



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**CAMBIOS DEL PAISAJE EN LA
REGIÓN COSTA MAYA, 1993-2010**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA
SIMBANGALA SIMBANGALA MORGAN

DIRECTORA
DRA. BONNIE LUCÍA CAMPOS CÁMARA

ASESORES
DR. DAVID VELÁZQUEZ TORRES
DR. OSCAR FRAUSTO MARTÍNEZ
DRA. LOURDES CASTILLO VILLANUEVA
DRA. MARÍA ESTELA OROZCO HERNÁNDEZ
DR. JUAN CARLOS ARRIAGA RODRÍGUEZ
DR. RAFAEL ROMERO MAYO



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, JUNIO DE 2016



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ
DEL PROGRAMA DE DOCTOTADO Y APROBADA COMO
REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

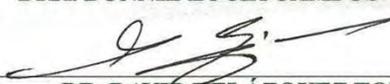
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

COMITÉ DE TESIS

DIRECTORA:


DRA. BONNIE LUCÍA CAMPOS CÁMARA

ASESOR:


DR. DAVID VELÁZQUEZ TORRES

ASESOR:


DR. OSCAR TRAUSTO MARTÍNEZ

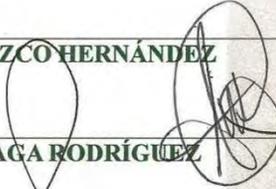
ASESORA:


DRA. LOURDES CASTILLO VILLANUEVA

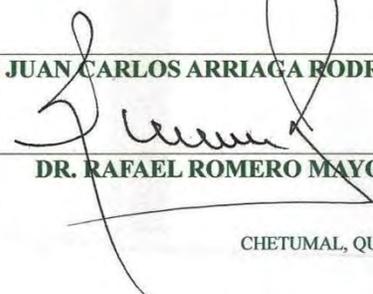
ASESORA:


DRA. MARÍA ESTELA OROZCO HERNÁNDEZ

ASESOR:


DR. JUAN CARLOS ARRIAGA RODRÍGUEZ

ASESOR: UNIVERSIDAD DE
QUINTANA ROO
SERVICIOS ESCOLARES
TITULACIONES


DR. RAFAEL ROMERO MAYO



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, JUNIO DE 2016

Dedicatoria

Ku bondate bo Charles Alibandila ni boma bo Kabisa Mundia

Esta tesis está dedicada con mucho cariño a mis padres, a quienes agradezco por todo el esfuerzo que siempre han hecho para que pudiera realizar todos mis estudios, sobre todo el confiar en que podía cumplir todos mis sueños.

Es por ello que puedo decirles que valió la pena todo el esfuerzo y dedicación para que hoy esté culminando una etapa más de mi vida académica con éxito, lo cual me hace sentir muy orgulloso y sé que a ustedes también porque logré terminar el doctorado, y sobre todo aprendí un nuevo idioma.

No me queda nada más que decirles, muchísimas gracias por todo su amor y apoyo.

¡Los quiero mucho!

Na wa mina

Ndate Mate

El presente trabajo de investigación es el resultado de la beca otorgada por la Secretaría de Relaciones Exteriores de México para cursar los estudios del Doctorado en Geografía en la Universidad de Quintana Roo.

Agradecimientos:

A la *Secretaría de Relaciones Exteriores* de México por otorgarme una beca de tres años para realizar los estudios del Doctorado en Geografía en la Universidad de Quintana Roo.

A la Universidad de Quintana Roo, a través del Mtro. Ángel Ezequiel Rivero Palomo, Rector, por su interés y valioso apoyo de autorizar una beca especial para poder finalizar los estudios del Doctorado en Geografía.

Al Dr. Víctor Soberanis Cruz, Director de la División de Ciencias e Ingeniería, por su invaluable apoyo en la gestión académica para llegar a buen término con mis estudios del doctorado.

A la Dra. Bonnie Lucía Campos Cámara, directora de tesis por su excelente dirección y guía del trabajo de investigación, por sus consejos, paciencia, apoyo y ánimo que me brindó durante mi estancia y para llegar a una exitosa conclusión de tesis.

A mi Comité de Asesores: Dr. David Velázquez, Dr. Oscar Frausto, Dra. Lourdes Castillo, Dr. Juan Carlos Arriaga, Dr. Rafael Romero y Dra. María Estela Orozco, por su gran apoyo en la realización de esta investigación.

A la Dra. Estela Orozco por su recibimiento para realizar mi estancia de investigación y procesamiento de datos satelitales para los avances de la tesis, en la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la Universidad Autónoma del Estado de México.

A Mtro. Marco Antonio Rosetti Castillo, mi profesor de bailes caribeños (actividad extracurricular) por su amistad, paciencia, interés, ánimo y por brindarme ese ambiente de relajación haciéndome ver que sí se puede aprender esos pasos difíciles de baile y realizar presentaciones ante el público, entonces también se puede tener confianza para enfrentar los desafíos académicos. Así que considero que es de suma importancia este tipo de actividades para que los alumnos, especialmente los extranjeros, puedan sentirse bienvenidos y aceptados en la comunidad universitaria.

Al Ing. Gerardo Daniel López Montejo por su valioso apoyo en la consulta técnica y aportación de imágenes satelitales como parte del Centro de Información Geográfica (CIG) de la División de Ciencias e Ingeniería.

A todos A mi compañera Catalina Espinosa Vega por su amistad, por haber compartido incontables horas de trabajo, conversaciones científicas y buenos tratos durante mi estancia en la Universidad de Quintana Roo, a mis amigos, en particular a Andrea Enedina, Mirlen Louis y Belén Trillo por sus aportes y amistad incondicional durante mi estancia en Chetumal, Quintana Roo, México.,

A todo el personal administrativo de la División de Ciencias e Ingeniería por su trato amable y profesionalismo, especialmente a Daniela Pérez Nájera por su paciencia e invaluable apoyo en los trámites académico-administrativos.

Tabla de contenido

| | |
|---|----------|
| Introducción General..... | 1 |
| Planteamiento del Problema | 4 |
| Problema en el conocimiento..... | 6 |
| Problema técnico..... | 6 |
| Problema de la política de manejo:..... | 7 |
| Objetivos y preguntas de la investigación | 7 |
| Hipótesis | 8 |
| Justificación de la investigación | 8 |
| Estructuración de la tesis | 8 |
| Referencias de la Introducción General..... | 10 |

Capítulo 1

| | |
|---|-----------|
| Descripción del área de estudio..... | 13 |
| 1 Caracterización del Área de Estudio | 14 |
| 1.1 Clima..... | 15 |
| 1.2 Recursos Naturales | 17 |
| 1.2.1 Laguna de Bacalar | 17 |
| 1.2.2 Arrecifes | 18 |
| 1.2.3 Flora..... | 18 |
| 1.2.4 Fauna | 19 |
| 1.3 Áreas urbanas y Actividades socioeconómicas | 19 |
| 1.4 Referencias del Capítulo 1 | 21 |

Capítulo 2

| | |
|--|-----------|
| Fundamentación Teórica..... | 22 |
| 2 Introducción..... | 23 |
| 2.1 La Cobertura y Uso del Suelo..... | 23 |
| 2.2 Cambio de la Cobertura y Uso de suelo | 25 |
| 2.2 Procesos del CCUS..... | 26 |
| 2.3 Determinantes del CCUS: factores biofísicos y socioeconómicos..... | 28 |
| 2.3.1 Factores biofísicos o Naturales..... | 29 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3.2 | Factores Socio-economicos | 29 |
| 2.3.3 | Un esquema para relacionar el Uso del Suelo y los cambios en la Tierra..... | 34 |
| 2.4 | Perspectivas Teóricas y Métodos de Análisis del CCUS..... | 36 |
| 3.1 | La Población versus Medio Ambiente..... | 37 |
| 3.2 | Principios económicos: Teoría oferta - renta..... | 39 |
| 3.3 | Perspectivas Social-Ecológicas - Enfoques recientes en el estudio de CCUS..... | 40 |
| 3.3.1 | Enfoque de ecología política | 40 |
| 2.3.2 | Análisis del CCUS..... | 41 |
| 2.3.3 | Métodos para evaluar CCUS | 43 |
| 2.4 | Referencias del Capítulo 2..... | 47 |

Capítulo 3

Usando el Análisis de Imágenes Orientado a Objetos para Mapear y Monitorear Cambios en la Cobertura Terrestre de la Región Costa Maya, México: 1993-2010 .. 52

| | | |
|-------|---|----|
| 3 | Introducción..... | 53 |
| 3.1.1 | Antecedentes (detección de cambios en el paisaje)..... | 55 |
| 3.1.2 | Técnicas de detección de cambios..... | 56 |
| 3.1.4 | Organización de capítulo y resultados esperados | 58 |
| 3.2 | Materiales..... | 60 |
| 3.2.1 | Sistema de cómputo..... | 61 |
| 3.3 | Métodos | 61 |
| 3.3.1 | Pre-procesamiento de imagines satelitales | 61 |
| 3.3.2 | Evaluación de la precisión de clasificación | 69 |
| 3.3.3 | Análisis de Detección de Cambios | 72 |
| 3.4 | Resultados..... | 73 |
| 3.4.1 | Mapas tematicos y distribicion de las clases | 73 |
| 3.4.2 | La Precisión (Fiabilidad) de la Clasifcacion Alcanzada..... | 77 |
| 3.4.3 | Análisis de Cambio de la Cobertura Terrestre..... | 78 |
| 3.5 | Discusión | 84 |
| 3.5.1 | Evaluación de la Precisión..... | 84 |
| 3.5.2 | Características de las Tendencias del cambio..... | 86 |
| 3.6 | Conclusión | 87 |

| | | |
|-----|----------------------------------|----|
| 3.7 | Referencias del Capítulo 3 | 89 |
|-----|----------------------------------|----|

Capítulo 4

Transiciones Sistemáticas de cobertura terrestre en la Región Costa Maya, Quintana Roo, México, 1993-2010

97

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.1 | Introducción | 98 |
| 4.2 | Metodología e Instrumentos de Evaluación..... | 100 |
| 4.2.1 | Instrumentos Cartográficos | 102 |
| 4.2.2 | Detección de los cambios en la cobertura terrestre | 103 |
| 4.2.3 | Detección de las transiciones inter-categorías | 104 |
| 4.3 | Resultados | 106 |
| 4.3.1 | Ganancias y Pérdidas..... | 106 |
| 4.3.2 | Cambio neto y el Intercambio | 107 |
| 4.3.3 | Persistencia y Vulnerabilidad a Transición | 108 |
| 4.3.4 | Procesos de Transición Inter-Categorías | 109 |
| 4.4 | Discusión | 114 |
| 4.4.1 | Evaluación de la Cantidad de Cambio..... | 114 |
| 4.4.2 | Análisis del Intercambio y Vulnerabilidad a la Transición | 114 |
| 4.4.3 | Transiciones Entre-Categorías..... | 115 |
| 4.5 | Conclusión del Capítulo..... | 121 |
| 4.6 | Referencias del Capítulo 4..... | 123 |

Capítulo 5

Reflexiones finales

128

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | Introducción | 129 |
| 5.1.1 | Mapeo de paisaje y teledetección de cambios (Capítulos 3)..... | 129 |
| 5.1.2 | Detección de transiciones sistemáticas de cobertura/ uso del suelo (capítulo 4) 130 | |
| 5.2 | Conclusiones sobre el problema de investigación | 131 |
| 5.3 | Conclusiones Acerca de las Preguntas de Investigación | 131 |
| 5.3.1 | ¿Ha habido políticas o regímenes de manejo importante en la RCM?..... | 131 |
| 5.3.2 | ¿Qué técnicas de teledetección se puede utilizar para procesar imágenes de Landsat TM / ETM? | 132 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.3.3 | ¿Qué enfoque de clasificación se deben utilizar para obtener mapas de alta calidad?..... | 132 |
| 5.3.4 | ¿Cómo se puede detectar transiciones sistemáticas y señales más dominantes de cambios? | 133 |
| 5.4 | Implicaciones para Políticas y Prácticas | 133 |
| 5.5 | Limitaciones..... | 133 |
| 5.6 | Sugerencias para Investigaciones Posteriores..... | 134 |
| 5.6.1 | Adopción del enfoque OBIA | 134 |
| 5.6.2 | El uso de imágenes de satélite de alta resolución..... | 134 |
| 5.6.3 | Nubosidad..... | 135 |
| 5.6.4 | Factores subyacentes de los cambios paisajísticos..... | 135 |
| 5.7 | Aportes Principales de la Investigación..... | 135 |
| 5.8 | Referencias del Capítulo 5..... | 136 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Ubicación de la Región de Costa Maya, Quintana Roo (RCM)..... | 14 |
| Figura 1.2. Temperatura media y Precipitación (cm) media mensual ,1980-2004..... | 15 |
| Figura 1.3. Impactos del huracán “Deán” (Septiembre de 2007) en Mahahual..... | 16 |
| Figura 1.4. Laguna de Bacalar, Bacalar..... | 17 |
| Figura 1.5. Clasificación dela selva por altura..... | 18 |
| Figura 1.6. Mahahual en 2010..... | 20 |
| Figura 2.1. Extensión de los sistemas cultivados, en 2000 | 26 |
| Figura 2.2. Relación entre causas próximas y sus factores determinantes..... | 27 |
| Figura 2.3. Los vínculos entre las fuerzas motrices y los cambios de uso/cobertura del suelo | 34 |
| Figura 3.1. El flujograma del capítulo 3..... | 59 |
| Figura 3.2. Compuesto de Imagen (Bandas 3, 4 y 5) de 1993 Landsat antes y después de corrección radiométrica..... | 63 |
| Figura 3.3. Flujograma de segmentación de imagen..... | 65 |
| Figura 3.4. Parte de Landsat TM, 1993 (Bandas 3, 4,5) antes y después de segmentación .. | 67 |
| Figura 3.5. Distribución de firmas espectrales de muestras de entrenamiento en Landsat, 2000..... | 68 |
| Figura 3.6. Mapa clasificado de la RCM, Quintana Roo, México, (10 de abril de 1993)..... | 74 |
| Figura 3.7. Mapa clasificado de la RCM, Quintana Roo, México, (09 de Febrero de 2000) ... | 75 |
| Figura 3.8. Mapa clasificado de la RCM, Quintana Roo, México, (14 de Febrero de 2010) .. | 76 |
| Figura 3.9. Patrón espacial de cambio de cambio en la cobertura terrestre entre las fechas | 79 |
| Figura 3.10. Distribución de las cobertura en los años 1993, 2000 y 2010..... | 81 |
| Figura 3.11. Tasa anual de cambio en cobertura terrestre entre las fechas | 81 |
| Figura 3.12. Contribuciones al cambio neto de cada seleccionada cobertura..... | 82 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.13. Tendencia espacial de transición de cobertura natural a coberturas artificiales..... | 84 |
| Figura 4.1. Mapas de cobertura del suelo en la RCM para 1993,2000 y 2010..... | 103 |
| Figura 4.2. Resumen de los componentes del cambio en el paisaje (%), 1993-2000 y 2000-2010 | 107 |
| Figura 4.3. Las sendas dominantes de transiciones sistemáticas en la RCM..... | 116 |
| Figura 4.4. Mapas de las transiciones sistemáticas en la RCM, 1993-2000..... | 117 |
| Figura 4.5. Mapas de las transiciones sistemáticas en la RCM, 2000-2010..... | 118 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Definiciones de los tipos de bienes y servicios relacionados con los ecosistemas y algunas funciones de los ecosistemas alterados por el cambio de uso de la tierra..... | 2 |
| Tabla 3.1. Características de Landsat TM5/ETM+..... | 60 |
| Tabla 3.2. Resumen de los parámetros de segmentación de píxeles | 66 |
| Tabla 3.3. Interpretación del coeficiente kappa..... | 71 |
| Tabla 3.4. Matriz de error para mapa clasificado, 2000 | 77 |
| Tabla 3.5. Índices Estadística por clase derivados de la matriz | 78 |
| Tabla 3.5. Cobertura del suelo y su cambio entre las fechas | 80 |
| Tabla 4.1. La relaciones ganancia-a la-persistencia (g_p), pérdida-a la-persistencia (L_p) y cambio-neto -a la-persistencia (N_p), y vulnerabilidad de cada categoría a cambiar..... | 108 |
| Tabla 4.2. Matriz de cambio para 1993-2000, bajo procesos aleatorios de ganancias..... | 110 |
| Tabla 4.3. Matriz de cambio para 1993-2000 y 2000-2010, bajo procesos aleatorios de pérdidas | 111 |
| Tabla 4.4. Las transiciones sistemáticas más relevantes en el RCM bajo procesos aleatorios de Cambios (%) de ganancias y pérdidas..... | 112 |

Introducción General

Paisajes costeros son preciosos ambientes directamente relacionados con la influencia de la tierra y del mar, y se encuentran entre los ecosistemas más dinámicos y productivos del mundo, los cuales proporcionan numerosos beneficios económicos, culturales, estéticos y servicios ecológicos (Robert & Jackie, 1999; Beatley, et al., 2002; UNEP, 2006). Por esta razón, han sido los destinos favoritos de varias actividades humanas tales como: los asentamientos humanos, la industria y el comercio, la defensa, el turismo y otros (Yang, 2009). Lo que explica porque más de la mitad de la población mundial vive en zonas costeras, aunque estas regiones ocupan menos del 15% de la superficie terrestre y son, frecuentemente, los lugares más peligrosos para vivir (Kusky, 2008).

A pesar de su importancia para la bienestar humana, en las últimas décadas, un ritmo sin precedentes de cambios en el paisaje han amenazados estas regiones con degradación de la tierra (Yang, 2009; Wang, 2010). Este fenómeno implica una pérdida o reducción en la capacidad productiva de un ecosistema y en su valor como recurso económico (Young, 1998; Eswaran, et al., 2001), y los huracanes y otros desastres naturales son sólo una parte de la explicación. El problema se debe, en gran parte, a las actividades humanas, entre los que destacan la presión demográfica, la globalización del mercado, la contaminación, el cambio climático, la sobre explotación de recursos naturales, la invasión de especies exóticas, los cambios en el uso del suelo, la deforestación y los incendios forestales, así como la existencia de políticas débiles y mal implementadas, además de deficiencias en el cumplimiento de las leyes (PNUMA, 2010). Las tasas de estos cambios han aumentado de manera exponencial durante el siglo pasado y se mantienen preocupantemente altas a pesar de una disminución en los últimos años (Turner II, 1997). Los cambios más dramáticos están presentes en la estructura y composición de la cobertura forestal; la expansión e intensificación de la agricultura, explotación forestal, desarrollo urbano y turístico (UNEP, 2007).

Tomando en cuenta los incrementos previstos en la población humana y en el crecimiento económico continuo, es probable que aumente aún más la explotación de los recursos costeros en las próximas décadas, con implicación sobre la sostenibilidad del medio

ambiente (Lambin, et al., 2003). Aunado a lo anterior, se espera que la perturbación provocada por el cambio climático aumente y ésta a su vez ejerza más presión sobre los ecosistemas, afectando a las especies que los conforman (Pitelka, et al., 2007). Los impactos de estos cambios, advierten Turner II, et al., (1997), podían ser especialmente difíciles para comunidades más vulnerables en la zona costera tropical.

Es importante resaltar, que no todos los cambios en el paisaje son malos; de hecho, como [Tabla 1](#) muestra, algunas alteraciones son realmente beneficiosas y están relacionados con los continuos aumentos en el suministro de alimentos, agua, vivienda, bienestar económico, salud, recreación, energía y la riqueza.

Tabla 1: Definiciones de los tipos de bienes y servicios relacionados con los ecosistemas y algunas funciones de los ecosistemas alterados por el cambio de uso de la tierra

| Tipo de bien/servicio ecosistema | Función | Ejemplo de una función alterada por el cambio en uso del suelo |
|--|---|---|
| De provisión de alimentos y materiales | Proporciona materias primas para la apropiación humana | Expansión de las tierras agrícolas aumenta la fracción apropiada para el consumo humano |
| De provisión del agua dulce | Regula el flujo de agua a los ríos | La urbanización y la construcción de infraestructura aumenta la tendencia a inundaciones |
| | Mantiene la calidad del agua | Escurrimiento agrícola contamina los ríos |
| De regulación del clima | Secuestra gases de efecto invernadero a través de los ciclos biogeoquímicos | La deforestación tropical libera CO ₂ , un contaminante atmosférico, aumenta calentamiento global |
| | Intercambios de agua, energía y momento con la atmósfera | La tala del bosque aumenta el albedo y enfría el aire |
| De regulación de las enfermedades | Restringe el hábitat para los vectores de enfermedades | La deforestación aumenta los contactos humanos con animales salvajes y transmite plagas y enfermedades zoonóticas |
| | Mantiene un clima saludable | La urbanización induce islas de calor |
| De soporte para la biodiversidad | Provee hábitat para flora y fauna | La Pérdida de bosques aumenta la fragmentación del hábitat |
| Fertilidad del suelo | Repone los nutrientes del suelo | El aumento de la erosión hídrica, reduce la fertilidad del suelo |

Fuente: adaptado de (DeFries, et al., 2004)

Pero otras alteraciones son indeseadas o perjudiciales, y llevan al deterioro ambiental que resultaría en la pérdida de servicios ambientales ([Tabla 1](#)). Por ejemplo, la tala de bosques a favor de la agricultura y asentamientos humanos puede satisfacer las necesidades alimentarias, energéticas y materiales de una población creciente. Pero, al mismo tiempo, la

deforestación o pérdida de bosques conlleva menoscabos de algunos servicios ambientales (Tabla 1), e incluso pérdida de resiliencia y un incremento en la vulnerabilidad de las sociedades ante disturbios naturales como incendios forestales y eventos climáticos extremos (Sherbinin, 2002; DeFries, et al., 2004).

Debido al incremento de la presión humana en los últimos años, las consecuencias negativas (como la erosión hídrica, pérdida de biodiversidad, la contaminación del agua y del aire) han aumentados, resultando en ecosistemas en peligro, en cuanto a sus integridades ecológicas, y regiones en situación de riesgo, en términos del bienestar socioeconómico (Giri, 2012). Los beneficios y oportunidades económicas que ofrecen los ecosistemas han comenzado a erosionar debido a que estos beneficios ocurren a costo de la degradación de los ecosistemas (Giri, 2012).

Dado la variedad de actividades humanas que potencialmente afectan a los sistemas ecológicos, es imperativo discriminar entre los efectos de determinados tipos de perturbaciones (en lugar de centrarse en un efecto general) para que se puedan identificar y mitigar a los que son más "dañina", es decir, que tiene los mayores efectos, o que afectan a la mayoría de los recursos "valiosos" (Osenberg & Schmitt, 1996). Sin embargo, realizar estos estudios para aumentar las perspectivas de un paisaje sostenible, constituye un gran reto (UNEP, 2007), ya que requiere bases de información fiables y técnicas analíticas capaces para evaluar efectivamente las condiciones ambientales (Yang, 2009).

Otra dificultad radica en que los ecosistemas costeros presentan variaciones extremas tanto en complejidad espacial como en la variabilidad temporal, lo que dificulta conseguir dicha información solo con métodos tradicionales in-situ (Yang, 2009).

Para una solución a la problemática planteada y para realizar un análisis más integrado de cambios en el paisaje, se recomienda un enfoque que trate la relación entre la sociedad y el ambiente como un sistema socio-ecológico integrado, desde una perspectiva biofísica en cuanto a la cobertura de la tierra, y por otro lado, el uso de suelo, por la acción social (Bürgi, et al., 2004; Olson, et al., 2004; Rindfuss, et al., 2004). Ya que es la interacción entre lo social y lo natural tal como hemos visto anteriormente, que induce los cambios en la cobertura terrestre, formando a su vez paisajes culturales diversos; tal es el caso de la

región Costa Maya, con la generación de recursos socioeconómicos y desarrollo de proyectos “ecológicos”, pero que a su vez provoca una degradación de la tierra.

Los procesos socioeconómicos y ambientales son inherentemente espaciales, y casi no pueden ser abordados completamente sin tomar en cuenta sus varias dimensiones espaciotemporales (Bürgi, et al., 2004). Por consiguiente, un enfoque de monitoreo ambiental apropiado debe incorporar capacidades para recopilar y comparar datos con el tiempo. En este sentido, esta tesis plantea, una investigación multidisciplinaria que combine las ciencias sociales y naturales con disciplinas tecnológicas de gran uso en la actualidad, como lo son la *Percepción Remota (teledetección)*; *Sistemas de Información Geográfica (SIG)* y los *Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)*-colectivamente llamado *Geoinformática*.

Percepción remota proporciona dato crítico sobre el estado y la condición del medio ambiente, que a su vez podría utilizarse para inferir la presión. Mientras que los *SIG* y *GPS* nos permitan conocer la dinámica y procesos de la transformación en el paisaje en diferentes periodos, así como entender cómo y por qué ocurren estos cambios; incluso facilita identificar las áreas más susceptibles a cambios, de modo que es fundamental en la toma de decisiones para la planificación de una región (Dzieszko, 2014). Asimismo, se considera una perspectiva histórica del mismo, permitiendo a su vez una visión contextual más completa para la gestión de paisajes, ordenamiento territorial y la restauración ecológica (Bürgi, et al., 2004).

Planteamiento del Problema

La *Región Costa Maya (RCM)* experimenta cambios significativos en el paisaje debido, principalmente, a las actividades humanas. La misma es un destino turístico establecido en 1991 por el gobierno de Quintana Roo como motor para impulsar el desarrollo de la parte sur del estado (Campos-Cámara, 2010). Como consecuencia, se ha visto un crecimiento acelerado en el desarrollo de infraestructura turística, el crecimiento urbano, las actividades y servicios relacionados. La industria turística ha convertido a la *RCM* en un enclave económico importante para Quintana Roo y en uno de los destinos turísticos de clase mundial.

El turismo es importante para la prosperidad de la *RCM*, pues, genera importantes ingresos y empleos, de tal modo que se fortalece como la principal económica de Quintana Roo. Sin embargo, como señala [Campos-Cámara \(2010\)](#), también ha generado algunos problemas, tales como: aumento en la población inmigrante; el alto costo de los bienes y servicios para el consumo local; la pérdida de la identidad de las comunidades locales; conflictos sociales; el deterioro del medio ambiente; y sobreexplotación de recursos naturales en los alrededores de las áreas protegidas. Según [Castillo-Villanueva \(2007\)](#), esto se debe a una planificación de corto plazo centrada más en la rentabilidad financiera e indiferente de los problemas sociales y ambientales que la actividad turística genera.

La vulnerabilidad ambiental de la zona costera quintanarroense es muy elevada debido al su ecosistema frágil, conformado por arrecifes de coral, estuarios y manglares, que ahora se encuentran amenazados por el crecimiento de los asentamientos humanos y las instalaciones turísticas. Sumado a lo anterior, en la zona imperan las prácticas de desarrollos insostenibles, una insuficiente vigilancia administrativa, una comprensión del área y una valorización limitadas del papel que desempeña público en general en la conservación ambiental de la zona ([PNUMA, 1996](#); [Castillo-Villanueva, 2007](#); [Campos-Cámara, 2010](#)).

Puesto que la degradación de los recursos naturales a veces es irreversible, entonces un modelo de desarrollo económico que no admite el uso racional de los recursos naturales está fuera del ámbito del desarrollo sostenible. Un plan de desarrollo turístico ideal debe dar prioridad a los recursos ambientales, mantener los procesos ecológicos esenciales y ayudar a conservar los recursos naturales y la biodiversidad. Además, debe incluir aspectos sociales y procurar mantener la identidad cultural de las comunidades locales ([Castillo-Villanueva, 2007](#); [Campos-Cámara, 2010](#)).

La implicación de todo eso en el medio ambiente de la *RCM* es fundamental, ya que sigue experimentado problemas ambientales manifestándose: en la extensión agrícola en suelos marginales; erosión de las playas; la contaminación de agua y mantos freáticos; la contaminación costera a partir de residuos sin tratamiento; la falta de playas públicas; el aumento de costo de vida; crecimiento urbano descontrolado sin servicios; deforestación y

destrucción de los hábitat debido a la eliminación selectiva de la vegetación nativa (Castillo-Villanueva, 2007; Vázquez-Trejo, 2010). A largo plazo, estos factores podrían conducir a un desastre ambiental que no sólo pone en peligro, tanto a la actividad turística, como todo el bienestar de las comunidades locales. Por lo tanto, es imperativo, como señala González-Vera, (2010) que estos factores disminuyan sus efectos sobre el medio ambiente y que las políticas gubernamentales para mitigar el deterioro del medio ambiente sean investigadas a fondo.

Los abusos del suelo siguen creciendo en la *RCM*, a pesar de que existen varios planes de desarrollo sostenible, entre ellos, reglas de los *programas de ordenamiento ecológico territorial (POET)*, que visualizan la restauración, protección, conservación y aprovechamiento racional de sus recursos naturales, y en el que además impone al desarrollo económico, turístico y urbano y planes de manejo de las áreas protegidas. Entonces, ¿Qué está pasando en la *RCM*? y ¿Por qué es grave la amenaza ambiental sobre la *RCM*? Para comprender la situación en la *RCM*, se tiene, primero, que aborda los siguientes problemas científicos planteados:

Problema en el conocimiento

- ¿Qué tan efectivas han sido las leyes ambientales existentes y políticas para prevenir la degradación del suelo?
- ¿En qué medida la organización y el desarrollo espacial fueron dirigida y controlada?
- ¿Cómo identificar los impactos ocasionados por desarrollos turísticos y los consiguientes problemas de urbanización, dado que el crecimiento urbano y el mantenimiento de la infraestructura productiva que están generando procesos contrarios a la sostenibilidad ambiental (Vázquez-Trejo, 2010)?
- ¿Cuáles son los patrones y características de los cambios en el paisaje en la *RCM*?

Problema técnico

- ¿En qué forma se puede medir cuantitativamente y caracterizar los impactos ambientales (González-Vera, 2010)?

- ¿Cómo integrar los datos de diferentes calidades tanto Social como Natural?

Problema de la política de manejo:

- ¿Es la evaluación de cambios en el paisaje importante para un desarrollo sustentable y se deber dar más atención a estos estudios?

Objetivos y preguntas de la investigación

El objetivo general de esta investigación es mapear, monitorear, y analizar la evolución de los cambios en el paisaje de *RCM* durante un período de 17 años (1993-2010) utilizando técnicas Geoinformáticas. Los objetivos específicos y sus respectivas preguntas científicas fundamentales asociadas son:

- 1) Revisar las actividades ambientales y socio-económicas durante el período de estudio.
 - a) ¿Ha habido políticas o regímenes de manejo importante establecidos para hacer frente a los problemas derivados de los cambios en el paisaje?
- 2) Desarrollar una apropiada metodología de teledetección usando datos de Landsat TM / ETM + para monitorear los cambios de cobertura del suelo en Región Costa Maya
 - a) ¿Qué técnicas de teledetección se puede utilizar para procesar imágenes de Landsat TM / ETM + seleccionadas?
- 3) Elaborar los mapas de cobertura de la tierra para la misma área durante los años 1993, 2000 y 2010
 - a) ¿Qué enfoque de clasificación se deben utilizar para obtener mapas de alta calidad?
- 4) Analizar la naturaleza y tendencias de cobertura del suelo durante el mismo período.
 - a) Con este objetivo (Capítulo 2) se aborda, específicamente: (1) cambio de área y el cambio en la tasa; (2) la distribución espacial de los cambios; (3) las trayectorias de cambio de tipos de cobertura del suelo; y (4) evaluación de la precisión de los mapas
- 5) Detectar y cuantifica transiciones sistemáticas y las señales más dominantes de cambios sistemáticos en la *RCM* y ganar en entendimiento sobre las coberturas

sujetas a mayor presión durante: 1993 a 2000 y 2000 a 2010. Se pretende contestar las siguientes preguntas:

- a) ¿cuáles son los cambios netos del paisaje para cada categoría?
- b) ¿cuáles son las ganancias, pérdidas, e intercambio de cada categoría?
- c) ¿cuáles son las categorías que presentan transiciones sistemáticas?
- d) ¿Cuáles son las señales más fuertes de transiciones sistemáticas?

Hipótesis

Los cambios en el Uso / Cobertura del suelo relacionados en la RCM durante (1993-2010) han presentados variaciones significativas y algunas transiciones son sistemáticas.

Justificación de la investigación

Las zonas costeras del gran caribe sufren una gran amenaza; siguen experimentando cambios socioeconómicos y ambientales rápidos e intensos que, según la PNUMA, (1996) están provocando *“un cúmulo de problemas y temas asignados no sólo por la contaminación, sino también por una mala planificación del uso del suelo en los litorales y a procedimientos igualmente equivocados para el control del desarrollo, uso excesivo o nocivo de los recursos marinos, sobrecarga de la capacidad de sustentación y a un manejo, monitoreo y vigilancia deficientes por parte del sector público...”* que podrían llevar hasta degradación y desastre. Éstos procesos requieren una evaluación robusta para hacer que las respuestas políticas sean rápidas y adecuadas para alcanzar la meta de un desarrollo sostenible en la región, ya que los programas de manejo ya existentes parecer ser deficientes e inefectivos. Esta investigación cobra importancia al establecer un precedente para mapear y monitorear las transformaciones de paisaje en la RCM e identificar y cuantificar las transiciones sistemáticas en esta región, así como para conocer los usos de suelo que las han propiciado. Esta información será de utilidad para mejorar planes de manejo integrado de desarrollo ambiental y futuras estrategias de conservación de los recursos natural de la región, puesto que este tipo de estudios son escasos en México.

Estructuración de la tesis

La tesis está estructurada en la introducción y 5 capítulos.

La **Introducción** presenta los antecedentes generales y planteamiento del problema del estudio (los objetivos, pregunta de investigación y la metodología utilizada para responder a las preguntas de la tesis, justificación y aporte de la investigación). La estructuración de la tesis concluye este apartado.

Capítulo 1 presenta la descripción de la *Región Costa Maya (RCM)*- el área en estudio, en términos de sus características físicas (ubicación geográfica, clima, vegetación, topografía, principales actividades económicas).

Capítulo 2 explora los conceptos, las definiciones y la fundamentación teórica que sustenta el estudio de cambios en el paisaje así como los métodos y técnicas utilizados para analizar este fenómeno.

Capítulo 3 presenta la introducción y antecedentes, métodos y los resultados de aplicación del enfoque: segmentación y clasificación orientada a objetos, a las imágenes multitemporal de Landsat TM / ETM + para mapear y monitorear la dinámica de la cobertura terrestre en la *RCM*. El capítulo discute los Resultados (Mapas de cobertura de suelo, la evaluación de la precisión de mapas, el análisis de las magnitudes, las tasas, la naturaleza y la distribución y las tendencias geográficas de los cambios en las coberturas terrestres) así como sus implicaciones ambientales en la *RCM*, terminando con la conclusión del capítulo.

Capítulo 4 presenta un procedimiento novedoso de detección de los cambios para detectar transiciones sistemáticas en la *RCM* entre 1993-2000 y 2000-2010. El procedimiento incluye el análisis más detallado de matrices convencionales de transición, que fueron elaboradas a partir de la tabulación cruzada de tres mapas de cobertura terrestre (derivados anteriormente en el [capítulo 3](#)). El capítulo, además, presenta los resultados, discusión y conclusión de lo mismo.

Capítulo 5, el último capítulo, resume los hallazgos y resultados importantes en los [capítulos 4 y 3](#), así como plantear recomendaciones para futuras investigaciones.

Referencias de la Introducción General

- Beatley, T., Brower, D. J., & Schwab, A. K. (2002). *An introduction to coastal zone management* (Segunda ed.). Washington, DC 20009: Island Press.
- Bürgi, m., Herperger, A. M., & Schneeberger, N. (2004). Driving forces of landscape change - current and new directions. *Landscape Ecology*, 199, 857-868.
- Campos Cámara, B. L. (2007). Urbanización y turismo. En B. L. Campos Cámara (Ed.), *Urbanización y turismo* (págs. 7-11). Barcelona: Ediciones Pomares,S.A.
- Campos-Cámara, B. L. (2010). Region Turística:Costa Maya. En B. L. Campos (Ed.), *Análisis Territorial Del Turismo Región Costa Maya* (págs. 9-50). México,D.F: Plaza y Valdes Editores.
- Castillo Villanueva, L., Velazquez Torres, D., & López Montejo, D. (2010). La planeación urbana-regional en Costa Maya. En B. L. Campos Cámara (Ed.), *ANÁLISIS TERRITORIAL DEL TURISMO REGIÓN COSTA MAYA* (págs. 75-110). Madrid ,España: Plaza y Valdes Editores.
- Castillo-Villanueva, L. (2007). Urbanización,turismo y problemas ambientales. En B. L. Campos-Cámara, L. Castillo-Villanueva, & D. Velazquez-Torres (Edits.), *Urbanización y Turismo* (págs. 67-90). Barcelona: Ediciones pomares,S.A.,
- DeFries, R. S., Foley, J. A., & Asner, G. P. (2004). Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function. *Front Ecol Environ*, 2(5), 249-257.
- Dzieszko, P. (2014). LAND-COVER MODELLING USING CORINE LAND COVER DATA AND MULTI-LAYER PERCEPTRON. *QUAESTIONES GEOGRAPHICAE*, 33(1), 5-22.
- Eswaran, H., Lal, R., & Reich, P. (2001). Land degradation: An overview. En E. M. Bridges, I. D. Hannam, L. Oldeman, P. d. T, S. J. Scherr, & S. Sompatpanit (Edits.), *Second International Conference on Land on Land Degradation and Desertification, Khon Kaen, Thailand*. New Delhi, India: Oxford Press.
- Giri, C. P. (2012). Brief Overview of Remote Sensing of Land Cover. En C. P. Giri (Ed.), *Remote Sensing of Land Use and Land Cover: Principles and Applications* (págs. 3-12). Boca Raton: CRC Press,Taylor & francis Group.
- González-Vera, A. (2010). Mahahual,Planeación y Sustentabilidad. En L. Castillo-Villanueva, Orozco-Hernández, & D. Velázquez-Torres (Edits.), *Ciudades,urbanización y metropolizacion* (págs. 359-374). México,D.F: Valdés,S.A de C.V.,
- Herrera Sansores, J. C., & Heridia Escobedo, J. D. (2011). Clima. En C. Pozo, N. Armijo Canto, & S. Calmé (Edits.), *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomol* (págs. 49-56). México, D. F.: El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para

el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd).

- Kusky, T. (2008). *THE COAST: Hazardous Interactions within the Coastal Environment*. New York : nfobase Publishing.
- Lambin, E. F., Geist, J. H., & Lepers, E. (2003). Dynamics of Land-Use and Land Cover Change in Tropical Regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205-241.
- Olson, J. M., Misana, S., & Campbell, D. J. (2004). *Land Use Change Impacts and Dynamics(LUCID) Project Working Paper48*. Nairobi, Kenya: International Livestock Research Institute.
- Osenberg, C. W., & Schmitt, R. J. (1996). Detecting ecological impact caused by human activities. En R. J. Schmitt, & C. W. Osenberg (Edits.), *Detecting Ecological Impacts: concepts and applications in coastal habitats* (págs. 3-16). San Diego, California: Academic Press.
- Pitelka, L. F., Canadell, J. G., & Pataki, D. E. (2007). Global Ecology, Networks, and Research Synthesis. En J. G. Canadell, D. E. Pataki, & L. F. Pitelka (Edits.), *Terrestrial Ecosystems in a Changing World:Global Change – The IGBP Series* (págs. 1-5). New York: Springer.
- PNUMA. (1996). *PNUMA: Directrices para una planificación y un manejo integrados de las Áreas costeras y marinas en la región del Gran Caribe. Informe Técnico del PAC No. 42*. Kingston, Jamaica: Programa Ambiental del Caribe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- PNUMA. (2010). *PERSPECTIVAS DEL MEDIO AMBIENTE: AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (GEO ALC 3)*. Panama: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Rindfuss, R. R., Walsh, S., Turner II, B. L., Fox, J., & Mishra, V. (2004). DEVELOPING A SCIENCE OF LAND CHANGE: CHALLENGES AND METHODOLOGICAL ISSUES. *PNAS*, 101(39), 13976–13981.
- Robert, K., & Jackie, A. (1999). *Coastal planning and management* (Primera ed.). London: Taylor & francis.
- Rosado-May, F. J., & Kissmann, S. (1998). Planning for sustainable Tourism in the Southern Coast of Mexica Caribbean. En L. HENS, R. J. BORDEN, S. SUZUKI, & G. CARAVELLO (Edits.), *RESEARCH IN HUMAN ECOLOGY:AN INTERDISCIPLINARY OVERVIEW* (págs. 53-78). Florence,Italy: VUBPRESS / VUB University Press Brussels.
- Sherbinin, A. d. (2002). *A CIESIN Thematic Guide to Land-Use and and Land-Cover Change (LUCC)*. Palisades,NY,USA: Columbia University.
- Turner II, B. L. (1997). The sustainability principle in global agendas: implications for understanding land-use/cover Change. *The Geographical Journal*, 163(2), 133-140.

