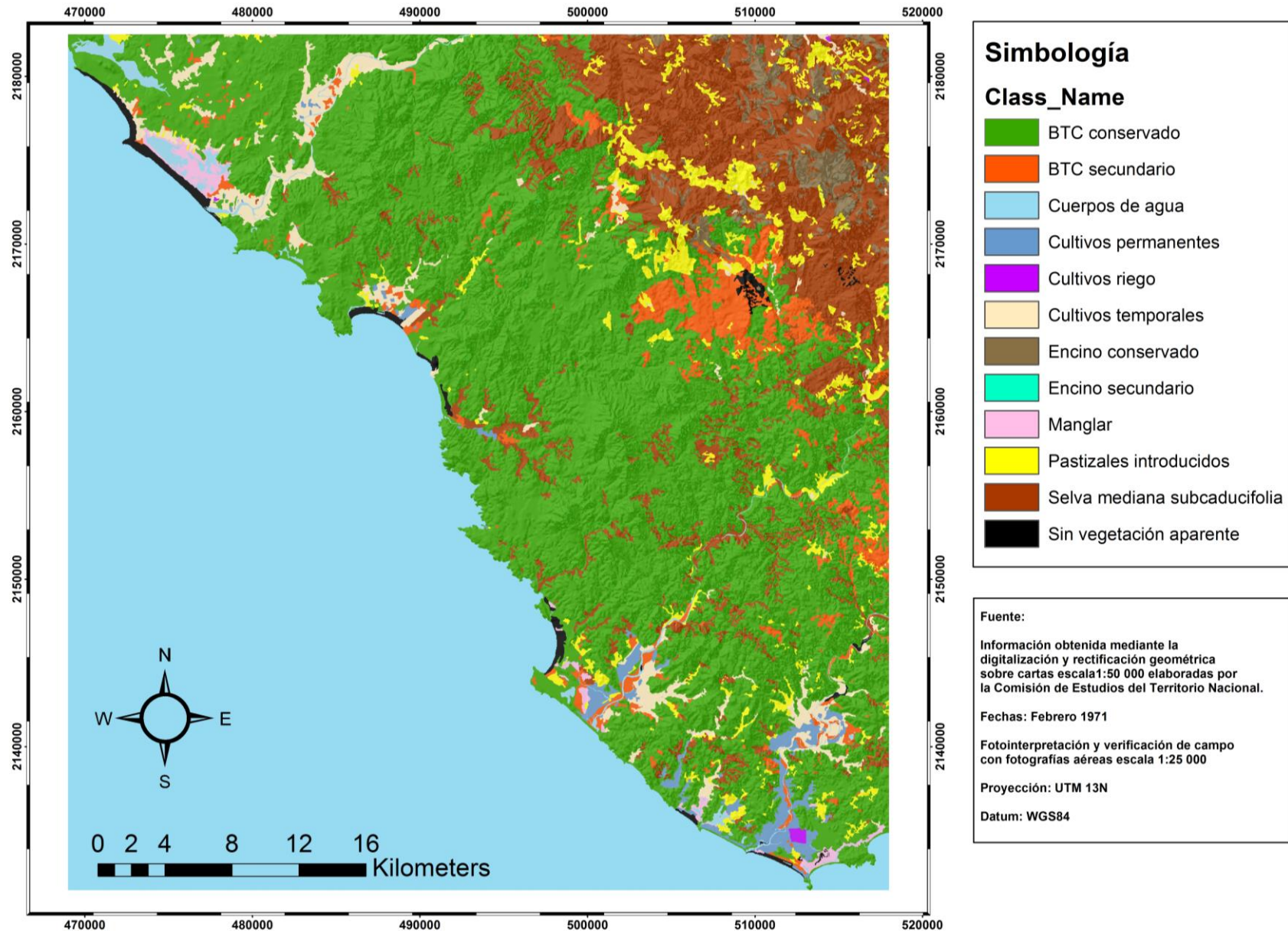


Figura 14. Composición de mapa de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 1970.

Modelo de Clasificación de Tipos de Vegetación y Usos del Suelo para el periodo 1993-94

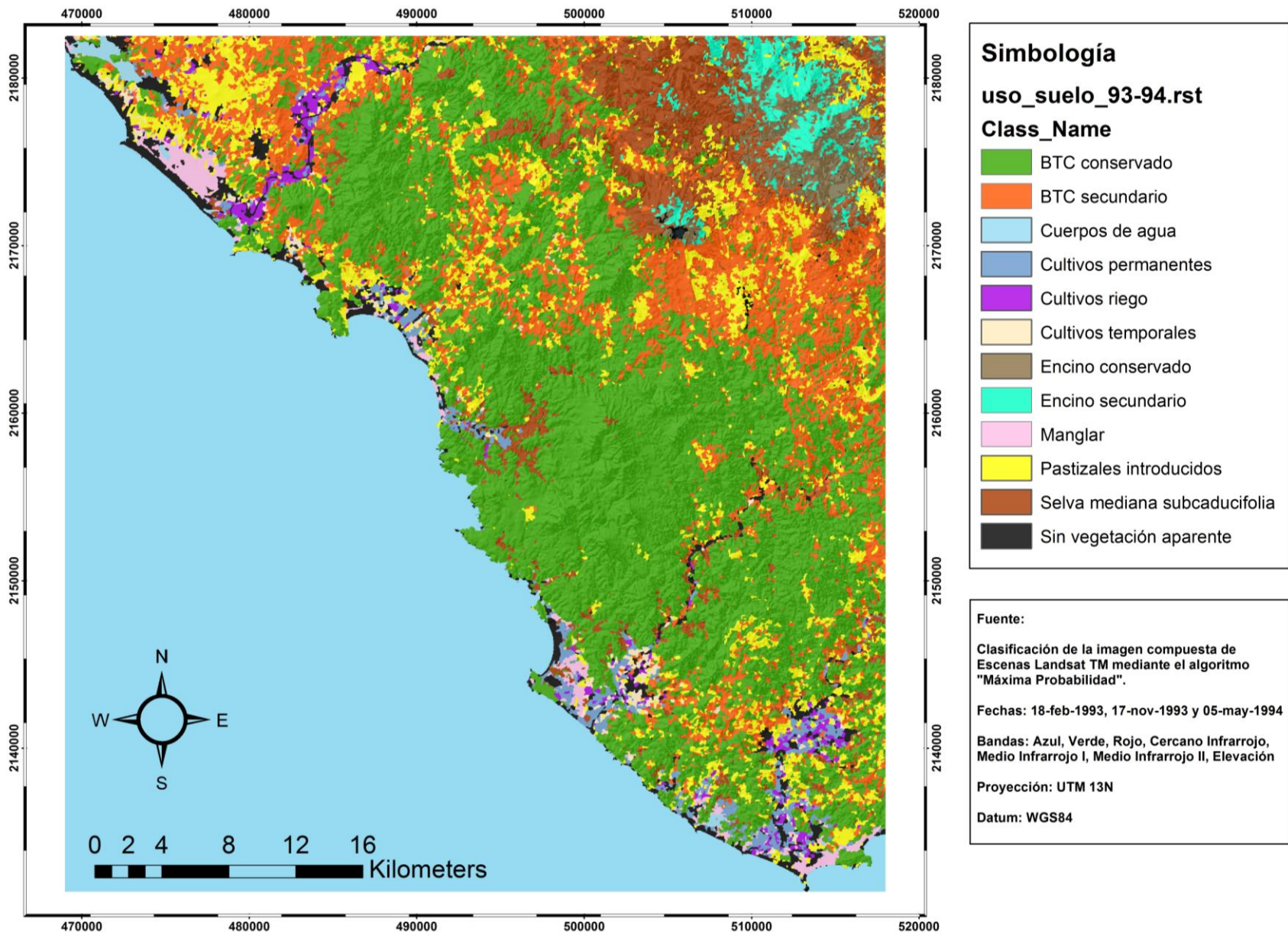


Figura 15. Composición de mapa de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente al periodo 1993-94

Mapa de Clasificación de Tipos de Vegetación y Usos del Suelo para el periodo 2011-12

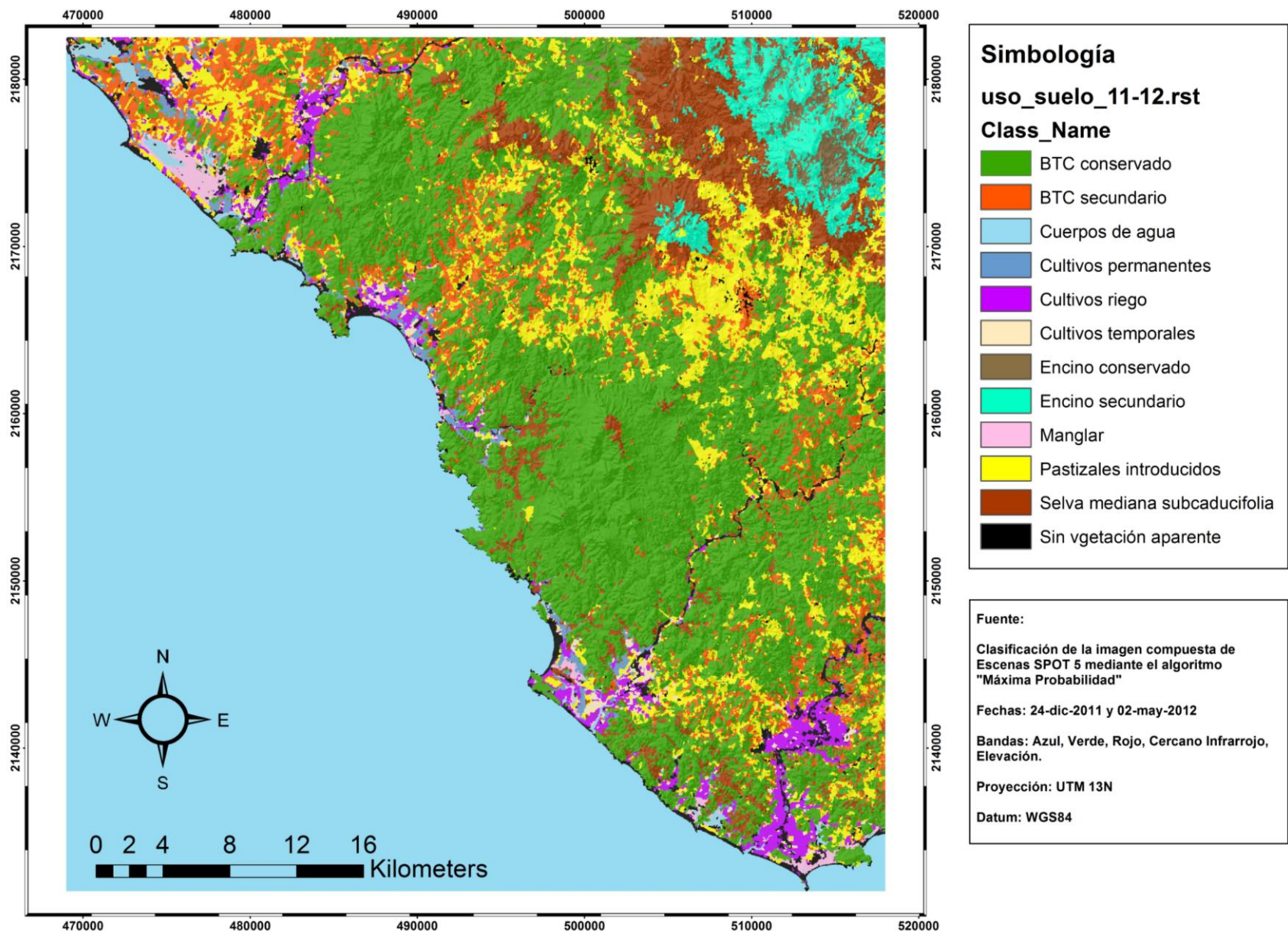


Figura 16. Composición de mapa de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente al periodo 2011-12

6.1.4. Análisis de exactitud

A continuación se presentan los estadísticos de exactitud global para los modelos de clasificación generados. Estos estadísticos para ambos modelos de clasificación se resumen en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Estadísticos de exactitud global de la clasificación de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 1993-94

Fecha	1993 – 94	2011-12
Exactitud global	(233/300) 77.66%	(249/300) 83%
K	0.7219	0.7954

El modelo de clasificación para el periodo 1993-94 obtuvo una exactitud global de 77.6% y un índice de Kappa de 0.72, lo que indica que el mapa obtenido mediante el algoritmo de clasificación es 72% más exacto que una esperada al azar. Mientras que para el periodo 2011-12 se obtuvo una exactitud global de 83% y un índice de Kappa de 0.79, por lo que este modelo en forma de mapa representa una clasificación que es 79% más exacta que una clasificación esperada al azar.

Los cuadros 5 y 6 muestran las matrices de error para ambas clasificaciones. Estas matrices permiten comparar el valor asignado a un pixel dentro de la imagen clasificada contra el valor del mismo pixel en una imagen o datos de referencia, por lo que contienen los datos necesarios para el cálculo de las exactitudes de usuario (errores de comisión) y del productor (errores de omisión). Como puede verse, de los 300 puntos de referencia, 35-37% correspondieron al bosque tropical caducifolio conservado, mientras que cada una de las clases agua, encino conservado, encino secundario, manglar, cultivos de riego y cultivos de temporal, tuvieron entre 2 y 5 por ciento del total de los puntos de referencia. Estos números corresponden proporcionalmente a las áreas que ocupan cada una de las doce clases identificadas.

Cuadro 5. Matriz de error de la clasificación de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 1993-94. Donde: AG= Cuerpos de agua, BTC 1°= Bosque Tropical Caducifolio conservado, BTC 2°= Bosque Tropical Caducifolio secundario, ENC 1°= Encino conservado, ENC 2°= Encino secundario, MNG= Manglar, PTZ= Pastizales introducidos, PRM= Cultivos permanentes, RGO= Cultivos de riego, SV= Sin vegetación aparente, SMSC= Selva Mediana Subcaducifolia (conservada y secundaria), y TMP= Cultivos temporales.

		Datos de referencia												
		AG	BTC 1°	BTC 2°	ENC 1°	ENC 2°	MNG	PTZ	PRM	RGO	SV	SM	TMP	TOTAL
Datos clasificados	AG	7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	8
	BTC 1°	0	95	10	0	0	0	2	0	0	0	5	0	112
	BTC 2°	0	11	27	0	0	0	7	0	1	0	2	0	48
	ENC 1°	0	0	1	6	1	0	1	0	0	0	0	0	9
	ENC 2°	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	6
	MNG	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	7
	PTZ	0	2	5	0	0	0	26	1	0	0	0	0	34
	PRM	0	0	0	0	0	0	1	8	0	0	2	0	11
	RGO	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1	1	6
	SV	1	0	0	0	0	0	1	0	0	16	0	3	21
	SMSC	0	3	1	0	1	0	0	0	0	0	25	0	30
	TMP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	7	8
	TOTAL	8	111	44	7	7	7	38	9	5	18	35	11	300

Cuadro 6. Matriz de error de la clasificación de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 2011-12. Donde: AG= Cuerpos de agua, BTC 1°= Bosque Tropical Caducifolio conservado, BTC 2°= Bosque Tropical Caducifolio secundario, ENC 1°= Encino conservado, ENC 2°= Encino secundario, MNG= Manglar, PTZ= Pastizales introducidos, PRM= Cultivos permanentes, RGO= Cultivos de riego, SV= Sin vegetación aparente, SMSC= Selva Mediana Subcaducifolia (conservada y secundaria), y TMP= Cultivos temporales.

		Datos de referencia												
		AG	BTC 1°	BTC 2°	ENC 1°	ENC 2°	MNG	PTZ	PRM	RGO	SV	SMSC	TMP	TOTAL
Datos clasificados	AG	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	BTC 1°	0	84	16	0	0	0	1	1	0	0	4	0	106
	BTC 2°	0	0	26	0	0	0	2	0	0	0	0	0	28
	ENC 1°	0	0	0	5	2	0	0	0	0	0	0	0	7
	ENC 2°	0	0	0	1	9	0	0	0	0	0	1	0	11
	MNG	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	9
	PTZ	0	4	3	0	0	0	41	0	0	0	1	2	51
	PRM	0	1	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	8
	RGO	0	0	0	0	0	1	0	0	11	1	0	1	14
	SV	0	0	0	0	0	0	1	0	0	24	0	0	25
	SMSC	0	3	1	0	0	0	1	0	0	0	17	0	22
	TMP	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	7	10
	TOTAL	9	92	46	6	11	11	46	8	13	25	23	10	300

En lo que respecta a la exactitud o confiabilidad del productor por categorías individuales (Cuadro 8), las clases “Agua”, “BTC conservado”, “Encino conservado”, y “Sin vegetación aparente” (píxeles clasificados que involucra elementos del paisaje como poblados, carreteras, cauce de ríos, dunas costeras, y zonas desprovistas de vegetación), presentaron los valores de exactitud más altos (>85%), mientras que las clases “BTC secundario” y “Cultivos temporales” obtuvieron los valores de exactitud más bajos (<65%). En lo que respecta a la confiabilidad del usuario, las clases “Encino secundario”, “Pastizal introducido”, “Cultivos permanentes”, “Selva mediana subcaducifolia” y

“Cultivos temporales” presentaron un valor mayor con respecto a la exactitud del productor (Cuadro 7).

Cuadro 7. Estadísticos de exactitud para el modelo de clasificación de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 1993-94.

Clase	Exactitud		Error	
	Productor	Usuario	Omisión	Comisión
Cuerpos de agua	0.8750	0.8750	0.1250	0.1250
Bosque Tropical Caducifolio conservado	0.8558	0.8482	0.1442	0.1582
Bosque Tropical Caducifolio secundario	0.6136	0.5625	0.3864	0.4375
Encino conservado	0.8571	0.6667	0.1429	0.3333
Encino secundario	0.7143	0.8333	0.2857	0.1667
Manglar	1	1	0	0
Pastizales introducidos	0.6842	0.7647	0.3158	0.2353
Cultivos permanentes	0.8889	0.7273	0.1111	0.2727
Cultivos de riego	0.8000	0.6667	0.2000	0.3333
Sin vegetación aparente	0.8889	0.7619	0.1111	0.2381
Selva Mediana subcaducifolia	0.7143	0.8333	0.2857	0.1667
Cultivos temporales	0.6364	0.8750	0.3636	0.1250

Los estadísticos de confiabilidad del productor para el modelo de clasificación 2011-12 (Cuadro 8) indican que las clases mejor representadas en la clasificación (>85%) fueron “Agua”, “BTC conservado”, “Manglar”, “Pastizal introducido”, “Cultivos permanentes” y “Sin vegetación aparente”. Por otra parte, los valores de productor más bajos correspondieron nuevamente las clases “BTC secundario” y “Cultivos temporales”. En cuanto a la confiabilidad del usuario, solamente las clases “BTC secundario” y “Selva mediana subcaducifolia” presentaron este estadístico por encima de la del productor.

