

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**Modelación prospectiva del cambio de uso de suelo en la
Región Transfronteriza México-Guatemala para los años
2010-2030**

TESIS

Que para obtener el título de:
Licenciada en Geografía

PRESENTA

Alejandra Amaranta Orozco Avila

DIRECTOR DE TESIS

Mtro. José Mauricio Galeana Pizaña

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), porque sin duda alguna ha sido una de las mejores decisiones que he tomado.

A mis amigos y compañeros geógrafos, con ustedes este camino fue siempre mejor.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico Tecnológico y de Innovación (FORDECYT), quienes financiaron el proyecto “Región Transfronteriza México-Guatemala: dimensión regional y bases para su desarrollo integral”, con clave: 291987, gracias al cual se me otorgó una beca para la presente investigación.

Al Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CENTROGEO) por el apoyo y por abrirme las puertas en el comienzo de mi desarrollo profesional.

De forma muy especial agradezco a Mauricio Galena y a Juan Manuel Núñez, por la oportunidad, por los consejos, y por ser quienes me enseñaron todas las bases para la realización de este trabajo. Agradezco lo aprendido y el seguir aprendiendo cada día de ustedes.

A mis sinodales, Margarita Franco, Rocío Alanís y Cecilia Gutiérrez, gracias a sus recomendaciones esta investigación logró seguir creciendo.

A mi papá, a mi mamá y a mis tres hermanos, sin ustedes en mi vida simplemente no hubiera sido posible llegar hasta este punto.

A mi cachorrita, espero con ansias el día en que otra vida nos permita volvernos a encontrar...

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1: Marco teórico: Dinámica de los sistemas socioecológicos y modelación prospectiva	6
1.1 Características de los sistemas socioecológicos.	6
1.2 Los sistemas socioecológicos y su relación con Geografía.	10
1.3 Dinámica del paisaje: los geosistemas.....	11
1.4 Cambio de uso de suelo.	13
1.5 Cambio de uso de suelo y modelación prospectiva.	19
1.6 Abordaje de sistemas dinámicos: el perceptrón multicapa.	23
1.7 Los escenarios prospectivos.	27
CAPÍTULO 2: Caracterización del área de estudio	32
2.1 Localización	32
2.2 Características físico-geográficas:	34
2.2.1 Altitud	34
2.2.2 Cuerpos de agua	37
2.3 Características socioeconómicas:	41
2.3.1 División territorial.....	41
2.3.2 Localidades	42
2.3.3 Población	44
2.3.4 Índice de Desarrollo Humano (IDH) y pobreza.....	46
2.3.5 Actividades económicas	50
2.3.6 Incendios	54
2.3.7 Migración.....	55
CAPÍTULO 3: Metodología	63
3.1 Selección de coberturas de uso de suelo y vegetación	64
3.2 Detección y análisis de cambios	71

3.3 Modelos de potencial de transición	73
3.4 Predicción del cambio de uso de suelo y vegetación	85
CAPÍTULO 4: Resultados y discusión.....	88
RESULTADOS	88
4.1 Selección de coberturas de uso de suelo y vegetación	88
4.2 Detección y análisis de cambios	91
4.2.1 Gráficas de cambios de la RTMG:.....	91
4.2.2 Mapas de cambios	96
4.3 Modelos de potencial de transición	98
4.3.1 Definición de submodelos de transición	98
4.3.2 Variables de cambio	99
4.3.3 Red neuronal Perceptrón multicapa	106
4.4 Predicción del cambio de uso de suelo y vegetación	109
4.4.1 Matrices de Markov para la RTMG	109
4.4.2 Validación del modelo	111
4.4.3 Construcción del escenario tendencial	113
DISCUSIÓN	123
CONCLUSIONES	136
REFERENCIAS.....	140
ANEXOS.....	154

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1- Principales elevaciones de la RTMG	36
Tabla 2.2- Área de las cuencas de la RTMG	37
Tabla 2.3- Extensión de los ríos en la RTMG	39
Tabla 2.4- Principales lagos y presas en la RTMG	40
Tabla 2.5- Principales municipios de la RTMG	42
Tabla 2.6- Localidades de la RTMG	43
Tabla 2.7- Total poblacional en la RTMG	44
Tabla 2.8- Población por tipo de localidad	45
Tabla 2.9- IDH en la RTMG al año 2012	46
Tabla 2.10- Población en situación de pobreza en Chiapas, Campeche y Tabasco al año 2010	49
Tabla 2.11- Actividades económicas en la RTMG al año 2010	50
Tabla 2.12- Actividades económicas por sector en la RTMG	53
Tabla 2.13- Cruces fronterizos de la RTMG	58
Tabla 2.14- Migración México-Guatemala para el año 2015	61
Tabla 3.1- Reclasificación por categorías de uso de suelo y vegetación para Chiapas, Campeche, Tabasco y Guatemala	66
Tabla 3.2- Geoprocesamientos para la generalización cartográfica en la RTMG	70
Tabla 3.3- Estadísticas de las transiciones obtenidas entre los usos de suelo y vegetación	74
Tabla 3.4- Variables de cambio probables para explicar los cambios de uso de suelo y vegetación en la RTMG y su coeficiente V de Cramer	77
Tabla 3.5- Matriz de correlación entre las variables de cambio consideradas más importantes	79
Tabla 3.6- Variables de cambio seleccionadas para el modelo y su coeficiente V de Cramer	80
Tabla 4.1- Cobertura por uso de suelo y vegetación en la RTMG para los años 1990, 2000 y 2010	91

Tabla 4.2- Submodelos de transición para la RTMG	98
Tabla 4.3- Variables de cambio seleccionadas para el modelo y su coeficiente V de Cramer por cada uso de suelo	99
Tabla 4.4- Parámetros del mejor resultado obtenido por medio del perceptrón multicapa	107
Tabla 4.5- Matriz de Markov para el año 2010	109
Tabla 4.6- Matriz de Markov para el año 2030	110
Tabla 4.7- Resultados del coeficiente de Kappa para el escenario seleccionado al año 2030	113
Tabla 4.8- Cobertura por uso de suelo y vegetación para la RTMG al año 2030	113
Tabla 4.9- Porcentaje de cobertura por uso de suelo y vegetación y el porcentaje que representan para los años 1990, 2000, 2010 y 2030 en la RTMG	115
Tabla 4.10- Total de hectáreas por uso de suelo y vegetación y el porcentaje que representan para los años 1990, 2000, 2010 y 2030 en la RTMG	122

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 2.1- Localización de la RTMG	33
Mapa 2.2- Altitud de la RTMG	36
Mapa 2.3- Distribución de las cuencas de la RTMG	37
Mapa 2.4- Distribución de los ríos en la RTMG	39
Mapa 2.5- Distribución de los lagos y presas en la RTMG	40
Mapa 2.6- Distribución de las localidades rurales y urbanas en la RTMG y su conexión por medio de carreteras	43
Mapa 2.7- Distribución de las actividades económicas en la RTMG	53
Mapa 2.8- Incendios ocurridos en la RTMG durante el año 2001	55
Mapa 2.9- Cruces fronterizos y sitios potenciales de ingreso a la frontera	57
Mapas 4.1- Usos de suelo y vegetación para los años de 1990, 2000 y 2010 en la RTMG	89
Mapas 4.2- Mapas de cambios para la RTMG entre 1990 y 2030	97
Mapas 4.3- Resultados de la validación del modelo	112
Mapa 4.4- Escenario tendencial de cambio de uso de suelo y vegetación en la RTMG al año 2030	113
Mapas 4.5- Análisis del escenario tendencial hacia 2030 a partir de los usos de suelo y vegetación de los años 1990, 2000 y 2010 en la RTMG	116

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1- Gráfica de cambios de uso de suelo y vegetación entre los años 1990-2000 (hectáreas)	92
Gráfica 4.2- Grafica de cambios de uso de suelo y vegetación entre los años 1990-2010 (hectáreas)	94
Gráfica 4.3- Grafica de cambios de uso de suelo y vegetación entre los años 1990-2030 (hectáreas)	95
Gráfica 4.4- Hectáreas de áreas urbanas en la RTMG para el periodo 1990-2030	117
Gráfica 4.5- Hectáreas de bosques en la RTMG para el periodo 1990-2030	118
Gráfica 4.6- Hectáreas de cuerpos de agua de la RTMG para el periodo 1990 - 2030	119
Gráfica 4.7- Hectáreas de otras vegetaciones de la RTMG para el periodo 1990-2030	120
Gráfica 4.8- Hectáreas de suelos agropecuarios de la RTMG para el periodo 1990-2030	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Componentes de los Sistemas Socioecológicos (SSE)	9
Figura 1.2- Elementos que integran un geosistema	12
Figura 1.3- Funcionamiento de un Perceptrón Multicapa	25
Figura 2.1- Emigración Guatemalteca según región de destino	56

RESUMEN

La frontera que comparten México y Guatemala, que para fines de esta investigación recibe el nombre de Región Transfronteriza México-Guatemala (RTMG), está integrada por los estados de Chiapas, Campeche, y Tabasco en México y por el país guatemalteco.

El análisis de las series de uso de suelo y vegetación, muestra que a través de los años se han presentado cambios en los usos de suelo de esta región, donde las características físico-geográficas, sociales y económicas que definen el sistema socioecológico conformado por la RTMG, mantienen una relación directa con los impulsores de cambio de uso de suelo y los condicionantes ambientales (por ejemplo la altitud, los cuerpos de agua, los incendios, las localidades, las carreteras, las actividades económicas y la migración), que hacen prioritario su análisis.

El presente estudio analiza los cambios de uso de suelo que ocurrieron entre los años 1990, 2000 y 2010, mismos que se usan como base para la construcción de un modelo prospectivo tendencial para el año 2030. Los resultados obtenidos de este modelo muestran en la RTMG el crecimiento de los suelos agropecuarios y de las áreas urbanas a costa de la pérdida de bosques, de otras vegetaciones y de cuerpos de agua.

La información anterior evidencia el impacto pronosticado del cambio de uso de suelo en la RTMG, la necesidad de analizar las implicaciones socioambientales que ello podría traer consigo, así como la importancia de construir instrumentos de focalización de medios de intervención territorial.

Palabras clave: RTMG, sistema socioecológico, cambio de uso de suelo, impulsores de cambio, modelación prospectiva.

INTRODUCCIÓN

La frontera entre México y Guatemala se caracteriza por ser poco estudiada y por poseer una compleja dinámica en sus dimensiones económica, política, social, cultural y ambiental, y es precisamente al considerar esta última, donde por medio de mapas e imágenes satelitales se observa que a través de los años la cantidad de vegetación se ha ido reduciendo cada vez más. Ante esto, surge la necesidad de comprender los cambios en los usos de suelo que han ocurrido en esta frontera, plantear aquellos cambios que se esperan a futuro y analizar los impactos socioambientales que dicha dinámica podría traer consigo (FORDECYT, 2017-2018).

Existe una influencia geopolítica entre México, Centro y Sur América debido principalmente a la cercanía geográfica, la historia, la cultura y al lenguaje que comparten los países de esta región (FORDECYT, 2017). Particularmente, la Región Transfronteriza México-Guatemala (RTMG) conformada por los estados de Chiapas, Campeche, Tabasco y el país de Guatemala, es un área importante debido a que es una de las dos fronteras que posee México, y en ella se dan una gran cantidad de interacciones dinámicas; inclusive, se considera que es esta zona en donde ocurren la mayor cantidad de cambios socioeconómicos del país, cambios que surgen principalmente por la demanda de trabajo que aumenta en el sur de México y por la oferta laboral que procede en su mayoría de Guatemala y que se manifiesta a través de la migración (FORDECYT, 2017).

Estos cambios tienen impacto de carácter social, cultural, económico, y ambiental, y van modelando el perfil de la región a través de una rápida evolución, lo que crea relaciones entre México y Centroamérica, así como entre el resto de los países del sur del continente (FORDECYT, 2017).

Las relaciones anteriormente establecidas junto con lo decretado por el “Plan de Desarrollo Integral: El Salvador, Guatemala, Honduras y México 2019”, que a partir de las recomendaciones de la CEPAL, tiene como objetivos: fiscalidad e inversión; integración comercial, energética y logística; el bienestar social: educación, salud y trabajo; gestión integral del ciclo migratorio con seguridad humana (derechos, medios de vida y seguridad centrada en las personas); y sustentabilidad ambiental y

riesgos; elementos que buscan lograr el desarrollo económico y social de la región (CEPAL, 2019); definen la importancia de la presente investigación, ya que esta realiza un análisis del cambio de uso de suelo por medio de la modelación prospectiva en la región de la frontera entre México y Guatemala, considerando varios condicionantes de cambio; y con ello a su vez contribuye a ser parte del primer proyecto de carácter integral, multidimensional y multidisciplinario de esta región, llamado “Región transfronteriza México-Guatemala: dimensión regional y bases para su desarrollo integral”, y que está siendo actualmente realizado por CONACYT en conjunto con otras instituciones.

Es de esta forma que el cambio de uso de suelo se convierte en un elemento clave a considerar dada su importancia como un factor de la dinámica transfronteriza entre México y Guatemala.

Por todo lo anterior, este trabajo se sitúa con una visión sistémica y una perspectiva geográfica en la RTMG que, por un lado, incluye un periodo de 20 años (1990 - 2010) dentro del que se busca realizar un análisis de los cambios en el uso del suelo y vegetación observados; y, por otro lado, construye un escenario tendencial de cambios de uso de suelo hacia el año 2030 utilizando una red neuronal de perceptrón multicapa.

Con este escenario tendencial, se pretende explicar cuáles podrían ser los cambios de uso de suelo y vegetación futuros, con la intención de aportar información de utilidad para la toma de decisiones y políticas de carácter público, que beneficien la relación indisoluble que existe entre la sociedad y la naturaleza.

El objetivo general de esta tesis es analizar el cambio de uso de suelo y vegetación entre 1990 y 2010 para generar un escenario tendencial sobre su comportamiento en la Región Transfronteriza México-Guatemala (RTMG) al año 2030.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Conocer y caracterizar el contexto ambiental, económico y sociocultural.
- Identificar los cambios de uso de suelo dominantes del periodo 1990-2010.

- Analizar los probables impulsores asociados al cambio de uso de suelo y su utilidad en la modelación prospectiva.
- Generar un escenario tendencial de cambio de uso de suelo y vegetación para el año 2030.
- Aportar información espacial sobre las probables dinámicas del uso del suelo en la RTMG.

La hipótesis de esta investigación establece que el área que abarcan los bosques y selvas en la RTMG ha ido disminuyendo considerablemente a través de los años debido al aumento de los flujos migratorios propios de la región que traen consigo un crecimiento de las áreas urbanas y de los suelos agropecuarios, y se espera que esa tendencia se mantenga hacia el año 2030.

En relación con la estructura capitular, el primer capítulo aborda acerca de marco teórico propio de esta investigación, es decir, el enfoque de los sistemas socioecológicos a partir de considerar la teoría de los sistemas y de los sistemas complejos, así mismo, establece la relación entre los sistemas socioecológicos y la Geografía aterrizando en el estudio del paisaje, dentro del cual surge el cambio de uso de suelo como una expresión de la dinámica que este experimenta y que puede ser analizada a través de la modelación prospectiva, con el método particular de la red neuronal perceptrón multicapa.

El segundo capítulo hace revisión de las características del área de estudio y que a la vez funcionan como variables de cambio para el modelo prospectivo. Se parte de la localización del área de estudio para pasar después a la descripción de las características físico-geográficas como lo son la altitud, y los cuerpos de agua, donde se consideran las cuencas, los ríos, los lagos y las presas. Después se presentan las características socioeconómicas: división territorial, localidades, población, IDH y pobreza, actividades económicas, incendios y migración. En los anexos de esta tesis se presentan otras características que definen la RTMG pero que se considera que no influyen directamente en los cambios de uso de suelo.

En el capítulo tres se encuentra la metodología que se desarrolló para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación.

El cuarto capítulo muestra los resultados del modelo por medio de mapas, gráficas, tablas y figuras, con sus respectivas descripciones y análisis, así mismo en este capítulo se realiza la discusión de estos resultados.

Finalmente, se presentan las conclusiones de la tesis, donde se incluyen elementos puntuales sobre los resultados obtenidos, así como las limitaciones y las perspectivas identificadas para la mejora en los estudios de modelación prospectiva del recurso suelo.

CAPÍTULO 1: Marco teórico: Dinámica de los sistemas socioecológicos y modelación prospectiva

El presente capítulo está dividido en siete subcapítulos. En el primero se explican las características generales de los sistemas socioecológicos. El siguiente subcapítulo muestra la relación existente entre los sistemas socioecológicos y la Geografía, y el estudio que hace esta disciplina desde su perspectiva. El tercer subcapítulo se enfoca en los paisajes, en la dinámica que estos experimentan y en las unidades espaciales en las que se dividen, haciendo un énfasis particular en los geosistemas. El subcapítulo cuatro aborda las características generales e importancia del recurso suelo, los procesos del cambio de uso de suelo y cómo estos pueden ser estudiados desde la Geografía y la Ecología del Paisaje. El quinto subcapítulo analiza el proceso de cambio de uso de suelo y su estudio a través de la modelación prospectiva. El subcapítulo seis aborda las características de un modelo prospectivo particularmente, por medio de la red neuronal perceptrón multicapa; finalmente, el séptimo subcapítulo trata sobre los escenarios prospectivos, su importancia, utilidad, las reacciones que pueden tomarse a partir de sus resultados, y las estrategias que podrían seguirse para la resolución de problemas concretos.

1.1 Características de los sistemas socioecológicos.

Un sistema es un conjunto de elementos llamados subsistemas que pueden ser considerados como unidades o compartimentos, y que mantienen constantes interacciones entre sí (Almenar & Diago, 2002). Cualquier sistema por naturaleza, tiene un alto grado de complicación dados los subsistemas que lo componen y las relaciones, estructuras, organizaciones, correlaciones y patrones que se establecen entre éstos (Navarrete, 2016).

Para el estudio de los sistemas, entre 1950 y 1968 fue creada la Teoría General de Sistemas (TGS) por el biólogo austriaco Ludwing Van Bertalanffy, la cual surgió con la finalidad de encontrar aspectos de los sistemas que pudieran generalizarse, y que por tanto, permitieran aplicarse a todos los sistemas independientemente de su tipo y escala (Buzai et al., 2015).

La TGS tiene su principal enfoque en los sistemas abiertos, por tanto, esta teoría considera a los sistemas como una totalidad, como un organismo que no se encuentra aislado donde el todo representa más que la suma de sus partes; el conjunto de elementos que lo integran se relacionan continuamente por la interacción de los flujos de materia, energía e información entre sí y con el entorno, intercambio que determina su equilibrio y continuidad de existencia (Arnold & Osorio, 1998).

Los sistemas pueden poseer una característica conocida como complejidad sistémica, a partir de la cual se convierten en sistemas complejos.

De acuerdo con Buzai et al., 2015, la complejidad de un sistema queda definida por tres elementos principales:

- A) Complejidad cuantitativa: la cantidad de elementos que integran un sistema.
- B) Conectividad: interacciones entre los distintos elementos.
- C) Variedad o variabilidad: número de estados posibles que se producen dentro de un sistema.

La complejidad busca incorporar problemas que a veces llegan a ser ignorados por la ciencia, por lo que incluye en sus estudios elementos como la incertidumbre, la emergencia y la auto-organización. Así mismo, dentro de los sistemas complejos existen las propiedades emergentes, que se refieren a cuando todos los componentes de un sistema interactúan en conjunto, haciendo que surjan características nuevas que no se pueden atribuir a un solo elemento, sino al resultado de la interacción de todos ellos (Castillo & Velázquez, 2015).

La característica de complejidad dio paso al surgimiento de la Teoría General de los Sistemas Complejos (TGSC), que toma como base a la TGS pero amplía su objetivo, al ya no solo tratar de encontrar aspectos generalizables para todos los sistemas, sino también al incorporar aspectos específicos para cada uno de los niveles que existen dentro de un sistema (Buzai et al., 2015).

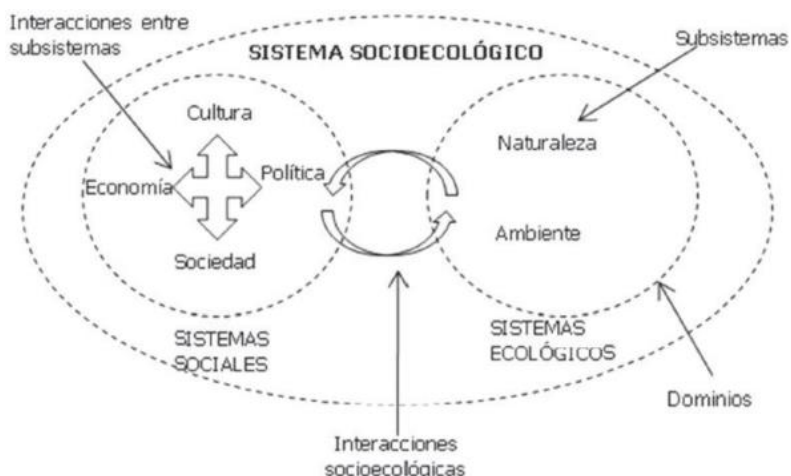
La finalidad de realizar un estudio a partir de la perspectiva de los sistemas complejos, es interpretar de forma sistémica el problema que existe, lo que dará

paso a acciones y políticas que sean capaces de mejorar el sistema y sus formas de evolucionar, para lo cual es fundamental la construcción de un diagnóstico integrado (García, 2011).

Existen distintas clases de sistemas complejos, tales como los dinámicos, los no lineales y los adaptativos. Los sistemas complejos adaptativos fueron definidos por Holling en 1998 como: "una trama de múltiples agentes (células, especies, individuos, naciones, instituciones, etcétera) que interactúan (interacciones fijas y variables) y reaccionan a lo que hacen cada uno de los agentes. En ellos la complejidad emerge de un pequeño grupo de procesos críticos que crean y mantienen las oportunidades de auto-organización del sistema". En los sistemas complejos adaptativos los elementos interactúan con el entorno, aprenden, toman experiencia de él, y finalmente se adaptan y auto-organizan (Castillo & Velázquez, 2015).

Un tipo de sistemas complejos adaptativos, son los sistemas socioecológicos (SSE), también llamados Sistemas Naturales Humanos Acoplados (SNHA). El concepto de los SSE fue utilizado por primera vez por Berkes y Folke en 1998 y se refiere a "el ser humano en la naturaleza". Los SSE son aquellos sistemas donde se crea un vínculo entre la naturaleza y el hombre, e interactúan los distintos componentes provenientes de ese vínculo (Nemec et al., 2013). Están compuestos por un subsistema social -ideas y comportamientos de carácter político, social, económico, tecnológico, y por valores, cultura, conocimiento, etcétera-, y por un subsistema ecológico -características físicas, químicas y biológicas de los ecosistemas- (Figura 1.1), (Liu et al., 2007).

Figura 1.1- Componentes de los Sistemas Socioecológicos (SSE). Fuente: Salas-Zapata et al., 2011.



En la Figura 1.1 se observan las interacciones existentes entre la sociedad y la ecología, y todos los elementos que componen a cada uno de estos subsistemas. Si bien es cierto que las interacciones sociedad-naturaleza siempre han existido, también es cierto que éstas se han ido intensificando desde la Revolución Industrial. En los últimos 50 años, el hombre ha impactado la naturaleza más que en cualquier otro periodo de la vida, porque la población crece y al mismo tiempo, utiliza cada vez más productos sintéticos para sus necesidades diarias (Liu et al., 2007).

De esta manera, la conectividad tanto regional como continental de las actividades humanas aumenta, permitiendo que todo se encuentre estrechamente relacionado en una escala global, aumentando la complejidad organizacional, espacial y temporal entre los SSE, por lo que, para estudiarlos deben ser consideradas todas sus interacciones, y ningún elemento debe ser tomado como independiente (Liu et al., 2007).

Lo anterior, es una pauta que permite entender la importancia de la estructura y las relaciones entre los subsistemas que componen los sistemas, así mismo, de considerar la respuesta a los cambios, la cual puede ser gradual o repentina, lo que genera incertidumbre y hace a los sistemas impredecibles (Folke et al., 2002). Conocer estos elementos permitirá mejorar las capacidades de adaptación de los SSE a los constantes cambios que ocurren por la conexión de redes que actúan de forma

horizontal y vertical tanto en la escala local, como en la regional y en la global (Castillo & Velázquez, 2015).

1.2 Los sistemas socioecológicos y su relación con Geografía.

Ahora bien, un SSE puede ser abordado desde la Geografía. La Geografía estudia la relación sociedad-naturaleza, de modo que analiza los subsistemas sociales y ecológicos, por tanto, la Geografía se dedica al estudio de los SSE, a partir de considerar el espacio y el tiempo, donde el paisaje y los procesos socioeconómicos pasan a ser estudiados como una unidad, con una estructura y organización espacial definidos (González & Ramírez, 1994).

La organización espacial es un elemento complejo por lo que, para el geógrafo, estudiarla desde la perspectiva de la TGS y de la TGSC es muy útil. La teoría de sistemas influye en las investigaciones geográficas, en sus límites de estudio y en la visión crítica. Es así que el enfoque sistémico le da a la Geografía una postura "materialista sistémica", que tiene la capacidad de vincular en todas las escalas tanto los componentes naturales como humanos (Revista Geográfica Digital, 2014).

De esta manera, un enfoque sistémico y el uso de metodologías cuantitativas para el análisis espacial, terminan por unificar la visión espacial, permite que se tomen en cuenta elementos que algunas veces no son fácilmente notables, se comprenden los procesos de carácter histórico, social y político (Weichselgartner & Kelman, 2015), y a través de realizar este análisis en distintas escalas y de forma espacio-temporal, se aumenta la resiliencia del sistema -definida como la capacidad de los sistemas de sufrir perturbaciones y aun así lograr mantener su estructura y funcionamiento-, y lograr la sostenibilidad del medio ambiente (Castillo & Velázquez, 2015), lo que dará pie a tomar decisiones para aplicarlas en el desarrollo del territorio, teniendo como objetivos su planificación y gestión (Weichselgartner & Kelman, 2015).

Aumentar la resiliencia de un SSE permite aumentar su sostenibilidad, mejorando el desarrollo y continuidad de los elementos que lo componen (Weichselgartner & Kelman, 2015). El objetivo de la sostenibilidad es que las actividades de una sociedad puedan ser llevadas a cabo en el medio ambiente, pero sin rebasar las posibilidades

de este de seguir cumpliendo sus funciones, como lo son generar recursos, prestar servicios ambientales y absorber residuos (Toro, 2007).

La elaboración de modelos, indicadores y esquemas con el enfoque espacial de la Geografía, resulta ser importante para sintetizar y jerarquizar información, y así darle al desarrollo sostenible una visión global y sistémica (Toro, 2007).

1.3 Dinámica del paisaje: los geosistemas.

Para el análisis de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza, la Geografía requiere estudiar el paisaje de forma integrada dentro de una escala espacial (González & Ramírez, 1994). Un paisaje se define como una superficie heterogénea que está conformada por un grupo de ecosistemas que se repiten de formas similares; es resultado de una combinación de factores y de una dinámica que se encuentra en continua evolución (Bertrand & Bertrand, 2006). Sus componentes son elementos de carácter biológico, físico y antrópico que interactúan en conjunto y de forma dinámica, por ejemplo: usos del suelo, ecosistemas, biotopos, geocomplejos, etcétera (Bertrand & Bertrand, 2006).

Los elementos que conforman el paisaje participan en una dinámica en común, de forma que el sistema evolutivo general del paisaje está integrado por agentes naturales (clima, seres vivos, agua, minerales, etcétera) que inducen procesos naturales (reptación, pedogénesis, ecofisiología, etcétera); y agentes antrópicos (agricultura, deforestación, uso de recursos naturales, entre muchos otros) (Bertrand & Bertrand, 2006).

En el estudio de los paisajes, la Geografía utiliza unidades bien definidas en el espacio, y clasifica a los paisajes en unidades elementales de acuerdo a su jerarquía y homogeneidad, permitiendo con esto entender el conjunto que los constituye (Bertrand & Bertrand, 2006). De esta manera, los paisajes son clasificados en:

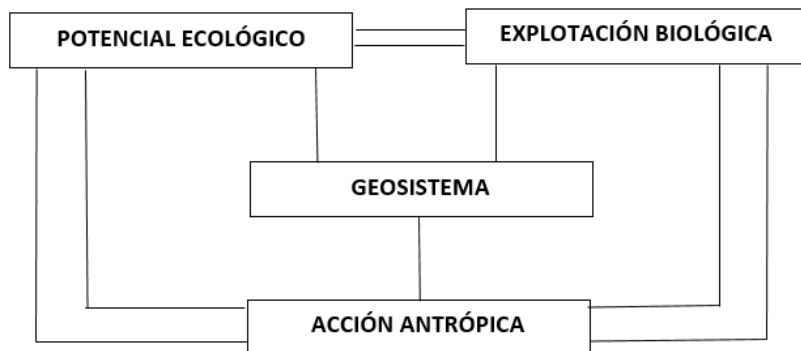
- ✓ Unidades superiores: constituidas por Zona, Dominio y Región natural. Estas representan las zonas de mayor extensión dentro de un paisaje.

- ✓ Unidades inferiores: conformadas por Geosistema, Geofacies y Geotopo. Son zonas de menor extensión, y como ocurren a escala del hombre, son en las que la Geografía se enfoca (Bertrand & Bertrand, 2006).

Dentro de estas unidades, la unidad más funcional para los estudios de ordenación del espacio es el geosistema (Bertrand & Bertrand, 2006). Un geosistema constituido en su mayor parte por varios paisajes y de acuerdo con Kobrinski y Mijaieva (1971), se define como un tipo de medio ambiente, es decir, una unidad espacio-temporal y de jerarquía dentro de un paisaje que representa la escala de la vida del hombre y que se desarrolla a través del proceso impacto-cambio-consecuencia (González & Ramírez, 1994).

Para su desarrollo, los geosistemas dependen de los elementos que lo integran (Figura 1.2), de las distintas funciones de su territorio, y de la extensión espacial que representa esa función del territorio según las condiciones naturales que lo permiten (González & Ramírez, 1994)

Figura 1.2 Elementos que integran un geosistema. Fuente: González & Ramírez, 1994.



Como se puede observar en la Figura 1.2, el geosistema está integrado por el potencial ecológico -geomorfología, clima e hidrología-, por la explotación biológica -vegetación, suelo y fauna-, y por la acción antrópica, y todos estos elementos mantienen continuas interacciones entre sí. Un geosistema está en clímax cuando existen recursos ecológicos y no se llega a una explotación biológica, es decir, hay un equilibrio, por lo que se mantiene la estabilidad.

Los geosistemas se clasifican en:

- ✓ Geosistema en biostasia. En ellos existe estabilidad ecológica, la actividad morfogénica es baja, dominan agentes y procesos bioquímicos, y aunque existe la actividad del hombre, esta no pone en riesgo el paisaje. Es decir, el geosistema está en equilibrio (Bertrand & Bertrand, 2006).
- ✓ Geosistema en rexistasia. La morfogénesis es dominante, por lo que hay una movilidad importante del potencial ecológico dado por los procesos de erosión, transporte y acumulación. La rexistasia por intensidad puede ser verdadera -con modificaciones en el relieve- o limitada -con modificaciones a nivel biológico- (Bertrand & Bertrand, 2006).

Dentro de un geosistema en rexistasia, la morfogénesis que rige el modelado del relieve y la evolución de este, puede ser de tipo natural o antrópica. La morfogénesis antrópica, es aquella donde las actividades económicas y de desarrollo del hombre, así como prácticas inadecuadas, tales como aplicación excesiva de riego, la quema de residuos de cosecha, el exceso de labranza y la falta de prácticas de conservación, modifican las condiciones naturales del relieve, de la vegetación y del recurso suelo (SEMARNAT, 2010).

1.4 Cambio de uso de suelo.

El suelo, a partir de una visión sistémica y tomando en cuenta las cuestiones ambientales y un enfoque sostenible, fue definido en 2002 por Jaramillo y otros autores como: “Aquella delgada capa, de pocos centímetros hasta algunos metros de espesor, de material terroso, no consolidado, que se forma en la inter-fase atmósfera-biósfera-litósfera. En ella interactúan elementos de la atmósfera e hidrósfera (aire, agua, temperatura, viento, etc.), de la litósfera (rocas, sedimentos) y de la biósfera y se realizan intercambios de materiales y energía entre lo inerte y lo vivo, produciéndose una enorme complejidad” (Jaramillo, 2002).

La importancia del suelo radica en sus funciones: es el sostén físico de los seres vivos (el hábitat de los organismos donde estos se desarrollan), y también representa el

área de soporte y construcción; es un regulador del ciclo hidrológico al purificar y proveer agua; se encarga de reciclar nutrientes y residuos orgánicos, por lo que interviene en los ciclos biogeoquímicos, transformando, filtrando, amortiguando, y así regulando a los ecosistemas (Alvarado, 2017).

De acuerdo a Jaramillo, 2002, los factores que intervienen en la formación del suelo son los siguientes:

- ✓ La roca madre o material parental, de donde proceden los materiales sólidos y los minerales constituyentes.
- ✓ El clima, que regula la temperatura, la humedad y la dinámica de los microorganismos y nutrientes.
- ✓ El relieve, que interviene en los procesos de transporte, en la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y en el microclima edáfico.
- ✓ La materia orgánica, cuya actividad biológica define los procesos en el suelo.
- ✓ El tiempo, porque los procesos del suelo ocurren a distintas velocidades (Jaramillo, 2002).

Ahora bien, la cobertura de suelo y vegetación se refiere a las características biofísicas existentes en la superficie de la tierra, tales como los distintos tipos de uso de suelo, la distribución de la vegetación, del agua, entre otros elementos (National Research Council, 2014).

El uso de suelo por su parte, hace referencia a la forma en la que el suelo es utilizado tanto por los humanos como por el hábitat que sobre él se asienta, lo cual depende en gran parte de la función que se le da al suelo y de las actividades económicas que ahí se desarrollan, por ejemplo, la urbanización de una zona está dada por la cantidad de agricultura que en ella se realiza, la zona forestal que ha sido transformada a zona urbana, las actividades de minería, la explotación de petróleo, etcétera (National Research Council, 2014).

Los usos de suelo son espacialmente distintos, pueden seguir ciertos patrones espacio-temporales y afectan la cobertura de vegetación en distinta manera, no es lo mismo la afectación hacia los bosques, que la que ocurre hacia los matorrales, los

pastizales, las selvas y el resto de tipos de vegetación (SEMARNAT, 2010). Dentro de lo anterior, es de destacar la importancia de los ecosistemas forestales, dado que albergan una enorme diversidad de especies, y prestan servicios ecosistémicos fundamentales como captura de carbono, generación de oxígeno, regulación del ciclo hidrológico, influencia en el clima y, en el caso de los suelos, contribuyen a su estabilización (Academia Mexicana de las Ciencias, 2010).

Los cambios en los usos del suelo, se refieren a la conversión de los diferentes tipos de suelo como resultado de las interacciones entre los seres humanos y las características físicas del ambiente (Liping et al., 2018). Estas interacciones crean una dinámica en los cambios de uso de suelo dada la heterogeneidad social y biofísica, y sus relaciones en el espacio, tales como la forma en la que la sociedad se adapta a la naturaleza ya sea por medio de los asentamientos humanos, la construcción, la agricultura, la obtención de energía, etcétera (National Research Council, 2014).

Si a lo anterior se le agregan las retroalimentaciones entre los distintos componentes es como se constituye un sistema complejo, donde las interacciones no son lineales, es decir, los procesos no son comunes o no siguen siempre los mismos patrones. Dicha complejidad tiene efectos como las variaciones en el espacio geográfico, en los grupos sociales, y en los distintos tipos de ecosistemas, por lo que se afectan elementos como la vegetación, las especies, los tipos de rocas, y desde luego, el suelo. (National Research Council, 2014).