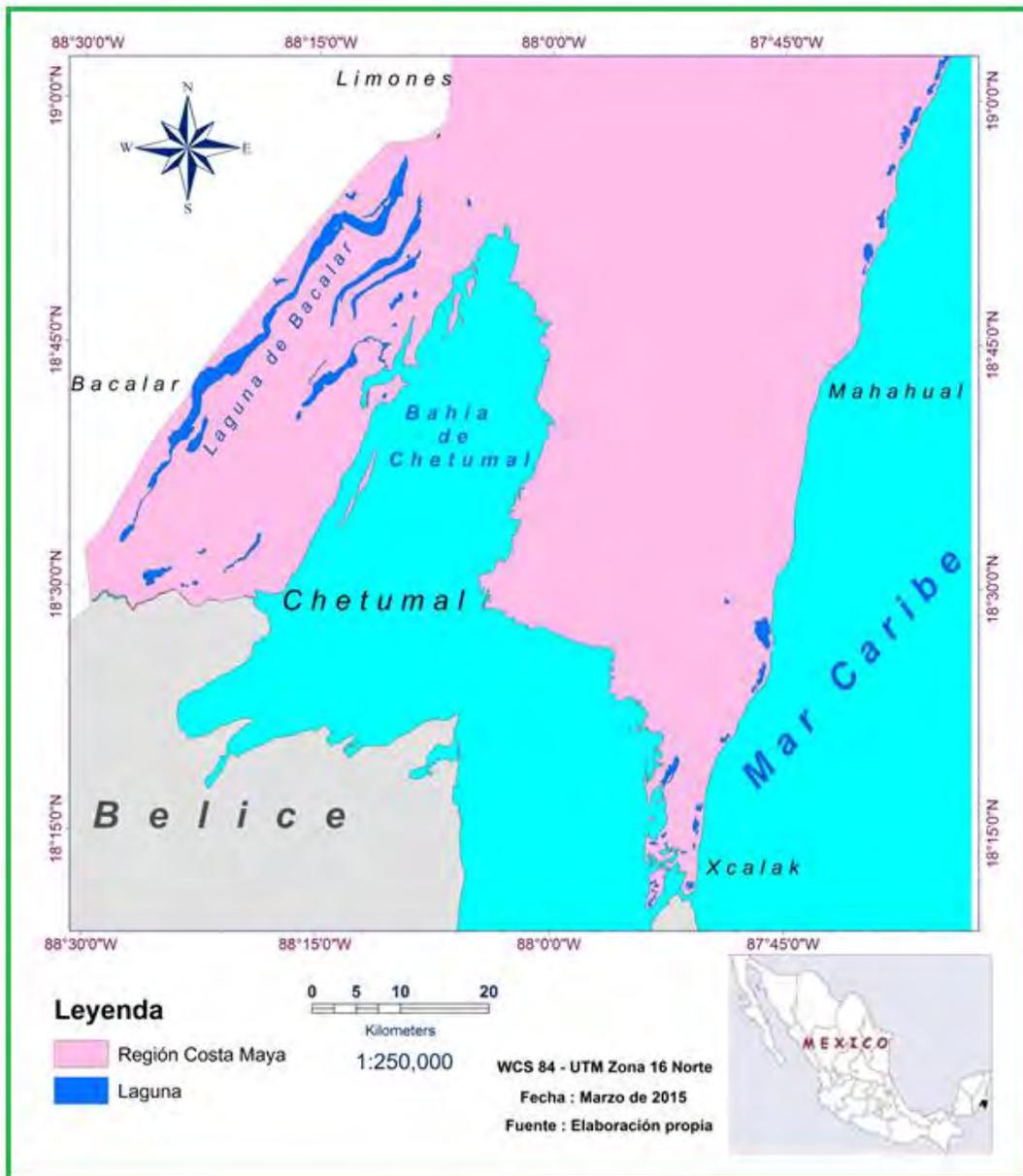
- UNEP. (2006). *Marine and coastal ecosystems and human wellbeing: A synthesis report based on the findings of the*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.
- UNEP. (2007). *The Global Environment Outlook: environment for development (GEO-4)*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme(UNEP).
- Vázquez-Trejo, A. (2010). La Costa Maya, un espacio para la participación de México en la cooperación ambiental centroamericana. En B. L. Campos Cámara (Ed.), *Análisis territorial del turismo region Costa Maya* (págs. 153-174). México D.F: Plaza y Valdes S.A. de C.V.
- Wang, Y. (2010). Remote Sensing of Coastal Environments: An Overview. En Y. Wang (Ed.), *Remote Sensing of Coastal Environments* (págs. 1-21). Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Yang, X. (2009). Remote Sensing, Geospatial Technologies and Coastal Ecosystems. En X. Yang (Ed.), *Remote Sensing, Geospatial Technologies and Coastal Ecosystems: Assessment and Management* (págs. 1-14). Berlin : Springer.
- Young, A. (1998). *Land resources: Now and for the future* (Primera ed.). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.

Capítulo 1

Descripción del área de estudio

1 Caracterización del Área de Estudio

La *Región Costa Maya (RCM)* se encuentra en la parte sur oriental de la península de Yucatán, en la costa sur del estado de Quintana Roo, en el municipio de Othón P. Blanco, entre las coordenadas geográficas 19°05 N, 87° 35 W y 18° 10 N 87° 33 W.



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Landsat

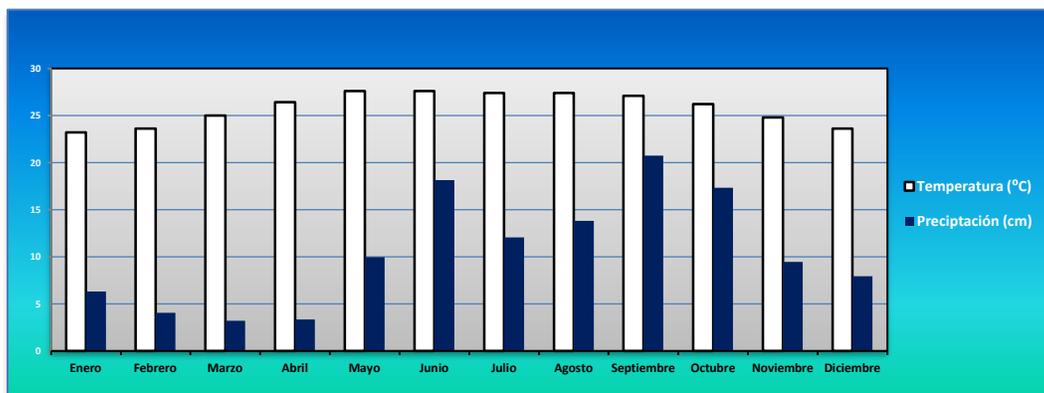
Figura 1.1: Ubicación de la Región de Costa Maya, Quintana Roo (RCM)

Está delimitada al este por el Mar Caribe, al norte con la Reserva de la *Biosfera de Sian Káan*, al oeste con la laguna de Bacalar y al sur con Belice. El terreno es generalmente plano, con una altura promedio de 8 m sobre el nivel de Mar. El suelo está clasificado por la (FAO/Unesco, 1988) [\(en una modificación hecha por INEGI\)](#) en los siguientes tipos: Regosoles cacaricos, Rendzinas-Litsoles y Solonchac-órtico (esos tipos de suelo corresponden en la terminología Maya a Huntunich, Tsek'el y Ak'alche, respectivamente [\(Díaz-Gallegos & Acosta-Velázquez, 2009\)](#))

Su franja costera se caracteriza por tener manglares y marismas que abarcan grandes áreas pantanosas y cenagosas con la vegetación predominante siendo selva baja y manglares. El ecosistema marino está integrado a la barrera arrecifal mesoamericana. Formando parte del RCM es la bahía de Chetumal que abarca la isla de Tamalcab y la zona sujeta a conservación ecológica, Santuario del Manatí se localizan en la cuenca de la Bahía de Chetumal, mientras que el área de protección de flora y fauna, Uaymil se ubica en la noroeste. El Río Hondo es el único escurrimiento superficial importante en Quintana Roo y se encuentra en la cuenca Bahía de Chetumal.

1.1 Clima

En la *RCM* prevalece el clima tropical cálido subhúmedo con régimen de lluvias en verano. La temperatura media anual es de 27°C, con temperatura máxima de 40°C y mínima de 14°C y precipitación promedio anual de 1249 mm. La época más lluviosa se encuentra entre junio y octubre



Fuente: Elaboración propia en base al (Herrera Sansores & Heridia Escobedo, 2011)

Figura 1.2: Temperatura media y Precipitación (cm) media mensual, 1980-2004

Esta región tiene ingreso de humedad proveniente del mar Caribe, y julio y marzo son los meses con la mayor (93%) y menor (80.9%) humedad relativa respectivamente. Las características y el comportamiento del régimen pluvial están determinados por las elevadas temperaturas y las condiciones generales de la circulación atmosférica, especialmente de los vientos alisios, de los nortes y las tormentas tropicales, que transportan las formaciones nubosas tierra adentro (Herrera Sansores & Heridia Escobedo, 2011)

La RCM presenta una alta vulnerabilidad a eventos meteorológicos extremos como los huracanes y la temporada con mayor incidencia de estos es de junio a septiembre, los cuales causan un una gran destrucción en la zona del Caribe. Se presentan fenómenos climáticos de tipo ciclónico, acarreado consigo importantes volúmenes de humedad.



(Fuente: CAPA, Mahahual, 2007 Quintana Roo)

Figura 1.3: Impactos del huracán “Deán” en Mahahual (Septiembre de 2007)

Quintana Roo ocupa el tercer lugar en incidencia de huracanes, después de Baja California Sur y Sinaloa; en la Península de Yucatán, es el estado donde impactan con mayor fuerza y poder destructivo

1.2 Recursos Naturales

La región costera del denominado corredor Punta Herrero-Xcalak (donde se desarrolla el proyecto turístico Costa Maya), posee playas de singular belleza y forma parte de una vasta cadena arrecifal, muy cercana a la zona continental, que pertenece a la barrera de arrecifes más grande de América y segunda más grande del mundo. Esta zona comprende una franja costera y continental de 130 kilómetros de longitud y se sitúa entre las poblaciones de Punta Herrero y Xcalak, incluyéndolas, de norte a sur respectivamente. Abarca parte de los municipios de Felipe Carrillo Puerto y Othón P. Blanco; colinda al norte con la bahía del Espíritu Santo, al sur con el canal de Bacalar Chico y la bahía de Chetumal, al este con el mar Caribe y al oeste con terrenos nacionales.

1.2.1 Laguna de Bacalar

La Laguna de Bacalar es de gran importancia para la zona sur del estado y es la que tiene mayor extensión, siendo una longitud aproximada de 50 km, y que a lo ancho mide de dos a tres kilómetros. Es conocida como “la laguna de siete colores”, por el gran atractivo visual que ofrecen las tonalidades cambiantes de sus aguas, aunado al verde de la vegetación de la selva que la rodea. Tiene tres cenotes en su interior



Fuente: Elaboración propia, tomada el 2nd junio de 2012 en Bacalar, Quintana Roo

Figura 1.4: Laguna de Bacalar, Bacalar.

1.2.2 Arrecifes

En casi toda la costa de Quintana Roo se presenta una laguna arrecifal, protegida por el arrecife coralino. Esta barrera, presente en el tramo Mahahual-Xcalak, es de las que más se acercan a la costa; la distancia entre ésta y el arrecife es variable, fluctúa entre los 100 y 1000 metros. La laguna arrecifal tiene una pendiente suave, con sedimentos de tipo arenas medianas y gruesas y la profundidad no excede los 4 metros. Posterior a la barrera arrecifal, se encuentran profundidades de entre 15 y 30 metros con un fondo arenoso; después se da un abrupto cambio de profundidad hasta los 800 metros, en la zona del canal de Yucatán

1.2.3 Flora

La RCM se caracteriza por una variedad de vegetación, destaca la vegetación acuática facultativa donde las comunidades más dominaste corresponde con los ecosistema de manglares. Mientras que en las zonas relativamente más altas se manifiestan una vegetación de selva subcaducifolia o de selva mediana alta En las zonas bajas se distribuye una vegetación adaptada a procesos de inundación temporal. (Díaz, 2011).



(Fuente: EK Díaz, 2011)

Figura 1.5: Clasificación de la selva por altura

1.2.4 Fauna

Según [Campos-Cámara, \(2007\)](#), la fauna de la zona, es variada debido a diversas asociaciones de vegetales y a la presencia de diversos cuerpos acuáticos y desde luego de la zona marina. Así tenemos la presencia de insectos, reptiles, mamíferos, aves y, desde luego, de fauna marina, mucha de ella de relativa rareza, y otros más en peligro de extinción, señala la misma autora. Cabe señalar que en el caso de la fauna marina, existe una importante variedad de ejemplares que tienen un gran interés comercial sobre todo hacia la capital del estado y en algunos casos, como lo es la langosta, hacia el extranjero ([Campos-Cámara, 2007](#)).

1.3 Áreas urbanas y Actividades socioeconómicas

Chetumal, Bacalar, Mahahual, y Xcalak son los asentamientos humanos principales de la RCM. Chetumal es la cabecera municipal, capital del estado y, debido a ello, ahí está la mayor concentración de la población de toda la RCM, representado 58.4% de la toda la población en 2000 la cual incremental 62.3% en 2005 ([Castillo-Villanueva, et al., 2010](#))

Se practica agricultura en buena parte de la zona, siendo el cultivo de caña el más importante económicamente, principalmente en la ribera de Rio Hondo, donde se encuentra el ingenio San Rafael de Pucte. Además se cultiva el sorgo y productos hortofrutícolas en invernaderos. Entre otros cultivos destaca el chile jalapeño y la papaya. Ganadería es otra actividad en la región que cuenta con apoyo de gubernamental.

Sin embargo, como señala ([Campos-Cámara, 2007](#)), no perciben grandes extensiones agrícolas en el litoral caribeño, ya que se realiza una agricultura de temporal y para autoconsumo, principalmente en las inmediaciones de la corredera Mahahual-Xcalak anteriormente cubierta por selva mediana y selva baja. Eminente en esta zona es la vocación turística (Figura 1.6), producto de su geografía, que lo ha dotado de grandes recursos, en la riqueza en biodiversidad, paisajes, cuerpos de agua, playas y franja costeras de una belleza excepcional en general, así como la riqueza histórica arqueológica ([Campos-Cámara, 2007](#)).



(Fuente: CAPA, Mahahual, Quintana Roo, 2010)

Figura 1.6: Mahahual en 2010

Fuera de turismo, otra principal actividad económica es la pesca y las especies más importantes son la langosta y el caracol que se venden principal en Cancún (Campos-Cámara, 2007). En cuanto a la actividad extractiva, destaca la forestal que aporta el 30% de producción de madera preciosa y 23% de madera dura tropical.

1.4 Referencias del Capítulo 1

- Campos-Cámara, B. L. (2007). Urbanización y turismo. En B. L. Campos Cámara (Ed.), *Urbanización y turismo* (págs. 7-11). Barcelona: Ediciones Pomares,S.A.
- Castillo-Villanueva, L., Velazquez Torres, D., & López Montejo, D. (2010). La planeación urbana-regional en Costa Maya. En B. L. Campos Cámara (Ed.), *ANÁLISIS TERRITORIAL DEL TURISMO REGIÓN COSTA MAYA* (págs. 75-110). Madrid ,España: Plaza y Valdes Editores.
- Díaz, A. E. (2011). Vegetación. En C. Pozo, N. Armijo Canto, & S. Calmé (Edits.), *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo I* (págs. 61-73). México, D. F: El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del.
- Diaz-Gallegos, J., & Acosta-Velázquez. (2009). En J. Espinoza-Avalos, G. Islebe, & H. Hernández-Arana (Edits.), *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal / Corozal: costa occidental del Mar Caribe* (págs. 225-237). Chetumal, Quintana Roo 77014: ECOSUR,.
- FAO/Unesco. (1988). *FAO/Unesco Soil Map of the World, Revised Legend, with corrections and updates*. Rome: FAO.
- Herrera Sansores, J. C., & Heridia Escobedo, J. D. (2011). Clima. En C. Pozo, N. Armijo Canto, & S. Calmé (Edits.), *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo I* (págs. 49-56). México, D. F.: El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd).

Capítulo 2

Fundamentación Teórica

2 Introducción

La tierra tiene muchas definiciones diferentes que varían de acuerdo con la disciplina del autor. La [FAO Y PNUMA., \(2000\)](#), la definen como:

“un área definible de la superficie terrestre de la tierra, abarcando todos los atributos de la biósfera inmediatamente por arriba y por debajo de esa superficie, incluyendo aquellos atributos climáticos cercanos a la superficie, el suelo y las formas del terreno, la superficie hidrológica (incluyendo lagos poco profundos, ríos, humedales y pantanos), las capas sedimentarias cercanas a la superficie, el agua subterránea asociada y las reservas geohidrológicas, las poblaciones animales y vegetales, los modelos de asentamientos humanos y los resultados físicos de la actividad humana pasada y presente (terrazas, estructuras para drenaje o almacenamiento de agua, caminos, edificios y otros).”

Esta amplia definición que abarca casi todos los aspectos de la tierra, nos ayudará a entender claramente, los conceptos y principios del cambio de uso/cobertura del suelo, sus causas e implicaciones, así como sus bases teóricas y los diferentes métodos de su evaluación.

2.1 La Cobertura y Uso del Suelo

La *cobertura y uso del suelo* es un sistema de clasificación que describe lo que está en la superficie de la tierra en cualquier lugar ([Verheye, 2000](#)). A pesar de que son tan estrechamente relacionados que a veces son utilizados como si fueran sinónimos, los dos términos son técnicamente diferentes. Para evitar confusión, es muy importante, como señalan [Aspinall & Hill \(2008\)](#), distinguir entre los dos términos. Por lo tanto, en este apartado, se discute sus características para diferenciarlas.

La *cobertura del suelo* corresponde a una descripción física del espacio, el material biofísico observado sobre la superficie terrestre, que incluye el suelo, la vegetación y agua ([Di Gregorio & Jansen, 1998](#)). Al principio, el significado no era tan amplio, y solo refería a la capa vegetal natural que caracterizaba un área particular. Sin embargo, el concepto ha sido extendido, permitiendo que varias categorías biofísicas sean distinguidas, como: estructuras humanas (edificios, pavimentos), así como otros aspectos del medio ambiente

natural, como la biodiversidad, aguas superficiales y subterráneas (Briassoulis, 2000a; Verheye, 2000; European Communities, 2001). La *Cobertura del suelo*, siendo el material físico sobre la superficie terrestre, interactúa directamente con la radiación electromagnética, y por lo tanto, puede ser observada directamente en el campo por sensores remotos como el ojo humano, fotografías aéreas, y los sensores de satélites (Fisher, et al., 2005).

En contraste, el *uso del suelo* es un poco más complicado. En la literatura existen dos enfoques: *funcional* y *secuencial*, dependiendo de la formación del autor o institución. Por ejemplo, los científicos sociales prefieren el enfoque *funcional*, y definen el uso del suelo como “*el empleo humano de la tierra en cuanto a su objeto socioeconómico*” (Meyer & Turner II, 1992). Mientras que los ecólogos, favorecen la perspectiva *secuencial* y lo clasifican en términos de las acciones inmediatas que las personas realizan en una cierta cobertura del suelo ya sea para mantener, modificar o convertirla (Di Gregorio & Jansen, 2005).

El denominador común en las dos definiciones es “*el implícito papel intencional de las personas para adaptar la cobertura natural del suelo para sus beneficios*” (Verheye, 2000). El uso del suelo definido de esta manera, entonces, establece un vínculo directo entre la cobertura del suelo y las actividades humanas, los cuales transforman el paisaje (Verheye, 2000; Helmut, et al., 2006) tales como: urbanización, agricultura, deforestación, construcción de vías de transporte y otras infraestructuras (Sherbinin, 2002; GLP, 2005).

A diferencia con la *cobertura del suelo*, el *uso de suelo*, sólo puede ser inferido, pero no explícitamente derivado de las imágenes satélites y aéreas, debido a que incluyen aspectos que están más allá de la caracterización biofísica de la tierra (Fisher, et al., 2005). Los atributos materiales terrestres tales como: las características del suelo, clima, topografía y vegetación, pueden ser vistos fácilmente. Mientras que la manera en la que estos atributos son utilizados o transformados por las acciones humanas, y sus aspectos jurídicos no tienen base espectral, y sólo pueden ser interpretados en sus contextos socio-económicos (Turner II & Meyer, 1994). Entonces, se requiere información socioeconómica suplementaria para detectar y analizar los usos principales del suelo, pero solo se la puede obtener a partir de los estudios de campo y entrevistas (Fisher, et al., 2005).

2.2 Cambio de la Cobertura y Uso de suelo

Meyer & Turner II. (1992), definen *Cambio de la Cobertura / Uso del Suelo (CCUS)*, desde una perspectiva ecológica, como lo son, los cambios ambientales que se ocupan de la alteración de la superficie terrestre y su cubierta biótica. Dichos cambios incluyen: la diversidad biótica, productividad primaria, tanto actual como potencial, calidad de suelo, erosión hídrica y sedimentación (IGBP & IHDP, 1999). En contraste, Briassoulis (2000a) define el mismo fenómeno, pero en un contexto más geo-espacial, como cambios cuantitativos en el tamaño terrestre (ya sea aumento o disminución) de un determinado tipo de uso/cobertura del suelo respectivamente, también, como consecuencia de la interacción entre los factores socio-económicos, institucionales y ambientales.

Como el *CCUS* es inherentemente espacial y dinámico, se lo evalúa a partir de una comparación del uso/cobertura del suelo en dos o más puntos en el tiempo (Aplin, 2004; Aspinall & Hill, 2008) – un análisis conocidos como *detección de los cambios* (Singh, 1989). Su magnitud varía de acuerdo con la escala de análisis, tanto temporal como espacial (Aspinall, 2008). Además, su proceso de cambio puede ser dramático (como en el caso de incendios forestales naturales o huracanes), sutil o gradual; asimismo los cambios pueden ser considerados como variables categóricas (clases) en un proceso continuo (Lambin, et al., 2003). La evaluación del *CCUS* también depende de la fuente de los datos utilizados, el método y esquema de clasificación y otros conjuntos de datos utilizados (Helmut, et al., 2006).

En cuanto a sus dimensiones, el *CCUS* puede ser agrupado en tres amplias categorías: como *conversión, modificación y mantenimiento* (Lambin, et al., 2003). La *conversión*, se refiere a un cambio de una cobertura o categoría de uso al otro, por ejemplo, del bosque a pastizal. Mientras que las *modificaciones* son las alteraciones sutiles en los atributos de una cobertura, que no cambie su clasificación general (Turner II, et al., 1994). Por otra parte, la *persistencia*, es el mantenimiento de la amplia utilización o categoría de cobertura del suelo, frente a los cambios dentro de los atributos físicos o funcionales de una cobertura, por ejemplo, de un área naturalmente cultivada a lo de irrigación (Briassoulis, 2000a). Pero, con la cobertura vegetal, dicho cambio significa una modificación o una alteración en los

componentes que comprende la vegetación, como cambios fenológicos (Fisher, et al., 2005).

Independientemente de sus definiciones particulares, los *CCUS* afectan el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos y ambientales, con implicaciones importantes para el desarrollo sostenible, la seguridad alimentaria, la biodiversidad y la vulnerabilidad de las personas y los ecosistemas a los impactos del cambio global (Lesschen, et al., 2005).

2.2 Procesos del CCUS

La *cobertura del suelo (terrestre)* es dinámica, y continuamente moldeado y transformado por la naturaleza, pero principalmente por actividades antrópicas, dirigidas a modificar o transformar la cobertura del suelo, con fines de producción y con menor medida al asentamiento (IGBP & IHDP, 1999). Dichos usos de la superficie terrestre ha crecido tanto, que ahora afecta a la estructura y funcionamiento de la biosfera con implicación sobre la sustentabilidad ambiental (Walsh, et al., 2004). Véase figura 2.1.

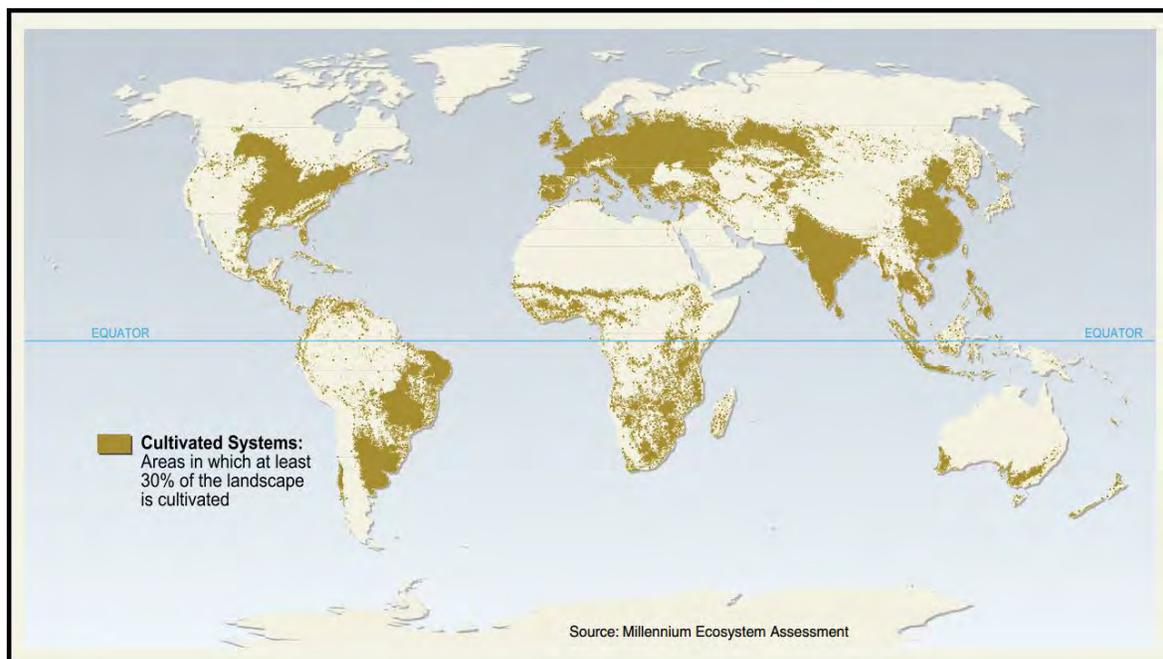


Figura 2.1 Extensión de los sistemas cultivados, en 2000.

Por ejemplo, en la escala mundial (Figura. 2.1), predomina la agricultura en el uso humano del suelo; de hecho, la FAO (2005) afirma que la zona bajo la administración agrícola ya

supera tierras arboladas en tamaño. Por esta razón, se han referidos a la actividades humanas, como las causas inmediatas (o directa) de los cambios en la cobertura del suelo, atribuyendo a las fuerzas motrices subyacentes, a un conjunto de factores socio económicos y políticos (Sherbinin, 2002; Rindfuss, et al., 2004; Lambin, et al., 2006). Como consecuencia, la comprensión del cambio en el uso del suelo es esencial para entender el cambio de la cobertura terrestre. Del mismo modo, para facilitar una mejor comprensión de los factores que influyen en *CCUS*, se deben poner mucha atención al contexto social que interviene en los cambios (Ojima, et al., 1994; IGBP & IHDP, 1999).

Como señalaran Lambin, et al. (2003), las causas próximas (directas) son las actividades humanas locales provenientes del uso intencional del suelo, los cuales afectan directamente la cobertura del suelo; Por ejemplo (Figura. 2.2):

1. La ampliación de las redes de transporte y la infraestructura
2. Aumento de la movilidad y el turismo
3. La ampliación y modernización de la agricultura y la ganadería;
4. Aumento de la demanda (comercial) de la energía, los recursos naturales y otros

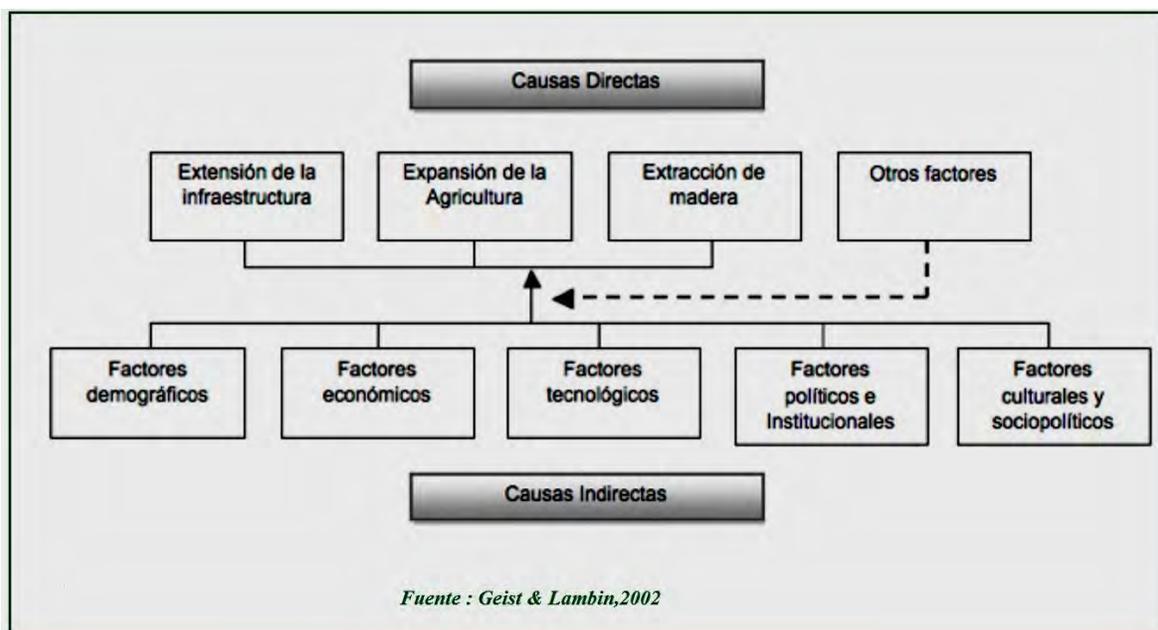


Figura 2.2: relación entre causas próximas y sus factores determinantes

Las actividades humanas convierten la cobertura del suelo de un tipo a otro, o modifican un tipo de cobertura del suelo ya existente, bajo la influencia de las fuerzas motrices subyacentes (Briassoulis, 2000a; Briassoulis, 2000b). Por ejemplo, a un nivel local, una causa próxima podría ser la decisión de un granjero para preparar una parcela de tierra para pastos o modificarlo a través de la introducción de nuevos pastos en pastizales ya existentes. Según Geist & Lambin, (2002), a nivel proximal, los cambios terrestres puede ser descritos por la combinación de múltiples factores sociales y biofísicos activos en lugar que por las variables individuales.

Por otra lado, las causas subyacentes (o indirectos) son los factores fundamentales o exógenos que sustentan las más directas causas de cambios del suelo (Lambin, et al., 2003). Dichos factores (la población o el desarrollo), mediadas por el entorno socio-económico (la demografía, economía de mercado, las instituciones y la cultura) e influenciados por las condiciones ambientales existentes, ocasionan un uso del suelo previsto (pastizal) de una cobertura vegetal ya existente (bosques), a través de la manipulación de las condiciones biofísicas de la tierra (Lambin, et al., 2003; Lambin & Geist, 2006).

Briassoulis (2000a), distingue otras fuerzas motrices subyacentes, las cuales mitigan los efectos negativos ocasionados por los cambios en la tierra que incluyen todas las formas de regulación formal e informal, ajustes de mercado, e innovación tecnológica. Según la autora, las fuerzas de mitigación podrían convertirse en fuerzas motrices de cambio en el uso del suelo. En el siguiente apartado se discute los factores que ocasionan los cambios en el uso de suelo.

2.3 Determinantes del CCUS: factores biofísicos y socioeconómicos.

Según Bürgi, et al. (2004) y Briassoulis (2000a), las fuerzas motrices son los factores que causan cambios observados en el paisaje; es decir, son los procesos influyentes en la trayectoria evolutiva del paisaje, y pueden ser clasificados como: *factores biofísicos* y *socioeconómicos*.

2.3.1 Factores biofísicos o Naturales

Los factores biofísicos (o naturales) son las diversas dotaciones naturales del territorio que controlan las tendencias y procesos del cambio del uso de suelo (Méndez, 1997). Bürgi, et al. (2004), distinguen entre los dos: *factores de sitio* y *perturbación natural*.

Factores de sitio son características biofísicas y procesos naturales (suelos, terrenos, clima, la hidrología, así como la flora y fauna nativa, la ubicación en relación con los asentamientos humanos y la infraestructura de transporte) cuya naturaleza, características y disponibilidad determinen los límites de lo que puede ser explotado, y así, induce diferencias en los patrones espaciales y temporales de la tierra (Briassoulis, 2000a; Verheye, 2000; Klein, 2003; Lambin, et al., 2003). Pero como dichos recursos son limitados en términos de su disponibilidad, entonces, existe un problema de escasez, que impulsa la actividad económica de acuerdo con la economía neoclásica (Méndez, 1997). Otras características específicas del sitio, que también, afectan el uso del suelo incluye: el acceso a las redes de comunicación y otras infraestructuras de transporte (aeropuertos, puertos), el acceso a los mercados, fuentes de materias primas y trabajadores y proveedores de los servicios (Briassoulis, 2000a; Verheye, 2000).

En contraste, *las perturbaciones naturales* son las fuerzas meteorológicas y ecológicas, tales como el clima, topografía y los procesos geomorfológicos, la sucesión vegetal, que alteran profundamente el medio ambiente, o dan forma al paisaje, incluso sin la interferencia de factores humanos (Briassoulis, 2000a; Klein, 2003; Bürgi, et al., 2004). Ejemplos de acción rápida de perturbaciones naturales incluyen: erupciones volcánicas, avalanchas, deslizamientos, huracanes y los incendios forestales naturales.

2.3.2 Factores Socio-economicos

Como se mencionó anteriormente, los factores socioeconómicos son las actividades fundamentales que sustentan las fuerzas motrices más directas. Son aquellas que se relación con la obtención de bienes materiales y servicios desinados a satisfacer las necesidades humanas (Méndez, 1997). Dichos factores, de acuerdo con Lambin (2004), pueden ser clasificados en grupos presentados y discutidos a continuación:

1. Factores o actores que afectan a las exigencias que se pondrán sobre la tierra, es decir, la población y la riqueza.
2. Factores que controlan la intensidad de la explotación de la tierra: a través de la tecnología.
3. Factores que están relacionados con el acceso o el control sobre los recursos de la tierra: la economía política.
4. Factores que crean los incentivos que motivan a los tomadores de decisiones individuales: la estructura política, actitudes y valores.

2.3.2.1 *La población y riqueza*

La mayoría de las perspectivas teóricas sobre el cambio ambiental sostienen que, en un determinado nivel de riqueza y la tecnología, la población es el factor determinante del consumo de recursos naturales (Meyer & Turner II, 1992). Los aspectos fundamentales de la demografía, que influyen en los cambios de uso del suelo son las características demográficas: el tamaño de la población, su tasa de cambio, su distribución, la estructura de edades y la migración (Redman, et al., 2004; Axinn & Ghimire, 2007).

El tamaño de la población, en gran parte intensifica la demanda para recursos naturales y los flujos de materiales, y de manera similar, el aumento de la población, también asume un aumento en el consumo de los recursos terrestres, ejerciendo presión sobre dichos recursos (IGBP & IHDP, 1999). Además, el crecimiento demográfico aumenta el desafío para mejorar las condiciones de vida y el suministro de los servicios sociales esenciales como la vivienda, transporte, saneamiento, salud, educación, empleo y seguridad, y también se hace más difícil enfrentar la pobreza, que es determinante en la degradación de la tierra (Axinn & Ghimire, 2007).

Por otra parte, el incremento del número de personas que viven en un área reduce la fracción de tierra dedicada a usos agrícolas en esa zona, al acelerar la transición hacia un entorno construido, que a su vez, lleva a la urbanización (Axinn & Ghimire, 2007). La urbanización implica grandes cambios en el estilo de vida, hábitos de consumo, el desarrollo de la infraestructura y residuos (lo que traduce en considerable CCUS) que también afectar a los bienes y servicios de los ecosistemas (Helmut, et al., 2006). De la

misma manera, la estructura de la población (las proporciones relativas de los niños, las personas de mayor edad y ancianos dentro de una población), puede aumentar el patrón de consumo y la construcción de edificios e infraestructura y así reducir la superficie de la tierra local dedicada a la flora (Axinn & Ghimire, 2007) ocasionando cambios en la cobertura del suelo (FAO Y PNUMA, 2000).

La migración interna e internacional, ya sea voluntaria o forzada, a veces puede aliviar u empeorar las presiones que otros factores demográficos y otras fuerzas ponen sobre la sociedad y el medio ambiente (FAO Y PNUMA, 2000). Entonces, una amplia disponibilidad de tierra de buena calidad y las tecnologías adecuadas de producción son esenciales para satisfacer las necesidades de una población en aumento (Lambin, et al., 2006).

Por último, la riqueza aumenta el consumo per cápita, ocasionando un cambio ambiental a través de la alta demanda de recursos naturales, aunque esta demanda puede reducirse mediante tecnologías avanzadas disponibles en las sociedades ricas (Turner II, et al., 1993). Por esta razón, los países ricos e industrializados son asociados con un cierto desarrollo positivo como la forestación, ya que tienen acceso a recursos extras para revertir la degradación de sus recursos naturales.

En contraste, las sociedades pobres y altamente dependientes, directa o indirectamente en los servicios de los ecosistemas para sobrevivir (incluyendo la agricultura, la ganadería y la caza) carecen de altos niveles de insumos para mitigar degradación de sus tierras. Como consecuencia, la pobreza, ampliada por otros factores, aumenta su vulnerabilidad a los cambios ambientales y a la degradación de los ecosistemas, a menudo atrapando las personas en ciclos de pobreza. (Millennium Ecosystem Assessment, 2005)

2.3.2.2 *La tecnología*

El cambio tecnológico es un elemento esencial del crecimiento y así, un importante factor determinante de los cambios pasados y futuros del paisaje. La tierra en un sentido físico es, a menudo, considerada como algo fijo y limitado en cierta medida para la mayoría de las actividades humanas como la agricultura, la industria, la silvicultura, la producción de energía, asentamiento, la recreación y la captación y almacenamiento de agua. La

tecnología disponible influye en la oferta económica de la tierra; es decir, el desarrollo tecnológico influye o altera la utilidad y la demanda para diferentes recursos naturales. Por ejemplo, la extensión de las infraestructuras básicas como carreteras, ferrocarriles y aeropuertos, puede abrir recursos previamente inaccesibles y conducir a su explotación o a su degradación (Helmut, et al., 2006). La creación de infraestructura, especialmente carreteras, es un paso crucial para facilitar los asentamientos humanos y para provocar la intensificación del uso de la tierra en esa región (Lambin, et al., 2003).

Además, según Turner II, et al., (1993), el desarrollo tecnológico y su aplicación (como mejoras de métodos para convertir biomasa a energía, el uso de tecnologías de procesamiento de la información en el cultivo y manejo de plagas; y el desarrollo de nuevas variedades de plantas y animales a través de la investigación en biotecnología) pueden llevar a grandes cambios en el uso del suelo.

2.3.2.3 La economía

Una economía en auge ocasiona la construcción de nuevos edificios comerciales e industriales. El crecimiento económico crea nuevos puestos de trabajo y por lo tanto atrae más trabajadores, lo que lleva a un crecimiento en la población, provocando la construcción de nuevas viviendas e infraestructura. Un cambio en el precio de los productos agrícolas y forestales puede afectar a las decisiones de los terratenientes a mantener la tierra en uso. El crecimiento económico y los patrones de consumo insostenibles representan una creciente presión sobre el ambiente, aunque esta presión es a menudo distribuida desproporcionadamente como se notó anteriormente.

2.3.2.4 Factores políticos e instituciones

Se refiere al modo en el que la sociedad divide el planeta con el fin de gobernar y controlar, a partir principalmente, de las instituciones. Las instituciones (político, legal, económico o tradicional) son '*las reglas del juego*' en una sociedad, que regulan las interacciones humanas, y así influyen en los cambios de tierra de manera formal o informal. Las limitaciones formales hacen referencia a la norma de la ley o los reglamentos, mientras que las restricciones informales pueden ser las convenciones o tradiciones mediadas por

factores culturales, económicos, políticos, religiosos, sociales y tradicionales. (Lambin, et al., 2006).

La organización del espacio se realiza por diversas razones, principalmente, para controlar lo que ocurre en una zona geográfica específica. El otro propósito, es crear y mantener la solidaridad dentro de la sociedad mediante la regulación de los procesos de competencia, solución de conflicto y cooperación en la siguiente manera:

1. Competencia: el control de la distribución, asignación y propiedad de los recursos escasos (incluyendo la tierra, el dinero, el poder y la capacidad de tomar decisiones autorizadas) ||
2. Conflicto: el mantenimiento del orden y la aplicación de la autoridad ||
3. Cooperación: la legitimación de la autoridad a través de la integración social (Horney, 1977); Elden, 2010); Stough et al., 2012)

El desempeño económico de un territorio a través del tiempo, es fundamentalmente influenciado por la forma en la que las instituciones evolucionan, cómo: disminuye la incertidumbre, la forma en que permiten a las personas tener acceso a la información y cómo disminuir las imperfecciones del mercado que aumentan los costos de transacción

2.3.2.5 Factores culturales

Según la UNEP (2007), la cultura es "*el conjunto de valores e instituciones que permiten a una sociedad desarrollar y mantener su identidad, actitudes sociales, las creencias y los valores de las percepciones individuales*". La cultura tiene un impacto considerable en los patrones de uso de la tierra a través de las percepciones de los diferentes valores sobre el progreso humano, con referencia a los conceptos de justicia y equidad, y en creencias diferentes acerca de la relación entre las personas y el mundo natural y espiritual (Redman, et al., 2004). Como la tierra es tanto un producto social, como una realidad física, entonces la cultura deja una profunda huella en los paisajes, por ejemplo las estructuras culturales (Bürgi, et al., 2004). Por lo tanto, la clave para comprender el cambio de la tierra, incluye reconocer el papel de los tomadores de decisiones y las personas que traen cambios a través de sus decisiones sobre los recursos de tierras y tecnologías, mediadas por la cultura.

2.3.3 Un esquema para relacionar el Uso del Suelo y los cambios en la Tierra

Se necesita una investigación básica adicional para entender cómo los factores determinantes del CCUS interactúan en contextos ambientales, históricos y sociales específicos para producir los diferentes usos del suelo (IGBP & IHDP, 1999). Para ello, será necesario precisar los vínculos entre los sistemas humanos que generan cambios tanto en el uso del suelo como en los sistemas físicos que se ven afectados por los cambios en la cobertura de suelo (Turner II, et al., 1993). En la Figura: 2.3, se presenta un modelo analítico que ilustra la relación entre las actividades humanas y el ambiente mediante el cambio en el uso/ cobertura del suelo.