Cuadro 8. Estadísticos de exactitud para el modelo de clasificación de los Tipos de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) correspondiente a 2011-12.

Clase	Exactitud		Error	
	Productor	Usuario	Omisión	Comisión
Cuerpos de agua	1	1	0	0
Bosque Tropical Caducifolio conservado	0.913	0.7924	0.0869	0.2076
Bosque Tropical Caducifolio secundario	0.5652	0.9285	0.4348	0.0715
Encino conservado	0.8333	0.7142	0.1667	0.2858
Encino secundario	0.8181	0.8181	0.1819	0.1819
Manglar	1	1	0	0
Pastizales introducidos	0.8913	0.8039	0.1087	0.1961
Cultivos permanentes	0.875	0.8750	0.125	0.125
Cultivos de riego	0.8461	0.7857	0.1539	0.2143
Sin vegetación aparente	0.96	0.96	0.04	0.04
Selva Mediana subcaducifolia	0.7391	0.7727	0.2609	0.2273
Cultivos temporales	0.7	0.7	0.3	0.3

Los valores bajos de confiabilidad del productor para la clase bosque tropical caducifolio secundario (BTC secundario) parecen deberse principalmente a la confusión espectral de esta clase con las clases “BTC conservado” y “Pastizal introducido”. Al examinar las matrices de error, así como como las firmas espectrales para ambos modelos de clasificación, se puede observar que no hubo una separación satisfactoria entre dichas clases. Para el caso de la clase selva mediana sub-caducifolia (SMSC) se presentó cierta confusión espectral con la clase “BTC conservado”. Por otra parte, las clases que pudieron separarse de manera bastante clara fueron principalmente las clases “Agua”, “BTC conservado”, “Encino conservado y “Manglar”

6.2. Análisis de cambio

6.2.1. Tasas de cambio

Los cuadros 9, 10 y 11 muestran los cálculos resultantes de las tasas de cambio anuales entre las tres fechas que abarca el estudio. Estos cálculos necesariamente utilizan el área específica, por lo que se calculó la proporción del territorio ocupada por cada clase así como la superficie total en el área de estudio. Los valores negativos en la tasa de cambio indican pérdida de superficie en el periodo evaluado, mientras que los valores positivos indican ganancias.

Cuadro 9. Superficie ocupada y Tasas de Cambio anual (TCA) calculadas para cada clase de tipo de vegetación y usos del suelo entre 1970 y 1993-94.

Clase	1970		1993-1994		TCA
	ha	%	ha	%	
Cuerpos de agua	1518.6	1.0791	763.2	0.5423	-2.8257
BTC conservado	88552.3	62.9244	66818.7	47.4808	-1.1665
BTC secundario	6741.7	4.7906	24265.8	17.2430	5.4814
Encino conservado	3204.6	2.2771	4049.2	2.8773	0.9795
Encino secundario	0	0	3108.8	2.2091	---
Manglar	959.4	0.6818	1782	1.2663	2.6133
Pastizales introducidos	6276.6	4.4601	16558.8	11.7665	4.1247
Cultivos permanentes	2064	1.4667	3030.8	2.1536	1.6135
Cultivos de riego	99.1	0.0704	1813.1	1.2884	12.8713
Sin vegetación aparente	1265.9	0.8995	4564.8	3.2437	5.4894
Selva mediana subcaducifolia	25332.8	18.0012	12753.7	9.0626	-2.8189
Cultivos temporales	4712.4	3.3485	1218.4	0.8657	-5.4801
TOTAL	140727.9	100	140727.9	100	

Cuadro 10. Superficie ocupada y Tasas de Cambio anual (TCA) calculadas para cada clase de tipo de vegetación y usos del suelo entre 1970 y 2011-12.

Clase	1970		2011-2012		TCA
	ha	%	ha	%	
Cuerpos de agua	1518.6	1.0791	958.2	0.6809	-1.0904
BTC conservado	88552.3	62.9244	69478.4	49.3707	-0.5758
BTC secundario	6741.7	4.7906	15941.3	11.3277	2.0701
Encino conservado	3204.6	2.2771	2353.5	1.6723	-0.7322
Encino secundario	0	0	5841.9	4.1512	---
Manglar	959.4	0.6818	1163.9	0.8271	0.4610
Pastizales introducidos	6276.6	4.4601	19486.2	13.8467	2.7340
Cultivos permanentes	2064	1.4667	1797.2	1.2770	-0.3290
Cultivos de riego	99.1	0.0704	4404.1	3.1295	9.4522
Sin vegetación aparente	1265.9	0.8995	3957	2.8118	2.7506
Selva mediana subcaducifolia	25332.8	18.0012	13898.8	9.8764	-1.4191
Cultivos temporales	4712.4	3.3485	1446.9	1.0281	-2.7721
TOTAL	140727.9	100	140727.9	100	

Cuadro 11. Superficie ocupada y Tasas de Cambio anual (TCA) calculadas para cada clase de tipo de vegetación y usos del suelo entre 1993-94 y 2011-12.

Clase	1993-1994		2011-2012		TCA
	ha	%	ha	%	
Cuerpos de agua	763.2	0.5423	958.2	0.6809	1.2716
BTC conservado	66818.7	47.4808	69478.4	49.3707	0.2170
BTC secundario	24265.8	17.2430	15941.3	11.3277	-2.3071
Encino conservado	4049.28	2.8773	2353.5	1.6723	-2.9696
Encino secundario	3108.8	2.2091	5841.9	4.1512	3.5666
Manglar	1782	1.2663	1163.9	0.8271	-2.3386
Pastizales introducidos	16558.8	11.7665	19486.2	13.8467	0.9084
Cultivos permanentes	3030.8	2.1536	1797.2	1.2770	-2.8616
Cultivos de riego	1813.1	1.28840	4404.1	3.1295	5.0540
Sin vegetación aparente	4564.8	3.2437	3957	2.8118	-0.7907
Selva mediana subcaducifolia	12753.7	9.0626	13898.8	9.8764	0.4788
Cultivos temporales	1218.4	0.8657	1446.9	1.0281	0.9595
TOTAL	140727.9	100	140727.9	100	

La Figura 17 muestra la proporción de área ocupada por cada clase para cada modelo de clasificación o periodo de tiempo considerado en el estudio. Se puede observar que la clase dominante para los tres modelos fue el “Bosque Tropical Caducifolio conservado”, el cual ocupó 62.92% en 1970, 47.48% en 1993-94 y finalmente 49.37% para el periodo 2011-12. En el caso del “Bosque Tropical Caducifolio secundario”, se observó un incremento de 4.79% en 1970 a 17.24% para el periodo 1993-94; para disminuir a 11.32%

en el periodo 2011-12. Esto indica que mientras la cobertura conservada del BTC disminuyó en 15% aproximadamente para el periodo 1970 y 1993-94, presentando una tasa de cambio anual de -1.17%, la cobertura secundaria se incrementó para ese mismo periodo a un ritmo de 5.48% por año (Cuadro 9, Figura 16). Sin embargo, al analizar los cambios ocurridos entre 1993-94 y 2011-12, el “BTC conservado” incrementó su superficie a una tasa anual de 0.22%, a su vez el “BTC secundario” perdió superficie a una tasa anual de -2.3% (Figura 18). De esta manera se observa una evidente desaceleración de la tasa de cambio anual para el “BTC conservado”, al punto de que esta cobertura muestra un incremento en su superficie debido probablemente a la regeneración del bosque secundario, misma que registra pérdidas de superficie en los últimos 20 años.

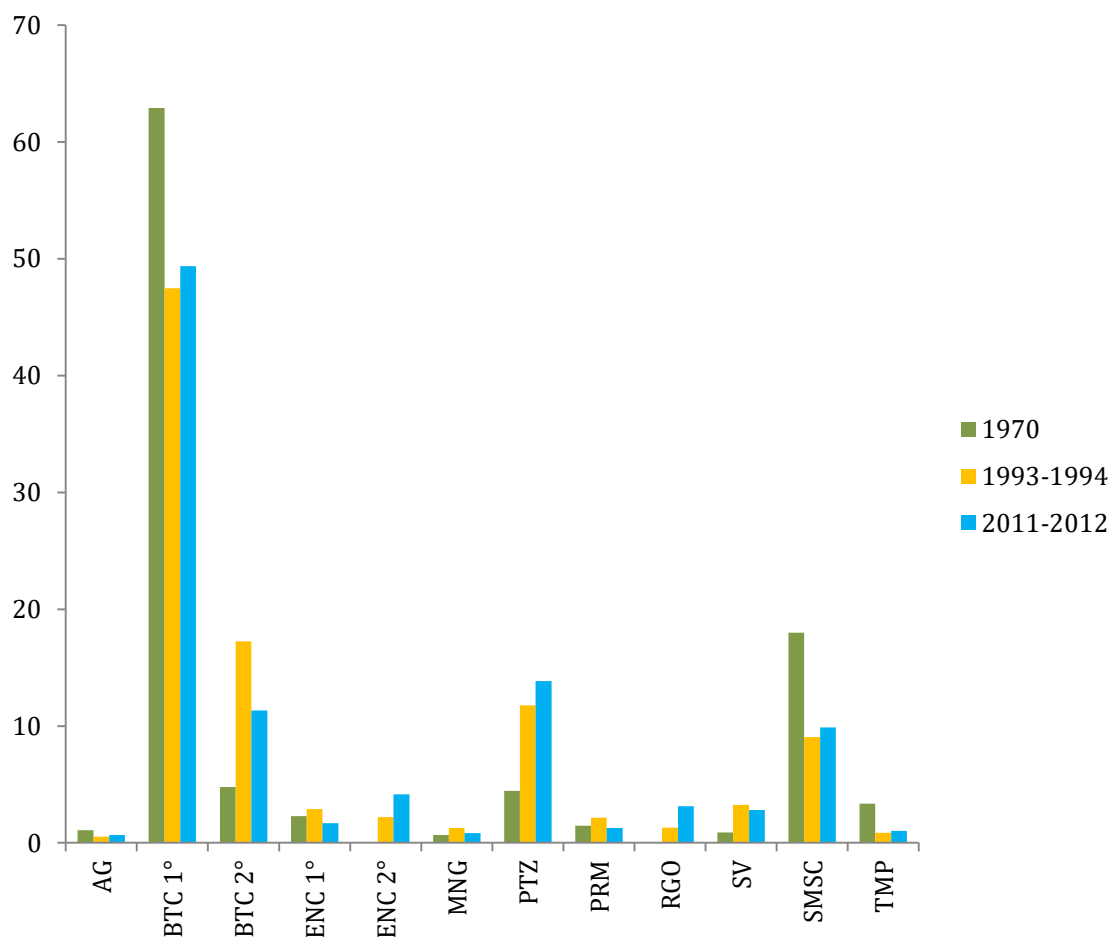


Figura 17. Proporción de superficie ocupada por cada clase de Tipo de Vegetación y Usos del Suelo (TVyUS) en los tres periodos de tiempo considerados, 1970, 1993-94 y 2011-12. Donde: AG= Cuerpos de agua, BTC 1°= Bosque Tropical Caducifolio conservado, BTC 2°= Bosque tropical caducifolio secundario, ENC 1°= Encino conservado, ENC 2°= Encino secundario, MNG= Manglar, PTZ= Pastizales introducidos, PRM= Cultivos permanentes, RGO= Cultivos de riego, SV= Sin vegetación aparente, SMSC= Selva mediana subcaducifolia (conservada y secundaria), y TMP= Cultivos temporales.

Por otra parte, la “Selva Mediana Subcaducifolia” representó una porción del territorio de 18% para la fecha 1970, la cual disminuyó aproximadamente a la mitad (9%) para los periodos posteriores de 1993-94 y 2011-12. Esta drástica disminución puede deberse principalmente a diferencias en la tipificación (mapeo) de ciertos TVyUS plasmadas en las cartas del CETENAL para el periodo 1970, respecto a las contenidas en los modelos de clasificación propuestos. Esto se ve reflejado en las matrices de transición (ver la sección Matrices de Transición) que indican cambios inverosímiles significativos, tales como la transformación de “Selva Mediana Subcaducifolia” a coberturas como Bosque Tropical Caducifolio y Bosque de Encino. Finalmente, la cobertura “Pastizales introducidos” experimentó un incremento continuo en su extensión, pasando de 4.46% para la fecha 1970 a 11.76% y 13.84% para los periodos 1993-94 y 2011-12, respectivamente. Sin embargo, como se puede observar, la cobertura “Pastizales introducidos” ha presentado una desaceleración en la tasa de cambio, pasando de un 4.12% anual para el periodo 1970 a 1993-94 (Figura 18) a una tasa 0.9% anual para el periodo de 1993-94 a 2011-12 (Figura 20). A continuación se presentan graficadas las tasas de cambio para los distintos periodos considerados en el análisis.

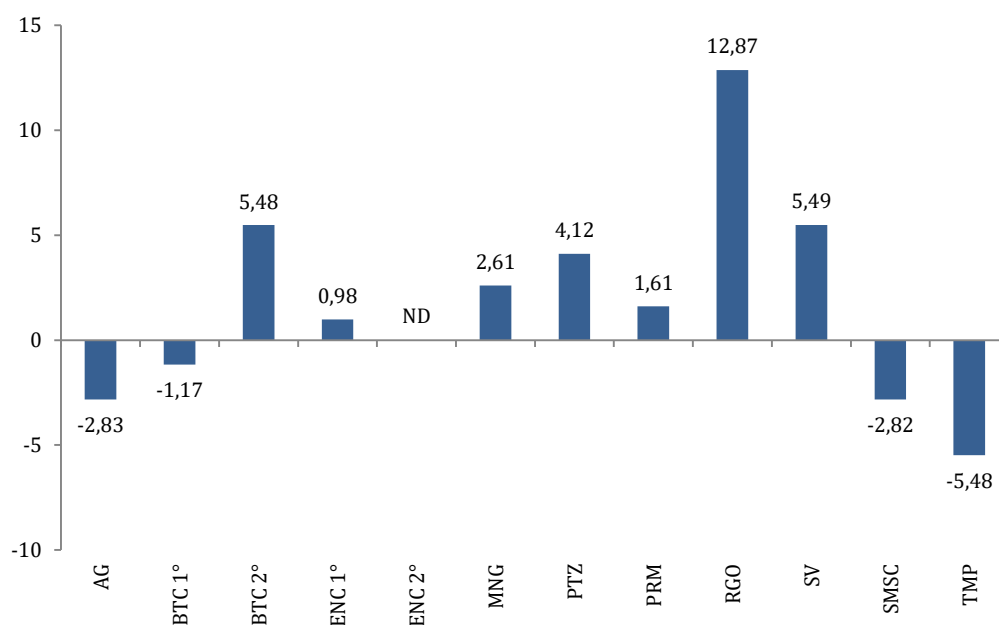


Figura 18. Tasas de cambio anuales para cada clase durante el periodo 1970 a 1993-94. Donde: AG= Cuerpos de agua, BTC 1°= Bosque Tropical Caducifolio conservado, BTC 2°= Bosque tropical caducifolio secundario, ENC 1°= Encino conservado, ENC 2°= Encino secundario, MNG= Manglar, PTZ= Pastizales introducidos, PRM= Cultivos permanentes, RGO= Cultivos de riego, SV= Sin vegetación aparente, SMSC= Selva mediana subcaducifolia (conservada y secundaria), y TMP= Cultivos temporales.

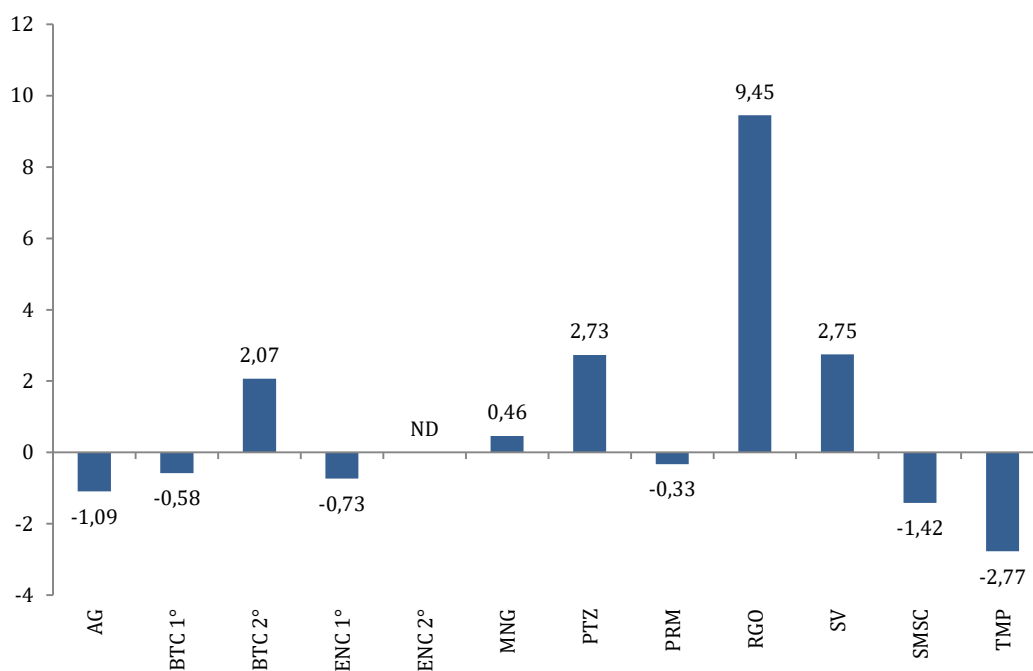


Figura 19. Tasas de cambio anuales para cada clase durante el periodo 1970 a 2011-12. Donde: AG= Cuerpos de agua, BTC 1°= Bosque Tropical Caducifolio conservado, BTC 2°= Bosque tropical caducifolio secundario, ENC 1°= Encino conservado, ENC 2°= Encino secundario, MNG= Manglar, PTZ= Pastizales introducidos, PRM= Cultivos permanentes, RGO= Cultivos de riego, SV= Sin vegetación aparente, SMSC= Selva mediana subcaducifolia (conservada y secundaria), y TMP= Cultivos temporales.