La principal amenaza de los suelos que puede impedir la regulación de los ecosistemas es la degradación; la cual hace que el suelo disminuya su capacidad para proveer bienes y servicios (Piscitelli, 2015). Existen distintos tipos de degradación:

- ✓ Erosión. Es el desgaste producido en el suelo, y puede ser natural -debido a la acción del agua o del viento-, o antrópica -dada por actividades como agricultura, ganadería, minería, etcétera-.
- ✓ Degradación física. Donde se producen cambios que afectan las condiciones físicas del suelo, tales como el desarrollo de raíces y el movimiento del agua,

del aire y de los nutrientes, generando como consecuencias que el suelo pierda su estructura y se compacte.

- ✓ Degradación química. Esta se encuentra relacionada con la pérdida de la materia orgánica y de nutrientes; el suelo se saliniza, se acidifica, se solidifica y se contamina.
- ✓ Degradación biológica. Aquí se pone en riesgo el desarrollo de los organismos vivos como elemento formador del suelo, y se alteran los ciclos biogeoquímicos.
- ✓ Desertificación. En este tipo de degradación, la capacidad productiva del suelo es rebasada por actividades humanas tales como la deforestación, la pérdida de cobertura vegetal y cambios climáticos que pueden ocurrir de manera natural o antrópica (Piscitelli, 2015).

Las definiciones anteriores permiten entender que, en la degradación del suelo, y por tanto, en el cambio de uso de suelo, el hombre toma un papel importante. El aumento de la población y con ello el consecuente aumento en la demanda del consumo de alimentos, la generación de combustible, el aumento en las actividades económicas, el aumento en el uso de la tecnología y la tecnificación, el crecimiento de los patrones de consumo, el crecimiento urbano y su desarrollo infraestructural, la corrupción política y hasta las creencias de carácter cultural, dan como resultado cambios en los usos del suelo, y detonan en la alteración de los ciclos biogeoquímicos, pérdida de biodiversidad y pérdida de servicios ambientales, contribuyendo con ello al cambio climático que hoy en día es una amenaza global (SEMARNAT, 2010 & Academia Mexicana de las Ciencias, 2010).

Es a través de estos procesos de cambio de uso de suelo que los ecosistemas y los paisajes son alterados, lo que establece que el cambio de uso de suelo es una forma en la que el paisaje expresa que su dinámica está cambiando, y puede generar

consecuencias desastrosas no solo a nivel geosistema, sino en todas las unidades que conforman un paisaje (SEMARNAT, 2010).

Dentro del estudio de los suelos, la Geografía aparece como la ciencia que permite entender las actividades que el ser humano realiza sobre el ambiente, y cómo estas tienen la capacidad de desequilibrar y acelerar procesos que degradan los ecosistemas, dadas las actividades sociales, culturales y económicas que se llevan a cabo (SEMARNAT, 2010).

Para la conservación de los paisajes, es fundamental analizar los procesos de cambio de uso de suelo a partir de criterios de carácter espacial que permitan un buen manejo de los recursos, de modo que los cambios en las configuraciones espaciales de los ecosistemas, no pongan en peligro el acceso a los recursos naturales y el consecuente daño a la biodiversidad. Estas causas y consecuencias de los cambios de uso de suelo deben ser analizados a partir de considerar distintas escalas geográficas y de utilizar técnicas de percepción remota y trabajo de campo (Academia Mexicana de las Ciencias, 2010).

El entendimiento de la distribución espacial pasada y a futuro de los suelos y de la vulnerabilidad que estos puedan presentar ante las actividades antropogénicas, es un elemento clave para las políticas de conservación y el cambio en el modo de vida social, económico, político y cultural que los seres humanos deben llevar a cabo para evitar su pérdida y sus cambios (Academia Mexicana de las Ciencias, 2010). Para cumplir con ese objetivo, la Geografía necesita de otras ciencias que la complementen, una de ellas es la Ecología del Paisaje (Troll, 2010).

La Ecología del Paisaje es definida como la ciencia que se dedica al estudio de la espacialidad y temporalidad de fenómenos sociales y ecológicos que ocurren en los mosaicos terrestres y acuáticos, y toma en cuenta todas las interacciones biológicas, geofísicas, humanas, antropológicas y de arquitectura del paisaje que se puedan presentar (Rathe, 2017).

La Ecología del Paisaje analiza el cambio de uso de suelo sobre la estructura espacial del paisaje para identificar patrones espaciales de acuerdo a la composición y

estructura de los elementos, y permitir con ello el entendimiento de su arreglo y complejidad (Academia Mexicana de las Ciencias, 2010).

La Ecología del Paisaje resulta de la mezcla de un análisis espacial cualitativo de los fenómenos sociales y naturales realizado por parte de los Geógrafos, con un análisis funcional cuantitativo, realizado por la Biología, la Geomorfología, la Hidrología, la Edafología y la Agronomía (Etter, 1991); es por lo anterior que la Geografía y la Ecología del Paisaje establecen una relación estrecha en el estudio del paisaje, ya que ambas toman en cuenta las escalas tanto de carácter espacial como temporal para el análisis de los procesos dinámicos socioambientales, y utilizan como base de sus estudios a la Teoría General de los Sistemas Complejos (Rathe, 2017).

El objeto de la Geografía entra en concordancia con la Ecología del Paisaje, porque cada vez es mayor el crecimiento en la intensificación del uso de los paisajes con fines económicos, lo que lleva a que la diversidad ecológica y biótica se vayan perdiendo, ocasionando que estos ya no puedan servir como mecanismos de autorregulación de los geosistemas (González & Ramírez, 1994). Ante ello, la Geografía considera a la Ecología del Paisaje con sus límites y posibilidades para el uso racional de los recursos en las actividades socioeconómicas, permitiendo encontrar una estructura espacial que de paso al desarrollo socioambiental, sin generar sobrecarga o estrés ecológico, resultando en la optimización del paisaje (González & Ramírez, 1994).

En el ordenamiento de un territorio, la Geografía y la Ecología del Paisaje, parten de estudiar la dinámica que ocurre en ese territorio, para que pueda funcionar de forma integral y siga prestando servicios ecosistémicos (SEMARNAT, 2010). Resulta fundamental tener una visión holística que permita entender y optimizar el desarrollo de los SSE (Rathe, 2017), donde ambas ciencias logren así identificar y analizar los cambios de uso de suelo, tanto en su carácter ecológico como geográfico, y que ello permita entender cómo, dónde y cuánto de los paisajes, y en particular del recurso suelo, está cambiando (SEMARNAT, 2010).

1.5 Cambio de uso de suelo y modelación prospectiva.

Los cambios en el uso del suelo resultan ser muy importantes por su papel protagónico en el cambio climático impulsado por el desarrollo económico. Considerando que esos procesos han ido en aumento y que tienen consecuencias directas en los procesos funcionales de los ecosistemas, tales como los ciclos biogeoquímicos y la biodiversidad, es decir, en el bienestar y permanencia de los SSE (Liping et al., 2018), es por lo que se tiene la incipiente necesidad de estudiarlos, y una de las herramientas para ello son los modelos prospectivos, los cuales, ayudan a explicar los procesos de cambios del uso de suelo actuales y futuros, para influir en la toma de decisiones y en la creación de políticas públicas a distintas escalas (National Research Council, 2014).

El análisis espacial en las últimas décadas se ha definido en dos áreas principales de investigación: el análisis de datos y el modelado espacial (Núñez, 2018). La primera área se encarga de desarrollar procedimientos para identificar las características que poseen los datos disponibles; la segunda se encarga de dar sentido a los patrones y establecer relaciones entre variables para comprender los fenómenos espaciales (Murayama Y., & Thapa R., 2011). Dentro de esta última área es que entran la retrospectiva y la prospectiva, donde se considera que la combinación de ambas, permitirá comprender mejor los datos existentes y así contribuir en el diseño de intervenciones de mejora (IOM, 2015).

La retrospectiva es útil principalmente en las cuestiones relacionadas con política, ya que partir de observaciones pasadas (analizadas de forma retrospectiva), se pueden comprender las razones que yacen bajo el éxito o suceso de alguna determinada política de intervención que está siendo ejecutada en el presente, es decir, cómo y por qué los elementos considerados de intervención funcionan o no (OIM, 2015).

Por su parte, la prospectiva es un saber interdisciplinario que busca analizar el futuro a partir de mezclar los datos reales de la ciencia, con la voluntad de las personas sobre lo que debería ser y lo que no en un futuro (Amozurrutia, 2014). Las preguntas en las que se enfoca la prospectiva son qué y para qué conocer el futuro, y se anticipa

a este a partir de analizar las tendencias pasadas para construir visiones e instrumentos que permitan prevenir la catástrofe frente a algún problema y transformar las acciones de los humanos con una visión a largo plazo, es decir, en la búsqueda de una planeación estratégica (Núñez, 2018).

La prospectiva se orienta a la toma de decisiones con un impulso hacia un futuro que puede ser anticipado, es por ello que hace explícitos los escenarios, de los cuales identifica peligros; de esta forma, funge como una planeación de un futuro, el cual se planifica, proyecta, y se tiene la capacidad de utilizar recursos de forma eficiente (Amozurrutia, 2014).

Así, los modelos prospectivos, tal como lo hacen el análisis de cobertura terrestre y el modelado biofísico, constituyen una herramienta del análisis espacial para entender la configuración territorial y las interacciones entre los ecosistemas, lo que servirá para el uso y la conservación sostenible de los recursos (National Research Council, 2014).

La importancia de estos modelos radica en que permiten realizar pruebas de hipótesis cuando lo que se busca es tener un mejor entendimiento de un sistema y apoyar la toma de decisiones al permitir explorar escenarios alternativos (Degenne P. & Lo Seen D., 2016), con el objetivo de generar una planeación científica efectiva sobre el uso del suelo, manejo y restauración ecológica, así como para el estudio y desarrollo socio-económico regional (Liping et al., 2018).

Intentar predecir los cambios a futuro por medio de la construcción de modelos prospectivos, resulta en una complejidad determinada por el alto grado de estocasticidad e incertidumbre que estos modelos traen consigo (National Research Council, 2014).

Cualquier tipo de modelo siempre va a poseer en su estructura un grado de incertidumbre determinado dada la gran variedad de fuentes que se utilizan, además de las condiciones de contorno y las dinámicas exógenas, tales como: la estructura del modelo, los procesos, las interacciones y las representaciones de este; por la falta de datos sobre algún tema; porque se trata de procesos que son poco comprendidos;

y porque muchas veces estos procesos son no estacionarios o dinámicos (National Research Council, 2014). La incertidumbre es algo que no se puede eliminar del todo, tanto para la cuestión de la toma de decisiones como para el entendimiento del estado físico a futuro del suelo.

Además, en la utilización de modelos se deben considerar otros retos existentes, tales como las fuentes de donde provienen los datos, el entendimiento de los parámetros por parte de los usuarios, los mecanismos que ocurren durante los procesos de modelación, las estructuras y otros detalles internos, la elección de qué modelo utilizar cuando no se tiene seguridad sobre el tema, el objetivo e inclusive la escala espacial y temporal que será seleccionada, y la búsqueda de una investigación interdisciplinaria que permita ir venciendo cada uno de los retos que se presentan (National Research Council, 2014).

La utilidad de los modelos prospectivos y las dificultades que presentan han generado que su desarrollo vaya en aumento en los últimos años, donde han influido el crecimiento de la tecnología, de las estrategias de observación y de la infraestructura, en el que las herramientas de Percepción Remota (PR) y de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han tenido un papel fundamental. La PR y los SIG son métodos que permiten desarrollar la modelación y avanzar en el entendimiento y la representación de los procesos de cambio, así como la integración de otros tipos de modelos que incluyen variables biofísicas y socioeconómicas (National Research Council, 2014).

Ahora bien, existen varios tipos de modelos, los basados en sectores económicos, los económicos espacialmente desagregados (National Research Council, 2014), los basados en ecuaciones, en técnicas estadísticas, los modelos expertos, los evolutivos, los multi-agentes, los híbridos, entre otros más (Parker et al., 2003).

A pesar de la diversidad de tipos de modelos, prácticamente todos son agrupados en tres clasificaciones: Autómatas Celulares (CA), Modelos Basados en Agentes (ABM) y Sistemas Dinámicos (SD) (Degenne & Lo Seen, 2016), que serán definidas a continuación:

- ✓ *Autómatas Celulares (Cellular Automata: CA)*. Es un enfoque de modelos basado en individuos, donde el espacio geográfico se representa en celdas que pueden tomar un número finito de estados. El estado de una celda cambia según las reglas de transición que se determinan por el estado de las celdas vecinas. Ejemplos de software utilizados para estos modelos son: Deum y SLEUTH (Degenne P. & Lo Seen D., 2016).

- ✓ *Modelos basados en agentes (Agent Based Modelling: ABM)*. Es otro enfoque de modelos basado en individuos que se utiliza cuando el sistema a ser modelado trata de situaciones complejas que envuelven entidades heterogéneas, por ejemplo, los sistemas sociales. Los agentes se definen por su comportamiento, pueden ser reactivos o cognitivos, e interaccionan con otros agentes y con su ambiente. Ejemplos de software utilizados para estos modelos son CORMAS y GAMA (Degenne P. & Lo Seen D., 2016).

- ✓ *Sistemas dinámicos (Systems Dynamics: SD)*. Las acciones que se llevan a cabo en la vida diaria están basadas en modelos, los humanos crean modelos mentales como base de sus actividades, la ventaja de estos modelos es que pueden almacenar una gran cantidad de información, la desventaja, es que no poseen confiabilidad al analizar las dinámicas de cambio y las complejidades.

Los sistemas dinámicos son precisamente los que establecen comunicación entre los modelos mentales y los modelos prospectivos, ya que un modelo de sistemas dinámicos se construye a partir de suposiciones que nacen de los modelos mentales, donde interviene la simulación computacional para hacerlos explícitos y determinar sus inconsistencias, sus mejoras y, por tanto, su futuro (Forrester, 2009).

Los sistemas dinámicos en sí, representan los procesos reales del mundo a través de sistemas de variables, flujos y ciclos de interacción. Cuando un sistema se plasma en el espacio geográfico no todas las variables agregadas

son adecuadas, por lo que se presenta la opción de descomponer el espacio del sistema en celdas, las variables-flujos de los modelos ahora sí ya pueden ser incluidos en cada una de esas celdas y quedarán establecidos junto a celdas vecinas que estén disponibles para realizar el intercambio de flujos. Ejemplos de software utilizados para estos modelos son: STELLA, Vensim, MOLUSCE y Terrset (Degenne P. & Lo Seen D., 2016).

1.6 Abordaje de sistemas dinámicos: el perceptrón multicapa.

El estudio de los sistemas dinámicos es algo que cada vez va tomando más interés por la aplicabilidad que estos tienen para la resolución de problemas. Existen métodos formales para estudiar este tipo de sistemas, pero muchas veces la complejidad que poseen no permite entender la interacción de sus elementos y su comportamiento en general con base en las variables que lo integran, por lo que se considera que los avances en las técnicas utilizadas por el Aprendizaje Automático (*Machine Learning*), que tienen una alta capacidad de adaptación en diversos dominios, es fundamental para el estudio del modelado de los sistemas dinámicos (Cabrera, 2018).

El Aprendizaje Automático es un enfoque poderoso para el análisis de datos, la visualización y la modelización; tiene la característica de que sus algoritmos aprenden de datos empíricos y puede ser usado en casos donde los fenómenos del modelado están ocultos o son poco evidentes o descritos. El Aprendizaje Automático crea sistemas que aprenden automáticamente a partir de identificar patrones complejos dentro de millones de datos a través de un algoritmo, el cual es capaz de predecir los futuros comportamientos. Estos sistemas tienen mejoras con el tiempo que ocurren de manera automática, por lo que la intervención del hombre se vuelve innecesaria (Kanevski et al., 2009)

Dentro del Aprendizaje Automático existen muchos algoritmos, los cuales toman distintos métodos dependiendo de las estadísticas no paramétricas, de inteligencia artificial y de ciencia computacional. Uno de los algoritmos más utilizados para estudios de carácter ambiental son las Redes Neuronales Artificiales -RNAs- (Kanevski et al., 2009).

Una RNA replica el funcionamiento del cerebro de un mamífero en cuanto a su comportamiento del sistema de conexiones neuronales que ejecutan o inhiben un proceso, pero por medio de la inteligencia artificial. Las RNAs están compuestas por unidades de procesamiento, también llamadas neuronas o nodos, que se organizan en un conjunto de capas que están interconectadas de forma jerárquica. Un interruptor binario activa estas neuronas, y es precisamente a eso a lo que se le llama función de activación; cuando una neurona se activa, se transmite información a la cadena de procesos, y esta información puede provenir desde múltiples neuronas inclusive si se trata de capas anteriores (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013).

A través del uso de los SIG y del desarrollo de modelos de cambio de uso de suelo, en el caso de esta tesis, de modelos basados en redes neuronales artificiales, es como se pueden analizar los cambios de uso de suelo que han ocurrido en cierto tiempo y espacio. El resultado de estos modelos permite ver qué reglas son las que rigen la dinámica de los cambios de uso de suelo y los factores que están en intervención, por lo que se comprenden así los procesos pasados y al mismo tiempo, se simulan futuros escenarios (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013).

La ventaja principal del uso de las RNAs radica en su capacidad para buscar y reconocer patrones de forma espacialmente explícita, y después de iteraciones a lo largo del tiempo lograr modelar y comprender la dinámica espacio-temporal del cambio de uso de suelo, por tanto su objetivo es encontrar patrones de comportamiento, lo que permitirá resolver elementos del análisis de datos y modelarlos, y será de ayuda para las geociencias y las cuestiones ambientales (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013).

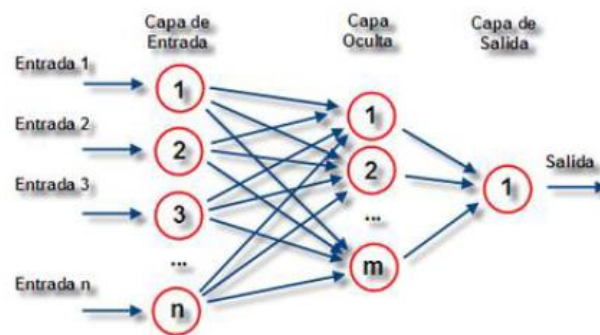
Existen muchos tipos de RNAs, entre ellas se encuentran: perceptrón multicapa, redes de funciones de base radial, regresión general de redes neuronales, redes neuronales probabilísticas, redes de densidad de mezcla Gaussianos, mapas auto-organizados con redes de Kohonen, entre otras (Kanevski et al., 2009). En el caso de la presente tesis, el tipo de red neuronal que se utilizará para construir el modelo de cambio de uso de suelo será la de perceptrón multicapa. Esta fue una de las primeras

redes neuronales desarrolladas, y fue creada por Rosenblatt en 1958; hoy en día es una de las redes neuronales que más se utilizan (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013).

El perceptrón multicapa está conformado por un nodo único, que recibe entradas que son ponderadas aleatoriamente y llega a los resultados con base en umbrales definidos; este único nodo clasifica linealmente los datos y crea funciones lineales (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013). El perceptrón multicapa es una red neuronal sin retroalimentaciones y sin conexiones laterales, la información fluye solo en una dirección desde la entrada y hasta la salida, y sirve para resolver problemas prácticos no lineales, es decir, modela relaciones no lineales entre las variables, además es el más robusto de los procedimientos utilizados para modelar los potenciales de transición (Eastman, 2012).

El perceptrón multicapa está compuesto por tres tipos de capas: una de entrada, una oculta y una capa de salida, como se identifica en la Figura 1.3.

Figura 1.3- Funcionamiento de un Perceptrón Multicapa. Fuente: Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013.



La capa de entrada son los insumos del modelo y la de salida el resultado obtenido, por su parte, la capa oculta es importante porque en ella el perceptrón multicapa aprende y hace uso de los efectos de interacción.

Con respecto al procedimiento que se lleva a cabo dentro del perceptrón multicapa, primero, los datos de entrada pasan a través de la red por medio de la alimentación hacia adelante (*feed forward*), allí los nodos de salida se calculan en función de los valores de entrada, y luego se transmiten hacia adelante a través de la red, en donde

un nodo se va a activar dependiendo de los valores de entrada y de los pesos utilizados (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013).

Posteriormente, para las ponderaciones en la búsqueda de los pesos adecuados, el perceptrón multicapa utiliza una regla de aprendizaje supervisado, que aplica un algoritmo de propagación hacia atrás. El aprendizaje supervisado es el esquema más común de entrenamiento, que se usa cuando se busca modelar una dependencia de entrada-salida que es desconocida. Las muestras para las entradas y las salidas se preparan como un set de entrenamiento, y con ellas la red inicia desde un estado predeterminado, es a ese proceso de búsqueda de los valores correctos a lo que se le conoce como regla de aprendizaje.

En cada prueba, los resultados del presente estado de la red se comparan con la salida deseada, y para hacer que coincida el comportamiento de entrada y salida de la red, se van actualizando los pesos de las neuronas, con lo que se reduce el error entre la salida real y la salida deseada (Kanevski et al., 2009).

El algoritmo de propagación hacia atrás (*back propagation algorithm*), minimiza la medida de error entre la salida real de la red neuronal y la salida deseada utilizando un error pre-calculado durante el paso de información a través de la red; de esta forma se están calculando los gradientes de la función del error respecto a los pesos de la red, buscando minimizar el error cuadrático medio. Las salidas del perceptrón multicapa entrenado con un error cuadrático medio se interpretan como el promedio condicional de los datos que se tienen como objetivo. Los pasos que sigue el algoritmo de propagación hacia atrás son:

- ✓ Se inician los pesos.
- ✓ Un par de entradas y la salida deseada se presentan a la red. La salida actual de la red es calculada y las salidas de todas las neuronas son almacenadas.

- ✓ El error cuadrático medio es calculado respecto a los pesos en cada capa, comenzando con la capa de salida y luego con un movimiento hacia atrás hasta llegar a las entradas. Este cálculo proporciona información sobre cuánto depende el error del peso particular en la vecindad de un modelo actual, por lo cual se buscará optimizar su valor y al mismo tiempo, reducir el error, al menos localmente en lo que al vecindario respecta. Así mismo, se obtienen los cálculos de cada peso en las capas ocultas, en un movimiento iterativo hacia atrás entre las capas, este procedimiento, es decir, la propagación hacia atrás de las salidas de los errores, es lo que inspira el nombre del algoritmo que utiliza el perceptrón multicapa (Kanevski et al., 2009).

- ✓ Posteriormente, viene un proceso al que se le conoce como ciclo, en este, los nodos se incorporan a la red neuronal, el error cuadrático medio observado y esperado se calcula para todas las observaciones, y se ajustan los valores de las matrices de ponderación, lo que permite que el error se distribuya de forma uniforme en toda la red; es alrededor de entre 4 mil y 10 mil ciclos que se alcanza un umbral de ajuste, y los valores de salida ya no producen grandes mejoras con respecto al nivel del error calculado. Finalmente, el proceso se detiene, y los valores de ponderación que se obtuvieron se guardan para aplicarlos al archivo que contenga solo los nodos de entrada a los que les fueron calculados valores de salida (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013).

Una vez ejecutado el perceptrón multicapa, es decir, cuando se entrenó la red neuronal por medio de parámetros definidos, se obtienen como resultado imágenes de potencial de transición, las cuales describen la probabilidad de una transición particular ocurriendo en el paisaje del modelo, y estas serán las utilizadas para predecir cambios en un futuro a través de escenarios prospectivos (Eastman, 2012).

1.7 Los escenarios prospectivos.

Obtenida la red neuronal perceptrón multicapa, es como se procede a mostrar ese resultado a través de la construcción de escenarios prospectivos. Un escenario se

define como “un conjunto formado por la descripción de una situación futura y de la trayectoria de eventos que permitan pasar de la situación de origen a la situación futura” (Amozurrutia, 2014). “Un escenario no es la realidad futura, sino un método de representación de esta realidad, destinado a iluminar la acción presente con la luz de los futuros posibles y deseables..., y solo adquirirán credibilidad y utilidad si respetan cuatro condiciones: pertinencia, coherencia, verosimilitud y transparencia” (Godet, 1995).

Los escenarios constituyen la técnica principal para explorar los posibles futuros, y la prospectiva desde su punto de vista metodológico, ayuda a construir conclusiones provisionales con hipótesis probables sobre variables explicativas que, a distintos niveles de precisión, puede ayudar a entender un futuro empírico que sea lo más cercano a la realidad futura (Amozurrutia, 2014).

Los escenarios están compuestos por la secuencia de los siguientes elementos:

- ✓ Situación de base o punto de partida del escenario, donde toman gran importancia las variables de cambio.
- ✓ Trayectoria futura más plausible, es decir, se describen y se analizan los cursos de las acciones más posibles.
- ✓ Una aproximación de las situaciones o riesgos de azar que pueden manifestarse.
- ✓ Una definición del horizonte de tiempo, es decir, a corto, mediano o largo plazo.
- ✓ Una descripción de la situación futura, es decir, la situación de llegada (Núñez, 2018).

Los escenarios pueden ser construidos de forma participativa, a partir de información científica, o bien, a partir de una mezcla de ambas. Modelar un escenario es complejo debido a la gran cantidad de interacción de procesos que ocurren en este, además de la distribución espacial de esos procesos, su dinámica, las escalas espaciales y temporales, y, todas las actividades humanas que tienen cabida en estos procesos (Degenne P. & Lo Seen D., 2016). Sin embargo, una vez que se logra la construcción

de modelos de cambio de uso de suelo, es cuando los escenarios creados permiten explorar las implicaciones que se obtendrían de la dinámica sociedad-naturaleza en un futuro; los escenarios poseen la ventaja de que se pueden conocer sin necesitar la observación real de los fenómenos y son definidos con base en el número, la frecuencia y las cualidades que poseen los comportamientos (Amozurrutia, 2014).

Existen tres tipos de escenarios: posibles, donde se quieren realizar con un deseo sin limitantes; realizables cuando existen los límites y pocos ideales, y cada vez serán más realizables si los ideales disminuyen y se tiene un control sobre la disponibilidad de recursos; y deseables, los cuales son escenarios realizables, es decir, hay límites y se tiene conciencia de ellos, se tienen los recursos pero también los deseos de efectuarlo, por lo que la entra en juego la planeación sobre la estrategia que se va a llevar a cabo con el objetivo de lograr ese escenario (Amozurrutia, 2014).

Al obtener los resultados de los escenarios, también debe tomarse en cuenta la reacción que se tendrá ante estos, la cual puede ser:

- ✓ Pasiva: el resultado de la prospectiva es inútil, es decir, a pesar de los resultados obtenidos no hay acción al respecto.
- ✓ Reactiva: explora los escenarios resultantes que se obtuvieron y lo que busca es adaptarse a las condiciones que se espera habrá en un futuro.
- ✓ Pre-activa: explora, pero generalmente de forma anticipatoria a los resultados.
- ✓ Pro-activa: los escenarios son explorados y con base en normas, se tiene una convicción de voluntad de definir ese futuro (Amozurrutia, 2014).

Definidos los escenarios y la reacción que se tendrá ante ellos, es como finalmente resta establecer las estrategias, ello con la finalidad de anticipar y definir el escenario más deseable o bien, el menos deseable. Existen los siguientes tipos de estrategias:

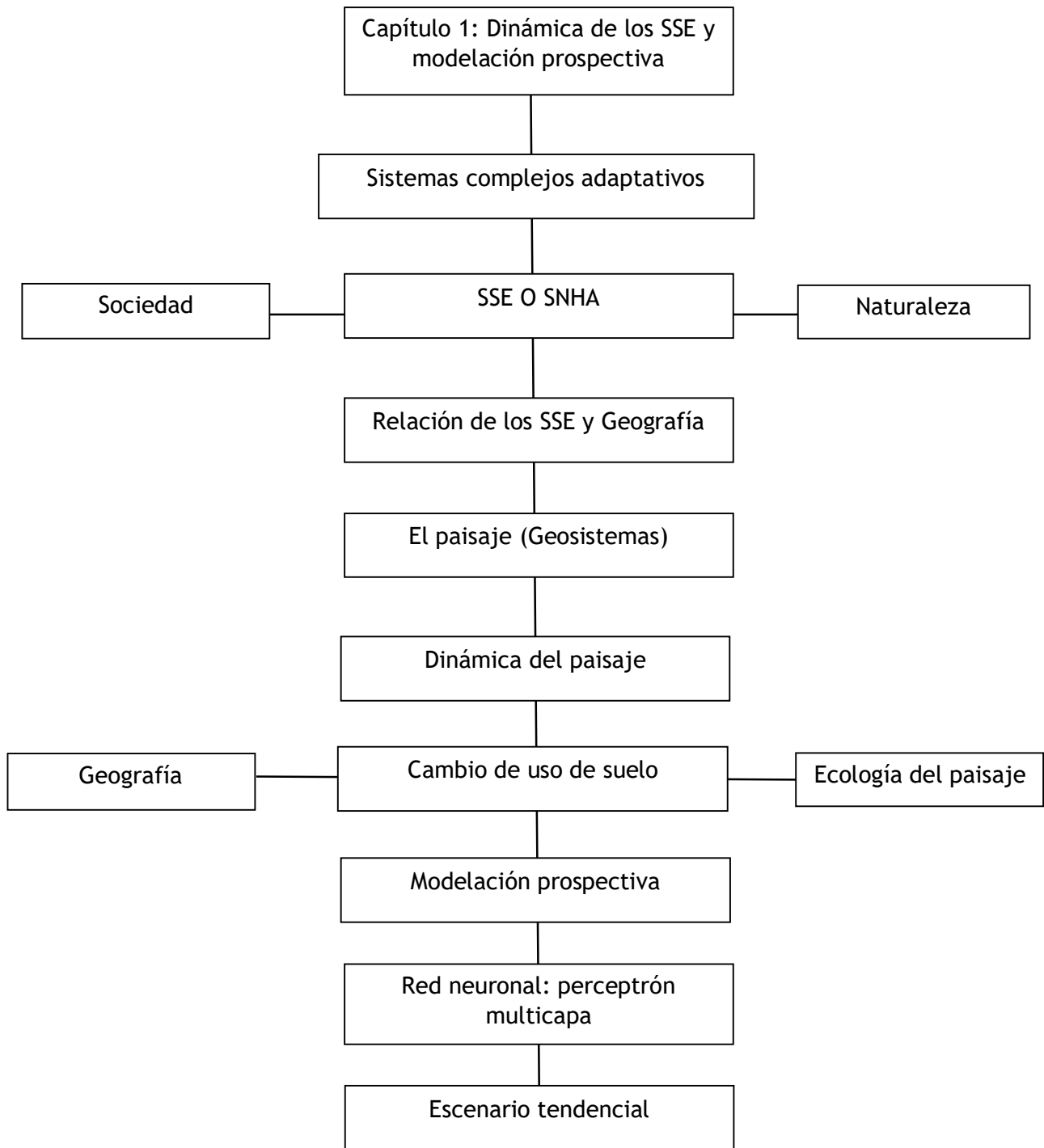
- ✓ Arriesgada: que se basa en escenarios probables, es decir, se utiliza un valor numérico que depende de un criterio de carácter lógico.
- ✓ Robusta: se construye a partir de evoluciones probables.

- ✓ Flexible: considera el máximo de opciones reversibles, más de la mitad de los escenarios.
- ✓ Conservadora: rechaza escenarios arriesgados e incómodos, solo atenta a ganancias que son apenas significativas (Amozurrutia, 2014).

Finalmente, la selección de un tipo de estrategia que sea útil es lo que terminará por consolidar una prospectiva de carácter estratégico que pueda ser aplicada para la resolución de problemas reales.

A modo de resumen de lo analizado en este primer capítulo, el siguiente esquema muestra a los SSE conformados por las interacciones de la sociedad y naturaleza, y como estos se relacionan con la Geografía dado que esta disciplina desde su enfoque espacial puede analizarlos.

La Geografía, que a su vez estudia el paisaje, -principalmente a nivel geosistema que es la escala del hombre-, y la dinámica existente dentro de este, analiza el cambio de uso de suelo como una forma de expresión de esa dinámica, donde son importantes las contribuciones de la Ecología del Paisaje. Una herramienta para los estudios a futuro de este recurso es la modelación, que por medio de algoritmos como la red neuronal perceptrón multicapa, logra proyectar un resultado a través de escenarios prospectivos que tienen la finalidad de anticiparse a un posible futuro y prevenir problemas concretos.



CAPÍTULO 2: Caracterización del área de estudio

Las características biofísicas y socioeconómicas que definen a la RTMG, crean de esta un sistema socioecológico complejo, ya que, varias de estas características son a la vez las causas de los cambios de uso de suelo en la región.

En este capítulo se presentan la localización de la RTMG, sus características físico geográficas tales como la altimetría y los cuerpos de agua, posteriormente, se describen las características socioeconómicas como división territorial, localidades, población, actividades económicas, migración, entre otras, y todas ellas son analizados por medio de gráficas, tablas y mapas. Estas características funcionan como los agentes que explican el cambio de uso de suelo en el modelo construido de la RTMG, el resto de características biofísicas y socioeconómicas que definen la región de estudio pueden encontrarse en los anexos de la presente investigación, y todas ellas son importantes porque establecen una relación indisoluble entre sí, por ejemplo, la biodiversidad de la RTMG está determinada por la variedad altimétrica, que al mismo tiempo conlleva a una variabilidad climática, y que influye a su vez en los tipos de rocas, suelos y cuerpos de agua que existen en la RTMG.

Todos estos elementos en conjunto muestran la riqueza biofísica de la RTMG, la cual interviene en las condiciones sociales y económicas de la región, lo que al mismo tiempo, determina el potencial existente para el desarrollo de los distintos tipos de usos de suelo.