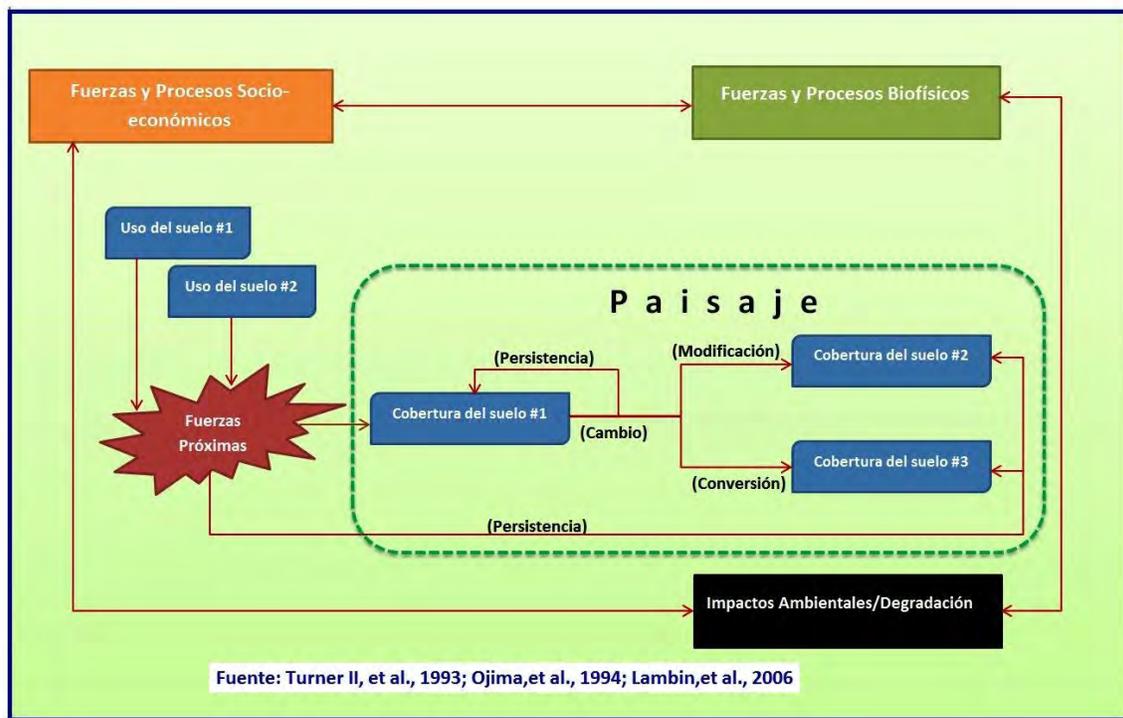


Figura: 2.3 Los vínculos entre fuerzas motrices y los cambios de uso/cobertura del suelo

En este esquema, existe una cobertura del suelo (sistema físico) en una relación sistémica con usos humanos (el uso del suelo) y las causas de esos usos. Las fuerzas motrices interactúan entre sí mismas y llevan a diferentes usos del suelo, en función del contexto social en el que operan. En el tiempo t_1 , las fuerzas motrices subyacentes de los humanos llevan a acciones precipitando la demanda del uso del suelo #1, que requiere la manipulación de la cobertura del suelo mediante tecnología empleada en las actividades

humanas, tales como la deforestación, cosecha, o la adición de nutrientes (fuentes próximas de cambio). Esta manipulación se dirige tanto a los cambios en la cobertura del suelo ya existente (# 1, # 2 o # 3) o para el mantenimiento de un cobertura particular (# 1). En el primer caso, la cobertura ya existente se la cambia a un nuevo estado que debe ser mantenido en la cara de los procesos naturales que la alterarían (física bucle de mantenimiento).

Los cambios en un nuevo estado de cobertura de suelo son de por lo menos dos tipos: *modificación* como en la cobertura del suelo tierra # 2 (por ejemplo, la fertilización de las tierras de cultivo o siembra de pastos exóticos en los pastizales) y *conversión* como en Cobertura del Suelo # 3 (por ejemplo, los bosques a tierras cultivadas, pastizales al asentamiento humano). Los procesos de *mantenimiento* sostienen la conversión de cobertura de suelo (# 3) o modificación (# 2). Por lo tanto, las fuentes próximas pueden ser consideradas como las de conversión, modificación o mantenimiento.

Las consecuencias ambientales de los usos de la cobertura del suelo (cambios en el estado de la cobertura) afectan a las fuerzas motrices originales mediante el bucle de realimentación de impactos ambientales. Del mismo modo estos cambios de cobertura de suelo (# 2 y # 3) se pueden repetir en otros lugares, que alcanzan una magnitud global que provoca el cambio climático, que a su vez retroalimenta el sistema físico local, afectando la cobertura del suelo y en la última instancia, las fuerzas motrices a través del bucle de impacto ambiental.

Independientemente de la causa, los impactos ambientales locales y globales o de la interacción de las fuerzas motrices en su contexto social (cambios en las fuerzas motrices en tiempo t_2) pueden desencadenar en un nuevo uso del suelo (# 2), con nuevas consecuencias para el sistema de uso / cobertura del suelo.

Según este marco, para estudiar los cambios en el paisaje, se deben considerar las condiciones y los cambios en la cobertura terrestre, causados por los cambios de uso del suelo y tasas de dichos cambios en los procesos: de conversión, modificación, mantenimiento, las actividades humanas, condiciones sociales que influyen en los dichos procesos (Turner II, et al., 1993).

2.4 Perspectivas Teóricas y Métodos de Análisis del CCUS

La relación entre seres humanos y el medio ambiente es compleja. Muchos marcos que incluyen una amplia gama de estudios empíricos, métodos y modelos, han sido formulados para iluminar esta relación (Redman, et al., 2004). Al principio, el vínculo entre la población y la naturaleza han sido el foco de una serie de teorías basadas en Malthus y los teoremas de Boserup. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que los cambios ambientales son mucho más complejos y no pueden ser abordados completamente, solo con el tamaño de la población (Lesschen, et al., 2005). Los cambios ambientales podrían ocurrir ya sea bajo la expansión, la disminución o el nivel constante de la población mediado por la tecnología, que juega un papel importante (Lambin, et al., 2003; Lambin, et al., 2006).

Como se señaló anteriormente, (apartado 2.3), cambios ambientales son influenciados por una variedad de factores biofísicos y sociales que interactúan juntos para ejercer diversas presiones, oportunidades, vulnerabilidades a las organizaciones sociales. Como consecuencia, estudios recientes han tratado de explicar los cambios ambientales en función de los factores socioeconómicos, políticos, tecnológicos, naturales y culturales (Lambin, et al., 2003). Por otra parte, se han logrado avances en vincular estos factores anteriormente mencionados, con el análisis de percepción remota (Teledetección) para contribuir a un mejor comprensión de los cambios ambientales (Rindfuss, et al., 2004).

Sin embargo, a pesar de este progreso, hasta la fecha, una teoría general que explica los cambios en el ambiente aún no ha sido formulado. Esta deficiencia se debe, en gran parte a la complejidad de los procesos de cambio del paisaje y el hecho de que los investigadores han basándose en las teorías de las disciplinas en las que no fueron capacitados (Uriarte, et al., 2010). Por esta razón, la mayoría de los estudios del **CCUS**, a menudo, se basan en los marcos teóricos generales de otras disciplinas como la geografía, la economía, la sociología y las ciencias ambientales (Turner II, et al., 2007)

Será muy útil definir de qué se entiende de la teoría. La palabra griega '*teoría*' significa, literalmente, '*mirando algo*', '*observando algo*'. Entonces, una teoría; siendo "*un conjunto de declaraciones conectadas y utilizadas en el proceso de explicación*" o "*un sistema de pensamiento que, a través de construcciones lógicas, suministra una explicación de un*

proceso, comportamiento o cualquier otro fenómeno de interés tal como existe en realidad", constituye una base de conocimiento (Briassoulis, 2000b). En base de esta definición, una teoría del **CCUS** es, un conjunto de proposiciones que sirven para comprender el "qué" de cambio en la tierra y el "por qué" de este cambio". Como apunta Briassoulis, (2000b), entonces, una teoría del cambio en el paisaje debe describir la estructura de los cambios de un tipo a otro, y ser capaz de explicar por qué ocurren dichos cambios, iluminar los mecanismos de estos cambios, y finalmente, procura identificar las fuerzas motrices. Además, dichas teoría, tendría que incorporar la historia pasada de las agentes involucrados en los cambios y deber ser capaz de predecir la probabilidad de cambio en el futuro (Lambin, et al., 2006). Por consecuente, varios marcos teóricos han sido elaborados para tratar de explicar y analizar la dimensión humana del cambio ambiental (Turner II, 1997). Como se notara a continuación, el foco principal de estos marcos se centra en la valoración de los recursos naturales y la estructura socio-política de uso de recursos naturales. A continuación, se discuten en los siguientes apartados, relevantes perspectivas teóricas que han sido utilizados con mayor frecuencia en la literatura del **CCUS** que incluyen: *población versus Ambiente* (Malthus y Boserup); *Principios económicos* (Oferta-renta y Von Thünen) (Koomen & Stillwell, 2007); *Perspectiva Social-Ecológicas* (Ecología política y la ciencia del cambio en la tierra) (Olson, et al., 2004).

3.1 La Población versus Medio Ambiente

La relación entre la población y el medio ambiente ha sido objeto de muchas teorías desde la antigüedad. Las dos teorías más importantes sobre los cuales se basan los recientes debates son perspectivas Maltusiana (límite al crecimiento) y Boserupiana (cuerno de la abundancia). Ambas perspectivas hacen énfasis en las relaciones recíprocas, lineal, y directa que existen entre la población y su entorno.

La teoría maltusiana (Malthus, 1798, p. 4) afirma que el crecimiento poblacional humano siempre tiende a sobrepasar las capacidades productivas de los recursos de tierras. Como resultado, los recursos ponen una restricción directa sobre el crecimiento de la población. Entonces, los problemas ambientales deben ser interpretados, como los mecanismos naturales de compensación; los que limitan la presión del crecimiento de la población.

Según Malthus, las demandas de la población ponen límites directos sobre la disponibilidad de recursos y que, los recursos, a su vez, ponen una restricción directa sobre el crecimiento de la población.

Por otro lado, [Boserup, \(1965\)](#), la antítesis de Malthus, toma explícitamente en cuenta los cambios tecnológicos, lo que Malthus ignora, y sostiene que son los aumentos de la población que estimulan innovaciones en la agricultura en forma de cambios tecnológicos e institucionales. Boserup reconoce la capacidad de la gente para innovar, inventar y adaptarse a situaciones difíciles ([Turner II & Shajaat Ali, 1996](#)), de acuerdo con el viejo adagio - "*la necesidad es la madre de las invenciones*". Por lo tanto en su tesis, Boserup considera el papel de la población como una variable independiente que influye en el desarrollo de la tecnología agrícola, que a su vez afecta la capacidad productiva de los recursos.

En contraste, la perspectiva maltusiana, considera la tecnología y el medio ambiente (los recursos de la tierra) como variables independientes que trabajan en conjunto para determinar la variable dependiente de la población, visto en términos de crecimiento y el tamaño de la población.

Las teorías Maltusiana y Boserupiana son importantes, y proporcionan una base para la comprender la relación entre la dinámica de la población humana y los recursos naturales. No obstante, han sido criticadas por centrarse únicamente en las características demográficas para explicar los cambios ambientales. Por ejemplo [Stonich \(1993\)](#), sostiene que el crecimiento demográfico no es una explicación causal suficiente del creciente abuso de la tierra, la destrucción de los bosques, el suelo y otros problemas ecológicos en una región. Stonich señala que, más bien, son la desigualdad en el acceso a la tierra y los patrones de inversión de los grandes terratenientes, ninguno de los cuales depende de la presión de la población, constituyen la base de la destrucción generalizada del medio ambiente.

Por su parte, [Wangari, \(2003\)](#) advierte que los puntos de vista Maltusiana y Boserupiana son estrechas, y conlleva la proposición de medidas simples de control de la población o la adopción de nuevas tecnologías como soluciones a los complejos problemas de la

degradación de la tierra y la pobreza. La autora señala que la ecología cultural presenta un panorama más amplio, centrándose en la evolución de los sistemas culturales a través de la adaptación ambiental. La ecología política (adoptada en este estudio) es uno de los marcos teóricos que han evolucionado de la ecología cultural.

3.2 Principios económicos: Teoría oferta - renta.

Modelos de Von Thünen y Ricardo son las dos teorías históricas más importantes para enmarcar el debate sobre la relación entre los cambios de cobertura/uso del suelo ([Mertens & Lambin, 2000](#)). Ricardo explicó las variaciones en precios de la tierra de acuerdo a la fertilidad o la calidad del suelo. Según Ricardo, una mejor calidad de la tierra es más rentable que las tierras de menor calidad y esta diferencia lleva al pago de un precio más alto para esa tierra ([Koomen & Stillwell, 2007](#)).

En contraste, Von Thünen - en un contexto más geo-espacial - explicó patrones de uso de la tierra, en función de las variables de costes de la distancia y el transporte. Según Von Thünen, la intensidad agrícola disminuye con el aumento de distancia de los centros de mercado ([Koomen, et al., 2007](#)). Esta explicación, constituye una base sobre la que se elaboran las teorías del uso de suelo; sin embargo, pasa por alto varios otros factores biofísico, socioeconómico e institucional que influyen en el uso del suelo ([Lesschen, et al., 2005](#)).

No cabe duda de que los cambios ambientales y los problemas que surgen como resultado son impulsados, principalmente, por el deseo de utilizar la tierra como un factor en la producción de bienes agrícolas e instalaciones residenciales. Sin embargo, como señalaron [Lesschen, et al. \(2005\)](#), la complejidad de los procesos que determinan los patrones de uso del suelo actual y la ubicación de los futuros cambios en el uso del suelo, son tales, que no pueden entenderse completamente, desde modelos teóricos tan “simples”; a pesar de que establecieron los marcos económicos espaciales básicos para entender cambio de sistema del uso del suelo y la agricultura. Como consecuencia, se han ampliado y mejorado las teorías de Ricardo y de Von Thünen en una serie de modelos econométricos, de los cuales el más citado es el estudio de [Chomitz & Gray, \(1996\)](#) para el uso de la tierra en Belice - un ejemplo de un análisis empírico basado en el von modo de Thünen.

3.3 Perspectivas Social-Ecológicas - Enfoques recientes en el estudio de CCUS

Existen muchas tradiciones epistemológicas, incluyendo la filosofía realista (adoptada para esta investigación), que pretenden iluminar la relación entre los seres humanos y el medio ambiente. De acuerdo con Briassoulis (2000b), las explicaciones realistas utilizan abstracción para identificar atribuciones causadoras necesarias de las estructuras específicas que ocurren en condiciones específicas. Según la autora, el realismo ve el mundo como diferenciada y estratificada, y compuesto no sólo por los acontecimientos (como lo hace el positivismo), sino también de los mecanismos y estructuras. Dichas estructuras se las ven como conjuntos de objetos relacionados entre sí que tienen propiedades esenciales como formas características de actuar. Según Briassoulis (2000b), el análisis realista intenta identificar las cadenas causales que explican los hechos particulares en términos del comportamiento de estas estructuras. Los enfoques realistas adoptadas para este estudio son la *ecología política* y el análisis *CCUS* discutidos a continuación.

3.3.1 Enfoque de ecología política

La ecología política estudia la sociedad y el ambiente a través de un enfoque que operan en diferentes escalas tanto espaciales como temporales. Y los parámetros de dicho enfoque subrayan que los cambios en el paisaje resultan de las interacciones entre la sociedad y medio ambiente reflejando los procesos económicos, políticos y la naturaleza (Turner II & Robbins, 2008). La ecología política utiliza estos parámetros uniendo las ciencias naturales, sociales y SIG en la búsqueda de conocimiento vinculado al sistema socio-ecológico (Turner II, et al., 2007; Turner II & Robbins, 2008). Sin embargo, para estudiar el sistema socio-ecológico con un enfoque ecología política, se debe resaltar las características del sistema como la desigualdad social y su impacto, aquellos elementos que tienen su origen en el poder social, cultural y económico y los sectores de la sociedad que son desempleados, marginados y tienen menos derecho (Wangari, 2003; Olson, et al., 2004; Turner II & Robbins, 2008). Como Blaikie & Brookfield 1978 (citado en Olson et al., 2004) señalan, el estudio del cambio ambiental y sus consecuencias...

"exige un enfoque que puede abarcar los efectos interactivos, la contribución de las diferentes escalas geográficas y de las jerarquías de las organizaciones socioeconómicas

(por ejemplo, personas, familias, pueblos y región, provincia o mundial) y las contribuciones entre los cambios sociales y ambientales a través del tiempo”.

Como consecuencia, el enfoque de ecología política es lo más adecuado para el estudio de cambios de paisaje en la *RCM*, ya que es una región socialmente construida (Campos-Cámara, 2010), en donde los factores sociales y ecológicos se unen para dar forma al paisaje. Por lo que es un laboratorio perfecto para poner a prueba la teoría de la ecología política de acuerdo con los siguientes conceptos basados en Olson et al, (2004):

- El enfoque de sistema Integración de los procesos sociales y ecológicos como los componentes activos del sistema de cambio de la tierra;
- El empleo de un marco de tiempo histórico relevante para entender la dimensión temporal de los patrones de interacción entre la sociedad y el medio ambiente;
- Los procesos puede operar a diferentes escalas, espacial y temporal (huracán, el crecimiento demográfico o los cambios en los instituciones)
- Reconoce que los acontecimientos en un área puede tener repercusión en otras áreas a través de procesos como la migración, el cambio institucional;
- Reconocer el papel del poder en la política, la resolución de los concursos y los conflictos

2.3.2 Análisis del CCUS

Análisis del *CCUS* es una de las tradiciones de investigación de la interacción de seres humanos con el medio ambiente que comprende un componente fundamental de cambio ambiental global e investigación de sostenibilidad (Turner II, et al., 2007). Busca entender las dinámicas humanas y ambientales que dan origen a los cambios del paisaje, no sólo en función de su tipo y magnitud, sino también su ubicación (Rindfuss, et al., 2004). Fue estimulado, en parte, por el reconocimiento de que el cambio global y la sostenibilidad no pueden ser abordados adecuadamente sin una mejor comprensión de los procesos de *CCUS* (Turner II, et al., 2007; Turner II, 2010).

Esta investigación es realizada por varias disciplinas, incluyendo geo-espacial, social y natural en un esfuerzo cada vez más conocida como "*La ciencia de cambios de la*

tierra"(Land Change Science en inglés) (Rindfuss, et al., 2004; Olson, et al., 2004). Este enfoque resalta la integración de factores ambientales (naturales o ecológicos) con contextos sociales para evitar errores de simplificaciones en los estudios de los procesos de cambio (Lambin, et al., 2001).

Como la ciencia del *CCUS* ha sido fuertemente influenciada por los geógrafos trabajando en ciencia de la información geográfica (Rindfuss, et al., 2004), este enfoque típicamente emplean tecnologías de *SIG* y teledetección para estudiar cambio en el paisaje; además centran en los aspectos biofísicos de la dinámica de cobertura terrestre (Turner II, et al., 2007). Dichos estudios consiste en la interpretación de la información geográfica a partir de análisis de fotografías aéreas, imágenes satelitales y las mediciones terrestres o mapas (Olson, et al., 2004). Al interpretar datos de diferentes períodos de tiempo para la misma área, se pueden determinar los cambios temporales en esta área (Singh, 1989; Mas, 1999). La integración de percepción remota con otros datos espaciales, tales como carreteras, elevación o límites administrativos en un sistema de información geográfica (*SIG*) facilita una mejor interpretación de información de cambios en el paisaje (IGBP & IHDP, 1999).

Olson, et al. (2004), consideran el análisis del *CCUS* como una herramienta particularmente útil en la investigación del medio ambiente, ya que brinda una rica información espaciotemporal sobre los cambios del paisaje, mientras que un análisis de las causas asociadas puede iluminar cómo las tendencias en la gestión están afectando el medio ambiente. Un resumen de alguna información proporcionada por el análisis del *CCUS* basado en Olson et al, (2004) incluyen:

- Identificación de los componentes del paisaje que están cambiando, la razón de estos cambios y su impacto ambiental;
- Determinación de los efectos de las políticas y programas anteriores sobre la gestión de tierras a fin de obtener las lecciones aprendidas de la experiencia positiva y preventiva
- Reconocimiento de los puntos críticos y las áreas donde el cambio está ocurriendo rápidamente ("puntos calientes del cambio"), zonas donde el desarrollo o el cambio

ha estancado o lugares en los que las personas o el medio ambiente son especialmente vulnerables a las perturbaciones naturales o hechos económicos

- Puntos de influencia en el sistema, a fin de mejorar gestión de las tierras;
- escenarios del impacto de las posibles políticas o programas

2.3.3 Métodos para evaluar CCUS

El marco metodológico de análisis del *CCUS* es basado en la integración de las teorías clásicas de la Geografía y las últimas tecnologías de la percepción remota, los SIG y GPS, estadística y computación (Verheye, 2000). Ha habido un cambio notable en los estudios de *CCUS*. Estudios recientes han alejados de un solo enfoque de detección e identificación de cambios en el paisaje (Lambin, et al., 2001) y comprensión de sus fuerzas motrices (Bürgi, et al., 2004), hacia modelado de sistemas terrestres para predecir los cambios y a la exploración de su posibles trayectorias (Verburg, et al., 2006). Apoyado en lo anterior, se deben considera el monitoreo de cambios en el paisaje, sólo como un primer paso esencial para ayudar en la identificación de las fuerzas motrices y proporcionar los datos necesarios para el modelado (Bürgi, et al., 2004). La evaluación de la magnitud e implicaciones ecológicas de cambio en la cobertura terrestre cobra más relevancia y utilidad cuando es acompañada por el modelado de los vínculos entre las configuraciones socioeconómicas y los procesos de los cambios (IGBP & IHDP, 1999).

Pero como el *CCUS* es un fenómeno complejo que se manifiesta en varias dimensiones, es importante identificar un mecanismo de categorización adecuada que diferencie los varios tipos de cambios del paisaje, para evaluar y monitorear las condiciones del ambiente. Según Byron & Lesslie, (2008), tal mecanismo debe abordar los siguientes cuatro aspectos:

- 1) *Cambio en el área*: pérdida o ganancia en el la extensión área. Esto proporciona una indicación de si cobertura/uso del suelo de un determinado área están aumentando o disminuyendo a través del tiempo. Dicho información se la deben presentar estadísticamente, de manera gráfica o espacial; y compara los cambios identificados y las tendencias observadas.
- 2) *Transformación*: el modelo de transición de coberturas/uso del suelo un uso del suelo a otro. Por ejemplo, un área puede ser cultivada un año, pasa a pastizal el

próximo año y, a continuación, volver a ser cultivada el siguiente año. Se pueden utilizar una matriz de cambio para expresar las transformaciones observadas.

- 3) *Dinámica*: las tasas de cambio y la periodicidad en la extensión de área o transformaciones. La característica espaciotemporal de cambio puede ser explorado por el análisis de las tasas de cambio. Análisis exitoso de la dinámica coberturas/uso del suelo requiere, datos consistentes y de alta calidad. A menudo no es posible obtener datos suficientemente consistentes en el año o temporadas consecutivas.
- 4) *Predicción*: modelado de patrones espaciales y temporales de cambio. El uso de modelos para predecir los usos de la tierra el pasado, presente y futuro sobre la base de ciertas reglas, relaciones y datos de entrada puede ayudar a identificar los factores clave de cambio de uso de la tierra, poner en práctica la planificación de escenarios, y llenar los vacíos en la disponibilidad de datos

Existe una diversidad de enfoques para analizar los procesos del *CCUS*, los cuales varían en gran medida de acuerdo con la escala y los objetivos de las aplicaciones previstas que, a su vez, determinan las diferentes técnicas necesarias (Lesschen, et al., 2005). Dichas técnicas también varían dependiendo de la disciplina de los investigadores. Por ejemplo científicos sociales están interesados principalmente en la explicación de los cambios observados uso del suelo, mientras que los ecologistas se centran en exploración y predicción (Houet, et al., 2010). Se pueden encontrar discusiones más amplias y detalladas sobre las distintas técnicas y modelos para estudiar el *CCUS* en Briassouli (2000b) y Koomen, et al. (2007). En este capítulo, se discute solo los que fueron empleados en la tesis: Teledetección de cambios y análisis geoespacial.

2.3.3.1 Teledetección de cambios

Detección de cambios a partir de percepción remota (Teledetección) es un proceso para determinar y evaluar las diferencias temporales de las propiedades de la cubierta terrestre, mediante la observación de ellos en distintos momentos, utilizando imágenes adquiridas por los sensores multi-espectrales basados en satélites (Mas, 1999). Se trata de una aplicación de un conjunto de datos multi-temporales para analizar cuantitativamente los efectos temporales y espaciales de los cambios de los suelos

Como se señaló anteriormente, la cobertura terrestre comprende atributos materiales biofísicos, que pueden observarse directamente por los satélites. Si se compara secuencialmente mapas de cobertura terrestre derivados de los datos imágenes satelitales de la misma área, es posible cuantificar explícitamente los siguientes cambios en el estado o naturaleza de la cobertura terrestre (Lambin, 1997):

1. Conversión de la cubierta terrestre (cambio de estado o de un tipo a otro, por ejemplo, los bosques a zona agrícola)
2. Modificación de la condición la cobertura terrestre (por ejemplo, bosques degradados o estresado)
3. Transición de la cobertura terrestre (por ejemplo, cambio de zona agrícola al área urbana).
4. El cambio en las propiedades biofísicas de una cobertura terrestre (por ejemplo, la acumulación de biomasa)

Esta información es crucial en el análisis espaciotemporal de los patrones del cambio en el paisaje, sin embargo, la medición directa no proporcionará suficiente entendimiento para analizar las fuerzas impulsoras del *CCUS* (IGBP & IHDP, 1999; GLP, 2005). Entonces se deber realizar un análisis geoespacial para inferir las fuerzas motrices y procesos de cambios y así facilitar un manejo ambiental más integrado. Modelos son utilizados en análisis espaciales del *CCUS*.

2.3.3.2 Análisis geoespacial

Según (Wainwright & Thornes, 2004), modelos son simplificaciones de la realidad o formas numéricas que representan una teoría, proporcionando así, un enfoque sistemático para entender un problema de la investigación. Gran parte de las investigaciones sobre *CCUS* utilizan modelos para abordar las cuestiones - *cuándo, dónde y por qué* se produce el cambio paisajístico (D.G.Brown, et al., 2000; Lambin, 2004). Lo que hace que la elaboración de modelos sea una técnica importante para investigaciones exploratorias o, que ponen a prueba nuestra comprensión de los procesos claves de *CCUS*, y para describir dichos procesos en términos cuantitativos (Lambin, et al., 2001; Lambin, 2004). Eso explica por que los modelos son considerados como herramientas que apoyan el análisis de procesos y consecuencias de los cambios en el paisaje.

Por ejemplo, en esta tesis (en capítulo 3), se utilizaron dos modelos en Idrisi Selva: el *CROSSTAB* y el *Modelador de Cambios en el Terreno (LCM)*, los cuales son ejemplos de modelos estadísticos espaciales que combinan la teledetección, *SIG* y métodos estadísticos para analizar la ubicación de las diferentes categorías de cambios en la cobertura terrestre (derivada de datos de sensores remotos) en relación con datos variables auxiliares geoespaciales del paisaje (IGBP & IHDP, 1999). El *LCM* también ofrece proyecciones cartográficas de los cambios y facilitando el análisis las implicaciones de dichos cambios en el paisaje (Eastman, 2015, p. 204). Y muy importante, el *LCM* también incluye herramientas especiales para la evaluación de *REDD* (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación) para las estrategias de mitigación del cambio climático (Eastman, 2015).

2.4 Referencias del Capítulo 2

- Aplin, P. (2004). Remote sensing: land cover. *Progress in Physical Geography*, 28(2), 283-293.
- Aspinall, R. J. (2008). Basic and Applied Land Use Science. In R. J. Aspinall, & M. J. Hill (Eds.), *Land use change : science, policy, and management* (pp. 3-15). Boca Raton: CRC Press;Taylor & Francis Group.
- Aspinall, R. J., & Hill, M. J. (2008). *Land Use:Science, Policy and Management*. Boca Raton: CRC Press;Taylor & Francis Group,.
- Axinn, W. G., & Ghimire, D. J. (2007). *Social Organization, Population, and Land Use*,. Michigan: Population Studies Center Report Number 4: Scientific reports (1-84).
- Boserup, E. (1965). *The Conditions of Agricultural Growth*. London: George Allen and Urwin.
- Briassoulis, H. (2000a). *FACTORS INFLUENCING LAND-USE AND LAND-COVER CHANGE*. Encyclopedia of Life Support Systems(EOLSS).
- Briassoulis, H. (2000b). *Analysis of land use change: Theoretical and modeling approaches*. Regional Research Institute. *The Web Book of Regional Science:West Virginia University*. Retrieved Marzo 15, 2012, from www.rrri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm
- Bürgi, M., Hersperger, M. A., & Schneeberger, N. (2004). Driving forces of landscape change-current and new directions. *Landscape Ecology*, 19, 857-868.
- Byron, I., & Lesslie, R. (2008). Spatial Methodologies for Integrating Social and Biophysical Data at a Regional or Catchment Scale . In R. J. Aspinall, & M. J. Hill (Eds.), *Land Use Change:Science, Policy and Management* (pp. 17-37). Boca Raton: CRC Press,Taylor & Francis Group.
- Campos-Cámara, B. L. (2010). Region Turística:Costa Maya. In B. L. Campos (Ed.), *Análisis Territorial Del Turismo Región Costa Maya* (pp. 9-50). México,D.F: Plaza y Valdes Editores.
- Cheong, S.-M., Brown, D. G., Kok, K., & Lopez-Carr, D. (2011). Mixed methods in land change research:towards integration. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 37, 8-12.
- Chomitz, K. M., & Gray, D. A. (1996). Roads, Land Use, and Deforestation:A Spatial Model Applied to Belize. *THE WORLD BANK ECONOMIC REVIEW*, 10(3), 487-512.
- D.G.Brown, B.C.Pijanowski, & J.D.Duh. (2000). Modeling the relationship between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest;USA. *Journal of Environmental Management*, 2000, 247-263.

- Di Gregorio, A., & Jansen, L. (1998). *Di Gre Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual*. Rome: FAO.
- Di Gregorio, A., & Jansen, L. J. (2005). Land Cover Classification System (LCCS) Version 2: Clasification Concepts and User manual. *Environmetal & Natural Resources Series*, 2(8), 1-208.
- Eastman, R. (2015). *IDRISI TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System Manual*. Worcester, MA. USA: Clark Labs. Clark University.
- European Communities. (2001). *Manual of concepts on land cover and land use information systems*. .
- FAO Y PNUMA. (2000). El Futuro de Nuestra Tierra:ENFRENTANDO EL DESAFÍO. *GUÍAS PARA LA PLANIFICACIÓN INTEGRADA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS DE LA TIERRA*.
- Fisher, P., Alexis J, C., & Wadsworth, R. (2005). Land Use and Land Cover: Contradiction or Complement? In P. Fisher, & U. J. David (Eds.), *Re-Presenting GIS* (pp. 85-89). West Sussex,England: John Wiley & Sons Ltd.
- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2002). Proximate causes and underlying forces of tropical deforestation. *BioScience* , 52(2), 143-150.
- Giri, C. P. (2012). Brief Overview of Remote. In C. P. Giri (Ed.), *Remote Sensing of Land Use and Land Cover: Principles and Applications*, (pp. 3-11). Boca Raton: CRC Press;Taylor & Francis Group.
- GLP. (2005). *Science Plan and Implementation Strategy*.IGBP Report No. 53/IHDP Report No. 19 (IGBP Report No. 53/IHDP Report No. 19 ed.). Stockholm: IGBP Secretariat.
- Helmut, G., McConnell, W., Lambin, E. F., Moran, E., Alves, D., & Rudel, T. (2006). Causes and Trajectories of Land-Use/cover Change. In E. F. Lambin, & H. Geist (Eds.), *Land-Use and LandCover Change : Local Processes and Global Impacts* (pp. 41-70). Verlag Berlin Heldenberg: Springer.
- Houet, T., Verburg, P. H., & Loveland, T. R. (2010). Monitoring and modelling landscape dynamics. *Landscape Ecol*, 25, 163-167.
- IGBP & IHDP. (1999). Land-Use and Land-Cover Change (LUCC)-Implementation Strategy. *IGBP REPORT 48 IHDP REPORT 10*.
- Klein, J. K. (2003). *Integrated Environmental Planning*. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Klein, J. K. (2003). *Integrated Environmental Planning* (First ed.). Oxford: Blackwell Science Ltd.

- Koomen, E., & Stillwell, J. (2007). MODELLING LAND-USE CHANGE:Theories and methods. In *MODELLING LAND-USE CHANGE* (pp. 1-21). Dordrecht: Springer.
- Koomen, E., Rietveld, P., & de Nijs, T. (2007). Modelling land-use change for spatial planning support. *Ann Reg Sci*.
- Lambin, E. F. (1997). Modeling and monitoring land.cover change processes in tropical regions. *Progressin Physical Geography*, 21(3), 375-393.
- Lambin, E. F. (2004). Modelling Land-Use Change. In J. Wainwright, & M. Mulligan (Eds.), *Environmental Modelling:Finding Simplicity in Complexity* (pp. 245-254). London: John Wiley & Sons,Ltd.
- Lambin, E. F., Geist, H., & Lepers, E. (2003). DYNAMICS OF LAND-USE AND LAND-COVER CHANGE IN TROPICAL REGIONS. *Annu. Rev. Environ. Resour*, 28, 205-241.
- Lambin, E. F., Geist, H., & Rindfuss, R. R. (2006). Introduction: Local Processes with Global Impacts. In E. F. Lambin, & H. Geist (Eds.), *Land-Use and Land-Cover Change : Local Processes, Global Impacts* (pp. 1-8). Berlin: Springer.
- Lambin, E. F., Geist, H., & Rindfuss, R. R. (2006). Introduction: Local Processes with Global Impacts. In E. F. Lambin, & H. Geist (Eds.), *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts* (pp. 1-9). Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Helmut, J. G., & et al. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change* , 11, 261-269.
- Lambin, E., Geist, H., & Lepers, E. (2003). Dynamics of Land-use and Land-cover change in the Tropical Regions. *Annu. Rev. Environ. Resour*, 28, 205-241.
- Lesschen, J. P., Verburg, P. H., & Staal, S. J. (2005). *Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems* (III. Land-Use and Land-Cover Change (LUCC) Project. IV ed.). Nairobi: International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP) V. International.
- Malthus, T. (1798). *An Essay on the Principle of Population*. london: Printed for J. Johnson, in St. Paul's Church-Yard.
- Mas, J. (1999). Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 20(1), 139-152.
- Méndez, R. (1997). *Geografía económica: la lógica espacial del capitalismo global* (Primera ed.). Barcelona: Editorial Ariel, S.A.
- Mertens, B., & Lambin, E. F. (2000). Land-Cover-Change Trajectories in Southern Cameroon. *Annals of the Association of American Geographers*, 90(3), 467-494.

- Meyer, W., & Turner II, B. (1992). HUMAN POPULATION GROWTH AND GLOBAL LAND-USE/COVER CHANGE. *Annu.Rev.Ecol.Syst*, 39-61.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being : synthesis / Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, DC: Island Press.
- National Research Council. (2005). Population, Land Use and Environment: Research Directions. In B. Entwistle, & P. C. Stern (Eds.). Washington, DC: The National Academic Press.
- Ojima, D. S., Galvin, K. A., & Turner II, B. L. (1994). The Global impact of Land-use Change. *BioScience*, 44(5), 300-304.
- Olson, J. M., Misana, S., Campbell, D. J., Mbonile, M., & Mugisha, S. (2004). *Land Use Change Impacts and Dynamics (LUCID) Project Working Paper 48*. Nairobi: Kenya: International Livestock Research Institute.
- Redman, C. L., Grove, J. M., & Kuby, L. H. (2004). Integrating Social science into the Long-Term Ecological Research (LTER) Network: Social Dimensions of Ecological Change and Ecological Dimensions of Social Change. *Ecosystems*, 7, 161-171.
- Rindfuss, R. R., Walsh, S. J., Turner II, B., Fox, J., & Mishra, V. (2004). Developing a science of land change: Challenges and methodological issues. *PNAS*, 101(39), 13976-13981.
- Sherbinin, d. (2002). "Land-Use and Land-Cover Change". In A *CIESIN Thematic Guide* (pp. 1-149). Sherbinin, d., 2002. "Land-Use and Land-Cover Change". Palisades, NY : Sherbinin, d., 2002. "Land-Use and Land-Cover Change". Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University.
- Singh, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely- sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 2753-2767.
- Turner II, B. L. (1997). The sustainability principle in global agendas: implications for understanding land-use/cover Change. *The Geographical Journal*, 163(2), 133-140.
- Turner II, B. L. (2010). Land change in the southern Yucata´n: case studies in land change science. *Reg Environ Change*, 10, 169-174.
- Turner II, B. L., & Meyer, W. B. (1994). Change in Land Use and Land Cover: A Global Perspective. *Turner II, B. L. & William, B. M., 1994. Ch Cambridge CB2 1RP, United Kingdom: Cambridge University Press*.
- Turner II, B. L., & Robbins, P. (2008). Land-Change Science and Political Ecology: Similarities, Differences, and Implications for Sustainability Science. *Annual Review of Environment and Resources*, 33, 295-316.

- Turner II, B. L., & Shajaat Ali, A. M. (1996). Induced intensification: Agricultural change in Bangladesh with implications for Malthus and Boserup. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, *93*, 14984–14991.
- Turner II, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *PNAS*, *104*(52), 20666–20671.
- Turner II, B., Meyer, W., & Skole, D. L. (1994). Global Land-Use/Land-Cover Change: Towards an intergrated Study. *AMBIO*, *23*(1).
- Turner II, B., Moss, R., & Skole, D. (1993). *Relating land-use and global land-cover change: A proposal for an IGBP-HDP core project. Report from the IGBP-HDP Working Group on Land-Use/Land-Cover Change*. (Joint publication of the International Geosphere-Biosphere Programme (Report No. 24) and the Human Dimensions of Global Environmental Change Programme (Report No. 5) ed.). Stockholm: Royal Swedish Academy of Sciences.
- Uriarte, M., Schneider, L., & Rudel, T. K. (2010). Synthesis: Land Transitions in the Tropics. *BIOTROPICA*, *42*(1), 59-62.
- Verburg, P. H., Kok, K., Pontius Jr, R. G., & A, V. (2006). Modeling Land-Use and Land-Cover Change. In E. F. Lambin, & H. Geist (Eds.), *Land-Use and Land-Cover Change: (pp. 117-135). Local Processes and Global Impacts: Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- Verheye, W. H. (2000). LAND USE, LAND COVER AND SOIL SCIENCES. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, *1*, 1-44.
- Wainwright, J., & Thornes, J. B. (2004). *Environmental issues in the Mediterranean, processes and perspectives from the past and present*. London, UK: Routledge.
- Walsh, S. J., Evans, T. P., & Turner II, B. L. (2004). POPULATION-ENVIRONMENT INTERACTIONS WITH AN EMPHASIS ON LAND-USE/LAND COVER DYNAMICS AND THE ROLE OF TECHNOLOGY. In S. Brunn, S. Cutter, & J. Harrington (Eds.), *Geography and Technology (pp. 491-519)*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Wangari, E. E. (2003). *Links beteween Gendered Division of Labour and Land use in Kajiado District, Kenya*. Nairobi, Kenya: International Livestock Research Institute.

Capítulo 3

Usando el Análisis de Imágenes Orientado a Objetos para Mapear y Monitorear Cambios en la Cobertura Terrestre de la Región Costa Maya, México: 1993-2010

3 Introducción

La tierra necesita un constante monitoreo de su alarmante y cambiantes paisajes para asegurar su salud y sostenibilidad, como cualquiera enfermedad crónica requiere diagnósticos regulares y actualizadas para mejorar su tratamiento. Cambio en la cobertura terrestre es el resultado de interacciones complejas entre los procesos naturales y humanos, y es una de las variables más importantes del cambio global, que plantea la mayor amenaza al sistema ecológico (Lambin, et al., 2003; Lambin & Geist, 2006). Para entender los cambios del paisaje, es necesario monitorear y caracterizar los patrones espaciotemporales de los cambios en la cobertura terrestre (Petit, et al., 2000). Esto es importante ya que la información precisa sobre el cambio de cobertura terrestre, como su ubicación, extensión, sus causas y consecuencias, es crucial para el manejo sostenible de los recursos naturales y el desarrollo urbano (Wang, et al., 2009).

Numerosos estudios han sido realizados para caracterizar cambios en el paisaje, existiendo controversias sobre cuál es el método más adecuado, principalmente por la extensión espacial y temporal sobre la que actúa (Baartman, et al., 2007). Técnicas como el conocimiento local de los expertos u observaciones de campo, son métodos convencionales que tienen buenos resultados en pequeñas áreas de estudio, pero que presentan limitaciones en grandes extensiones, ya que requieren de mucho tiempo e intenso trabajo de campos, más aún cuando se trata de lugares aislados e inaccesibles (Baartman, et al., 2007; Eswaran, et al., 2001). En este sentido, el desarrollo de herramientas de Percepción remota (teledetección), Sistemas de Información Geográfica (*SIG*) y los Sistemas de Posicionamiento Global (*GPS*) colectivamente llamado *Geoinformática*, pueden entregar la información espacio-temporal necesaria adecuada a la extensión y dinámica del fenómeno de cambio en el paisaje.

La tecnología de percepción remota, ofrece la colección y análisis de datos espaciales derivados de satélites, con vínculos a los datos del *GPS* y capas de datos de los *SIG*. Los datos de percepción remota adhieren a los principios de repetición, objetividad y coherencia, que son características prerequisites en cualquier marco de monitorea y vigilancia. (Röder & Hill, 2009). Por consiguiente, esta tecnología ha sido ampliamente

utilizadas para estudiar cambio del paisaje, principalmente, mediante la comparación de imágenes satelitales clasificadas y análisis de series de tiempo (Mas, 1999).

La percepción remota es capaz de adquirir fotos o imágenes que cubren áreas grandes, proporcionando una visión sinóptica que nos permite identificar objetos, patrones y las interacciones ecológicas y antropogénicas (Yang, 2009). Teledetección, también facilita la recopilación de los datos en una manera imparcial y rentable, de lo contrario, el monitoreo a gran escala necesita una cantidad considerable de recursos humanos y de tiempo, si se generen dichos datos a través de sólo los trabajos de campo (Eswaran, et al., 2001).

Asimismo, las capacidades multiespectrales de los datos derivados de teledetección, permiten la evaluación de las características biofísicas de la superficie terrestre; mientras que sus capacidades multitemporales permiten el seguimiento de estos cambios a lo largo de tiempo (Wang, 2010). Otra característica clave de teledetección, es su compatibilidad digital-produce información temática y métrica, que puede ser fácilmente incorporada al *SIG*, para estudiar cambios en el paisaje (Walsh, et al., 2004; IGBP & IHDP, 1999). Además, la disponibilidad de archivos digitales de imágenes satelitales, como los son de Landsat, desde 1972, facilita estudiar los cambios históricos en el paisaje en relación con otros factores ambientales y humanos (Bürgi, et al., 2004).