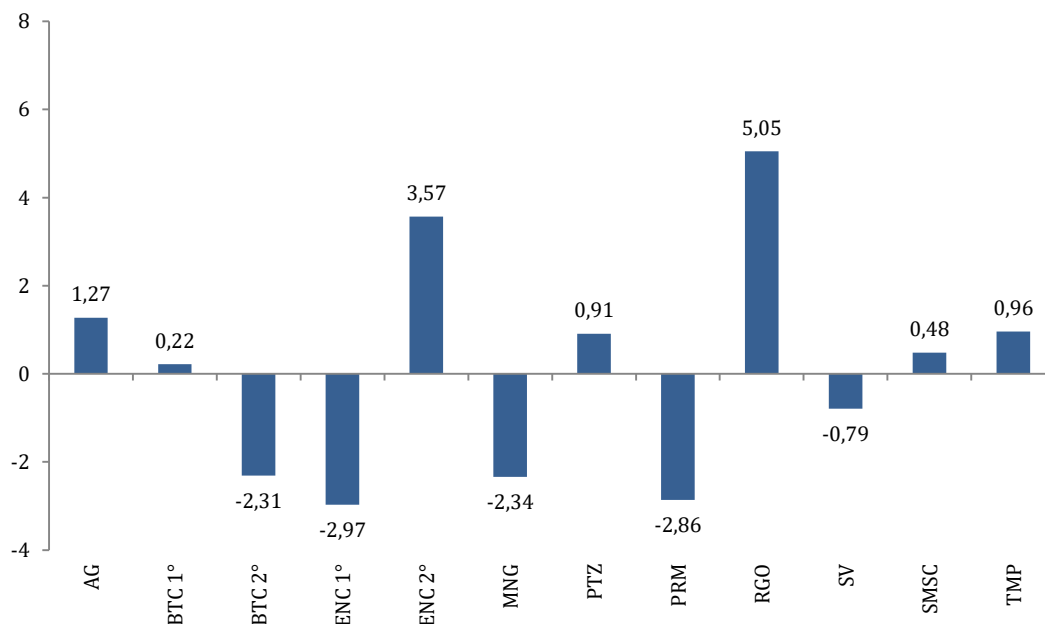


Figura 20. Tasas de cambio anuales para cada clase durante el periodo 1993-94 a 2011-12. Donde: AG= Cuerpos de agua, BTC 1°= Bosque Tropical Caducifolio conservado, BTC 2°= Bosque tropical caducifolio secundario, ENC 1°= Encino conservado, ENC 2°= Encino secundario, MNG= Manglar, PTZ= Pastizales introducidos, PRM= Cultivos permanentes, RGO= Cultivos de riego, SV= Sin vegetación aparente, SMSC= Selva mediana subcaducifolia (conservada y secundaria), y TMP= Cultivos temporales.

Respecto a la dinámica de las zonas de cultivo (permanentes, riego y temporal), éstas conformaron entre el 4.3% y 5.4% del total de la superficie. La clase “Cultivos de riego” registró un incremento de superficie con una tasa de cambio anual de 12.87% para el periodo de 1970 a 1993-94, aunque para el periodo 1993-94 a 2011-12 ésta se desaceleró considerablemente a 5.05%. Esta clase fue la única que presentó tasas de cambio positivas en todos los periodos analizados.

6.2.2. Matrices de transición

Se obtuvieron las matrices de transición para cada uno de los periodos evaluados, las cuales indicaron la superficie (hectáreas) total de cambio entre las clases consideradas para los distintos periodos analizados, mostrando tanto transformaciones como aquellas clases que permanecieron inalteradas. Los valores dentro de las celdas expresan el cambio de superficie que se gana o se pierde, con “SC” indicando aquellas celdas que se mantuvieron sin cambios en las clases de cruce. Por otra parte, los valores de la diagonal principal, cuyas celdas se muestran en tonos grises, indican el área que se mantuvo sin cambios (permanencias). Los valores en negritas indican aquellos cambios denominados inverosímiles (e.g., el cambio de bosque tropical caducifolio a selva mediana subcaducifolia). Es decir, significarían falsos cambios que se presentan debido a la existencia de problemas tales como la utilización de clasificaciones elaboradas con criterios de categorización no estandarizados, por ejemplo derivados de la aplicación de esquemas diferentes de clasificación de la vegetación. Otro factor que explicaría tales cambios inverosímiles es la imposibilidad de que los algoritmos de clasificación discriminen rigurosamente entre las clases de los modelos de clasificaciones obtenidas de las imágenes de satélite Landsat y SPOT.

Cuadro 12. Matriz de transición (expresada en hectáreas) para el periodo de 1970 a 1993-94. Donde: BTC 1°= Bosque Tropical Caducifolio conservado, BTC 2°= Bosque Tropical Caducifolio secundario, ENC 1°= Encino conservado, ENC 2°= Encino secundario, MNG= Manglar, PTZ= Pastizales introducidos, PRM= Cultivos permanentes, RGO= Cultivos de riego, SV= Sin vegetación aparente, SMSC= Selva Mediana Subcaducifolia (conservada y secundaria), y TMP= Cultivos temporales.

	Agua	BTC 1°	BTC 2°	ENC 1°	ENC 2°	MNG	PTZ	PRM	RGO	SV	SMSC	TMP
AG	434.25	34.65	28.89	SC	SC	327.69	33.57	125.73	103.5	383.94	27.36	19.08
BTC 1°	252.54	59049.45	14426.37	5.94	14.04	495.72	9365.58	760.68	185.4	1338.66	2310.39	347.58
BTC 2°	1.35	1336.14	2964.87	1.17	1.17	94.68	1245.78	324	123.3	342.99	200.7	105.57
ENC 1°	SC	3.96	191.34	1491.03	900.18	SC	157.77	SC	SC	5.76	454.59	SC
ENC 2°	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
MNG	3.78	20.34	6.75	SC	SC	688.77	33.12	62.28	12.24	117.27	8.91	6.03
PTZ	3.78	809.82	1708.11	344.43	227.97	47.88	1660.68	108.99	43.38	296.28	968.67	56.7
PRM	SC	70.38	52.56	SC	SC	57.78	137.97	850.32	363.33	336.33	23.58	171.81
RGO	SC	0.36	SC	2.61	SC	5.85	12.69	24.12	22.86	10.53	6.21	13.95
SV	65.52	20.61	81.81	SC	SC	28.71	173.16	58.5	2.7	799.2	23.31	12.42
SMSC	SC	5282.46	4141.8	2201.94	1956.42	18.36	2744.64	163.08	20.43	165.6	8587.89	50.22
TMP	2.07	190.62	663.3	2.16	9.09	16.65	993.87	553.14	936	768.33	142.11	435.06

Cuadro 13. Matriz de transición (expresada en hectáreas) para el periodo de 1970 a 2011-12.

	Agua	BTC 1°	BTC 2°	ENC 1°	ENC 2°	MNG	PTZ	PRM	RGO	SV	SMSC	TMP
AG	633.33	51.39	SC	SC	SC	168.39	25.56	18.99	170.64	360.27	10.62	55.26
BTC 1°	206.19	59155.92	12249.81	26.28	54.72	175.23	9744.75	900.9	798.57	1501.74	3524.94	213.3
BTC 2°	27.72	1725.21	1043.55	0.45	18.45	84.6	2674.26	116.55	426.06	291.33	168.12	165.42
ENC 1°	SC	23.94	23.94	848.07	1770.48	SC	107.28	SC	SC	0.99	429.93	SC
ENC 2°	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
MNG	20.34	29.16	11.34	SC	SC	645.39	23.49	68.94	61.38	78.12	4.5	16.83
PTZ	12.15	1134.99	735.57	212.13	517.77	9.9	1962.36	56.7	140.22	193.23	1221.48	80.19
PRM	15.21	70.92	19.62	SC	SC	20.43	171	125.37	1112.4	210.6	53.1	265.41
RGO	SC	3.06	SC	0.45	0.27	SC	14.67	2.25	65.52	4.32	4.77	3.87
SV	29.07	42.75	151.2	SC	SC	34.38	247.77	49.68	136.98	554.58	4.14	15.39
SMSC	0.27	6933.6	1123.92	1263.33	3457.71	1.53	3674.52	154.35	99.63	232.74	8330.58	60.66
TMP	13.95	307.53	558.18	2.79	22.59	24.12	840.6	303.48	1392.75	529.11	146.7	570.6

Cuadro 14. Matriz de transición (expresada en hectáreas) para el periodo de 1993-94 a 2011-12.

	Agua	BTC 1°	BTC 2°	ENC 1°	ENC 2°	MNG	PTZ	PRM	RGO	SV	SMSC	TMP
AG	500.94	29.52	2.43	SC	SC	5.58	5.13	3.69	1.26	213.48	0.18	1.08
BTC 1°	24.21	54353.07	4613.04	27.27	35.28	25.38	3976.2	208.71	139.14	308.7	3063.42	44.37
BTC 2°	0.99	8355.15	6250.41	32.58	132.3	2.07	7367.94	172.26	188.28	322.02	0.18	140.49
ENC 1°	SC	SC	2.52	1183.68	2314.71	SC	77.4	SC	SC	SC	470.97	SC
ENC 2°	SC	1.98	1.26	669.69	1938.24	SC	41.13	SC	SC	SC	456.57	SC
MNG	157.41	170.19	16.47	SC	SC	835.38	21.6	243.9	137.7	149.76	27.18	22.5
PTZ	10.53	3423.06	3973.41	134.73	491.58	22.23	6136.38	138.6	502.65	525.69	961.2	238.77
PRM	36.09	234.36	90.72	SC	SC	100.71	113.58	546.84	1262.79	234.09	147.78	263.88
RGO	22.86	45.45	90.45	SC	SC	10.35	124.65	61.2	944.01	234.27	10.08	269.82
SV	193.95	214.02	348.48	9.9	55.71	147.33	514.71	154.8	883.26	1757.79	25.11	259.83
SMSC	6.21	2562.57	377.01	295.65	874.17	6.3	829.62	170.64	62.64	140.31	7402.32	26.28
TMP	5.04	89.1	175.14	SC	SC	8.64	277.92	96.57	282.42	70.92	32.76	179.91

Como puede observarse en los cuadros 12 y 13, la clase “Encino secundario” se mantiene sin cambios debido a que para el periodo 1970, según la información arrojada por las cartas del CETENAL, no se consideró al bosque secundario de encino como una clase determinada para la región. Sin embargo, en el proceso de entrenamiento y clasificación para las imágenes compuestas Landsat y SPOT, se pudo clasificar el bosque de encino secundario con base a la información vectorial escala 1:250 000 del INEGI, lo que pudo traducirse en detección de cambios para esta clase para el periodo 1993-94 a 2011-12 (Cuadro 14) así como una estimación de la tasa de cambio asociada a esta clase (Figura 19).

Las áreas ocupadas por la Selva Mediana Subcaducifolia (SMSC) en 1970, presentó cambios significativos principalmente para aparecer como Bosque Tropical Caducifolio (BTC) conservado y “BTC secundario”; sin embargo, como se mencionó en el apartado anterior, estos cambios se consideran como el resultado de problemas en la información contenida en los modelos de clasificación.

Las áreas ocupadas por el “BTC conservado” presentan cambios significativos para aparecer como “BTC secundario” y como “Pastizales introducidos” en los tres periodos analizados (1970 a 1993-94, 1993-94 a 2011-12, y 1970 a 2011-12). El “BTC conservado” registra cambios poco significativos hacia las clases asociadas a zonas de cultivos como permanentes, riego y temporales. Por otro lado, áreas de “BTC secundario” muestran los mayores cambios hacia la clase “BTC conservado” y hacia la clase “Pastizales introducidos”, significando que, mientras el bosque secundario pierde cobertura por procesos de deforestación y

conversión de superficie forestal a pastizales, al mismo tiempo se registran ganancias por medio de la degradación del “BTC conservado” a “BTC secundario”.

Respecto a la clase “Pastizales introducidos”, sus mayores conversiones consisten en transformaciones hacia “BTC conservado”, “BTC secundario” y “SMSC” muy probablemente como consecuencia de procesos de regeneración de la vegetación. Otras conversiones de los “Pastizales introducidos”, a “Encino conservado” y “Encino secundario”, así como cultivos permanentes, temporales y de riego resultaron poco significativas. Una excepción ocurre durante el periodo 1993-94 a 2011-12, donde se registró una conversión considerable de “Pastizales introducidos” a “Cultivos de riego”.

En cuanto a las clases asociadas a las zonas de cultivos (permanentes, riego y temporales), si bien estas clases no incrementaron significativamente su proporción en la totalidad del territorio, sí se presentó una dinámica de cambio entre estas (Cuadros 12, 13 y 14). Se puede observar que la clase “Cultivos de riego” presentó los mayores intercambios entre “Cultivos permanentes” y “Cultivos temporales”, incrementando continuamente su superficie en las últimas cuatro décadas.

6.3 Predicciones de cambios a futuro

6.3.1. Pre-modelado de los cambios de uso del suelo

Mediante el uso del módulo “Land Change Modeler for Ecological Suitability” (LCMES; Clark University, 2012) se visualizaron y modelaron las transiciones de cobertura para dos fechas establecidas (t_1 y t_2). Un modelo (mapa) de transiciones permite evaluar de manera visual cada transición entre t_1 y t_2 , y de esta manera definir cuáles transiciones serán incluidas en el modelado orientando a predecir escenarios de predicción.

Con la finalidad de observar cuáles fueron las clases que presentaron el mayor cambio y cuáles persistieron en el periodo de 1970 a 2011-12, se determinó ignorar las transiciones menores a 500 hectáreas. De esta manera, se descartaron transiciones inverosímiles (e. g. bosque tropical conservado a cuerpos de agua, encino secundario a bosque tropical conservado, etc.) que puedan ser producto de errores en la clasificación de los mapas. Por lo tanto, se analizaron sólo aquellas transiciones que se consideren verosímiles, es decir cambios de cobertura debidas a prácticas de manejo o producto de la degradación o regeneración de coberturas conservadas y secundarias, respectivamente.

6.3.2. Modelado de los cambios de uso del suelo y variables explicativas

Una vez que se agruparon las transiciones consideradas afines entre los diversos sub-modelos, se evaluó el desempeño de cada una de las variables que potencialmente pueden explicar los cambios detectados en los periodos del análisis. Los cuadros 15 y 16 muestran los valores obtenidos por cada una de las variables consideradas mediante la evaluación con el índice de Cramer global y para cada clase, respectivamente, el cual cuando adquiere valores > 0.15 , indica que las variables explican de manera favorable la distribución espacial de las distintas clases entre las fechas sometidas al análisis (Eastman, 2009; Pérez-Vega, 2012).

Cuadro 15. Evaluación de las variables explicativas mediante el índice de Cramer.

Variable	Índice de Cramer (global)
Aspecto	0.1007
Modelo Digital de Elevación (MDE)	0.2972
Distancia a poblados	0.0914
Distancia a la RBChC	0.1689
Tipos de cobertura (probabilidad de evidencia)	0.2253
Relieve (probabilidad de evidencia)	0.2569
Sombreado topográfico	0.1084

Cuadro 16. Evaluación de las variables explicativas mediante el índice de Cramer para cada una de las clases consideradas.

Variable	Clase										
	BTC conservado	BTC secundario	Encino conservado	Encino secundario	Manglar	Pastizales introducidos	Cult. permanentes	Cult. de riego	Sin vegetación	SMSC	Cult. temporales
Aspecto	0.1321	0.1860	0.0559	0.0724	0.0695	0.1352	0.0793	0.1223	0.2619	0.1448	0.0950
MDE	0.1835	0.5432	0.1524	0.5080	0.7378	0.2031	0.1822	0.2526	0.3893	0.2877	0.6399
Distancia a poblados	0.0546	0.1711	0.0753	0.1292	0.1304	0.0580	0.0844	0.0863	0.2175	0.1801	0.0575
Distancia a RBChC	0.2928	0.4028	0.2184	0.2835	0.3778	0.1717	0.1668	0.1384	0.1371	0.1050	0.2024
Tipos de cobertura (prob. ev.)	0.1668	0.6265	0.2343	0.2047	0.3151	0.5793	0.2879	0.1563	0.2819	0.4076	0.5114
Relieve (prob. ev.)	0.1183	0.3528	0.1819	0.3331	0.5824	0.1386	0.1047	0.1704	0.2962	0.1635	0.3762
Sombreado topográfico	0.1207	0.2081	0.0492	0.0877	0.1403	0.1462	0.1111	0.1338	0.2550	0.1688	0.0983

De las siete variables evaluadas, solamente tres variables (Aspecto, Distancia a poblados y Sombreado topográfico) presentaron un valor menor a 0.15, lo que indica que éstas débilmente explican los cambios de Tipos de Cobertura y Usos del suelo en los periodos analizados. En contraste, las variables Modelo Digital de Elevación (MDE), Distancia a la Reserva, Tipos de cobertura (probabilidad de evidencia) y Relieve (probabilidad de evidencia), obtuvieron un valor mayor a 0.15, lo que significa que los cambios detectados pueden ser explicados, aunque sea de manera parcial por tales variables. Particularmente, el MDE y el Relieve obtuvieron los valores más altos del índice de Cramer, lo que sugiere la importancia que tiene la topografía en la determinación de la naturaleza de los cambios de Tipos de Cobertura y Usos del Suelo en la región de estudio.

6.3.3. Elaboración de sub-modelos

La elaboración de los sub-modelos sometidos al modelado se basó en la agrupación de las transiciones que probablemente se deben a las mismas variables o fuerzas conductoras. El sub-modelo denominado “deforestación” incluye las transiciones siguientes: (1) Bosque Tropical Caducifolio conservado (BTC 1°) a Pastizal Introducido (PTZ), (2) BTC 1° a Sin Vegetación aparente (SV), (3) BTC secundario (BTC 2°) a PTZ y, (4) Selva mediana subcaducifolia (SMSC) a PTZ. Estas transiciones fueron agrupadas dentro del sub-modelo, determinando un identificador común (e.g., “deforestación”).

Una vez determinados los parámetros para correr el sub-modelo (número de iteraciones error de media cuadrática), se entrenó el algoritmo de redes neuronales artificiales Multi-Layer Perceptron (Eastman, 2009; Emil *et al.* 2012 y Pacifici *et al.* 2007) para obtener las transiciones potenciales que serán la base de la predicción. El algoritmo toma una muestra aleatoria de píxeles que experimentaron las transiciones seleccionadas en el sub-modelo, así como una muestra de píxeles que pudieron experimentar dichas transiciones pero persistieron tras correr los sub-modelos. Con las muestras utilizadas en el proceso de entrenamiento, el MLP construye un mapa de transiciones potenciales por cada transición incorporada al submodelo (cuatro en este caso). La Figura 21 muestra los parámetros del sub-modelo “deforestación”, entre los que destaca una exactitud de 83.85%.