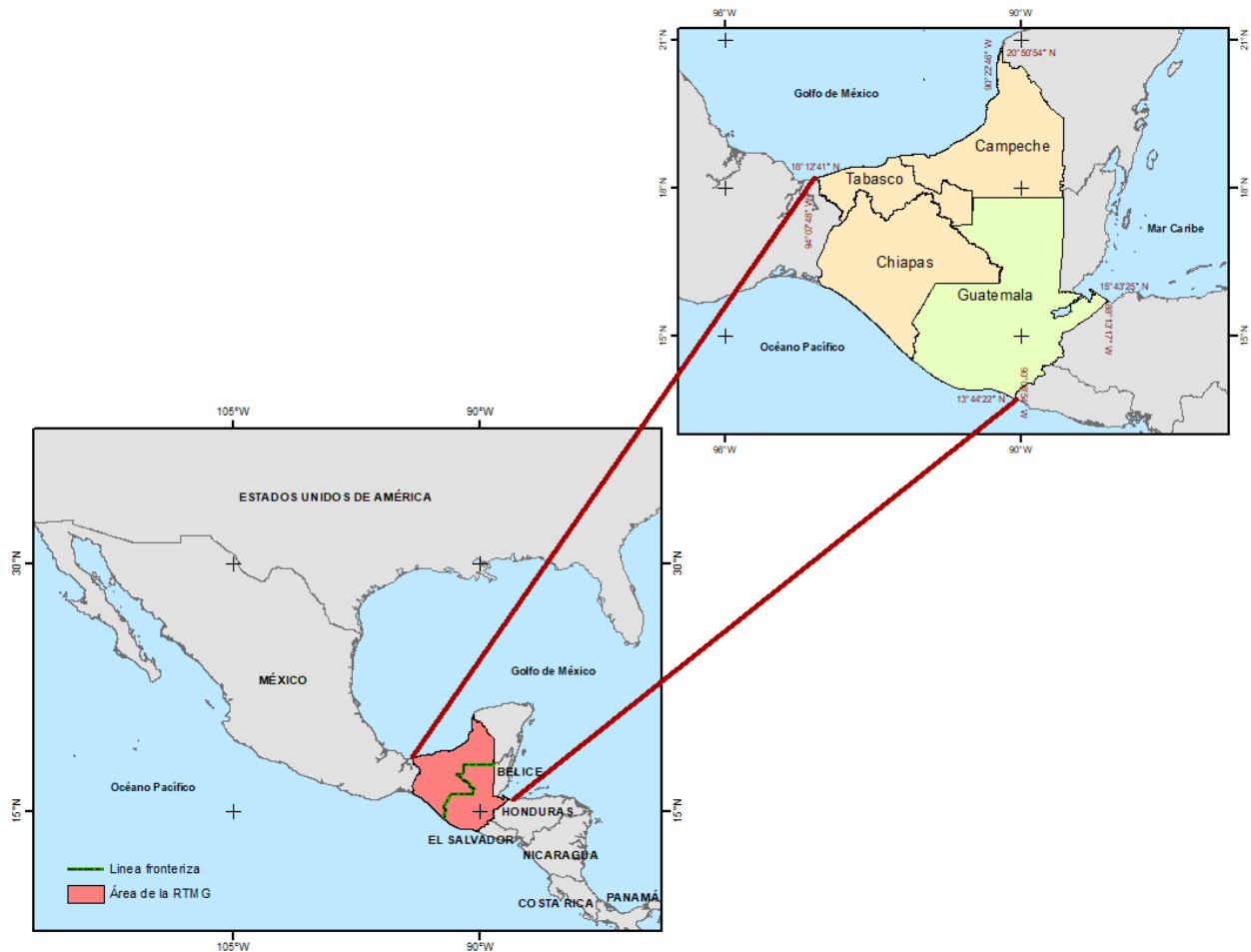
2.1 Localización

La Región Transfronteriza México-Guatemala (RTMG), es una de las dos fronteras que posee México y está conformada por los estados de Chiapas, Campeche y Tabasco (cuyas capitales son Tuxtla Gutiérrez, Campeche y Villahermosa, respectivamente) en el sureste del país, y por el país de Guatemala (capital Ciudad de Guatemala), localizado al noroeste de Centroamérica (Mapa 2.1). Chiapas, Campeche y Tabasco están divididos con respecto a Guatemala por una línea fronteriza terrestre que tiene una extensión de 573 kilómetros (SRE, 2013), y que se encuentra conformada por el volcán Tacaná, los cerros Buenavista e Ixbul, y por líneas imaginarias señaladas por monumentos o cercas (INEGI, 2010), así mismo, los divide una frontera fluvial, donde

los ríos que separan son el Suchiate con una extensión de 161 km, el Usumacinta que se extiende hasta 587.26 km, y el Chixoy que tiene una extensión de 68.03 km (INEGI, 2010).

La RTMG cubre un área de 26,944,031.66 hectáreas, y colinda al norte con el Golfo de México -coordenadas extremas 20° 50' 54" N y 90° 22' 46" W-, al sur con el Océano Pacífico -coordenadas extremas 13° 44' 22" N y 90° 06' 54" W-, al este con Yucatán, Quintana Roo, Belice, Honduras y El Salvador -coordenadas extremas 15° 43' 25" N y 88° 13' 17" W-, y al oeste con Veracruz y Oaxaca -coordenadas extremas 18° 12' 41" N y 94° 07' 48" W-.

Mapa 2.1- Localización de la RTMG. Fuente: Elaboración propia a partir de información de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.



2.2 Características físico-geográficas:

La gran superficie que abarca la RTMG, hace que las características físico-geográficas y socioeconómicas de la región no sean homogéneas, por lo que para describirlas primero fue necesario conseguir los insumos tanto para México como para Guatemala, y posteriormente, se realizó un proceso de homologación de las distintas clases, de modo que toda la RTMG contara con las mismas características y así poder representarse como una unidad a través de mapas, donde la escala de información se mantuvo en 1:250 000.

En algunos casos, la homologación de clases no se llevó a cabo porque las categorías existentes y las características que las definen eran notablemente distintas entre México y Guatemala, ello además de que en varias ocasiones el análisis se realizó en distintos años dada la baja disponibilidad de insumos.

2.2.1 Altitud

La RTMG se encuentra sobre una gran variedad de provincias fisiográficas, debido a la poca uniformidad de clasificación que poseen México y Guatemala.

En los estados de Chiapas, Campeche y Tabasco, se tienen la provincia fisiográfica de la Llanura Costera del Golfo Sur; la provincia de la península de Yucatán en Campeche (INEGI, 2010); y la Sierra de Madre de Chiapas y Guatemala, que es la cadena principal de la cordillera centroamericana que se extiende desde Chiapas, pasa por Guatemala y por otros países del norte de América Central, tal como lo son El Salvador, Honduras y Nicaragua (García, 2014). La cordillera Centroamericana es importante por su extensión, su altitud, y porque su origen está dado por la intensa actividad volcánica de la zona (García, 2014).

Del lado de Guatemala, se tienen 11 provincias fisiográficas: Plataforma sedimentaria de Yucatán, Cinturón Plegado de Lacandón, Montañas Mayas, Tierras bajas interiores del Petén, Tierras altas sedimentarias, Tierras altas cristalinas, Tierras volcánicas, Pendiente volcánica reciente, Depresión del Motagua, Depresión de Izabal y la Llanura Costera del Pacífico (CONAP, 2008).

Las placas tectónicas que confluyen en la zona de la RTMG, son la placa Norteamericana, la de Cocos y la del Caribe (SGM, 2017). Mesoamérica -que abarca México y Centroamérica-, tiene como característica el ser una zona de alta actividad tectónica, que resulta precisamente de la dinámica de placas, como es la subducción de la placa de Cocos a lo largo de la Trinchera Centroamericana. Del lado del Sureste de México y en la frontera con Guatemala, se tiene una tectónica aún más compleja por la subducción de la placa de Cocos bajo las placas de Norte América y Caribe, donde estas dos últimas tienen un límite transcurrente con la fosa del Caimán y con el sistema de fallas Motagua-Polochic. Lo anterior resulta en que la RTMG es una zona tectónicamente activa y fisiográficamente compleja, lo que se traduce en sismos e intensa actividad volcánica (García, 2007).

Estas características crean una variedad altimétrica, donde en las zonas en las que no hay grandes cadenas montañosas, predominan terrenos llanos que se inundan con cierta facilidad, y que son pantanosos por la presencia de cuerpos de agua (Ortega, 2018); en cambio, en las zonas de cadenas montañosas, existen enormes elevaciones que se extienden a lo largo de la RTMG, las principales se pueden observar en la Tabla 2.1.

Mapa 2.2- Altitud de la RTMG. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.

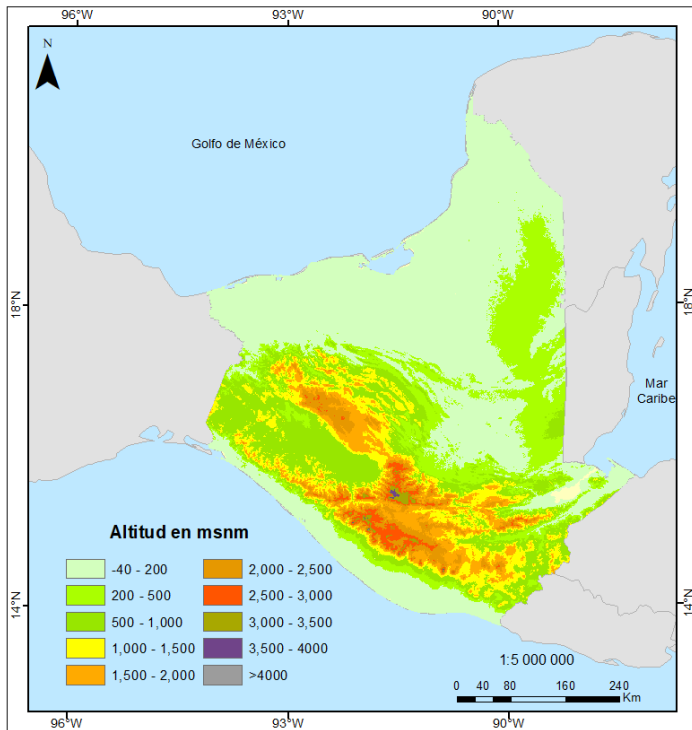


Tabla 2.1- Principales elevaciones de la RTMG. Fuentes: SEMARNAT, CONABIO, SUVUMEH, Ortega, 2018.

Nombre	Altitud (metros sobre el nivel del mar)
Sierra Madre de Chiapas -punto más alto: volcán Tajumulco-	4,220
Volcán Tacaná	4,092
Volcán Acatenango	3,976
Sierra de los Cuchumatanes	3,837
Volcán Santa María	3,772
Volcán Fuego	3,763
Cerro El male	3,091
Cerro Tzontehuitz	3,081
Cerro Huitepec	3,039

En el Mapa 2.2 se observa que la altimetría de la zona de estudio varía desde los -40 msnm hasta los 4,220 msnm. Las zonas más bajas de la RTMG se encuentran principalmente al norte. Las zonas más altas que van desde los 1,000 msnm hasta los 4,220 msnm, se encuentran en el centro-sur de la RTMG, que es precisamente ahí donde atraviesa la cordillera centroamericana, y que como se ya se mencionó tiene un origen volcánico que hace que en la RTMG predomine la actividad tectónica y las grandes variaciones altimétricas.

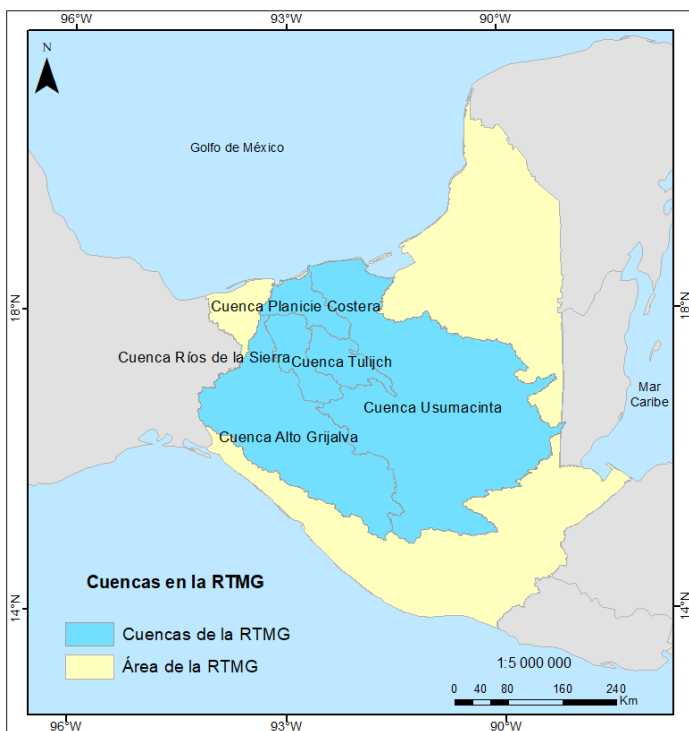
2.2.2 Cuerpos de agua

✓ Cuencas

Dentro de la RTMG se encuentran cinco cuencas que pertenecen al sistema Grijalva-Usumacinta (Mapa 2.3).

Mapa 2.3- Distribución de las cuencas de la RTMG. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.

Tabla 2.2- Área de las cuencas de la RTMG. Fuente: Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.



Cuenca	Área (km ²)
Usumacinta	77,225.86
Alto Grijalva	37,575.06
Ríos de la Sierra	6,997.19
Tulijch	6,101.86
Planicie Costera	5,858.47

Como se observa en el Mapa 2.3, el sistema de cuencas de la RTMG se distribuye principalmente al centro-oeste de esta, encontrándose por ello en una de las zonas fisiográficamente más complejas (Mapa 2.2).

Por la extensión que abarcan la cuenca Usumacinta y la cuenca Grijalva, ambas son las principales en la RTMG (Tabla 2.2). La cuenca del Usumacinta, es la mayor de todas las cuencas fronterizas existentes; su superficie es equivalente a todo el estado de Chiapas, y se extiende en un 44% sobre México y en un 56% sobre Guatemala

(Quiroz, 2013). La complejidad de la red hidrológica que compone esta cuenca, se da debido a la variabilidad topográfica de la región, así como por encontrarse en una de las zonas de Mesoamérica con mayores cantidades de precipitación, lo que a su vez la convierte en es una de las zonas de mayor biodiversidad a nivel mundial. La población asentada en esta cuenca al año 2010 era de 1, 776, 232 habitantes que se distribuían principalmente en las partes altas (March & Castro, 2013).

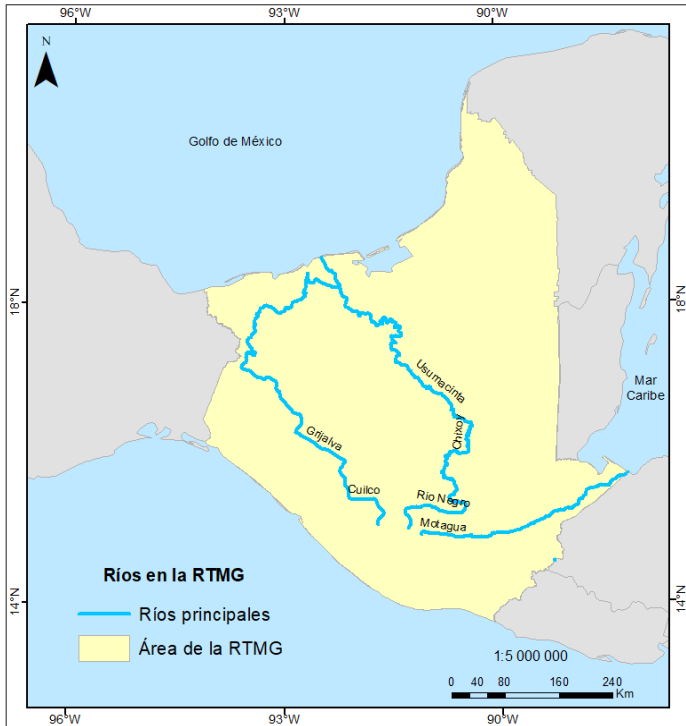
La cuenca del Grijalva por su parte, se extiende en un 90.5% en México y un 9.5% sobre el país guatemalteco (Quiroz, 2013), está conformada por el río Grijalva que nace en Guatemala y cruza los estados de Chiapas y Tabasco, y se divide en alto, medio y bajo Grijalva. Las condiciones climáticas varían de acuerdo a como va descendiendo el río Grijalva, el alto y medio Grijalva poseen una precipitación media que oscila entre los 1,200 y los 1,700 mm anuales, el bajo Grijalva por su parte, posee una precipitación media de 4,000 mm anuales, lo que lo convierte en una de las zonas de mayor precipitación de México, y dadas las características de variabilidad topográfica, resultan escurrimientos que desembocan en inundaciones para las zonas llanas (OMM-GWP, 2006).

✓ Ríos

Considerando que las dos principales cuencas de la RTMG son la Usumacinta y la Grijalva, los ríos que se encuentran al interior de estas y que llevan el mismo nombre, son a su vez, los más importantes de la RTMG, conformando con ello el sistema Grijalva-Usumacinta, dentro del cual también existen los ríos Motagua, Negro, Cuilco, Chixoy y Lempa (Mapa 2.4).

Mapa 2.4- Distribución de los ríos en la RTMG.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.

Tabla 2.3- Extensión de los ríos en la RTMG.
Fuente: Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.



Ríos	Extensión (kilómetros)
Usumacinta	587.26
Grijalva	512.05
Motagua	380.21
Río Negro	328.72
Cuilco	134.94
Chixoy	68.03
Lempa	2.23

Con una extensión de 587.26 km, el río Usumacinta es el más importante de la RTMG (Tabla 2.3); este río es el más caudaloso de todo Mesoamérica (Chávez, 2001) y uno de los más caudalosos de México, y esto se explica debido a que en esta zona se tiene una precipitación al año de entre 1,500 y 3,500 mm. Su caudal es de 1,700 m³/s, por lo que tiene la fuerza para generar 1,850 MW de energía eléctrica (March & Castro, 2013).

El río Grijalva tiene una extensión de 512.05 km (Tabla 2.3), por lo que es el segundo más largo de la RTMG. Si se considerara el volumen del río Grijalva más el volumen del río Usumacinta, el Golfo de México estaría recibiendo prácticamente 100 millones de m³ al año de agua dulce, por lo que estas cifras muestran la gran cantidad de agua dulce existente en la RTMG (OMM-GWP, 2006).

✓ Lagos y presas

En la RTMG existen una importante cantidad de lagos y presas (Mapa 2.5).

Mapa 2.5- Distribución de los lagos y presas en la RTMG. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.

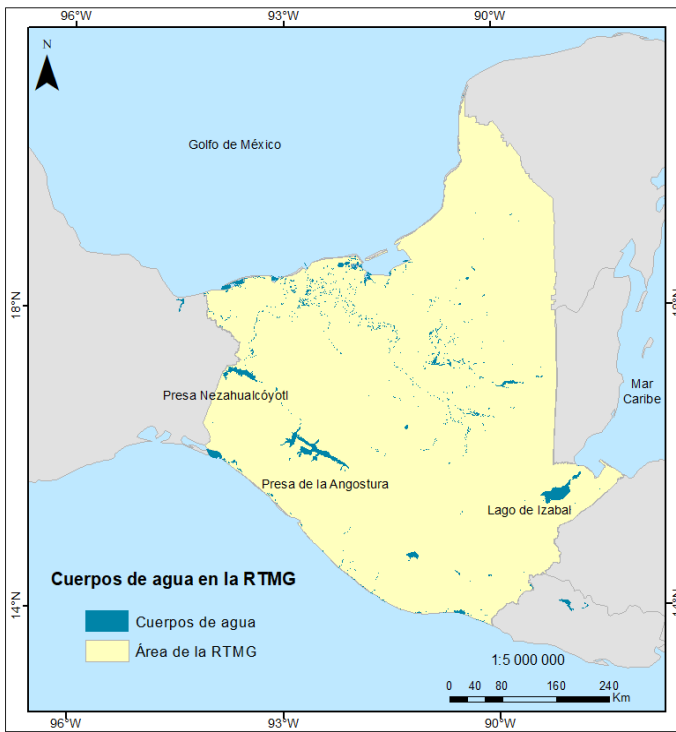


Tabla 2.4- Principales lagos y presas en la RTMG. Fuente: Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.

Lago/presa	Área (kms)
Presa de la Angostura	863.70
Lago de Izabal	733.16
Presa de Nezahualcóyotl	280.26

A pesar de la abundancia de los lagos y presas en la región de estudio, son dos los que destacan como principales por la extensión que abarcan, uno es la presa La Angostura y el otro el Lago de Izabal (Tabla 2.4).

La presa Doctor Belisario Domínguez, también llamada La Angostura, tiene un área de 863.70 km, fue construida entre 1969 y 1974 sobre el río Grijalva en el estado de Chiapas. Su importancia reside en ser el segundo aprovechamiento del sistema Grijalva (Alegría, 2010).

El Lago de Izabal, abarca un área de 733.16 km, es un lago que se localiza en el departamento de Izabal, Guatemala. Este lago alberga diversas Áreas Naturales Protegidas, y tiene como prioridad la conservación, por lo que se realizan actividades de ecoturismo y pesca, de forma sustentable (OSPESCA, 2017).

2.3 Características socioeconómicas:

Tal y como ocurrió en el caso de las características físico-geográficas de la región, la disponibilidad y categorización de información poblacional y socioeconómica, difieren mucho entre México y Guatemala. En el caso de Guatemala particularmente, es más compleja la disponibilidad de esta información, ya que el último censo fue realizado en el año 2002, y aunque en el año 2018 se realizó otro censo, esta información no será publicada hasta finales del año 2019.

Es por lo anterior, que con respecto a las características socioeconómicas se definió trabajar con los últimos censos ya existentes publicados, es decir, Censo 2002 para Guatemala y Censo 2010 así como algunos datos de la Encuesta Intercensal 2015, para México; así mismo, también se consideraron algunas otras fuentes de información con el fin de lograr un análisis socioeconómico más integrado de la RTMG.

2.3.1 División territorial

Guatemala está dividido en departamentos y estos a su vez en municipios. Los departamentos en los que se divide Guatemala son 22: Ciudad de Guatemala, Huehuetenango, San Marcos, Alta Verapáz, Quiché, Quetzaltenango, Escuintla, Chimaltenango, Suchitepéquez, Jutiapa, Petén, Totonicapán, Izabal, Sololá, Chiquimila, Santa Rosa, Sacatepéquez, Jalapa, Retalhuleu, Baja Verapaz, Zacapa, El Progreso. Estos departamentos están divididos en un total de 322 municipios.

Por su parte, Chiapas se divide en 118 municipios, Campeche en 11 y Tabasco en 17, conformando así 146 municipios pertenecientes a México (Encuesta Intercensal INEGI, 2015). En total, la RTMG tiene 468 municipios, y los más importantes por su área se observan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5- Principales municipios de la RTMG. Fuentes: Censo 2010, Mexico y Censo 2002, Guatemala.

Municipios de la RTMG	Área (hectáreas)
Calakmul	1,400,000
Ocosingo	958,454
Carmen	857,235
San Andrés	805,288
Hopelchén	779,822
Champoton	686,179
La Libertad	682,550
Candelaria	566,087
Escárcega	478,795
Flores	387,591

Como se observa en la Tabla anterior, el municipio de Calakmul es el más grande de la RTMG, este pertenece al estado de Campeche, cubre un área de 1, 400,000 hectáreas y para el año 2010 tenía una población de 26,882 habitantes (SEDESOL, 2014).

2.3.2 Localidades

El criterio para distinguir las localidades urbanas de las localidades rurales, fue a partir de considerar la cantidad de población que las conformaba, es decir, una localidad con una cantidad de habitantes menor a 2,500 se consideró rural, esto mientras que una localidad con una cantidad de habitantes mayor a 2,500 se consideró urbana (INEGI, 2010).

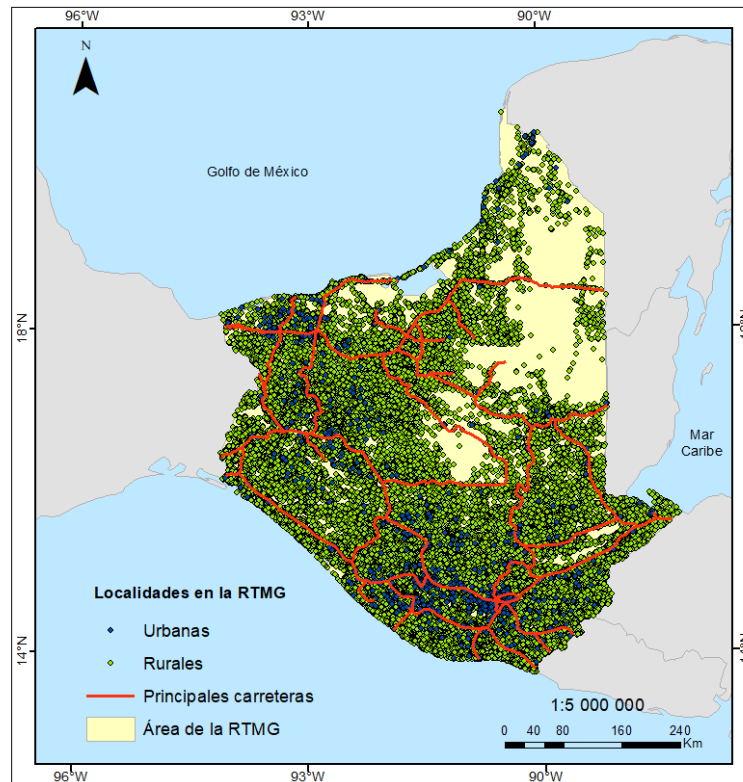
En la Tabla 2.6 se observa que, tanto del lado de México como del Guatemala, fueron predominantes las localidades rurales frente a las urbanas. En el caso de Chiapas, Campeche y Tabasco, del total de localidades, un 98.90% fueron rurales y solo el 1.10% urbanas. Del lado de Guatemala, 97.83% de localidades fueron rurales, mientras que el 2.17% fueron urbanas.

Tabla 2.6- Localidades de la RTMG. Fuentes: Censo 2010, Mexico y Censo 2002, Guatemala.

	Urbanas	Rurales	Total de localidades
Chiapas, Campeche y Tabasco	262	24,869	25,131
Guatemala	591	26,665	27,256
Total en la RTMG	853 (1.62%)	51,534 (98.37%)	52,387

En el Mapa 2.6, se identifican en color verde las localidades rurales, en azul urbanas y en rojo las carreteras principales que cruzan la RTMG. La distribución de las carreteras mantiene relación con la concentración de las localidades urbanas, lo que se identifica principalmente al sureste y al centro-oeste de la región. El resto de las carreteras mantienen conexiones entre la gran cantidad de localidades rurales, y a su vez, entre las localidades urbanas con las rurales.

Mapa 2.6- Distribución de las localidades rurales y urbanas en la RTMG y su conexión por medio de carreteras. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.



2.3.3 Población

La cercanía geográfica e histórica que prevalece en la región, hace que exista una homogeneidad étnica, social y demográfica, la cual determina que la RTMG tenga mayor similitud entre quienes la integran, que son Chiapas, Campeche, Tabasco y Guatemala, que cada uno de estos en comparación con sus respectivos promedios a nivel nacional; sin embargo, esta similitud está determinada por las condiciones precarias en las que vive la población, mas no se trata de un proceso de desarrollo a nivel regional (Canales et al., 2010).

De acuerdo con el censo de 2010 para México y el de 2002 para Guatemala, los datos poblacionales de la región fueron los siguientes:

Tabla 2.7- Total poblacional en la RTMG. Fuentes: Censo 2010, Mexico y Censo 2002, Guatemala.

	Total de población	Total de Hombres	Total de Mujeres
Chiapas	4,796,580	2,352,807	2,443,773
Campeche	822,441	407,721	414,720
Tabasco	2,238,603	1,100,758	1,137,845
Guatemala	11,237,193	5 496 839	5,740,357
Total para la RTMG	19,094,817	9,358,125	9,736,695

Con base en los datos de la Tabla 2.7, se puede observar que se tenía en la RTMG un total de 19, 094,817 habitantes, donde eran un poco más de mujeres que de hombres, la diferencia era únicamente de 378,570.

En la Tabla 2.8, se observa la cantidad de población que para esos años existía tanto en Guatemala como en Chiapas, Campeche y Tabasco, pero esta vez especificando su distribución por tipo de localidad.

Tabla 2.8- Población por tipo de localidad. Fuentes: Censo 2002, Guatemala. Encuesta Intercensal 2015, México.

	Población que vivía en localidades urbanas	Población que vivía en localidades rurales
Chiapas	49%	51%
Campeche	75%	25%
Tabasco	57%	43%
Guatemala	46%	54%
Total para la RTMG	56.75%	43.25%

La Tabla anterior permite identificar que el patrón de la distribución de la población no es generalizado para toda la RTMG, esto ya que mientras en Chiapas y Guatemala vivía más población en localidades rurales que en urbanas, en Campeche y Tabasco vivía más población en localidades urbanas que en las rurales. A pesar de ello, dado que se está trabajando la RTMG como un sistema, se considerará que, de manera general para la región, se tenían 51,534 (98.38%) localidades rurales donde vivía el 43.25% de la población total, frente a únicamente 853 (1.62%) localidades urbanas donde vivía el 56.75% de la población total (Tabla 2.8).

Las cifras anteriores evidencian que la RTMG por cantidad localidades era predominantemente rural, pero, la mayoría de la población vivía en las localidades urbanas, elementos que podrían dejar al descubierto características como centralización de las oportunidades en las ciudades, lo que conduce a la sobrepoblación de zonas urbanas y a su vez a la migración interna e inclusive externa con respecto a los países centro y sur americanos. Al respecto, es importante considerar que toda la región que abarca América Latina y el Caribe (ALC) se caracteriza porque en ella el peso de lo rural siempre ha sido muy relevante, por lo que se establece que esta condición podría ser generalizada para la zona (FAO, 2018).

Según el Banco Mundial y la FAO, las poblaciones rurales se caracterizan por asentarse en zonas no urbanizadas, es decir, zonas donde predominan las actividades económicas primarias. Estas poblaciones poseen un estilo de vida más vinculado con la naturaleza, y tanto su pensamiento como organización social se consideran estructurados de una forma tradicional y menos cercana a la tecnología y modernización como se vive en las ciudades, esto en comparación con las formas de

vida de las ciudades. De igual forma, la población rural usualmente vive en asentamientos irregulares de forma abundante, los cuales son asentamientos informales y vulnerables en cuanto a las condiciones físicas, sociales y económicas. Las personas que viven en ellos son de bajos ingresos y, por tanto, pueden buscar emigrar en busca de trabajo a las zonas urbanas. Las condiciones de vida de manera general se consideran precarias, ya que no tienen total acceso a servicios básicos, viven bajo hacinamiento, explotación laboral, violencia y baja calidad ambiental (Banco Mundial, 009 & FAO, 2018).

2.3.4 Índice de Desarrollo Humano (IDH) y pobreza

Considerando entonces a la RTMG como una zona predominantemente rural, y a partir de las características definidas anteriormente para la condición de ruralidad, es de esperarse que el índice de desarrollo humano sea bajo para toda la región. El Índice de Desarrollo Humano (IDH), se define como aquel índice que representa el avance de una región con respecto a la educación, la salud y los ingresos (Ortega, 2018), por lo que primero se deben calcular los índices en esos aspectos, para posteriormente, obtener el IDH, que dejará ver el nivel de desarrollo humano para las personas en una fecha determinada (PNUD, 2015). Los valores el IDH oscilan entre 0 y 1, y mientras más cercano a 1, se podrá hablar de un mejor desarrollo humano para la región de estudio (PNUD, 2015).

Tabla 2.9- IDH en la RTMG al año 2012. Fuentes: PNUD, 2015 & Datos Macro, 2012.

	IDH para el año 2012
Chiapas	0.667
Campeche	0.749
Tabasco	0.742
Guatemala	0.613
IDH para la RTMG	0.692

Dada la poca disponibilidad de información con respecto a los datos de IDH de quienes integran la RTMG, se decidió utilizar los datos de pobreza e IDH del año 2012, con el objetivo de que estos pudieran ser comparables (Tabla 2.9).

Ahora bien, a partir de obtener el IDH promedio de Chiapas, Campeche, Tabasco y Guatemala, fue como se obtuvo el IDH para toda la RTMG, dando como resultado

0.692; considerando que 1 es el mejor resultado de IDH, entonces la RTMG está por encima de la mitad de un buen resultado, sin embargo, el resultado sigue siendo bajo, esto ya que, si se compara el IDH de la RTMG con el de otros países, se puede notar que, por ejemplo en el caso del IDH para todo México el resultado en el año 2012 fue de 0.757, lo que muestra que está notablemente por encima de lo obtenido en la RTMG.

Si se compara el IDH de la RTMG con el resto del mundo, los países con mejor IDH para el año 2012 fueron Noruega, Suiza y Australia, con un IDH de 0.942, 0.935 y 0.929 respectivamente, por lo que estos resultados son muy altos en comparación con el obtenido para RTMG. Hacia el otro extremo, los países con IDH más bajo a nivel mundial fueron Sudáfrica, Zambia y Zimbabue, obteniendo como resultado 0.664, 0.569 y 0.505, respectivamente.

Analizando los datos anteriores, puede notarse el IDH de la RTMG está más cercano a los IDH más bajos del mundo, por lo que ello evidencia las precarias condiciones de vida en la RTMG (Datos Macro, 2012). Aunado a ello, en la Tabla 2.9 se observa que en Chiapas y Guatemala al igual que predominaba la población que vivía en localidades rurales, también predominaba un IDH más bajo con respecto a Campeche y Tabasco, este resultado fue aún más bajo en el caso del país Guatemala, por lo que se establece que el IDH muestra un resultado general para la región, mas no logra identificar las desigualdades existentes al interior de esta, además también permite establecer una relación directa entre la ruralidad y las condiciones precarias de vida de la población, tal y como lo es en cuestiones de educación, salud e ingresos, lo que puede recaer en pobreza.

La pobreza se define como un fenómeno de múltiples dimensiones que priva el desarrollo de las capacidades humanas (PNUD, 2016). De acuerdo con el PNUD, 2016, en el caso de América Latina y el Caribe, se identifica que del periodo 2002 al 2013 se redujo el porcentaje de personas en condición de pobreza, esto a partir de considerar los ingresos económicos, es decir, la pobreza se redujo de un 42% a un 24%, por lo que mejoraron las condiciones de vida para varios países de América Latina, lo que se reflejó en las condiciones económicas, de salud y de educación, sin

embargo, este avance no se generó de forma homogénea para toda la región, sino de forma desigual, ya que en el caso del país de Guatemala, se considera que la pobreza aumentó durante ese mismo periodo un 7% (PNUD, 2016). De acuerdo con el Informe Regional sobre Desarrollo Humano para América Latina y el Caribe, en relación con la movilidad económica hacia diferentes grupos de ingreso, en Guatemala un 14% de la población logró salir de la pobreza, sin embargo, un 24% de la clase media cayó en la vulnerabilidad, y un 36% era población vulnerable que cayó en la pobreza.

El aumento de la pobreza lleva como consecuente una disminución del IDH, que como se analizó anteriormente para Guatemala fue de 0.613 para el año 2012. Si bien es cierto que la economía de este país ha crecido moderadamente, también es cierto que la pobreza también lo ha hecho, lo anterior pone al descubierto que el modelo de desarrollo adoptado se ha concentrado solo en la dimensión económica, dejando de lado las ideas de un progreso multidimensional -definido como “el espacio de desarrollo con límites normativos en el que nada que disminuya los derechos de las personas y las comunidades, ni nada que amenace las sostenibilidad ambiental, puede considerarse progreso” (PNUD, 2016)-, que el Estado ha dejado de buscar bienestar para toda la población, y que además, la economía que ha crecido en el país se concentra solo en manos de unos pocos (PNUD, 2016).

Para Chiapas, Campeche y Tabasco, el panorama no es muy distinto (Tabla 2.10). En el caso de México a nivel general para el año 2010, de 112,336,538 habitantes, el 46.3% de ese total de población se encontraba en pobreza, y el 11.4% en pobreza extrema, donde las tres entidades con mayor pobreza eran Chiapas, Oaxaca y Guerrero (CONEVAL, 2012). Con base en estos resultados y en el caso particular de Chiapas, este estado representó el primer lugar en pobreza y en pobreza extrema de las 32 entidades federativas, ya que considerando que la población total para Chiapas en el 2010 fue de 4,796,580, el 78.5% se encontraba en situación de pobreza, es decir 3,765,315 habitantes (CONEVAL, 2012).

Campeche por su parte, con respecto a las 32 entidades federativas para el año 2010, ocupó el lugar número 13 en porcentaje de pobreza y el lugar número 7 en pobreza extrema. De su población total que para el año 2010 fue de 822,441 habitantes, el

50.3% se encontraba en situación de pobreza, es decir, 411,221 habitantes, encontrándose con ello en los primeros 15 lugares de pobreza a nivel nacional (CONEVAL, 2012).

Tabasco, de las 32 entidades federativas, en el año 2010 ocupó el lugar número 8 en pobreza y en pobreza extrema del país. De un total de población de 2, 238,603 habitantes, el 57.3% vivía en situación de pobreza, por tanto, se encontraba entre de las 10 primeras entidades federativas del país con respecto a su nivel de pobreza (CONEVAL, 2012).

Tabla 2.10- Población en situación de pobreza en Chiapas, Campeche y Tabasco al año 2010. Fuentes: CONEVAL, 2012.

	Pobreza extrema	Pobreza moderada	Vulnerabilidad por carencia social	Vulnerabilidad por ingreso	No pobre y no vulnerable
Chiapas	38.3%	40.2%	13.2%	2.3%	5.9%
Campeche	13.6%	36.7%	25.6%	4.3%	19.8%
Tabasco	13.6%	43.7%	27.6%	4%	11.1%

Las estadísticas de pobreza anteriormente revisadas muestran que la pobreza extrema se encuentra principalmente en Chiapas y Guatemala, estableciendo relación con IDH bajo y por tanto, con población que se vive aún en zonas rurales.