Por otra parte, el *SIG* proporciona un entorno flexible para entrar, analizar, manejar y visualizar datos digitales de diversas fuentes, necesarias en la aplicación de percepción remota (Prenzel, 2004). Mientras que el *GPS* es otra tecnología esencial y cobra importancia cuando los proyectos de percepción remota necesitan tener puntos de control precisos en trabajos del campo (Eswaran, et al., 2001).

La *RCM* es un ejemplo de un área que está experimentando cambios rápidos de cobertura del suelo. Fue establecido en 1991 por el gobierno estatal como motor para estimular el desarrollo al sur de Quintana Roo. Como consecuencia, la región ha experimentado un desarrollo masivo, principalmente en el turismo y en la infraestructura correspondiente, lo que ha convertido la *RCM* en uno de los destinos turísticos más importantes, que atrae a turistas de todo el mundo (Campos-Cámara, 2010). El turismo es importante para la prosperidad de la región, pero también ha incrementado amenazas al medio ambiente en

forma de cambios demográficos, la urbanización descontrolada y una gran presión a los recursos naturales (Castillo-Villanueva, et al., 2010). A pesar de que la RCM cuenta con varias normas ambientales (Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio (POET) que regulan la económica, el turismo y el desarrollo urbano y prever la restauración, protección, conservación y uso racional de los recursos naturales, el deterioro ambiental sigue (González-Vera, 2010; Vázquez-Trejo, 2010).

Sin mitigación, las amenazas antes mencionadas podrían conducir a la degradación de la tierra, que no sólo ponga en peligro el bienestar humano, sino también el turismo, que es la actividad económica principal en la región. Por lo tanto, es imperativo que se examinen estos factores en el contexto del desarrollo sostenible para evitar el deterioro al medio ambiente. Y dadas las escalas espaciales y temporales de asunto, la teledetección por satélite se presenta como la única manera rentable y factible de adquirir dicha información necesaria (Foody, 2003). Así, los objetivos del presente capítulo son:

- Desarrollar una metodología de teledetección apropiado usando datos de Landsat TM/ETM+ para monitorear los cambios en la cobertura del suelo del área de estudio
- Elaborar mapas de cobertura del suelo del área de estudio durante los años 1993, 2000 y 2010
- Caracterizar los tipos, las tasas, y la variabilidad temporal de los cambios en la cobertura del suelo durante el período 1993-2010.

Este estudio implica dos procedimientos principales a saber, la elaboración de mapas de cobertura terrestre y la aplicación del análisis de detección de cambios. Entre su producción clave son un conjunto de datos validados sobre la RCM, importante en la gestión de los recursos, evaluación de los patrones del cambio del paisaje uso del suelo, en el modelado y predicción de cambios futuros.

3.1.1 Antecedentes (detección de cambios en el paisaje)

Según Lambin & Geist, (2006), cualquier estudio del cambio en el paisaje, debe ser implementando en dos etapas fundamentales, es decir: detectar un cambio en el paisaje, y atribuir este cambio a un conjunto de factores causales. El uso de imágenes satelitales multitemporales para realizar dicha tarea, ha sido demostrado ser un enfoque eficiente

(Lambin, 1997), conocido como *detección de los cambios* (Sing, 1989). Su principio básico, es que cualquier cambio del paisaje resulta en cambios en los valores de radiancia detectables por sensores satelitales (Mas, 1999).

La *detección de cambios* ha sido convertida en una herramienta fundamental y universal para los administradores de recursos naturales e investigadores de los organismos gubernamentales, las organizaciones de conservación, y la industria. LU, et al. (2004), proporcionan una excelente revisión de su gama de aplicaciones que incluyen: cambio en el uso/cobertura del suelo; cambio en la vegetación; deforestación, el cambio en los humedales; incendios forestales; cambio urbano y otras. El resultado de un análisis de teledetección es típicamente cuantitativo, y un buen estudio de detección de cambio debe dar información precisa sobre la ubicación, naturaleza y magnitud de los cambios en la cobertura terrestres (Macleod & Congalton, 1998). Según Byron & Lesslie, (2008), esta información debe específicamente detalla:

- el cambio de área y la tasa de cambio,
- la distribución espacial de los que ha cambiado,
- trayectorias de los tipos de cobertura de suelo que ha cambiado, y
- evaluación de la exactitud de los resultados de detección de cambio

Una implementación exitosa de detección del cambio depende de varios factores, como el estado natural de la zona, la selección de datos de teledetección apropiado y la técnica de análisis (Coppin, et al., 2004; Lu, et al., 2004). Otra consideración crucial en la aplicación de la teledetección de cambio, es la recopilación de información in situ, que es esencial en la calibración e integración de otras herramientas como los SIG y GPS para mejorar la precisión de los resultados (Eswaran, et al., 2001).

3.1.2 Técnicas de detección de cambios

Como se comentó en el capítulo anterior, cualquier detección de cambios debe reconocer que los cambios toman tres procesos: *conversión, modificación o persistencia*, los cuales determinaría la metodología utilizada para caracterizar los cambios (Lambin, 1997). Por ejemplo, la conversión implica un cambio evidente, mientras que la modificación es sutil

(mucho menos evidente) y como consecuencia, requiere la consideración de un mayor nivel de detalle. Existe una variedad de métodos de teledetección de cambios en la literatura (LU, et al., 2004; Anjos, et al., 2016). Van Oort (2007), los distingue entre dos categorías: *Comparación pre-clasificatoria* y *posclasificatorio*, dependiendo de cuando se asignan las clases. En el primero caso, se detectan cambios y luego asignan las clases, mediante técnicas cuantitativas como, por ejemplo: diferencias de las imágenes multitemporales, componentes principales, y racionamiento de la banda. En la segunda, se clasifican datos satelitales y después se detectan el cambio.

La premisa básica del primer enfoque, es que los cambios del paisaje tienen que resultar en cambios en los valores de radiancia (Mas, 1999). Por ello, se requiere el empleo de metodologías de corrección radiométrica robustas, que transformen las imágenes satelitales en unidades comparables, y clasificando sólo aquellos áreas que han sido objeto de cambio espectral significativa (Horning, et al., 2010). A pesar de que dichas técnicas son efectivas en localizar los cambios, no pueden identificar la naturaleza, ni la clase del cambio (Van Oort, 2007). Su ventaja radica en su capacidad de ser fácilmente afinada para detectar modificaciones específicas; así como su mayor capacidad, generalmente, de detectar cambios sutiles (Van Oort, 2007).

En contraste, el enfoque *posclasificatorio* es el método de teledetección de cambios más común e intuitiva (LU, et al., 2004) y consiste en comparación de datos de teledetección ya clasificados de la misma área, utilizando matemática simple de imagen o mediante matrices de confusión, para detectar cambios (Horning, et al., 2010). Este enfoque tiene mayor exigencia computacional, es muy sensible a las precisiones de los mapas temáticos utilizados y además puede dificultar la realización de una evaluación adecuada de la precisión de los mapas históricos. Pero la técnica cobra importancia en su capacidad de generar mapas de "de-a", que pueden utilizarse para caracterizar cuantitativamente los patrones y naturaleza de la cambios (Jensen, 1996). La misma técnica también facilita la generación de matriz de error-una herramienta clave en el análisis de precisión de los mapas (Congalton & Green, 2009; Lillesand, et al., 2004; Jensen, 1996), así como facilita la comparación de datos adquiridos por diferentes sensores satelitales (Coppin, et al., 2004).

3.1.3 Segmentación y procesamiento de imágenes orientada a objetos(OBIA)

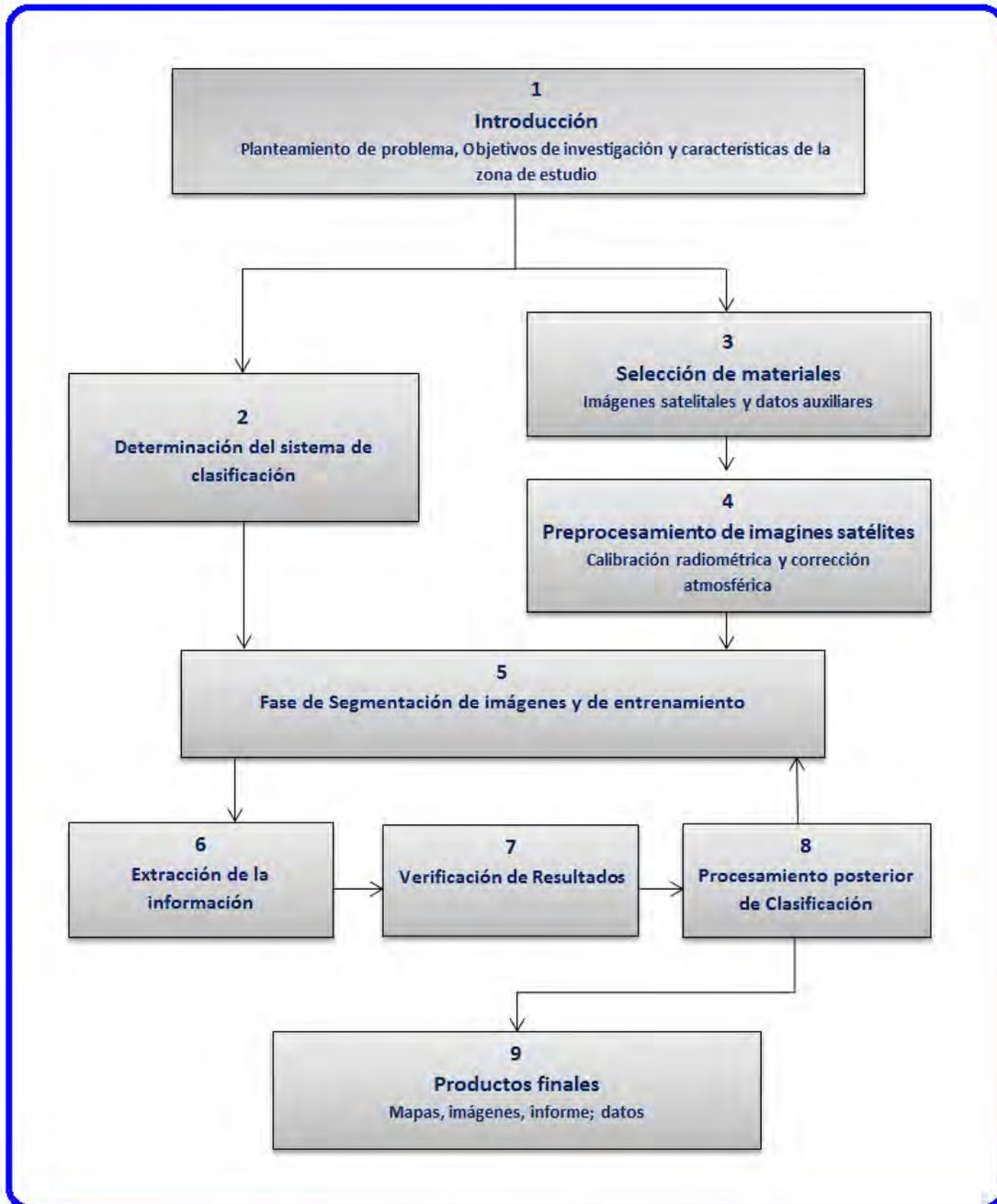
Avances tecnológicos recientes, en técnicas de teledetección y procesamiento de imágenes digitales asociadas ofrecen oportunidades sin precedentes para elaborar mapas temáticos con mayor precisión (Navulu, 2007; Blaschke, et al., 2014). Una técnica relativamente nueva, que no ha sido utilizada ampliamente en cartografiar la cobertura del suelo, pero que muestra considerables posibilidades de desarrollo, es la segmentación y el procesamiento de imagen orientada a objetos (Frohn, et al., 2009). La segmentación es el proceso mediante el cual se pretende identificar dentro una imagen satélite objetos o elementos con ciertas características que sean diferenciables (Hamilton, et al., 2007). La segmentación permite asignar etiquetas a cada uno de los píxeles que conforman la imagen, de forma que dichos compartan unas ciertas etiquetas y características visuales comunes (Navulu, 2007; Mao, et al., 2013).

El procesado de imágenes digitales basado en objetos tiene sus orígenes en el hecho de que la interpretación de imágenes que realiza el sistema visual humano se lleva a cabo a partir del reconocimiento de objetos caracterizados por diferentes atributos (tamaño, forma, texturas, y color entre otros), y no mediante la percepción de puntos individuales (píxeles), caracterizados exclusivamente por valores digitales asociados a dichos puntos (Navulu, 2007). Por lo tanto, los resultados de la clasificación orientada a objetos tienen una precisión mucho mayor que los que se obtiene sin esta información. Pero a pesar de esta ventaja, sólo un puñado de estudios publicados en México han aplicado este tipo de procesado, o análisis, de imágenes basado en objetos es conocido en la literatura como *OBIA (Object Based Image Analysis)* (Blaschke, 2013), a los datos de Landsat. En este sentido, en este capítulo se lo aplican a las imágenes Landsat TM / ETM + para mapear y monitorear la cobertura terrestre en la RCM durante un período de 17 años.

3.1.4 Organización de capítulo y resultados esperados

Figura 3.1 ilustra la organización de este capítulo para realizar los objetivos antes mencionados. Los resultados previstos de este capítulo incluyen:

- Un conjunto de mapas temáticos y datos validados que describen los cambios en la cobertura del suelo en la *RCM* y que son útiles para el desarrollo de modelos de los cambios de la cobertura terrestre en la *RCM*
- Experiencia necesaria para desarrollar métodos novedosos y estandarizados basados en geo-informática para estudiar los cambios en el paisaje



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1: El flujograma del capítulo 3

3.2 Materiales

Análisis de los cambios fue basado en tres mapas de cobertura del suelo, derivados de las imágenes Landsat TM / ETM + (Path 19, Row 47) con fecha 10/04/1993, 09/02/2000 y 14/02/2010, descargado de forma gratuita desde *United States Geological Survey* (www.usgs.gov). Estos sistemas de sensores son muy bien conocidos en la comunidad científica, por lo que sólo se plantea un breve resumen de sus características principales en la a *Tabla 3.2*

Tabla 3.1. Características de Landsat TM5/ETM+

| Modo Espectral | Espacial (m) | Banda | Amplitud (µm) | Banda espectral | Radiométrica | Temporal |
|------------------|--------------|-------|---------------|--------------------|--------------|----------|
| Pancromática | 15 | 8 | 0.52 – 0.90 | Pancromática | 8 Bits | 16 días |
| Multiespectrales | 30 | 1 | 0.45 – 0.52 | Luz visible, Azul | | |
| | | 2 | 0.52 – 0.61 | Luz visible, Verde | | |
| | | 3 | 0.63 – 0.69 | Luz visible, Roja | | |
| | | 4 | 0.76 – 0.90 | Infrarrojo cercano | | |
| | | 5 | 1.55 – 1.75 | Infrarrojo medio | | |
| | | 6 | 10.4 – 12.5 | Infrarrojo térmico | | |
| | | 7 | 2.08–2.35 | Infrarrojo Medio | | |

Fuente: Elaboración propia

Se seleccionó las imágenes con el fin de minimizar los efectos ambientales afectando a los resultados de detección de cambios (Sing, 1989). Al estar ubicado en la zona subtropical, la RCM tiende a ser nublada casi durante todo el año, especialmente, en la temporada de lluvias - de abril a septiembre (verse *Figura 2.3*). Por lo tanto, las imágenes fueron tomadas durante la "temporada seca", (noviembre-marzo), aprovechando de los días libres de nubosidad, que desafortunadamente, no fueron encontradas en fechas aniversario precisas.

Afortunadamente, todas las imágenes ya habían sido previamente pre-procesadas en parte por la USGS y rectificadas a la zona UTM 16 Norte (proyección de mapa) y a WGS 84 (datum y elipsoide, NAD27) correspondiente a Quintana Roo, México. Por lo que, se consideró, necesario, sólo la corrección radiométrica, después del primer examen de calidad de las imágenes y el cálculo de las estadísticas de imagen. Se utilizó los siguientes datos

auxiliares para mejorar la interpretación de las imágenes, seleccionar de áreas de entrenamiento y para probar la fiabilidad de clasificación: el mapa INEGI -Serie IV, Google Earth, algunas fotos históricas y 30 m modelos de elevación digital.

3.2 1 Sistema de cómputo

En este estudio, se utilizaron los siguientes paquetes de software: *Idrisi Selva 17.00*, *ArcGIS* y *Microsoft Excel*. *IDRISI* (www.clarklabs.org) es un sofisticado sistema de información geográfica y procesamiento de imágenes raster desarrollado por la Escuela Posgrado de Geografía en la Universidad de Clark, Worcester, Massachusetts (Eastman, 2012). *ArcGIS*® es una aplicación cartográfica, desarrollada por ESRI, frecuentemente utilizada para preparar imágenes que pueden ser usadas directamente en un *SIG*, para posteriormente analizar y extraer información de ellas. Nos permite realizar cualquier tarea de *SIG*, que incluye: análisis geográfico, edición y compilación y gestión de datos, visualización y geo-procesamiento. *Microsoft Excel* se lo utilizo en elaboración de gráficos y cálculos, mientras que *Microsoft Word* y *Power Point* fueron utilizados básicamente para la presentación de la tesis.

3.3 Métodos

3.3.1 Pre-procesamiento de imagines satelitales

Los pasos de pre-procesamiento empleados en este capítulo incluyen: la calibración radiométrica y segmentación de imágenes utilizando el software *Idrisi Selva*®.

3.3.1.1 Corrección Radiométrica

La corrección de efectos atmosféricos en las imágenes satelitales, es un procedimiento común en la actualidad y pretende evaluar y eliminar las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre (Eastman, 2012). Existen numerosas técnicas en diversas aplicaciones de varios software de teledetección que realizan la corrección atmosférica. *Idrisi Selva* presenta cuatro opciones:

1. Modelos de sustracción de objetos oscuros;
2. Modelo de $\text{Cos}(t)$;
3. Modelo de Corrección Completa y

4. Modelo de Reflectancia Aparente.

Se implementó la corrección atmosférica usando el método $Cos(t)$. A diferencia del primer, el modelo $Cos(t)$ aborda, tanto, la remoción de neblina (procedimiento para estimar los efectos de la absorción por los gases atmosféricos y la dispersión de Rayleigh), como calibración de la radiancia, utilizando los metadatos de la imágenes (Eastman, 2012). Los metadatos incluyen: la hora y fecha de la información, la elevación del sol, el nombre del satélite, y para cada banda, la longitud de onda, la ganancia (*gain*) y el sesgo (*Bias*).

El modelo $Cos(t)$ requiere un ajuste de las configuraciones de los números digitales (*ND*), que corresponde a valores que se deben sustraer para eliminar la neblina visible. Por ello se realizó la técnica “*Cuerpos Negros Aparentes*” (Eastman, et al., 2005), cuya principio radica en la suposición de que, un sensor de teledetección, no debe detectar cualquier radiación en estos lugares oscuros, y que deben llevar un valor cero *ND* (Chavez, 1988). Pero debido a la dispersión atmosférica, el sensor registra valores de *ND* mayor de cero, en estos supuestos “oscuros” lugares, los cuales deben ser sustraídos de cada banda espectral particular, para eliminar el componente de dispersión (Chavez, 1988).

De esta manera, se determinó valores “oscuros” de *ND*, aislando píxeles con valores extremadamente bajos de reflectancia en cada banda de las imágenes: en ríos, lagos profundos, la laguna y el mar Caribe. Cuando se obtuvo todos los datos de entrada necesarios, se implementó el *Modelo Cos(t)*, el cual opera en dos etapas. Primeramente, convierte los valores de los *ND* de imagen satelital unidades de radiancia espectral absoluta, mediante la eliminación efectos de la ganancia y sesgo introducidos por el sistema de teledetección, utilizando la siguiente ecuación (Eastman, 2012):

$$L = \left\{ \frac{L_{max} - L_{min}}{255} \right\} ND + L_{min} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde **L** es la radiancia expresada en $W m^{-2} sr^{-1}$.

Alternativamente $L = \text{Sesgo} + (\text{Ganancia} * ND)$

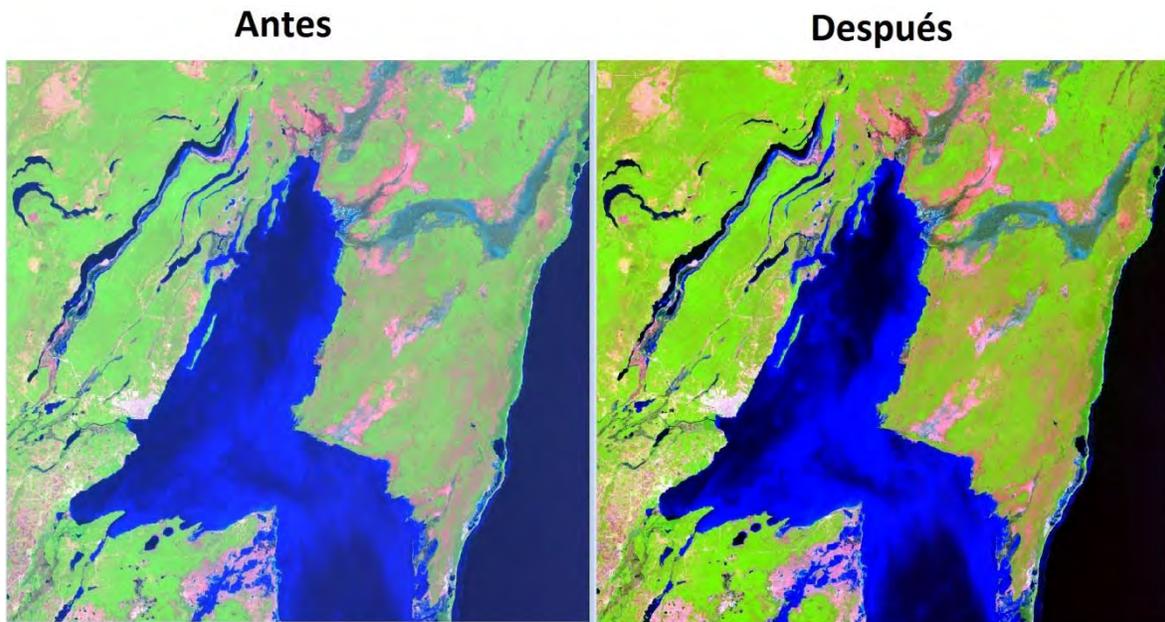
Donde $\text{Sesgo} = L_{min}$

$$\text{Y Ganancia} = \left\{ \frac{L_{max} - L_{min}}{255} \right\}$$

En segundo paso, el modelo convierte los resultados de primer paso a la reflectancia superficie mediante la corrección de los efectos solares y atmosféricos.

Se descartó el modelo de corrección completa, ya que no teníamos datos meteorológicos históricos para alimentar dicho modelo. Además, [Chávez \(1988\)](#), sostiene que la reflectancia calculada por el modelo $Cos(t)$ es aproximadamente cerca a aquellas derivadas de un modelo completo que requiere mediciones atmosféricas in situ.

El panel izquierdo ([Figura3.2](#)) muestra una imagen cruda de Landsat TM (Bandas 3, 4 y 5). Mientras que el panel derecho muestra la misma escena con la corrección radiométrica. La imagen corregida es mucho más limpia y es mucho más fácil de discernir características de la superficie y colores.



Elaboración propia con base en Landsat TM, 1993

Figura.3.2: *Compuesto de Imagen (Bandas3, 4 y 5) antes y después de corrección radiométrica*

Al finalizar el pre-procesamiento, se aplicaron una máscara de agua a todas las bandas para reducir la *dimensionalidad* de las imágenes antes de proceder a la fase de clasificación.

3.3.1.2 *Esquema de clasificación*

“No hay una clasificación idónea para el uso/cobertura de la tierra y es poco probable que uno pueda desarrollarse...” ([Anderson, et al., 1976](#))

Percepción remota es un atractiva fuente de datos para cartografiar la superficie terrestre en diferentes escalas (Foody, 2002). Pero como dichos datos no registran la cobertura terrestre directamente, se la infieren de las interpretaciones de imágenes multiespectrales (Wyatt, 2000). Por este motivo, mapas temáticos, tal derivado, son interpretaciones selectivas, ya que transmiten información elaborada según objetivos específicos de los investigadores, a menudo influenciados por la ubicación geográfica y las características de los datos (Thompson, 1996; FAO, 2005). Lo que ha resultado en el desarrollo de un conjunto de datos y métodos que son, a menudo, muy lejos de ser objetivo o reproducible, y por lo tanto difíciles de comparar con datos externos (Lambin & Geist, 2006; Adams & Gillespie, 2006). Y desafortunadamente, todavía no existe un sistema de clasificación estándar, universalmente reconocido en la actualidad (Anderson, et al., 1976).

Un esquema de clasificación nos ofrece un marco para organizar y categorizar la información extraídas de los datos de teledetección; así definiendo efectivamente la leyenda que se utilizaría en mapa final (Lambin & Geist, 2006). Según LU & Weng, (2007), para diseñar un buen sistema de clasificación, se debe toma en cuenta los siguientes factores: la necesidad del usuario; la resolución espacial de los datos de teledetección seleccionados; la compatibilidad con trabajo anterior; los algoritmos disponibles para procesar imágenes y clasificarlas y las limitaciones de tiempo; deben ser de carácter informativo, totalmente exhaustiva, mutuamente excluyentes y separable.

Por otra parte, Jensen (1996), advierte que, si ya existe un sistema de clasificación de buena reputación, no sería prudente desarrollar un sistema completamente nuevo que probablemente será utilizado solamente por nosotros. Sería mejor utilizar un esquema de clasificación ya reconocido a nivel nacional y solo modifica las definiciones de categorías al proyecto en cuestión (Narumalani, et al., 2005). Para ello, se adoptó el sistema de clasificación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) de México, que nos permita interpretar el significado de los resultados de la clasificación a la luz de los otros estudios, y facilitar el intercambio de datos. El esquema consta de cinco amplias clases: agua, zona urbana (y superficies edificadas), Cultivo, Popal-tula, los manglares y los bosques tropicales o selva. Se agrupo tres clases, Pastizal, Agricultura de

temporal y riego en categoría: Cultivo; y las dos clases leñosa, Selva baja y mediana en una amplia categoría: Selva

3.3.1.3 Procedimiento de Segmentación y Clasificación de imágenes

La clasificación (Figura 3.3), es una de las técnicas más extendida para crear mapas temáticos de imágenes de un sistema de teledetección (Eastman, 2012). En su forma más simple, esta técnica consiste en asociar, asistida por computadora, la información espectral contenida de bandas utilizadas, con las posibles clases de cobertura terrestre, a partir del uso de una regla de asignación (Lizarazo & Elsner, 2011; Eastman, 2012). Cada pixel de la imagen se le asigna un valor correspondiente a la clase de cobertura determinada.

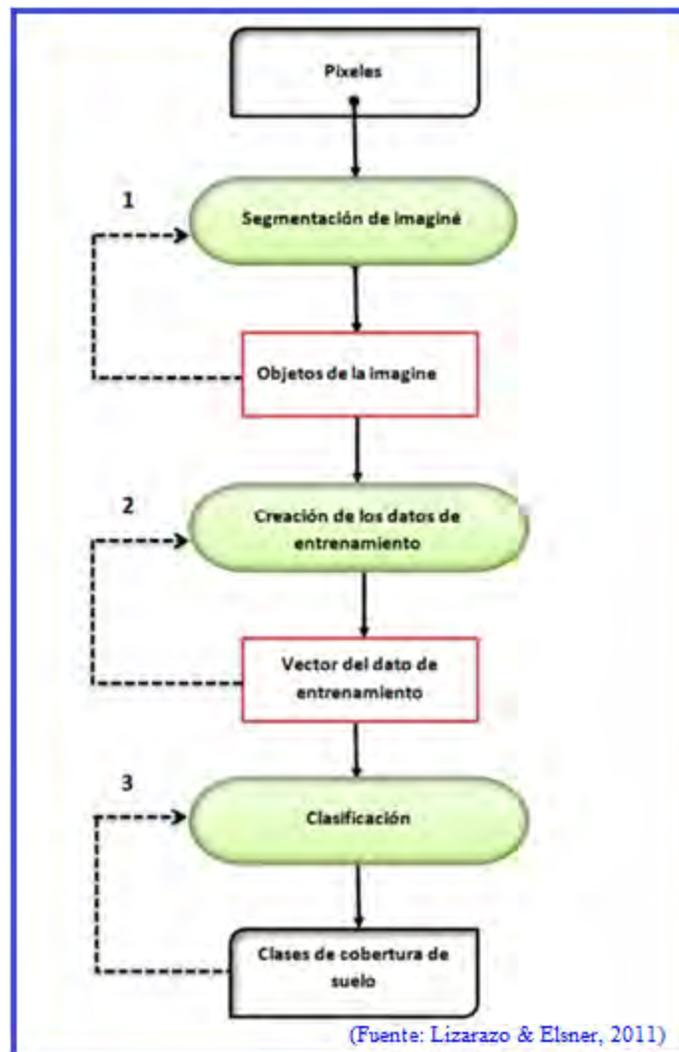


Figura 3.3: Flujograma de segmentación de imagen

Por su parte, la **OBIA** consta de tres pasos: la segmentación de imágenes, la derivación de información analítica sobre los segmentos y clasificación (Figura 3.3). La producción de imágenes segmentadas adecuadamente, es un paso crítico en la clasificación orientada a objetos (Lizarazo & Elsner, 2011), y dichos objetos son creados mediante un proceso de segmentación de imágenes en el que aquellos píxeles que están cerca y que tienen características espectrales similares se agrupan en un segmento (Blaschke, et al., 2014). El proceso es semi-automatizado, en el que el usuario define los parámetros de entrada específicos para afinar el algoritmo a una escala correcta de análisis, antes de aplicar una clasificación supervisada a la imagen segmentada (Eastman, 2012). Para ello, y siguiendo al flujograma (Figura 3.3), se utilizó una combinación de tres bandas (3, 4 y 5) de cada fecha (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Resumen de los parámetros de segmentación de píxeles

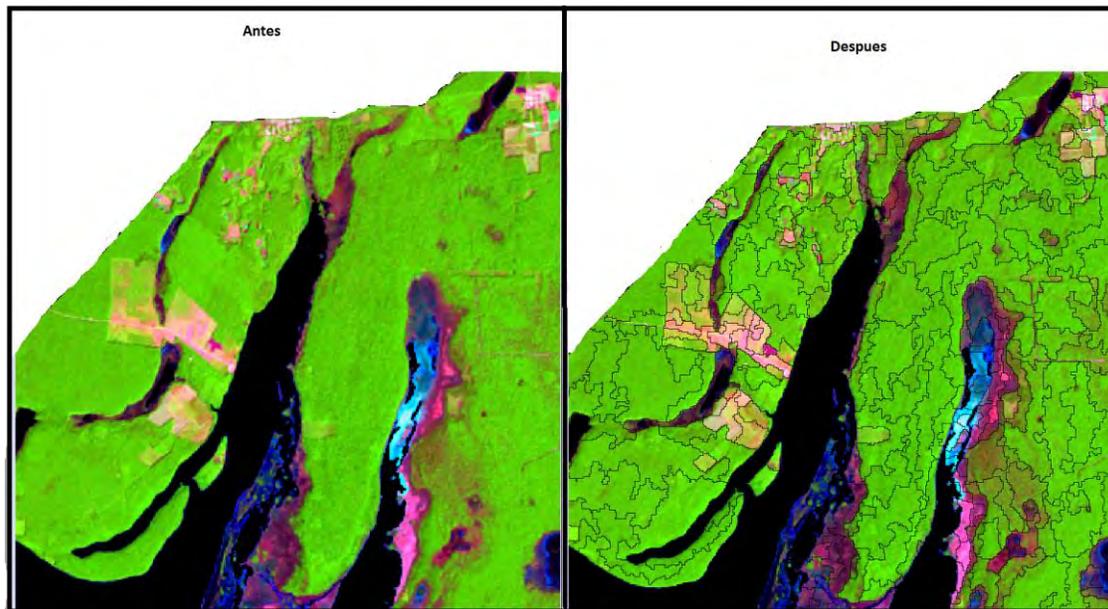
| parámetros de segmentación (en inglés) | Fechas de la imágenes satélites | | |
|---|---------------------------------|----------------|----------------|
| | 17/04/1993 | 09/02/2000 | 28/02/2010 |
| Bandas | 3,4,5 | 3,4,5 | 3,4,5 |
| Weight | 03 / 0.4 / 0.3 | 03 / 0.4 / 0.3 | 03 / 0.4 / 0.3 |
| Window size | 3 | 3 | 3 |
| Weight mean factor | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Weight variance factor | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Similarity tolerance | 35 / 40 / 70 | 35 / 40 / 70 | 35 / 40 / 70 |

Fuente: Elaboración propia

Pero desafortunadamente, no hay valores estándar para estas variables (Frohn, et al., 2009), ya que diferentes tipos de imágenes requieren diferentes escalas de análisis, y además varios objetos significativos pueden aparecer en diferentes escalas espaciales de análisis en la misma imagen (Blaschke, 2013; Blaschke, et al., 2014)

Por lo tanto, en esta tesis, para ejecutar el modelo de segmentación, se realizó varias iteraciones de las tolerancias de similitud por "ensayo y error", hasta que se encontró una

combinación de valores (Tabla 3.2) que produjo a un “mejor” resultado, mediante la inspección visual de cada segmentación. Tabla 3.2, muestra los parámetros finales que fueron utilizados en segmentar las imágenes. Se asignó un peso de 0.4 a la banda 4: *infrarroja cercano*, ya que siempre se correlaciona menos con otras bandas, debido a que lleva información única sobre la vegetación (Figura 3.5); mientras que el resto de las bandas fueron asignada un peso de 0.3. En la siguiente figura3.4, se muestra un subconjunto de la fecha 1993, antes y después la segmentación.



Fuente: Elaboración propia

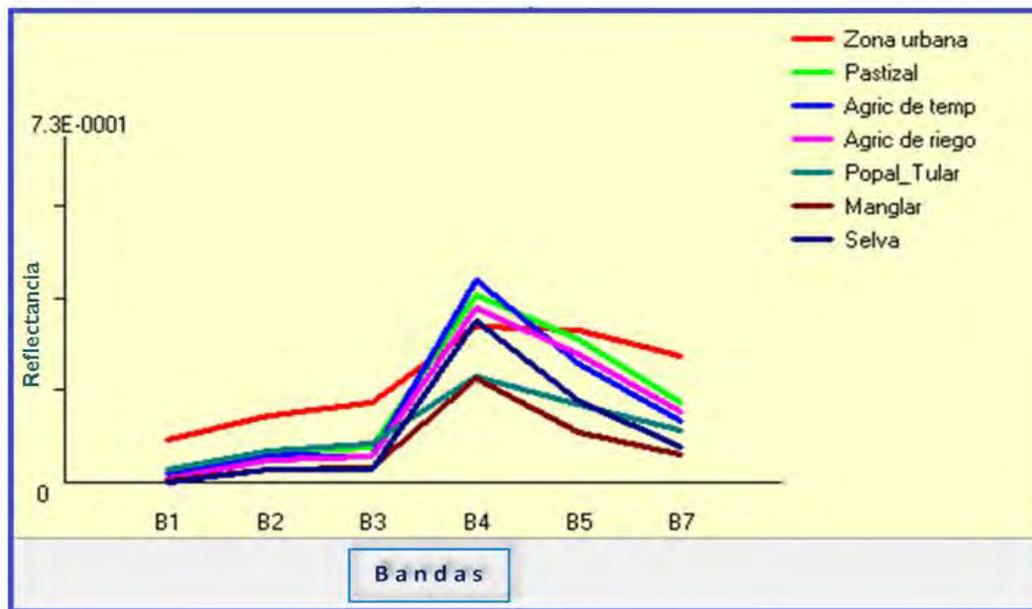
Figura 3.4: Parte de Landsat TM, 1993 (Bandas 3, 4,5) antes y después de segmentación

3.3.1.4 Selección de sitios de entrenamiento

LU & Weng, (2007) señalan que un esquema de clasificación adecuado y un número suficiente de muestras de entrenamiento, son prerequisites para tener una clasificación exitosa. Por ello se debe seleccionar una muestra de polígonos, que representen, adecuadamente, a las categorías de interés (Chuvieco, 1995). Y guiado por el esquema de clasificación creado anteriormente, se creó *sitios de entrenamiento* y clases de sus firmas espectrales en Idrisi Selva.

Muestras de entrenamiento son segmentos espectralmente homogéneos que representan ejemplos de los tipos de cobertura terrestre conocidos, y son usadas para entrenar el

algoritmo de clasificación para asignar el resto de los objetos segmentados a clases (Chuvieco, 1995; Jensen, 1996; Lillesand, et al., 2004). Al elegir ejemplos en la imagen misma (usualmente confirmados por un trabajo de campo), uno desarrolla firmas específicas a las longitudes de onda disponibles (Eastman, 2012) que intervienen en la clasificación, como se muestra en figura 3.11



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5: Distribución de firmas espectrales de muestras de entrenamiento en Landsat, 2000.

Después se llevaron a cabo la delimitación de objetos de entrenamiento, guiado por los datos temáticos disponibles del *INEGI*, conocimiento de los expertos y trabajo limitado de campo. Es importante señalar que se utilizó los mismos “objetos” de entrenamiento cuando sea posible, en cada clasificación.

3.3.1.3 Fase de Asignación.

Por último, con sitios de entrenamiento obtenidos mediante la segmentación de imágenes, se clasifico las imágenes utilizando el enfoque supervisado del algoritmo máxima probabilidad. La clasificación supervisada es la técnica más utilizada para el análisis cuantitativo de los datos de imágenes (Richards, 2013), en donde la identidad y ubicación de algunos sitio o campos de entrenamiento son conocidos en antemano, ya sea por las fotos aéreas, mapas de referencia o experiencia personal del investigador (Jensen, 1996).

Mientras que el clasificador de máxima probabilidad, el algoritmo más empleado hoy en día por su robustez y ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos de teledetección; y se basa en la teoría de la probabilidad bayesiana donde la clase asignada es la que tiene la mayor probabilidad de pertenencia a una clase (Richards, 2013). Se pueden encontrar ejemplos de obras donde se utilizó esta técnica en (Mao, et al., 2013; Dewan & Yamaguchi, 2009; Lu, et al., 2011; Tomaso, et al., 2013; Eastman, et al., 2005), mencionando solo algunos. El resultado de la clasificación son los mapas de cobertura del suelo para el 1993, 2000 y 2010. Se aplicó una evaluación de error a mapa de 2000 para el cual había datos de referencia fiables y dar una perspectiva de fiabilidad de los demás mapas ya que se utilizó los mismos objetos de entrenamiento en todas las fechas.

3.3.2 Evaluación de la precisión de clasificación

*"Una vez que se haya elaborado un mapa a partir de fotografías, se lo debe verificar en campo...
(Spurr, 1948) "*

Un mapa derivado de teledetección siempre lleva aparejada, un cierto margen de error, en función de la calidad de los datos o de la rigurosidad del método empleado (Chuvieco, 1995), que puede afectar el análisis de proceso de cambio con los errores clásica de omisión y Comisión (Congalton & Green, 2009). Por ello, resulta obligatorio aplicar algún procedimiento de verificación, que permita cuantificar ese error, y para valorar la calidad final y su aplicabilidad operativa (Foody, 2002; Jensen, 1996; Chuvieco, 1995).

Para realiza dicha verificación con mayor eficacia, se someten los mapas derivados, a una evaluación de la exactitud (fiabilidad o precisión) de clasificación (Foody, 2002). Este proceso consiste en comparar los resultados obtenidos, con una fuente externa que represente la realidad presente en el terreno al momento de tomar la imagen. Dado que indica que tan confiable será un mapa, entonces se debe presentar, de manera adecuada los resultados de verificación (como las fuentes de error y su magnitud), para facilitar la revisión del trabajo con el fin del reducir estos errores (Jensen, 1996).

3.3.2.1 Tipos de precisión de mapa

Congalton & Green, (2009), distinguen dos tipos de precisión de mapa: *localización y temática*. Según los autores, precisión de localización, es la exactitud con la que los

elementos se encuentran en el mapa en relación con su verdadera ubicación en campo; y está directamente relacionada con las características espaciales de los datos de los que se deriva el producto final. Por ejemplo, si se utilice imágenes satelitales, la precisión espacial del mapa final será dictada por la precisión espacial de la dicha imagen (Horning, et al., 2010). La precisión de localización suelen abordarse en la etapa de pre-procesamiento de clasificación de imágenes.

Mientras que, la *precisión temática* especifica qué tan buena las clases individuales igualan a las que en realidad se encuentran en campo (Congalton & Green, 2009). Por ejemplo, si el mapa temático indica que hay bosque en un lugar determinado, ¿existe realmente el bosque en ese lugar o no? Evaluación de la precisión temática, es mucho más complejo que la de ubicación, y forma una parte integral del proceso de clasificación posterior. De acuerdo con Horning, et al., (2010), dicho análisis es especialmente importante, ya que brinda las siguientes ventajas:

- proporciona una medida de la fiabilidad global del mapa de cobertura del suelo
- identifica cual clases generales o qué regiones del mapa, no cumplen con los objetivos de precisión de un determinado análisis
- proporciona al usuario información importante en cuanto a que clases son menos precisos, con que clases, las confunden con estas clases y donde regionalmente se producen estos errores

3.3.2.2 Factores que afectan la precisión temática

Congalton & Green, 2009, advierten que es necesario que los investigadores y usuarios de datos de teledetección tengan un sólido conocimiento de los factores que intervienen en la clasificación de imágenes satelitales y las técnicas utilizadas en la realización de cualquier evaluación de la precisión, para evitar limitar la eficaz utilización de los datos derivados. Se puede encontrar excelentes y detalladas definiciones y discusiones sobre fuentes error en la clasificación temática en los trabajos de (Foody, 2002; Congalton & Green, 2009) o cualquier libro texto de Percepción remota los cuales, en incluye:

- La calidad y el tipo de base los datos
- La experiencia del investigador

- métodos de procesamiento
- familiaridad del investigador con el área del estudio y
- el nivel de detalle del esquema de clasificación

Pero, para realizar correctamente la fiabilidad de clasificación, es necesario comparar sistemáticamente dos fuentes de información (Jensen, 1996):

- píxeles o polígonos en un mapa derivado de clasificación de teledetección
- datos de auxiliares de referencia (pueden de hecho contener un error).