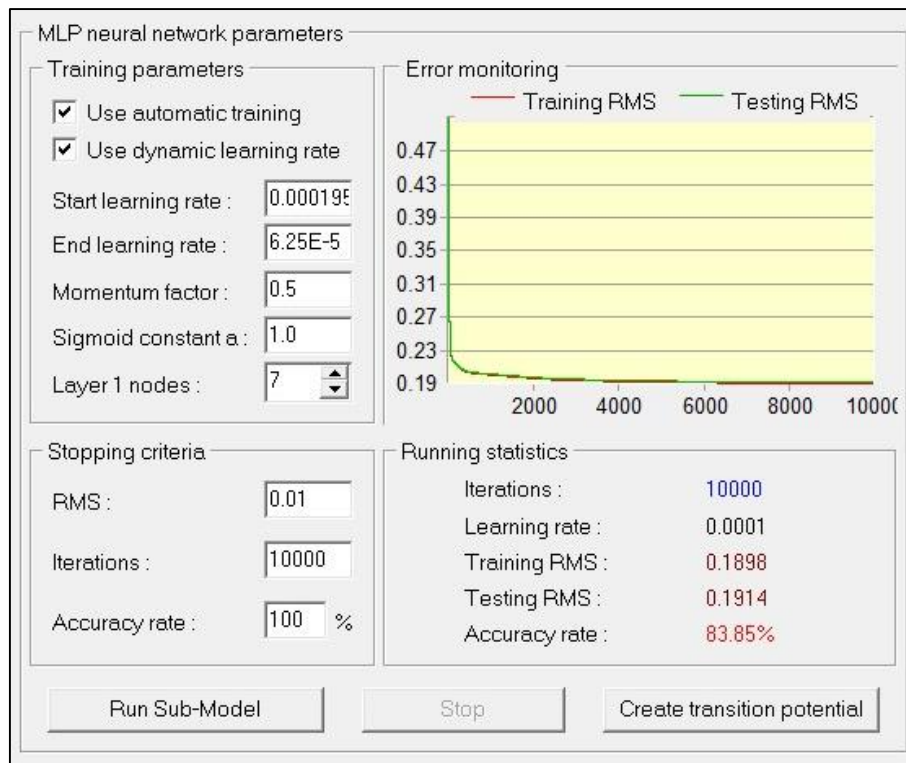


Figura 21. Parámetros del sub-modelo “deforestación” tras 10 000 iteraciones del algoritmo de redes neuronales artificiales.

Tres sub-modelos más fueron creados; (1) sub-modelo llamado “cons-sec”, el cual incluyó las transiciones potenciales de bosques conservados a bosques secundarios, es decir las transiciones de BTC conservado a BTC secundario y Encino conservado a Encino secundario; (2) un sub-modelo llamado “sec-cons” que incluye transiciones de bosques secundarios a bosques conservados, es decir las transiciones de BTC secundario a BTC conservado; y (3) un sub-modelo llamado “regenera”, el cual considera las transiciones que significarían procesos de regeneración de las coberturas boscosas a partir de áreas transformadas como el pastizal introducido, es decir, PTZ a BTC conservado y PTZ a SMSC.

La Figura 22 muestra un ejemplo de modelo de transiciones potenciales, en este caso la transición potencial de la clase BTC conservado a BTC secundario para el periodo de 1970 a 2011-12. En ella se muestra el potencial de cambio que pudiera experimentar el BTC conservado y transformarse a BTC secundario. En tonos azul y verde oscuros se presentan aquellas zonas que tendrían poco potencial de cambio (cercano a cero), mientras que las zonas con mayor potencial de cambio se muestran en tonos amarillos-rojos.

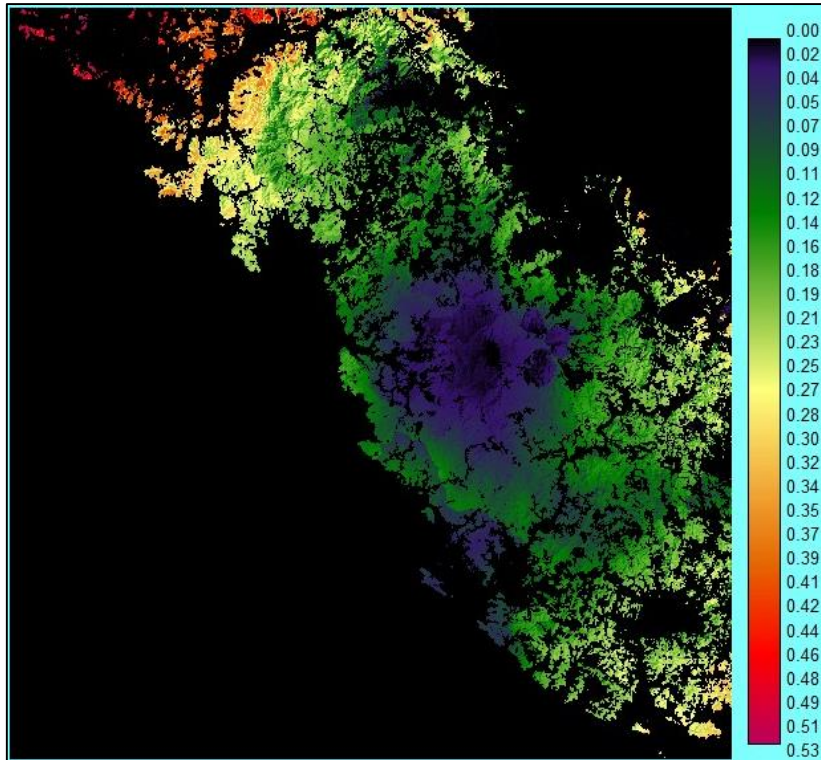


Figura 22. Transición potencial de la clase Bosque tropical caducifolio conservado (BTC 1°) a Bosque tropical caducifolio secundario (BTC 2°) entre el periodo 1970 a 2011-12. La escala de valores indica el potencial de cambio en un intervalo de cero a uno.

6.3.4. Predicción de escenarios tendenciales

Las predicciones de los cambios de cobertura para los años 2020, 2030, 2040 y 2050 se llevaron a cabo mediante la aplicación del algoritmo de cadenas Markov.

Con base en el análisis de cambio de coberturas entre el t_1 y t_2 , así como la proyección de las transiciones potenciales entre dichos periodos, es posible cuantificar los cambios que ocurrirán a una fecha determinada en el futuro mediante el proceso de análisis probabilístico de las cadenas de Markov a través de matrices de probabilidades de transición. Esta matriz registra la probabilidad de transición de cada una de las clases en el t_1 (filas) a cualquiera de las demás clases a un t_2 (columnas), entendiendo que los valores de cada fila deben sumar uno y no ser negativos, ya que en la proyección de tipos de cobertura y usos del suelo el territorio no es creado ni destruido (Eastman, 2009; Howard *et al.*, 1995). Posteriormente, a partir del cálculo entre las matrices de probabilidades de transición se genera una matriz de probabilidades condicionales, la cual reporta el pronóstico de los cambios de cada clase en función de las probabilidades de transición (Briceño, 2003; Eastman, 2009). De esta manera se predijo cuánto territorio

podría esperarse que cambiara del tiempo 2 a una fecha a futuro determinada o tiempo 3, con base en proyecciones de las transiciones potenciales obtenidas en los sub-modelos considerados, así como de las matrices mencionadas anteriormente. Estas predicciones describen, por ejemplo, los posibles escenarios de cambio para los tiempos establecidos. Se obtuvieron dos tipos de predicciones en forma de imágenes: (1) imágenes duras que consisten de clasificaciones basadas en decisiones inequívocas, y (2) imágenes suaves que muestran el potencial de cambio. En la Figura 23 se observan las predicciones suaves para el año 2030 asociadas a los sub-modelos (a) “deforestación”, (b) “cons-sec”, y (c) “regenera”. Esta imagen muestra el potencial de cambio considerando las transiciones (mencionadas arriba) que conforman al sub-modelo. En tonos oscuros se observan aquellas zonas con bajo potencial de cambio, mientras que en tonos brillantes se observan las zonas con mayor potencial de cambio.

Bajo este mismo esquema se modelaron las transiciones potenciales entre las fechas 1993-94 y 2011-12, obteniéndose modelos de predicción tanto duros como suaves para los diferentes sub-modelos que se muestran a continuación. La figura 24 muestra las predicciones duras para los sub-modelos denominados a) “deforestación” y b) “cons-sec” y “sec-cons”, con una proyección al año 2030. Estas predicciones duras están basadas en decisiones inequívocas; es decir, el algoritmo asigna a cada pixel una decisión definitiva sobre la clase a la que pertenece cada pixel, considerando las transiciones potenciales obtenidas en el pre-modelado. Se optó por modelar conjuntamente las predicciones para los sub-modelos “cons-sec” y “sec-cons” para la evaluación del periodo 1993-94 – 2011-12. Finalmente, la Figura 25 muestra las predicciones duras y suaves que incluyen todos los sub-modelos considerados.

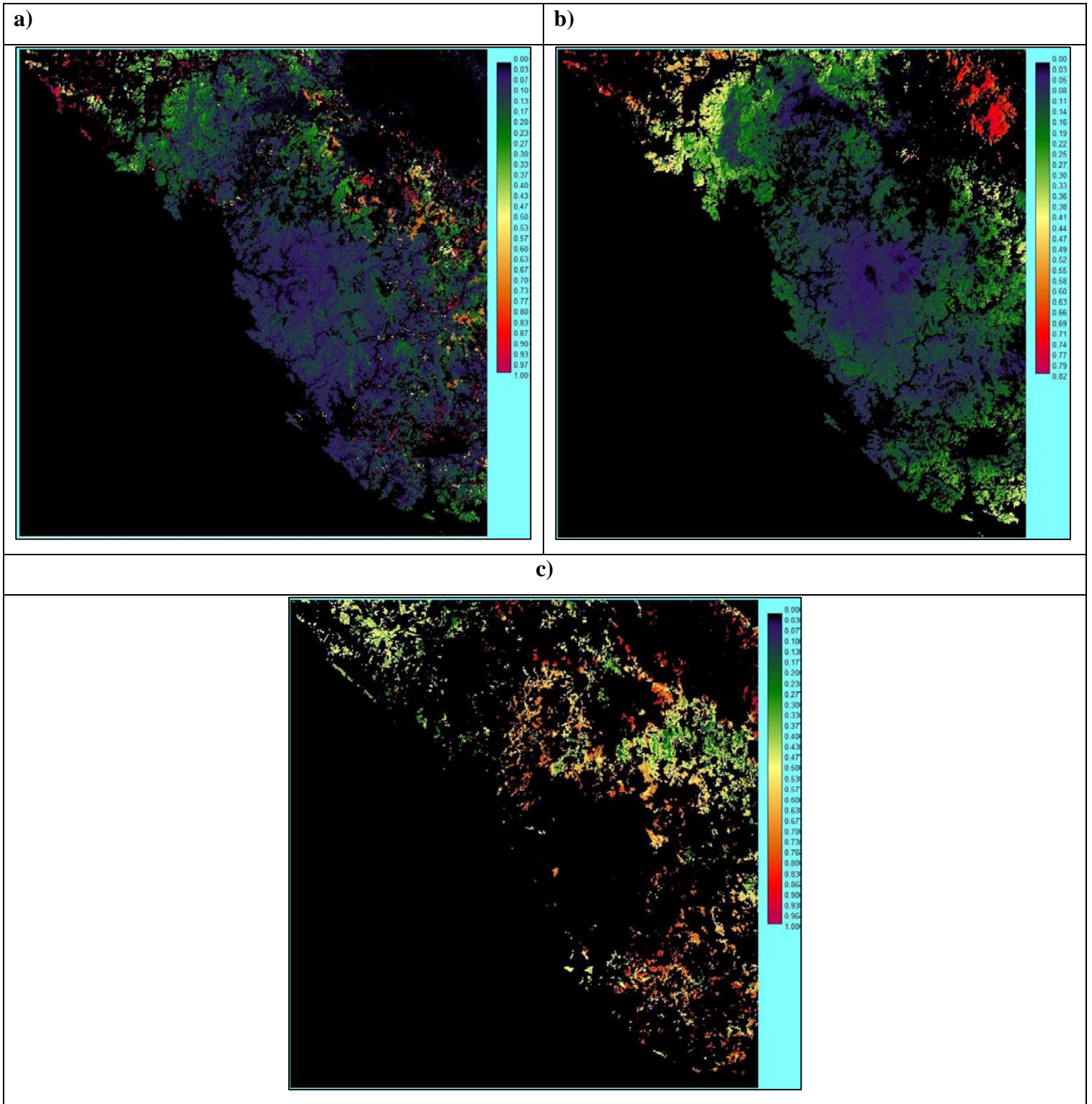


Figura 23. Modelos de predicción suave, correspondientes a los sub-modelos a) “deforestación”, b) “cons-sec” y c) “regenera”. Las escalas representan el potencial para que las transiciones ocurran.

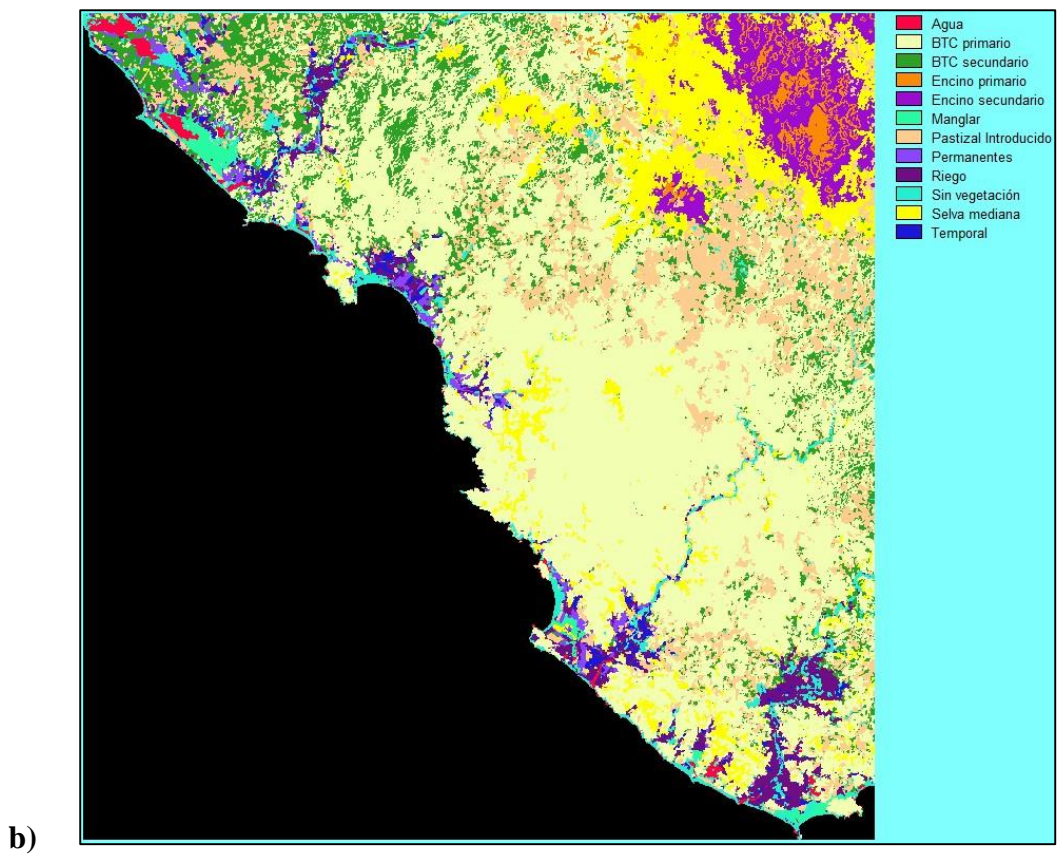
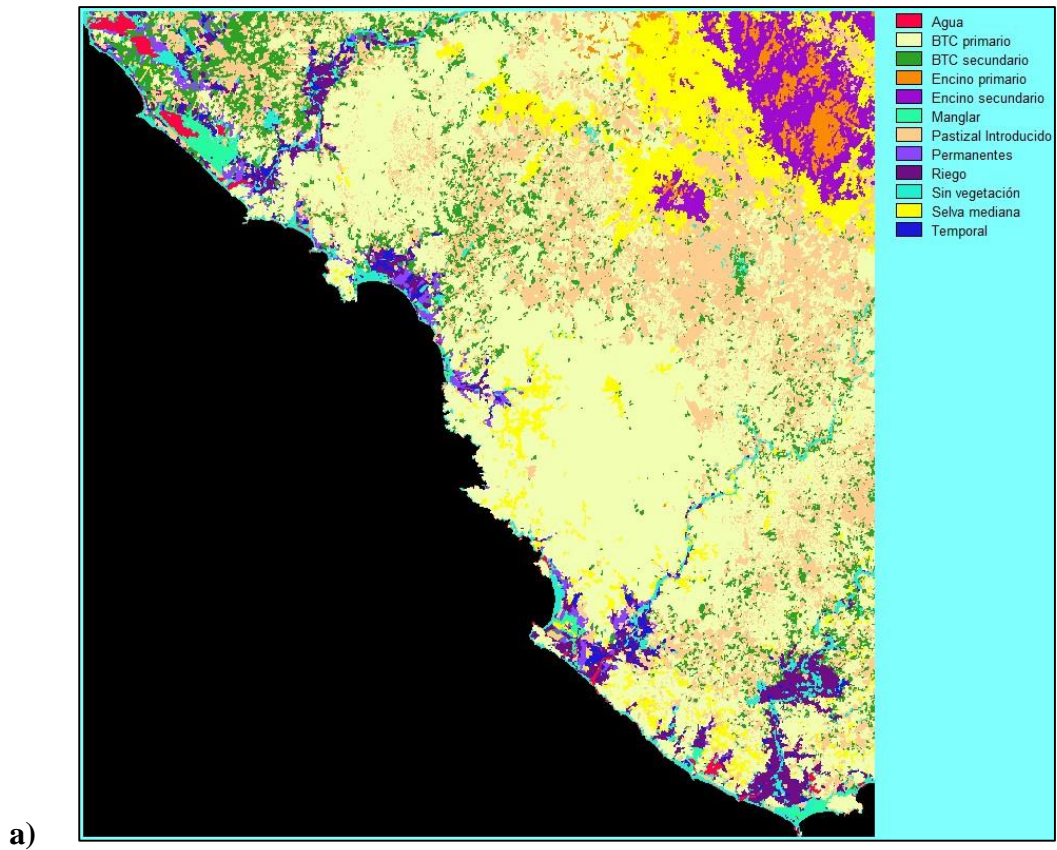


Figura 24. Predicciones duras para el año 2030 de los sub-modelos: a) “deforestación”; y b) “cons-sec” y “sec-cons”.