Si bien es cierto que estas condiciones no son homogéneas para toda la región, es decir, lo que ocurre en Chiapas y Guatemala, no ocurre de la misma forma en Campeche y Tabasco, también es cierto, que de manera general sí se identifica un patrón en cuanto a las altas condiciones de pobreza para la RTMG, ya sea tanto en pobreza moderada, como en pobreza extrema y en alta vulnerabilidad a caer en la pobreza; además, del año 2002 al año 2013, sólo un 14% de la población en Guatemala logró salir de la pobreza, esto mientras que en el año 2010 para Chiapas solo un 5.9% de la población era no pobre y no vulnerable, un 11.1% en Tabasco y un 19.8% en Campeche, lo anterior muestra que cada vez menos población en la RTMG es no pobre, pero al mismo tiempo cada vez más población aumenta en cuanto a ser vulnerable de caer en la pobreza.

Entre las causas que permiten entender la incidencia de la pobreza se tienen el cambio climático, la falta de trabajo, la falta de estudios, la desigualdad social, y la mala gestión gubernamental. Estas causas traen consigo distintos efectos, tales como la migración, los altos costos de educación, abandono escolar, trabajo duro, trabajo infantil, falta de dinero, falta de valores y falta de oportunidades (PNUD, 2016). Estos efectos generados en las condiciones de pobreza, establecen una relación directa con la centralización del desarrollo en las zonas urbanas, lo que tiene una influencia directa en las actividades económicas que se llevan a cabo en la región, y cuya oferta al mismo tiempo promueve la migración.

De esta manera, la RTMG es una zona donde prevalece la pobreza, el rezago educativo y el atraso y vulnerabilidad social. Y si bien presenta cierta homogeneidad social, demográfica y étnica, también la presenta con respecto a las condiciones de vida precarias bajo las que gran cantidad de población vive, elementos que ponen de manifiesto la falta de un proceso adecuado para lograr el desarrollo social y económico de la región (Canales et al., 2010).

2.3.5 Actividades económicas

En la Tabla 2.11 se pueden observar las actividades económicas primarias, secundarias y terciarias que para el año 2010 se llevaban a cabo en la RTMG.

Tabla 2.11- Actividades económicas en la RTMG al año 2010. Fuentes: DENU, 2010 & Uso de suelo en Guatemala, 2010.

<p>Actividades primarias</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Acuacultura y piscicultura • Almacenamiento de productos agrícolas sin refrigeración • Apicultura • Beneficio del café, arroz, tabaco y otros productos agrícolas • Corte y empacado de carne de ganado, aves y otros animales • Cultivo de: aguacate, banano, cacao, cardamomo, caña de azúcar, cítricos, coco, coníferas y latifoliadas, cultivos permanentes arbóreos, flores, follaje, fresa, frijol, hortalizas (cebolla, lechuga, papa, repollo, zanahoria), hule, jocote, limón, loroco, macadamia, maíz, manía, mango, maushan,
-------------------------------------	--

	<p>melón, mora, palma africana, papaya, pastos, pejibaye, piña, rambután, sábila, salinas, sandía, te, tomate</p> <ul style="list-style-type: none"> • Despepite de algodón • Matanza de ganado, aves y otros animales comestibles • Otros cultivos no alimenticios en invernaderos y viveros • Pesca y captura de: anchoveta, camarón, crustáceos, moluscos, peces, sardina, túnidos y otras especies.
Actividades secundarias	<ul style="list-style-type: none"> • Acabado de productos textiles • Agroindustrias • Aserraderos • Cerrajerías • Complejos industriales • Confección de productos textiles, prendas de vestir y otros accesorios • Conservación de frutas y verduras • Corte y empacado de carne • Curtido y acabado de cuero y piel • Elaboración de alimentos, bebidas y aceites • Escombreras, vertederos o rellenos sanitarios y plantas de tratamiento • Fabricación de: accesorios, agroquímicos, artículos personales y para el hogar, herramientas para la construcción, herrería, joyería, madera, maquinaria, metales, orfebrería, productos manufactureros, utensilios, entre otros • Hidroeléctricas • Minería de: arena y grava para la construcción, carbón mineral, otras arcillas, piedra caliza, sal • Reparación de artículos para el hogar, automóviles, calzado, equipo eléctrico, llantas, madera, plantas industriales y otros
Actividades terciarias	<ul style="list-style-type: none"> • Actividades administrativas: actividades de seguridad nacional, administración pública en general, administración de aeropuertos, cementerios e instituciones de bienestar.

	<ul style="list-style-type: none"> • Agencias de: anuncios publicitarios, bienes públicos, cobranza, colocación, correo, noticiosas, publicidad, viajes • Alquiler de: autobuses, transporte, automóviles, equipo de cómputo, equipo de construcción, instrumentos musicales, bienes raíces, maquinaria, mesas y sillas • Organizaciones: agricultores, autotransporte de materiales para la construcción, civiles, comerciantes, laborales, prestadores de servicios, productores, religiosas • Comercio de: artículos, bebidas, blancos, botanas, calzado, carnes, cemento, cerveza, conservas, cueros y pieles, desechables, dulces, electrodomésticos, embutidos, envases, equipo de telecomunicaciones, fertilizantes, fibras, frutas y verduras, ganado y aves, joyería, juguetes, libros, madera, maquinaria, muebles, papelería, pescados, pintura, sombreros, vidrios, vinos. • Servicios de: alquiler, atención médica, banca de desarrollo, bibliotecas, deportivos, diseño, domésticos: agua, gas, luz, edición, educativos, entretenimiento, guarderías, hoteles, investigaciones, mantenimiento, nocturnos, recreativos, restaurantes, seguros de vida, supervisión de construcciones, telecomunicaciones, transmisión, transportes.
--	---

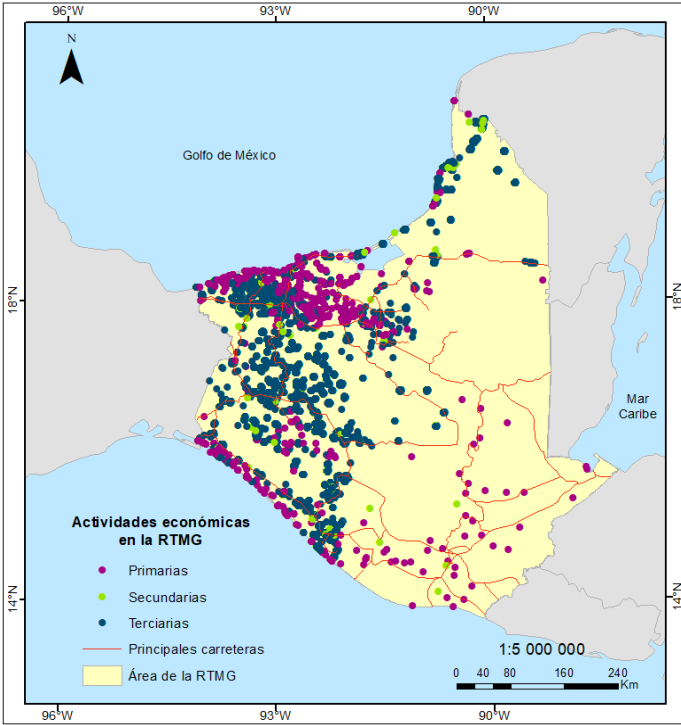
La Tabla 2.11 permite identificar la variedad en las actividades económicas que se llevan a cabo en esta región, que se refieren principalmente a ganadería, agricultura pesca, agroindustrias, fabricación, reparación, minería, así como agencias, organizaciones, comercio y otros servicios.

En el Mapa 2.7 se muestra la distribución de las actividades económicas diferenciando entre primarias, secundarias y terciarias. Se debe considerar que en varios de los sitios donde se llevan a cabo las actividades primarias, también se llevan a cabo las secundarias, y/o las actividades terciarias, es decir, los puntos de las distintas actividades económicas en el mapa se traslapan en varias ocasiones. También se logra identificar en el mapa que la mayoría de las actividades económicas se concentran

en Chiapas y Tabasco, otras menos en Campeche y muy pocas en el lado de Guatemala. Lo anterior no indica necesariamente que en Guatemala no se lleven a cabo actividades económicas, sino que esto puede responder a las fuentes de donde proviene la información sobre las actividades económicas de ese país.

Mapa 2.7- Distribución de las actividades económicas en la RTMG. Fuentes: Elaboración propia a partir de datos del DENUE, 2010 & Uso de suelo en Guatemala, 2010.

Tabla 2.12- Actividades económicas por sector en la RTMG. Fuentes: DENUE, 2010 & Uso de suelo en Guatemala, 2010.



Actividades económicas	Total de puntos en la RTMG	Porcentaje que representa en la RTMG
Primarias	3,725	1.48%
Secundarias	32,385	12.93%
Terciarias	214,194	85.59%
Total	250,304	100.00%

De manera general, en el Mapa 2.7 se identifica un patrón en la distribución de las actividades económicas en la región, mientras que las actividades primarias se distribuyen principalmente al noroeste, suroeste y un poco al sureste de la región, las actividades económicas secundarias lo hacen hacia el norte y el oeste. Con respecto a las actividades terciarias, estas se encuentran prácticamente solo al oeste de la región, por lo que la distribución de estas en el país de Guatemala es prácticamente nula, y se concentran por tanto en los estados de Chiapas, Tabasco y Campeche.

Si se revisa el Mapa 2.7 en conjunto con la Tabla 2.12, puede notarse que el hecho de que haya más actividades económicas del lado de México que del de Guatemala, no solo responde a la fuente de la información de donde esta proviene, sino que también contribuye a explicar el por qué es tan grande la migración desde Guatemala hacia México en busca de mejores oportunidades de trabajo y desarrollo, y que sea precisamente en Guatemala donde prácticamente las únicas actividades económicas sean las primarias, lo que responde a la condición de ruralidad que como ya se revisó, se vive principalmente en ese país.

La Tabla 2.12 muestra que de acuerdo con la información con la que se trabajó, las actividades económicas predominantes en la RTMG para el año 2010 fueron las terciarias, representando el 85.59%, seguidas de las secundarias en un 12.93%, y las primarias únicamente en un 1.48%. Estas estadísticas indicarían por tanto que la RTMG es una región con predominio de servicios y comercio.

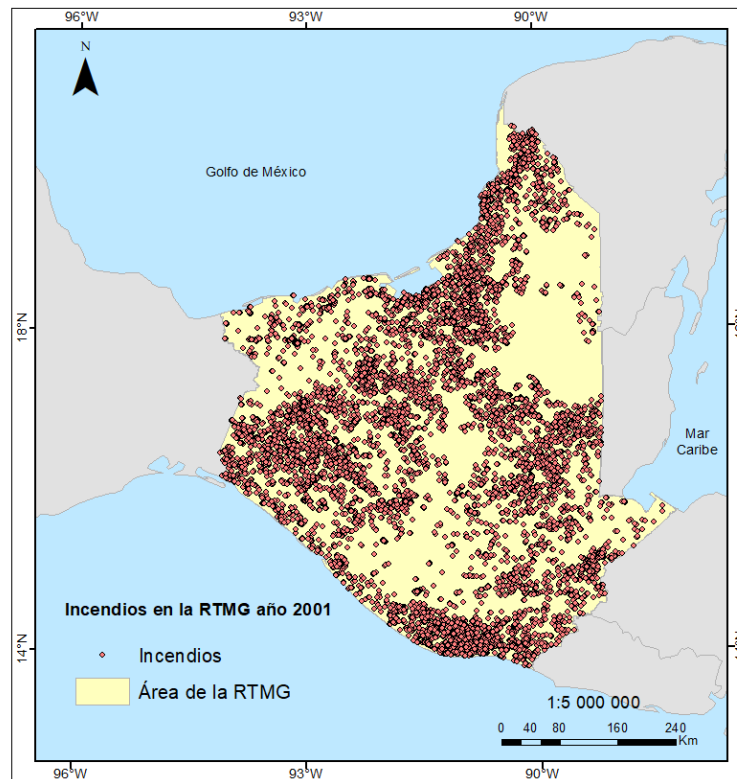
2.3.6 Incendios

La tercera causa de pérdida forestal en México son los incendios, las dos primeras son el cambio de uso de suelo y la tala ilegal. Los incendios traen consigo consecuencias, las cuales se reflejan principalmente en la pérdida de vidas humanas, pero también en la pérdida del capital natural (Reyes, 2018).

Las actividades agrícolas y ganaderas muchas veces pueden generar incendios para ser llevadas a cabo, así mismo, estos pueden ser generados de forma natural por volcanes, rayos, etcétera.

En el Mapa 2.8 se muestran los incendios que ocurrieron en la RTMG en el año 2001. Se presentaron un total de 9,836 ya fuese por causas naturales o antrópicas, y como se observa la mayor cantidad de estos se distribuyeron al oeste de la zona de estudio, es decir, en los estados correspondientes a México.

Mapa 2.8- Incendios ocurridos en la RTMG durante el año 2001. Fuentes: Active Fire Data, satélite MODIS, NASA, 2001.



2.3.7 Migración

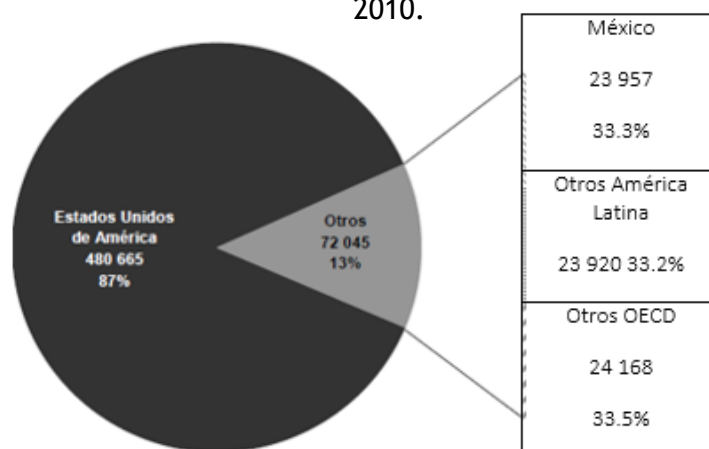
Como se mencionó con anterioridad, en la RTMG ocurren una serie de interacciones principalmente por la demanda de trabajo del sur de México y la oferta laboral de Guatemala y que manifiesta a través de la migración (FORDECYT, 2017).

La migración a nivel mundial es algo que va en aumento. A lo largo del tiempo los flujos migratorios de han dado por la cercanía geográfica que mantienen entre sí las regiones, sin embargo, distintos factores como comerciales, económicos, de conflictos, de inseguridad, de relaciones étnicas, y la trata de personas, han influido también (OIM, 2018).

La migración entre México y Centroamérica ocurre principalmente por cuatro causas: económicas, de violencia, de unificación familiar y de desastres naturales. Sin embargo, la migración que existe entre México y Guatemala es distinta a la que se establece con el resto de los países de Centroamérica (Figura 2.1). Entre México y Guatemala existe una migración circular, es decir, muchas personas van a trabajar a

los estados de Chiapas, Campeche, Tabasco, entre otros, y regresan a sus residencias de origen en Guatemala; en el caso de Honduras y El Salvador, así como otros países de Centroamérica, estos solo utilizan México como una zona de paso porque su objetivo final es llegar a los Estados Unidos (Canales et al., 2010).

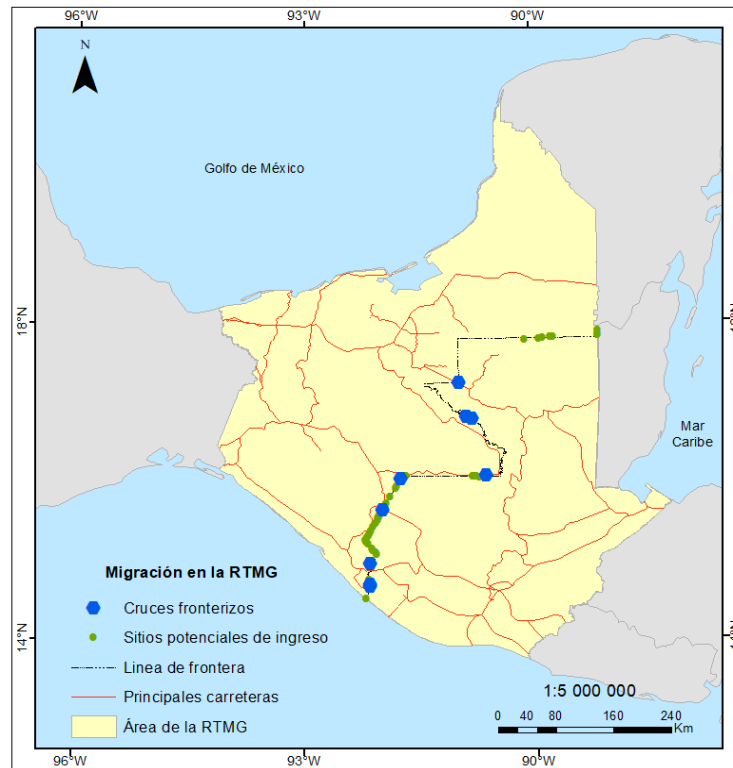
Figura 2.1- Emigración Guatemalteca según región de destino. Fuente: Canales et al., 2010.



Como se identifica en la Figura 2.1, para el año 2000 de los emigrantes guatemaltecos, un 87% se dirigía hacia Estados Unidos, el 13% restante se dirigía en primer lugar a OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, compuesto por 36 países del mundo) en un 33.5%, en segundo lugar a México (33.3%), y en tercer lugar, hacia otros lugares de América Latina (33.2%). Esto permite distinguir que desde ese año México ya era un destino importante para la migración proveniente de Guatemala.

La RTMG es una zona con gran dinámica de movimientos migratorios porque es precisamente en medio de esta donde se localiza la frontera México-Guatemala, de hecho, en ella existen puntos de intercambio oficiales, es decir, cruces fronterizos que ambos países reconocen (Mapa 2.9).

Mapa 2.9- Cruces fronterizos y sitios potenciales de ingreso a la frontera. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.



En la Tabla 2.13 se identifican las principales características de cada uno de los nueve cruces fronterizos que han sido reconocidos de forma oficial, así como las localidades que los integran tanto del lado de México como del de Guatemala.

Tabla 2.13- Cruces fronterizos de la RTMG. Fuente: Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.

Nombre del Cruce fronterizo	Localidades fronterizas en México	Localidades fronterizas en Guatemala	Características del cruce fronterizo
El Ceibo (Sueños de Oro (Mx) - El Ceibo (GT))	Sueños de Oro y Tenosique	El Naranja	Es un cruce vehicular por el cual circulan entre 30 y 40 unidades al día. Los fines de semana, se convierte en un cruce peatonal.
Frontera Corozal (Mx)	Lacanjá, Chancalá y Palenque	-----	Es un cruce peatonal cuyo flujo varía según la época del año, pero el rango oscila entre 20 y 120 personas diarias.
Bethel (Gt)	-----	La Libertad, Santa Elena, Flores y Ruinas de Tikal	Tipo de cruce fluvial. Varía la cantidad de personas que cruzan dependiendo la época del año. El promedio oscila entre 20 y 120 personas diarias.
Nuevo Orizaba (Mx) - Ingenieros (Gt)	El Carmen	Talismán	Es un cruce vehicular en el que circulan entre 20 y 30 unidades al día.
Carmen Xhan (Mx) - Gracias a Dios (Gt)	Lázaro Cárdenas, Trinitaria y Tecomán	Nenton, Camoja Grande, La Democracia y Huehuetenango	Cruce vehicular continuo, de entre 20 y 30 unidades por día.
Ciudad Cuauhtémoc (Mx) - La Mesilla (Gt)	Ciudad Cuauhtémoc, El Jocote y Frontera Comalapa	La Mesilla y La Democracia	Cruce migratorio peatonal, que es de carácter fluido y permanente. También es un cruce mecanizado, es decir, se transportan distintas unidades desde carácter turístico hasta

			transporte de cargas de alto tonelaje.
Puente Talismán	Ciudad Hidalgo	Tecún Umán	Cruce vehicular.
Puente Ing. Luis Cabrera	Ciudad Hidalgo	Tecún Umán	Cruce vehicular.
Puente Dr. Rodolfo Robles	Nueva Orizaba	Ingenieros y Playa Grande	Cruce vehicular.

Como se observa en el Mapa 2.9 y en la Tabla 2.13, existen en la RTMG un total de nueve cruces. Algunos de estos cruces fronterizos reciben un nombre en México (Mx) y otro en Guatemala (Gt), pero ambos países reconocen su existencia de forma oficial. Los cruces fronterizos existentes se localizan entre Chiapas, Tabasco y Guatemala, mas no sobre Campeche, esto indica que la migración se da principalmente hacia los dos primeros estados mencionados.

Así mismo, en el Mapa 2.9 también se identifican puntos de color verde que representan los sitios potenciales de ingreso a la frontera, es decir, sitios que, aunque no estén reconocidos de forma oficial, sí podrían considerarse como puntos para entrar a la frontera entre México y Guatemala, cabe mencionar que estos puntos se consideran a partir de la existencia de los principales caminos y carreteras en la RTMG. Al igual que los cruces fronterizos, los sitios potenciales de ingreso se encuentran en mayor medida del lado de Chiapas y Tabasco, sin embargo, de manera general toda la frontera presenta un destacable potencial de ingreso.

En la Tabla 2.13 se observan las localidades que son colindantes con los cruces fronterizos, tanto del lado de México como del de Guatemala; así mismo, se observan las características de cada uno de estos cruces. Al respecto de esto último, existen cinco cruces de tipo vehicular, un cruce peatonal, un cruce fluvial, y dos cruces que son tanto peatonales como vehiculares. Lo anterior muestra que la migración en la RTMG se realiza principalmente por medio de vehículos, donde el promedio varía de entre 20 y 30 unidades al día, y que pueden ser de unidades particulares, de unidades turísticas e inclusive de unidades de transporte de carga. Los cruces que son tanto vehiculares como peatonales también son importantes, ya sea que solo sean

peatonales los fines de semana o que sea de carácter fluido y permanente, como ocurre en el cruce Ciudad Cuauhtémoc-La Mesilla. En el cruce peatonal y en el fluvial, varía la cantidad de personas que cruza a lo largo del año, pero el promedio va desde 20 hasta 120.

Estos datos corroboran que la RTMG es una zona con una alta dinámica de migración, pero esta se considera un problema dado las condiciones de ilegalidad, la violencia, y la inseguridad que muchas veces traen consigo los migrantes; así mismo, este problema se considera que es de carácter regional, es decir, que no tiene mayor trascendencia para el resto de México (Canales et al., 2010).

Los elementos anteriores causan que se generen políticas que no resultan como esperaban, por ejemplo, aquellas políticas que México crear para reforzar el control fronterizo, pero que, al mismo tiempo, esto hace que los migrantes procedentes principalmente de Guatemala, sean criminalizados, pierdan sus derechos, y que con ello se afecte también a aquellos migrantes que solo son temporales, o que vienen a generar algún bien al país; es por ello que abunda la necesidad de organizaciones civiles que velen por los derechos de los migrantes, ya que actualmente estas son muy pocas y están sobre demandadas (Canales et al., 2010).

De esta manera, la migración genera cambios y conflictos, y no solo a la población de México que son quienes reciben a los migrantes, sino también a los migrantes que salen de Guatemala, ya que atraviesan complejidades como violencia, discriminación, entre otras dificultades (Canales et al., 2010).

Para el año 2015 con respecto al movimiento migratorio de la población de Guatemala, se tuvieron las estadísticas de la siguiente Tabla.

Tabla 2.14- Migración México-Guatemala para el año 2015. Fuente: Encuestas sobre migración en las fronteras norte y sur en México (EMIF), COLEF, 2015.

Procedencia	Total de población	Total de Hombres y Mujeres	Grupo de edad	Tipo de localidad de residencia	Tiempo que permanencia en México	Razón de su migración
De Guatemala a México	725,401	HOMBRES- 660,021 (91%) MUJERES- 65,380 (9%)	31.6% de 20 a 29 años 29.6% de 30 a 39 años 38.8% otras edades	Urbana: 23.7% Rural: 76.3%	Permanecerá: 19.5% hasta 24 horas 80.5% más de un día (donde 42.8% de un mes a un año).	El 99.9% trabajará 73.3% trabajará en el sector agropecuario y un 9.3% en el sector de servicios.
De México a Guatemala (retorno)	566,979	HOMBRES- 505,092 (89.1%) MUJERES- 61,887 (10.9%)	31.8% de 20 a 29 años 28.3% de 30 a 39 años 39.9% otras edades	Urbana: 26.8% Rural: 73.2%	Permaneció: 22.9% hasta 24 horas 77.1% más de un día (donde 40.7% de un mes a un año).	El 98.7% si trabajó en México 73.1% trabajó en el sector agropecuario y un 9.5% en el sector comercio.

La Tabla 2.14 deja ver la dinámica de la migración circular, es decir, los guatemaltecos que salen de su país para llegar a México y los que salen de México para volver a su país Guatemala. Las personas que salen de Guatemala representan el 56.12%, mientras que quienes vuelven a Guatemala son el 43.87%, lo que indica que son más los migrantes permanentes que los temporales. En ambos casos prácticamente el 90% de los migrantes son hombres y solo el 10% son mujeres, ello indica que son las mujeres quienes se quedan en casa muy probablemente para la realización de tareas domésticas.

El grupo de edad predominante en esta migración es el de 20 a 29 años, seguido del grupo de 30 a 39 años, esto permite ver que en general, se trata de grupos de

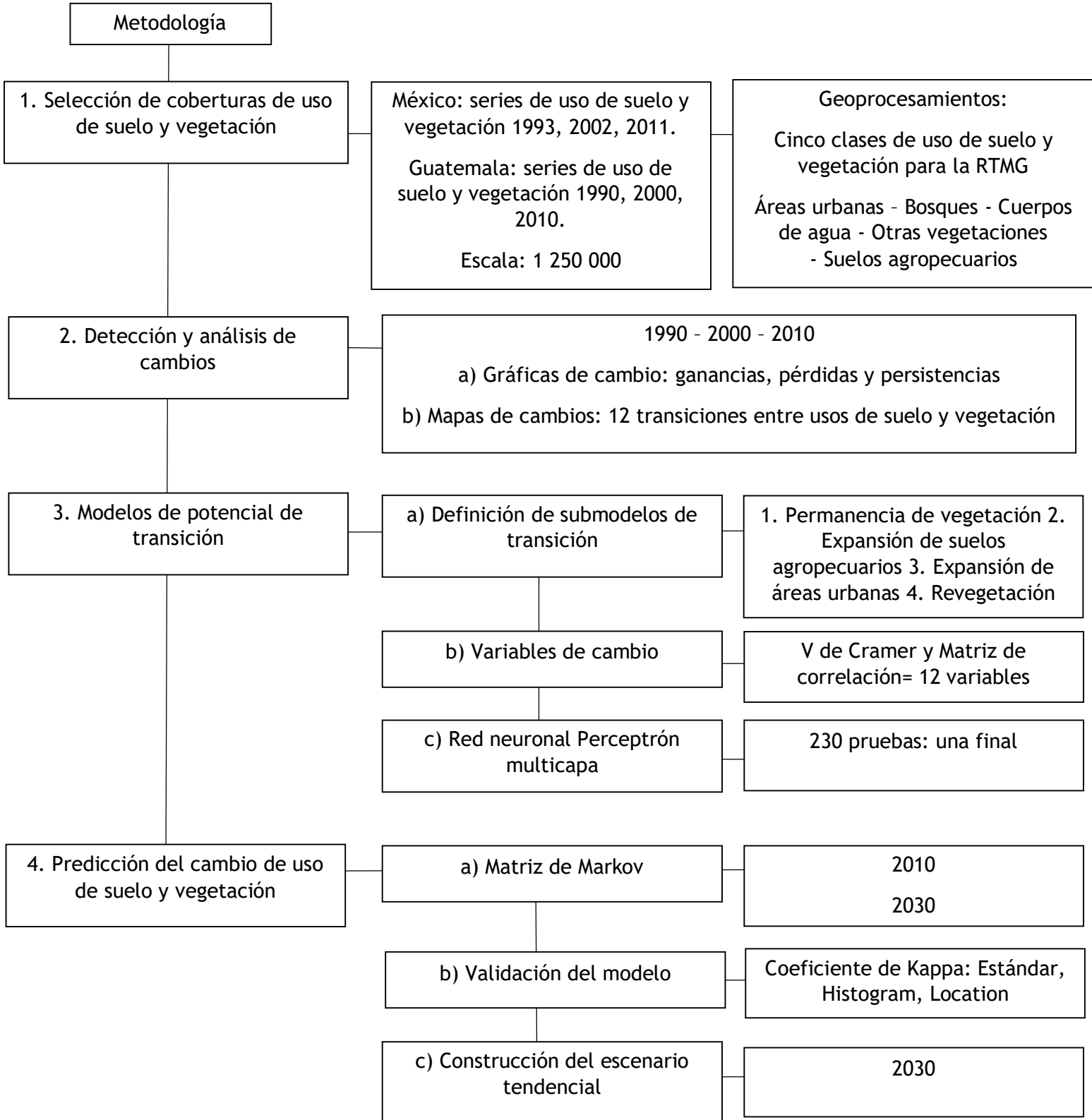
población joven y que por tanto se encuentran en condiciones aptas para trabajar. Así mismo, en la tabla se observa que, de acuerdo al tipo de localidad, en ambos casos, más del 70% de los migrantes provienen de localidades rurales, lo que podría indicar que es en esas localidades donde las condiciones de precariedad y pocas oportunidades para el desarrollo, orillan a las personas a buscar otra salida, la cual la toman a través de la migración para llegar a las zonas urbanas en busca de mejor calidad de vida.

Con respecto al tiempo de permanencia en México, en ambos casos alrededor de un 20% de la población permanecerá hasta 24 horas, es decir, van y regresan a sus residencias. Sin embargo, alrededor del 80% restante de la población, piensa permanecer más de un día, y de ese 80%, un 40% indicó que pasarán entre un mes y un año en México; es con base en ello que se determina que predomina la población cuya migración no es circular, sino que permanecen un buen tiempo en México; finalmente, en ambos casos la razón de su permanencia, indicó en un 99% que vienen a México para trabajar, predominantemente en el sector agropecuario, seguido del sector servicio y comercios.

Lo anterior se relaciona con las actividades económicas predominantes en la RTMG, si bien se dijo que con base en los insumos que se trabajó se muestra que la región es predominantemente de actividades terciarias, es decir, de servicios y comercio, la migración indica que la mayoría de la población guatemalteca viene a México a trabajar en actividades económicas primarias, y que solo en un alrededor del 9% lo viene a hacer en actividades terciarias.

De esta manera, las relaciones entre los elementos revisados en este capítulo, permitieron comprender que las características que definen a la RTMG, influyen directamente en los cambios de uso de suelo.

CAPÍTULO 3: Metodología



La metodología realizada para cumplir los objetivos de esta investigación fue dividida en cuatro secciones: 1- Selección de coberturas de uso de suelo y vegetación. 2- Detección y análisis de cambios, constituida por gráficas y mapas de cambio. 3- Modelos de potencial de transición, dentro de lo que se encuentra la definición de submodelos de transición, las variables de cambio y la ejecución de los submodelos de transición a través de la red neuronal perceptrón multicapa y, 4- Predicción del cambio de uso de suelo y vegetación, que está integrado por la matriz de Markov, la validación del modelo y la construcción del escenario tendencial. Cada una de estas secciones, serán analizadas a continuación.

3.1 Selección de coberturas de uso de suelo y vegetación

En este apartado se definieron los usos de suelo y vegetación de los años 1990, 2000 y 2010 que se utilizarían para modelar hacia el año 2030.

El primer paso fue obtener los insumos necesarios el modelo, es decir, los archivos tipo shapefile del uso de suelo para los estados de Chiapas, Campeche y Tabasco en México y para todo el país de Guatemala. En el caso de México, las series de uso de suelo fueron obtenidas de Plataforma de Servicios de Información Espacial de CentroGeo en escala 1:250 000 y correspondieron a las series II, III y V del INEGI (años 1993, 2002, y 2011, respectivamente). En el caso de Guatemala, las series de uso de suelo y vegetación se obtuvieron del Atlas Centroamericano para la Gestión Sostenible del Territorio y correspondieron a los años de 1990, 2000 y 2010, y también se utilizó la escala 1:250 000. Esta escala fue la seleccionada, dado que en ella se encontraban disponibles todos los insumos utilizados de las series de uso de suelo y vegetación.

La proyección con la que se realizaron los procesos correspondientes fue la UTM 15 Norte, lo cual quedó definido a partir de hacer una revisión de distintos mapas correspondientes a Chiapas, Campeche, Tabasco, así como al país de Guatemala, donde se observó que prácticamente todos ellos utilizaban esa proyección.

Una vez obtenidos los insumos, por medio del software ArcMap se realizaron los siguientes geoprosesamientos:

- ✓ Recorte a las series de uso de suelo y vegetación para los estados de Chiapas, Campeche y Tabasco y para el país de Guatemala.
- ✓ Clasificación por categorías. Al analizar las tablas de atributos y las clases de uso de suelo para los tres estados correspondientes México y para el país de Guatemala, se identificaron diferencias entre estas dada la clasificación base con la que fueron elaboradas y las fuentes de donde procedían.
- ✓ Reclasificación por categorías. A partir de analizar las distintas clases existentes de uso de suelo y vegetación, se realizó una homologación para que toda la RTMG tuviera las mismas clases.

La reclasificación por categorías se dio en función de los insumos, es decir, aunque se considera que se homologaron usos de suelo que son muy distintos, por ejemplo en el caso de bosques y selvas, dadas las clasificaciones disponibles de usos de suelo y vegetación del país de Guatemala y con el objetivo de que toda la región de estudio tuviera las mismas clases para todos los años, fue que se decidió homologar la clasificación de México acorde con la clasificación de Guatemala, y que así toda la RTMG mantuviera cinco clases de uso de suelo y vegetación finales: bosques, áreas urbanas, cuerpos de agua, otras vegetaciones y suelos agropecuarios (Tabla 3.1).

Tabla 3.1- Reclasificación por categorías de uso de suelo y vegetación para Chiapas, Campeche, Tabasco y Guatemala. Fuentes INEGI & CATHALAC.