Dicha tarea se la realiza usando varios procedimientos, incluyendo mediante una matriz de error, también llamada una matriz de confusión (Congalton & Green, 2009), puesto que recoge los conflictos que se presentan entre categorías (Chuvienco, 1995).

3.3.2.3 Matriz de error

Una matriz de error es una tabulación cruzada, en donde las filas se ocupan por las clases de referencia, que se consideran correctos o por lo menos más preciso que los datos de los mapas y las columnas por las categorías de clasificación (Chuvienco, 1995; Congalton & Green, 2009). La diagonal expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (mapas y realidad), mientras que los marginales suponen errores de asignación (Chuvienco, 1995).

La matriz es la base sobre la que calculan los errores de omisión y comisión, fiabilidad global así como el índice Kappa El coeficiente kappa (κ). Un valor de κ igual a 1 indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar. La interpretación del coeficiente kappa se realiza correlacionando su valor con una escala cualitativa que incluye seis niveles de fuerza de concordancia (Tabla 3.3) (Monserud & Leeman, 1992).

Tabla 3.3: Interpretación del coeficiente kappa

| Índice de κ | Fuerza de concordancia |
|--------------------|------------------------|
| 0 | Pobre |
| 0.01-0.20 | Leve |
| 0.21-0.40 | aceptable |
| 0.41-0.60 | moderada |
| 0.61-0.80 | considerable |
| 0.81-1.00 | casi perfecta |

Fuente: Elaboración propia con base en Monserud & Leeman, 1992

3.3.2.4 *Proceso de verificación del mapa*

La verificación de la precisión del mapa es un paso importante en un proyecto cartográfico, ya que garantiza la credibilidad de los cálculos de detección de cambios. Sin embargo, realizarlo puede requerir mucho tiempo y ser costosa, la razón principal por la que este paso crucial, a menudo, se lo pasa por alto en muchos proyectos de mapeo (Horning, et al., 2010; Congalton & Green, 2009). En este estudio, se realizó una evaluación de la precisión sólo en mapa de 2000, para el cual contaba con datos históricos fiables de referencia, siguiendo los procedimientos planteados en Eastman, (2012).

Primero, se generó un conjunto de 210 sitios de muestreo al azar, usando Idrisi Selva. El tamaño 210, es por encima del número total de muestras necesarias para una precisión total recomendada de al menos el 85%, según la regla estadística para establecer es tamaño de campos de verificación, sugerido por Jensen, (1996). Luego se determinó las "verdadera" cobertura del suelo o categorías en estos lugares, con la ayuda de Mapa topográfico INEGI, Serie IV, Google Earth, el conocimiento de los expertos y la familiaridad personal del autor con el área de estudio, y trabajo de campo limitado.

Por último, se comparó las clases de cobertura del suelo validadas, contra las asignada en el mapa de 2000, usando una matriz de error (Tabla 3.4) para derivar la precisión (fiabilidad o exactitud) general de clasificación, errores de omisión (exactitud del productor), Comisión (exactitud del usuario) y un coeficiente κ . Las definiciones de los términos antes mencionados y sus cálculos han sido abordados ampliamente en la literatura de teledetección (Jensen, 1996; Lillesand, et al., 2004; Congalton & Green, 2009; Campbell & Wynne, 2011; Richards, 2013).

3.3.3 *Análisis de Detección de Cambios*

Se aplicó la técnica de post-clasificación para analizar los cambios durante períodos 1993-2000 y 2000-2010, ya que permite la detección y mapeo de la cantidad, ubicación y naturaleza del cambio (Lu, et al., 2004).

Para ello se utilizaron una herramienta de Idrisi selva: el Modelador de Cambios en el Terreno (*LCM*, por sus siglas en inglés). El *LCM* facilita un análisis rápido del cambio en la

cobertura terrestre y sus consecuencias, mediante un instrumento para la clasificación cruzada de datos. Este instrumento permite evaluar los cambios de forma gráfica y cartográfica, así como el análisis de ganancias y pérdidas, de los cambios netos del terreno, y de los intercambios o transiciones de usos de suelo entre dos fechas temporales (Eastman, 2012). Asimismo, permite diseñar mapas de localización de esos cambios.

La aplicación del *LCM* permite utilizar los mapas raster como parámetros de entrada para identificar la ubicación y magnitud los cambios terrestres importantes, la persistencia terrestre y transiciones entre las categorías de cobertura del suelo en el área de (Eastman, et al., 2005). Además, ayuda a calcular las tendencias espaciales de las principales transiciones entre categorías de cobertura de interés en el área de estudio. Para identificar la ubicación general de una tendencia específica cambio terrestre se utilizó el módulo *TREND* del *LCM*, el cual es un procedimiento de interpolación diseñado para tal fin (Václavík & Rogan, 2009).

De esta manera, se caracterizó: tipos, tasas y tendencias espaciales de cambio de cobertura del suelo durante el período 1993-2010, cuyos resultados se presentan y discuten en el siguiente apartado. Pero como las combinaciones posibles de las transiciones pueden ser complejas con muchas clases de cobertura del suelo (Warner & Campagna, 2009), para simplificar el análisis en este estudio nos centramos en las transiciones relacionadas con las actividades humanas. Además, teniendo en cuenta que la transformación del suelo no es lineal (Uriarte, et al., 2010), se calculó, la tasa media anual de variación (R) para cada clase con la fórmula propuesta por Puyravaud, (2003), es decir:

$$R = (A_2/A_1) (1/t_2 - t_1) - 1$$

Dónde: A_2 y A_1 , son las áreas de la clase al final (t_2) y el inicio (t_1), del período que se evalúa, y t_2-t_1 es el número de años que abarca ese período.

3.4 Resultados

Los resultados se presentan en forma de mapas, gráficos y cuadros estadísticos.

3.4.1 Mapas temáticos y distribución de las clases

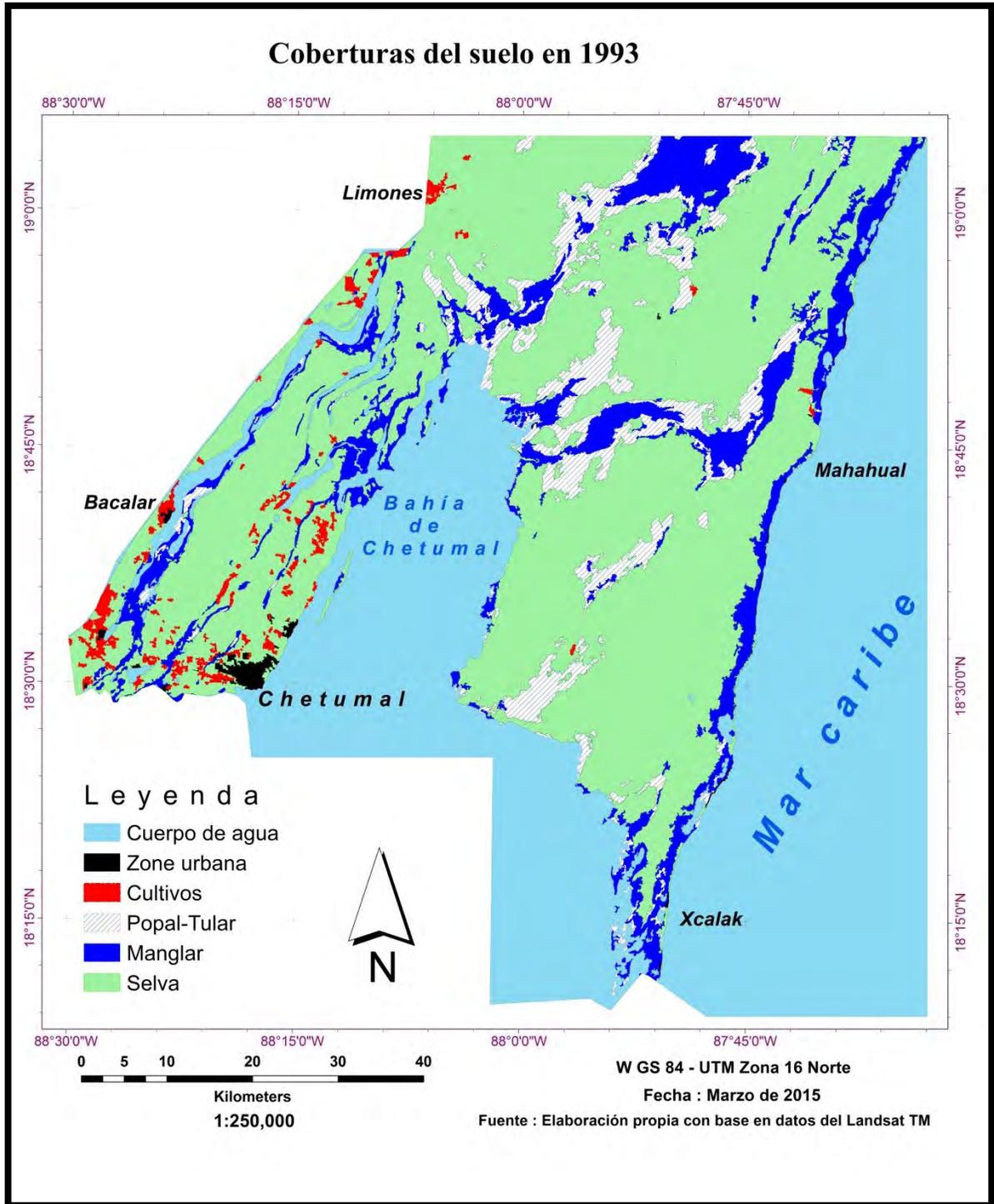


Figura 3.6: Mapa clasificado de la RCM, Quintana Roo, México, (10 de abril de 1993)

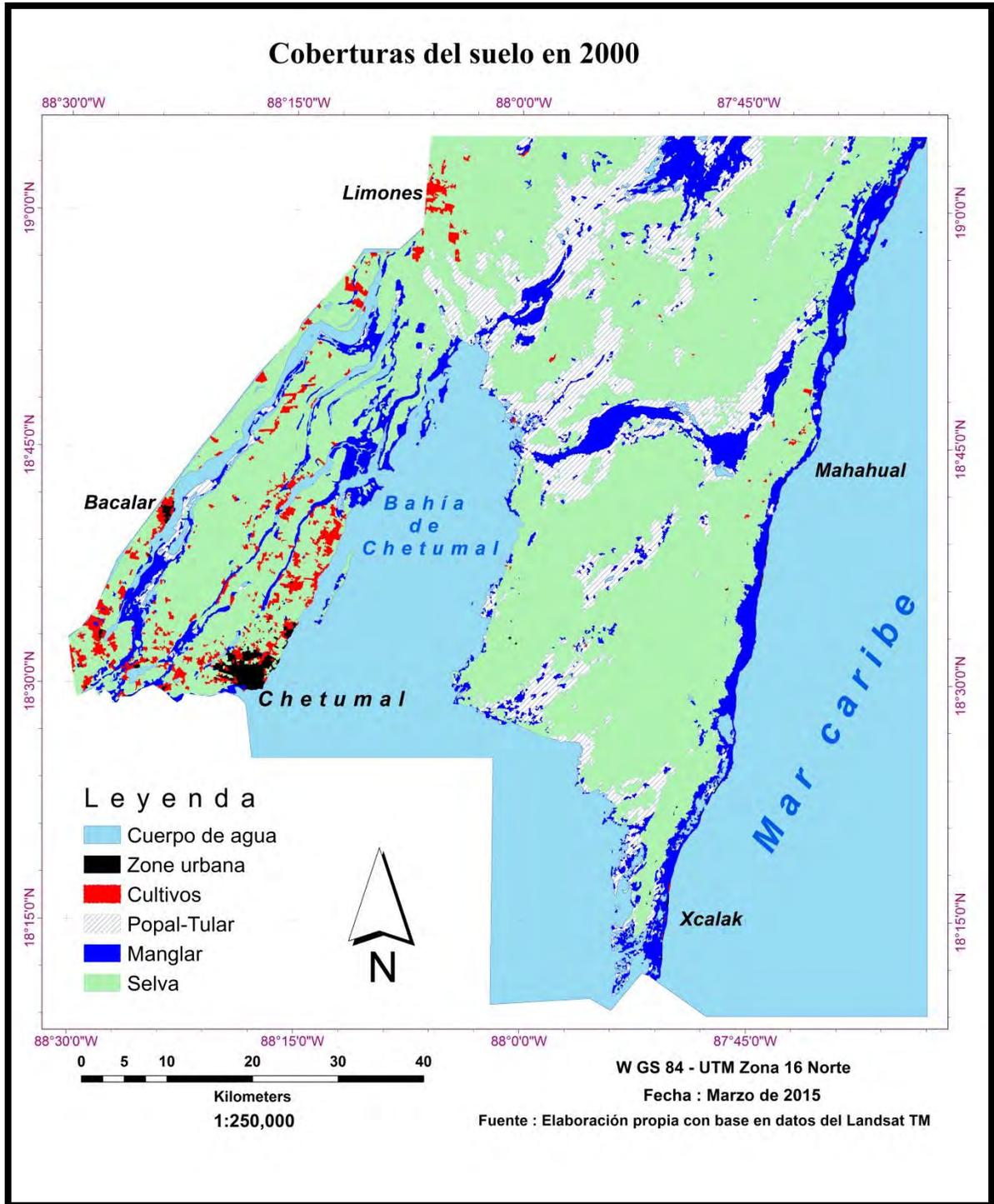


Figura 3.7: Mapa clasificado de la RCM, Quintana Roo, México, (09 de Febrero de 2000)

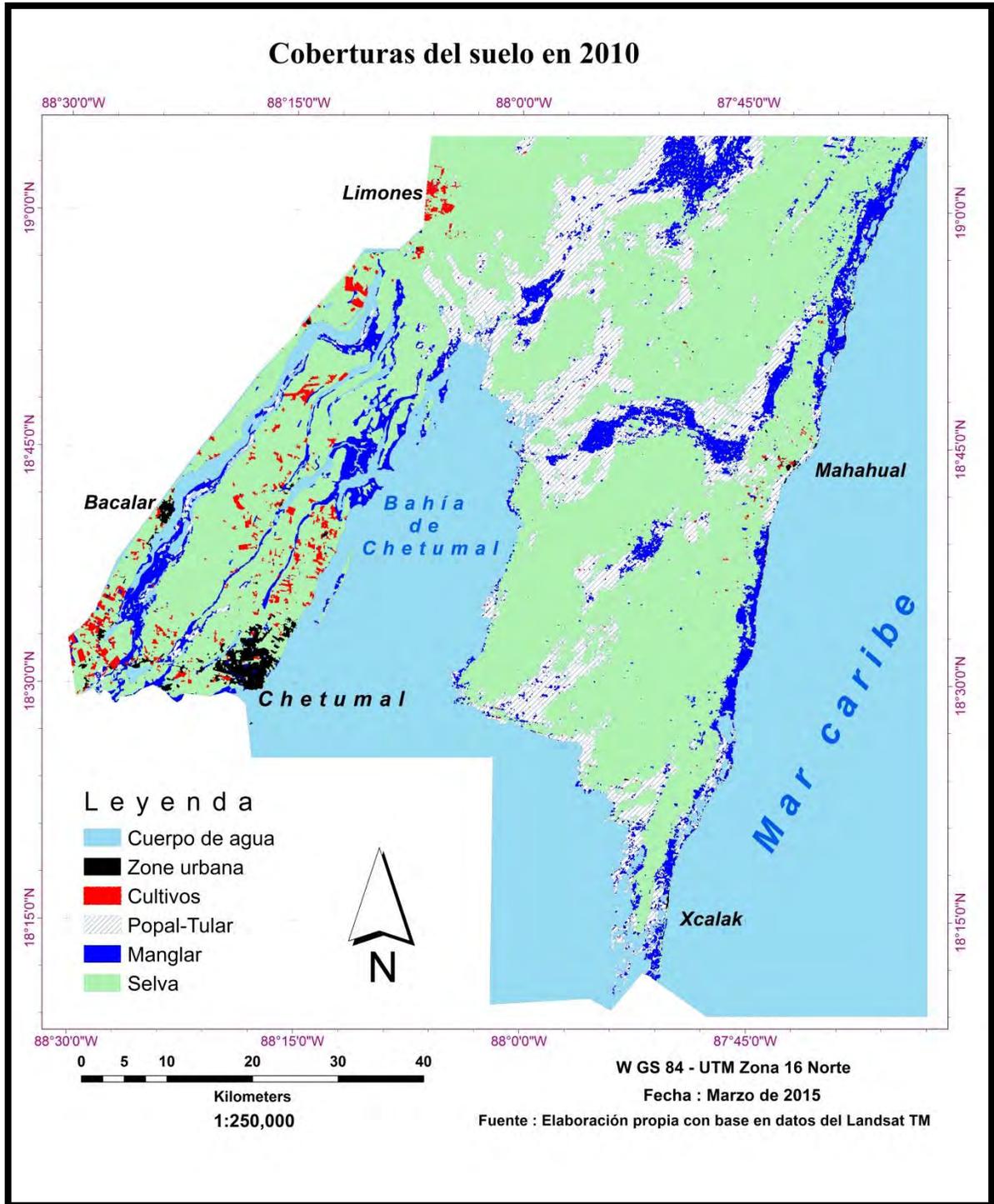


Figura 3.8: Mapa clasificado de la RCM, Quintana Roo, México, (14 de Febrero de 2010)

Exceptuando a Agua (~ 45%), la prevalencia de las selva en el paisaje es evidente (Figuras 3.7, 3.8 y 3.9), y se la pueden considerar como la matriz de la RCM, ya que representa el elemento más extenso y más conectado del paisaje que desempeña un papel dominante en la función del paisaje. Un proceso de fragmentación en selva es evidente en los mapas que se ve intensificado con cada año sucesivo desde 1993. Por otra parte, las humedales (Popal-Tular y manglares, colectivamente) constituyen la tercera clase más grande. Los mapas muestran grandes parches de manglares siendo reemplazados por Popal-Tular.

Mientras que la agricultura, la cuarta más grande categoría en la región, se concentra principalmente en la parte oeste, en las cuencas de agua dulce de laguna de Bacalar y Río Hondo. También se puede observar una pequeña mancha de cultivos, ubicados alrededor de Majahual, cerca del aeropuerto. La clase zona urbana comprende el área más pequeña del estudio, y es principalmente prominente alrededor de las principales ciudades (Chetumal, Caderita, Bacalar, y Limones) tanto en el interior como a lo largo de la costa del Caribe de Santa Rosa, en el norte, pasando Majahual hasta Xcalak, en el extremo sur.

3.4.2 La Precisión (Fiabilidad) de la Clasificación Alcanzada

Tabla 3.4- una matriz de error, resume los resultados del análisis de la fiabilidad de mapeo. La matriz enumera las muestras clasificadas correctamente en la diagonal (color amarillo) y los errores son los valores, fuera de la diagonal. La Tabla 3.4 muestra que la clasificación alcanzó una precisión global de 94.29% con un índice kappa de 0.9141.

Tabla 3.4: Matriz de error para mapa clasificado, 2000

| Datos clasificados | Dato de referencia | | | | | | Σ | ErrorC |
|--------------------|--------------------|-------------|----------|-------------|---------|--------|-----|--------|
| | Cuerpo de Agua | Zona urbana | Cultivos | Popal-Tular | Manglar | Selva | | |
| Agua | 88 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 88 | 0.0000 |
| Zona urbana | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.0000 |
| Cultivos | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0.0000 |
| Popal-Tular | 0 | 0 | 0 | 12 | 4 | 2 | 18 | 0.3333 |
| Manglar | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 2 | 18 | 0.1111 |
| Selva | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 76 | 80 | 0.0500 |
| Σ | 88 | 2 | 7 | 13 | 20 | 80 | 210 | |
| ErrorO | 0.0000 | 0.5000 | 0.2857 | 0.0769 | 0.2000 | 0.0500 | | 0.0571 |

Fuente: Elaboración propia

(Donde ErrorC=Errores de comisión y ErrorO = Errores de omisión):

Fiabilidad (Exactitud) global del mapa = $(88+1+5+12+16+76)/210 = 198/210 = 94.29\%$

Tabla 3.5: Índices Estadística por clase derivados de la matriz

| CLASE | Exactitud del productor | Exactitud de usuario |
|-------------|-------------------------|----------------------|
| Agua | 88/88 = 100% | 88/88=100% |
| Zona urbana | 1/2 = 50% | 1/1=100% |
| Cultivos | 5/7 = 71.43% | 5/5=100% |
| Popal-Tular | 12/13 = 92.31% | 12/18=66.67% |
| Manglar | 16/20 = 80% | 16/18=88.89% |
| Selva | 76/80 = 95% | 76/80=95% |

Fuente: Elaboración propia

Los muestreos de las clases relativamente homogéneas (cuerpos de agua, los humedades y Selva) y clases mixtas (urbanos y las zonas agrícolas dieron altas valores de exactitud o precisión del productor (>80%) y más bajas respectivamente (Tabla 3.5). El índice kappa de 0.9141 indica un alto grado de concordancia “muy buena” con datos de referencia o realidad, e implica que 91.41% de la clasificación es de acuerdo con los datos de referencia, dejando sólo 8.39% al azar.

3.4.3 Análisis de Cambio de la Cobertura Terrestre.

El análisis de los patrones espaciales de los cambios de cobertura del suelo sustenta el tercer objetivo del capítulo: caracterizar las tendencias de cobertura de la tierra en la región. Los dos mapas de clasificación cruzada (Figura 3.9): 1993-2000 y 2000-2010 representan la persistencia, es decir, zonas en las que no se haya producido el cambio entre las coberturas del suelo (en verde), y los patrones espaciales entre clases de conversiones entre las fechas (en otros colores).

Una característica obvia en estos mapas, es el incremento rápido seguido por el declive de las zonas agrícolas, en la parte continente al oeste de la Bahía de Chetumal en los dos períodos del estudio, respectivamente, debido esencialmente a su conversión en Selva.

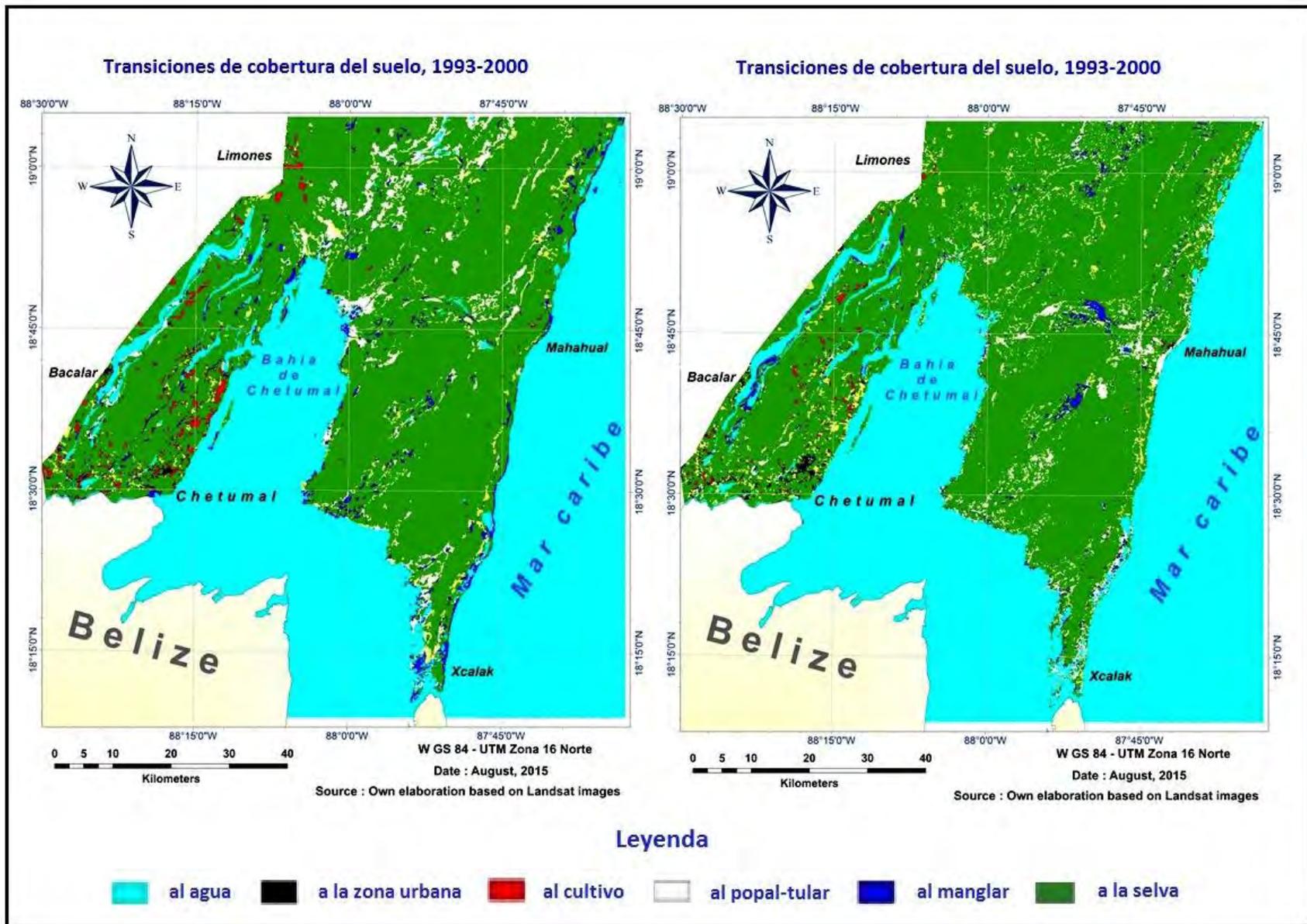


Figura 3.9. Patrón espacial de cambio de cambio en la cobertura terrestre entre las fechas.

Otro cambio importante es la marcada expansión de las zonas urbanas, especialmente alrededor de Chetumal y Mahahual, probablemente como resultado del crecimiento natural. Otro cambio notable es la fragmentación de la vegetación leñosa (Selvas y manglares) alrededor de las principales zonas urbanas, especialmente en Mahahual.

3.4.3.1 Magnitud y la tasa de los cambios

Tabla 3.5 y gráficamente, Figuras 3.10 y 3.11, respectivamente, proporcionan información cuantitativa sobre la magnitud de cada tipo de cobertura terrestre y su tasa de cambio. Los valores negativos indican una reducción de la tasa y magnitud del cambio.

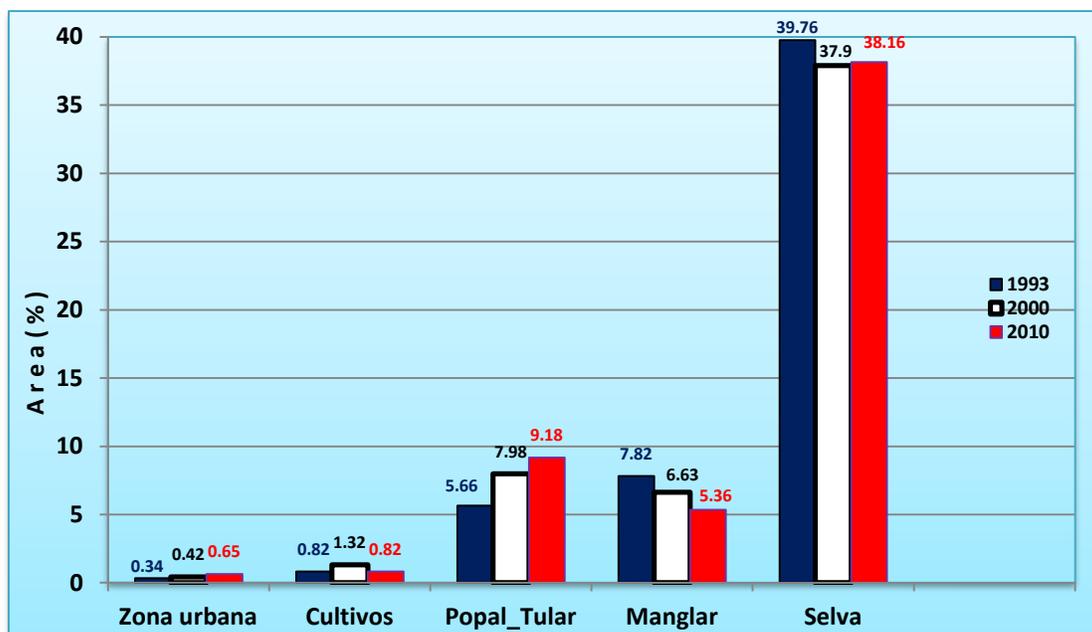
Tabla 3.5 Cobertura del suelo y su cambio entre las fechas

| Cobertura terrestre | Superficies 1993 | | Superficies 2000 | | Superficies 2010 | | Cambios | |
|---------------------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|-----------|-----------|
| | (Km ²) | % | (Km ²) | % | (Km ²) | % | 1993-2000 | 2000-2010 |
| | | | | | | | | |
| Cuerpo de agua | 3339.23 | 45.604 | 3352.52 | 45.786 | 3356.28 | 45.837 | 13.29 | 3.76 |
| Zona Urbana | 24.72 | 0.338 | 28.23 | 0.386 | 47.46 | 0.648 | 3.51 | 19.23 |
| Cultivos | 59.93 | 0.818 | 96.47 | 1.318 | 59.90 | 0.818 | 36.54 | -36.57 |
| Popal-Tular | 414.78 | 5.664 | 584.34 | 7.980 | 672.12 | 9.179 | 169.56 | 87.78 |
| Manglar | 572.35 | 7.817 | 485.50 | 6.630 | 392.07 | 5.355 | -86.85 | -93.43 |
| Selva | 2911.21 | 39.759 | 2775.16 | 37.900 | 2794.39 | 38.163 | -136.05 | 19.23 |
| Suma | 7,322.22 | 100 | 7,322.22 | 100 | 7,322.22 | 100 | 0 | 0 |

Fuente: Elaboración propia

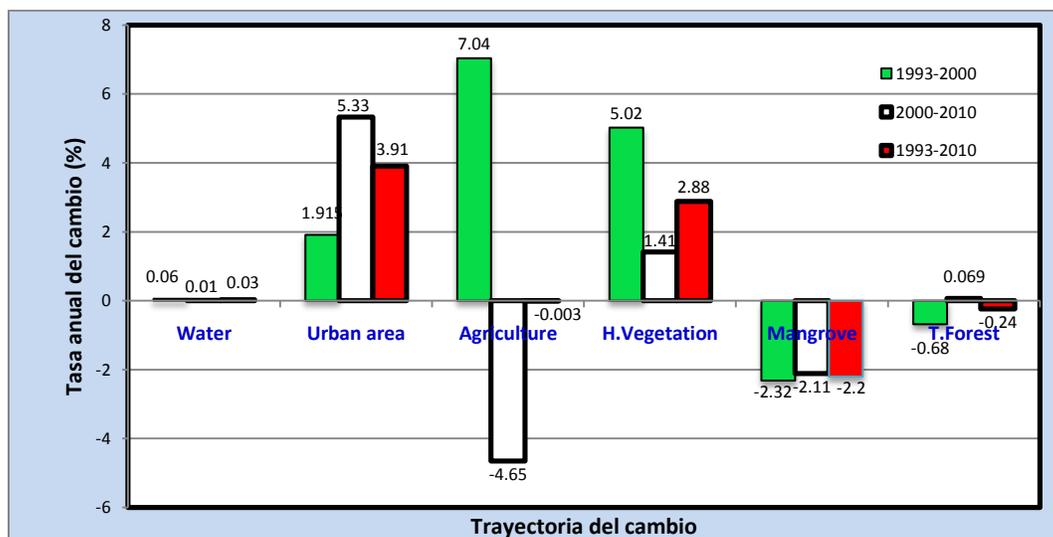
Popal-tular expandió, significativamente, en todos los sub-periodos (por 169.56 Km² en el período 1993-2000, al 5,02% anual, y por 87,78 km² de 2000-2010, al 1,41% anual, que corresponde a un incremento anual neto global del 2,88% para el todo el período de estudio. En contraste, los manglares perdieron cobertura de manera constante durante los dos periodos del estudio: de 1993-2000 por 86,85 Km² en al -2,3% al año, y desde 2000-2010 por 93,43 Km² al -2.11% por año, manteniendo una tasa de declive anual global de -2,2%. Por otra parte, una gran reducción en la selva (136.06 Km²) ocurrió en el período 1993-2000, a una tasa anual del -0.68% (Figura3.11). Pero la tendencia se revirtió durante

el segundo período, recuperando marginalmente (19.23 Km²) a una tasa de 0.07% por año, lo que refleja una pérdida neta anual de -0.24%, para todo el período de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10: Distribución de las coberturas en los años 1993, 2000 y 2010



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11. Tasa anual de cambio en cobertura terrestre entre las fechas

Las zonas agrícolas presentaron un resultado interesante: ganaron 36,56 Km² (al 7.04% anual) en el período 1993-2000, pero perdió casi la misma cantidad (al -4.65% por año)

entre 2000 y 2010, lo que refleja una tasa anual neta insignificante de cambio para el período todo de estudio. En contraste, la clase zona urbana exhibió un incremento espacial intensa en ambos sub-períodos. Se aumentó por 3,51 Km² (1,91% anual) durante 1993-2000, y luego expandió rápidamente, más o menos cinco veces, a 19.23 Km² (al 5.99% anual) entre 2000 y 2010, lo que traduce en una tasa anual neto global del 3.91% para el todo el período de estudio.

3.4.3.2 Naturaleza de los Cambios entre las Coberturas

Algunas clases contribuyeron hacia las variaciones de otras categorías (Figura 3.12).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12. Contribuciones al cambio neto de cada seleccionada cobertura.

Por ejemplo, zona urbana ganó principalmente de cultivos y selva, pero perdió al *manglar* en el período, 1993-2000. Entre 2000 y 2010, la contribución al cambio neto en *urbana* por *selva* y *cultivo*, al menos, duplicó, y *urbana* también recuperó su pérdida a los manglares durante el periodo 2000-2010.

La pérdida en *selvas* explica la mayoría de los aumentos totales en *cultivo* en el primer sub-período, mientras que los cambios más significativos en el segundo sub-período eran ganancias, principalmente, en *selva*, *zonas urbanas* y *manglares*, los cuales conllevaron pérdida neta en *cultivo*.

El mayor contribuyente a la pérdida neta de *manglares* desde 1993-2000 fue su conversión al *popal-tular* y *agua*, lo que anuló pequeñas ganancias a expensa de la *selva*. Mientras que, la pérdida neta en *manglares* en el siguiente periodo, se debe a las ganancias en las cuatro clases: *selva*, *popal-tular*, el *agua* y la *zona urbana*. Por otro lado, las ganancias en todas las demás clases contribuyeron a una pérdida global neta (1.86% de la **RCM**) en la *selva* en el período 1993-2000. No obstante, el patrón se cambió a ganancia neta en el período 2000-2010, gracias principalmente a las pérdidas en *manglares* y en *cultivos*.

3.4.3.3 *Tendencia espacial de la transición*

La **RCM** es una región socialmente construida y, por tanto, altamente influenciada por las actividades humanas. Para descifrar tanto la dinámica de los patrones de cambio inducidos por intervención humana e identificar los "puntos calientes" del cambio, se utilizó el módulo "**TREND**" de **LCM** (Idrisi selva), para mapear las tendencias de transición de la vegetación natural (*Selva*, *manglares* y *popal-tular*) hacia la cobertura antrópica (*área urbana* y *cultivo*) durante el período de estudio de 17 años.

El mapa resultante ([Figura 3.13](#)), creado con un polinomio de 3^{er} orden por defecto, representa una superficie simulada que especifica las ubicaciones generales de las transiciones entre las categorías seleccionadas: de zonas sin cambio, denotado por "*Baja*", a zonas con cambio marcada, representado por "*alta*".

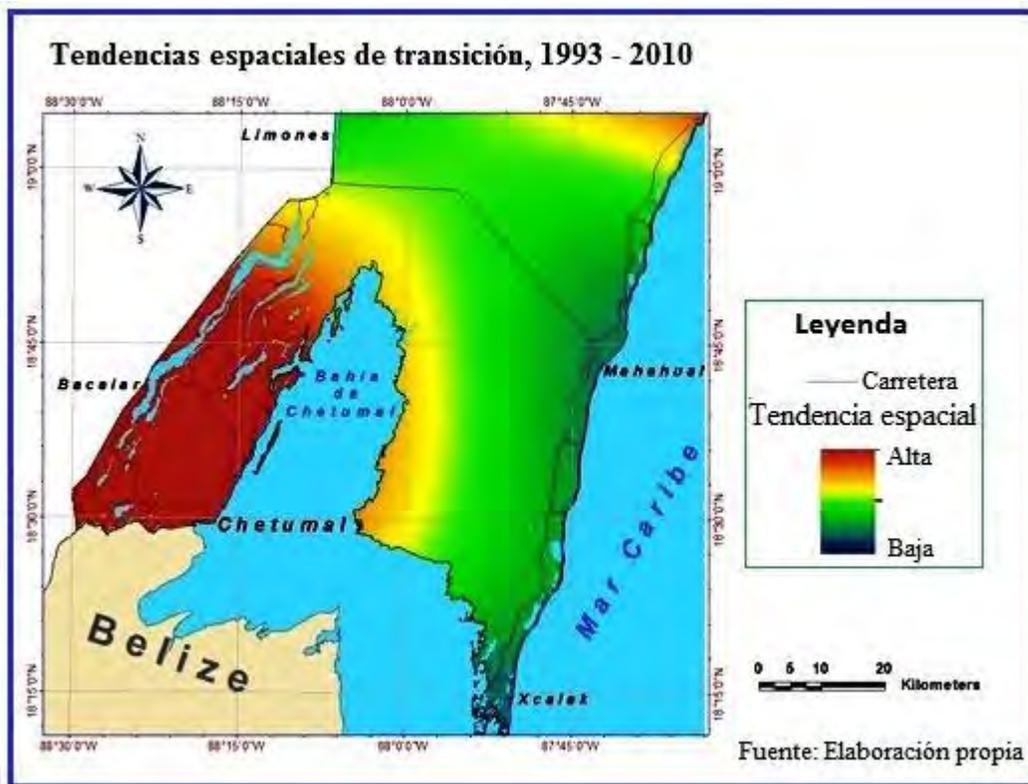


Figura 3.13. Tendencia espacial de transición cobertura natural a coberturas artificiales

El mapa revela una tendencia del cambio hacia el suroeste en la parte continente, donde la inclinación más intensa para cambiar de vegetación natural a las cubiertas humanas, se encuentra concentrada alrededor de la parte sur-occidental de la Costa Maya, entre laguna de Bacalar, Bahía de Chetumal y río hondo(frontera entre México y Belice). No cambio o persistencia (en verde), caracterizo el resto de Costa Maya y la península.

3.5 Discusión

3.5.1 Evaluación de la Precisión

Resultados de esta capítulo confirman el valor de la segmentación y clasificación orientada a objetos (*OBIA*) para el mapeo y caracterización de cambio de la cobertura terrestre, integrando imágenes Landsat y datos auxiliares. El enfoque resulto en una precisión de clasificación alta (94.29%), mucho mejor que la recomendada (> 85%), para los mapas derivados de imágenes satelitales (Foody, 2002) y un valor κ (0.9141) que indica "excelente o casi perfecto" acuerdo entre el mapa y datos de referencia (Monserud & Leeman, 1992).

Estas estadísticas resalta el éxito de nuestros procedimientos de teledetección en cartografiar, precisamente, la distribución espacial de las coberturas del suelo de la **RCM**. Asimismo, la alta exactitud temática derivada ($> 90\%$) asemeja a las alcanzadas en estudios análogos (Frohn, et al., 2009; Ceccareli, et al., 2013). En este sentido, se puede considerar a los mapas derivados como aptos para el análisis de detección de cambios.

Pero, a pesar de bueno resultado mencionados anteriormente, algunas clases de cobertura del suelo, es decir, *zonas urbanas/cultivos* con *selva*, y *manglares* con *popal-tular*, presentaron algunos problemas de clasificación (Tabla 3.4). Las *zonas urbanas* y *cultivo* tuvieron los errores de omisión más bajos ($> 0,2$) y cero errores de comisión. Esto sugiere que estos errores fueron probablemente exagerados debido a la representatividad limitada de muestras en estas clases, como se han señalados en estudios similares (Ceccareli, et al., 2013).

En segundo lugar, las categorías mixtas (figura3.5), como las *zonas urbanas*, *cultivos* y *selva*, son generalmente más difíciles de clasificar debido a que sus bordes de clase son elaborados de forma artificial, y pueden existir un conflicto entre las clases temáticas deseadas y sus posibilidades de separación (Foody, 2002; Warner & Campagna, 2009). Así, no es sorprendente que esas clases sufrieron mayores errores de comisión.

En tercer lugar, la imagen Landsat 2000 fue tomada en febrero, durante el invierno, la temporada seca cuando no hay muchas actividades agrícolas, por lo que algunos campos agrícolas aparecieron principalmente como monte bajo y probablemente fueron clasificados erróneamente como *Selva*.

Mientras que *manglares* y *popa-tular* habitan en ambientes húmedos similares, y a menudo se encuentran adyacentes entre sí. Su similitud espectral hace que aparezcan casi igual también en color en las imágenes, lo que provoca la confusión entre ellos (Figura 3.5).

Todas estas confusiones podrían haberse reducidas y la precisión global mejorada aún más, si hubiéramos llevamos a cabo un extenso trabajo de campo, que desafortunadamente no era logísticamente posible.

3.5.2 Características de las Tendencias del cambio

Resultados de la detección de cambios muestran que la *urbanización* y otros cuatro procesos opuestos, como la *deforestación* y *reforestación*; la *expansión agrícola* y el *abandono de tierras*, fueron activos en la *RCM* (Willaarts, et al., 2014).

La expansión agrícola sustentó la deforestación durante 1993 y 2000 (Figuras 3.9 y 3.12), pero cuando el incremento finalmente terminó, en el segundo periodo, una recuperación forestal ocurrió (a expensas de las *zonas agrícolas* y *manglares*), así reflejando un patrón clásico de transición forestal (Rudel, et al., 2005; Uriarte, et al., 2010), el cual es generalmente muy común en América Latina y en la península de Yucatán, en particular, (Turner II, 2010).