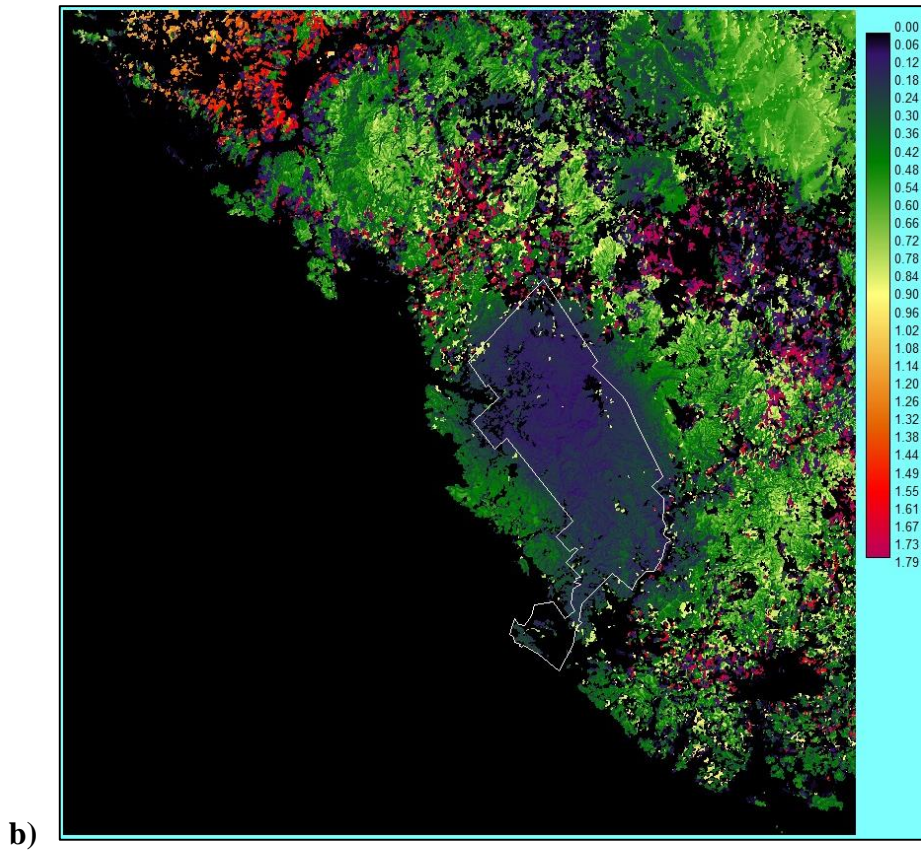
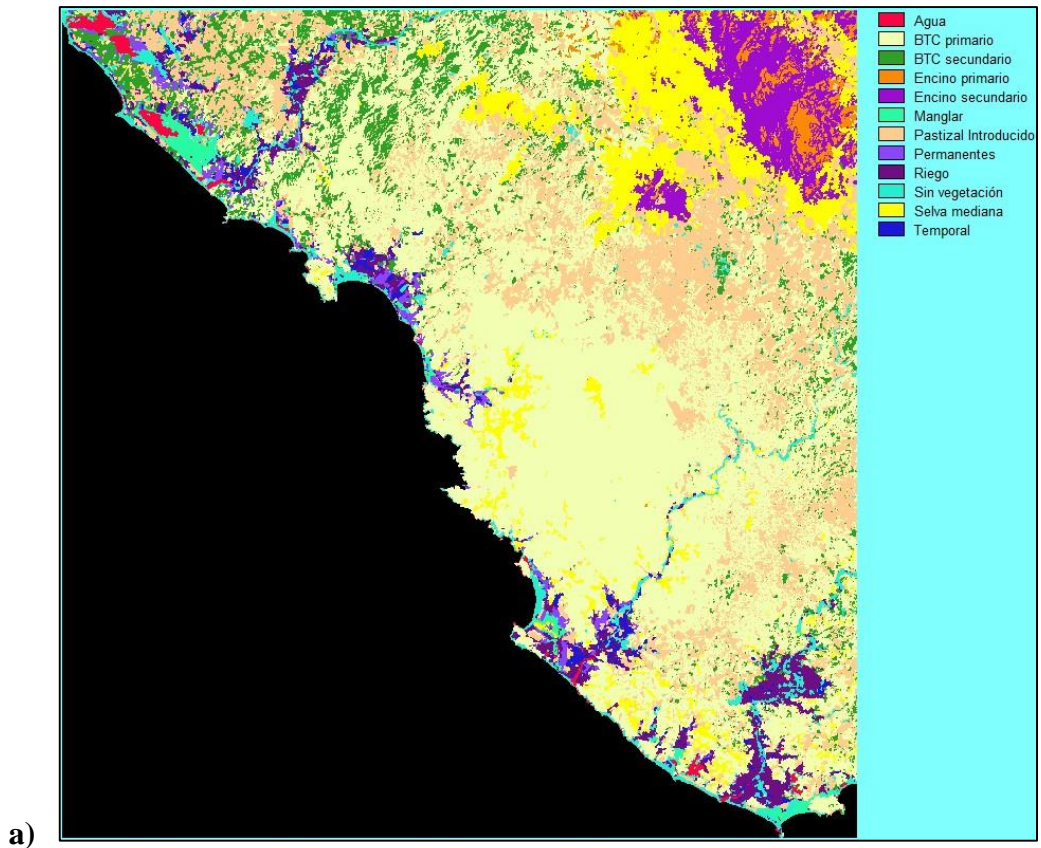


Figura 25. Escenarios de tendencias de cambio de diversos sub-modelos analizados: a) predicción dura que incluye los sub-modelos “deforestación”, “cons-sec”, “sec-cons”; b) predicción suave considerando los sub-modelos anteriores, con una sobreposición del polígono de la RBChC.

6.4. La vulnerabilidad de la RBChC y los cambios de usos del suelo

Debido a que los modelos predictivos suaves identifican los potenciales de cambio a nivel de píxeles individuales, su utilización resulta muy adecuada para analizar las áreas de la reserva de la biósfera Chamela-Cuixmala (RBChC) que por su ubicación resultan vulnerables a los cambios de uso del suelo. Con propósitos de visualización, la Figura 26 amplifica la Figura 25b, la cual consiste en la predicción suave de los sub-modelos “deforestación”, “cons-sec”, y “sec-cons”. En esta figura se puede observar claramente que la RBChC constituye el núcleo de los valores más bajos de potencial de cambio a futuro de TVyUS. En otras palabras, los límites de la RbChC coinciden con la delimitación del continuo más significativo de las coberturas boscosas naturales conservadas en la región, es decir las áreas con valores de potencial de cambio cercanos a cero (tonos violetas y azules).

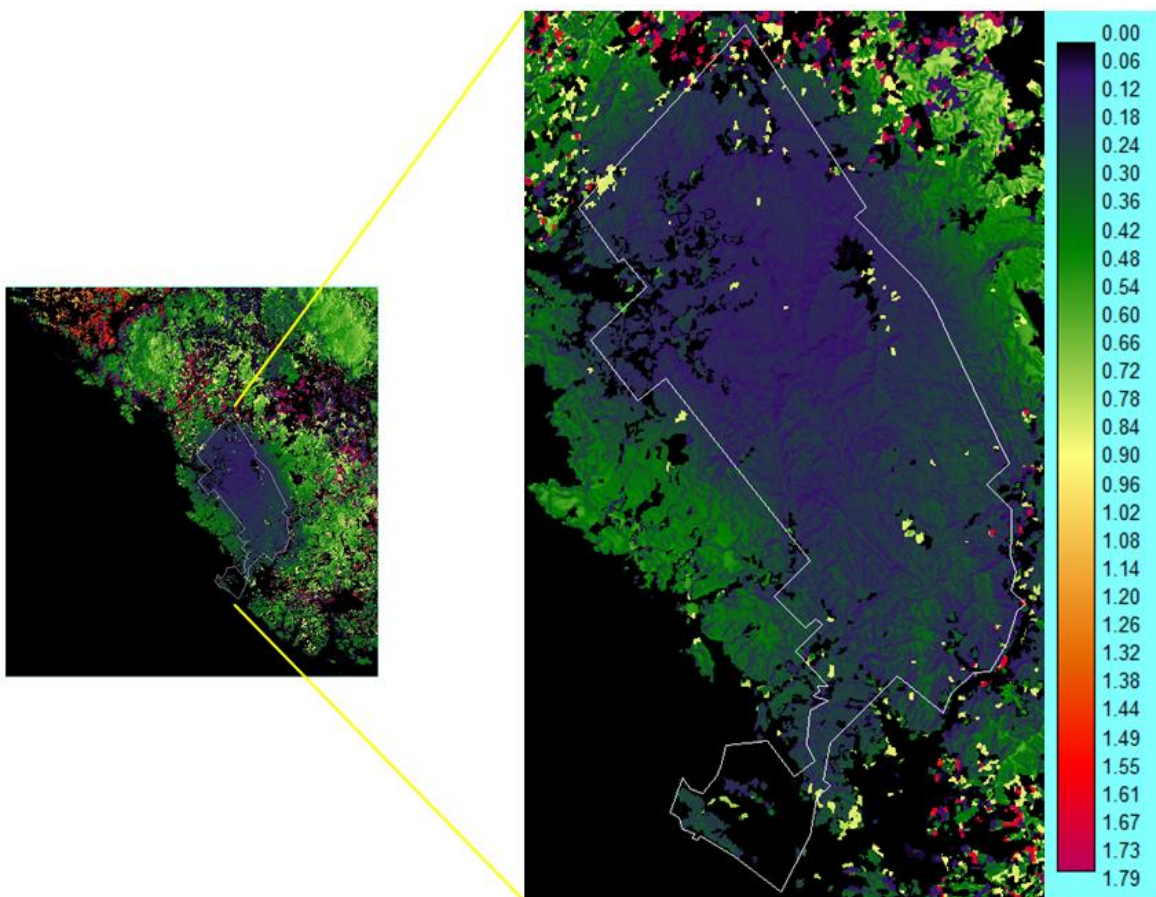


Figura 26. Predicciones suaves que incluye los sub-modelos “deforestación”, “cons-sec”, “sec-cons” con acercamiento a los límites de la RBChC.

En la Figura 26 puede apreciarse de manera muy clara que, a medida que se incrementa la distancia al polígono de la reserva, se hacen notar ciertas áreas que presentan una mayor vulnerabilidad a los cambios de cobertura y usos del suelo. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 27; en la que se observa cómo la porción noroeste de la región de estudio, al norte del río San Nicolás (Figura 27a) se presentan áreas en tonos rojos brillantes, lo que indica una alta vulnerabilidad a cambios de coberturas y usos del suelo.

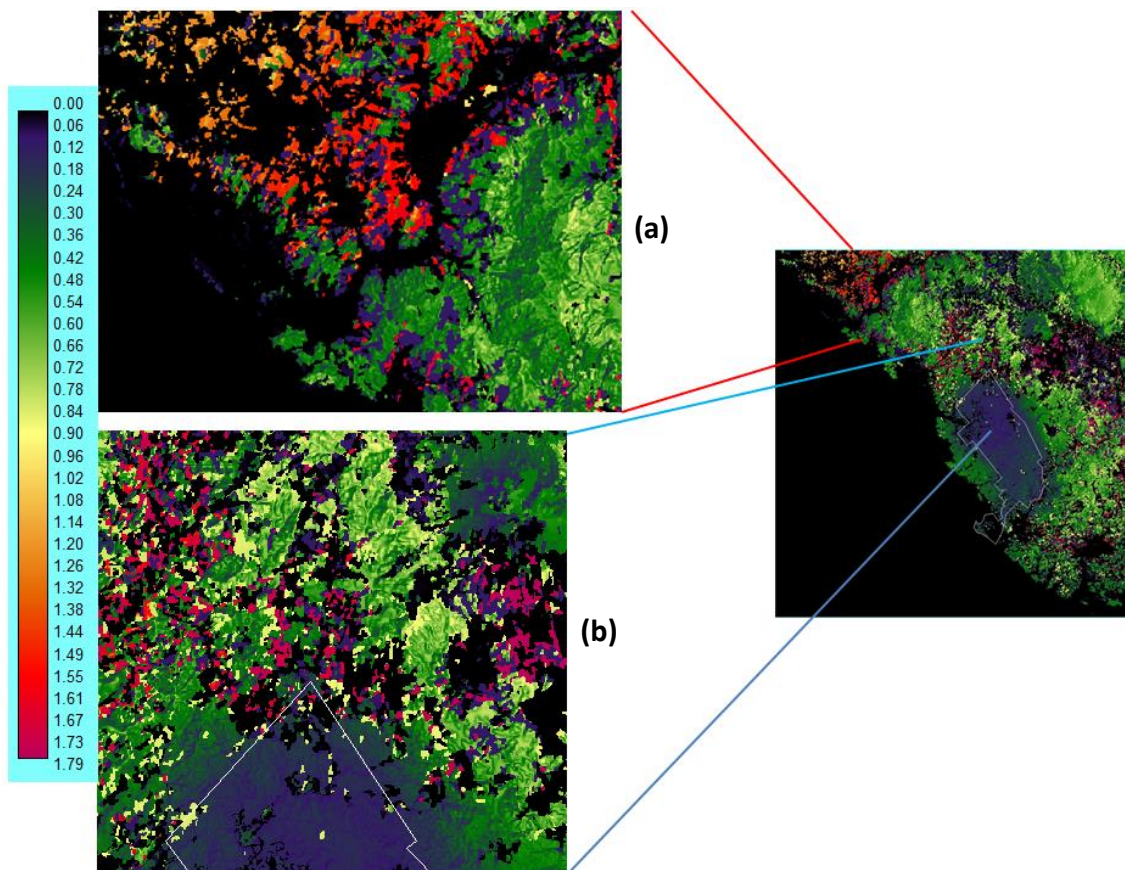


Figura 27. Predicciones suaves que incluye los sub-modelos “deforestación”, “cons-sec”, “sec-cons” con acercamiento a la porción noroeste del área de estudio (a) y al norte del límite de la RBChC (b).

Por otra parte, en la parte norte de la reserva se observan áreas que presentan en su mayoría una vulnerabilidad media a los cambios (tonos verdes brillantes y amarillos), así como ciertas áreas próximas a la reserva con una vulnerabilidad alta (tonos rojo brillante y magenta). Sin embargo, al observar conjuntamente la predicción dura (Figura 25a) y la suave (Figura 27b) estos cambios próximos a la reserva incluyen tanto transiciones potenciales de coberturas boscosas a coberturas antrópicas (BTC a Pastizal Introducido), así como coberturas antrópicas a coberturas boscosas (PTZ a BTC). Lo anterior indica una vulnerabilidad de cambios tanto para la conservación de coberturas naturales como para la conversión de éstas a coberturas de uso antrópico.

Continuando con el examen de las vulnerabilidades de cambios en las distintas áreas de la zona de estudio, la Figura 28a muestra que la porción noreste presenta vulnerabilidades bajas y medias a los cambios correspondientes a las coberturas de bosque de encino conservado y secundario. Un caso similar sucede con los cambios potenciales correspondientes a la Selva Mediana Subcaducifolia (SMSC), presentando vulnerabilidades medias y bajas principalmente. Por otra parte, en lo que respecta al Bosque Tropical caducifolio conservado (BTC 1°), se observan vulnerabilidades más altas de conversión de coberturas conservadas a secundarias, así como la conversión de estas a Pastizales Introducidos. Finalmente, en la Figura 28b se ilustra la vulnerabilidad de los TVyUS encontrados al sur del límite de la RBChC. En esta figura se puede observar que en las inmediaciones del Río Purificación se presentan en su mayoría vulnerabilidades medias a los cambios con algunas porciones presentando vulnerabilidades muy altas y muy bajas. Nuevamente, al tratarse de los sub-modelos “deforestación”, “cons-sec” y “sec-cons”, se observa la vulnerabilidad de la conversión de coberturas boscosas a coberturas de uso antrópico y viceversa. Sin embargo, destaca mencionar el impacto que la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala ejerce sobre la vulnerabilidad a los cambios en el territorio. No obstante que el valor obtenido del índice de Cramer sobre la variable “Distancia a la RBChC” fue menor al obtenido por otras variables (e.g., “MDE”, “Tipos de cobertura (probabilidad de evidencia)” y “Relieve (probabilidad de evidencia)”), al visualizar las imágenes suaves se hace evidente que esta variable juega un papel determinante para conducir la naturaleza de los cambios en la región de estudio.

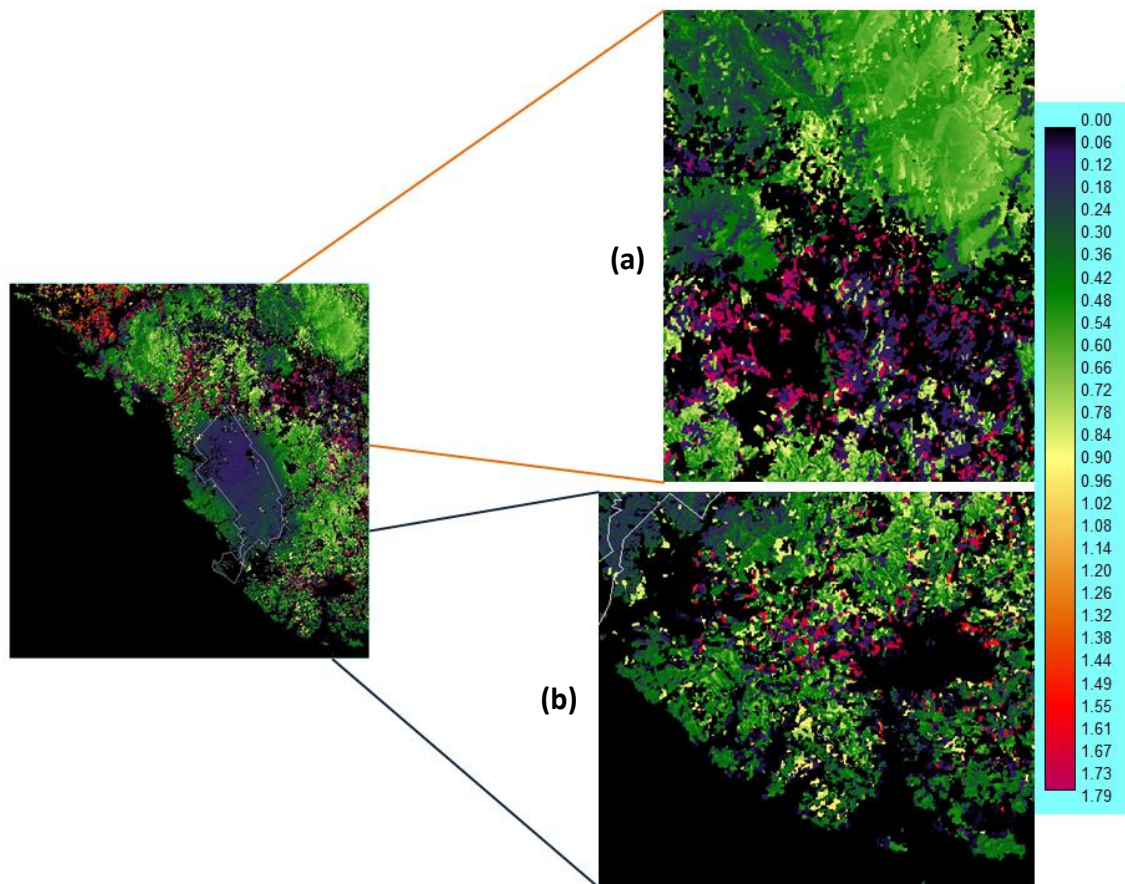


Figura 28. Predicciones suaves que incluye los sub-modelos “deforestación”, “cons-sec”, “sec-cons” con acercamiento a la porción noreste del área de estudio (a) y al sur del límite de la RBChC (b).