Chiapas, Campeche y Tabasco Serie II: 1993	Guatemala Serie del año 1990
Agricultura (riego y humedad) Agricultura de temporal	Suelos agropecuarios
Área sin vegetación aparente	Áreas urbanas
Asentamiento humano	Bosques
Bosque de coníferas primario	Cuerpos de agua
Bosque de coníferas secundario	Otras vegetaciones
Bosque de coníferas-latifoliadas primario	
Bosque de coníferas-latifoliadas secundario	
Bosque de latifoliadas primario	
Bosque de latifoliadas secundario	
Bosque mesófilo de montaña primario	
Bosque mesófilo de montaña secundario	
Cuerpos de agua	
Matorral xerófilo primario	
Matorral xerófilo secundario	
Otro tipo de vegetación	
Pastizal inducido o cultivado	
Pastizal natural primario	
Selva caducifolia y subcaducifolia primario	
Selva caducifolia y subcaducifolia secundario	
Selva perennifolia y subperennifolia primario	
Selva perennifolia y subperennifolia secundario	
Vegetación hidrófila primario	
Vegetación hidrófila secundario	

Chiapas, Campeche y Tabasco Serie III: 2002	Guatemala Serie del año 2000
Acuícola	Agricultura
Agricultura (riego y humedad)	Áreas urbanas
Agricultura de temporal	Bosques
Área sin vegetación aparente	Cuerpos de agua
Asentamiento humano	Otras vegetaciones
Bosque de coníferas primario	
Bosque de coníferas secundario	
Bosque de coníferas-latifoliadas primario	
Bosque de coníferas-latifoliadas secundario	
Bosque de latifoliadas primario	
Bosque de latifoliadas secundario	
Bosque mesófilo de montaña primario	
Bosque mesófilo de montaña secundario	
Cuerpos de agua	
Otro tipo de vegetación	
Pastizal inducido o cultivado	
Pastizal natural primario	
Plantación forestal	
Selva caducifolia y subcaducifolia primario	
Selva caducifolia y subcaducifolia secundario	
Selva perennifolia y subperennifolia primario	
Selva perennifolia y subperennifolia secundario	
Sin dato	
Vegetación hidrófila primario	
Vegetación hidrófila secundario	

Chiapas, Campeche y Tabasco Serie V: 2011	Guatemala Serie 2010
Acuícola	Arbustales
Agricultura (riego y humedad)	Áreas urbanas
Agricultura de temporal	Área de escasa vegetación
Área sin vegetación aparente	Bosque coníferas
Asentamiento humano	Bosques latifoliados
Bosque de coníferas primario	Bosques mixtos
Bosque de coníferas secundario	Cuerpos de agua
Bosque de coníferas-latifoliadas primario	Cultivos anuales
Bosque de coníferas-latifoliadas secundario	Cultivos permanentes
Bosque de latifoliadas primario	Humedales
Bosque de latifoliadas secundario	Mangle
Bosque mesófilo de montaña primario	Páramos
Bosque mesófilo de montaña secundario	Pastos
Cuerpos de agua	Sabanas
Sin Dato	Áreas agrícolas heterogéneas
Otro tipo de vegetación	
Pastizal inducido o cultivado	
Pastizal natural primario	
Pastizal natural secundario	
Plantación forestal	
Selva caducifolia y subcaducifolia primario	
Selva caducifolia y subcaducifolia secundario	
Selva perennifolia y subperennifolia primario	
Selva perennifolia y subperennifolia secundario	
Vegetación hidrófila primario	
Vegetación hidrófila secundario	

Es así como a partir de la homologación de los usos de suelo y vegetación para los tres años, se obtuvieron finalmente cinco clases en la RTMG:

1. Áreas urbanas
2. Bosques
3. Cuerpos de agua
4. Otras vegetaciones
5. Suelos agropecuarios

- ✓ Fusionar (Merge). Obtenido lo anterior, se realizó un merge de los usos de suelo y vegetación entre Chiapas, Campeche y Tabasco con Guatemala, para constituir así de forma espacial la RTMG como una unidad.

- ✓ **Disolver (Dissolve).** Se disolvieron las clases de uso de suelo y vegetación existentes para que la tabla de atributos estuviera limpia y quedara compuesta únicamente por las cinco clases de uso de suelo y vegetación ya definidas.

- ✓ **Proyectar (Project).** Se realizó el ajuste de proyección para la zona de estudio, donde se seleccionó la Proyección Universal Transversal de Mercator para la zona 15 norte.

- ✓ **Generalización cartográfica (Cuadro 3.1).** Debido a que la fusión realizada entre los estados de Chiapas, Campeche y Tabasco con Guatemala no unió de forma correcta los usos de suelo y vegetación, es decir, se crearon huecos en la frontera terrestre e hídrica, fue necesario realizar una generalización cartográfica que permitiera eliminar estos huecos para que los usos de suelo y vegetación quedaran espacialmente unidos y bien definidos.

Tabla 3.2- Geoprocesamientos para la generalización cartográfica en la RTMG. Fuente: elaboración propia.



3.2 Detección y análisis de cambios

A partir de esta sección, todos los procesos se realizaron por medio del software Terrset -Monitoreo Geoespacial y Sistema de Modelado (*Geospatial Monitoring and Modeling System*)-, particularmente a través de su herramienta Modelador de Cambio de Suelo (*Land Change Modeler -LCM-*).

Terrset es un programa que incorpora SIGs con herramientas de procesamiento de imágenes, para generar una serie de aplicaciones que se enfocan en monitorear y modelar el sistema terrestre para el desarrollo sostenible (Eastman, 2012). La herramienta *Land Change Modeler* por su parte, se utiliza dentro de *Terrset* para analizar los cambios del uso del suelo, a través de modelar relaciones entre variables explicativas y proyectar esos cambios a futuro (Eastman, 2012).

Ahora bien, la detección y el análisis de cambios, es un proceso que sirve para evaluar cuales son los cambios de usos de suelo y vegetación que se han presentado en distintas fechas, lo cual se expresa a través de gráficas de cambios y de un mapa de cambios.

Las gráficas de cambio identifican las cantidades de uso de suelo y vegetación que se han perdido, es decir, el área que cambió de un uso de suelo a otro; las que se han ganado, que se refiere a aquellas que han sido recuperadas por parte de un uso de suelo; y las áreas persistentes, que son las que no han cambiado su uso y, por tanto, se mantienen.

Los resultados de estas gráficas se muestran de distintas formas: ganancias y pérdidas por categoría de uso de suelo, el cambio neto por categoría, y el de cambio neto (Eastman, 2012). LCM arroja los resultados de ganancias y pérdidas por uso de suelo y vegetación, pero para obtener las persistencias, fue necesario elaborar un mapa de persistencias de modo que así se tuvieran todos los datos para construir las gráficas de cambios.

El mapa de cambios por su parte, representa de forma espacial los cambios experimentados en los usos de suelo y vegetación que dieron cuenta las gráficas de

cambios, a través de mostrar las transiciones existentes entre los distintos usos de suelo. También puede haber mapas que expresen los cambios con respecto a las persistencias, ganancias y pérdidas, de transición de un uso de suelo a otro y de intercambios entre los distintos usos de suelo (Eastman, 2012).

Debido a que la RTMG fue trabajada en la escala 1:250 000, el Área Mínima Cartografiada (AMC), correspondería a 125 hectáreas, sin embargo, al aplicar una fórmula de generalización cartográfica (Tobler, 1987)) se identificó que lo más adecuado era trabajar con un AMC de 1km² o bien, de 100 hectáreas (Salinas and Ramón, 2013). A partir de esta consideración, se realizó el mapa de cambios, y dado que ignorar transiciones menores a 100 hectáreas no otorgaba ningún resultado a causa de la gran área de la región, fue por lo que se definió no ignorar ninguna transición, lo que dio como resultado 20 transiciones finales en los mapas de cambios (Mapas 4.2).

Para iniciar los procedimientos de modelación en Terrset, se convirtieron los tres shapes que se tenían de los usos de suelo y vegetación para la RTMG correspondientes a los años de 1990, 2000 y 2010 a raster, para los que se definió un tamaño de celda de 100 X 100 dada el AMC anteriormente explicada. Este tamaño de celda en automático dio al raster un total de 6337 columnas y 7868 filas. Por su parte, la asignación de valores de clase en los píxeles de borde de los polígonos, fue un proceso automático que resulto de la rasterización de los insumos.

Teniendo los archivos raster, estos fueron transformados a formato ASCII para que el software Terrset los pudiera abrir y procesar.

Posteriormente, por medio de la herramienta LCM se introdujo cada uno de los archivos de uso de suelo y vegetación en formato ASCII para los años de 1990, 2000 y 2010, y los cuales fueron convertidos con el software a un formato ArcRaster. Con cada uno de estos se pudo observar en LCM un mapa que mostraba las distintas clases de uso de suelo y vegetación existentes, en donde se especificaron las cinco categorías finales de uso de suelo y vegetación: áreas urbanas, bosques, cuerpos de agua, otras vegetaciones y suelos agropecuarios; de esta forma ya se tuvieron

finalmente en el software los tres mapas de usos de suelo y vegetación. El análisis de cambios se realizó primero para los años de 1990 y 2000 (Gráfica 4.1), posteriormente, para los años de 1990 y 2010 (Gráfica 4.2), y por último para los años de 1990 y 2030 (Gráficas 4.3), lo anterior con la finalidad de observar con mayor claridad los cambios presentados a corto plazo en cuanto a las ganancias, pérdidas y persistencias de los usos de suelo y vegetación entre las distintas fechas, y de revisar la permanencia de las 20 transiciones entre los diferentes años de análisis.

3.3 Modelos de potencial de transición

3.3.1 Definición de submodelos de transición

Obtenidas las transiciones del mapa de cambios, se definieron los submodelos de transición.

Como se vio previamente, el mapa de cambios dio como resultado 20 transiciones entre los usos de suelo y vegetación, y dado que no todas eran significativas, además de que se mejoraría la claridad visual, fue por lo que se optó por reducir el número de transiciones para los submodelos a construir, para ello se realizó una generalización cartográfica, en el caso de bosques y vegetación se aplicó a los polígonos que tuvieran un área menor o igual a 50 hectáreas; para el resto de los usos de suelo, tales como cuerpos de agua, suelos agropecuarios y áreas urbanas, se aplicó a polígonos de área menor o igual a 25 hectáreas, del resultado de este proceso se obtuvieron las siguientes estadísticas:

Tabla 3.3- Estadísticas de las transiciones obtenidas entre los usos de suelo y vegetación.
Fuente: elaboración propia.

Número de Transición	Transición	Polígonos	Valor Mínimo (has)	Valor Máximo (has)	Suma (has)	Promedio (has)	Desviación estándar
1	Áreas urbanas a bosques	3	54	93	210	70.00	16.67
2	Áreas urbanas a Otras vegetaciones	13	51	82	807	62.07	10.90
3	Áreas urbanas a Suelos agropecuarios	5	28	149	368	73.60	45.58
4	Bosques a Áreas urbanas	91	26	349	6,518	71.62	61.47
5	Bosques a Cuerpos de agua	244	26	264	13,598	55.72	38.74
6	Bosques a Otras vegetaciones	3,414	51	90,501	682,758	199.98	1,622.27
7	Bosques a Suelos agropecuarios	6,091	26	54,794	1,419,399	233.03	981.46
8	Cuerpos de agua a Bosques	122	51	488	13,272	108.78	75.48
9	Cuerpos de agua a Otras vegetaciones	84	52	1,133	13,121	156.20	187.78
10	Cuerpos de agua a Suelos agropecuarios	133	26	4,091	12,231	91.96	351.33
11	Otras vegetaciones a Áreas urbanas	91	26	6,029	15,052	165.40	637.49
12	Otras vegetaciones a Bosques	240	51	2,715	55,275	230.31	324.58
13	Otras vegetaciones a Cuerpos de agua	294	26	3,617	35,784	121.71	308.98
14	Otras vegetaciones a Suelos agropecuarios	509	26	41,866	162,649	319.54	2,369.87
15	Suelos agropecuarios a Áreas urbanas	147	26	739	9,112	61.98	72.34
16	Suelos agropecuarios a Bosques	1,682	51	3,845	363,918	216.36	315.31
17	Suelos agropecuarios a Cuerpos de agua	121	26	433	8,431	69.67	73.34
18	Suelos agropecuarios a Otras vegetaciones	236	51	3,960	61,451	260.38	404.90
19	Cuerpos de agua a Áreas urbanas	86	1	50	454	5.27	10.76
20	Áreas urbanas a Cuerpos de agua	111	1	40	366	3.29	5.37

Obtenidos los datos de la tabla anterior, se decidió eliminar aquellas transiciones cuyo promedio fuera menor a 100 hectáreas, dada el AMC de la RTMG de 100 hectáreas. Dentro de esto se mantuvo una excepción para el caso de las áreas urbanas, ya que, aunque estas obtuvieron un promedio menor a 100 hectáreas, se considera que son importantes a tomar en cuenta debido a que sí han tenido un crecimiento notorio a través de los años, el cual influye en el comportamiento del resto de los usos de suelo.

Así, se eliminaron en total ocho transiciones: áreas urbanas a bosques, áreas urbanas a otras vegetaciones, áreas urbanas a suelos agropecuarios, bosques a cuerpos de agua, cuerpos de agua a suelos agropecuarios, suelos agropecuarios a cuerpos de agua, cuerpos de agua a áreas urbanas y áreas urbanas a cuerpos de agua. Lo anterior dejó un total de 12 transiciones finales que fueron agrupadas en cuatro submodelos: permanencia de vegetación, expansión de suelos agropecuarios, expansión de áreas urbanas y revegetación (Tabla 4.2), los cuales fueron definidos a partir de la tabla de estadísticas anterior, por la predominancia de las transiciones, y porque los submodelos para ser explicados compartían entre sí mismas variables de cambio.

3.3.2 Variables de cambio

Las variables, indicadores o impulsores de cambio “drivers”, son las condiciones biofísicas y sociales así como los procesos y otros elementos que puedan guardar relación con el sistema suelo, por ejemplo, el uso, la cobertura, la función del suelo, la densidad de ocupación, el manejo de las tierras, la tenencia, su valor, etcétera (National Research Council, 2014), que incitarán a que ocurra el cambio en el uso del suelo, y que a su vez serán capaces de explicar el porqué de la ubicación de los nuevos cambios en una región determinada (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013).

Las variables de cambio deben elegirse siempre y cuando estas se manifiesten a través un patrón espacial que se considere tengan influencia en donde están ocurriendo los principales cambios en los usos del suelo, es por ello que reciben el nombre de variables de aptitud o idoneidad, y suelen oscilar entre un total de 6 y 15 (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013). Existen dos tipos de variables:

- ✓ Biofísicas: altitud, pendiente, temperatura, precipitación, energía del relieve, etcétera.
- ✓ Socioeconómicas: distancia a núcleos poblacionales, principales carreteras, precios del suelo, distancia entre los usos del suelo, densidad de población, etcétera (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013).

La elección de las variables de cambio por su aptitud se determina por medio de pruebas de correlación, tal es el caso de la prueba V de Cramer, la cual es un test de correlación que calcula la fuerza de relación entre esas variables, y las presenta en una tabla de contingencia mayor a 2x2.

La prueba V de Cramer toma valores entre 0 y 1, donde 0 es no significativo y 1 es significativo, en general, las variables que tienen una V de Cramer de aproximadamente 0.15 o superior se consideran útiles, y aquellas con valores de 0.40 o superiores se consideran como muy buenas (Eastman, 2012).

Una V de Cramer alta indica que el valor explicativo potencial de la variable es bueno, sin embargo, esto no garantiza el desempeño de la variable, ya que no puede determinar cuáles serán los requisitos matemáticos según el modelo que se esté utilizando, y tampoco logra determinar la complejidad de esa relación, sin embargo, una V de Cramer baja indica con certeza que la variable debe ser descartada (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013).

Para el caso de esta tesis, se fueron probando distintas variables que pudieran fungir como variables de cambio, es decir, como aquellas que están provocando los cambios en los usos de suelo y vegetación en la RTMG.

Todas las variables se obtuvieron en formato shapefile para posteriormente ser transformadas a formato raster con un tamaño de celda de 100 por 100, y un total de 6337 filas y 7868 columnas, de modo que quedaron definidos de forma igual que como se hizo con los raster de los insumos de uso de suelo y vegetación; posteriormente se hizo la transformación a formato ASCII, y finalmente a formato ArcRaster -método que ya se explicó anteriormente- para que fueran compatibles con el software

Terrset. Las variables de cambio que se probaron en esta investigación fueron un total de 35 (Tabla 3.4).

Tabla 3.4- Variables de cambio probables para explicar los cambios de uso de suelo y vegetación en la RTMG y su coeficiente V de Cramer. Fuente: elaboración propia.

Variables biofísicas	V de Cramer
Distancia a bosques	0.2962
Distancia a otras vegetaciones	0.2940
Altitud	0.2422
Distancia a cuerpos de agua	0.2230
Distancia a lagos	0.2041
Pendiente	0.1779
Distancia a cuencas	0.1686
Energía del relieve	0.1654
Índice de Posición Topográfica	0.1595
Rugosidad	0.1575
Orientación	0.1572
Curvatura	0.1550
Distancia a volcanes activos	0.1432
Sombreado	0.1194
Distancia a ríos	0.0905
Variables antrópicas	V de Cramer
Probabilidad de evidencia	0.6750
Distancia a suelos agropecuarios	0.3022
Distancia a áreas urbanas	0.2649
Distancia a actividades económicas terciarias	0.2486
Distancia a actividades económicas primarias	0.2466
Distancia a localidades urbanas	0.2351
Distancia a actividades económicas	0.2288
Distancia a actividades económicas secundarias	0.2145
Distancia a localidades rurales	0.2039
Distancia a cabeceras municipales	0.1957
Distancia a localidades	0.1912
Distancia a cultivos de café	0.1804
Distancia a carreteras	0.1628
Distancia a capitales	0.1580
Distancia a sitios potenciales de ingreso por línea fronteriza	0.1571
Distancia a cultivos temporales y permanentes	0.1507
Distancia a incendios	0.1270
Tercera polinomial de bosques a suelos agropecuarios	0.1270
Densidad de población	0.1008
Distancia a cruces fronterizos	0.0675

Todas las variables biofísicas y socioeconómicas, fueron consideradas tanto en su forma discreta como continua, buscando con ello obtener mejores resultados. Así mismo, todas fueron consideradas como estáticas, es decir, como que no cambiaban en el tiempo, ello dada la baja disponibilidad de información.

La selección de las variables de cambio que serían las definitivas para el modelo, se realizó a partir de los siguientes criterios:

- ✓ Aquellas que tuvieran un índice de V de Cramer más alto no solo en el resultado general de la V de Cramer, sino también en la V de Cramer que se obtuvo por cada uno de los usos de suelo y vegetación.
- ✓ A partir de realizar una matriz de correlación entre las variables que con base en el resultado V de Cramer fueran las más importantes para explicar el cambio de uso de suelo, ello además sirvió para obtener información sobre las variables redundantes entre sí (Tabla 3.5).

Tabla 3.5- Matriz de correlación entre las variables de cambio consideradas más importantes. Fuente: elaboración propia.

	Act terciarias	Loc urbanas	Act económico	Act secundar	Loc rurales	Act primarias	Cuencas	Volcanes	Incendios	Altitud	Cuerpos de agua	Carretera	Sitios pot de ingreso	IPT
Act terciarias	1													
Loc urbanas	0.813	1												
Act económico	0.762	0.805	1											
Act secundar	0.356	0.432	0.845	1										
Loc rurales	-0.269	0.134	0.398	0.726	1									
Act Primarias	-0.223	-0.556	-0.239	-0.159	-0.268	1								
Cuencas	-0.476	-0.590	-0.051	0.463	0.511	0.310	1							
Volcanes	0.515	0.150	0.081	-0.315	-0.740	0.567	-0.497	1						
Incendios	-0.390	-0.711	-0.231	0.061	-0.003	0.901	0.688	0.211	1					
Altitud	-0.306	-0.468	-0.415	-0.126	-0.081	-0.313	0.452	-0.525	-0.002	1				
Cuerpos de agua	-0.517	0.058	-0.026	0.208	0.798	-0.462	0.137	-0.790	-0.312	-0.054	1			
Carretera	-0.276	0.255	-0.198	-0.329	0.217	-0.434	-0.552	-0.257	-0.596	-0.357	0.712	1		
Sitios pot de ingreso	-0.914	-0.805	-0.658	-0.166	0.336	0.048	0.677	-0.703	0.355	0.626	0.459	0.032	1	
IPT	-0.066	0.344	0.435	0.670	0.871	-0.689	0.310	-0.850	-0.404	0.185	0.761	0.258	0.251	1

Obtenido lo anterior, fue como se eligieron las 12 variables finalmente seleccionadas para el modelo (Tabla 3.6).

Tabla 3.6- Variables de cambio seleccionadas para el modelo y su coeficiente V de Cramer. Fuente: elaboración propia.

Variable de cambio	General V de Cramer
1. Probabilidad de Evidencia	0.6750
2. Distancia a actividades económicas terciarias	0.2486
3. Distancia a actividades económicas primarias	0.2466
4. Altitud	0.2422
5. Distancia a localidades urbanas	0.2351
6. Distancia a cuerpos de agua	0.2230
7. Distancia a actividades económicas secundarias	0.2145
8. Distancia a localidades rurales	0.2039
9. Distancia a carreteras	0.1628
10. Distancia a sitios potenciales de ingreso por línea fronteriza	0.1571
11. Índice de Posición Topográfica (IPT)	0.1595
12. Incendios	0.1270

Donde coeficiente V de Cramer:

0	Sin significancia
0.01 - 0.14	Poco significativo
0.15 - 0.39	Significativo
0.40 y +	Muy significativo

Fuente: Eastman, 2012.

1. La probabilidad de evidencia, es una variable que se obtuvo por medio LCM en el apartado de Utilidad de Transformación de la variable *-Variable Transformation Utility-*, en donde se seleccionó el tipo de transformación de Probabilidad de evidencia *-Evidence Likelihood-*, dentro de lo cual se estableció como capa de transición el mapa de cambios de uso de suelo, y como variable de entrada la capa de uso de suelo y vegetación para el año de 1990. La utilidad de esta variable radica en que transforma el resto de las variables categóricas o continuas agrupadas, de acuerdo con examinar la frecuencia relativa de los píxeles que pertenecen a las diferentes categorías en el caso de que se presentara algún cambio, es decir, muestra la probabilidad de cada uno de los usos de suelo de cambiar con base en tendencias pasadas (Eastman, 2012).

2. La distancia a actividades económicas terciarias es una variable que fue obtenida de la capa de actividades económicas creada a partir de la unión de la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del INEGI, para los estados de Chiapas, Campeche y Tabasco en México, con un shapefile de uso de suelo y vegetación del año 2010 para Guatemala. A partir de la información recopilada, se realizó una clasificación donde se consideraron a las actividades terciarias como aquellas que incluyen transporte, comercio y servicios. A los puntos de las actividades terciarias para la RTMG, se les calculó la distancia euclidiana y se definieron para esta y el resto de las variables, las características mencionadas anteriormente para los raster a procesar, es decir, un tamaño de celda de 100x100, y un total de 6337 columnas y 7868 filas.

3. La distancia a actividades económicas primarias es una variable antrópica para la obtención de la cual se realizó el mismo procedimiento que para la variable de actividades económicas terciarias, pero en este caso se consideraron como actividades económicas primarias a las que incluían agricultura, ganadería y pesca.

4. La altitud es una variable que se obtuvo a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) proveniente de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza 2018, y el cual fue recortado a la zona que cubría la RTMG.

5. La distancia a localidades urbanas es una variable que fue obtenida a partir de una capa de localidades urbanas y rurales, cuya información proviene para el caso de México del Censo de Población y Vivienda 2000 y para Guatemala del Censo Nacional de Población y de Habitación 2002. Las localidades urbanas fueron seleccionadas por contar con una población mayor a 2,500 habitantes, están representadas con puntos, que en total fueron 853 para toda la RTMG, y a los cuales les fue calculada la distancia euclidiana.

6. La distancia a cuerpos de agua es una variable que fue obtenida a partir del mapa de usos de suelo y vegetación para la RTMG en el año 2000. Esta variable consideró todos los ríos, lagos y presas que se encuentran en las cinco cuencas que conforman la región, y se trató de un conjunto de polígonos a los que se les

asignaron puntos aleatorios, posteriormente se extrajo el valor del raster para cada uno de los puntos, y finalmente, se les calculó la distancia euclidiana.

7. La distancia a actividades económicas secundarias es una variable para la que se realizó el mismo procedimiento que para las actividades económicas terciarias y primarias, pero en este caso se consideraron como actividades económicas secundarias aquellas que incluían minería, generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, agua y suministro de gas, así como productos al consumidor final y construcción e industrias manufactureras (INEGI 2017).

8. La distancia a localidades rurales es una variable que fue obtenida a partir de la misma fuente y procedimiento que la distancia a las localidades urbanas. Así, se tuvieron un total de 51,534 puntos que representaban a las localidades rurales, considerando a estas como aquellas que contaban con población menor a 2,500 habitantes.

9. La distancia a carreteras es una variable que se obtuvo de la plataforma de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018. A estas carreteras, consideradas las principales, les fue calculada la distancia euclidiana.

10. La distancia a sitios potenciales de ingreso por línea fronteriza es una variable que también se obtuvo de la plataforma de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018. Esta variable, como su nombre lo indica, explica los sitios que de forma oficial o no, tienen potencial para permitir el ingreso a la frontera entre los países de México y Guatemala; y está representada por medio de puntos, a los cuales les fue calculada la distancia euclidiana.

11. El Índice de Posición Topográfica (TPI) es una variable que se obtuvo por medio del software ArcMap y a través de una de sus herramientas topográficas, la cual recibe el nombre de Topographic Position Index (Jenness). Esta variable permite analizar la morfología del terreno, dejando ver las zonas que son llanas, que tienen pendiente, o que son zonas montañosas; este resultado se mostró de forma continua, es decir, sin la creación de categorías propiamente.

12. La distancia a incendios es una variable que considera todos los incendios generados tanto por causas naturales, como antrópicas. Esta variable fue obtenida de Active Fire Data proveniente de la National Aeronautic and Space Administration (NASA), por medio del satélite MODIS y para el año 2001. Una vez que se tuvieron los puntos de incendios de la región, también les fue calculada la distancia euclidiana.

3.3.3 Red neuronal perceptrón multicapa.

Una vez definidos los submodelos de transición que se utilizarían para ejecutar la red neuronal perceptrón multicapa, así como ya seleccionadas las variables de cambio utilizadas para explicar los cambios presentados entre los distintos usos de suelo con respecto a los intervalos de tiempo ya establecidos, el siguiente paso fue definir los parámetros con los que se correría la red neuronal.

Al ejecutar la transición de submodelos, se tiene la opción de seleccionar unos apartados que utilizan un entrenamiento automático y una tasa de aprendizaje dinámica, esto indica que LCM buscará los parámetros más óptimos para entrenar la red, es decir, por si mismo podría encontrar los pesos de las conexiones entre las unidades, de manera que la red se comporte de forma determinada, descrita por un conjunto de parámetros de entrenamiento. Sin embargo, es posible experimentar con los distintos parámetros, tales como la elección del tamaño de muestra, las capas ocultas, la tasa de aprendizaje, la constante sigmoide, el número de iteraciones, y el momento, lo anterior con la finalidad de obtener mejores resultados en cuanto a reducir el error cuadrático medio tanto de entrenamiento como de prueba, y que, al mismo tiempo eso lleve a mejorar la tasa de exactitud obtenida (Eastman, 2012).

Para el caso de esta tesis se optó por lo anteriormente dicho, así se realizaron un total de 230 pruebas de ejecución de perceptrón multicapa para los cuatro submodelos variando los parámetros y la combinación de las variables de cambio, ello con el objetivo de determinar cuáles serían los parámetros finales con los que se obtendría un mejor resultado por submodelo, y, por tanto, que esto mejorara

el resultado general del perceptrón multicapa, demostrando con ello que tienen mejor explicación de los cambios de uso de suelo.

Con respecto a los parámetros de la red neuronal, se considera que la tasa de exactitud obtenida a partir de un perceptrón multicapa, para ser tomada en cuenta como un buen resultado debe ser mayor a un 50%, y el error cuadrático medio tanto de entrenamiento como de prueba, deben tener como resultado un valor menor a 0.25 (Eastman, 2012).

Con respecto a la combinación de variables, para cada prueba se partió de las 12 variables finales por cada submodelo, pero con base en el resultado del reporte que se obtenía al ejecutar cada una de las pruebas de perceptrón multicapa, el cual mostraba las 12 variables de acuerdo con el orden que estas tenían por significancia por cada submodelo, se fueron eliminando variables (partiendo de la de menor significancia a la de mayor), para identificar así qué combinación de variables, en conjunción con una combinación considerada óptima de parámetros, permitía obtener el mejor resultado para el perceptrón multicapa que se estaba ejecutando.

Si bien es cierto que se jugaron con los parámetros para las pruebas, también existieron algunos que fueron dejados de forma automática como la red neuronal lo establecía, tal fue el caso del tamaño de muestra por clase, la constante sigmoide con un valor de 1.0, y los criterios a los cuales la red neuronal se detendría, como lo fue un error cuadrático medio de 0.1 y una tasa de exactitud de 100%, esto debido a que las pruebas demostraban que realizar cambios en estos parámetros no mejoraban el resultado obtenido.

Así, después de 230 pruebas realizadas, quedó definido el mejor resultado obtenido para cada uno de los submodelos (Tabla 4.4), y que sirvió para la construcción del escenario tendencial de cambio de uso de suelo y vegetación al año 2030.

3.4 Predicción del cambio de uso de suelo y vegetación

Finalmente, la sección 4 está integrada por distintos procesos que llevaron a la obtención de un escenario tendencial final que muestra un modelo de cómo sería el cambio de uso de suelo y vegetación en la RTMG para el año 2030.

3.4.1 Matriz de Markov.

La matriz de Markov es una matriz que se calcula a partir de utilizar las entradas de la tabla y los totales marginales, y muestra su resultado en una tabla cruzada de los dos mapas que es ajustada por el error proporcional (Eastman, 2012). Lo que está indicando esta matriz es el cambio en porcentaje de los tipos de uso de suelo y vegetación, es decir, que usos de suelo se perderán y qué usos reclamarán cobertura, o sea, la ganarán (Eastman, 2012).

Para esta investigación se construyeron dos matrices de Markov. La primera al 2010 (Tabla 4.5) con la finalidad generar un escenario tendencial hacia ese año que pudiera ser validado con el mapa de uso de suelo y vegetación original del año 2010; posteriormente, se construyó una matriz de Markov al año 2030 (Tabla 4.6) ya que este era el escenario tendencial final objetivo de la presente tesis.

Habiendo obtenido los porcentajes de ganancia y pérdida por cobertura de uso de suelo, se procedió a validar los insumos utilizados en el modelo para conservar el mejor resultado que sirviera para generar el escenario tendencial de cambio.

3.4.2 Validación del modelo

La validación del modelo se realizó para evaluar la eficacia del modelo, de los procesos, y la forma en la que se representa el paisaje, y que ello aumentara la rigurosidad científica y la aplicabilidad del modelo (National Research Council, 2014).

Si bien es cierto que existen distintas formas de evaluar un modelo, para esta tesis se utilizó la validación de patrones, la cual utiliza una métrica que compara los datos de salida del modelo con el propósito de saber de qué forma el modelo servirá para una aplicación particular, ello a través de comparar un mapa de

cambio simulado con un mapa actual real de cambio para evaluar las diferencias basadas en algunas métricas. Esta comparación se llevó a cabo a partir de la obtención de tres mapas: el primero fue el mapa de uso de suelo de la fecha desde donde se comenzaría a realizar el modelo, el segundo fue el mapa de uso de suelo de la fecha hasta la que se pretendía realizar el modelo, y el tercero fue el mapa simulado final que se obtuvo de ambas fechas anteriores (National Research Council, 2014).

Las comparaciones de los tres mapas permitieron evaluar la exactitud del modelo de cambio de uso de suelo contra un mapa original de uso de suelo y vegetación que se tenía para esa misma fecha, lo cual se realizó por medio de la estadística de Kappa, también llamada coeficiente Kappa (Viera & Garrett, 2005). Este coeficiente se utiliza para cuantificar el acuerdo de posición espacial entre los valores categóricos de los dos mapas, es decir, mide la frecuencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que se supondría por el azar, o sea, por simulación (Viera & Garrett, 2005).

El coeficiente Kappa, toma valores de 0 a 1, donde 0 indica total desacuerdo, valores entre 0.40 y 0.60 indican un acuerdo moderado, y 1 significa un acuerdo casi perfecto (Tonini et al., 2018). Es de esta forma que el resultado obtenido con este índice determina la eficacia de los insumos del modelo a ejecutar (Haggen, 2002), y está definido por la siguiente ecuación:

$$Kappa = \frac{(Po - Pe)}{(1 - Pe)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

Po= Proporción observada de acuerdos

Pe= Proporción esperada de acuerdos

Pmax= Máxima proporción de acuerdos

A partir de la definición anterior, el coeficiente de Kappa es interpretado como el producto de dos factores: KLocation y KHistogram, los cuales fueron creados por Pontius para establecer las similitudes entre ambos (Pontius, 2000).

- ✓ K Location es aquel que establece la distribución espacial de la cantidad de clases, es decir, mide el acuerdo de posición espacial de las categorías en los dos mapas (Haggen, 2002). Y su fórmula es:

$$K Location = \frac{(Po - Pe)}{(PMax - Pe)} \text{ (Ecuación 2)}$$

- ✓ K Histogram por su parte, mide el acuerdo cuantitativo entre los dos mapas. Es decir, el tamaño de las clases existentes expresado en celdas. Se llama así porque es una estadística que puede ser calculada directamente de los histogramas de los dos mapas (Haggen, 2002). Su fórmula es:

$$K Histogram = \frac{(Pmax - Pe)}{(1 - Pe)} \text{ (Ecuación 3)}$$

Para la validación del modelo se utilizó el software Map Comparison Kit (MCK), con el cual se obtuvieron los resultados del coeficiente de Kappa y de sus componentes K Histogram y K Location, que sirvieron para determinar con base en la mayor cantidad de acuerdos, cuál de todas las pruebas realizadas fue la mejor y que, por tanto, se tomaría como final para construir el escenario tendencial al año 2030 (Tabla 4.4).

3.4.3 Construcción del escenario tendencial

A partir de la validación, de considerar los parámetros y la combinación de variables óptima, y de definir en LCM un tipo de predicción suave y un tipo de agregación lógica, fue como se creó un escenario tendencial a 2030 (Mapa 4.4), el cual muestra las tendencias de cambio de uso de suelo y vegetación en el supuesto caso de que no se presentara ningún cambio, es decir, es el cambio presentado sin tomar en cuenta ningún tipo de incentivo o restricción en cuanto al desarrollo de los distintos tipos de uso de suelo y vegetación presentado entre 1990, 2000 y 2010.

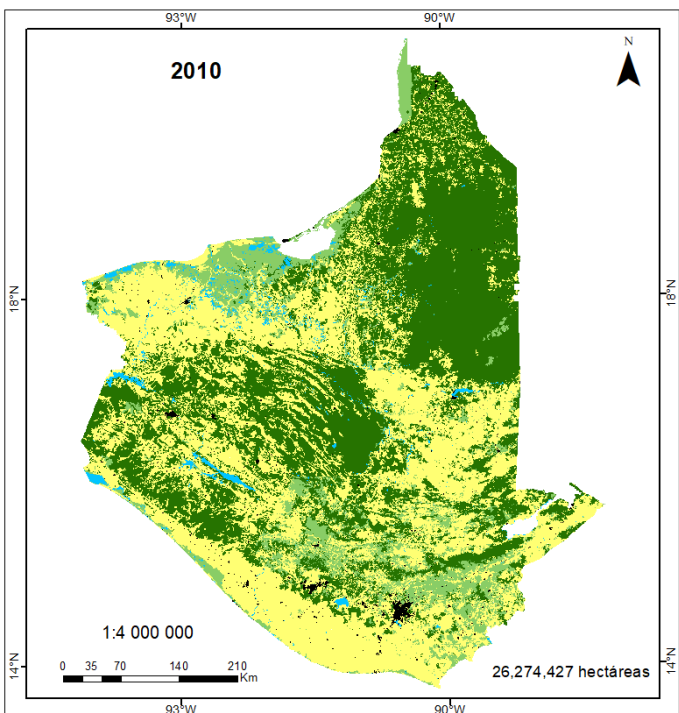
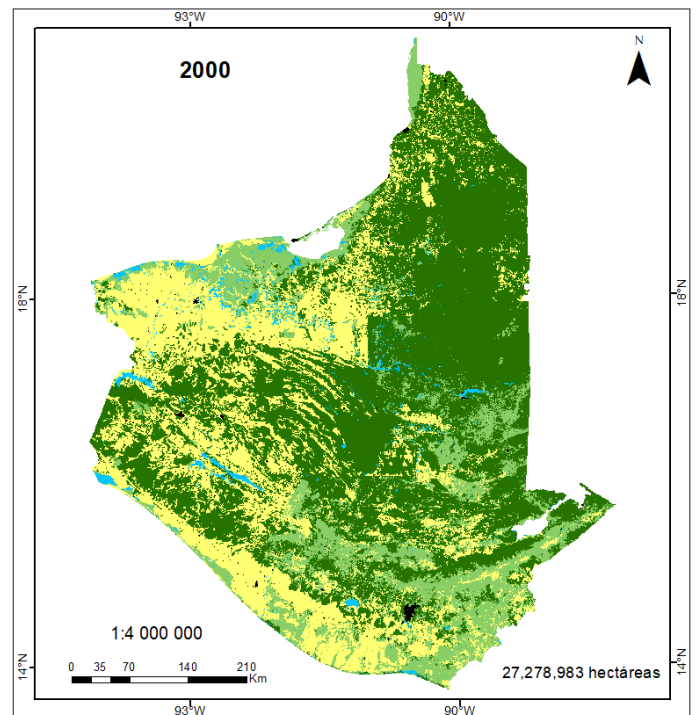
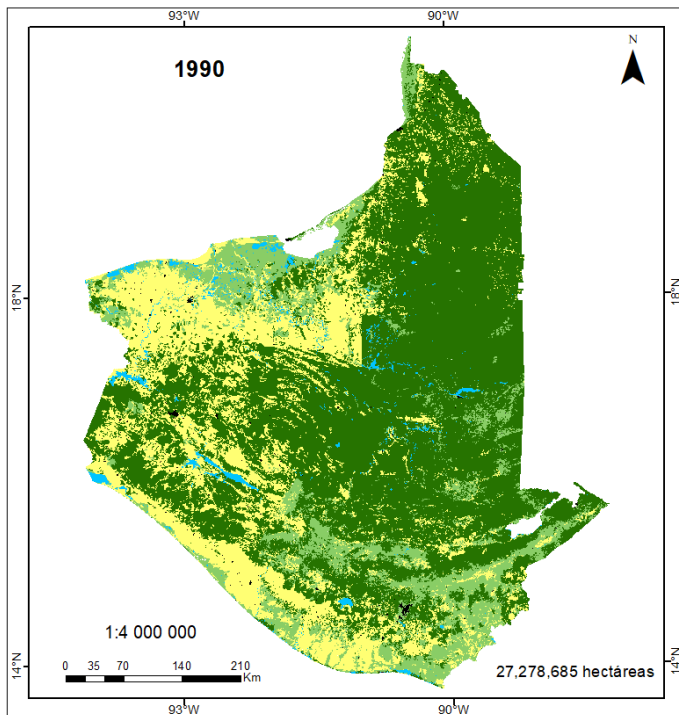
RESULTADOS

Los resultados y la discusión de esta investigación se muestran de acuerdo a los procesos realizados en cada una de las cuatro secciones en las que fue dividida la Metodología (Capítulo 3).