Lugares experimentan transiciones forestales cuando cese la disminución de la cobertura forestal y comienza la recuperación con nuevo crecimiento del bosque mediada por los factores sociales, económicos y políticos (Rudel, et al., 2005). Transición forestal en la *RCM* puede atribuirse al hecho de que entre 1993 y 2000 la agricultura fue la principal actividad económica junto con la pesca, y las políticas agrícolas gubernamentales en forma de subsidios, controles de precios y la puntual distribución de terreno fomentaron la deforestación (Geoghegan, et al., 2001; Turner II, 2010)

Pero, después, estas políticas fueron suspendidas a favor de la liberalización del comercio y un nuevo énfasis en el turismo (Vance & Geoghegan, 2002; Schmook & Vance, 2009). La falta de inversión pública en la agricultura rural a favor del turismo, a menudo motivado por las normas de conservación, favoreció la recuperación del bosque, de esta manera la recuperación de los ecosistemas (Bray & Kleipeis, 2005; Turner II, 2010).

A pesar de que el abandono de tierras alivia presión sobre los recursos naturales, y es positivo para la recuperación del medio ambiente, algunos autores (Serra, et al., 2008; Ignacio-Díaz, et al., 2011) advierten que también podría conllevar consecuencias perniciosas, tales como una disminución gradual de la biodiversidad y complejidad del paisaje así como el incremento de la vulnerabilidad a ciertos riesgos como incendios forestales, inundaciones y las sequías. Especulamos que los reportados aumentos de los casos de incendios forestales en la *RCM* podrían estar vinculados al abandono de la tierra.

El abandono de tierras también podría tener un serio impacto en la seguridad alimentaria y bienestar de la vida rural en la *RCM*, dado que la urbanización está expandiendo rápidamente consumiendo las zonas agrícolas circundantes. Preocupante, también es la continua destrucción de los manglares (Figura 3.9) al casi doble (2.2%) del promedio nacional de México de alrededor de 1.3% (FAO, 2007), reflejando un aumento de las actividades humanas (construcción de hoteles y casas, muelles, carreteras, delimitación de propiedades privadas en zona de manglar) y huracanes (Hirales-Cota, et al., 2010).

El análisis de la tendencia del cambio ha revelado que la parte continental de la *RCM* (en las cuenca de laguna de Bacalar y río Hondo), como el "punto caliente" de cambio de la *RCM* (Figura 3.13)-y no a la península como habíamos pensando- atraídos probablemente por la disponibilidad abundante de agua dulce, la proximidad a las zonas urbanas y redes de carreteras. Este resultado debe ayudar a las autoridades prestar su atención en esta área en particular para controlar y manejar efectivamente estos cambios rápidos.

Y muy importante aún, algunos de nuestros resultados de análisis de cambio son comparables con resultados de otros publicados estudios que, indirectamente, consideraron la *RCM*, pero utilizaron un conjunto de diferentes datos y técnicas de teledetección.

Por ejemplo, nuestra tasa de deforestación tropical anual de 0.68% para el período 1993-2000, es consistente con 0.76% estimado por Díaz-Gallegos, et al., (2010) para el sur de Quintana Roo durante 1976-2000, y con el 0.6% calculado por García-Rubio, et al., (2005) para tres localidades (ejidos) cerca de Chetumal para el período 1990-2000. Estos estudios dan una confirmación adicional de la fiabilidad de las tasas de cambio que se obtuvo en este estudio.

3.6 Conclusión

El estudio ha establecido un marco repetible y eficiente de procesamiento de imágenes basada en la segmentación y clasificación orientada a objetos para derivar mapas temáticos precisos a partir de imágenes Landsat. Estos mapas son útiles en diversos análisis de detección de cambio para una exitosa comprensión y gestión ambiental. El estudio ha revelado la *urbanización*, el *abandono de tierra agrícola* (transición forestal) y la *tala de*

manglares como la explicación principal del cambio de la **RCM**, impulsado por factores políticos y socioeconómicos asociados con el desarrollo del turismo.

Desde la perspectiva de la planificación y manejo de la conservación, parece que las autoridades han perdido el control total de la protección de los manglares. Esto se refleja en la continua destrucción de los manglares, especialmente en Mahahual en áreas a lo largo de la línea costera Caribeña, a pesar de que los manglares gozan de protección tanto nacional como internacional.

Las autoridades pertinentes y los interesados participantes deben realizar levantamientos ambientales periódicos basados en Geoinformática tanto para monitor el estado de conservación de los manglares, como para asegurar que el turismo y el desarrollo de infraestructuras relacionadas respeten las normas y reglamentos de desarrollos existentes. Una forma más rápida y rentable de lograr esto es mediante la aplicación de la metodología descrita en este capítulo, y aprovechar del masivo archivo de Landsat disponible gratuitamente o, alternativamente imágenes comerciales, con mayor resolución.

3.7 Referencias del Capítulo 3

- Adams, J. B., & Gillespie, A. R. (2006). *Remote Sensing of landscapes with spectral images: a Physical modeling Approach*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Anderson, J. R., Hardy, E. E., Raach, J. T., & Witmer, R. E. (1976). *A Land Use And Land Cover Classification System For Use With Remote Sensor Data. Geological Survey Professional Paper 964*. Washington: United States Government Printing Office,.
- Anjos, D., Lu, D. D., & Sant'Anna, S. (2016). Change Detection Techniques using Multisensor Data. En P. S. Thenkabail (Ed.), *Remote Sensing Handbook: Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies* (págs. 377-397). Boca Raton, FL.USA: Taylor & Francis Group, LLC.
- Baartman, J. M., van Lynden, G. J., Reed, M. S., Ritsema, C. J., & Hessel, R. (2007). *Desertification and land degradation: origins, processes and solutions: A literature review* (DESIRE REPORT Series: number 4 ed.). Wageningen, The Netherlands: ISRIC, the Netherlands.
- Blaschke, T. (2013). *OBJECT BASED IMAGE ANALYSIS: A NEW PARADIGM IN REMOTE SENSING?* Baltimore, Maryland : ASPRS 2013 Annual Conference.
- Blaschke, T., Burnett, C., & Anssi, P. (2005). Image Segmentation Methods for Object-based Analysis and Classification. En S. M. DE JONG, & F. D. VAN DER MEER (Edits.), *REMOTE SENSING IMAGE ANALYSIS: INCLUDING THE SPATIAL DOMAIN* (págs. 211-234). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Blaschke, T., Hay, G., Kelly, M., Lang, S., Hofmann, P., Addink, E., . . . Tiede, D. (2014). Geographic Object-Based Image Analysis – Towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 180-191.
- Bray, D. B., & Kleipeis, P. (2005). Deforestation, forest transitions, and Institutions for Sustainability in Southeastern Mexico, 1900-2000. *Environmental and History*, 11, 195-223.
- Bürgi, M., Hersperger, M. A., & Schneeberger, N. (2004). Driving forces of landscape change-current and new directions. *Landscape Ecology*, 19, 857-868.
- Byron, I., & Lesslie, R. (2008). Spatial Methodologies for Intergrating Social and Biophysical Data at a Regional or Catchment Scale. En R. J. Aspinall, & M. J. Hill (Edits.), *Change Science, Policy and Management* (págs. 44-61). Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (Quinto ed.). New York: The Guilford Press.

- Campos Cámara, B. L. (2007). Urbanización y turismo. En B. L. Campos Cámara (Ed.), *Urbanización y turismo* (págs. 7-11). Barcelona: Ediciones Pomares,S.A.
- Campos-Cámara, B. L. (2010). Region turística:Costa Maya. En B. L. Campos-Cámara (Ed.), *Análisis territorial del turismo region Costa Maya* (págs. 15-50). México,D.F: Plaza y Valdés S.A de C.V.
- Castillo-Villanueva, L., Velazquez Torres, D., & López Montejo, D. (2010). La planeación urbana-regional en Costa Maya. En B. L. Campos Cámara (Ed.), *ANÁLISIS TERRITORIAL DEL TURISMO REGIÓN COSTA MAYA* (págs. 75-110). Madrid ,España: Plaza y Valdes Editores.
- Ceccareli, T., Smiraglia, D., Bajocco, S., Rinaldo, S., De Angelis, A., & Salvati, L. P. (2013). Land cover data from Landsat single-date imagery: an approach integrating pixel-based and object based classifiers. *European Journal of Remote Sensing*, 46, 699-717.
- Chavez, P. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24, 459-479.
- Chuvieco, E. (1995). *FUNDEMENTALS DE TELEDECCION ESPACIAL* (Segunda ed.). MADRID: EDICIONES RIALP,S.A.
- Clark, B., & Pellikka, P. (2009). Landscape analysis using multi-scale segmentation and object-oriented classification. En A. Röder, & J. Hill (Edits.), *Recent Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment* (págs. 323-341). Leiden,the Netherlands: CRC Press/Balkema.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data:Principles and Practices* (2nd ed.). Boca Raton,Florida: CRC Press and Taylor & Francis Group.
- Coppin, P., Jonckheere, & Nackaerts, K. M. (2004). Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9), 1565-1596.
- Dewan, A. M., & Yamaguchi, Y. (2009). Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh:Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography*, 29, 390-401.
- Díaz-Gallegos, J. R., Mas, J. F., & Velázquez, A. (2010). Trends of tropical deforestation in Southeast Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 31, 180-196.
- Eastman, J. (2012). *IDriSi Selva Manual* (Version 17.01 ed.). Clark Labs. Clark University.USA.
- Eastman, J. R., Crema, S., Zhu, H., & Toledano, J. (2005). In-Process Classification Assessment of Remotely Sensed Imagery. *Geocarto International*, 20(4), 33-44.

- Eswaran, H., Lal, R., & Reich, P. (2001). Land Degradation: An Overview. En E. Bridges, I. Hannan, L. Olderman, F. de Vries, S. Scherr, & S. Sombatpant (Edits.), *Response to Land Degradation* (págs. 20-34). Enfield (NH) USA: Science Publishers.
- FAO. (2005). *Land Cover Classification System (LCCS), version 2: Classification Concepts and User Manual*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2007). *The world's mangroves 1980-2005. FAO Forestry United Nations Paper 153*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80, 185 – 201.
- Foody, G. M. (2003). Remote sensing of tropical forest environments: towards the monitoring of environmental resources for sustainable development. *INT. J. REMOTE SENSING*, 24(20), 4035-4046.
- Frohn, R. C., Reif, M., Lane, C., & Autrey, B. (2009). Satellite remote sensing of isolated wetlands using object-oriented classification of Landsat-7 data. *WETLANDS*, 29(3), 931-941.
- García-Rubio, G., Schmook, B., & Espejel-Carvajal, I. (2005). Dinámica en el uso del suelo en tres ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 58, 122-139.
- Geoghegan, J., S, C.-V., Klepeis, P., Macario-Mendoza, P., Ogneva-Himmelberger, Y., Roy, R. C., . . . Vance, C. (2001). . Modeling tropical deforestation in the southern Yucatán peninsular region: comparing survey and satellite data. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 25-46.
- González-Vera, A. (2010). Mahahual, planeación y sustentabilidad. En L. Castillo-Villanueva, M. E. Oroszco-Hernandez, & D. Velazquez-Torres (Edits.), *Ciudades, Urbanización y Metropolización* (págs. 359-374). México D.F.: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
- Hamilton, R., Megown, K., Mellin, T., & Fox, I. (2007). *Guide to automated stand delineation using image segmentation*. Salt Lake City: UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Remote Sensing Applications Center.
- Herrera Sansores, J. C., & Heridia Escobedo, J. D. (2011). Clima. En C. Pozo, N. Armijo Canto, & S. Calmé (Edits.), *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo I* (págs. 49-56). México, D. F.: El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd).

- Hirales-Cota, M., Espinoza-Avalos, J., Schmook, B., Ruiz-Luna, A., & Ramos-Reyes, R. (2010). Agentes de deforestación de manglar en Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, sureste de México. *Ciencias Marinas*, 36(2), 147–159.
- Horning, N., Robinson, J., Sterling, E., Turner, W., & Spector, S. (2010). *Remote Sensing for Ecology and Conservation: A Handbook of Techniques* (First ed.). Oxford: Oxford University Press.
- IGBP & IHDP. (1999). Land-Use and Land-Cover Change (LUCC)-Implementation Strategy. *IGBP REPORT 48 IHDP REPORT 10*.
- Ignacio-Diaz, G., Nahuelhual, L., Echeverría, C., & Marín, S. (2011). Drivers of land abandonment in Southern Chile and implications for landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 99, 207-217.
- Jansen, L. J., & Di Gregorio, A. (2002). Parametric land cover and land-use classifications as tools for environmental change detection. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 91, 89-100.
- Jensen, J. R. (1996). *Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective* (Segunda ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Lambin, E. F. (1997). Modeling and monitoring land cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*, 21(3), 375-393.
- Lambin, E. F. (1997). Modeling and monitoring land cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*, 21(3), 375-393.
- Lambin, E. F., Geist, H., & Rindfuss, R. R. (2006). Introduction: Local Processes with Global Impacts. En E. F. Lambin, & H. Geist (Eds.), *Land-Use and Land-Cover Change : Local Processes, Global Impacts* (págs. 1-8). Berlin: Springer.
- Lambin, E., & Geist, H. (2006). *Land-Use and land-cover change. Local Processes and Global Impacts*. Berlin: Springer.
- Lambin, E. F., Geist, H., & Lepers, E. (2003). Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Anna. rev. Environ Resource*, 205-241.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2004). *REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION* (5th ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Lizarazo, I., & Elsner, P. (2011). Segmentation of Remotely Sensed Imagery: Moving from Sharp Objects to Fuzzy Regions. En P.-G. Dr Ho (Ed.), *Image Segmentation* (pág. 249). Rijeka, Croatia: InTech.

- LU, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 853-870.
- Lu, D., Mausel, P., Brondízio, & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365–2407.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDÍZIO, & MORAN, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365–2407.
- Lu, D., Moran, E., Hetrick, S., & Li, G. (2011). Land-Use and Land-Cover Change Detection. En Q. Weng (Ed.), *Advances in Environmental Remote Sensing: sensors, algorithms and applications* (págs. 273-288). Boca Raton: CRS Press; Taylor & Francis Group.
- Macleod, R. D., & Congalton, R. G. (1998). A Quantitative Comparison of Change-Detection Algorithms for Monitoring Eelgrass from Remotely Sensed Data . *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64(3), 207-216.
- Mao, Z., Chen, J., Philpot, B., Li, J., & Pan, D. (2013). Detecting changes in high-resolution satellite coastal imagery using an image object detection approach. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7), 2454-2469.
- Mas, J. (1999). Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 20(1), 139-152.
- Mas, J.-F., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., . . . Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multidecade spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5, 249-261.
- Monserud, R. A., & Leeman, R. (1992). Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. *Ecological Modelling*, 62(4), 275-293.
- Narumalani, S., Hladky, J. T., & Jensen, J. R. (2005). Information extraction from remote sensed data. En J. D. Bossler, J. R. Jensen, R. B. McMaster, & C. Rizos (Edits.), *Manual of Geospatial Science and Technology* (págs. 299-324). New York: Taylor & Francis.
- Navulu, K. (2007). *Multispectral Image Analysis Using the Object-Oriented Paradigm*. Boca Raton,: CRC Press.
- Petit, C., Scudder, T., & Lambin, E. (2000). Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: resettlement and rapid land-cover changes in the southern-eastern Zambia. *International Journal of Remote Sensing*, 22(17), 3435-3456.

- Prenzel, B. (2004). Remote sensing- based quantification of land-cover and land-use change for planning. *Progress in planning*, 61, 281-299.
- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177, 593-596.
- Richards, J. A. (2013). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction* (5 ed.). Herdelberg: Springer.
- Röder, A., & Hill, J. (2009). Remote sensing and geoinformation processing in land degradation assessment—an introduction. En A. Röder, & J. Hill (Edits.), *Recent Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment* (págs. XVII-XX). London: Taylor & Francis Group.
- Rudel, T. K., Coome, O. T., Moran, E., Achard, F., Angelsen, A., Xu, J., & Lambin, E. F. (2005). Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change*, 15, 23-31.
- Schmook, B., & Vance, C. (2009). Agricultural Policy, Market Barriers and Deforestation: The Case of Mexico's Southern Yucatán . *World Development*, 37(5), 1015-1025.
- Serra, P., Pons, X., & Sauri, D. (2008). . Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape:A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Applied Geography*, 28, 189-209.
- Sing, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely- sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 2753-2767.
- Spurr, S. H. (1948). *Aerial photgraphs in Forestry* (Primera ed.). New York: Ronald Press.
- Thompson, M. (1996). A standard land-cover clasification scheme for remote-sensing application in South Africa. *South African Journal of Science*, 92, 34-42.
- Tomaso, C., Daniela, S., Bajocco, S., Bajoso, Rinaldo, S., De angelis, A., . . . Perini, L. (2013). Land cover data from Landsat single-date imagery: an approach integrating pixel-based and object based classifiers. *European Journal of Remote Sensing*, 46, 699-717.
- Turner II, B. (2010). Sustainability and forest transitions in southern Yucatán:The land architecture approach. *Land Use Policy*, 27, 170-179.
- Uriarte, M., Schneider, L., & Rudel, T. K. (2010). Synthesis: Land Transitions in the Tropics. *BIOTROPICA*, 42(1), 59-62.

- Václavík, T., & Rogan, J. (2009). Identifying Trends in LandUse/Land Cover Changes in the Context of Post-Socialist Transformation in Central Europe: A Case Study of the Greater Olomouc Region, Czech Republic. *GIScience & Remote Sensing*, 46(1), 54-76.
- Van Oort, P. (2007). Interpreting the change detection error matrix. *Remote Sensing of Environment*, 108, 1-8.
- Vance, C., & Geoghegan, J. (2002). Temporal and spatial modelling of tropical deforestation: a survival analysis linking satellite and household survey data. *Agricultural Economics*, 27, 317-332.
- Vázquez-Trejo, A. (2010). La Costa Maya, un espacio para la participación de México en la cooperación ambiental centroamericana. En B. L. Campos-Cámara (Ed.), *Análisis Territorial del Turismo Región Costa Maya* (págs. 153-174). México D.F.: Plaza y Valdés S.A, de C.V.
- Walsh, S. J., Evans, T. P., & Turner II, B. L. (2004). POPULATION-ENVIRONMENTAL INTERACTIONS WITH AN EMPHASIS ON LAND-USE/LAND-COVER DYNAMICS AND THE ROLE OF TECHNOLOGY. En S. Brunn, S. Cutter, & J. Harrington (Edits.), *Geography and Technology* (págs. 491-517). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Wang, Y. (2010). Remote Sensing of Coastal Environments: An Overview. En Q. Weng (Ed.), *REMOTE SENSING OF COASTAL ENVIRONMENTS* (págs. 1-21). Boca Raton: CRC Press; Taylor & Francis Series .
- Wang, Y., Mitchell, B. R., Nugranad-Marzilli, J., Bonyng, G., Zhou, Y., & Shriver, G. (2009). Remote sensing of land-cover change and landscape context of the National Parks: A case study of the Northeast Temperate Network. *Remote Sensing of the Environment*, 113, 1453-1461.
- Warner, T. A., & Campagna, D. (2009). *Remote Sensing with IDRISI Taiga: A Beginner's Guide*. Hong Kong: Geocarto International Centre.
- Willaarts, B., Salmoral, G., Farinaci, J., & Sanz-Sánchez, M. (2014). Trends in land use and ecosystem services in Latin America. En B. Willaarts, A. Garrido, & M. Llamas (Edits.), *Water for Food and Wellbeing in Latin America and the Caribbean: Social and Environmental Implications for a Globalized Economy* (págs. 55-80). Oxon and New York: Routledge.
- Wyatt, B. K. (2000). REMOTE SENSING OF LAND COVER AND LAND COVER CHANGE. En M. M. Verstraete, M. Menenti, & J. Peltoniemi (Edits.), *Observing Land from Space: Science, Customers and Technology* (págs. 127-136.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

- Wyman, M. S., & Stein, T. V. (2010). Modeling social and land-use/land-cover change data to assess drivers of smallholder deforestation in Belize. *Applied Geography*(30), 329-342.
- Yang, X. (2009). Remote Sensing, Geospatial Technologies and Coastal Ecosystems. En X. Yang (Ed.), *Remote Sensing and Geospatial Technologies for Coastal Ecosystem Assessment and Management, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, (págs. 1-14). Verlag Berlin Heidelberg : Springer.

Capítulo 4

Transiciones Sistemáticas de cobertura terrestre en la Región Costa Maya, Quintana Roo, México, 1993-2010

4.1 Introducción

La región Costa Maya (*RCM*) experimenta cambios significativos en su paisaje debido, principalmente, a las actividades humanas. Esta región es un destino turístico establecido en 1991 por el gobierno de Quintana Roo como motor para impulsar el desarrollo de la parte sur del estado. Como consecuencia, se ha visto un crecimiento acelerado en el desarrollo de infraestructura turística, el crecimiento urbano, las actividades y servicios relacionados. La industria turística ha convertido a la *RCM* en un enclave económico importante para Quintana Roo y en uno de los destinos turísticos de clase mundial.

El turismo es importante para la prosperidad de la *RCM*, pues genera importantes ingresos y empleos, de tal modo que se fortalece como la principal económica de Quintana Roo. Sin embargo, según [Campos-Cámara \(2010\)](#), también ha generado algunos problemas, tales como: aumento en la población inmigrante; el alto costo de los bienes y servicios para el consumo local; la pérdida de la identidad de las comunidades locales; conflictos sociales; el deterioro del medio ambiente; y sobreexplotación de recursos naturales en los alrededores de las áreas protegidas. De acuerdo con [Castillo-Villanueva \(2007\)](#), esto se debe a una planificación de corto plazo centrada más en la rentabilidad financiera e indiferente de los problemas sociales y ambientales que la actividad turística genera.

La vulnerabilidad ambiental de la zona costera quintanarroense es muy elevada debido al su ecosistema frágil, conformado por arrecifes de coral, estuarios y manglares, que ahora se encuentran amenazados por el crecimiento de los asentamientos humanos y las instalaciones turísticas. Sumado a lo anterior, en la zona imperan las prácticas de desarrollos insostenibles, una insuficiente vigilancia administrativa, una comprensión del área y una valorización limitadas del papel que desempeña público en general en la conservación ambiental de la zona ([PNUMA, 1996](#); [Castillo-Villanueva, 2007](#); [Campos-Cámara, 2010](#)).

Puesto que la degradación de los recursos naturales a veces es irreversible, entonces un modelo de desarrollo económico que no admite el uso racional de los recursos naturales está fuera del ámbito del desarrollo sostenible. Un plan de desarrollo turístico ideal debe dar prioridad a los recursos ambientales, mantener los procesos ecológicos esenciales y

ayudar a conservar los recursos naturales y la biodiversidad. Además, debe incluir aspectos sociales y procurar mantener la identidad cultural de las comunidades locales (Castillo-Villanueva, 2007; Campos-Cámara, 2010).

La implicación de todo eso en el medio ambiente de la **RCM** es fundamental, ya que sigue experimentado problemas ambientales manifestándose: en la extensión agrícola en suelos marginales; erosión de las playas; la contaminación de agua y mantos freáticos; la contaminación costera a partir de residuos sin tratamiento; la falta de playas públicas; el aumento de costo de vida; crecimiento urbano descontrolado sin servicios; deforestación y destrucción de los hábitat debido a la eliminación selectiva de la vegetación nativa (Castillo-Villanueva, 2007; Vázquez, 2010).

A largo plazo, estos factores podrían conducir a un desastre ambiental que no sólo pone en peligro tanto a la actividad turística como todo el bienestar de las comunidades locales. Por lo tanto, es imperativo, como señala González Vera (2010), que estos factores disminuyan sus efectos sobre el medio ambiente y que las políticas gubernamentales para mitigar el deterioro del medio ambiente sean investigados a fondo.

A pesar de que existe un plan de desarrollo sostenible que visualiza la restauración, protección, conservación y aprovechamiento racional de sus recursos naturales, y en el que además impone al desarrollo económico, turístico y urbano se realizan reglas de los programas de ordenamiento ecológico territorial (*POET*), los programas de desarrollo urbano y en los planes de manejo de las áreas protegidas Entonces *¿Por qué es grave la amenaza ambiental sobre la RCM?*

Una forma de contestar esta pregunta es a través de un análisis del cambio en paisaje. En concordancia con Olson, et al. (2004), consideramos que este tipo de análisis es una herramienta especialmente útil para realizar investigaciones de tipo ambiental, ya que brinda información ambiental y social abundante, esencial para la selección, planificación y ejecución de planes de uso de la tierra para satisfacer la creciente demanda de las necesidades humanas básicas y el bienestar. El análisis del cambio ofrece oportunidades únicas para monitorear el paisaje (Lambin, 1997) que se refleja en un gran número de estudios (Petit, et al., 2000; Lambin, et al., 2006; Díaz-Gallegos, et al., 2010). El corazón de

esta técnica es la comparación de mapas de la misma cobertura terrestre, obtenidos de imágenes satelitales en tiempos diferentes (Lambin, et al., 2003; Mas, et al., 2012). Con base en esos datos se construye una matriz de tabulación cruzada, con la cual se pueden caracterizar cuantitativamente los procesos de cambio ocurridos en el paisaje para determinados cortes de tiempo (Lambin, et al., 2001; Pontius Jr & Malizia, 2004a).

Para realizar lo anterior, primero caracterizamos cuantitativamente la cobertura del suelo en la *RCM*, mediante la matriz de transición tradicional. En seguida aplicamos la técnica del análisis propuesta por Pontius Jr, et al.(2004b) y extendida por Braimoh (2006) para detectar transiciones sistemáticas y señales dominantes de cambios en el paisaje durante dos períodos de tiempo (1993 a 2000 y 2000 a 2010).

4.2 Metodología e Instrumentos de Evaluación

La tabulación cruzada, también llamada matriz de transición, es una herramienta poderosa en el análisis espaciotemporal utilizada, frecuentemente, en diagnósticos rápidos de condición de recursos naturales (Pontius Jr & Malizia, 2004a; Pontius Jr & Cheuk, 2006). Y sus productos son considerados de gran utilidad para apoyar políticas encaminadas a disminuir o revertir el deterioro ambiental (Pontius Jr, et al., 2004b; Manandhar, et al., 2010). En México, el dicho procedimiento ha sido ampliamente utilizado en varios estudios de cambios en el paisaje, por ejemplo, para la evaluación del cambio en el uso/cobertura del suelo (Mas, et al., 2004); análisis del proceso de deforestación (Díaz-Gallegos, et al., 2010; Hirales-Cota, et al., 2010); de procesos hidrológicos (Mendoza, et al., 2010); de urbanización (López, et al., 2001; Valdez-Lazalde, et al., 2011; Díaz, et al., 2014).

Por su parte, el análisis tradicional de matrices ha sido criticado severamente en estudios recientes (Pontius Jr, et al., 2004b; Versace, et al., 2008; Teferi, et al., 2013), los cuales han demostrado sus deficiencias. Este análisis provee información sobre los más prominentes cambios en el paisaje, sin embargo, falla en su evaluación, esto debido a que los métodos estadísticos comúnmente usados para interpretar los datos, carecen de conceptos fundamentales para extraer el máximo contenido de la información que puede ofrecer una matriz de tabulación cruzada (Pontius Jr, et al., 2004b). Ya que solo calculan la cantidad y ubicación de los tipos de cambio y pasa por alto o no siempre detecta las transiciones

aleatorias y sistemáticas que pueden tener una influencia importante en la condición y el funcionamiento del paisaje (Versace, et al., 2008).

Las transiciones aleatorias son aquellas influenciadas por los procesos fortuitos o de cambios únicos, y dichas transiciones están en función de la proporción de la cobertura del suelo (Brimoh, 2006). Estas transiciones generalmente son causadas por la interacción de factores de uso del suelo que actúan abruptamente, como la migración espontánea, los conflictos internos, los cambios en las condiciones macroeconómicas, la pérdida de los derechos a la tierra, los recursos, u otros factores de producción (Lambin, et al., 2001; Lambin, et al., 2003). Mientras que, las transiciones sistemáticas son aquellas debidas a procesos regulares o comunes de cambio. Estos procesos tienden a evolucionar de una manera más consistente o progresiva dictadas principalmente por factores socioeconómicos tales como: crecimiento demográfico, la expansión urbana, falta de educación pública sobre el medio ambiente o los cambios en las políticas de gestión del suelo (Lambin, et al., 2003; Lambin, et al., 2006).

Desde una perspectiva estadística, las transiciones aleatorias se producen cuando una cobertura terrestre sustituye a otro tipo en proporción con el tamaño de dicha categoría. Las ganancias o pérdidas no aleatorias implican un proceso sistemático de cambio en el que una cobertura terrestre se dirige sistemáticamente a otras coberturas para reemplazarla (Pontius Jr, et al., 2004b).

La identificación de las transiciones sistemáticas permite a los investigadores centrarse en las señales más fuertes de cambios en el paisaje y ayuda a vincular patrones de cambios de paisaje a los procesos (Manandhar, et al., 2010). Es importante que se entienda si el proceso detrás de una transición es aleatorio o sistemático, ya que la política para mantener la sustentabilidad ambiental deber primeramente ser orientada a revertir procesos sistemáticos.

El método propuesto por Pontius Jr, et al. (2004b) permite comprobar si las transiciones entre categorías observadas han sido impulsadas por procesos sistemáticos o aleatorios. Ese método se apoya en el cálculo de diversos componentes (ganancia, pérdida, intercambio y cambio neto) de una matriz de tabulación cruzada estándar.

Algunos ejemplos de los estudios que han demostrado la utilidad de dicho método son: la exploración de los impactos del uso de la tierra sobre el balance hídrico regional (Versace, et al., 2008); la detección de la relación entre el cambio ambiental y la calidad del agua (Teixeira, et al., 2014); monitoreo de vínculo entre de transformaciones de uso/cobertura del suelo y cambios ambientales en áreas peri-urbanas en zonas montañosas y ecosistemas (Mallinis, et al., 2014); la detección de los vínculos dinámicos entre las características del paisaje y la calidad del agua (Huan, et al., 2013); el análisis de los procesos detrás de las transiciones del bosques (Aabeyir, et al., 2012); la evaluación del dinamismo del paisaje para ser considerado en los modelos de cambio del uso/cobertura del suelo (Lira, et al., 2012).

Existen muy pocos estudios sobre transiciones sistemáticas en México y ninguna en la RCM, en este sentido, aplicamos este novedoso método propuesto por Pontius Jr. (2004) para detectar transiciones sistemáticas en el área del estudio. La información generada se puede convertir en una valiosa herramienta para la planificación y toma de decisiones por parte de las autoridades y a los interesados en con respecto a la **RCM**.

4.2.1 Instrumentos Cartográficos

Se utilizaron tres mapas de cobertura terrestre (Figura 4.1) derivados (en el capítulo anterior) de datos de Landsat TM/ETM+, a partir de clasificación orientada a los segmentos para los años 1993, 2000 y 2010. Estos mapas ilustran información en seis amplias categorías: *agua*, *zona urbana*, *cultivo*, *popal-tular (P.Tular)*, *manglar* y *área selvática*. La evaluación de error del mapa 2000, para el que había datos de referencia fiables (mapa INEGI, serie II,), presentó una exactitud global del 94% (valor de $\kappa= 0.914$).

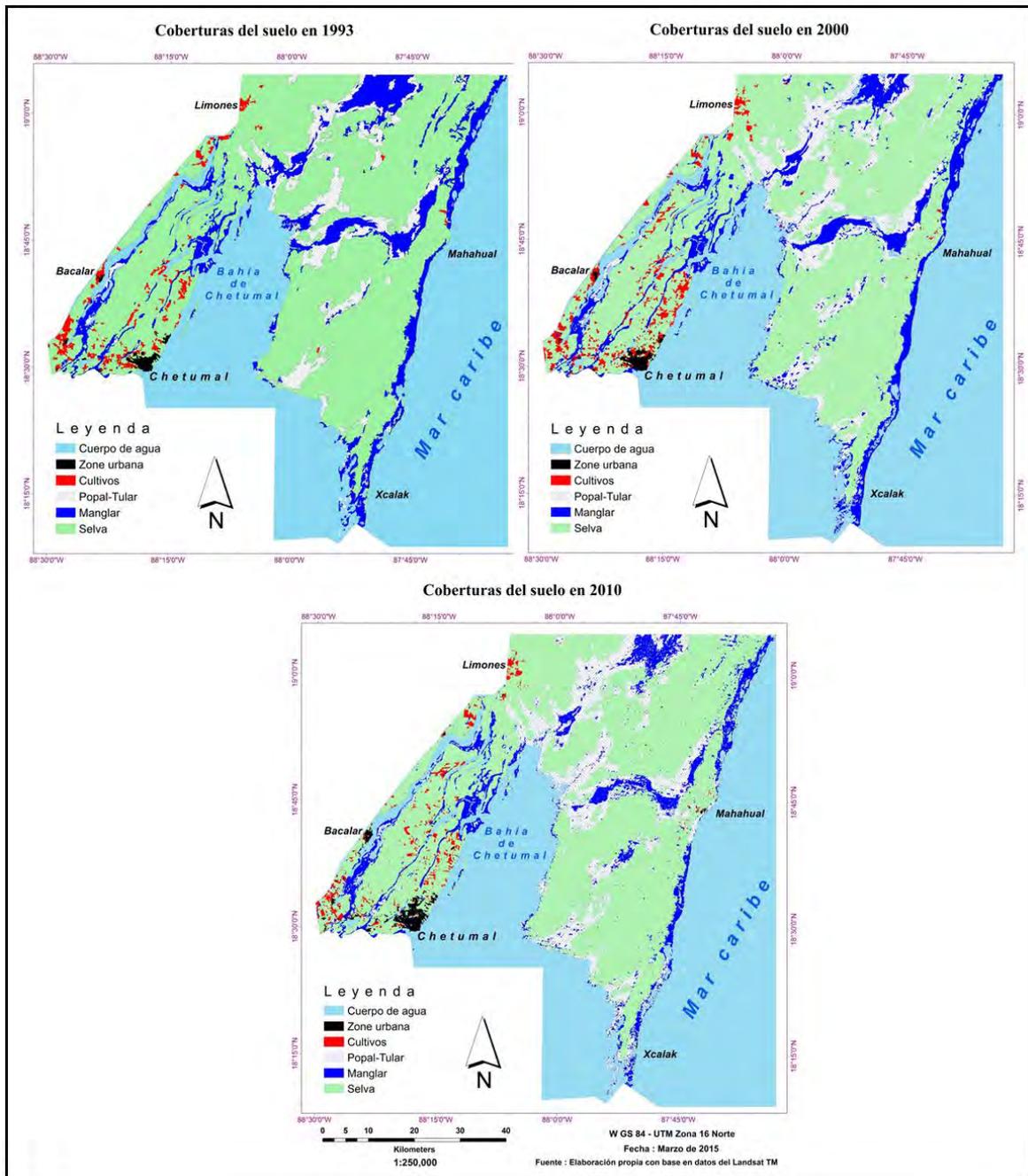


Figura 4.1: Mapas de cobertura del suelo en la RCM para 1993,2000 y 2010

4.2.2 Detección de los cambios en la cobertura terrestre

Se aplicó la técnica de post-clasificación para analizar los cambios durante períodos 1993-2000 y 2000-2010. Para ello se utilizaron el **CROSTAB**, un herramienta de Idrisi selva, el cual es básicamente una superposición (o una tabulación cruzada) de dos imágenes

previamente clasificadas en un *SIG*, y permite identificar las transiciones de una cobertura terrestre a otra (Warner & Campagna, 2009).

Con *CROSSTAB*, se generaron dos matrices de transición (Tablas 4.1 y 4.2) en donde, las entradas fuera de la diagonal comprenden las proporciones del paisaje que experimentaron la transición de una categoría a otra categoría, mientras que las entradas en la diagonal indican persistencia de categorías.

Por otra parte, las entradas en las filas y columnas representan las categorías en el tiempo T_1 (origen), y el tiempo T_2 (destino) respectivamente. Los valores totales de las filas de la derecha y de las columnas en la parte inferior, indican la proporción del paisaje por categoría en T_1 y T_2 , respectivamente. Después, en el siguiente apartado, se sometió las dos matrices a un análisis más detallado para detectar transición sistemática.

4.2.3 Detección de las transiciones inter-categóricas

Para detectar la transición sistemática, las dos matrices de transición fueron analizadas en cuatro pasos, siguiendo la metodología de Pontius Jr. (2004) para derivar los siguientes componentes del cambio por categorías: la ganancia y pérdida en cada tipo de cobertura, intercambio, cambio neto, las ganancias y pérdidas esperadas, ganancia y pérdida inter-categóricas. Este enfoque distingue patrones importantes del cambio del paisaje distintos del alto nivel de persistencia común en la mayoría de otras investigaciones.

4.2.3.1 Ganancia, pérdida, persistencia y vulnerabilidad a la transición

La ganancia se refiere al aumento del área de una cobertura terrestre, mientras que la pérdida se refiere a una disminución de la superficie de una cobertura terrestre entre 1993,2000 y 2010. Se derivó la ganancia de cada categoría, de la matriz de tabulación cruzada extendida, restando la persistencia de la columna total de la matriz; después se calculó la pérdida restando la persistencia de la total de la fila. Se derivó las proporciones: pérdidas-a-persistencia (*pérdida/persistencia*); ganar-a-persistencia (*ganancia/persistencia*) para evaluar la vulnerabilidad de cada categoría a perder o ganar mediante un enfoque desarrollado por Braimoh (2006).

Valores superiores a uno indican una mayor tendencia de una clase a cambiar a otras categorías que a persistir. Del mismo modo, los valores de relación ganar-persistencia (g_p), mayor que uno indican más ganancia que la persistencia.

4.2.3.2 *Intercambio y el cambio neto*

El intercambio, es el cambio de ubicación de un tipo de cobertura terrestre entre dos puntos de tiempo, se lo deriva de la ganancia bruta y pérdida bruta (Pontius Jr, et al., 2004b; Versace, et al., 2008) entre 1993-2000 y 2000-2010. El concepto de intercambio da más sentido a la interpretación de una situación en la que el cambio neto en un tipo de cobertura terrestre es cero y evita la tendencia de interpretar la situación como ausencia de cambio. Según Pontius Jr. (2004), la falta de cambio neto no indica necesariamente una ausencia de cambio en el paisaje, ya que el cambio neto no logra captar el componente intercambio de cambio. El intercambio de una categoría es el cambio total menos la variación neta en dicha categoría. El cambio neto es la diferencia en área de una cobertura terrestre entre dos puntos de tiempo o el valor absoluto de la diferencia entre la ganancia y la pérdida. Como Pontius Jr. (2004) señalaron, el cambio neto subestima el cambio total en el paisaje, ya que no toma en cuenta el cambio en la ubicación, como lo hace el intercambio.

4.2.3.3 *Transiciones aleatorias y sistemáticas*

Se utilizaron los métodos descritos en Pontius Jr. (2004), para realizar un análisis más detallado de las pérdidas, ganancias y persistencia para determinar si las transiciones eran de carácter aleatorio o sistemático. En primer lugar, se calculó la ganancia esperada de cada categoría mediante la distribución de la ganancia observada entre las otras clases, con base en sus proporciones relativas en T_1 (Ecuación 1). Del mismo modo, se determinaron las pérdidas esperadas mediante la distribución de las pérdidas observadas entre las otras clases con base en sus proporciones relativas en T_1 (Ecuación 2).

Las ecuaciones (1 y 2) respectivamente, dan como resultado transiciones esperadas bajo un proceso aleatorio de ganancia(o pérdida), en donde todas las variables son expresadas porcentaje del área de estudio (Pontius Jr, et al., 2004b).

$$G_{ij} = (P_{+j} - P_{jj}) \left(\frac{P_{i+}}{100 - P_{j+}} \right), \quad \forall i \neq j \quad (1)$$

$$L_{ij} = (P_{i+} - P_{ii}) \left(\frac{P_{+j}}{100 - P_{+i}} \right), \quad \forall i \neq j \quad (2)$$

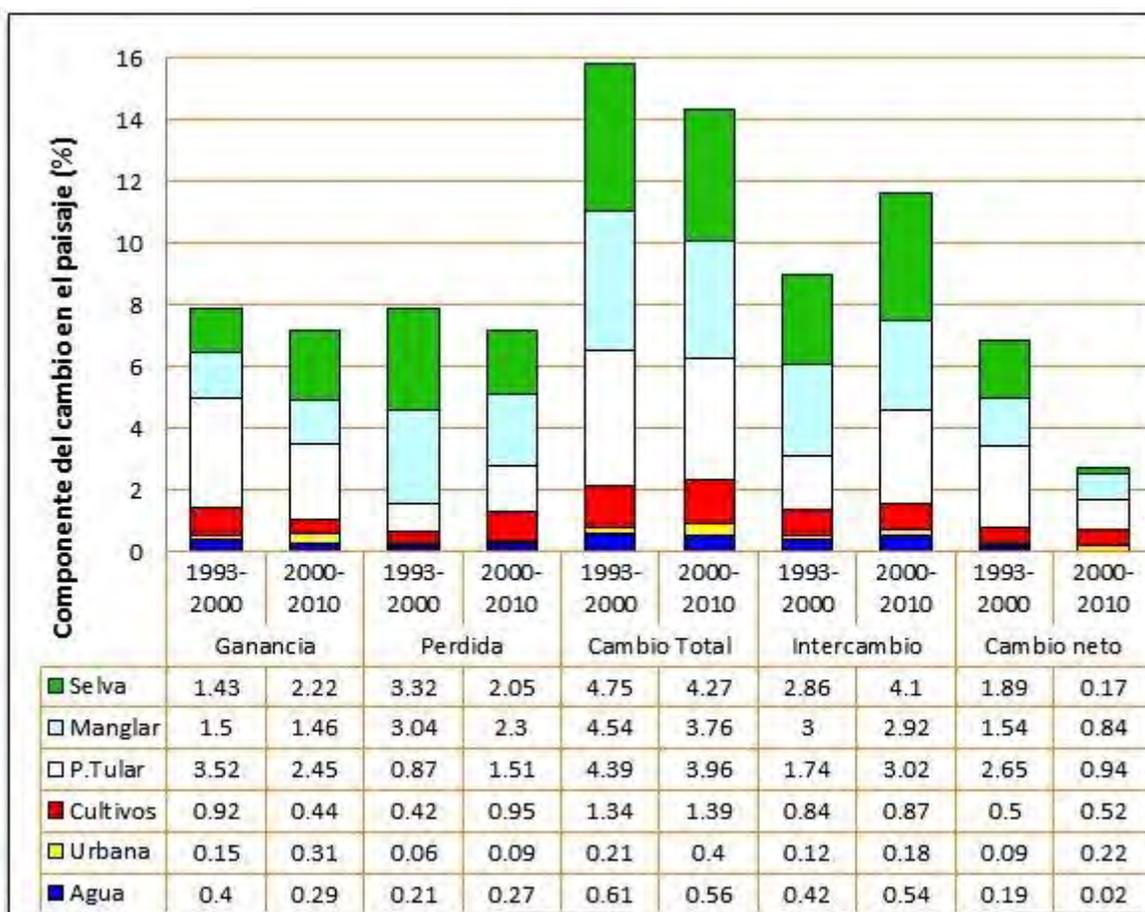
En donde G_{ij} es la transición esperada desde la categoría i a la categoría j debido a un proceso de ganancia al azar. $(P_{+j} - P_{jj})$ es la ganancia neta total de la categoría j entre 1993 - 2000 y 2000-2010. P_{i+} es el tamaño de la categoría i en T_1 , y P_{j+} es la suma de los tamaños de todas las categorías, excepto j en T_1 . Para la ecuación 2, L_{ij} es la transición esperada entre categorías i a la categoría j debido a un proceso al azar de pérdida. $P_{i+} - P_{ii}$ es la pérdida neta total de la categoría i entre T_1 y T_2 , P_{+j} es el tamaño de la categoría j en el T_2 , y $100 - P_{+i}$ es la suma de los tamaños de todas las categorías excepto i en T_2 .