7. DISCUSIÓN

7.1 Modelos de clasificación

Los análisis de los cambios de cobertura y usos del suelo pueden realizarse a partir de la comparación de mapas elaborados mediante diversos procedimientos como técnicas de digitalización manual, de interpretación interdependiente, o mediante el uso de algoritmos de clasificación de imágenes obtenida mediante percepción remota (FAO, 1996; FAO, 2005; Singh, 1989). En lo que respecta a éstos últimos, las técnicas empleadas son altamente sensibles a factores diversos tales como las variaciones espectrales del terreno dadas por el ángulo de incidencia solar, la humedad del suelo o por las diferencias del estado de las coberturas vegetales debido a la estacionalidad y propiedades fenológicas de la región (Eastman, 2009; Mas *et al.*, 2004). La incidencia de factores como los mencionados, podría redundar en la generación de errores de clasificación asociados principalmente a la generación de dos o más respuestas espectrales para una misma cobertura.

En la región de estudio, es decir las áreas de influencia de la Reserva de la biósfera Chamela-Cuixmala (RBChC), se han llevado a cabo algunos trabajos en los que se han aplicado técnicas de percepción remota para evaluar las condiciones que guardan la cobertura del terreno y los usos del suelo así como sus cambios a lo largo del tiempo. Por ejemplo, Miranda (1997), a partir de la utilización de imágenes Landsat MSS, determinó la magnitud de la deforestación y fragmentación del Bosque Tropical Caducifolio en la costa de Jalisco y sus consecuencias en la estructura de las comunidades de mamíferos terrestres. Más recientemente, Sánchez-Azofeifa *et al.* (2008), evaluaron los procesos de cambio de cobertura forestal en las áreas de influencia de la RBChC, para lo cual analizaron imágenes ASTER colectadas únicamente durante la temporada seca. El presente trabajo se basa en el análisis de modelos de clasificaciones supervisadas obtenidos a partir de imágenes satelitales multi-temporales o “compuestas”. Es decir, se utilizaron las características multi-espectrales (visible e infrarrojo) de múltiples imágenes que correspondieron a diferentes periodos estacionales dentro de un año, con el objetivo de obtener modelos de mapas clasificados que identificaron los diferentes tipos de coberturas del terreno así como los usos del suelo. El enfoque multi-temporal, basado en la diferenciación espectral asociada a los cambios fenológicos de la vegetación y el manejo y comportamiento estacional de las prácticas agrícolas, parece ser un procedimiento de procesamiento y análisis de imágenes de satélite relativamente poco abordado en la literatura, no obstante sus posibilidades analíticas (Ortega-Huerta *et al.*, 2011). A continuación se identifican algunos aspectos considerados como relevantes en la aplicación de tal enfoque.

La utilización de un mayor número de bandas en la aplicación de los algoritmos de clasificación incrementaría las posibilidades de diferenciación espectral, aunque igualmente relevante resulta la incorporación de respuestas espectrales correspondientes a las diferentes condiciones fenológicas de la cubierta del terreno.

El planteamiento original del presente estudio contempló utilizar tres fechas por periodo (temporada seca, inicio de lluvias, fin de lluvias) para conformar la composición de imágenes que fueron sometidas al proceso de clasificación, tanto para el periodo 1993-94 como 2011-12. Sin embargo, para el periodo 2011-12 las imágenes disponibles presentaron inconsistencias de origen geométrico, particularmente para la fecha correspondiente a la temporada seca. Debido a esto, la imagen compuesta para el periodo

2011-12 contó con menor número de bandas utilizadas durante el proceso de clasificación supervisada. Al comparar los dos modelos de clasificaciones de TVyUS obtenidos para los periodos 1993-94 vs 2011-12, se hacen evidentes las diferencias existentes respecto los datos utilizados por los algoritmos para obtener las clasificaciones finales de cada imagen compuesta. Primero, se puede apreciar que la clasificación de la imagen compuesta SPOT para el periodo 2011-12, presenta una mayor resolución espacial, lo que hace posible detectar con mayor detalle la extensión de las diferentes coberturas e incluso la continuidad de elementos del paisaje pequeños, tales como los cauces de los ríos. Aun cuando la imagen compuesta para este periodo constó únicamente de dos fechas, fue posible diferenciar las condiciones fenológicas de una variedad de tipos de cobertura del terreno en la región, aunque exámenes detallados de algunos tipos de vegetación hacen pensar que la no utilización de una tercera imagen en cierto modo limitó una diferenciación más clara entre áreas de bosque tropical caducifolio y selva mediana subcaducifolia. Por último, aunque se observan diferencias en la delimitación de ciertas coberturas del terreno, entre los periodos 1993-94 y 2011-12, ambos modelos hacen evidentes los principales patrones en la extensión y ubicación de las distintas coberturas.

Otros enfoques, tales como el uso de imágenes hiper-espectrales pudieran probar ser enfoques más eficientes para caracterizar una región y derivar en modelos de mapas más precisos sobre la configuración de las distintas coberturas y usos del suelo. Sin embargo, la disponibilidad y costos de éstas, las hacen relativamente poco viables para ser aplicadas en proyectos como el presente estudio. Generalmente, las imágenes hiper-espectrales han sido utilizadas en proyectos de detección de elementos detallados del paisaje, tales como los minerales, además que los costos por la adquisición de estas imágenes son considerablemente altos (Papp y Cudahy, 2002).

7.2. Exactitud de clasificaciones TVyUS

Un punto fundamental en los análisis de cambio de cobertura y uso del suelo es la confiabilidad de los mapas generados mediante técnicas de percepción remota, la cual se calcula mediante la obtención de estadísticos que miden la exactitud temática adoptada en el sistema de clasificación (Berlanga *et al.* 2010; Mas *et al.*, 2003; Skirvin *et al.*, 2004). Con una confiabilidad alta en los mapas generados, es posible efectuar análisis de cambio postclasificadorio sin incurrir en la propagación multiplicativa de los errores de mapas sobrepuestos (Berlanga *et al.* 2010; Singh, 1989).

En este trabajo se aplicaron esquemas de evaluación de la exactitud de las clasificaciones obtenidas, con excepción de la cobertura utilizada como tiempo inicial, es decir el mapa de TVyUS del año 1970. Con la finalidad de obtener clasificaciones que permitieran la reconstrucción del escenario de TVyUS del tiempo inicial, se habían obtenido imágenes de satélite Landsat 1 MSS correspondientes a los años 1978 y 1980. Sin embargo, debido a las bajas resoluciones espacial y temporal de las imágenes disponibles, así como problemas de “bando”, se decidió únicamente utilizar los datos históricos proporcionados por el INEGI. Aunque no se llevó a cabo un análisis de exactitud cuantitativo, se realizaron corroboraciones visuales sobre la identidad de algunas clases con el apoyo de fotografías aéreas a color de muy alta resolución proporcionadas por el INEGI y que coincidentemente fueron las imágenes utilizadas para crear la cartografía referida.

Por otra parte, la confiabilidad obtenida para las clasificaciones supervisadas generadas en el presente estudio, corresponde a los estándares internacionales aceptados en la literatura. (Mas *et al.*, 2001; CONANP, 2011). Esta confiabilidad es resultado directo de la metodología adoptada para generar los mapas. Por ejemplo, Berlanga *et al.* (2010), reportan niveles de exactitud alrededor del 90% para mapas generados con imágenes Landsat, sin embargo de las nueve clases obtenidas mediante el clasificador de máxima probabilidad, dos clases fueron añadidas posteriormente a la clasificación mediante digitalización en pantalla de polígonos, lo cual reduce considerablemente los errores obtenidos.

La obtención de los niveles de exactitud de las clasificaciones propuestas en este estudio se vio influenciada por factores asociados no solamente a la resolución espectral de las imágenes, sino también metodológicos. Con respecto a éstos últimos, se considera que la utilización de las cartas de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 del INEGI, como medio auxiliar para obtener muestras representativas de los datos de referencia, de alguna manera confirió incertidumbre en los cálculos de estadísticos de exactitud. La información que contienen estas cartas (Series I a la V) presenta ciertas incongruencias debidas a errores generados durante el proceso de digitalización y corrección de la información vectorial, así como a las características del sistema de clasificación adoptado a lo largo de los años (Mas *et al.*, 2004). Aunque la información contenida en estas cartas es el resultado de un amplio trabajo de verificación en campo, apoyo de especialistas, y

derivaciones de cartas de alta resolución (1:50 000) y de la interpretación de fotografías aéreas (INEGI, 2012; Mas *et al.*, 2004; Pineda *et al.*, 2009; Velázquez *et al.*, 2002), su escala no corresponde a la resolución espacial de las clasificaciones propuestas en este estudio, sobre todo si consideramos que tal evaluación se hace pixel a pixel. Los datos históricos, como las cartas en mención, conllevan la incertidumbre de los errores de mapeo, tales como aquellos originados en el proceso de fotointerpretación (Mas, *et al.*, 2003; Congalton, 1991; Congalton y Green, 1993).

Sin embargo, la obtención de los datos de referencia para el análisis de exactitud de las clasificaciones generadas, también incluyó la utilización visual de las imágenes de satélite compuestas, a partir de las cuales se obtuvieron las clasificaciones; el proceso de generación aleatoria de los sitios de referencia estuvo caracterizado por mantener la independencia de la localización respecto a los sitios de entrenamiento o calibración. En otras palabras, solamente se utilizaron los sitios de referencia cuya identidad de tipo de cobertura del terreno y uso del suelo fuera corroborado tanto por las imágenes compuestas de satélite, como por los datos de referencia del INEGI correspondientes en tiempo.

En el presente estudio, los modelos de mapas de TVyUS obtenidos mediante el proceso de clasificación consistieron de un total de 12 clases, de las cuales todas fueron obtenidas mediante la aplicación del algoritmo de clasificación supervisada. Los valores de exactitud obtenidos (usuario y productor), fueron el resultado de haber realizado una limpieza escrupulosa y depuración de firmas espectrales.

7.3. Algoritmos de clasificación

La fase de clasificación es quizá el aspecto más importante en el procesamiento de imágenes, obteniendo clases distintivas asociadas a las firmas espectrales características del terreno, mediante el uso de reglas de decisión o algoritmos matemáticos de clasificación (Eastman, 2009; Kloer, 1994). De esta manera, el análisis independiente de cada pixel es comparado con cada una de las firmas generadas de los sitios de entrenamiento y se clasifica para obtener una imagen temática (Kloer, 1994).

En el presente estudio se probaron distintos algoritmos de clasificación. (e.g. paralelepípedo, distancia mínima a las medias, máxima probabilidad, análisis discriminante lineal y clasificación por segmentación). La finalidad fue de examinar el

desempeño de cada uno de estos algoritmos en la obtención de imágenes clasificadas, aunque solamente con propósitos de seleccionar el algoritmo que más respondiera a las necesidades de este estudio. De ninguna manera se trató de realizar un análisis riguroso del desempeño de cada algoritmo.

Tras la generación de firmas espectrales, limpieza estadística y posterior clasificación, comparaciones visuales permitieron identificar al algoritmo de clasificación máxima probabilidad como el de mejor desempeño; a diferencia de otros algoritmos como paralelepípedo o mínima distancia, máxima probabilidad no dejó píxeles sin clasificar en las imágenes compuestas. Mediante la utilización de las imágenes compuestas, estas inspecciones y comparaciones visuales permitieron hacer claras distinciones entre las distintas coberturas clasificadas. Algoritmos como el análisis discriminante lineal tuvieron un desempeño similar al observado por el algoritmo máxima probabilidad, aunque sobre-representaron ciertas coberturas del terreno. Finalmente, el clasificador por segmentación, demostró ser una herramienta útil para realizar generalizaciones de los modelos de mapas obtenidos mediante el algoritmo máxima probabilidad.

Otros estudios que analizan los cambios de uso del suelo y el impacto de la conversión de coberturas naturales a coberturas de uso antrópico (Aguirre y Salmerón, 2010; Berlanga *et al.*, 2010; Evangelista *et al.*, 2010; Velázquez *et al.*, 2002) aplican metodologías de clasificación supervisada similares a las desarrolladas en el presente trabajo, e inclusive se selecciona a máxima probabilidad como el algoritmo de clasificación predilecto debido principalmente a que cubre la mayoría de las deficiencias encontradas en otros algoritmos (como los mencionados en el párrafo anterior) y sobre todo porque de manera ortodoxa toma en cuenta como criterio de clasificación la variabilidad espectral de cada píxel que compone a la imagen (Eastman, 2009; Soofi, 2005). Sin embargo, las aplicaciones de redes neuronales artificiales se han considerado como herramientas alternativas de clasificación, cuyas bases matemáticas optimizan la generación de modelos (sean de clasificación de imágenes o de detección de cambio) al compararlas con otros métodos estadísticos tradicionales (Emil *et al.*, 2012). Particularmente el algoritmo multilayer perceptron está siendo utilizado con frecuencia como herramienta de predicción, función de aproximación (relación entre variables) y clasificación de imágenes (Gardner y Dorling, 1998).

No obstante que los modelos de clasificaciones propuestos por este estudio para los periodos 1993-94 y 2011-12 cumplen con los estándares de confiabilidad, y considerando que el uso de redes neuronales como herramientas óptimas de clasificación es cada vez más recurrente (Emil *et al.*, 2012; Pacifici *et al.*, 2007), se recomienda que las futuras investigaciones evalúen cuantitativamente el desempeño de diversos algoritmos de clasificación, tales como aquellos basados en redes neuronales artificiales.

7.4. Análisis de cambios

A través de la teledetección y cuantificación de las coberturas en un territorio, es posible determinar el resultado de procesos de transformación de los ecosistemas, consecuencia de la interacción entre las sociedades humanas con el medio biofísico (Berlanga *et al.*, 2009; Briassoulis, 2002; CONANP, 2011). Uno de los indicadores que mejor describen estos procesos es la tasa de cambio, cuya evaluación permite conocer el impacto de las actividades económicas en el territorio, además de identificar las áreas de atención prioritaria, así como sentar las bases para conocer las tendencias de deforestación, degradación, pérdida de biodiversidad, entre otros (CONANP, 2011; Lambin *et al.*, 2001; Riebsame *et al.*, 1994).

Para entender la dinámica de los procesos de cambio en el área de estudio, se calcularon las tasas de cambio entre los tres periodos considerados (1970 a 1993-94, 1970 a 2011-12, 1993-94 a 2011-12) y se observaron las tendencias de transformación entre TVyUS. Del mismo modo, la generación de matrices de transición describe dichas transformaciones al mostrar un resumen de las similitudes y diferencias del paisaje en los intervalos de tiempo analizados (Berlanga *et al.*, 2010; Mas *et al.*, 2001).

De manera general, se detectaron diversos cambios en la región de estudio. La clase dominante en los tres periodos considerados fue el Bosque Tropical Caducifolio conservado, la cual experimentó una desaceleración en la tasa de cambio a lo largo de 40 años. Si bien se registró una tasa anual de cambio de -1.17% para el periodo inicial 1970 – 1993-94, esta se revirtió a 0.22% para el segundo y periodo final de 1993-94 a 2011-12. En este último periodo, se mostraron incrementos de cobertura del BTC conservado a expensas del BTC secundario y los Pastizales. En efecto, el BTC secundario (la segunda clase dominante en la región) experimentó una tendencia opuesta a la clase dominante; es decir, mientras que en el periodo inicial se registró un incremento significativo a una

tasa anual de 5.48%, esta se revirtió a -2.31% para el periodo 1993-94 a 2011-12, reduciendo su extensión a expensas de los incrementos tanto del BTC conservado como de los pastizales introducidos. Éstos últimos, por ejemplo, mostraron un continuo incremento en las cuatro décadas que abarca el presente estudio. Sin embargo, la tasa de cambio anual se redujo considerablemente en todo el periodo del análisis, pasando de un valor inicial de 4.12%, a un valor final 0.91%. El trabajo realizado por Castillo *et al.* (2005) podría explicar las tendencias mencionadas. De acuerdo a sus encuestas, muchas de las tierras de los ejidatarios se encuentran sin uso o abandonadas, lo que genera parches de bosque secundario con diferentes niveles de perturbación, producto de la regeneración de coberturas, e incluso ciertas áreas de bosque conservado. Esta tendencia, asociada a la crisis económica del campo y emigración de campesinos hacia los Estados Unidos también ha sido documentada en otros estudios (García de Fuentes y Morales, 2000; López *et al.*, 2001; Mas *et al.*, 2004; Sánchez-Azofeifa, 2008).

Respecto al bosque de encino conservado, este presentó un incremento en su superficie a una tasa de 0.97% para el periodo inicial, la cual se revirtió a una tasa de -2.96% para el periodo final. Esta tendencia sugiere recientes y significativas transformaciones del bosque de encino conservado a secundario como resultado de desmontes localizados en las áreas templadas de la zona de estudio. Por otro lado, la Selva Mediana Subcaducifolia (una de las clases más importantes tanto por su biodiversidad como por su extensión la región) sólo presentó cambios significativos en su superficie durante el primer periodo de análisis, pasando de 18% de superficie total para el año 1970, hacia 9.06% y 9.87% para los años 1993-94 y 2011-12, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, esta drástica disminución se debe muy probablemente a las diferencias entre la tipificación original de la CETENAL para esta clase y las contenidas en los modelos de clasificación generados en este trabajo. No obstante lo anterior, las tasas de cambio asociadas a este tipo de cobertura también muestran una desaceleración durante el periodo del análisis.