4.1 Selección de coberturas de uso de suelo y vegetación

Los geoprocесamientos que se llevaron a cabo para la homologación de los usos de suelo y vegetación en la RTMG, dieron como resultado cinco clases finales: áreas urbanas, bosques, cuerpos de agua, otras vegetaciones y suelos agropecuarios (Mapas 4.1). Estos usos de suelo y vegetación fueron tomados para los años de 1990, 2000, 2010, y a partir de esto se creó un escenario tendencial de cambio de uso de suelo y vegetación al año 2030.

Mapas 4.1- Usos de suelo y vegetación para los años de 1990, 2000 y 2010 en la RTMG.
 Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI y del CATHALAC, 1990, 2000 y 2010.



- AREAS URBANAS
- BOSQUES
- CUERPOS DE AGUA
- OTRAS VEGETACIONES
- SUELOS AGROPECUARIOS

Visualmente, los Mapas 4.1 muestran que entre 1990 y 2010 los bosques se han ido reduciendo, ello mientras aumentan los suelos agropecuarios, y esto ocurre principalmente en el área que corresponde al país de Guatemala; así mismo, ocurre algo similar para la cobertura de otras vegetaciones, ya que, aunque en menor medida en comparación con los bosques, estas disminuyen mientras aumentan los suelos agropecuarios; en el caso de las manchas urbanas se observa que estas crecieron, y que la mancha principal para el año 2010 fue la Ciudad de Guatemala.

Ahora bien, en la Tabla 4.1 se observan las estadísticas de la cantidad de hectáreas de cada una de las clases de uso de suelo y vegetación consideradas. Para el año de 1990 la mayor cobertura de uso de suelo la tenían los bosques (59%), sin embargo, en 20 años, es decir, para el año 2010, esta cobertura disminuyó en un 17%, llegando a abarcar con ello el 42%. Con respecto al uso de suelo de otras vegetaciones, estas aumentaron en un 3% para el año 2000, pero volvieron a disminuir al año 2010 representando un 3% menos con respecto a lo que se tenía en 1990.

Los suelos agropecuarios representaban en 1990 el 25% de la RTMG y para el año 2010 se presentó un crecimiento del 19%, por lo que se convirtieron en el uso de suelo de mayor extensión en la RTMG, inclusive por encima de los bosques. Las áreas urbanas, a lo largo de estos 20 años de análisis, también presentaron un incremento el cual se acentuó entre el 2000 y el 2010, sin embargo, siguieron representando el uso de suelo de menor extensión de la región (1%). Los cuerpos de agua por su parte, fueron el único uso de suelo que se mantuvo relativamente estable, ya que la tabla muestra que durante los 20 años siempre representaron el 2% de la cobertura.

Tabla 4.1- Porcentaje de cobertura por uso de suelo y vegetación en la RTMG para los años 1990, 2000 y 2010. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI y del CATHALAC, 1990, 2000 y 2010.

Clases	1990	2000	2010
	Cobertura	Cobertura	Cobertura
Áreas urbanas	0.2%	0.4%	1%
Bosques	59%	52%	42%
Cuerpos de agua	2%	2%	2%
Otras vegetaciones	14%	17%	11%
Suelos agropecuarios	25%	29%	44%

Los datos anteriores permiten establecer que los insumos utilizados para los procedimientos que se realizaron durante esta investigación, y que correspondieron a los usos de suelo y vegetación para la RTMG entre los años 1990, 2000 y 2010, mostraron una tendencia de comportamiento que se mantuvo, es decir, los bosques que se redujeron al igual que otras vegetaciones, los suelos agropecuarios y las áreas urbanas que aumentaron y los cuerpos de agua que fueron estables. Es de importancia mencionar que, si bien esta tendencia fue para toda la RTMG, los Mapas 4.1 permiten destacar que es en el sureste donde de forma visual se identifican los principales cambios, es decir, en lo que corresponde al país de Guatemala.

4.2 Detección y análisis de cambios

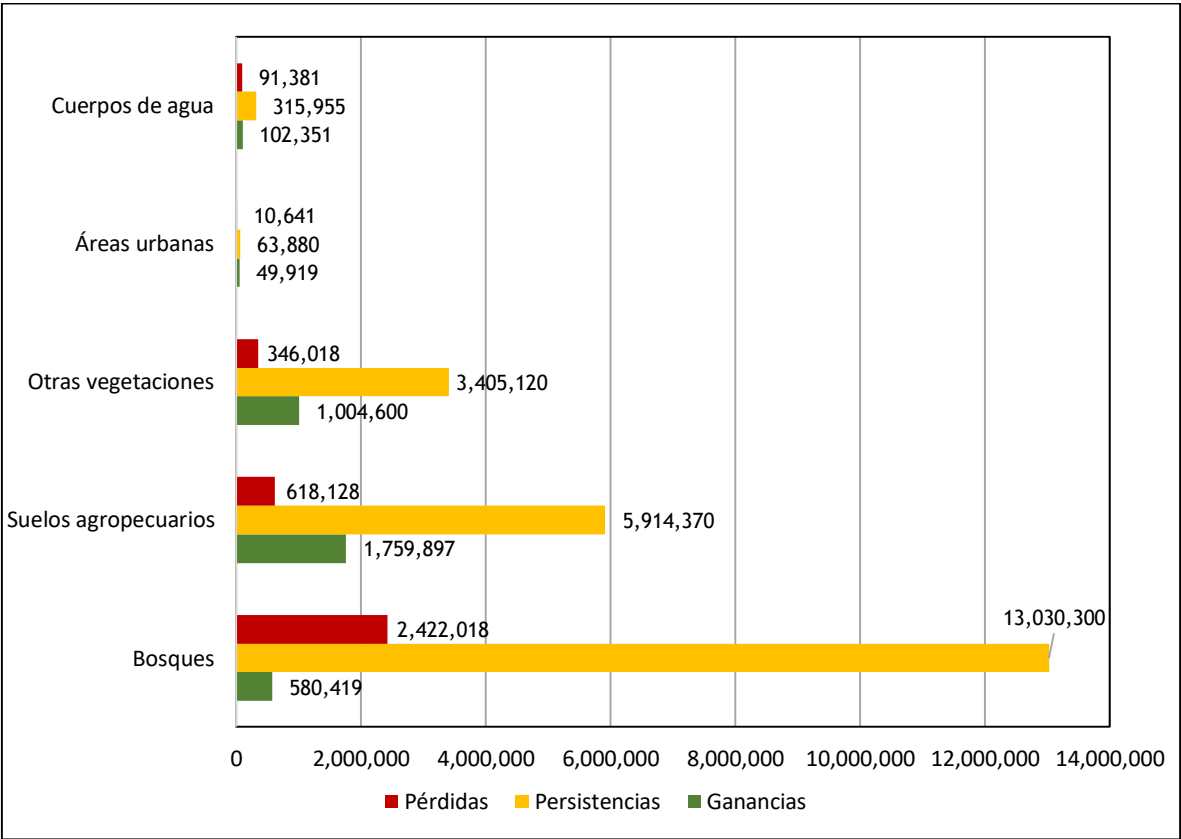
4.2.1 Gráficas de cambios de la RTMG:

La Gráfica 4.1 muestra las ganancias, pérdidas y persistencias de usos de suelo entre los años de 1990 y 2000. Las mayores ganancias fueron para los suelos agropecuarios, es decir, este periodo experimentó una expansión agrícola y ganadera. Las mayores pérdidas fueron para bosques, y se infiere, por tanto, que los suelos agropecuarios podrían estar aumentando cobertura a expensas de los bosques. Las mayores persistencias fueron también para los bosques, esto podría

ser explicado porque había una gran cantidad de bosques en la RTMG, por lo que a pesar de que una parte importante de estos se perdía, existían suficientes como para que se considerara que una porción de ellos permaneciera intacta.

Las menores ganancias, pérdidas y persistencias de los usos de suelo fueron para las áreas urbanas, esto no necesariamente demuestra que las áreas urbanas estaban creciendo poco, perdiendo poco, y persistiendo poco a la vez, sino que estas abarcaban una menor extensión en la RTMG, y por lo tanto, los cambios eran menos visibles al compararlos con los otros usos de suelo, tales como bosques, suelos agropecuarios, otras vegetaciones e inclusive, con los cuerpos de agua (Tabla 4.1).

Gráfica 4.1- Gráfica de cambios de uso de suelo y vegetación entre los años 1990-2000 (hectáreas). Fuente: elaboración propia.

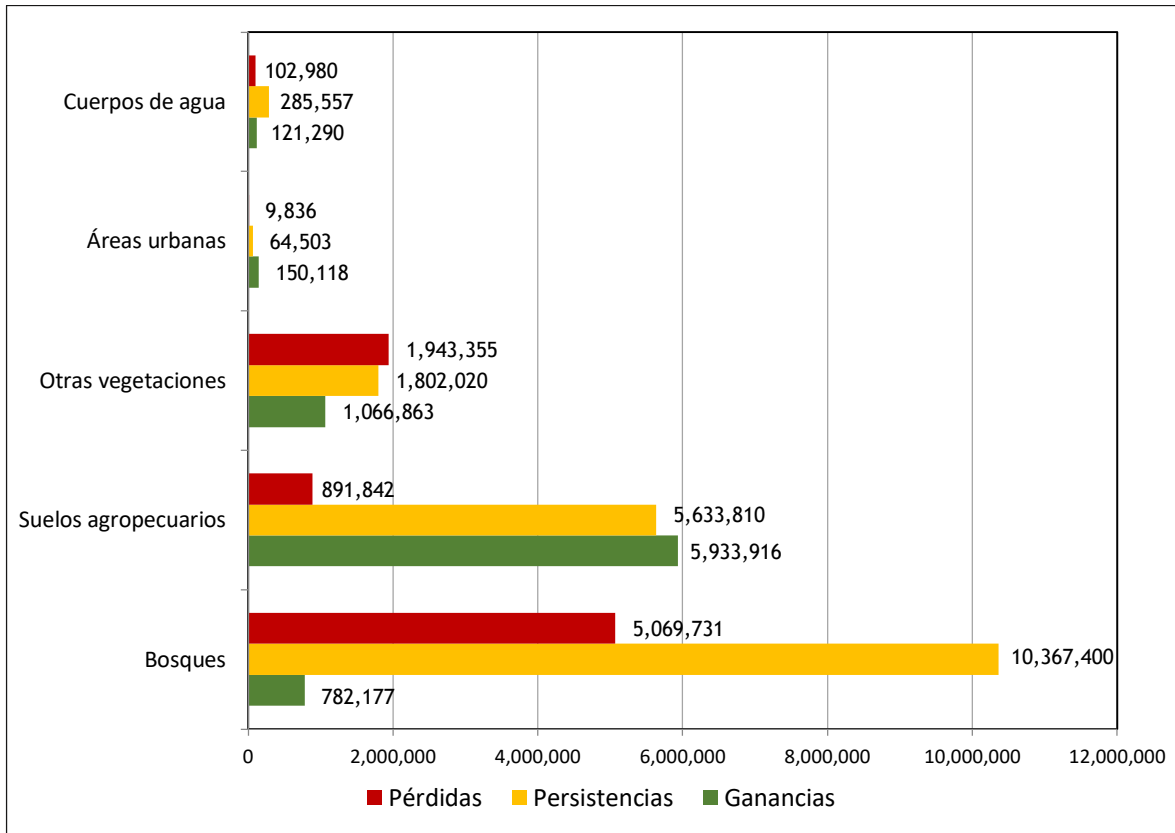


Para los años 1990-2010 (Gráfica 4.2), es decir, agregando 10 años más al análisis, se puede notar que la tendencia se mantuvo, las mayores ganancias fueron para los suelos agropecuarios, las mayores pérdidas para los bosques seguidos de otras vegetaciones; y las mayores persistencias fueron también para los bosques, así como para los suelos agropecuarios.

La diferencia que destaca en comparación con lo observado en el periodo 1990-2000 (Gráfica 4.1), es que para los años 1990-2010 aunque de forma general se mantuvo una tendencia de comportamiento, los suelos agropecuarios crecieron casi tres veces más (237%) y los bosques se perdieron en un 109%, así mismo, aunque la mayor persistencia siguió siendo para los bosques, ésta se redujo en un 20% comparada con lo que existía antes.

Con respecto a las menores pérdidas y persistencias, volvieron a ser las áreas urbanas quienes las tuvieron; pero esta vez las menores ganancias fueron para los cuerpos de agua, ya que durante esos 20 años disminuyeron su crecimiento, mientras las áreas urbanas lo incrementaron. Como ya se mencionó, aunque en comparación con el resto de usos de suelo las áreas urbanas cubrían poca cobertura, si se analizan de forma particular, es de hacer notar que sus pérdidas se redujeron en un 8%, mientras que sus ganancias se triplicaron.

Gráfica 4.2- Grafica de cambios de uso de suelo y vegetación entre los años 1990-2010 (hectáreas). Fuente: elaboración propia.



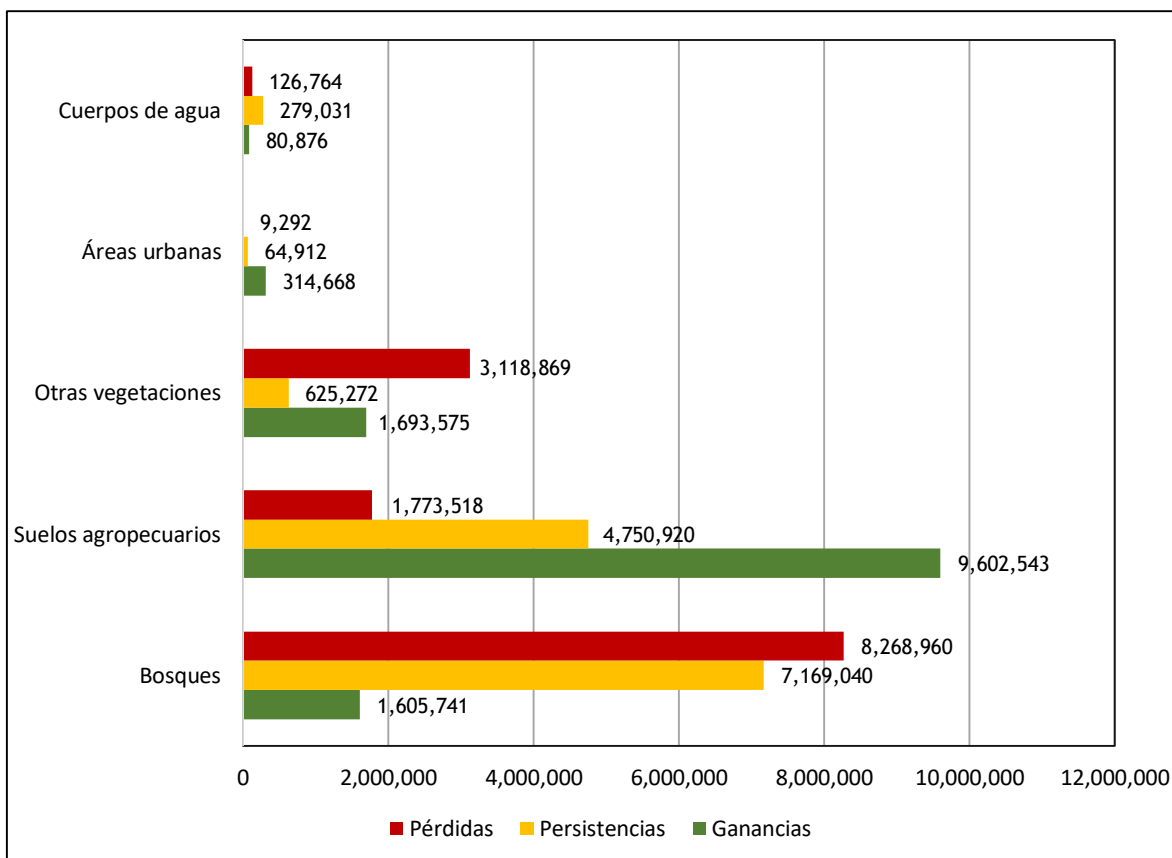
En la Gráfica 4.3 se presentan los resultados que son parte del objetivo general de esta tesis, que se refiere al análisis que se considera desde 1990 hasta 2030, año del escenario tendencial de cambio de uso de suelo que se mostrará más adelante. Ésta gráfica evidencia el comportamiento de los usos de suelo durante todo el periodo de estudio de la presente investigación y la tendencia que se mantiene con respecto a los cambios de uso de suelo en comparación con las gráficas anteriores (Gráfica 4.1 y 4.2).

En esta gráfica se observa que las mayores ganancias volvieron a ser para los suelos agropecuarios, pero esta vez se espera que crezcan desde los años 1990-2010 hacia 1990-2030 en un 62%, que las pérdidas de los bosques aumenten en un 63%, y aunque la mayor persistencia se mantenga para los bosques, esta se espera que decrezca en un 31%, es decir, 10% menos de lo obtenido para 1990-2010.

Así mismo la gráfica muestra ganancias y persistencias de la cobertura de otras vegetaciones, lo que se le conoce como revegetación. La revegetación es la contracción de los suelos agropecuarios a costa del crecimiento de otras vegetaciones y bosques, esta ocurre cuando se abandonan tierras y se permite la restauración pasiva de la vegetación, conocida como sucesión secundaria, o bien, cuando intencionalmente se plantan árboles y arbustos que sean nativos de la región, con el objetivo de disminuir la erosión del suelo e incrementar la diversidad biológica de este, lo que recibe el nombre de restauración activa (Bienes & Marqués, 2006).

Tal y como ocurrió entre 1990 y 2010 (Gráfica 4.2), las menores pérdidas y persistencias fueron para las áreas urbanas; y la menor ganancia volvió a ser para los cuerpos de agua, pero esta vez se espera que reduzcan su ganancia para 1990-2030 en un 33.3%.

Gráfica 4.3- Grafica de cambios de uso de suelo y vegetación entre los años 1990-2030 (hectáreas). Fuente: elaboración propia.

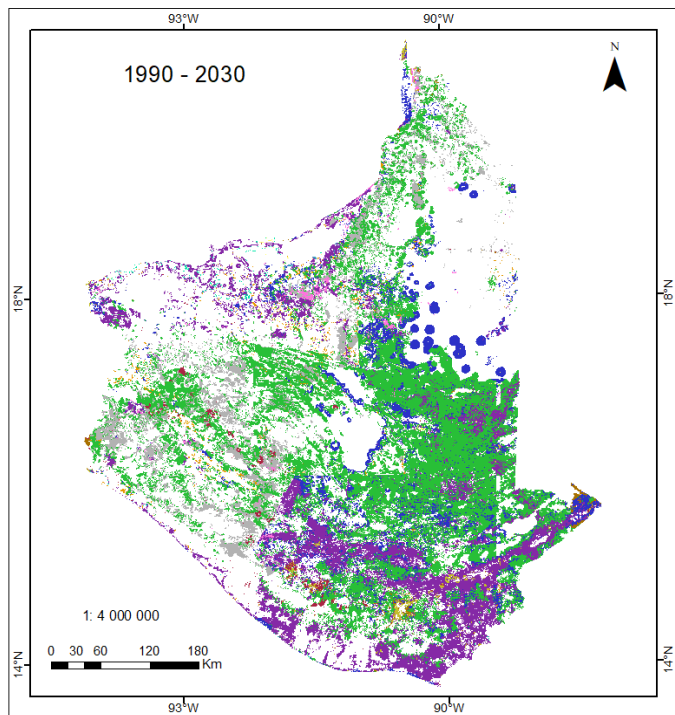
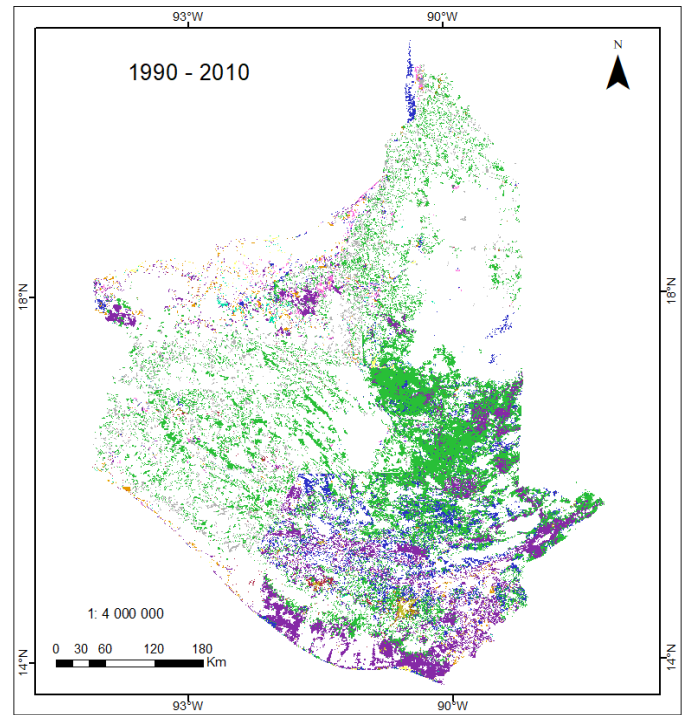
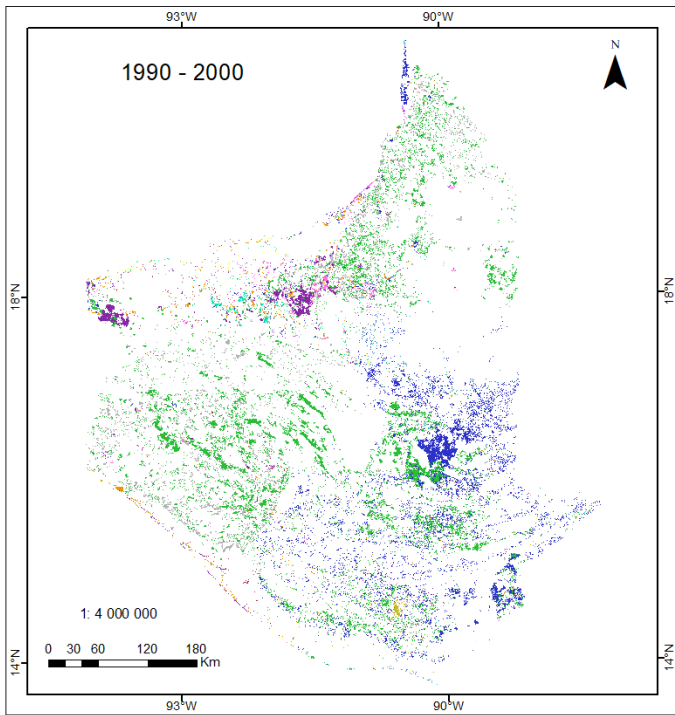


Los datos anteriores muestran así que entre 1990 y 2030 la tendencia a que crezcan los suelos agropecuarios a costa de bosques y otras vegetaciones se mantiene, pero estas cantidades crecen más conforme van avanzando los años, y de forma similar ocurre en el caso de las áreas urbanas, las cuales han ido aumentando de forma exponencial; en el caso de los cuerpos de agua, si bien es cierto que experimentan un crecimiento para 1990-2010, para el año 2030 se vuelve a pronosticar su pérdida.

4.2.2 Mapas de cambios

Como se revisó en la Metodología (Capítulo 3), los procesos realizados dieron como resultado 20 transiciones de uso de suelo y vegetación entre los años 1990 y 2030, sin embargo las estadísticas obtenidas permitieron eliminar 8 transiciones dejando así un total de 12 transiciones para la creación de los mapas de cambio, estos fueron realizados a partir de las gráficas de cambios, y demuestran que aunque las transiciones se mantienen, las áreas que estas cubren crecen más conforme pasa el tiempo. Entre 1990 y 2000 cubrían pequeñas áreas, pero con los años y haciendo la comparación entre 1990 y 2030, estas crecen de forma evidente a lo largo de toda la zona de estudio. Las transiciones visualmente más notorias son de bosques a otras vegetaciones, de otras vegetaciones a suelos agropecuarios y de bosques a suelos agropecuarios (Mapas 4.2).

Mapas 4.2- Mapas de cambios para la RTMG entre 1990 y 2030. Fuente: elaboración propia.



- | | |
|--|---|
|  | Bosques a Areas urbanas |
|  | Bosques a Otras vegetaciones |
|  | Bosques a Suelos agropecuarios |
|  | Cuerpos de agua a Bosques |
|  | Cuerpos de agua a Otras vegetaciones |
|  | Otras vegetaciones a Areas urbanas |
|  | Otras vegetaciones a Bosques |
|  | Otras vegetaciones a Cuerpos de agua |
|  | Otras vegetaciones a Suelos agrpecuarios |
|  | Suelos agropecuarios a Areas urbanas |
|  | Suelos agropecuarios a Bosques |
|  | Suelos agropecuarios a Otras vegetaciones |

Las principales transiciones entre los usos de suelo, se pronostica ocurrirán al sur de la región, primordialmente al sureste, que es donde está el país de Guatemala, aspecto que ya había destacado desde la revisión de los insumos del modelo (Mapas 4.1).

4.3 Modelos de potencial de transición

4.3.1 Definición de submodelos de transición

La agrupación de las transiciones de uso de suelo y vegetación para la construcción de submodelos se observa en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2- Submodelos de transición para la RTMG. Fuente: elaboración propia.

Transiciones	Submodelos	Área total (has)
1. Bosques a Otras vegetaciones 2. Cuerpos de agua a Bosques 3. Cuerpos de agua a Otras vegetaciones 4. Otras vegetaciones a Bosques 5. Otras vegetaciones a Cuerpos de agua	1: Permanencia de vegetación (Bosques vis a vis Otras vegetaciones)	1,034,871.58
6. Bosques a Suelos agropecuarios 7. Otras vegetaciones a Suelos agropecuarios	2: Expansión de Suelos agropecuarios a costa de capital natural (Bosques y Otras vegetaciones a Suelos agropecuarios)	1,706,022.59
8. Bosques a Áreas urbanas 9. Otras vegetaciones a Áreas urbanas 10. Suelos agropecuarios a Áreas urbanas	3: Expansión de Áreas urbanas (Bosques, Otras vegetaciones y Suelos agropecuarios a Áreas urbanas)	39,321.04
11. Suelos agropecuarios a Bosques 12. Suelos agropecuarios a Otras vegetaciones	4: Revegetación o contracción de Suelos agropecuarios a Vegetación (Suelos agropecuarios a Otras vegetaciones y Bosques)	560,314.52

4.3.2 Variables de cambio

La Tabla 4.3 permite observar las variables de cambio utilizadas en el modelo y sus resultados del coeficiente V de Cramer tanto general, como para cada uno de los distintos usos de suelo y vegetación.

Tabla 4.3- Variables de cambio seleccionadas para el modelo y su coeficiente V de Cramer por cada uso de suelo. Fuente: elaboración propia.

	General	Áreas urbanas	Bosques	Cuerpos de agua	Otras vegetaciones	Suelos agropecuarios
1. Probabilidad de evidencia	0.7669	0.7220	0.7776	0.7622	0.8090	0.7762
2. Distancia a actividades económicas terciarias	0.2166	0.1018	0.3886	0.0691	0.2326	0.3270
3. Distancia a actividades económicas primarias	0.2466	0.1876	0.4185	0.1457	0.1282	0.3557
4. Altitud	0.2422	0.0551	0.3480	0.3255	0.1943	0.2309
5. Distancia a Localidades urbanas	0.2351	0.2303	0.4021	0.0506	0.1879	0.2878
6. Distancia a Cuerpos de agua	0.2230	0.0233	0.1787	0.3944	0.1471	0.1301
7. Distancia a actividades económicas secundarias	0.2145	0.1529	0.2301	0.0673	0.2005	0.3711
8. Distancia a localidades rurales	0.2039	0.0383	0.3883	0.0558	0.1221	0.3298
9. Distancia a carreteras	0.1628	0.0977	0.3020	0.0620	0.1270	0.2241
10. Distancia a sitios potenciales de ingreso por línea fronteriza	0.1571	0.1109	0.1939	0.0550	0.2239	0.1831
11. Índice de Posición Topográfica (TPI)	0.1595	0.0149	0.0835	0.3108	0.0280	0.0593
12. Incendios	0.1270	0.0214	0.2331	0.0694	0.0995	0.1879

Donde coeficiente V de Cramer:

0	Sin significancia
0.01-0.14	Poco significativo
0.15-0.39	Significativo
0.40 y +	Muy significativo

Fuente: Eastman, 2012.

Como se observa en la Tabla 4.3, la probabilidad de evidencia -*evidence likelihood*- fue la variable que más alta V de Cramer obtuvo en LCM con un resultado de 0.6750, como ya se mencionó anteriormente, se obtuvo directamente en LCM e hizo las transformaciones correspondientes a las 11 variables restantes del modelo,

es por ello que tiene tan alta correlación con todas estas, lo que la hace ser muy significativa para explicar el cambio de uso de suelo en la región.

Las actividades terciarias en la RTMG, representan una variable importante para explicar el cambio de uso de suelo dado su coeficiente de V de Cramer de 0.2486 (significativo). A partir de este resultado, y de acuerdo a lo revisado en el Capítulo 3 donde se vio que las actividades económicas terciarias incluyen actividades de administración, de alquiler, de organizaciones, de comercio principalmente de alimentos, de accesorios y de artefactos de tamaño pequeño, así como los servicios básicos, domésticos, de entretenimiento, de construcción, de telecomunicaciones y de transporte (Tabla 2.11); y que en el caso de la RTMG representan el 85.59% de la región (Tabla 2.12), se permite identificar que no solo son las actividades que más predominan, sino que también destacan como la principal causa del cambio de uso de suelo.

Así mismo, la Tabla 4.3 muestra una relación significativa entre las actividades terciarias y los suelos agropecuarios, los bosques y otras vegetaciones; ello mientras que la matriz de correlación (Tabla 3.4) deja ver una conexión entre las actividades económicas terciarias y las localidades urbanas, lo que permite establecer que es en las localidades urbanas donde principalmente se realizan las actividades terciarias; así mismo, se guarda una relación con los volcanes, por lo que estos entran como un fenómeno que podría tener incidencia en el desarrollo de las actividades económicas de la región.

Las actividades económicas primarias que predominan en la RTMG son la acuicultura, piscicultura, apicultura, pesca, ganadería, beneficios de productos agrícolas, así como el cultivo de variedad de alimentos (Tabla 2.11). Si bien es cierto que las actividades primarias representan el 1.48% de la RTMG, lo que es poco comparado con las actividades secundarias y terciarias (Tabla 2.12), dado el coeficiente V de Cramer de 0.2466, se muestra que son la segunda causa de los cambios de uso de suelo, por tanto, aunque su distribución sea baja, la influencia para determinar que el suelo cambie es muy alta.

Si se establece una relación de este resultado con los elementos revisados en la caracterización del área de estudio (Capítulo 2), puede identificarse entonces que esta variable guarda relación con la migración, ya que, los principales movimientos migratorios ocurren de Guatemala hacia los estados de Chiapas, Campeche y Tabasco como estrategia de búsqueda de oportunidades de trabajo, con una particularidad de enfoque hacia las actividades económicas primarias (Tabla 2.14).

De acuerdo con los datos de migración obtenidos para el año 2015 (Tabla 2.14), quienes fueron de Guatemala a México lo hicieron para dedicarse a las actividades primarias en un 73%, y quienes fueron de México a Guatemala -por medio de una migración circular- trabajaron en un 99% en las actividades económicas primarias. Estas cifras permiten identificar una conexión: las condiciones de ruralidad que se viven en la RTMG y que predominan en Guatemala, así como la oferta de trabajo por parte de Chiapas, Campeche y Tabasco que está centrada principalmente en las actividades primarias, conducen a la migración de personas que se integran en trabajos basados en el aprovechamiento directo de los recursos naturales.

En ese mismo contexto, la Tabla 4.3 destaca la importante significancia que tienen las actividades primarias con los bosques, los suelos agropecuarios y las áreas urbanas, y la matriz de correlación evidencia conexión entre las actividades primarias y los incendios, volcanes y cuencas (Tabla 3.4), lo que crea una relación directa de estos últimos con el desarrollo de las actividades primarias.

Con respecto a la altitud y de acuerdo con lo revisado en la caracterización del área de estudio (Capítulo 2), el mapa altimétrico de la RTMG (Mapa 2.2), mostró un rango de altimetría que llega hasta los 4,220 msnm, lo anterior pone en evidencia la gran variación altimétrica, que está determinada por la intensa actividad tectónica de la zona (García, 2007), y que a su vez genera diversidad de climas, por tanto, de vegetación, así como también de suelos y rocas (Rzedowski, 2006), esto crea una relación estrecha entre las características físico-geográficas de la RTMG y las causas que provocan los cambios de uso de suelo.

De acuerdo con los resultados el coeficiente de V de Cramer de altitud fue de 0.2422, lo que la coloca como la tercera causa de cambio de uso de suelo en la RTMG. La Tabla 4.3 indica que la significancia de la variable altitud es alta con respecto a los bosques, los cuerpos de agua y los suelos agropecuarios, por lo que además de interferir en las condiciones naturales, sus variaciones pueden representar un impedimento o incentivo para la población, en cuanto a sus asentamientos y a la realización de actividades económicas, tal es el caso de la agricultura y la ganadería. Así mismo en la Tabla 3.4 se observa una correlación entre la altitud y los sitios potenciales de ingreso a la frontera, por lo que también se puede determinar que en las condiciones de migración a través de estos sitios también influye la variable altimétrica.

En las 853 localidades urbanas (1.62%) existentes en la RTMG vive el 56.75% de la población, es decir, hay pocas localidades urbanas pero gran concentración poblacional en ellas, esto en comparación con las cifras que se obtuvieron en el caso de las localidades rurales (Tabla 2.8). La distancia a localidades urbanas mostró un coeficiente V de Cramer de 0.2351, que ubica a esta variable como la cuarta causa del cambio de uso de suelo en la RTMG. La Tabla 4.3 muestra la significancia de las localidades urbanas con bosques, suelos agropecuarios y otras vegetaciones, lo que conduce a entender que el desarrollo de las localidades urbanas y sus actividades de agricultura y ganadería, tienen un impacto directo en la vegetación. De igual forma, la Tabla 3.4 permite crear relación de las localidades urbanas con las actividades terciarias, con las carreteras, con la altitud e inclusive con los cuerpos de agua, por lo que se identifica la importancia de estos últimos en el desarrollo de los asentamientos de las localidades urbanas.