Al determinar las proporciones esperadas bajo un proceso aleatorio de cambio, se puede calcular la diferencia entre ganancias esperadas y ganancias observadas (Versace, et al., 2008). Esta diferencia provee información sobre la tasa a la que cualquier clase ganaría o perdería al azar. Apoyados en Pontius Jr. (2004), asumimos que los valores cercanos a cero indican que la transición paisaje fue al azar, mientras que valores más lejos de cero indican una transición inter-categoría sistemática. La magnitud de la diferencia entre la ganancia observada (o pérdida) y ganancia esperada (o pérdida) cuantifica un patrón sistemático de cambio e indica el tamaño de su huella ambiental. La proporción de la diferencia en relación al tamaño de la categoría indica la intensidad de las transiciones sistemáticas.

4.3 Resultados

4.3.1 Ganancias y Pérdidas

La figura 4.2 muestra que las ganancias fueron más altas en las coberturas de vegetación natural (*selva, manglar y P.Tular*) entre 1993-2010, mientras que las ganancias de las demás categorías fueron pequeñas (<1%). Las categorías de vegetación natural también sufrieron las mayores pérdidas (~ 91% en 1993-2000 y el 82% de 2000 - 2010 de las pérdidas totales). La cobertura *urbana* experimento casi ninguna pérdidas (< 0.1%) durante los dos periodos de estudios.



Fuente: Elaboración propia con datos de matrices de transición

Figura 4.2: Resumen de los componentes del cambio en el paisaje (%), 1993-2000 y 2000-2010

4.3.2 Cambio neto y el Intercambio

Sólo una pequeña parte del paisaje (~7,5%) experimentó cambio en los dos períodos de estudio y de este cambio, el intercambio formó la mayor proporción (57% y 72% en el primer y segundo periodo, respectivamente); el resto fue cambio neto (Figura 4.2). A nivel de la categoría, el intercambio y cambio neto constituyen cambios en *Agua* durante 1993-2000, pero en el periodo 2000-2010, las transiciones son casi totalmente intercambio. El intercambio y cambio neto comprenden los tipos de cambios en las demás categorías.

En el primer periodo, exceptuando al *P.Tular* en donde el cambio neto fue mayor, los cambios atribuidos a intercambio en otras categorías fueron mayores que los cambios netos. El mismo patrón se repitió en el segundo período, aunque en este caso fue la categoría *zona urbana* la que tuvo el cambio neto mayor que el Intercambio. El mayor cambio está

asociado con las clases de vegetación naturales los cuales colectivamente, constituyen la clase más grande del paisaje (~ 80% en ambos períodos).

4.3.3 Persistencia y Vulnerabilidad a Transición

La [Tabla 4.1](#) revela el predominio de la persistencia (92% y el 93%) en el paisaje de 1993-2000 y de 2000-2010 respectivamente.

Tabla 4.1: La relaciones ganancia-a la-persistencia (g_p), pérdida-a la-persistencia (L_p) y cambio-neto -a la-persistencia (N_p), y vulnerabilidad de cada categoría a cambiar

| Categoría | Persistencia (P) | | g_p | | L_p | | N_p | |
|-----------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1993-2000 | 2000-2010 | 1993-2000 | 2000-2010 | 1993-2000 | 2000-2010 | 1993-2000 | 2000-2010 |
| Agua | 45.39 | 45.53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Urbana | 0.26 | 0.33 | 0.58 | 0.94 | 0.23 | 0.27 | 0.35 | 0.67 |
| Cultivos | 0.40 | 0.38 | 2.3 | 1.16 | 1.05 | 2.50 | 1.25 | -1.34 |
| P.Tular | 4.81 | 6.79 | 0.73 | 0.36 | 0.18 | 0.22 | 0.55 | 0.14 |
| Manglar | 4.78 | 3.98 | 0.31 | 0.37 | 0.64 | 0.58 | -0.33 | -0.21 |
| Selva | 36.44 | 35.82 | 0.04 | 0.06 | 0.09 | 0.06 | -0.05 | 0 |

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la Figura 4.2

La persistencia en la vegetación natural fue mucho mayor que en otras clases en ambos períodos de estudio. Las categorías *Agua* y *Selva* presentaron los mayores (>35%) y menores valores (~0) de las índices **P** y de g_p , respectivamente, durante período 1993-2010. La categoría *cultivos* fue la única cobertura que registró valores de $g_p > 0$, en los dos períodos de estudio. Asimismo se observó un patrón similar para el índice L_p , en el que *Cultivo* fue la única categoría con $L_p > 1$. Nuevamente, siguiendo a [Braumoh \(2006\)](#), las categorías con la relación $L_p > 1$ indican una mayor tendencia a cambiar a otras clases que a persistir.

En contraste, sólo la categoría *manglar* presentó valores negativos de N_p (-0.33 y -0.21) en ambos períodos de tiempo, respectivamente. Mientras que la relación N_p de la categoría *selva* fue negativa (-0.05), en el período 1993-2000, y cero de 2000-2010. Las relaciones

N_p para el resto de las clases fueron positivas en ambos periodos de estudio, exceptuando al *cultivo*, el cual registró un valor negativo (-1.34) en el período 2000-2010.

4.3.4 Procesos de Transición Inter-Catégoricas

4.3.4.1 *Matrices extendidas de transición*

Las [tablas 4.2 y 4.3](#) son las matrices de cambio o transición derivadas de la tabulación cruzada de las colecciones de mapas para los períodos 1993-2000 y 2000-2010, en donde las filas despliegan los valores de las categorías de mapa_1 y las columnas las de mapa_2 . Las matrices ([Tabla 4.2](#)), muestran cuatro números para cada combinación de categorías, en cada respectivo período de tiempo. El número de arriba escrito en **negrita** es el porcentaje de la combinación observada en el paisaje. Debajo de ese número, en *cursiva*, indica el porcentaje del paisaje que se esperaría si el proceso de cambio fuera aleatorio. El tercer número, entre paréntesis (), es el número en **negrita** menos el número en *cursiva*, $P_{ij}-G_{ij}$. Una transición es sistemática si la transición observada se desvía de la transición que se esperaría (*en cursiva*). El cuarto número entre corchetes [] es la diferencia relativa de la combinación entre el número observado y el número esperado. La [tabla 4.3](#), presenta el análisis análogo, pero examinando el proceso aleatorio de pérdida.

Tabla 4.2: Matriz de cambio para 1993-2000, bajo procesos aleatorios de ganancias.

Con los valores (%) de transición observados (tipo de letra negra), pérdidas esperadas (itálicas), y ganancias esperadas (normal) entre categorías

| (A) | 2000 | | | | | | | | (B) | 2010 | | | | | | | |
|--------------|--|---|---|--|--|--|---|---|------------|--|--|--|--|--|--|---|---|
| 1993 | Agua | Z.Urbana | Cultivos | P.Tular | Manglar | Selva | 1993 (Total) | Pérdidas | 2000 | Agua | Z.Urbana | Cultivos | P.Tular | Manglar | Selva | 2000 (Total) | Pérdidas |
| Agua | 45.39 <i>45.39</i> (0.00) [0.00] | 0.00 0.07 (-0.07) [-1.00] | 0.00 0.43 (-0.43) [-1.00] | 0.07 1.70 (-1.68) [-0.96] | 0.12 0.74 (-0.61) [-0.84] | 0.02 1.08 (-1.03) [-0.98] | 45.60 49.41 (-3.81) [-0.08] | 0.21 4.02 (-3.81) [-0.95] | Agua | 45.53 <i>45.53</i> (0.00) [0.00] | 0.00 <i>0.14</i> (-0.14) [-1.00] | 0.01 <i>0.20</i> (-0.19) [-0.95] | 0.15 <i>1.22</i> (-1.09) [-0.88] | 0.08 <i>0.71</i> (-0.63) [-0.89] | 0.03 <i>1.63</i> (-1.61) [-0.98] | 45.80 49.43 (-3.63) [-0.07] | 0.27 3.90 (-3.63) [-0.93] |
| Z.Urbana | 0.00 0.002 (-0.002) [-1.00] | 0.26 <i>0.26</i> (0.00) [0.00] | 0.02 0.003 (0.02) [5.67] | 0.00 0.01 (-0.01) [-1.00] | 0.02 0.01 (0.01) [1.00] | 0.02 0.01 (0.01) [1.80] | 0.32 0.29 (0.03) [0.10] | 0.06 0.03 (0.03) [1.00] | Z.Urbana | 0.01 <i>0.002</i> (0.008) [4.00] | 0.33 <i>0.33</i> (0.00) [0.00] | 0.01 <i>0.002</i> (0.01) [4.00] | 0.00 <i>0.01</i> (-0.01) [-1.00] | 0.02 <i>0.01</i> (0.01) [1.00] | 0.05 <i>0.02</i> (0.03) [1.50] | 0.42 0.37 (0.05) [0.14] | 0.09 0.04 (0.05) [1.25] |
| Cultivos | 0.00 0.01 (-0.01) [-1.00] | 0.05 <i>0.40</i> (0.05) [49.00] | 0.40 0.03 (0.00) [0.00] | 0.01 0.03 (-0.02) [-0.67] | 0.03 0.01 (0.02) [2.00] | 0.33 0.02 (0.31) [15.50] | 0.82 0.47 (0.35) [0.74] | 0.42 0.07 (0.35) [5.00] | Cultivos | 0.00 <i>0.01</i> (-0.01) [-1.00] | 0.12 <i>0.38</i> (0.12) [30.00] | 0.38 <i>0.04</i> (0.00) [0.00] | 0.02 <i>0.04</i> (-0.02) [-0.50] | 0.03 <i>0.02</i> (0.01) [0.50] | 0.78 <i>0.05</i> (0.73) [14.60] | 1.33 0.50 (0.83) [1.66] | 0.95 0.12 (0.83) [6.92] |
| P.Tular | 0.12 0.04 (0.08) [2.00] | 0.00 0.01 (-0.01) [-1.00] | 0.01 0.05 (-0.04) [-0.80] | 4.81 <i>4.81</i> (0.00) [0.00] | 0.49 0.09 (0.40) [4.44] | 0.25 0.13 (0.12) [0.92] | 5.68 5.13 (0.55) [0.11] | 0.87 0.32 (0.55) [1.72] | P.Tular | 0.09 <i>0.04</i> (0.05) [1.25] | 0.00 <i>0.03</i> (-0.03) [-1.00] | 0.01 <i>0.04</i> (-0.03) [-0.75] | 6.79 <i>6.79</i> (0.00) [0.00] | 0.89 <i>0.13</i> (0.76) [5.85] | 0.52 <i>0.30</i> (0.22) [0.73] | 8.30 7.33 (0.97) [0.13] | 1.51 0.54 (0.97) [1.80] |
| Manglar | 0.22 0.06 (0.16) [2.67] | 0.01 0.01 (0.00) [0.00] | 0.01 0.07 (-0.06) [-0.86] | 1.99 <i>1.99</i> (1.69) [5.63] | 4.78 <i>4.78</i> (0.00) [0.00] | 0.81 0.19 (0.63) [3.50] | 7.82 5.40 (2.42) [0.45] | 3.04 0.62 (2.42) [3.90] | Manglar | 0.17 <i>0.03</i> (0.14) [4.67] | 0.04 <i>0.02</i> (0.02) [1.00] | 0.02 <i>0.03</i> (-0.01) [-0.33] | 1.23 <i>0.17</i> (1.06) [6.24] | 3.98 <i>3.98</i> (0.00) [0.00] | 0.84 <i>0.22</i> (0.61) [2.65] | 6.28 4.45 (1.83) [0.41] | 2.30 0.47 (1.83) [3.89] |
| Selva | 0.06 0.29 (-0.23) [-0.79] | 0.09 0.06 (0.03) [0.50] | 0.88 0.37 (0.51) [1.38] | 1.45 1.49 (-0.08) [-0.05] | 0.84 0.65 (0.20) [0.31] | 36.44 <i>36.44</i> (0.00) [0.00] | 39.76 39.30 (0.46) [0.01] | 3.32 2.86 (0.46) [0.16] | Selva | 0.02 <i>0.21</i> (-0.18) [-0.86] | 0.15 <i>0.12</i> (0.03) [0.25] | 0.39 <i>0.17</i> (0.22) [1.29] | 1.05 <i>1.01</i> (0.02) [0.03] | 0.44 <i>0.59</i> (-0.15) [-0.25] | 35.82 <i>35.82</i> (0.00) [0.00] | 37.87 37.92 (-0.05) [0.00] | 2.05 2.10 (-0.05) [-0.02] |
| 2000 (Total) | 45.79 45.79 (0.00) [0.00] | 0.41 0.41 (0.00) [0.00] | 1.32 1.32 (0.00) [0.00] | 8.33 8.33 (0.00) [0.00] | 6.28 6.28 (0.00) [0.00] | 37.87 37.87 (0.00) [0.00] | 100 | | Total 2010 | 45.82 45.82 (0.00) [0.00] | 0.64 0.64 (0.00) [0.00] | 0.82 0.82 (0.00) [0.00] | 9.24 9.24 (0.00) [0.00] | 5.44 5.44 (0.00) [0.00] | 38.04 38.04 (0.00) [0.00] | 100 | |
| Ganancias | 0.40 0.40 (0.00) [0.00] | 0.15 0.00 (0.00) [0.00] | 0.92 0.92 (0.00) [0.00] | 3.52 3.52 (0.00) [0.00] | 1.50 1.50 (0.00) [0.00] | 1.43 1.43 (0.00) [0.00] | | $\Sigma=7.92$ | Ganancias | 0.29 0.29 (0.00) [0.00] | 0.31 0.31 (0.00) [0.00] | 0.44 0.44 (0.00) [0.00] | 2.45 2.45 (0.00) [0.00] | 1.46 1.46 (0.00) [0.00] | 2.22 2.22 (0.00) [0.00] | | $\Sigma=7.17$ |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3: Matriz de cambio para 1993-2000 y 2000-2010, bajo procesos aleatorios de pérdidas.

Con los valores (%) de transición observados (tipo de letra negrita), pérdidas esperadas (itálicas), y ganancias esperadas (normal) entre categorías

| (A) | 2000 | | | | | | | | (B) | 2010 | | | | | | | |
|-------------------|--|--|--|--|---|--|--|--|-------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1993 | Agua | Z.Urbana | Cultivos | P.Tular | Manglar | Selva | 1993 (Total) | Pérdidas | 2000 | Agua | Z.Urbana | Cultivos | P.Tular | Manglar | Selva | Total 2000 | Pérdidas |
| Agua | 45.39 <i>45.39</i> (0.00) [0.00] | 0.00 <i>0.00</i> (-0.002) [-1.00] | 0.00 <i>0.01</i> (-0.01) [-1.00] | 0.07 <i>0.03</i> (0.04) [1.33] | 0.12 <i>0.02</i> (0.10) [5.00] | 0.02 <i>0.15</i> (-0.13) [-0.87] | 45.60 <i>45.60</i> (0.00) [0.00] | 0.21 <i>0.21</i> (0.00) [0.00] | Agua | 45.53 <i>45.53</i> (0.00) [0.00] | 0.00 <i>0.003</i> (-0.003) [-1.00] | 0.01 <i>0.004</i> (0.006) [1.50] | 0.15 <i>0.05</i> (0.10) [2.00] | 0.08 <i>0.03</i> (0.05) [1.67] | 0.03 <i>0.19</i> (-0.16) [-0.84] | 45.80 <i>45.80</i> (0.00) [0.00] | 0.27 <i>0.27</i> (0.00) [0.00] |
| Z.Urbana | 0.00 <i>0.03</i> (-0.03) [-1.00] | 0.26 <i>0.26</i> (0.00) [0.00] | 0.02 <i>0.001</i> (0.02) [19.00] | 0.00 <i>0.01</i> (-0.01) [-1.00] | 0.02 <i>0.004</i> (0.02) [5.00] | 0.02 <i>0.02</i> (0.00) [0.00] | 0.32 <i>0.32</i> (0.00) [0.00] | 0.06 <i>0.06</i> (0.00) [0.00] | Z.Urbana | 0.01 <i>0.04</i> (-0.03) [-0.75] | 0.33 <i>0.33</i> (0.00) [0.00] | 0.01 <i>0.001</i> (0.01) [10.00] | 0.00 <i>0.01</i> (-0.01) [-1.00] | 0.02 <i>0.01</i> (0.01) [1.00] | 0.05 <i>0.03</i> (0.02) [0.67] | 0.42 <i>0.42</i> (0.00) [0.00] | 0.09 <i>0.09</i> (0.00) [0.00] |
| Cultivos | 0.00 <i>0.19</i> (-0.19) [-1.00] | 0.05 <i>0.002</i> (0.05) [25.00] | 0.40 <i>0.40</i> (0.00) [0.00] | 0.01 <i>0.04</i> (-0.03) [-0.75] | 0.03 <i>0.03</i> (0.00) [0.00] | 0.33 <i>0.16</i> (0.17) [1.06] | 0.82 <i>0.82</i> (0.00) [0.00] | 0.42 <i>0.42</i> (0.00) [0.00] | Cultivos | 0.00 <i>0.43</i> (-0.44) [-1.00] | 0.12 <i>0.01</i> (0.11) [11.00] | 0.38 <i>0.38</i> (0.00) [0.00] | 0.02 <i>0.09</i> (-0.07) [-0.78] | 0.03 <i>0.05</i> (-0.02) [-0.40] | 0.78 <i>0.37</i> (0.41) [1.11] | 1.33 <i>1.33</i> (0.00) [0.00] | 0.95 <i>0.95</i> (0.00) [0.00] |
| P.Tular | 0.12 <i>0.44</i> (-0.32) [-0.73] | 0.00 <i>0.004</i> (-0.004) [-1.00] | 0.01 <i>0.01</i> (-0.00) [-0.00] | 4.81 <i>4.81</i> (0.00) [0.00] | 0.49 <i>0.06</i> (0.43) [7.17] | 0.25 <i>0.36</i> (-0.11) [-0.31] | 5.68 <i>5.68</i> (0.03) [0.01] | 0.87 <i>0.87</i> (0.00) [0.00] | P.Tular | 0.09 <i>0.76</i> (-0.66) [-0.88] | 0.00 <i>0.01</i> (-0.01) [-1.00] | 0.01 <i>0.01</i> (0.00) [0.00] | 6.79 <i>6.79</i> (0.00) [0.00] | 0.89 <i>0.09</i> (0.80) [8.89] | 0.52 <i>0.64</i> (-0.11) [-0.17] | 8.30 <i>8.28</i> (0.00) [0.00] | 1.51 <i>1.51</i> (0.00) [0.00] |
| Manglar | 0.22 <i>1.49</i> (-1.27) [-0.85] | 0.01 <i>0.01</i> (0.00) [0.00] | 0.01 <i>0.04</i> (-0.03) [-0.75] | 1.99 <i>0.26</i> (1.73) [6.65] | 4.78 <i>4.78</i> (0.00) [0.00] | 0.81 <i>1.24</i> (-0.43) [-0.35] | 7.82 <i>7.82</i> (0.00) [0.00] | 3.04 <i>3.04</i> (0.00) [0.00] | Manglar | 0.17 <i>1.11</i> (-0.94) [-0.85] | 0.04 <i>0.02</i> (0.02) [1.00] | 0.02 <i>0.02</i> (0.00) [0.00] | 1.23 <i>0.23</i> (1.00) [4.35] | 3.98 <i>3.98</i> (0.00) [0.00] | 0.84 <i>0.92</i> (-0.09) [-0.10] | 6.28 <i>6.28</i> (0.00) [0.00] | 2.30 <i>2.30</i> (0.00) [0.00] |
| Selva | 0.06 <i>2.44</i> (-2.38) [-0.98] | 0.09 <i>0.02</i> (0.07) [3.50] | 0.88 <i>0.07</i> (0.81) [11.53] | 1.45 <i>0.45</i> (1.00) [2.22] | 0.84 <i>0.34</i> (0.50) [1.47] | 36.44 <i>36.44</i> (0.00) [0.00] | 39.76 <i>39.76</i> (-0.1) [0.00] | 3.32 <i>3.32</i> (0.00) [0.00] | Selva | 0.02 <i>1.52</i> (-1.49) [-0.99] | 0.15 <i>0.02</i> (0.13) [6.50] | 0.39 <i>0.03</i> (0.36) [12.00] | 1.05 <i>0.30</i> (0.75) [2.50] | 0.44 <i>0.18</i> (0.26) [1.44] | 35.82 <i>35.82</i> (0.00) [0.00] | 37.87 <i>37.87</i> (0.00) [0.00] | 2.04 <i>2.04</i> (0.00) [0.00] |
| Total 2000 | 45.79 <i>49.98</i> (-4.19) [-0.08] | 0.41 <i>0.29</i> (0.12) [0.41] | 1.32 <i>0.53</i> (0.79) [1.49] | 8.33 <i>5.60</i> (2.73) [0.49] | 6.28 <i>5.23</i> (1.05) [0.20] | 37.87 <i>38.37</i> (-0.50) [-0.01] | 100 | | Total 2010 | 45.82 <i>49.39</i> (-3.57) [-0.07] | 0.64 <i>0.39</i> (0.25) [0.64] | 0.82 <i>0.44</i> (0.38) [0.86] | 9.24 <i>7.47</i> (1.77) [0.24] | 5.44 <i>4.34</i> (1.10) [0.25] | 38.04 <i>37.97</i> (0.07) [0.00] | 100 | |
| Ganancias | 0.40 <i>-4.59</i> (-4.19) [-0.91] | 0.15 <i>0.03</i> (0.12) [4.00] | 0.92 <i>0.13</i> (0.79) [6.08] | 3.52 <i>0.79</i> (2.73) [3.46] | 1.50 <i>0.45</i> (1.05) [2.23] | 1.43 <i>-1.93</i> (-0.50) [-0.26] | | Σ=7.92 | Ganancias | 0.29 <i>3.86</i> (-3.57) [-0.92] | 0.31 <i>0.06</i> (0.25) [4.17] | 0.44 <i>0.06</i> (0.38) [6.33] | 2.45 <i>0.68</i> (1.77) [2.60] | 1.46 <i>0.36</i> (1.10) [3.06] | 2.22 <i>2.15</i> (0.07) [0.03] | | Σ=7.17 |

Fuente: Elaboración propia

4.3.4.2 Las transiciones sistemáticas más relevantes en el RCM

Tabla 4.4 presenta las transiciones sistemáticas más relevantes en la **RCM** considerando el porcentaje de cambio en términos de ganancias y pérdidas.

Tabla 4.4: Las transiciones sistemáticas más relevantes en el **RCM** bajo procesos aleatorios de Cambios (%) de ganancias y pérdidas

| Transición Sistemática (de - a) | | Periodo | Obsv. menos esperado | Diff./ lo esperado | Interpretación de la transición sistemática | |
|---------------------------------|-----------|------------|----------------------|--------------------|---|---|
| Ganancias relevantes | Manglar | Agua | 1993-2000 | 0.16 | 2.67 | Cuando Agua gana, reemplaza a Manglar |
| | | | 2000-2010 | 0.14 | 4.67 | |
| | No-Agua | | 1993-2000 | -3.81 | -0.95 | Cuando no-Agua gana, no reemplaza a Agua |
| | | | 2000-2010 | -3.63 | -0.93 | |
| | Cultivos | Urbana | 1993-2000 | 0.05 | 49.00 | Cuando urbana gana, reemplaza a Cultivos |
| | | | 2000-2010 | 0.12 | 30.00 | |
| | | Selva | 1993-2000 | 0.31 | 15.50 | Cuando Selva gana, reemplaza a Cultivos |
| | | | 2000-2010 | 0.73 | 14.60 | |
| | | No-Cultivo | 1993-2000 | 0.35 | 5.00 | Cuando No-Cultivo clases ganan, reemplazan a Cultivos. Cultivo pierde |
| | | | 2000-2010 | 0.83 | 6.92 | |
| | Selva | Cultivo | 1993-2000 | 0.51 | 1.38 | Cuando Cultivo gana, reemplaza a Selva |
| | | | 2000-2010 | 0.22 | 1.29 | |
| Manglar | | 1993-2000 | 0.20 | 0.30 | Cuando Manglar gana, reemplaza a Selva | |
| | | 2000-2010 | -0.15 | -0.25 | | |
| P.Tular | | 1993-2000 | 0.40 | 4.44 | Cuando Manglar gana, reemplaza a P.Tular | |
| | | 2000-2010 | 0.76 | 5.85 | | |
| Manglar | Selva | 1993-2000 | 0.63 | 3.50 | Cuando Selva gana, reemplaza a Manglar | |
| | | 2000-2010 | 0.61 | 2.65 | | |
| | P.Tular | 1993-2000 | 1.69 | 5.63 | Cuando P.Tular gana, reemplaza a Manglar | |
| | | 2000-2010 | 1.06 | 6.24 | | |
| | No-Mangla | 1993-2000 | 2.42 | 3.90 | Cuando No-Manglar clases ganan, reemplazan a Manglar | |
| | | 2000-2010 | 1.83 | 3.89 | | |
| Pérdidas relevantes | Agua | Manglar | 1993-2000 | 0.10 | 5.00 | Cuando Agua pierde, Manglar lo reemplaza |
| | | | 2000-2010 | 0.05 | 1.67 | |
| | P.Tular | | 1993-2000 | 0.43 | 7.17 | Cuando P.Tular pierde, Manglar lo reemplaza |
| | | | 2000-2010 | 0.80 | 8.89 | |
| | Manglar | P.Tular | 1993-2000 | 1.73 | 6.65 | Cuando Manglar pierde, P.Tular lo reemplaza |
| | | | 2000-2010 | 1.00 | 4.35 | |
| | | Agua | 1993-2000 | -1.27 | -0.85 | Cuando Manglar pierde, Agua no lo reemplaza |
| | 2000-2010 | -0.94 | -0.85 | | | |
| | Cultivo | Urbana | 1993-2000 | 0.05 | 25.00 | Cuando Cultivo pierde, urbana lo reemplaza |
| | | | 2000-2010 | 0.11 | 11.00 | |
| | | Selva | 1993-2000 | 0.17 | 1.06 | Cuando Cultivo pierde, Selva lo reemplaza. Señal débil |
| | | | 2000-2010 | 0.41 | 1.11 | |
| Selva | Urbana | 1993-2000 | 0.07 | 3.50 | Cuando Selva pierde, Urbana lo reemplaza | |
| | | 2000-2010 | 0.13 | 6.50 | | |
| | Cultivo | 1993-2000 | 0.81 | 11.53 | Cuando Selva pierde, Cultivo lo reemplaza. Señal muy fuerte | |
| 2000-2010 | 0.36 | 12.00 | | | | |
| No-urbana | Urbana | 1993-2000 | 0.12 | 4.00 | Cuando no-Urbana pierde, Urbana lo reemplaza. Urbana gana. | |
| | | 2000-2010 | 0.25 | 4.17 | | |
| No-Cultivo | Cultivo | 1993-2000 | 0.79 | 6.03 | Cuando no-Cultivo clases pierden, Cultivo las reemplaza. Cultivo gana | |
| | | 2000-2010 | 0.38 | 6.33 | | |
| Non-Selva | Selva | 1993-2000 | -0.50 | -0.26 | Cuando no-selva pierde, no reemplaza a Selva | |
| | | 2000-2010 | 0.01 | 0.03 | | Cuando no-Selva pierde, Selva lo reemplaza |

Fuente: Elaboración propia con base en datos de las tablas 4.2 y 4.3

La primera fila indica un patrón sistemático en la que *Agua* reemplaza *Manglar* a tasas de alrededor de tres y cinco veces la tasa que se esperaría si *Agua* ganaría aleatoriamente durante 1993-2000 y 2000-2010, respectivamente. Las categorías *no-Agua* tendían a evitar reemplazar *Agua*, cuando ganaron al azar. Las diferencias entre las ganancias observadas y esperadas son positivas en la segunda fila, lo que corrobora patrones sistemáticos en los cuales *Urbana*, *Selva* y categorías *no-Cultivos* se inclinaban a reemplazar a *Cultivos* cuando ganaron alza. Las intensidades (49 de 1993-2000 y 30 de 2000-2010) de la transición sistemáticas: *Cultivos* → *Urbana*, fueron las más altas registradas en el paisaje, lo que indica que dicha transición era la más fuerte en el paisaje.

En la tercera fila, las diferencias entre las ganancias observadas y esperadas son positivas para las transiciones: *Selva* → *cultivos*, *Selva* → *manglares* (solo entre 1993-2000). Esto muestra que cuando *Cultivo* gana, tendían a sistemáticamente reemplazar *Selva* y fue poco dispuesto a sustituir manglar entre 2000-2010 bajo procesos aleatorios, a pesar de que las señales eran débiles (<1,40). En las dos últimas filas las diferencias entre las ganancias observadas y esperadas son positivas, implicando que cuando *Selva*, *P.Tular* y categorías *No-Manglar* ganaron al azar, se inclinaba a sustituir a *Manglar*, pero cuando *Manglar* gana, tendía a reemplazar a *P.Tular*.

Con respecto a las relaciones de bajo procesos aleatorios de pérdidas, las primera y segunda filas indican que cuando las categorías perdieron, tendían a ser reemplazados por *Manglar* y *P.Tular* pero no por *Agua*. La tercera fila afirma que cuando *Cultivo* perdió, se inclinaba a ser sustituido sistemáticamente por *urbana* y *Selva* (en un grado mucho menor); pero cuando *Selva* perdió (la cuarta fila), se inclinaba a ser reemplazado sistemáticamente por *cultivo*, a 12 veces y a *urbana* a 3.5 y 6.5 veces las tasas que se esperaría si el proceso fuera bajo procesos aleatorio de pérdida. Las tres últimas filas corroboran que cuando otras categorías perdieron, tendían a ser sustituidos por *urbana*, *cultivo* y no por *selva* (solo en 1993-2000).

4.4 Discusión

Este capítulo, evalúa los patrones de transiciones de paisaje en la **RCM** en los períodos 1993-2010. Las tendencias más importantes son: *Cultivo a Zona Urbana*; intercambios entre *Cultivo y Selva*; y *Manglar a Popal-Tular*. Se discute dichas tendencias y terminando con observaciones relativas a la metodología aplicada.

4.4.1 Evaluación de la Cantidad de Cambio

El análisis muestra que la persistencia, principalmente en *Agua* y en la vegetación naturales (*Selva*, *Manglar* y *P.Tular*) es aproximadamente 90% de la **RCM**. Se puede atribuir el alto grado de persistencia a la existencia en la región de sitios protegidos: Reserva de la Biosfera de Sian Káan, Manatí, y bosques de manglar y humedales los cuales cuentan con la protección del gobierno. También, como se indicó en la introducción, **RCM** es una creación "reciente" del gobierno del estado (en 1993) para impulsar el desarrollo económico en la zona sur de Quintana Roo, basado en el turismo.

Al dominar el paisaje, la vegetación natural es la matriz del paisaje en la que ocurren todos los intercambios entre las clases, los más prominentes en términos de porcentaje de paisaje, siendo *entre Selva y P.Tular*, *Manglar y P.Tular*. Resulta tentador suponer las transiciones entre estas categorías como las más sistemáticas (Tablas 4.2 y 4.3), con base en sus altas proporciones ($> 1\%$). Sin embargo tal interpretación es engañosa, ya que no toma en cuenta que la *selva* (37%), *manglar* (1%) y *P.Tular* (1%), son las categorías más grandes del paisaje (Tablas 4.2 y 4.3). Magnitud que por sí sola no es suficiente evidencia para determinar si una transición es aleatorio o sistemático (Manandhar, et al., 2010), ya que, incluso, un proceso aleatorio de cambio terrestre causaría grandes transiciones dentro de estas clases (Pontius Jr, et al., 2004b).

4.4.2 Análisis del Intercambio y Vulnerabilidad a la Transición

La Tabla 4.1 revela que *Cultivo* es la única clase con valores >1 de g_p y L_p ; indicando que a pesar de su pequeña proporción en el paisaje (0,4% en 2000 y 0,5% en 2010), presenta las mayores tendencias de ganar y perder, que de persistir. Dichas tendencias son dominantes durante los dos periodos del estudio. Alto valor de g_p durante 1993-2000 sugiere una

expansión de las actividades agrícolas (especialmente en el Chile, maíz, caña ganadería extensiva) en respuesta a los incentivos del gubernamental (Turner II, 2010). Dichas tendencias son corroboradas por la mayor inclinación de *Cultivo* a ganar área, que a perderlo a otros tipos de cobertura durante 1993-2000. No obstante, esta tendencia revirtió en el segundo período (Tabla 4.1), debido al barbecho y abandono de tierras agrícolas. El intercambio (~ 0,86%) en *Cultivo* es mayor que el cambio neto durante 1993-2010; lo que implica el predominio de la práctica de la agricultura migratoria mediante el sistema de roza tumba y quema (Velásquez-Torres, 2007). La intensificación agrícola explica la persistencia en *Cultivos*.

Agua y Selva, las dos categorías más grandes (~84% del paisaje) muestran índices de vulnerabilidad a cambio de casi cero (Figura 4.2), lo que implica mayor tendencia hacia la estabilidad (Braumoh, 2006). Cambio en estas clases es casi puro intercambio, confirmada por casi cero valores de N_p . En contraste, y haciendo referencia a Braumoh (2006), los valores negativos N_p de *Manglar*, indican una alta tendencia a perder, que a ganar a otras clases. Se puede atribuir las altas pérdidas o deforestación en *manglares*, especialmente, en el Corredor turístico Costa Maya (una zona costera que va desde Mahahual a Xcalak), a la construcción de infraestructura turística (carreteras, hoteles, muelles), ocasionando la destrucción de manglares y otros ecosistemas marinos, así como a la exposición de los manglares perturbaciones meteorológicas (tormentas y huracanes) que prevalecen en la temporada de lluvias, de junio a noviembre (Diaz-Gallegos & Acosta-Velázquez, 2009; Hiraes-Cota, et al., 2010).

4.4.3 Transiciones Entre-Categorías

Cambio total (~8% del paisaje) es casi doble la variación global neto entre 1993 y 2000, pero aumenta a aproximadamente cinco veces el cambio global neto durante el período 2000-2010 (Figura 4.2). Por lo tanto, el intercambio y cambio neto son importantes para entender el cambio total en cualquier paisaje.

Pontius Jr. (2004) advierten que representar sólo el cambio neto podría llevar a una subestimación dramática de cambio total; los autores afirman que el análisis de persistencia, ganancias y pérdidas es instructivo, sin embargo, no informa si las transiciones

entre las categorías son sistemáticas o aleatorias. En este sentido, se examinó los cambios en el paisaje, utilizando métodos estadísticos novedosos, propuestos por Pontius Jr., (2004) y Braimoh, (2006) que toman en cuenta la persistencia ya que dicho componente domina en la RCM.

Estos métodos nos permiten distinguir entre cambios sistemáticos y aleatorios del paisaje. Pero, no se puede considerar cualquiera transición sistemática como la señal dominante en del paisaje. Según Braimoh (2006) y Alo & Pontius Jr, (2008), solo se la pueda inferir, por ejemplo, cuando una categoría X reemplaza sistemáticamente a otra categoría Y, y la categoría Y pierde área sistemáticamente a la categoría X. Con base en esta condición, las señales dominantes de los cambios en la RCM durante 1993-2010, (Figura 4.3), son: *Cultivo* → *Urbana*; intercambios entre *Cultivo* y *Selva*, y *Manglar* → *P. Tular*.