Mas *et al.* (2004), en un estudio a escala nacional determinaron tasas de cambio para los bosques templados y tropicales con valores estimados que oscilan entre 0.51% y 1.31% para el periodo 1976 a 2000, lo que en cierta manera se asemeja a lo registrado en este estudio. Sin embargo, es importante mencionar que en ciertos casos se muestran tasas de cambio anual con valores muy elevados, como el caso de coberturas tipo agrícola, debido principalmente a variaciones en la tipificación de las clases de usos del suelo,

considerando diferencias en las prácticas agrícolas, por ejemplo asociadas al uso de riego. En este trabajo se contemplaron tres clases distintas para los usos del suelo agrícola (cultivos permanentes, de riego y temporales) en lugar de agrupar éstas clases en una sola (una cobertura general denominada “agricultura”, por ejemplo), logrando así determinar la tasa y dinámica de cambio entre las diferentes formas de manejo de los campos agrícolas. Es ampliamente aceptado que estas actividades agrícolas y sus asociados procesos dinámicos de conversión constituyen la principal causa de pérdida de cobertura forestal (Berlanga *et al.*, 2005; Berlanga *et al.*, 2009; Briassoulis, 2002; Evangelista *et al.*, 2010; FAO, 1996; Lambin *et al.*, 2001; Mas *et al.*, 2004). Aunque en este estudio se registró una dinámica de cambio elevada entre las diferentes clases asociadas a la agricultura (principalmente la agricultura de riego), los resultados muestran que la principal causa de pérdida de coberturas naturales se debió al incremento de los pastizales introducidos.

No obstante que la creación de modelos de deforestación que se ha basado en una generalización de los tipos de coberturas (Arehki, 2011; Aguirre y Salmerón, 2010; Berlanga *et al.*, 2009; CONANP, 2011; Mas *et al.*, 2004), el presente estudio hace distinción de subclases dentro de algunas categorías como agricultura y bosques o selvas, lo que representa amplias posibilidades para incidir en la dinámica de los cambios y transformaciones de la cubierta del terreno en la región. Sin embargo, el presente estudio tiene los alcances de ser un ejercicio de modelado preliminar, a partir del cual se infieren patrones y tendencias generales en los cambios de uso del suelo y los tipos de vegetación.

7.5. Modelado de los cambios de uso del suelo y variables explicativas

El uso de modelos espacialmente explícitos es cada vez más recurrente y adaptable a diferentes escalas de estudio. Por ejemplo, a pequeña escala (regiones geográficas amplias) es posible generar modelos espaciales de distribución del nicho ecológico en el estudio de especies de diversos taxones; mientras que a una escala mayor son utilizados para modelar la dinámica del paisaje o los cambios de TVyUS (Baltzer *et al.*, 1998; Scott *et al.*, 2002). Estos modelos proporcionan un entendimiento sobre la complejidad de los procesos propios de las comunidades ecológicas y del paisaje, y al mismo tiempo proporcionan información básica para el diseño de estrategias aplicables en la resolución de problemas sobre ecología de la conservación y manejo del territorio (Baltzer *et al.*, 1998; Turner *et al.*, 1995). Con la finalidad de ir más allá de diagnósticos cualitativos

sobre los cambios de usos del suelo obtenidos a partir de modelos no espaciales, se hace necesario establecer explícitamente las relaciones de espacio entre las variables causales potenciales y el objeto de estudio (Czárán y Bartha, 1992).

En este estudio, el modelado de cambios de uso del suelo consistió en la generación de sub-modelos que mostraron las transiciones ocurridas durante los periodos analizados y la posterior predicción de dichos cambios en función de las variables causales consideradas. En cuanto a éstas últimas, diversas investigaciones destacan el uso de variables de tipo socioeconómico como aquellas que explicarían en mayor medida los cambios de uso del suelo. Sin embargo, otras investigaciones se enfocan en el uso de variables del medio biofísico como la base de los modelos predictivos (Arekhi, 2011; Briassoulis, 2002; Castillo, 2005; Mas *et al.*, 2004; Meyer y Turner, 1992). No obstante la evidente importancia de la relación de ambos tipos de variables como fuerzas conductoras de los cambios de uso del suelo (Lambin *et al.*, 2001; Evangelista *et al.*, 2009), en el presente trabajo se aplicó un enfoque exploratorio, por lo que únicamente fueron consideradas las variables del medio biofísico como factores explicativos de los modelos de predicción. Las variables elevación, distancia a la RBChC, tipos de cobertura (probabilidad de evidencia), y relieve (probabilidad de evidencia) fueron las variables con los valores más altos del índice de Cramer, demostrando de manera cuantitativa el nivel de asociación entre éstas a la distribución espacial de los diferentes tipos de coberturas y usos del suelo en la región de estudio, lo que podría significar que dichas variables explican de manera favorable las tendencias del potencial de cambio generados en los modelos. Particularmente, la clase BTC conservado presentó un gran nivel de asociación con la distancia a la RBChC, obteniendo el valor más alto del índice de Cramer (0.2928) sobre las otras variables evaluadas. Por otra parte, la variable tipos de cobertura (probabilidad de evidencia) registró los valores más altos del índice de Cramer en las clases BTC secundario, encino conservado, pastizales introducidos, cultivos permanentes y SMSC; lo que indica que los mismos tipos de cobertura guían los diversos procesos de cambio (i.e., es muy probable que las nuevas áreas de desmonte para introducir pastizales, se localicen próximas a áreas con ese tipo de cobertura del terreno, es decir pastizales introducidos). En lo que respecta a la variable elevación, se puede apreciar que existe una gran asociación con el manglar (0.7378), ya que este tipo de cobertura se restringe a alturas muy cercanas al nivel del mar.

Dicho lo anterior, tanto la elevación como el relieve fueron las variables a las que se les asocia la mayoría de los cambios detectados en este trabajo, lo que indica la importancia de la topografía (como lo puede ser la dificultad de acceso al terreno) para guiar los procesos de cambio en la región de Chamela. De manera similar, Mas *et al.* (2004), encontraron a las variables elevación, pendiente, distancia a caminos, distancia a poblados, y proximidad a los bordes del bosque como las principales fuerzas conductoras de los cambios de uso del suelo en el sureste de México. En otro estudio realizado por Arekhi (2011), el autor considera a variables como distancia a poblados, elevación y pendiente, como las principales fuerzas conductoras de la deforestación en la provincia de Ilam, Irán. No obstante la significancia de tales resultados, se debe reconocer que tanto variables socioeconómicas, como variables dinámicas (variables que cambian en función del tiempo) podrían ser incorporadas a los modelos elaborados y complementar sustancialmente el análisis.

Por otra parte, existen otros enfoques desarrollados para entender los procesos de cambio de coberturas y usos del suelo. Por ejemplo, Pérez-Vega *et al.* (2012) realizaron un trabajo en el que comparan dos enfoques distintos para modelar los cambios de cobertura y usos del suelo y sus implicaciones en la pérdida de la biodiversidad en un bosque tropical caducifolio en el estado de Colima. En su trabajo concluyen que Land Change Modeler (LCM) y su red neuronal Multi-Layer Perceptron es un enfoque óptimo para generar un mapa general de potencial de cambio. Por otro lado, DINAMICA permite generar mejores mapas de potencial de cambio a nivel de transición. Sin embargo, y tomando en cuenta que cada modelo presenta ventajas propias, como por ejemplo la capacidad del Multi-Layer Perceptron para modelar relaciones complejas entre las variables, o la flexibilidad de DINAMICA para incorporar conocimiento experto al modelo en cuestión, el uso de múltiples enfoques podría resultar en evaluaciones más completas y con un sustento matemático más sólido (Mas *et al.*, 2011; Pérez-Vega *et al.*, 2012)

7.6. Procesos de cambio en la RBChC y sus áreas de influencia: causas y consecuencias

Entre las principales metas de este trabajo se encuentra la identificación de los factores que han guiado los procesos de cambio de los tipos de cobertura y usos del suelo en la RBChC y sus áreas de influencia a lo largo del periodo de análisis que abarca este estudio (cuatro décadas), con particular interés en las conversiones entre las clases dominantes en la región. De manera general, destaca la dinámica de cambio observada en las clases BTC

conservado y BTC secundario. Siendo el Bosque Tropical Caducifolio la clase dominante en la región, y la cubierta forestal tropical predominante en el país (Miranda, 1997; Trejo y Dirzo, 2000), por décadas se ha favorecido la transformación de este tipo de cobertura hacia la expansión de tierras de cultivo y desmontes para el pastoreo de ganado doméstico (Castillo *et al.*, 2005; De Ita, 1983). Los análisis de cambio realizados en este trabajo muestran una importante disminución del BTC conservado para el periodo inicial del análisis. Esta disminución se debe probablemente a que en la primera mitad del siglo 20, las políticas gubernamentales acordaron expandir la frontera agrícola en el país, notándose de manera particular en la costa de Jalisco mediante la transformación del paisaje y fragmentación del mismo (Cerutti y Lorenzana, 2008; Challenger, 1998; Miranda, 1997). Sin embargo, para el segundo periodo del análisis de cambio se registró una tendencia diferente a la observada para el periodo inicial. La implementación de políticas de conservación en la década de los noventas, una de las cuales contempla el decreto de la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala en diciembre de 1993 (Castillo *et al.*, 2005; Ceballos *et al.*, 1999), podría explicar en parte esta dinámica y la evidente desaceleración de las tasas de cambio en la cobertura conservada del Bosque Tropical Caducifolio.

En lo que respecta a la cobertura secundaria del Bosque Tropical Caducifolio, las tendencias reportadas en el presente estudio muestran un incremento significativo para el periodo inicial del estudio, y una posterior disminución para el periodo final. Esta disminución se debe principalmente a la conversión del BTC secundario hacia pastizales introducidos y en menor medida a la regeneración del BTC. La regeneración y reconversión de coberturas naturales no es un fenómeno ajeno a la dinámica de los sistemas forestales en México como lo reportan diversos estudios (Berlanga *et al.*, 2009; Evangelista *et al.*, 2010; López *et al.*, 2001; Mas *et al.*, 2004). El abandono de las tierras de cultivo debido a la crisis económica del campo trae como consecuencia la regeneración de coberturas forestales, generando fragmentos de coberturas secundarias con diferentes niveles de degradación e incluso otros fragmentos de bosques conservados (Castillo *et al.*, 2005; García de Fuentes y Morales, 2000; López *et al.*, 2001; Sánchez-Azofeifa *et al.*, 2008).

Para tener un entendimiento claro sobre las causas y las consecuencias de los procesos del cambio de uso del suelo, es necesario considerar dos aspectos fundamentales: aspectos

biofísicos y aspectos socioeconómicos (Briassoulis, 2002; Lambin *et al.*, 2001). Los patrones de uso suelo son guiados por una variedad de causas sociales, dando como resultado cambios en los tipos de vegetación y, como consecuencia, pérdida de la biodiversidad y otros procesos acumulativos que de manera general afectan el clima y la biósfera (Riebsame *et al.*; 1994; Meyer y Turner; 1992; Turner *et al.*, 1994). En un esfuerzo para entender la relación de los sistemas socio-ecológicos en la región de Chamela-Cuixmala, Castillo *et al.* (2005) realizaron un estudio que tiene como objetivo entender la interacción entre las poblaciones rurales con el Bosque Tropical Caducifolio. En este estudio se reconoce a los ejidatarios como una de los principales grupos involucrados en la toma de decisiones ya que, al ser propietarios de la mayor parte del territorio, determinan en gran medida la dinámica de cambio en la región. Las comunidades rurales tienen una percepción mixta sobre las políticas de conservación en la región de Chamela, que si bien se reconoce el valor de los servicios ecosistémicos que aporta el BTC a dichas comunidades tanto en el presente como el futuro, así como el esfuerzo de las instituciones científicas (Estación Biológica Chamela de la UNAM) para generar conocimiento, también se perciben como imposiciones que contradicen la historia de desarrollo de las comunidades rurales en la región de Chamela (Castillo *et al.*, 2005). Más allá de esta percepción, entre las principales razones por las que podría explicarse la desaceleración de las tasas de deforestación registradas para el periodo final (1993-94 – 2011-12), los pobladores consideran que se debe a los costos económicos y desgaste físico que conlleva el desmonte en zonas de difícil acceso (Castillo *et al.*, 2005).

7.7. La RBChC y áreas de vulnerabilidad a cambios de usos del suelo

Las características de los modelos y sub-modelos obtenidos mediante las predicciones suaves permitieron visualizar los diferentes niveles de vulnerabilidad de cualquier zona dentro del área de estudio, incluidas las zonas limítrofes o colindantes de la Reserva de la Biósfera Chamela Cuixmala. Por ejemplo, el sub-modelo de predicción suave llamado “deforestación”, consistió de datos continuos que representan los potenciales de cambio, en este caso de alguna clase de vegetación conservada a clases como pastizales introducidos, cultivos y suelo sin cubierta vegetal aparente. De esta manera las proyecciones de los cambios de usos del suelo en toda la zona de estudio, incluyeron aquellas zonas más propensas a procesos de transformación en la región de influencia de la RBChC. Por ejemplo, la predicción suave que incluyó los sub-modelos “deforestación”, “cons-sec”, y “sec-cons” (Figura 25b) hace claramente evidente que la

RBChC está cumpliendo con la función de conservación del paisaje a través de las protección de coberturas de vegetación conservadas en la región; se aprecia una clara distinción de los valores de potencial de cambio entre las fronteras del polígono de la reserva y las zonas mucho más propensas a cambios. Sánchez-Azofeifa *et al.* (2008) confirman lo anterior; su estudio que analiza los procesos de cambio en la región de Chamela, mostró que al reducirse la distancia hacia el polígono de RBChC se incrementa la continuidad del bosque tropical y se disminuye la fragmentación. Lamentablemente, no existen zonas de amortiguamiento entre las áreas con valores medios y altos de potencial de cambio y los límites de la reserva. Incluso se pueden apreciar algunas zonas propensas a cambios dentro del polígono de la reserva, que si bien no representan un área de gran tamaño con respecto a los cambios proyectados en otras zonas de la región de estudio, pueden ser puntos focales de atención.

Debido a la importancia ecológica del bosque tropical caducifolio, así como el papel de la reserva para conservar este ecosistema, los resultados obtenidos en este trabajo proyectan cierta vulnerabilidad a considerar sobre la integridad de las coberturas naturales en la región de Chamela. Al no presentar zonas claras de amortiguamiento entre el polígono de la reserva y las zonas muy vulnerables al cambio, se incrementan las condiciones de aislamiento de los ecosistemas que se encuentran en el interior de la reserva (BTC conservado y SMSC conservada, por ejemplo). Considerando el reducido tamaño de la RBChC (aprox. 130 km²) y los riesgos mencionados en sus proximidades, la información presentada en este estudio puede servir de base para identificar áreas de bosques conservados, localizadas fuera de los límites de la reserva, así como diseñar estrategias de conservación para promover la continuidad entre tales fragmentos conservados y la RBChC. Se debe tener presente que la RBChC es una de las pocas áreas destinada a la protección exclusiva del bosque tropical caducifolio en Mesoamérica (Miles *et al.*, 2006; Quesada y Stoner, 2004; Sánchez-Azofeifa, 2008).

En un estudio sobre el cambio de coberturas y uso del suelo a escala nacional, Mas *et al.* (2004) proyectan dos escenarios de cambio (e.g., uno conservador y otro sobrestimado). Ambos escenarios proyectan una disminución considerable de coberturas como matorral y bosques conservados, mientras que coberturas de origen antrópico muestran incrementos importantes. Ahora bien, este tipo de análisis de modelos de predicción parten de la base de condiciones naturales y de desarrollo inmutables, es decir, bajo el

supuesto de que existan las mismas condiciones a lo largo del periodo al cual se proyecta (Eastman, 2009; Mas *et al.*, 2004), por lo que los escenarios proyectados al año 2050 generados en el presente trabajo pueden ser considerados sobre estimaciones de los cambios potenciales que pudieran ocurrir. Por otra parte, la información generada y propuesta en el presente trabajo (e.g., modelos de mapas de TVyUS a partir de imágenes compuestas, diferentes modelos duros y suaves de predicción, etc.), sienta las bases para que futuras investigaciones realicen comparaciones particulares en la aplicación de otros modelos (e.g., algoritmos de clasificación como redes neuronales, uso de variables dinámicas y socioeconómicas, etc.), así como al contexto de cambio identificado en la región.

Como se mencionó anteriormente, las aplicaciones de modelos espacialmente explícitos aumentan las capacidades para modelar con precisión los procesos complejos de paisajes (Baltzer et al. 1998), tales como la RBChC y sus áreas de influencia. No obstante que el presente estudio aborda el modelado de los cambios en el paisaje a escala regional, su información generada puede integrarse con estudios realizados a diferentes escalas. Por ejemplo, Aguirre-Orozco (2012) modeló la distribución de diez especies endémicas en la región de Chamela utilizando diferentes tamaños de vecindario, encontrando que existe una clara preferencia de hábitat por el bosque tropical caducifolio. Por lo tanto, la aplicación de otros enfoques de modelado, tal como las predicciones de nicho ecológico y generación de modelos de distribución de especies, pudieran relacionarse con los modelos de cambios de usos del suelo, con la finalidad de complementar el modelado tanto de sistemas biológicos (especies) como ecológicos (ecosistemas y paisajes) (Arehki, 2011; Baltzer *et al.*, 1998; Sánchez-Azofeifa *et al.*, 2008).

CONCLUSIONES

- A partir de las evaluaciones que se hicieron sobre los diversos cambios de coberturas y usos del suelo en la región de Chamela, acontecidos a partir de principios de los 70s, se identifica que el Bosque Tropical Caducifolio, la formación vegetal dominante, ocupa entre el 60% y 64% del territorio durante el periodo de análisis. Sin embargo, aunque los cambios experimentados en el periodo 1970 a la fecha son por demás drásticos (con una tasa anual de cambio de -1.17%), las evaluaciones de los cambios correspondientes a un periodo más

reciente (principios de 1990s a 2012) revelan una desaceleración de las tasas de cambio de las principales cubiertas forestales (0.2%).