El coeficiente V de Cramer de 0.2230 pone la distancia a los cuerpos de agua como la quinta causa del cambio de uso de suelo en la RTMG, y tomando lo anteriormente dicho con respecto a las localidades urbanas, se puede notar la influencia que estos tienen en la población, ya que la Tabla 4.3 evidencia una significancia que indica que el desarrollo de los bosques y otras vegetaciones ocurre gracias a la presencia de cuerpos de agua, así mismo, los cuerpos de agua son los que permiten el

desarrollo de los suelos agropecuarios, y de forma similar ocurre en el caso de las localidades rurales y de las actividades secundarias que se realizan (Tabla 3.4).

Las actividades económicas secundarias en la RTMG representan el 12.53% de la región (Tabla 2.12), y las predominantes son la producción textil, agroindustrias, complejos industriales, elaboración de alimentos, fabricación de variedades de productos, hidroeléctricas, reparación de artefactos y minería, tal como es el caso de la minería de sal, de piedra caliza, de arcillas, de carbón mineral, así como de arena, grava y otras piedras para la construcción (Tabla 2.11).

A pesar de que el porcentaje que estas representan es bajo en comparación con las actividades terciarias (85.59%), y está poco por encima de las actividades primarias (1.48%), el coeficiente V de Cramer de 0.2145 (significativo), determina que la transformación de las materias primarias representa la sexta causa de cambio de uso de suelo en la región. Las actividades económicas secundarias muestran una significancia con suelos agropecuarios, bosques y otras vegetaciones (Tabla 4.3), así mismo, la Tabla 3.4 muestra una correlación de las actividades secundarias con el resto de las actividades económicas, y con las localidades rurales y urbanas, estableciendo así la relación localidades y desarrollo de estas por medio de actividades de carácter económico.

Con base a lo revisado en la caracterización del área de estudio (Capítulo 2), en la RTMG se tienen un total de 51,534 (98.37%) localidades rurales donde vive el 43.25% de la población (Tabla 2.8), es decir, hay una cantidad mucho mayor de localidades rurales que de urbanas, pero es en las localidades rurales donde vive menos población, poniendo de evidencia que la RTMG es predominantemente rural por su espacio geográfico -que como se revisó en el Capítulo 2 sobre el área de estudio, está caracterizado por vivir en condiciones de un bajo Índice de Desarrollo Humano y altos índices de pobreza y vulnerabilidad-, pero donde la mayoría de la población se asienta en las zonas urbanas, lo que podría ser explicado como ya se vio, por las mejores oportunidades de vida que las ciudades ofrecen y que por tanto, conducen a la migración poblacional en busca de estas (Tabla 2.14).

Lo anterior puede establecerse a partir de revisar la Tabla 3.4, donde se muestra una alta correlación entre las localidades rurales y los sitios potenciales de ingreso a la frontera, así mismo, con las actividades económicas y a su vez con la dependencia que estas tienen con respecto a los cuerpos de agua y del Índice de Posición Topográfica, es decir, de las características morfológicas del terreno.

Estos elementos además de un coeficiente V de Cramer de 0.2039 (significativo) llevan a considerar la distancia a localidades rurales como la séptima causa de cambio de uso de suelo en la RTMG, y cuya significancia es mayor con los bosques, con los suelos agropecuarios y con otras vegetaciones (Tabla 4.3), lo que vuelve a mostrar una relación entre las localidades rurales y el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas a costa de las coberturas de bosques, así como de otras vegetaciones.

Con un coeficiente V de Cramer de 0.1628 (significativo), la distancia a carreteras es la octava causa del cambio de uso de suelo en la RTMG, y si se establece una relación sobre lo visto en la caracterización del área de estudio (Capítulo 2), entonces puede determinarse que las carreteras son derivadas del desarrollo de localidades, tanto urbanas como rurales, lo que a su vez mantiene conexión con los sitios potenciales de ingreso y con el desarrollo poblacional por medio de las actividades económicas, que dependen en gran medida de la cercanía a los cuerpos de agua (Tabla 3.4).

Al respecto, en la Tabla 4.3, en la que se observa una significancia de las carreteras con los bosques, los suelos agropecuarios y otras vegetaciones, se podría explicar que el desarrollo de las carreteras ocurre a costa de la eliminación de la vegetación y con la finalidad de cumplir con las necesidades de desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas y en general, de los asentamientos de las localidades.

La migración es un elemento clave en la RTMG para explicar la dinámica que se vive en la zona, incentivada principalmente por la oferta de trabajo en Chiapas, Campeche y Tabasco y la demanda proveniente de Guatemala, donde existen cruces fronterizos oficiales, pero también, sitios potenciales de ingreso a la

frontera, es decir, todos los lugares oficiales o no, donde la población podría cruzar (Mapa 2.9).

Como se explicó en la caracterización del área de estudio (Capítulo 2), estos sitios potenciales se convierten en un problema cuando no hay forma de regular la legalidad de los cruces, cuando las cifras de quienes migran son muy altas, y cuando surgen problemas y consecuencias como inseguridad, violencia, discriminación e inclusive afectaciones al medio ambiente.

Un coeficiente V de Cramer de 0.1571 (significativo), sugiere que la distancia a sitios potenciales de ingreso por línea fronteriza es la novena causa del cambio de uso de suelo en la RTMG. Al igual que ocurre con las áreas rurales, la relación de significancia de la migración es mayor con otras vegetaciones, bosques y suelos agropecuarios (Tabla 4.3), lo que permite volver a mencionar que es la población de localidades rurales la que migra con el objetivo de dedicarse a la realización de actividades agrícolas y ganaderas, y a su vez, esto afecta directamente a los bosques y al resto de la vegetación.

En la Tabla 3.4 se puede analizar que la correlación de la variable sitios potenciales de ingreso a la frontera -que representa la migración-, es alta con respecto a muchas otras variables, estableciendo así que la migración como tal es un fenómeno que queda determinado por las características que definen a la RTMG y que han estado siendo mencionadas a lo largo de esta investigación.

El Índice de Posición Topográfica, como ya se mencionó, fue obtenido a partir de tomar los datos altimétricos de la RTMG, por lo que resulta ser una variable de cambio que establece una relación directa con la altitud (Tabla 2.1), indicando así que las variaciones en la altimetría, por consecuencia conducen a variaciones en la geomorfología de la RTMG, de esta manera, con base en el coeficiente V de Cramer de 0.1595 (significativo), se considera al Índice de Posición Topográfica como la décima causa del cambio de uso de suelo en la región.

En la Tabla 4.3 se observa que la significancia de ese Índice es mayor con respecto a los cuerpos de agua, bosques y suelos agropecuarios, lo que crea una relación

entre las geoformas, los asentamientos de localidades y la realización de actividades productivas, ya que la geomorfología puede servir como incentivo o impedimento para el desarrollo de la población y de las actividades económicas que estos llevan a cabo, lo anterior se corrobora al revisar la correlación entre variables mostrada en la Tabla 3.4.

La distancia a incendios fue considerada porque a pesar de tener de resultado un coeficiente V de Cramer poco significativo (0.1270), en la Tabla 4.3 se observa que estos, si tienen significancia con respecto a los bosques y los suelos agropecuarios. Además, la matriz de correlación (Tabla 3.4), indica que los incendios son una variable que está correlacionada con las actividades primarias, las cuencas, los volcanes y con las actividades secundarias.

Estos elementos dan pie para explicar que los incendios ya sean causados por el hombre o por cuestiones naturales como erupciones volcánicas y/o rayos, aumentan, lo que hace disminuir los bosques, lo que representa condiciones para el desarrollo de las actividades primarias e inclusive de las secundarias, es decir, para los suelos agropecuarios y la transformación de las materias primas.

4.3.3 Red neuronal Perceptrón multicapa

En la Tabla 4.4 se puede observar la combinación de variables y parámetros que permitió obtener el mejor resultado del modelo a partir de realizar 230 pruebas en total para los cuatro submodelos considerados.

Tabla 4.4- Parámetros del mejor resultado obtenido por medio del perceptrón multicapa. Fuente: elaboración propia a partir de la realización de distintas pruebas.

Submodelo	Parámetros de la red	VARIABLES INCLUIDAS	VARIABLES ELIMINADAS	Tasa de Exactitud	ECM de entrenamiento	ECM de prueba
1: Permanencia de vegetación	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa de aprendizaje de inicio: 0.01 - Tasa de aprendizaje de término: 0.001 - Momento: 0.1 - Neuronas ocultas: 9 - Iteraciones: 10,000 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Probabilidad de evidencia 2. Actividades terciarias 3. Actividades primarias 5. Localidades urbanas 6. Cuerpos de agua 7. Actividades secundarias 10. Sitios potenciales de ingreso 11. IPT 	<ol style="list-style-type: none"> 4. Altitud 8. Localidades rurales 9. Carreteras 12. Incendios 	59.11%	0.2561	0.2573
2: Expansión de suelos agropecuarios	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa de aprendizaje de inicio: 0.0025 - Tasa de aprendizaje de término: 0.00025 - Momento: 0.5 - Neuronas ocultas: 10 - Iteraciones: 10,000 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Probabilidad de evidencia 2. Actividades terciarias 3. Actividades primarias 5. Localidades urbanas 6. Cuerpos de agua 7. Actividades secundarias 8. Localidades rurales 9. Carreteras 10. Sitios potenciales de ingreso 12. Incendios 	<ol style="list-style-type: none"> 4. Altitud 11. IPT 	74.48%	0.2837	0.2909
3. Expansión de áreas urbanas	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa de aprendizaje de inicio: 0.01 - Tasa de aprendizaje de término: 0.001 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Probabilidad de evidencia 2. Actividades terciarias 3. Actividades primarias 4. Altitud 	<ol style="list-style-type: none"> 11. IPT 	73.34%	0.2492	0.2495

	<ul style="list-style-type: none"> - Momento: 0.5 - Neuronas ocultas: 8 - Iteraciones: 10,000 	<ul style="list-style-type: none"> 5. Localidades urbanas 6. Cuerpos de agua 7. Actividades secundarias 8. Localidades rurales 9. Carreteras 10. Sitios potenciales de ingreso 12. Incendios 				
4: Revegetación	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa de aprendizaje de inicio: 0.0025 - Tasa de aprendizaje de término: 0.00025 - Momento: 0.5 - Neuronas ocultas: 10 - Iteraciones: 60,000 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Probabilidad de evidencia 2. Actividades terciarias 3. Actividades primarias 4. Altitud 5. Localidades urbanas 6. Cuerpos de agua 7. Actividades secundarias 8. Localidades rurales 9. Carreteras 10. Sitios potenciales de ingreso 11. IPT 12. Incendios 	0	63.86%	0.3989	0.3992

En la Tabla 4.4, prácticamente los cuatro submodelos muestran una misma combinación jerárquica de variables, es decir, las mismas variables bajo el mismo orden de importancia son capaces de explicarlos; sin embargo, existen algunas pequeñas variaciones, por ejemplo en el caso de la expansión de suelos agropecuarios y de la expansión de áreas urbanas, todas las variables fueron importantes excepto la altitud y el Índice de Posición Topográfica, lo que indica que estas variables fueron eliminadas porque el perceptrón multicapa identifica que no interfieren directamente en que los asentamientos urbanos y las actividades agrícolas y ganaderas crezcan, en cambio el resto de las variables si poseen una influencia directa en ello. En el caso de la permanencia de la vegetación, el perceptrón multicapa indicó que esta puede ser afectada principalmente por la altitud, las localidades rurales, las carreteras y los incendios; y finalmente el submodelo de revegetación, es explicado por la combinación de relaciones de las 12 variables.

4.4 Predicción del cambio de uso de suelo y vegetación

4.4.1 Matrices de Markov para la RTMG

La matriz de Markov para el año 2010 (Tabla 4.5) se obtuvo para obtener el porcentaje de probabilidad de cambio de cada uno de los usos de suelo y vegetación al 2010 y que ello sirviera de comparación para lo pronosticado al 2030.

Tabla 4.5- Matriz de Markov para el año 2010. Fuente: elaboración propia.

Probabilidad de cambio a	Áreas urbanas	Bosques	Cuerpos de agua	Otras vegetaciones	Suelos agropecuarios
Dado					
Áreas urbanas	85.71 %	2.50 %	0.52 %	4.23 %	7.04 %
Bosques	0.06 %	84.31 %	0.16 %	5.59 %	9.88 %
Cuerpos de agua	0.12 %	7.23 %	77.56 %	7.87 %	7.22 %
Otras vegetaciones	0.44 %	2.10 %	1.34 %	90.77 %	5.35 %
Suelos agropecuarios	0.23 %	7.21 %	0.41 %	1.63 %	90.53 %

Como se observa en la Tabla 4.5, para el año 2010 de manera general se identifica que la mayor transición de usos de suelo fue de bosques a suelos agropecuarios (9.88%), es decir, los bosques fueron los que más se perdieron en función de las actividades agrícolas y ganaderas; esto seguido de la transición de cuerpos de agua a otras vegetaciones (7.87%), donde una de las posibles causas es la eutrofización (Ruíz, 2017) y en tercer lugar de cuerpos de agua a bosques (7.23%); lo anterior indica por tanto las altas pérdidas de los cuerpos de agua que se han suscitado.

La menor pérdida de cobertura fue de los bosques pero esta vez en función de las áreas urbanas (0.06%); otras coberturas que menormente se perdieron fueron los cuerpos de agua en función de las áreas urbanas (0.12%) y los suelos agropecuarios en función también de áreas urbanas (0.23%).

De acuerdo con la matriz de Markov para el año 2010, los cambios observados en este año ocurrieron con una alta probabilidad hacia los suelos agropecuarios y hacia otras vegetaciones, y el uso de suelo al que se presentaron las menores probabilidades fueron las áreas urbanas; por lo que para ese año los suelos agropecuarios ya se identificaban como el uso de suelo dominante en la región, y las áreas urbanas estaban creciendo poco a costa del resto de los usos de suelo.

Ahora bien, la matriz de Markov para el año 2030 (Tabla 4.6) se obtuvo para construir el escenario tendencial.

Tabla 4.6- Matriz de Markov para el año 2030. Fuente: elaboración propia.

Probabilidad de cambio a	Áreas urbanas	Bosques	Cuerpos de agua	Otras vegetaciones	Suelos agropecuarios
Dado					
Áreas urbanas	86.78 %	1.44 %	0.51 %	0.58 %	10.69 %
Bosques	0.27 %	67.16 %	0.17 %	5.64 %	26.76 %
Cuerpos de agua	0.39 %	5.68 %	70.17 %	10.77 %	12.99 %
Otras vegetaciones	1.40 %	2.65 %	1.29 %	48.12 %	46.54 %
Suelos agropecuarios	0.82 %	10.10 %	0.42 %	2.32 %	86.34 %

Para el 2030 las mayores probabilidades de cambio serán de otras vegetaciones a suelos agropecuarios (46.54%) y de bosques a suelos agropecuarios (26.76%), este último caso también ocurrió para el año 2010. Las menores probabilidades de cambio, serán de bosques a cuerpos de agua (0.17%), esto seguido de bosques a áreas urbanas (0.27%), lo que indica que la probabilidad de que los bosques cambien a zonas urbanas es muy baja, y más bien es alta a que cambien a suelos agropecuarios.

A partir de lo anterior se establece que las probabilidades de transición que se esperan para el año 2030, son semejantes a las observadas entre 1990 - 2010, es decir, predominan las transiciones de bosques hacia los suelos agropecuarios, de cuerpos de agua a otras vegetaciones y de otras vegetaciones a suelos agropecuarios. Es de hacer notar las grandes cantidades en las que las transiciones aumentan con el paso del tiempo si se compara lo obtenido al año 2010 con lo esperado al año 2030. Así, se puede entender por medio de cifras lo que se esperará para el escenario tendencial al 2030, que sean los suelos agropecuarios los que más se extiendan a costa de los bosques y otras vegetaciones, que las áreas urbanas se extiendan principalmente sobre los suelos agropecuarios, y que los cuerpos de agua cambien hacia suelos agropecuarios y hacia otras vegetaciones.

4.4.2 Validación del modelo

Con respecto a la validación del modelo, se observa que el mapa de uso de suelo vegetación 2010 original presenta notables diferencias con respecto al mapa de suelo 2010 simulado, principalmente en las coberturas de bosques, de suelos agropecuarios así como de otras vegetaciones (Mapas 4.3).

Además de los mapas se observa el resultado de la validación, es decir, las fracciones iguales y desiguales de la comparación entre ambos mapas. En color verde se muestran las fracciones de la región que se mantuvieron igual, es decir, se tuvo una fracción correcta de 0.691 (70 % de predicción correcta); en color rojo se presentan aquellos usos de suelo que cambiaron, es decir, que la simulación a 2010 no acertó, lo que representa una fracción incorrecta de 0.309 (30 % de errores en la predicción); a partir de las diferencias entre lo observado y lo modelado, fue

como el software MCK arrojó los resultados de Kappa para el escenario a 2030 (Tabla 4.7).

Mapas 4.3- Resultados de la validación del modelo. Fuente: elaboración propia.

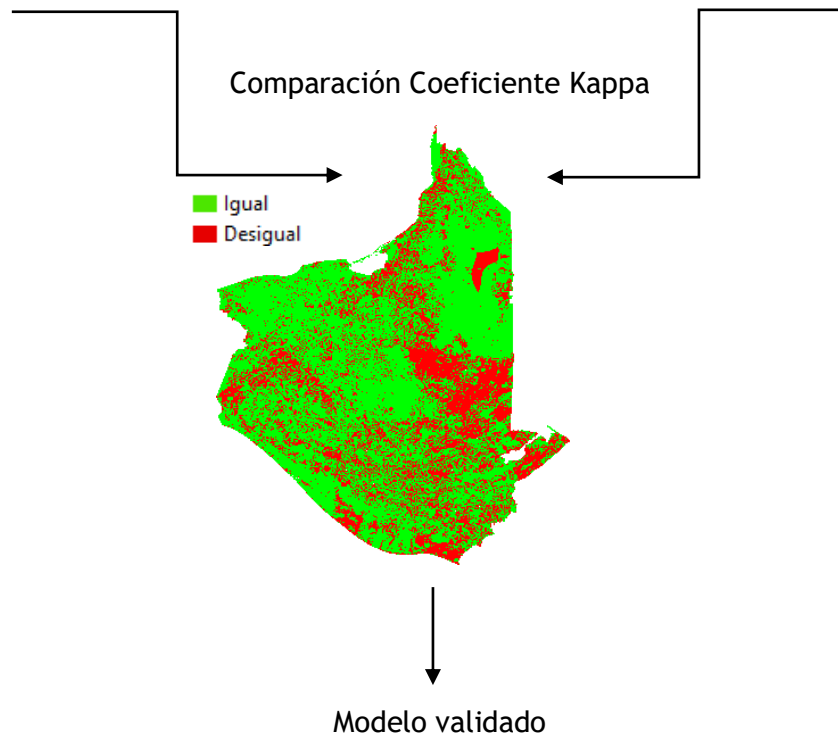
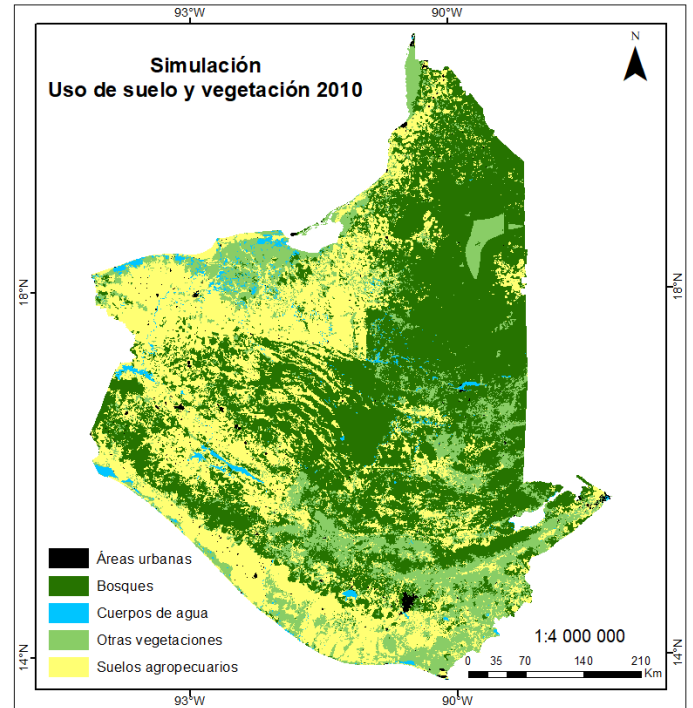
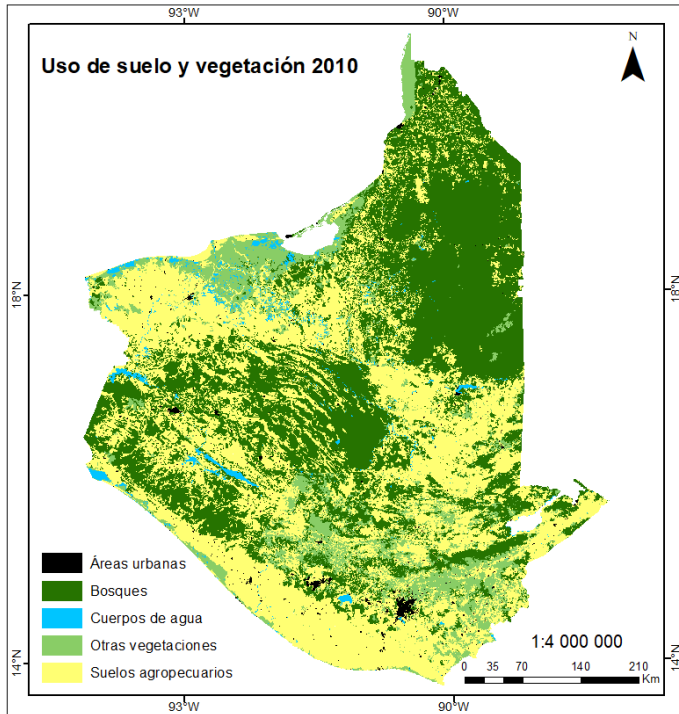


Tabla 4.7- Resultados del coeficiente de Kappa para el escenario seleccionado al año 2030. Fuente: elaboración propia.

Kappa Estándar	Kappa Location	Kappa Histogram	Fracción correcta
0.515	0.632	0.815	0.691

Para la interpretación de los resultados del coeficiente de Kappa se utilizó la escala creada por Viera y Garret 2005, con la que se puede decir que el *Kappa estándar* que obtuvo un valor de 0.515 predice un acuerdo moderado. El *Kappa Histogram*, que mide el tamaño de las clases existentes, arrojó un valor de 0.815 que representa un acuerdo sustancial. Y *Kappa Location*, que muestra la distribución espacial de la cantidad de clases tuvo un valor de 0.632 que indica acuerdos sustanciales. Estos resultados positivos dieron paso a la construcción del escenario.

4.4.3 Construcción del escenario tendencial

Finalmente, con base en los procesos resultados descritos en las secciones anteriores se obtuvo el escenario tendencial de cambio de uso de suelo (Mapa 4.4).

Mapa 4.4- Escenario tendencial de cambio de uso de suelo y vegetación en la RTMG al año 2030. Fuente: elaboración propia.

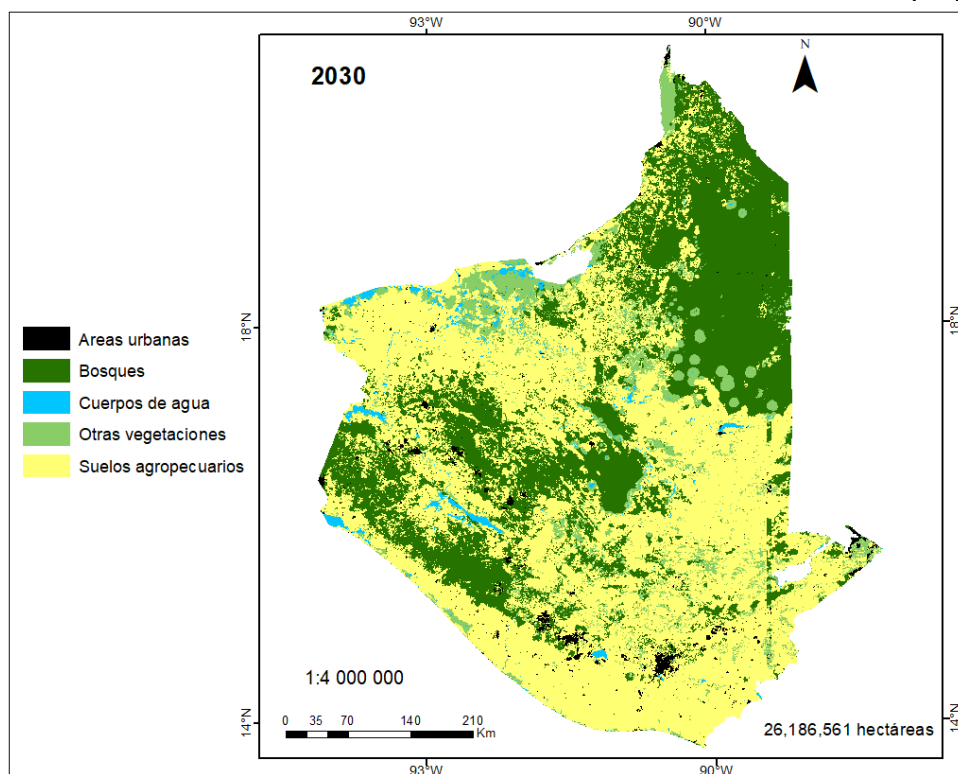


Tabla 4.8- Porcentaje de cobertura por uso de suelo y vegetación para la RTMG al año 2030. Fuente: elaboración propia.

Clases	2030
	Cobertura
Áreas urbanas	2%
Bosques	34%
Cuerpos de agua	1%
Otras vegetaciones	8%
Suelos agropecuarios	55%

Como se observa en el Mapa 4.4, la distribución de las áreas urbanas se concentra principalmente en una franja que recorre el sur de la RTMG, y existen algunas otras manchas urbanas distribuidas en la punta norte de la región; los bosques predominan al noreste y suroeste, mientras que los suelos agropecuarios lo hacen en el noroeste y sureste; por su parte los cuerpos de agua se distribuyen al oeste de la región; y las otras vegetaciones principalmente al norte y al este de esta.

Analizando el escenario se pueden notar ciertas estructuras definidas, como lo son una línea al sureste, y al centro norte unos círculos conformados por el uso de suelo correspondiente a otras vegetaciones, estas estructuras fueron creadas por procesos internos de la herramienta Land Change Modeler y son efectos del modelo.

En el caso de los círculos, eran muy altas probabilidades de cambio de un píxel, es decir, los píxeles de otras vegetaciones estaban rodeados por completo por suelos agropecuarios, y no tenían a nadie alrededor para que interfiriera y/o limitara la forma en la que crecía esa transición, por ello fue tomando forma circularmente geométrica. La línea geométrica está dada por el efecto de borde, ya que al revisar la transición de los píxeles puede empezar a hacerlo en forma de línea, lo que queda determinado por ser la orilla de la región, esto pudo ser mejorado a partir de crear el modelo para una región más grande que la RTMG y así ya el error de la línea recortarlo por no caer en el área de interés.

En la Tabla 4.8 se identifica el porcentaje que cada uno de los usos de suelo y vegetación se espera que cubran de la RTMG al año 2030. Si se comparan los datos obtenidos en la Tabla 4.1 y la Tabla 4.8 se obtiene la siguiente tabla, en la cual se observan los cambios en porcentaje que cada uno de los usos de suelo y vegetación cubría en los distintos años de análisis, 1990, 2000, 2010 y 2030.

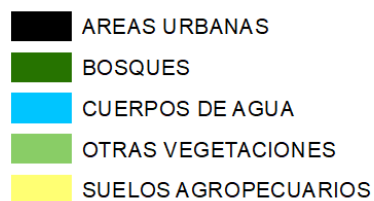
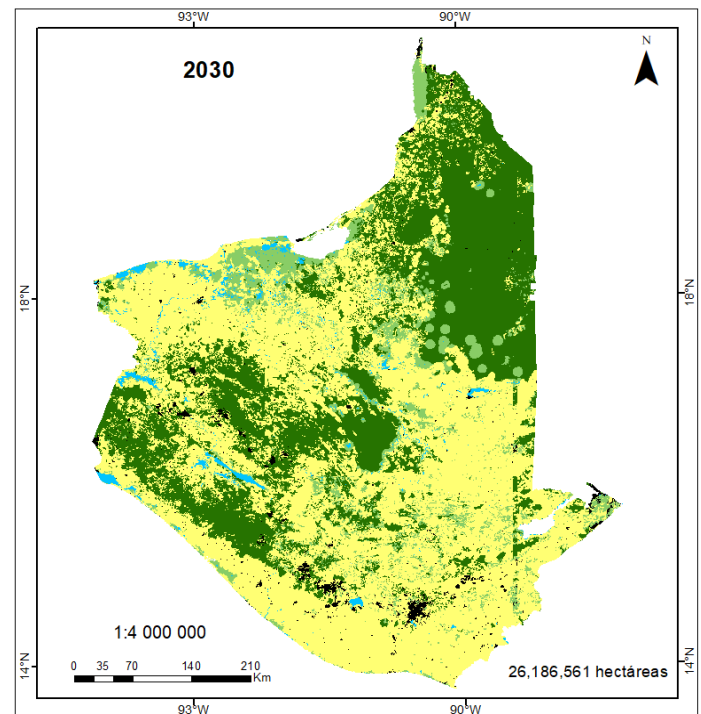
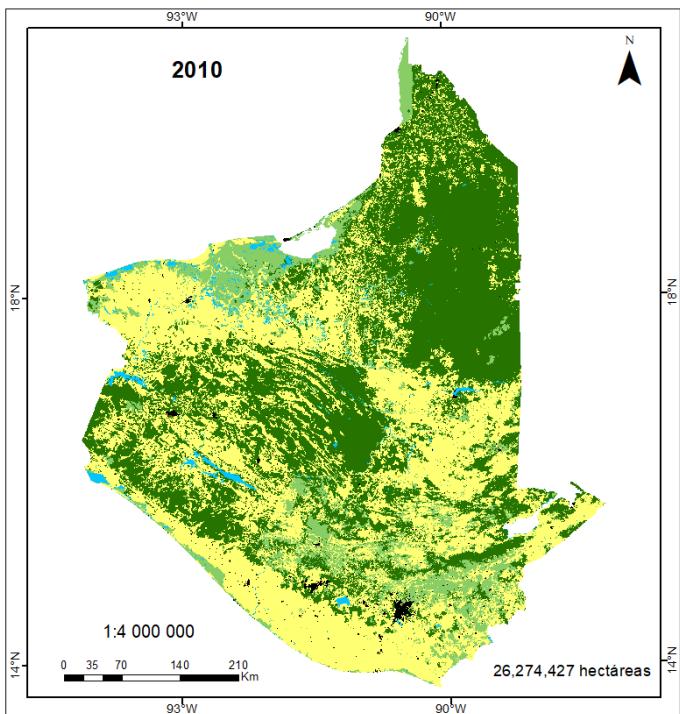
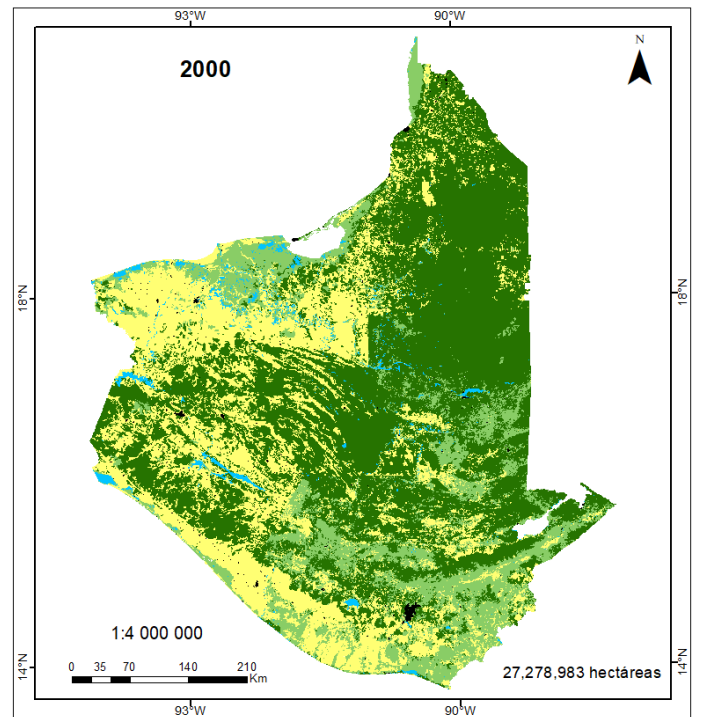
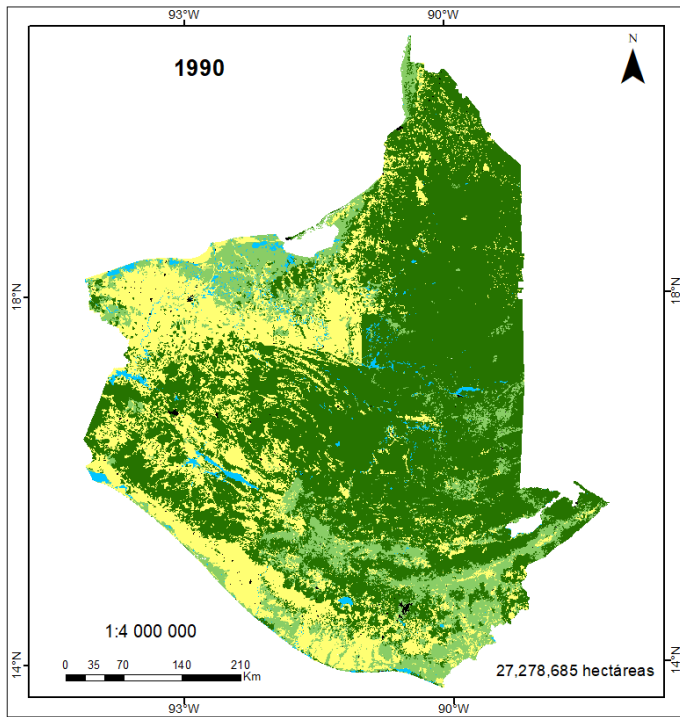
Tabla 4.9- Porcentaje de cobertura por uso de suelo y vegetación para los años 1990, 2000, 2010 y 2030 en la RTMG. Fuente: elaboración propia.

Clases	1990	2000	2010	2030
	Cobertura	Cobertura	Cobertura	Cobertura
Áreas urbanas	0.2%	0.4%	1%	2%
Bosques	59%	52%	42%	34%
Cuerpos de agua	2%	2%	2%	1%
Otras vegetaciones	14%	17%	11%	8%
Suelos agropecuarios	25%	29%	44%	55%

Lo que se identifica en la Tabla 4.9 es la tendencia crecimiento de las áreas urbanas en todos los años, el decrecimiento de los bosques para todos los años, y aunque los cuerpos de agua se mantienen estables entre 1990 y el 2010, para el 2030 se pronostica su pérdida; en el caso de otras vegetaciones estas experimentan un crecimiento en su cobertura para el año 2000, sin embargo, para los años 2010 y 2030 se identifica su pérdida. En el caso de los suelos agropecuarios, estos experimentan un crecimiento evidente en todos los años, y para el año 2030 se pronostica que lleguen a cubrir el 55% de la RTMG.