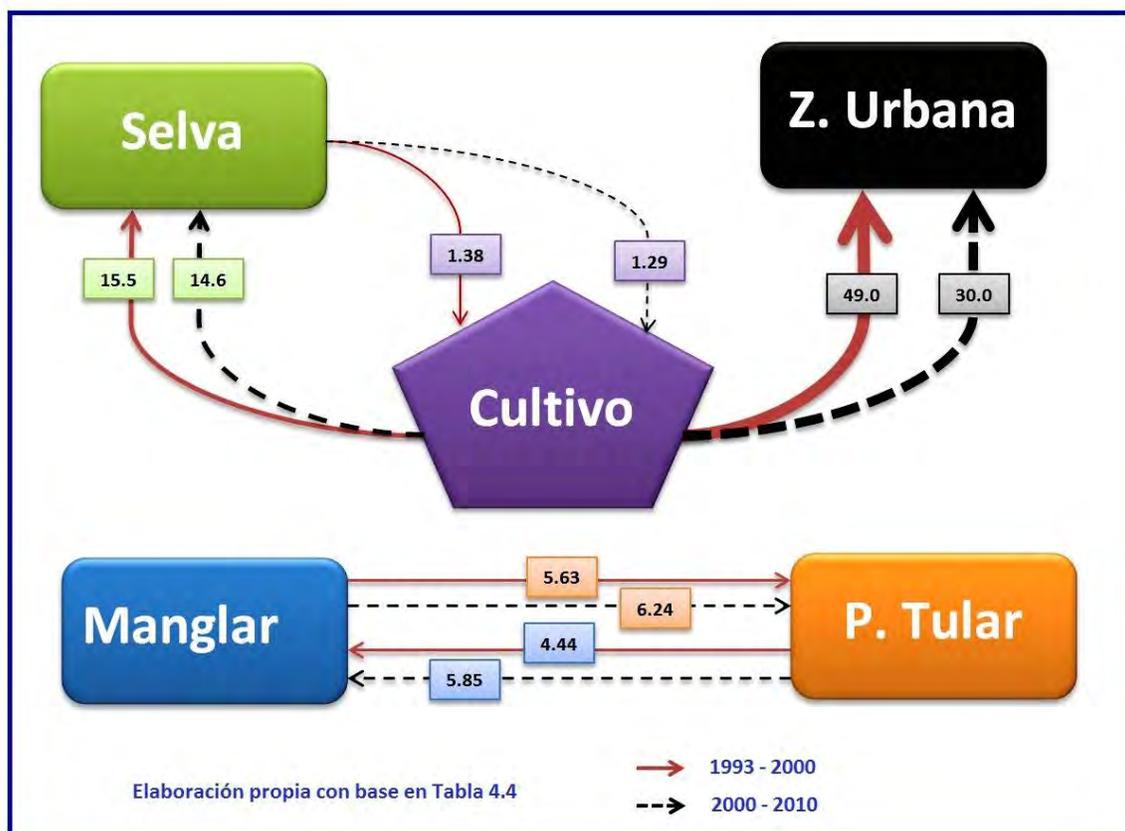


Figura 4.3: Las sendas dominantes de transiciones sistemáticas en la RCM

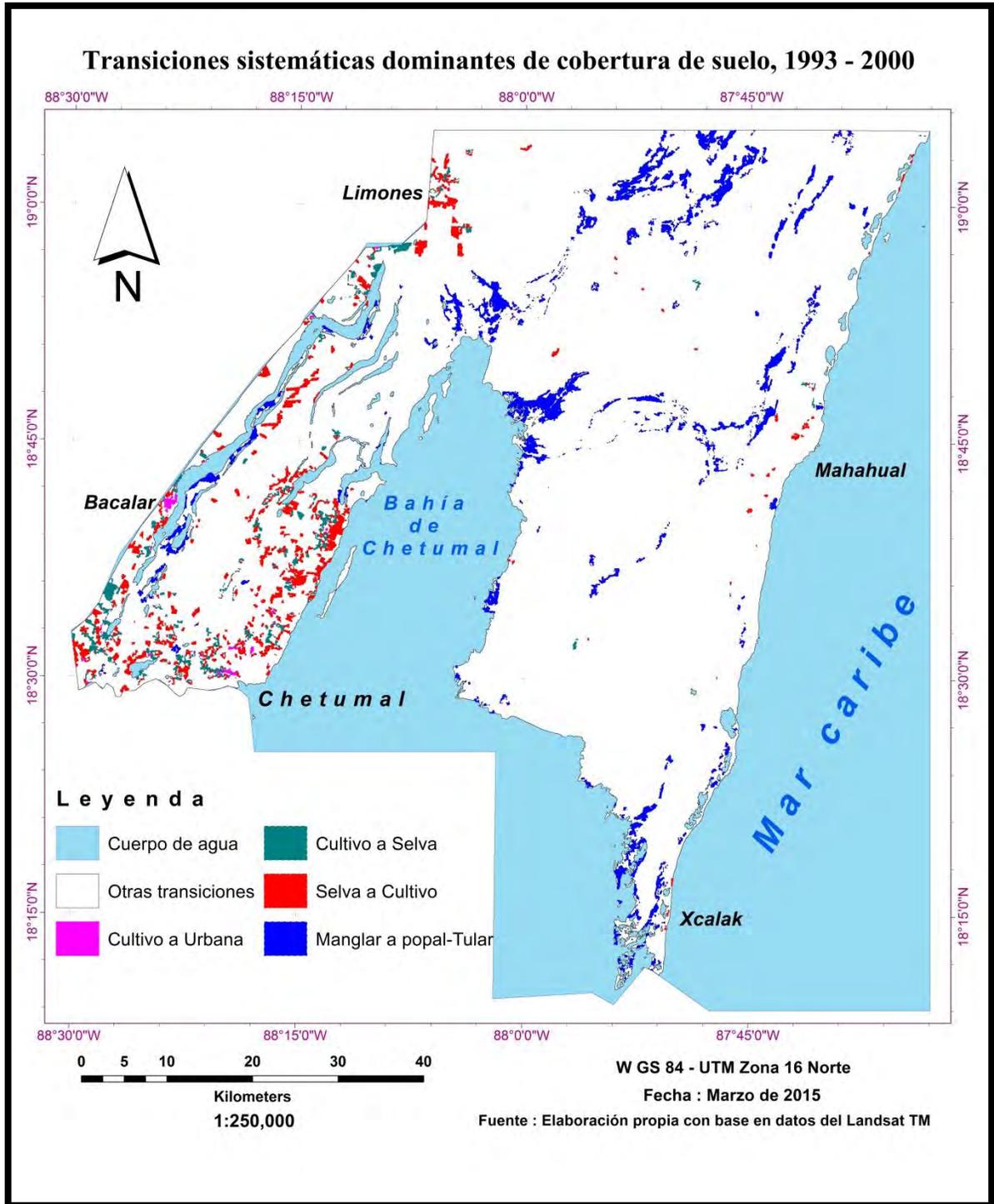


Figura 4.4: Mapas de las transiciones sistemáticas en la RCM, 1993-2000

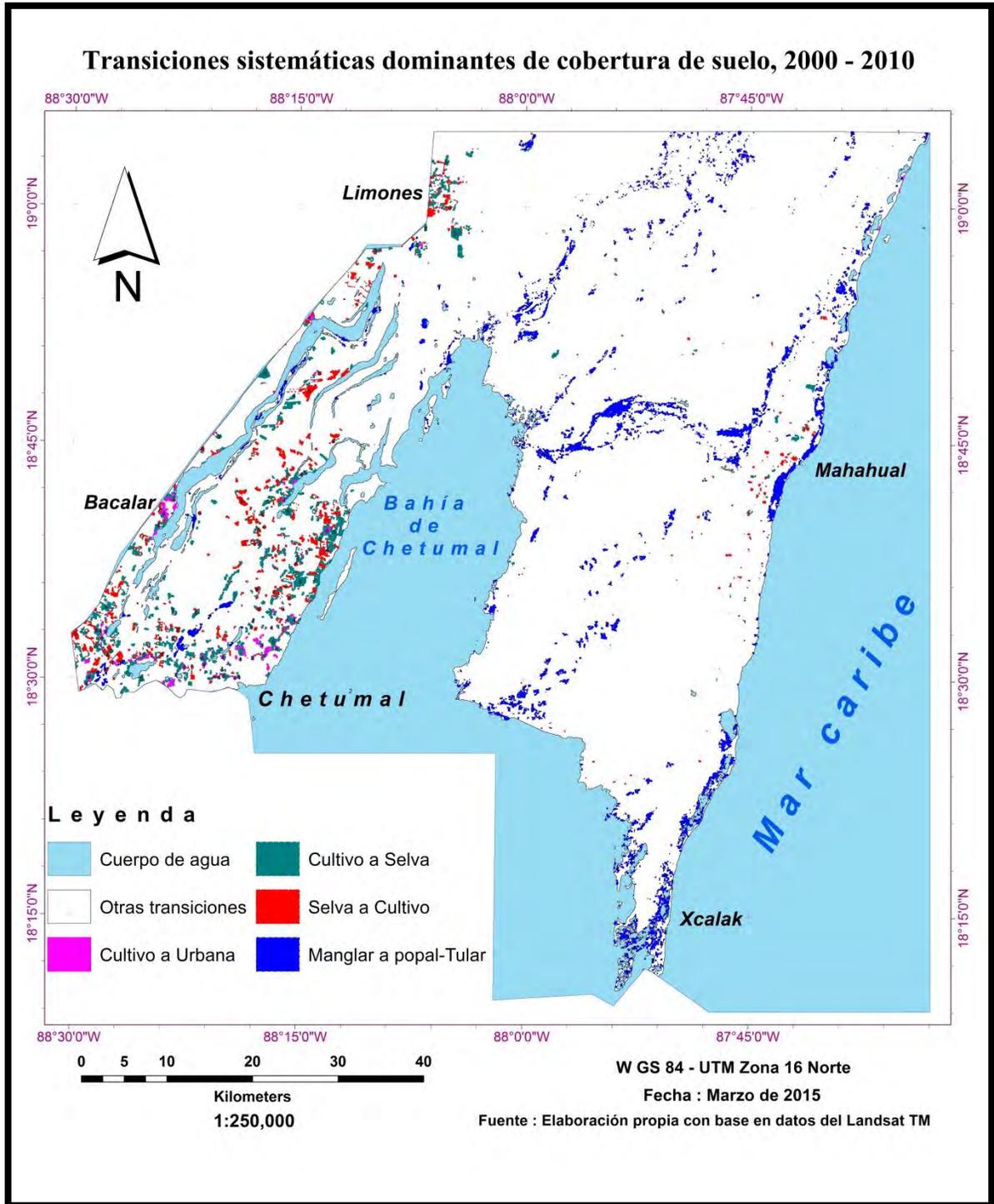


Figura 4.5: Mapas de las transiciones sistemáticas en la RCM, 2000-2010

Las señales dominantes (discutidos a continuación), nos permite identificar los procesos potenciales de cambios en la **RCM**, los cuales son: *urbanización*, *deforestación*, *expansión agrícola*, *la reforestación* y *el abandono de tierras*.

4.4.3.1 *Transición: Cultivo→ Urbana o el proceso de urbanización*

La transición sistemática más fuerte en la **RCM** es la de *Cultivo* → *Urbana*, con valores 49 para 1993-2000 y 30 para 2000-2010 (Tabla 4.4), implicando que *urbanización* es el proceso más fuerte del paisaje. Se puede confirmar el cambio irreversible de *urbanización*, por la fuerte inclinación de la *zona urbana* a reemplazar *cultivo*, cuando gana, evitando al mismo tiempo ser sistemáticamente sustituidos por clases *No-urbanas*; fortalecida por una inclinación similar de *cultivo* de ser sustituido por *zona urbana* cuando *cultivo* pierde bajo proceso aleatorio de pérdida. Alta tendencia a la permanencia (Tabla 4.1) en *zona urbana* es también, corroborada por los valores positivos de **Np**, lo que indica una mayor tendencia a ganar área que a perderlo a otras clases (Braimoh, 2006)

Estos resultados no son sorprendentes, ya que las *zonas urbanas* (Figura 4.1) están rodeadas de campos de *cultivos*, lo que significa que, cualquier expansión espacial en la zona ocurre a expensas de Campo agrícola; como se observó alrededor de principales asentamientos urbanos como Chetumal, la capital de la Quintana Roo, Mahahual-Xcalak y Bacalar. Dichas sustitución de las tierras agrícolas es muy bien conocida en todo el mundo en general (Farley, 2010) y en la península de Yucatán, en particular (Velásquez-Torres, 2007). Las altas magnitudes de cambios sistemáticas en ambos periodos de estudio se deben a factores socio-económicos y políticos que favorecen desarrollo de turismo.

4.4.3.2 *Intercambio entre Cultivo y Selva*

Los intercambios entre *cultivo* y *selva* indican una fuerte inclinación de la *selva* de reemplazar *cultivos* a más de 10 veces la tasa a la que *cultivo* sustituye a *selva* (Tabla 4.4). Esta tendencia es también corroborada por la fuerte inclinación de *cultivo* de perder a otras categorías bajo procesos aleatorios de pérdida, cuando otras categorías ganan. Se deben grandes pérdidas en *cultivo* a la *selva* al abandono de tierras, lo que revela fuertes declives en la agricultura. Se puede observar dicho proceso en los mapas (Figuras 4.4 & 4.5),

concentrado entre las riberas de la laguna de Bacalar y la bahía de Chetumal; y al norte de la bahía de Chetumal

Ewers, et al.(2006) afirman que una deforestación no es un proceso al azar, su evolución y transformación es un reflejo de la compleja historia del uso del suelo de una región particular, como la *RCM*. En este sentido, se pueden vincular los intercambios entre *cultivo* y *selva* a factores socioeconómicas, como la caída de los precios de productos agrícolas, la pérdida de incentivos gubernamentales y a una fuerte promoción del turismo (García-Rubio, et al., 2005; Velásquez-Torres, 2007; Turner II, 2010; Hernández, 2010).

Por otra parte, la reforestación o la expansión selvática en tierras agrícolas abandonadas, indica una disminución de la presión humana, y es consistente con la teoría de *transición forestal* - un marco conceptual según Farley, (2010), para entender aquellos escenarios en los cuales paisajes pasan, desde un periodo de pérdida de cobertura forestal, hacia un periodo de incremento de cobertura forestal. Para más detalles véase también, siguientes trabajos (Lambin, et al., 2001; Rudel, et al., 2005; Uriarte, et al., 2010).

En la *RCM*, las sendas de transición forestal más importantes están asociadas, en parte, con las políticas gubernamentales para modernizar la economía de México, específicamente de la economía agraria (García-Rubio, et al., 2005). Tales medidas restan importancia a la agricultura "marginal" del sistema ejidal, y tratan de aumentar las alternativas no agrícolas (como arqueo-ecoturismo), a los usuarios de las tierras afectadas (Turner II, 2010).

De acuerdo con García-Rubio, et al. (2005), la senda al abandono de tierra agrícola, se debe a: alta cantidad de personas que tienen trabajo remunerado que tiende a aumentar la falta de mano de obra para mantener grandes extensiones de áreas cultivadas; suelo no apto para agricultura y ganadería de alto rendimiento, y la escasez de infraestructura para la producción intensiva.

Otro factor muy importante, es la creación de áreas naturales protegidas (como las *Reservas de la Biosfera de Sian Ka'an* y de *Banco Chinchorro*; la *Zona Sujeta a Conservación Ecológica "Santuario del Manatí, Bahía de Chetumal"*) en donde se promueve la preservación de los bosques, incluidas las normas que restringen la tala de bosques entre los ejidos que residen dentro de la reserva.

Por otra parte, la transición: *Cultivo* → *Selva* o la deforestación de la *selva*, validada por valores de intercambio mayores que los de cambios netos en *cultivo* (Figura 4.2), es una indicación de la prevalencia de la agricultura migratoria en la *RCM* y esto es consistente con los resultados de García-Rubio, et al., (2005) y Velásquez-Torres, (2007).

4.4.3.3 Transición Manglar-Popal-Tular

P.Tular se caracterizó por una fuerte inclinación a reemplazar al *Manglar* cuando el *P.Tular* gana al azar (Tabla 4.4). Esto se corrobora por la fuerte tendencia del *Manglar* a perder frente al *P.Tular* y otras categorías no-*Manglares*, en procesos aleatorios de pérdida. Las pérdidas continuas en *Manglar*, representada como un proxy de ganancia en *P.Tular*, pueden atribuirse a la traza de líneas delimitación de propiedades privadas dentro de la zona de manglar, a la tala para la construcción de hoteles, a la construcción de caminos y el impacto de los huracanes (Díaz-Gallegos & Acosta-Velázquez, 2009; Hiraes-Cota, et al., 2010).

4.5 Conclusión del Capítulo

Este estudio analizó los patrones de cambios del paisaje en la *RCM*, Quintana Roo, en dos periodos de tiempo (1993 a 2000 y 2000 a 2010). Para ello se utilizaron mapas raster multitemporales, un SIG y un análisis más detallado de la matriz de transición, para obtener una mejor comprensión de las transiciones entre categorías y procesos clave detrás de estas transiciones.

El estudio encontró que solo una pequeña proporción de la *RCM* (~ 8% entre 1993-2000 y el ~7% entre 2000-2010) experimento transiciones entre-categorías, dominado por cambio neto (~81%) e intercambio (19%). El Intercambio es mayor que el cambio neto en las categorías con pérdidas netas. La inclusión de intercambio en la dinámica del cambio es importante para evitar interpretar a la ausencia del cambio neto como ausencia de cambio, ya que el cambio neto no logra captar el componente de intercambio del cambio. *Cultivo* es la categoría más dinámica de la *RCM*, cuya tendencia a perder área a otras categorías en lugar de gana ha aumentado durante el período de estudio.

La pérdida del ecosistema agrícola tiene implicaciones ambientales y económicas críticas para la región y debería preocupar a las autoridades y las partes interesadas. Estadísticas de la vulnerabilidad a cambiar ($L_p > N_p$ y $N_p < 0$) para *Manglar* son preocupantes. A pesar de contar con la protección internacional y gubernamental, *Manglar* muestra una inclinación fuerte y continua hacia la pérdida de superficie entre los años 1993-2010, lo que sugiere que las leyes y políticas ambientales existentes no han sido eficaces para evitar su destrucción.

Las señales dominantes de transición en el **RCM** son: *cultivo a zona urbana*; *intercambios entre Cultivo y Selva*; y *Manglar a P.Tular*. Estas transiciones probablemente indican una falta de crecimiento económico equilibrado en la **RCM** que es necesario abordar para evitar la degradación al medio ambiente. Estas señales se caracterizan por la disminución del sector agrícola, en comparación con el sector turismo el cual está gozando un crecimiento rápida en la región visto en expansión urbana. Ya que estos procesos asociados con señales dominantes, son inducidos por las políticas, su regulación o reversión también tiene que ser activado con las políticas gubernamentales para aumentar la posibilidad de uso sostenible del suelo.

El estudio ha revelado nuevas perspectivas a la naturaleza y procesos (tanto aleatorios como sistemáticos) del cambio en la **RCM**; que incluyen los cambios derivados de intercambio, y las tendencias de las coberturas terrestres para cambiar a otras categorías. No se habría observado esta información si hubiéramos hecho el análisis basado en la matriz de transición tradicional. Además, nos hubiéramos centrado en los intercambios entre *selva y manglar*, con base en sus huellas ambientales dominantes en el paisaje; y habría perdido las transiciones sistemáticas en el paisaje. Imágenes raster de alta resolución deben ser utilizadas en futuros estudios para determinar las fuerzas motrices de los procesos de transición dominantes.

4.6 Referencias del Capítulo 4

- Aabeyir, R., Oduro, W., & Quaye-Ballard, J. A. (2012). Analysis of the Processes behind Woodland Transition in Commercial Charcoal Producing Areas: A Case Study of Kintampo North District of Ghana. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 4(10), 866-877.
- Alo, C. A., & Pontius Jr, R. G. (2008). Identifying systematic land-cover transitions using remote sensing and GIS: the fate of forests inside and outside protected areas of Southwestern Ghana. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(2), 280-295.
- Braimoh, A. (2006). Random and systematic land covers transitions in Ghana. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113, 254-263.
- Campos-Cámara, B. L. (2010). Region Turística: Costa Maya. En B. L. Cámara, & B. L. Campos (Ed.), *Análisis Territorial Del Turismo Región Costa Maya* (págs. 9-50). México, D.F.: Plaza y Valdes Editores.
- Castillo-Villanueva, L. (2007). Urbanización, turismo y problemas ambientales. En B. L. Cámara, *Urbanización y turismo* (págs. 67-90). Barcelona: Ediciones pomares, S.A.
- Castillo-Villanueva, L., Velázquez -Torres, D., & López- Montejó, D. (2010). La planeación urbana-regional en Costa Maya. En B. L. Campos Cámara (Ed.), *ANÁLISIS TERRITORIAL DEL TURISMO REGIÓN COSTA MAYA* (págs. 75-110). Madrid, España: Plaza y Valdes Editores.
- Díaz, R. E., Bravo, L. C., Alatorre, L. C., & Flores, E. S. (2014). Análisis geospacial de la interacción entre el uso de suelo y de agua en el área peri-urbana de Cuasuhteémoc, Chihuahua. un estudio socioambiental en el norte de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(83), 116-130.
- Díaz-Gallegos, J. R., Mas, J.-F., & Velázquez, A. (2010). Trends of tropical deforestation in Southeast Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 31, 180-196.
- Díaz-Gallegos, J., & Acosta-Velázquez. (2009). En J. Espinoza-Avalos, G. Islebe, & H. Hernández-Arana (Eds.), *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal / Corozal: costa occidental del Mar Caribe* (págs. 225-237). Chetumal, Quintana Roo 77014: ECOSUR,.
- Eastman, R. (2015). *IDRISI TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System Manual*. Worcester, MA. USA: Clark Labs. Clark University.
- Ewers, R., Kliskey, A., Walker, S., Rutledge, D., Harding, J., & Didham, R. (2006). Past and future trajectories of forest loss in New Zealand. *Biological Conservation*, 133, 312-325.
- Farley, K. A. (2010). Pathways to forest transition: Local case studies from the Ecuadorian Andes. *Journal of Latin American Geography*, 9(2), 7-26.

- García-Rubio, G., Schmook, B., & Espejel-Carvajal, I. (2005). Dinámica en el uso del suelo en tres ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(58), 122-139.
- Hernández, A. s. (2010). Análisis de la política y gestión ambiental para las actividades turísticas en Mahahual. En B. L. Cámara, & B. L. Campos (Ed.), *ANÁLISIS TERRITORIAL DEL TURISMO REGIÓN COSTA MAYA* (págs. 233-298). México D.F: Plaza y Valdés Editores S.A de C.V.
- Hirales-Cota, M., Espinoza-Avalos, J., Schmook, B., Ruiz-Luna, A., & Ramos-Reyes, R. (2010). Agentes de deforestación de manglar en Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, sureste de México. *Ciencias Marinas* , 36(2), 147-159.
- Huan, J., li, Q., Pontius Jr, R. G., Klemas, V., & Hong, H. (2013). Detecting the dynamic linkage between landscape characteristic and water quality in a subtropical coastal watershed, southeast china. *Environmetal Management*, 51, 32-44.
- Lambin, E. F. (1997). Modeling and monitoring land.cover change processes in tropical regions. *Progressin Physical Geography*, 21(3), 375-393.
- Lambin, E. F., Geist, H., & Lepers, E. (2003). Dynamics of Land-use and Land-cover change in the Tropical Regions. *Annu. Rev. Environ. Resour*, 28, 205-241.
- Lambin, E. F., Geist, H., & Rindfuss, R. R. (2006). Introduction: Local Processes with Global Impacts. En E. F. Lambin, & H. Geist (Edits.), *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts* (págs. 1-9). Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Helmut, J. G., & et al. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change* , 11, 261-269.
- Lira, P. K., Tambosi, L. R., Ewers, R. M., & Metzger, J. P. (2012). Land-use and land-cover change in atlantic Forest landscapes. *Forest Ecology and Management*, 278, 80-89.
- López, E., Bocco, G., Mendoza, M., & Duhau, E. (2001). Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe: A case study in Morelia City ,Mexico. *Landscape and Urban Planning*, 55, 271-285.
- Mallinis, G., Koutsias, N., & Arianoutsou, M. (2014). Monitoring land use/land cover transformations from 1945 to 2007 in two peri-urban mountainous areas of Athens metropolitan area, Greece. *Science of the Total Environment*, 490, 262-278.
- Manandhar, R., Odeh, I. O., & Pontius Jr, R. G. (2010). Analysis of twenty years of categorical land transitions in the Lower Hunterof New South Wales, Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 135, 336–346.
- Mas, J.-F., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., . . . Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial

database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5, 249-261.

- Mas, J.-F., Pérez-Vega, a., & Clarke, K. C. (2012). Assessing simulated land use/cover maps using similarity and fragmentation indices. *Ecological Complexity*, 11, 38-45.
- Mendoza, M., Bocco, G., López-Granados, E., & Bravo, M. (2010). Hydrological implications of land use and land cover change: Spatial analytical approach at regional scale in the closed basin of the Cuitzeo Lake, Michoacan, Mexico. *Singapore Journal of Geography*, 31, 197-214.
- Olson, J. M., Misana, S., & Campbell, D. J. (2004). *Land Use Change Impacts and Dynamics(LUCID) Project Working Paper48*. Nairobi, Kenya: International Livestock Research Institute.
- Ouedraogo, I., Savadogo, P., Tigabu, M., Djibril Dayamba, S., & Odén, P. C. (2011). Systematic and random transitions of land-cover types in Burkina Faso, West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 32(18), 5229–5245.
- Pérez, U. G., & Bosque, J. S. (2008). TRANSICIONES DE LA COBERTURA Y USO DE LA TIERRA EN EL PERÍODO 1991 – 2005 EN LA CUENCA DEL RÍO COMBEIMA, COLOMBIA. *Serie Geográfica - Profesora María de los Ángeles Díaz Muñoz, In Memoriam*(14), 163-178.
- Petit, C., Scudder, T., & Lambin, E. (2000). Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: resettlement and rapid land-cover changes in the southern-eastern Zambia. *International Journal of Remote Sensing*, 22(17), 3435-3456.
- PNUMA. (1996). *PNUMA: Directrices para una planificación y un manejo integrados de las Áreas costeras y marinas en la región del Gran Caribe. Informe Técnico del PAC No. 42*. Kingston, Jamaica: Programa Ambiental del Caribe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Pontius Jr, R. G., & Malizia, N. R. (2004a). Effect of Category Aggregation on Map Comparison. En M. J. Egenhofer, C. Freksa, & H. J. Miller (Edits.), *GIScience 2004, LNCS 3234* (págs. 251–268). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg .
- Pontius Jr, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004b). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101, 251-268.
- Pontius Jr, R., & Cheuk, M. (2006). A generalized cross-tabulation matrix to compare soft-classified maps at multiple resolutions. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(1), 1-30.
- Ramita, M., Odeh, I. O., & Inakwu O.A, R. G. (2010). Analysis of twenty years of categorical land transitions in the Lower Hunter of New South Wales, Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 135, 336–346.

- Rosado-May, F. J., & Kissmann, S. (1998). Planning for sustainable Tourism in the Southern Coast of Mexico Caribbean. En L. HENS, R. J. BORDEN, S. SUZUKI, & G. CARAVELLO (Edits.), *RESEARCH IN HUMAN ECOLOGY:AN INTERDISCIPLINARY OVERVIEW* (págs. 53-78). Florence,Italy: VUBPRESS / VUB University Press Brussels.
- ROSADO-MAY, F. J., & KISSMANN, S. (1998). Planning for sustainable Tourism in the Southern Coast of Mexico Caribbean. En L. HENS, R. J. BORDEN, S. SUZUKI, & G. CARAVELLO (Edits.), *RESEARCH IN HUMAN ECOLOGY:AN INTERDISCIPLINARY OVERVIEW* (págs. 53-78). Florence,Italy: VUBPRESS / VUB University Press Brussels.
- Rudel, T. K., Coome, O. T., Moran, E., Achard, F., Angelsen, A., Xu, J., & Lambin, E. F. (2005). Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change*, 15, 23-31.
- Schulz, J. J., Cayuela, L., Echeverria, C., Salas, J., & Rey, J. M. (2010). Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975–2008). *Applied Geography*, 30, 436-447.
- Teferi, E., Bewket, W., Uhlenbrook, S., & Wenninger, J. (2013). Understanding recent land use and land cover dynamics in the source region of the Upper Blue Nile, Ethiopia: Spatially explicit statistical modeling of systematic transitions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 165, 98-117.
- Teixeira, Z., Heliana, T., & Marques, J. C. (2014). Systematic processes of land use/land cover change to identify relevant driving forces: Implications on water quality. *Science of the Total Environment*, 470-471, 1320-1335.
- Turner II, B. (2010). Sustainability and forest transitions in southern Yucatán:The land architecture approach. *Land Use Policy*, 27, 170-179.
- Uriarte, M., Schneider, L., & Rudel, T. K. (2010). Synthesis: Land Transitions in the Tropics. *BIOTROPICA*, 42(1), 59-62.
- Valdez-Lazalde, J. R., Aguirre-Salado, C. A., & Gregorio, Á.-P. (2011). Análisis de os ca,mios en el uso del suelo en la cuenca dl río metztitlán (México) usando imágenes de satélite: 1985-2007. *Revista Chapingo.Serie Ciencias forestales y del ambiente*, 17(3), 313-324.
- Vázquez, T. A. (2010). la Costa Maya, un espacio para la participación de México en la cooperación ambiental centrosmerican. En B. L. Cámara, & B. L. Campos (Ed.), *ANÁLISIS TERRITORIAL DEL TURISMO REGION COSTA MAYA* (págs. 153-174). México D.F: Plaza y Valdes S.A. de C.V.
- Velásquez-Torres, D. (2007). Deforestación de la Selva Maya. Una nálisis geográfico regional. *Perspectiva Geográfica*, 12, 1-21.

Versace, V., Ierodiaconou, D., Stagnitti, F., & Hamilton, A. (2008). Appraisal of random and systematic land cover transitions for regional water balance and revegetation strategies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123, 328-336.

Warner, T. A., & Campagna, D. (2009). *Remote Sensing with IDRISI Taiga: A Beginner's Guide*. Hong Kong: Geocarto International Centre.

Capítulo 5

Reflexiones finales

5.1 Introducción

Este capítulo final presenta el resumen de la tesis con base en los objetivos del estudio. La meta del capítulo es reflexionar sobre las características relevantes del estudio y discutir los principales aportes y limitaciones así como las sugerencias para futuras investigaciones.

El objeto fundamental de esta tesis: *Cambios del paisaje en la región Costa Maya, 1993 – 2010*, fue mapear y monitorear la evolución de los cambios paisajísticos en la *RCM*, así como detectar transiciones sistemáticas, durante un período de 17 años (1993-2010) a partir de técnicas Geoinformáticas. Para ello, se aplicó una estrategia compuesto por dos fases principales: mapeo y teledetección de cambios (Capítulos 3) y detección de transiciones sistemáticas de cobertura/ uso del suelo (Capítulos 4), los cuales se encuentran publicados, respectivamente, en las revistas científicas: *Perspectiva Geográfica, Colombia* (Simbangala, et al., 2015a), e *Investigaciones Geográficas, Chile* (Simbangala, et al., 2015b).

5.1.1 Mapeo de paisaje y teledetección de cambios (Capítulos 3)

El primer paso (Capítulo 3), es un trabajo de alcance descriptivo y explicativo en el cual se examinan los cambios globales entre las fechas, mediante las tecnologías geoespaciales. Eso, para responder a las exigencias de conocimiento planteada por la necesidad de manejo y gestión de las transformaciones en el área de estudio. De acuerdo con el marco teórico planteado (Capítulo 2), el cambio en la cobertura terrestre constituye un elemento crítico en los estudios de los cambios paisajísticos, ya que afecta a muchos aspectos del sistema ambiental, amenazándolo con la degradación. Por tanto, información precisa y actualizada del cambio terrestre, es necesario para monitorear tanto la evolución, como las consecuencias de tales cambios ambientales (Capítulos 2 y 3). Según la revisión de la literatura (Capítulo 3), las técnicas de Geoinformática, son los medios más eficientes y rentables para realizar tales estudios.

Por ello, capítulo 3 aplico el enfoque *Segmentación y procesamiento de imágenes orientada a objetos (OBIA)*, una metodología novedosa de teledetección multitemporal, para derivar mapas temáticos de cobertura terrestre más precisos de las tres imágenes Landsat TM/ETM+. Se utilizó una modificación del esquema de clasificación de INEGI (México,

Mapa, Serie III) para satisfacer las necesidades de modelado ambiental posteriores antes de implementar un análisis de precisión para mapa 2000.

Análisis espacial descriptivo de los derivados mapas: 1993, 2000 y 2010, reveló que, en general, Selva y agua ocuparon casi la mitad de RCM, seguida por *Manglares*, *Popal-tular*, *Cultivos* y *Zona urbanas*, siendo la cobertura más pequeña. La regresión y expansión del área selvática; crecimiento rápido de la zona urbana y popal-tular; y deforestación de manglares fueron los cambios paisajísticos que caracterizaron el área del estudio.

5.1.2 Detección de transiciones sistemáticas de cobertura/ uso del suelo (capítulo 4)

Por otro lado, la segunda parte (Capítulo 4) es un trabajo del enfoque explicativo para detectar transiciones sistemáticas, en el cual se aplica un novedoso análisis cuantitativo estadístico para abordar las deficiencias de otros establecidos y tradicionales métodos de detección de cambios. El análisis incluye matriz extendida del cambio (derivados de tres mapas anteriormente clasificados en Capítulo 3), mediante la cual se determinó la pérdida, ganancia, persistencia, cambios totales, cambios netos, intercambios, la vulnerabilidad de las categorías a las transiciones. Estos componentes del cambio fueron utilizados para detectar transiciones sistemáticas y de ellas inferir las señales más fuertes de las transiciones sistemáticas en el paisaje.

Los resultados indican que una enorme proporción (casi 92%) de *RCM* persistió, el resto (aproximadamente 8%) experimentó cambio entre 1993-2010. De este cambio, casi la mitad se debió a cambio neto, y el resto al intercambio. La categoría más dinámica del paisaje fue *cultivo*, el cual junto con *manglares* mostraron altas tendencias a perder que a ganar. Mientras que *zona urbana* tenía tendencias opuestas, se prefería ganar cobertura que perderla. Por otra parte una estabilidad relativa caracterizó el resto de las clases.

En cuanto a las señales más fuertes de las transiciones sistemáticas, capítulo 4, señala que, se las deben a procesos inducidos por los cambios: *Cultivo a Zona Urbana*; *intercambios entre Cultivo y Selva*; y *Manglar a Popal-Tular*.

5.2 Conclusiones sobre el problema de investigación

Creciente presión humana tiene implicación profunda sobre la sustentabilidad de ecosistemas paisajísticos. En este contexto, un monitoreo riguroso y continuo que nos permite detectar, evaluar y manejar, impactos antropogénicos, correctamente es muy importante. Según, [Skidmore, et al., \(1997\)](#), un manejo eficaz debe tener tres elementos: Información sobre recursos naturales, Políticas claras para controlar el manejo de tales recursos y la participación de personas con interés.

Esta tesis es un buen ejemplo de la integración la Geoinformática con estadísticas espaciales, para comprender la naturaleza de cambios ambientales, sus consecuencias y lo que se deben hacer para evitar sus peor efectos. El trabajo ha ayudado a aclarar las transformaciones que la **RCM** ha sufrido entre 1993-2010.

En cuanto al segundo elemento, este trabajo ha comprobado que aunque existen programas de ordenamiento ecológico territorial (POET) para la **RCM**, en los que se visualiza la restauración, protección, conservación y aprovechamiento racional de los recursos naturales, y en los que además se imponen reglas al desarrollo económico, turístico y urbano, lo cierto es que los programas de desarrollo urbano y los planes de manejo de las áreas protegidas no han frenado la amenaza ambiental sobre la región.

Sobre el tercero elemento, la tesis muestra que tanto las autoridades gubernamentales como terrateniente (inversionistas) son culpables en los abusos del suelo que la **RCM** está sufriendo. La falta de participación en conservación por parte de las inversionistas en infraestructura turísticas ha propiciado la destrucción de los manglares.

5.3 Conclusiones Acerca de las Preguntas de Investigación

5.3.1 ¿Ha habido políticas o regímenes de manejo importante en la RCM?

La **RCM** cuenta con una gran diversidad de instrumentos de planeación que contemplan de manera general un desarrollo urbano sustentable que a las vez incida en el desarrollo territorial de la región ([Castillo-Villanueva, et al., 2010](#)). Sin embargo, esta tesis ha utilizado técnicas de Geoinformática para mostrar que dichos programas de gestión ambiental parece que no funcionan, lo que implica que el modelo de desarrollo de la **RCM**

es insostenible. Esta política en realidad se preocupa, en gran medida, en aumentar el número de turistas sin tomar medidas correspondientes para mejorar la capacidad del medio ambiente para soportar el turismo en el largo plazo.

5.3.2 ¿Qué técnicas de teledetección se puede utilizar para procesar imágenes de Landsat TM / ETM?

El objetivo principal del capítulo 3 fue derivar la información de cobertura terrestre más precisa y útil posible, dado el uso de las técnicas más rentables disponibles. Este estudio ha resaltado la capacidad de la integración de la teledetección, usando imágenes Landsat y SIG, en el análisis de los cambios en el paisaje (Capítulos 3 y 4). Un estudio como éste ayudaría en mejorar la planificación y monitoreo ambiental, lo que conduce a un desarrollo sostenible y el uso de recursos no renovables en la *RCM*.

5.3.3 ¿Qué enfoque de clasificación se deben utilizar para obtener mapas de alta calidad?

Se deben utilizar la segmentación y clasificación orientada a objetos para derivar mapas temáticos precisos a partir de imágenes satelitales ya que proporciona una manera eficaz de incorporar la información espacial y conocimiento del experto en el proceso de clasificación y detección de cambios. Se utilizó este enfoque (Capítulo 3) y derivó tres mapas 1993, 2000 y 2010 a una precisión global de 94.29% ($\kappa = 0.9141$) %, el cual es mucho mejor que el criterio mínimo del 85% recomendado, y una concordancia, "fuerte", con los datos de referencia. Todo esto significa una clasificación exitosa y satisfactoria, comprobando la *OBIA* como un estrategia eficaz para cartografiar paisajes costeros.

Los mapas temáticos derivados, están en formatos digitales compatibles, por tanto, pueden ser fácilmente utilizados a una variedad de aplicaciones *SIG* futuras. Por ejemplo, en esta tesis, los mapas sirvieron como base de datos en detección de cambios (Capítulo 3) así como en el análisis más detallado para detectar transiciones sistemáticas (Capítulo 4). Se pueden incorporar temas adicionales en cuanto esté disponible más información sobre recursos o en cuanto se identifiquen nuevas necesidades de gestión.

5.3.4 ¿Cómo se puede detectar transiciones sistemáticas y señales más dominantes de cambios?

La integración del análisis detallado de la matriz de transición (Pontius Jr, et al., 2004) y el índice de persistencia (Brammoh, 2006) revelaron nuevas perspectivas sobre la naturaleza y los procesos (tanto aleatorios como sistemáticos) del cambio en la *RCM*. Esta nos permitió identificar las señales dominantes de las transiciones paisajísticas en la *RCM* que deberían facilitar una mejor planificación en el manejo sostenible de recursos naturales.

Las señales de esas tendencias se caracterizan por la disminución de la actividad agrícola, en comparación con turismo, el cual presenta un crecimiento rápido, reflejado por un crecimiento acelerado en el desarrollo de infraestructura turística, el crecimiento urbano, las actividades y servicios relacionados-lo que por otra parte es un síntoma de la ausencia de crecimiento económico equilibrado.

5.4 Implicaciones para Políticas y Prácticas

El desarrollo agrícola, el crecimiento urbano y la planificación urbana, y la conservación de los recursos naturales implican diferentes niveles de gobierno (federal, estatal y municipal) y los organismos no gubernamentales. Existe la necesidad de crear una coordinación institucional más eficaz entre los distintos sectores pertinentes para el desarrollo sostenible y la conservación del medio ambiente.

Además, puesto que la *RCM* está experimentando cambios notables, la actualización de la base de datos espaciales es una tarea muy crítica. Con la disponibilidad continua de imágenes Landsat, sin costo alguno, el monitoreo ambiental debe pasar de periódico al inventario continuo.

5.5 Limitaciones

En este estudio no se pudo encontrar imágenes Landsat sin nubosidad en las fechas de aniversario exactos, lo que habría permitido un análisis de detección de cambios mucho más precisa. Tampoco pudo realizar un trabajo extensivo de campo para facilitar la selección de muestras de entrenamiento y validación de la precisión de clasificación

También, encontramos la fase de Segmentación de clasificación basada en objetos (OBIA) computacionalmente muy exigente y demoraba mucho tiempo en completarse que otras técnicas de clasificación tradicionales. La naturaleza semi-cuantitativa de la segmentación hace que sea difícil evaluar el tiempo necesario para la creación de objetos a diferente nivel de segmentación. Además, el enfoque OBIA es más dependiente de la experiencia y la comprensión del analista, lo que lo hace más susceptible a errores humanos que en otras técnicas tradicionales.

5.6 Sugerencias para Investigaciones Posteriores

5.6.1 Adopción del enfoque OBIA

Ha llegado el momento de alejarse de los enfoques centrados en píxel (desarrollados para las imágenes con baja resoluciones), y explorar el enfoque la segmentación y clasificación orientada a objetos (OBIA), especialmente en cuanto a análisis de imágenes satelitales de alta resolución. Este enfoque es mucho más intuitivo y ha sido demostrado ser superior a los métodos basados en píxeles, en términos de precisión. Ha sido un campo emergente en la ciencia Geoinformática desde el 2000 y varias conferencias internacionales dedicadas al desarrollo de su literatura han sido celebradas cada dos años, desde 2006. La quinta conferencia GEOBIA (por su siglas en inglés) siendo en mayo de 2014; Salónica, Grecia.

5.6.2 El uso de imágenes de satélite de alta resolución

Perspectivas futuras de investigación se beneficiarán significativamente con el uso de imágenes satélites de alta resolución, como de WorldView e Ikonos, permitiendo una investigación del paisaje en una escala más detallada y minuciosa útil para la conservación, la restauración y el desarrollo de la costa recursos. Y su integración con datos de sensores activos tales como Lidar, facilita un mapeo precisa de los componentes del paisaje como, áreas Urbana.

Las imágenes híper-espectrales proveen información espectral rica adecuada para el análisis espectral y debe ser utilizado ampliamente en estudios futuros. La teledetección híper-espectral emplea a cientos de banda espectrales estrechas y contiguas en la recopilación de

datos para mejorar la capacidad de identificación de los hábitats costeros. Estos datos proporcionan detalles espaciales refinados para el mapeo de la costera.

5.6.3 Nubosidad

Regiones tropicales, como la RCM, son notoriamente difíciles de mapear con las imágenes satelitales ópticas. Alta precipitación y nubosidad persistentes durante un gran parte del año hace sea casi imposible adquirir imágenes libres de nubosidad. Por tanto, en próximos estudios, es necesario explorar la combinación de sensores activos como el radar con sensores pasivos ya sensores radar siendo instrumentos activos con su propia fuente de energía, puede adquirir imágenes en cualquier tipo de clima en el día o noche.⁴

5.6.4 Factores subyacentes de los cambios paisajísticos

Trabajos futuros deben centrarse en los procesos subyacentes que causaron los cambios o señales dominantes observadas, y de los ya que esta información es crucial para el desarrollo de estrategias de gestión eficaces.

5.7 Aportes Principales de la Investigación

Esta tesis ha proporcionado un buen ejemplo de como la integración de teledetección de cambio con SIG puede beneficiar un estudio de cambio en el paisaje. Este trabajo ha contribuido a clarificar ampliamente las características y los procesos de los cambios paisajísticos en la RCM.

Además existen muy pocos estudios en México y no en RCM que han tratado de monitorear o evaluar cambios en el paisaje en el contexto de los dos principales enfoques analíticos que se han utilizado en esta tesis. Por lo tanto, los tres mapas temáticos generados ay otros resultados de la tesis representan una eficaz alternativa a los resultados convencionales provenientes de los enfoques tradicionales.

Más importante es el hecho de que los cambios paisajísticos pueden ser mapeados y monitoreados precisamente utilizados, imágenes gratuitos de Landsat, y técnicas de teledetección simples, que son fáciles de implementar, y sus resultados fáciles d interpretar.

El objetivo general de esta investigación ([Capítulo 3](#)) fue desarrollar un procedimiento de teledetección para monitorear cambios paisajísticos en la RCM. Esta tesis ha hecho una contribución significativa al campo de la teledetección en México a demostrar la utilidad del enfoque alternativo de procesamiento de imágenes a lo centrado en píxeles, y que ha producido mapas muy precisos muy por encima del 85%.

Esta tesis, también ha contribuido a la literatura de análisis geográfico en la generación de nuevo conocimiento mismo que se difundieron en las revistas internacionales científicas: *Perspectiva Geográfica, Colombia* ([Simbangala, et al., 2015a](#)), e *Investigaciones Geográficas, Chile* ([Simbangala, et al., 2015b](#)).

5.8 Referencias del Capítulo 5

- Braimoh, A. (2006). Random and systematic land covers transitions in Ghana. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113, 254-263.
- Castillo-Villanueva, L., Velázquez-Torres, D., Iturbe-Posada, A., & López-Montejo, D. (2010). La planeación urbana-regional en Costa Maya. En B. L. Campos-Cámara (Ed.), *Análisis Territorial del Turismo Región Costa Maya* (págs. 75-110). Madrid, España: Plaza y Valdes.
- González-Vera, A. (2010). Mahahual, planeación y sustentabilidad. En L. Castillo-Villanueva, M. E. Oroszco-Hernandez, & D. Velazquez-Torres (Edits.), *Ciudades, Urbanización y Metropolización* (págs. 359-374). México D.F.: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
- Pontius Jr, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101, 251-268.
- Rosado-May, F. J., & Kissmann, S. (1998). Planning for sustainable tourism in the southern coast of Mexican caribbean. En V. U. Brussels (Ed.), *Research in human ecology: An interdisciplinary overview* (págs. 53-78). Florence, Italy: Hens, L; Borden, R J; Suzuki, S; Caravello, G.
- Simbangala, M. S., Campos-Cámara, B. L., & Arriaga-Rodríguez, J. C. (2015a). Transiciones sistemáticas de cobertura de suelo en la Región Costa Maya, Quintana Roo, México, 1993-2010. *PERSPECTIVA GEOGRÁFICA*, 20(1).

- Simbangala, M. S., Campos-Cámara, B. L., Castillo- Villanueva, L., Frausto- Martínez, Ó., Velázquez-Torres, D., Romero- Mayo, R., & Orozco- Hernández, M. E. (2015b). Using Object Oriented Image Analysis to Map and Monitor land cover change in Costa Maya Region, México:1993-2010. *Investigaciones Geográficas, Chile*, 50.
- Skidmore, A. K., Bijker, W., Schmidt, K., & Kumar, L. (1997). Use of remote sensing and GIS for sustainable land management. *ITC Journal*, 3/4, 302-317.
- Vázquez-Trejo, A. (2010). La Costa Maya, un espacio para la participación de México en la cooperación ambiental centroamericana. En B. L. Campos-Cámara (Ed.), *Análisis Territorial del Turismo Región Costa Maya* (págs. 153-174). México D.F.: Plaza y Valdés S.A, de C.V.