- Considerando las tendencias de cambios más recientes, los sub-modelos generados en este trabajo indican diversas proyecciones de cambio para la región de Chamela. Por ejemplo, el submodelo deforestación demostró un bajo potencial de cambio para las principales cubiertas forestales en la mayor parte del territorio. Por otra parte, el submodelo “cons-sec” considera un bajo potencial de cambio en las inmediaciones de la reserva; sin embargo, niveles medios y altos de potencial de cambio se encontraron en las porciones noroeste y sureste de la región, en las inmediaciones de los ríos San Nicolás y Purificación, respectivamente.
- De las variables consideradas para modelar los cambios de coberturas y usos del suelo, aquellas que presentaron una mayor asociación a la distribución espacial de las distintas clases fueron aquellas relacionadas con la topografía de la región, tales como elevación y relieve. De manera similar, las variables tipos de cobertura y distancia a la RBChC mostraron un gran nivel de asociación a la distribución de las clases. Sin embargo, se recomienda dar continuidad al estudio de los cambios de coberturas y usos del suelo considerando la inclusión de variables de tipo socioeconómico para entender de una manera más completa los procesos de cambio asociados a la región de Chamela.
- Los modelos generados lograron identificar aquellas áreas con alto nivel de vulnerabilidad a los cambios en la región de Chamela. Particularmente se destaca la ausencia de zonas de amortiguamiento entre la vegetación conservada dentro de la reserva y las zonas fragmentadas en los límites de la región de estudio. En lo que respecta a la vulnerabilidad de la reserva, las áreas más vulnerables se ubicaron en la parte norte y sureste.

BIBLIOGRAFÍA

Agarwal, C., L. Green, M. Grove, T. Evans y C. Schweik. 2000. A review and assessment of land-use change models dynamics of space, time and human choice. Center for the Study of Institutions Population and Environmental Change. Indiana University. 81 p.

Aguirre-Orozco, M.Y. 2012. Modelado de la distribución actual de especies endémicas en la región de Chamela; preferencia de hábitats e integración de escalas. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México. 106 p.

Aguirre, R. y O. Salmerón. 2010. Detección de cambios de uso del suelo y vegetación. En *Atlas regional de impactos derivados de las actividades petroleras en Coatzacoalcos, Veracruz*. SEMARNAT. 41-43.

Arehki, S. 2011. Modeling spatial pattern of deforestation using GIS and logistic regression: A case study of northern Ilam forests, Ilam Province, Iran. *African journal of Biotechnology* 10:16236-16249.

Arizmendi, M. C. y L. Márquez-Valdelamar. 2000. Áreas importantes para la conservación de las aves en México. CIPAMEX. 440 p.

Aubréville, A. 1938. La forêt coloniale: Les forêts de l'Afrique occidentale française. *Ann. Acad. Sci. Coloniale* 9:1-245.

Ball, G. H., y Hall, D. J., 1965. A Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification. Stanford Research Institute. Menlo Park, California, USA.

Baltzer, H., P. W. Braun y W. Köhler. 1998. Cellular autómatas models for vegetation dynamics. *Ecological Modeling* 107:113-125.

Berlanga-Robles, C. A., R. R. García-Campos, J. López-Blanco y A. Ruiz Luna. 2010. Patrones de cambio de coberturas y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit

(1973-2000). Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM 72:7-22.

Bocco, G., M. Mendoza y O. R. Masera. 2001. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM 44:18-38.

Briassoulis, H. 2002. Analysis of Land use Change: a theoretical and modeling approaches. En *The Web Book of Regional Science* (ed. Loveridge, S.). West Virginia University, Morgantown.

Briceño, F. 2003. Cambios de cobertura de la tierra en el valle del Río Momboy, Estado Trujillo. *Geoenseñanza* 8:91-100.

Bullock, S. 1986. Climate of Chamela, Jalisco, and trends in the south coastal region on México. *Arch. Met. Geaph. Biocl., Ser B* 36:297-316.

Castillo, A., M.A. Magaña, A. Pujadas, L. Martínez & C. Godínez. 2005. Understanding rural people interaction with ecosystems: a case study in a tropical dry forest of Mexico. *Ecosystems* 8:630-643

Ceballos, G. y A. García. 1995. Conserving Neotropical biodiversity: the role of dry forests in Western Mexico. *Conservation Biology* 9:1349-1353.

Ceballos, G. y A. Miranda. 1986. Los mamíferos de Chamela, Jalisco. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Ceballos, G., A. Szekely, A. García, P. Rodríguez y F. Noguera. 1999. Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera Cgamela-Cuixmala. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP, México, D.F.

Cerutti, M. y G. Lorenzana. 2008. Irrigación, expansión de la frontera agrícola y empresariado en el Yaqui (1925-1965). *América Latina en la Historia Económica* 31:7-36.

Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. CONABIO, UNAM. México, D.F.

Cincotta, R. P., J. Winsnewski y R. Engelman. 2000. Human population in the biodiversity hotspots. *Nature* 404:990-991.

Clark, D. 1996. Abolishing virginity. *Trop. Ecol.* 12:735-739.

CONANP. 2011. Tasa de cambio de uso del suelo en el Parque Nacional Pico de Orizaba, Veracruz, México en el periodo 2003 – 2011. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 47p.

Congalton, R. 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment* 37:35-46.

Congalton, R. y K. Green. 1993. A practical look at the sources of confusion in error matrix generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 59:641-644.

Czárán, T. y S. Bartha. 1992. Spatio-temporal Dynamic Models of Plant Populations and Communities. *TREE* 7: 38-42.

D'Addabbo, A., G. Satalino, G. Pasquariello y P. Blonda. 2004. Three different unsupervised methods for change detection: An application. *Proc. Internat. Geosci. Remote Sens. Symposium*. Pp. 1980–1983.

De Ita, M. C. 1983. Patrones de Producción agrícola en un ecosistema tropical estacional en la costa de Jalisco. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. México, D. F.

Durán E., P. Balvanera, E. Lott, G. Segara, A. Pérez-Jiménez, A. Islas y M. Franco. 2002. En *Historia natural de Chamela*. (eds. F. A. Noguera, J. H. Vega Rivera, A. N. García-Aldrete y M. Quesada Avendaño) pp. 443-472. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.

Eastman, R. 2009. IDRISI Taiga Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs, Clark University. Worcester Massachusetts, USA.

Ehrlich, P. y J. Holdren. 1974. The impact of population growth. *Science* 1971:1212-1217.

Eliason, S. A. y E. B. Allen. 1997. Exotic grass competition in suppressing native shrubland re-establishment. *Restoration Ecology* 5:245-255.

Emil, N. V., M. Neghina y M. Datcu. 2012. A neural network approach for land-cover change detection in multi-temporal multispectral remote-sensing imagery. *Recent Advances in Signal Processing, Computational Geometry and Systems Theory*. Polytechnic University of Bucharest, Rumania. 6p.

Evangelista, O. V., J. López, J. Caballero y M. A. Martínez. 2010. Patrones espaciales de cambio de cobertura y uso del suelo en el área cafetalera de la Sierra Norte de Puebla. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 72:23-38.

ERDAS. 2010. ERDAS Field Guide. ERDAS Inc. Norcross, Georgia, USA.

FAO, 1996. Global Forest Resources Assessment 1990. Survey of Tropical Forest Cover and Study of Change Processes. Forestry Paper 130. FAO. Roma.

FAO. 2005. Global Forest Resources Assessment 2005. FAO. Roma.

Foley, J. A. 2005. Global Consequences of Land Uses. *Science* 309:570-574.

García de Fuentes, A. y J. Morales. 2000. Dinámica regional de Yucatán 1980-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 42:157-172.

Gardner, M. W. y S. R. Dorling. 1998. Artificial Neural Networks (The Multilayer Perceptron). A review of the applications in the atmospheric sciences. *Atmospheric Environment* 32:2627-2636.

Gueguen, L., C. Shiyong, G. Schwarz, M. Datcu. 2010. Multitemporal analysis of multisensor data: Information theoretical approaches. *Proc. Internat. Geosc. Remote Sens. Symposium*. pp. 2559–2562.

Hartshorn, G. S. 1988. Tropical and subtropical vegetation of Meso-America. En *North American terrestrial vegetation*, (eds. M. G. Barbour y W. D. Billings) pp. 365–90. New York: Cambridge University Press.

Hernández, X. E., L. M. Arias y L. P. Novelo. 1990. El sistema agrícola de roza-tumba-quema en Yucatán y su capacidad de sostenimiento. En *Agricultura Indígena: pasado y presente* (ed. T. R. Rabiela) pp. 343-357. Ediciones de la Casa Chata No. 27. México.

Hord, R. M. 1982. Digital image processing of remotely sensed data. Academic Press. New York, USA.

Howard, D. M., P. J. Howard y D. C. Howard. 1995. A Markov model projection of soil organic carbon stores following land use changes. *Journal of Environmental Management* 45:287-302.

INECC. 2011. Unidades morfométricas del relieve mexicano. Carta Manzanillo, E13-2-5. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Documento en internet: <http://www2.inecc.gob.mx/emapas/cartas.html>

INEGI. 1981. Síntesis Geográfica del Estado de Jalisco. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, 306 p.

INEGI, 2012. Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000 : Serie IV. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, 132p.

Jensen, J. R. 1996. Introductory digital image processing: A remote sensing perspective 2da edición. Prentice-Hall, New Jersey, USA.

Janzen, H. D. 1988. The tropical dry forests. The most endangered major tropical ecosystem. En *Biodiversity* (ed. E. O. Wilson) pp. 130-137. National Academy of Sciences/Smithsonian Institution. Washington, D.C.

Kasperson, J. X., R. E. Kasperson y B. L. Turner II. 1995. Regions at Risk: Comparisons of Threatened Environments. United Nations Univ. Press, Tokyo.

Kloer, B. R. 1994. Hybrid Parametric/Non-Parametric Image Classification. ACSM-ASPRS Annual Convention, Reno, Nevada.

Lambin, E. F., B. L. Turner, J. G. Helmut. 2001. The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*: 11:261-269.

Lambin, E. F., N. Baulies, G. Bockstael, T. Fisher, R. Krug, E. F. Lemmans, R. R. Moran, Y. Rindfuss, D. Sato, B. L. Skole, Turner II y C. Vogel. 1999. Land use and land cover change implementation strategy. IGBP report 48, IHDP report 10. Estocolmo, Suecia.

Levin, D., Y., Peres y E. Wilmer. 2005. Markov Chains and Mixing Times. University of Oregon, USA.

Longley, P. A. 2002. Geography: will development in urban remote sensing using GIS lead to a better urban geography? *Progress in Human Geography* 26:231-239.

López, E., G. Bocco, M. Mendoza y E. Duhau. 2001. Predicting land-cover and land-use change in urban fringe. A case in Morelia City, México. *Landscape Urban Plan.* 55:271-285.

Lott, E. J. 1993. Annotated checklist of the vascular flora of the Chamela Bay Region. *Occasional Papers of the California Academy of Sciences.* 148:1-60.

Maass, J.M. 1995. Conversion of tropical dry forest to pasture and agriculture. En *Seasonally dry tropical forests* (eds. S. Bullock, H. Mooney, y E. Medina) pp. 337-360. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Mangel, M., L. M. Talbot y G. K. Meffe.. 1996. Principles of conservation of wild living resources. *Ecological Applications* 6: 338:362.

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 México. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5:249-261.

Mas, J. F., H. Puig, J. L. Palacio y A. S. López. 2004. Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. *Environ. Model. Software* 19:461-471.

Mas, J. F., J. R. Díaz-Gallegos y A. Pérez-Vega. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 51:53-72.

Mas, J. F., J. L. Palacio, A. Velázquez y G. Bocco. 2001. Evaluación de la confiabilidad temática de bases de datos cartográficas. 1er Congreso Nacional de Geomática, Guanajuato. Instituto de Geografía, UNAM.

Mas, J. F., M. Kolb, T. Houet, M. Paegelow y M. T. Camacho-Olmedo. 2011. Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Brasil*.

Masera, O. R. 1996. Deforestación y degradación forestal en México. Documentos de trabajo No. 19, GIRA A. C., Pátzcuaro, Michoacán. México.

Masera, O., M. Ordoñez y R. Dirzo. 1992. Carbon emissions from deforestation in México: current situation and long-term scenarios. *Global Environmental Change*.

Masera, O. R., M. J. Ordoñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situations and long term scenarios, *Climatic Change*, pp. 265-295.

Meyer, F. 2012. The watershed concept and its use in segmentation: a brief history. Centre de Morphologie Mathématique. Département Maths et Systèmes, Mines-Paris Tech, 11 pp.

Meyer, W. B. y B. L Turner. 1992. Human population growth and global land-use/cover change. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 23:39-61.

Meyer, W. B y B. L Turner II. 1996. Land use-land-cover change: challenges for geographers. *Geojournal*. 39:237-240.

Miles, L., A.C. Newton, R.S. DeFries, C. Ravilious, I. May, S. Blyth, V. Kapos, y J. Gordon. 2006. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography* 33:491-505.

Miranda, A. R. 1997. Deforestación y fragmentación del hábitat: consecuencias ecológicas sobre la fauna de mamíferos de la selva tropical estacional. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ecología. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. B033. México, D.F.

Miranda, F., y Xolocotzi, E. H. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Colegio de Postgraduados, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 176 pp.

Mooney, H. A., Bullock, S. H. y Medina, E. 1995. Introduction. En *Seasonally dry tropical forests* (eds. S. H. Bullock, H. A. Mooney & E. Medina) pp. 1-8. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Noble, I. R. y R. Dirzo. 1997. Forests as human dominated ecosystem. *Science* 277:522-525.

Ortega-Huerta, M. A., Komar, O., Price, K. P., & Ventura, H. J. 2012. Mapping coffee plantations with Landsat imagery: an example from El Salvador. *International journal of remote sensing*, 33:220-242.

Pacifici, F., F. del Frate, C. Solimini y W. Emery. 2007. An inovative neural-net method to detect temporal changes in high resolution optical satellite imagery. *Trans. Geosci. Remote Sens.* 9:2940-2952.

Paola, J. D. y R.A. Schowengerdt. 1995. A detailed comparison of backpropagation neural network and maximum-likelihood classifiers for urban land use classification. *Geosci. Remote Sens.* 4:981-996.

Papp, É. y T. Cudahy. 2002. Hyperspectral Remote Sensing. En *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration* (ed. É. Papp) pp. 13-21. CRCLEME. Canberra, Australia.

Peña, S., y C. M. Fuentes. 2007. Land use changes in Ciudad Juárez, Chihuahua: A systems dynamic model. Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, México. pp. 65-89.

Pérez-Vega, A., J. F. Mas y A. Ligmann-Zielinska. 2012. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modeling & Software* 29:11-23.

Pineda, N., S. J. Bosque, D. M. Gómez y R. W. Plata. 2009. Análisis de cambio de uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 69:33-52.

Quesada, M. y K. E. Stoner. 2004. Threats to the conservation of tropical dry forests in Costa Rica. En *Biodiversity Conservation in Costa Rica: Learning the Lessons in a Seasonal Dry Forests* (eds. G. W. Frankie, A. Mata y S. B. Vinson) pp. 266-280. University of California Press, Berkeley, California.

Riebsame, W. E., W. B. Meyer, B. L. y Turner II, 1994. Modeling land use and cover as part of global environmental change. *Climatic Change*: 28:45-64.

Rzedowski, J. y G. Calderón. 1987. El bosque tropical caducifolio de la región mexicana del bajío. *Trace* 12.

Sánchez-Azofeifa, G. A. 2005 Research priorities for Neotropical Dry Forests. *Biotropica* 37:477-485.

Sánchez-Azofeifa, G. A., M. Quesada, P. Cuevas-Reyes, A. Castillo, G. Sánchez-Montoya. 2008. Land cover and conservation in the área of influence of the Chamela-Cuixmala Biosphere Reserve, México. *Forest Ecology Management* 258:907-912.

Scott, J. M., P. J. Heglund, y M. L. Morrison. 2002. Predicting species occurrences: issues of accuracy and scale. Island, Washington, D.C.

SEMARNAT, 2005. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México - Compendio de Estadísticas Ambientales. 2005. Capítulo 2: Vegetación y Uso del Suelo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Documento en internet: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/02_vegetacion/cap2_2.html#inicio

Singh, A. 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data, *Int. J. Remote Sensing* 6:989-1003.

Skirvin, S. M., W. G. Kepner, S. E. Marsh, S. E. Drake, J. K. Maingi, C. M. Edmons, C. J. Watts y D. R. Williams. 2004. Assessing the accuracy of satellite derived land-cover classification using historical aerial photography, digital orthophoto quadrangles and airborne video data. En *Remote Sensing and GIS Accuracy Assessment* (eds. R. S. Lunetta y J. G. Lyon) pp. 115-131. CRC Press, Boca Ranton.

Soofi, K. 2005. Satellite Remote Sensing Lecture. ConocoPhillips. Houston, Texas. USA.

Turner, B. L. y W. B. Meyer. 1994. Global land use and land cover change: An overview. En: *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective* (eds. W. B. Meyer y B. L. Turner II) pp. 3-10. Cambridge: Cambridge University Press.

Turner, B. L., W. B. Meyer y D. L. Skole. 1994. Global land use/land cover change: towards an integrated study. *Ambio* 23:91-95.

Tou, J. T. y R. C. González. 1974. *Pattern Recognition Principles*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.

Trejo, I. y Dirzo, R. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in México. *Biol. Conserv.* 94:33-42.

Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco y J. M. Melillo. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277:494-499.

Whittaker, R. H. 1972. Recent evolution of ecological concepts in relation to the eastern forests of North America. En *History of American ecology* (ed. Frank Egerton). New York, NY: Arno Press.

Wilkie, D.S., y Finn, J.T. 1996. *Remote Sensing Imagery for Natural Resources Monitoring*. Columbia University Press, New York. p. 295.

Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Escurra y J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica* 62:21-37.

Veldkamp, A. y L. O. Fresco. 1996. CLUE: A Conceptual Model to Study the Conversion of Land Use and Its Effects. *Ecological Modelling* 85:253-270.

Xiuhong W., D. Zheng y Y. Shen. 2006. Land use change and its driving forces on the Tibetan Plateau during 1990-2000. *Catena* 72:56-66.

Yetman, D. y A. Búrquez. 1994. Buffelgrass Sonoran desert nightmare. The Arizonan Riparian Council Newsletter 7:7-10.

Zubair, A. O. 2006. Change detection in land use and land cover using remote sensing data and GIS (A case study of Ilorin and its environs in Kwara State). University of Ibadan. Nigeria. p. 54.