Ahora bien, para entender los cambios de uso de suelo entre los los años 1990, 2000, 2010 y 2030, se generaron los Mapas 4.5. Observando estos mapas se identifica lo ya mencionado en las gráficas y mapas de cambios (Gráficas 4.1, 4.2, 4.3 y Mapas 4.2), es notable el crecimiento a través de los años de los suelos agropecuarios y de las áreas urbanas, así como la consecuente disminución de los bosques y otras vegetaciones, e inclusive de los cuerpos de agua.

Mapas 4.5- Análisis del escenario tendencial hacia 2030 a partir de los usos de suelo y vegetación de los años 1990, 2000 y 2010 en la RTMG. Fuente: elaboración propia.

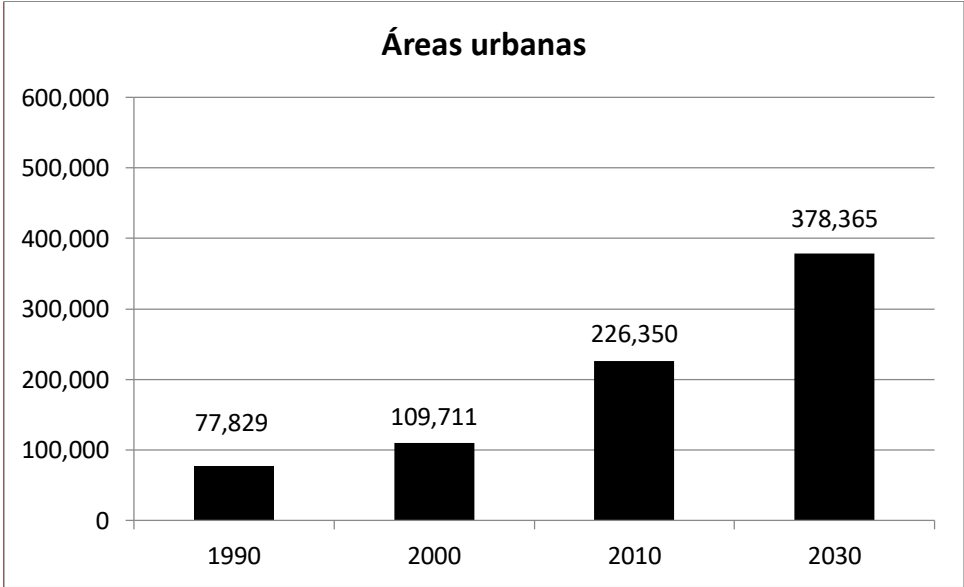


A partir de los Mapas 4.5 se extrajo la información sobre la cantidad de hectáreas correspondientes para cada uso de suelo y vegetación en los distintos años con su respectivo análisis, lo cual se presenta de la Gráfica 4.4 a la Gráfica 4.8.

Tal y como se revisó en las gráficas de cambios (Gráfica 4.1, 4.2 y 4.3), contrario a lo que ocurre con los bosques y otras vegetaciones, las hectáreas correspondientes a las áreas urbanas van en aumento (Gráfica 4.4). Para 1990 se tenía casi 78 millones de hectáreas, para el 2000 estas crecieron en un 41%, para el 2010 el porcentaje de crecimiento fue de 106% y para el 2030 se espera que las áreas urbanas presenten un crecimiento del 67% con respecto a lo que había en el 2010.

Así, los resultados del escenario permiten identificar la rapidez en el crecimiento de las áreas urbanas para la RTMG, y se espera que pasen así de representar el 1% en la región en 2010, a representar el 2% para el 2030 (Tabla 4.9), lo que estaría mostrando que duplicarán el porcentaje que abarcan de la RTMG con respecto al resto de los usos de suelo.

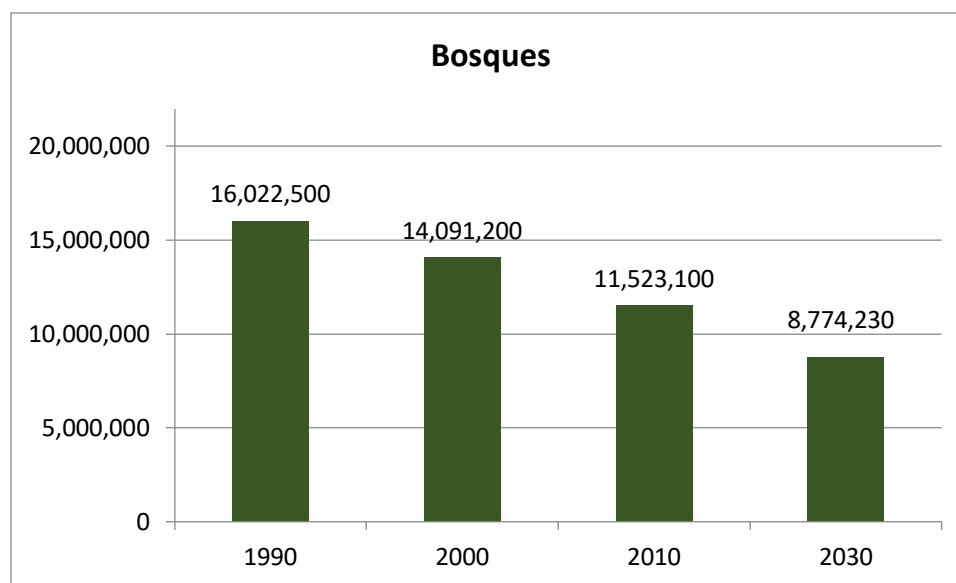
Gráfica 4.4- Hectáreas de áreas urbanas en la RTMG para el periodo 1990 - 2030.
Fuente: elaboración propia.



En la Gráfica 4.5 se observa que los bosques se han ido reduciendo de forma evidente. Partieron de representar 16 millones de hectáreas existentes en la región en 1990, para reducirse en 2 millones para el 2000 lo que representa un 12% de pérdida. Para el 2010 se redujeron en un 18% y para el 2030 se espera una reducción de su cobertura en un 24%.

Lo anterior demuestra que cada vez es mayor la pérdida de los bosques y con base en el escenario de uso de suelo creado se observa que, de seguir bajo las mismas tasas de pérdida de cobertura forestal que se han mantenido a través de los años, casi un cuarto de los bosques de la RTMG habrán desaparecido para el año 2030; mientras que los bosques representaban en la región el 42% en 2010, al 2030 se espera que representen el 34% de la zona de estudio (Tabla 4.9).

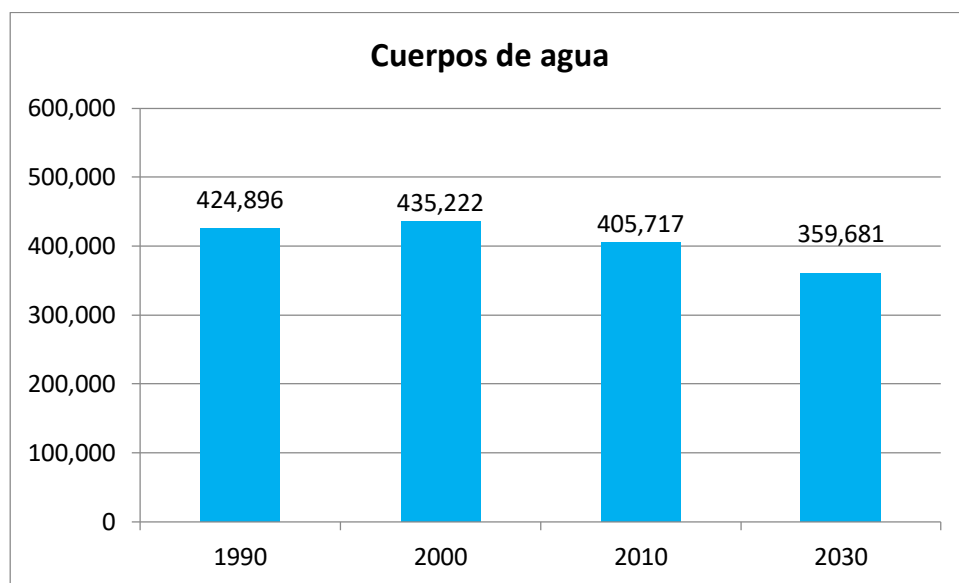
Gráfica 4.5- Hectáreas de bosques en la RTMG para el periodo 1990 - 2030. Fuente: elaboración propia.



En 1990 los cuerpos de agua abarcaban poco más de 420 mil hectáreas, para el 2000 esta cobertura aumentó en un 3%, posteriormente para el 2010 disminuyó en un 7%, y para el 2030 se estima que disminuirá a un 11% en comparación con lo existente para el año 2010 (Gráfica 4.6).

Si bien es cierto que en la primera década se notó un crecimiento de los cuerpos de agua, también es cierto que en décadas posteriores estos disminuyeron; y aunque esta disminución de los cuerpos de agua no es tan evidente como la de otros usos de suelo, se espera que los cuerpos de agua existentes en la RTMG sigan reduciéndose aún más con el paso del tiempo, ya que mientras para 2010 los cuerpos de agua representaban el 2%, se prevé que para 2030 representen la mitad, es decir, el 1% (Tabla 4.9).

Gráfica 4.6- Hectáreas de cuerpos de agua de la RTMG para el periodo 1990 - 2030.
Fuente: elaboración propia.

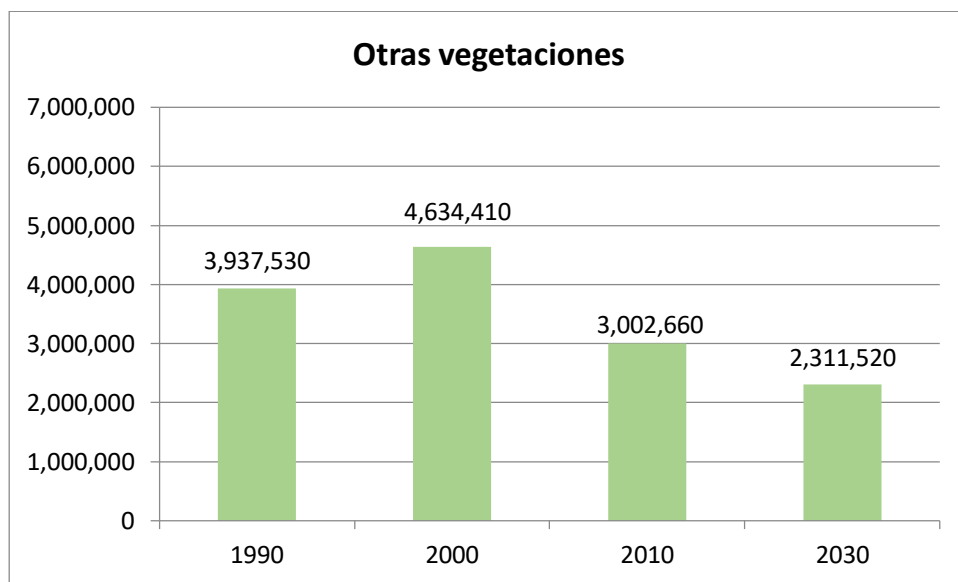


La Gráfica 4.7 que muestra la cobertura de otras vegetaciones, permite ver que en 1990 se tenían poco más de 3 millones 900 mil hectáreas, pero para el año 2000 estas aumentaron en un 18%, sin embargo, para 2010 estas volvieron a disminuir en un 35% y para el 2030 se espera que disminuyan en un 23% con respecto a lo que existía en el año 2010.

Como se analizó en las gráficas de cambios (Gráficas 4.1, 4.2 y 4.3), su tendencia va a que, si bien una parte se mantiene ya sea por revegetación o por otras causas, la mayor parte de su cobertura se espera que siga disminuyendo principalmente a

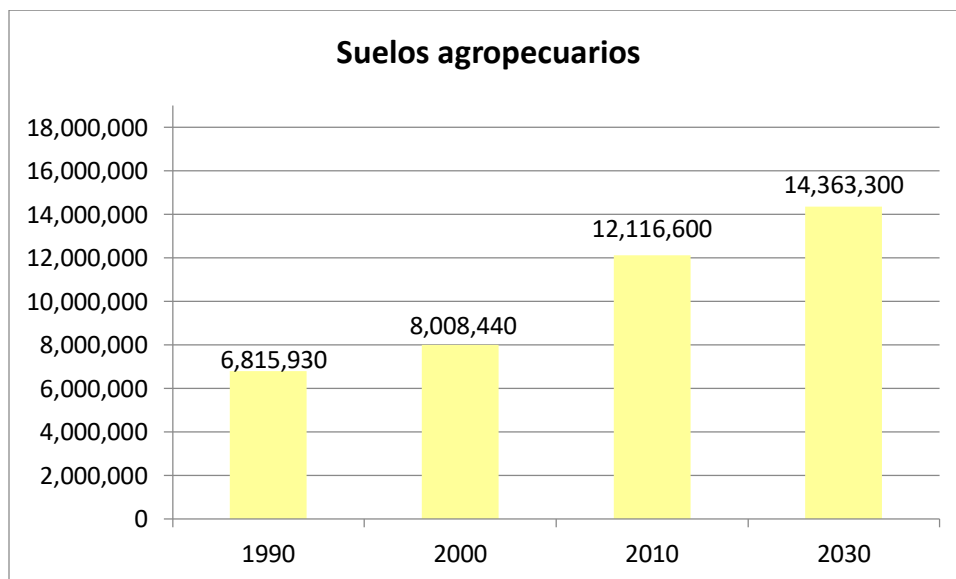
costa de los suelos agropecuarios, tal y como ocurre con la cobertura de bosques, por lo que, si para 2010 otras vegetaciones representaban el 11%, para 2030 se espera que representen el 8% de la región (Tabla 4.9).

Gráfica 4.7- Hectáreas de otras vegetaciones de la RTMG para el periodo 1990 - 2030.
Fuente: elaboración propia.



Los suelos agropecuarios por su parte, como ya se revisó, son el uso de suelo que representa las mayores ganancias de cobertura y cuya persistencia también se encuentra entre las principales. Para el año de 1990 se tenía poco más de 6 millones 800 mil hectáreas, ya en el 2000 estas crecieron en un 18%, en el 2010 lo hicieron en un 51%, y para el año 2030 se espera que estos crezcan en un 19%, lo que representa más del doble de hectáreas de lo que abarcaba este uso de suelo en 1990 (Gráfica 4.8).

Gráfica 4.8- Hectáreas de suelos agropecuarios de la RTMG para el periodo 1990 - 2030.
Fuente: elaboración propia.



Si bien es cierto que comparado con las áreas urbanas el crecimiento de los suelos agropecuarios no se identifica que sea tan veloz a través de los años, también es cierto que la extensión de estos es muchas veces mayor que la cobertura que pueden tener las áreas urbanas en la RTMG, es decir, mientras que para el año 2030 se espera que las áreas urbanas abarquen un 2% de la RTMG, los suelos agropecuarios se espera que lo hagan en un 55% (Tabla 4.9). Lo anterior advierte el predominio de la agricultura y ganadería sobre el resto de los usos de suelo, ello ya que mientras que para el año 2010 representaban el 44% de cobertura en la región, se pronostica que para el año 2030 abarcarán más de la mitad de la RTMG (Tabla 4.9).

A modo de resumen de lo anteriormente expuesto se presentan en la Tabla 4.10 los resultados finales del escenario tendencial, comparando la cantidad de hectáreas de crecimiento para cada uno de los usos de suelo y vegetación durante los distintos años de análisis, en conjunto con el porcentaje que representa ese crecimiento.

Tabla 4.10- Total de hectáreas por uso de suelo y vegetación y el porcentaje que representan para los años 1990, 2000, 2010 y 2030 en la RTMG. Fuente: elaboración propia.

Hectáreas al año 1990	Hectáreas al año 2000	Hectáreas al año 2010	Variación (%) 2010 - 2030	Hectáreas pronosticadas al año 2030
Áreas urbanas				
77,829	109,711 (+ 41%)	226,350 (+ 106%)	+ 67%	378,365
Suelos agropecuarios				
6,815,930	8,008,440 (+18 %)	12,116,600 (+ 51%)	+ 19%	14,363,300
Bosques				
16,022,500	14,091,200 (- 12%)	11,523,100 (- 18%)	- 24%	8,774,230
Otras vegetaciones				
3,937,530	4,634,410 (+ 18%)	3,002,660 (- 35%)	- 23%	2,311,520
Cuerpos de agua				
424,896	435,222 (+ 3%)	405,717 (- 7%)	- 11%	359,681

De acuerdo con la Tabla 4.10, si se comparan los resultados del año 2010 y el 2030, se identifica que el mayor crecimiento será para las áreas urbanas pasando de 226,350 a 378,365 hectáreas (crecimiento del 67%); el segundo mayor crecimiento se espera que sea para los suelos agropecuarios, ya que de tener 12,116,600 hectáreas en el 2010, para el 2030 se espera que abarquen 14,363,300 hectáreas (crecimiento del 19%).

La mayor pérdida se espera que sea para los bosques, ya que de tener 11,523,100 hectáreas al 2010, para el 2030 tendrán 8,774,230 hectáreas (decrecimiento del 24%). La segunda mayor pérdida será para otras vegetaciones, las cuales en el 2010

abarcan 3,002,660 hectáreas y se espera que para el 2030 cubran 2,311,520 hectáreas (decrecimiento del 23%). Y finalmente, la tercera mayor pérdida será para los cuerpos de agua, que en el 2010 tenían 405,717 hectáreas y para el 2030 tendrán 359,681 hectáreas (representando un decrecimiento del 11%).

DISCUSIÓN

Existen investigaciones de carácter cultural, histórico, antropológico, geográfico y ambiental, y dentro de estas últimas existen unas cuantas relacionadas con el cambio de uso de suelo que se ha llevado a cabo en Chiapas, Campeche, Tabasco y en Guatemala, pero en general se trata de investigaciones fragmentadas, que se centran en función de alguna necesidad que surge por lo que no se pueden medir las características y trayectorias de los procesos, o bien, se enfocan solo en determinadas regiones de estos tres estados en México o alguna parte de Guatemala, por tanto, no existen estudios como tal que analicen los procesos transfronterizos de forma integral (FORDECYT, 2017-2018).

Respecto a las investigaciones que funcionan como antecedentes de los modelos prospectivos, después de una revisión se identificó que se tiene bastante información como libros, tesis, artículos científicos y casos aplicados de las Redes Neuronales Artificiales en el cambio de uso de suelo, sin embargo, ninguno de estas investigaciones ha sido aplicada para la frontera que integran Chiapas, Campeche, Tabasco y Guatemala, de forma que, no se tienen como tal estudios de cambio de uso de suelo para toda esa región, y por tanto, tampoco se han aplicado métodos de modelación prospectiva para lograr estudiarla, al menos no a esa escala.

Por lo anterior, se considera que las investigaciones existentes representan apenas iniciativas en los estudios de los cambios de uso de suelo en la frontera (FORDECYT, 2017-2018), de modo que el resultado obtenido en esta tesis resulta ser relevante para los estudios prospectivos de cambio de uso de suelo, y más aún, en el caso particular de la frontera entre México y Guatemala.

Ahora bien, dado que los resultados obtenidos en esta tesis fueron divididos en cuatro secciones: selección de coberturas de uso de suelo y vegetación, detección

y análisis de cambios, modelos de potencial de transición y predicción del cambio de uso de suelo, la discusión de esta investigación se presenta en el mismo orden.

La selección de coberturas de uso de suelo y vegetación fue para los años 1990, 2000 y 2010, dado que para esos años estaban disponibles para el país de Guatemala, por tanto, del lado de México se utilizaron series acorde a esos años buscando una homologación, eligiendo así las series II (1993), III (2002) y V (2011). El año de modelación seleccionado fue el 2030, debido a que el análisis histórico de los usos de suelo y vegetación cubrió un periodo de 20 años, por lo que se realizó una modelación a otros 20 años a futuro.

Con respecto a los insumos utilizados, existen ciertas deficiencias, ya que estos no experimentaron un proceso de evaluación de su confiabilidad cartográfica. Sin embargo, en el caso de México, las series de uso de suelo y vegetación del INEGI, son reconocidas como la cartografía oficial del país, son útiles por sus dimensiones temporales y espaciales para las escalas regionales y nacional, y han sido utilizadas en diferentes trabajos e investigaciones, por ejemplo, como fuentes de estadísticas nacionales a nivel gubernamental e internacional (Evaluación de recursos forestales de la FAO), así como también, siendo la base de instrumentos de política pública ambiental, tal es el caso del IRDEF (Galeana et al., 2019).

Las series de uso de suelo y vegetación de Guatemala por su parte, provienen del Atlas Centroamericano para la Gestión Sostenible del Territorio, y fueron elaboradas y procesadas cartográficamente por el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe (CATHALAC), el cual es una organización internacional que busca lograr el desarrollo sostenible para toda la región latinoamericana y caribeña. Dado su carácter internacional, y su disponibilidad como la única fuente de coberturas de uso de suelo y vegetación en Guatemala, se considera que posee validez suficiente para ser utilizada como insumo de la presente investigación.

Las variables de cambio utilizadas como insumos para el modelo, fueron obtenidas de distintas fuentes oficiales tanto para el caso de México como para el de

Guatemala, pero muchas en muchas ocasiones, la baja disponibilidad y la falta actualización de los datos de Guatemala, era más evidente que en el caso de los datos de México, por tanto, los insumos pueden tener fuerte influencia en los resultados, es decir, en el escenario tendencial construido, se identifica visualmente que los principales cambios y transiciones de submodelos ocurrieron mayormente en el país de Guatemala que en el resto de la RTMG, lo que podría ser determinado o porque es ahí donde se pronostican la mayor cantidad de cambios, o por la pobreza de información de este país, lo que podría determinar que no se estuvieran mostrando los cambios de uso de suelo y vegetación de forma certera.

Con respecto a la detección y análisis de cambios, las gráficas y mapas mostraron de forma cuantitativa los cambios históricos que han ocurrido en cada uso de suelo, este proceso ha sido utilizado en otras investigaciones, por ejemplo, las gráficas y mapas de cambio realizadas en la investigación “Análisis de los instrumentos de política pública y sus efectos de contención en la expansión de sistemas agropecuarios en el Complejo de ANPS de la Sierra Madre de Chiapas” Reyes, 2018, permitieron el observar el crecimiento de los suelos agropecuarios a costa principalmente del detrimento de los bosques y de otras vegetaciones, lo cual queda demostrado no solo por la cantidad de ganancias, pérdidas y persistencias obtenidas en las gráficas, sino también por las transiciones entre los usos de suelo que indicó el mapa de cambios.

Otro caso de estudio en el que han sido utilizadas gráficas y mapas de cambios es la investigación de Joorabian & Gholamalifard del año 2015, y que lleva por nombre “Scenario-based land cover change modeling and its implications for landscape pattern analysis in the Neka Watershed, Iran”, donde las gráficas y mapas de cambio, permitieron estudiar las ganancias, pérdidas y el cambio neto entre los bosques, la agricultura, las zonas residenciales y los huertos.

En relación a los modelos de potencial de transición, en primer lugar, hay que tomar en cuenta que la definición de submodelos es un proceso que se ha llevado a cabo en otras investigaciones, como es el caso de la que lleva por nombre

“Modelos prospectivos de cobertura terrestre para el Complejo de Áreas Naturales Protegidas Sierra Madre de Chiapas”, y que fue elaborado en el 2017 por CentroGeo-SEMARNAT-CONACYT; en esta investigación se seleccionaron cinco transiciones: bosques y selvas a pecuario, agrícola a pecuario, bosques y selvas a agrícola, agrícola a bosques y selvas y otra vegetación a pecuario, posteriormente, estas transiciones fueron agrupadas en un submodelo.

En el caso de la presente tesis, se obtuvieron un total de cuatro submodelos, los cuales se establecieron a partir de las 12 transiciones obtenidas del mapa de cambios, y que se definieron al encontrar relación entre estas para explicar un determinado cambio de uso de suelo.

En segundo lugar, se deben considerar las variables de cambio. Los cambios de uso de suelo resultantes del escenario tendencial, fueron definidos con base en la obtención del coeficiente V de Cramer y de matrices de correlación, que permitieron establecer 12 variables de cambio de carácter antrópico y biofísico, como lo fueron: distancia euclidiana a actividades económicas primarias, secundarias y terciarias, localidades urbanas y rurales, carreteras, incendios, sitios potenciales de ingreso por línea fronteriza, así como cuerpos de agua, altitud, Índice de Posición Topográfica y probabilidad de evidencia.

La medida de la distancia euclidiana se utilizó en la mayoría de las variables dado que esta es útil en los modelos de aprendizaje automático, debido a que la distancia permite a los algoritmos reconocer similitudes entre los contenidos, en este caso, entre las variables de cambio (Sharma, 2013); un ejemplo de estudio de caso donde se ha utilizado la distancia euclidiana para las variables de cambio es en el realizado por Joorabian & Gholamalifard en el año 2015, “Scenario-based land cover change modeling and its implications for landscape pattern analysis in the Neka Watershed, Iran”; así mismo en el estudio de Pacheco & Hewitt realizado en 2013 y que lleva por nombre “Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales”.

Las variables utilizadas para el escenario tendencial de esta tesis fueron significativas, no solo porque los resultados de su coeficiente V de Cramer (Tabla 4.3) y la matriz de correlación (Tabla 3.4) lo constataron, sino porque con base en otros autores, como Pacheco & Hewitt 2013, se considera que las variables de cambio pueden ser cualquier característica de un área que el investigador crea que pueda influir sobre su uso u ocupación, de modo que incluyen elementos biofísicos tales como altitud, temperatura, precipitación, vegetación, etcétera, o socioeconómicos, como la distancia a carreteras, la densidad de población, índices, etcétera.

Además de lo anterior, el análisis y los procesos realizados durante esta tesis demostraron que las variables de cambio se encuentran conectadas ya sea como causas o consecuencias unas de las otras y, por tanto, mantienen una relación y una dinámica conjunta que permitieron comprender los cambios de uso de suelo en la región.

Si se analiza la caracterización de área de estudio (Capítulo 2) en conjunto con los elementos que se encuentran en los anexos de esta tesis, se identifica una relación entre los elementos sociales, ambientales, económicos y culturales de esta región, y las causas que están provocando los cambios en los usos de suelo.

Si a una población -cuyos modos de vida son influidos en gran parte por las características biofísicas- que vive mayormente en áreas urbanas pero donde predominan las condiciones de ruralidad, manteniendo características como pobreza y bajo IDH -que muestra un rezago educativo y una vulnerabilidad social, se le agregan elementos como el incremento de la población que se manifiesta en la gran velocidad del crecimiento de las áreas urbanas, las cuales requieren cada vez más recursos, bienes e infraestructura, y que para su desarrollo ejecutan actividades -lo que se relaciona directamente con la demanda de trabajo por parte de Guatemala y la oferta de trabajo que ofrecen principalmente Chiapas, Campeche y Tabasco en México-, termina por promoverse la migración, cuyas cifras son muy altas, y el principal objetivo de los migrantes es trabajar, de forma particular en actividades agrícolas (Tabla 2.14).

En tercer lugar, en relación a los modelos de potencial de transición, entra la ejecución de cada uno de los submodelos por medio del perceptrón multicapa. El escenario tendencial de cambio de uso de suelo resultante se construyó por medio del perceptrón multicapa que es la clase de Red Neuronal Artificial más común. Según Pacheco & Hewitt, 2014, las RNAs no identifican la localización exacta de cambios en los usos del suelo, sino que son más bien un buen método de modelación dada su capacidad para localizar patrones generales de comportamiento en el cambio de uso de suelo, así como para determinar la aptitud que tiene una celda para acoger determinada clase de cobertura, inclusive, las RNAs sirven en la actualidad como apoyo para el desarrollo de otros modelos, tales como los Autómatas Celulares y los Modelos Basados en Agentes.

Distintos estudios han demostrado que el perceptrón multicapa es más robusto que otros métodos como la regresión logística, como ejemplo se tiene una predicción de áreas vulnerables a los cambios de bosques en el Parque Nacional Tam Dao de Vietnam, elaborado por Kio y Murayama, 2010; así mismo, se tiene una evaluación del impacto del cambio de cobertura en el riesgo por erosión en la Cuenca del Río Blanco de Fork White al Noroeste de Arkansas, que fue realizado por Leh y otros autores en el 2011.

Del perceptrón multicapa utilizado se decidió ejecutar diferentes pruebas hasta encontrar el mejor resultado, fue por ello que se realizaron un total de 230 de las cuales fue elegida la mejor para cada submodelo, y estas se caracterizaron por tener una tasa de exactitud mayor al 50%, sin embargo, no todas cumplieron con tener un resultado menor a 0.25 con respecto al error de entrenamiento y al error de prueba como lo estableció Eastman, 2012, a pesar de ello, se decidió seleccionar aquella considerada más óptima, y que cumpliera con la mayoría de las condiciones anteriormente establecidas.

El realizar distintas pruebas hasta encontrar la mejor combinación que permitiera el mejor ajuste entre las variables de cambio y las transiciones obtenidas, es un proceso que ha sido llevado a cabo en otras investigaciones, como la de “Modelos

prospectivos de cobertura terrestre para el Complejo de Áreas Naturales Protegidas Sierra Madre de Chiapas”, CentroGeo-SEMARNAT-CONACYT, 2017.

Por último, los resultados de esta tesis analizaron la predicción del cambio de uso de suelo. En primera instancia, se generaron dos matrices de Markov, la primera al año 2010, que mostró las cantidades de cambio entre 1990 y el año 2000. Posteriormente, la matriz se realizó al año 2030, expresando las cantidades de cambio esperadas para esa fecha.

La matriz de Markov es un proceso que también ha sido realizado en investigaciones como la de Reyes 2018 “Análisis de los instrumentos de política pública y sus efectos de contención en la expansión de sistemas agropecuarios en el Complejo de ANPS de la Sierra Madre de Chiapas”, donde se construyó una matriz de cambio que explicaba los cambios ocurridos entre el 2011 y el 2039. Así mismo, este proceso de obtención de matrices de Markov se llevó a cabo en la investigación elaborada en 2017 por CentroGeo-SEMARNAT-CONACYT.

En segunda instancia, con relación a la validación cabe decir que los modelos se prospectivos se pueden evaluar a través de una validación de los insumos, en la cual se utilizan imágenes de satélite y puntos de entrenamiento y de prueba, tal y como se realizó en “Modelos prospectivos de cobertura terrestre para el Complejo de Áreas Naturales Protegidas Sierra Madre de Chiapas”, CentroGeo-SEMARNAT-CONACYT.

En el caso de la presente tesis no se llevó a cabo este tipo de validación dado el tamaño de la RTMG que oscila alrededor de 27 millones de hectáreas, lo que hubiera requerido de muchas imágenes de satélite y procesamientos. Fue por tanto que se optó por validar con una simulación, donde se aprovechó la disponibilidad de las series de uso de suelo y vegetación, es decir, se partió de un entorno conocido hacia una tercera fecha futura, realizando una comparación entre lo simulado y lo observado. Este tipo de validación es un método común, y ha sido llevado a cabo en otros estudios, tal como el que se realizó en un caso de estudio virtual pero basado en situaciones reales realizado por Mas et al., 2013, y que lleva

por nombre “Inductive pattern-based land use/cover change models: a comparison of four software packages”.

Otra investigación donde también se llevó a cabo este tipo de validación fue en la realizada por Joorabian & Gholamalifard 2015, “Scenario-based land cover change modeling and its implications for landscape pattern analysis in the Neka Watershed, Iran”.

La validación de esta tesis se realizó por medio del coeficiente de Kappa (Tabla 4.7), y si bien es cierto que no se logró un acuerdo casi perfecto, es decir, un Kappa aún más cercano a 1, este resultado fue el seleccionado porque representó la mejor prueba de las 230 realizadas, porque obtuvo una buena fracción de acuerdos según este coeficiente (Viera & Garret, 2005), y porque permitió visualizar de forma clara las distintas clases de usos de suelo y vegetación.

En tercera instancia, se obtuvo el escenario tendencial de cambio de uso de suelo.

Los escenarios de cambio se caracterizan por ser comúnmente utilizados en cuestiones de impacto ambiental, adaptación y evaluación de vulnerabilidad, con el objetivo de mostrar alternativas en cuanto a las condiciones futuras consideradas que pueden tener influencia en un determinado sistema. Así, tener varios tipos de predicciones es útil para saber que esperar a futuro con base en distintos escenarios posibles, realizables y deseables, de modo que se puedan explorar diferentes resultados, para los cuales se construyan hipótesis provisionales que permitan entender los posibles futuros según sean cercanos a la realidad (Amozurrutia, 2014).

Es tal la importancia de la construcción de escenarios, que inclusive varios autores tienen su propia clasificación especificando que deben existir distintos escenarios según las necesidades de uso que estos pueden tener, tal es el caso de Marien 2002, Habermas 2003, Dreborg 2004, Mansini 2006, Borjeson 2006 y Maier y otros 2016 (Camacho et al., 2008).

Estudios que demuestran que la utilización de más de un escenario prospectivo significa obtener un mejor resultado, son por ejemplo el de Joorabian &

Gholamalifard del año 2015, “Scenario-based land cover change modeling and its implications for landscape pattern analysis in the Neka Watershed, Iran”, donde se construyeron cinco escenarios prospectivos. Así mismo, también está la tesis de Reyes 2018 sobre la cuenca de Chiapas, en la que se obtuvieron dos escenarios prospectivos, uno tendencial y otro sin la consideración de instrumentos ambientales.

La presente investigación mostró un único escenario tendencial de cambio de uso de suelo debido a se considera que el haber utilizado otros elementos para aumentar la cantidad de escenarios, hubiera traigo consigo un mayor proceso de complejidad. Este único escenario pronostica dónde ocurrirían y cómo serán los cambios de uso de suelo para el año 2030 de seguir con la misma tendencia que se ha mantenido a través de los años; sin embargo, este resultado no analiza otros elementos en la región, por ejemplo, la existencia de Áreas Naturales Protegidas, un caso supuesto en el que se cerrara la frontera y no hubiera migración, el establecimiento de carreteras y caminos, es decir, cambios dinámicos en la infraestructura; o bien, cualquier elemento que pudiera a incentivar o restringir el desarrollo de otras condiciones particulares (Eastman, 2012).

Tampoco se están tomando en cuenta eventos extraordinarios que no entran en la tendencia que se ha mantenido a lo largo de los años, por ejemplo, los desastres naturales, las recientes oleadas de migración, las políticas de Estados Unidos que terminan por impactar todo el continente y al mundo, etcétera.

Además, es de considerar que los resultados obtenidos por medio del modelo de RNAs no fueron comparados con otro modelo. La validación realizada por medio del índice Kappa es solo una medida estadística de utilidad media en cuanto a desconocer el nivel de exactitud con los datos que se está trabajando, pero según Pacheco & Hewitt, 2013, únicamente por medio de una comparación de carácter objetivo de dos o inclusive más modelos, por ejemplo RNAs y Regresión Logística, se puede lograr una evaluación más certera en cuanto a la utilidad y resultados del modelo aplicado, ya que al utilizar un solo modelo, es más complejo el encontrar los parámetros de error.

Lo anteriormente dicho pone de manifiesto que, el haber realizado una validación del modelo con una simulación, mas no una validación de los insumos como tal, así como el hecho de que los resultados aquí obtenidos sean un único escenario tendencial, que provengan de un solo modelo sin compararlo con otros, además de las limitaciones propias de las redes neuronales son importantes deficiencias de esta investigación.

Ahora bien, los resultados obtenidos para la RTMG, es decir, los cambios de uso de suelo entre los años de 1990, 2000 y 2010, así como el escenario prospectivo construido para el año 2030, evidencian el crecimiento de los suelos agropecuarios y de las áreas urbanas a costa de la pérdida de bosques, de otras vegetaciones y de cuerpos de agua.

Estos resultados de cambio de uso de suelo que se esperan y las variables de cambio que los explican muestran una coherencia con respecto a lo que ocurre y se prevé que ocurrirá a nivel mundial. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) & el Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo (GTIS), 2016, los principales promotores del cambio de uso de suelo en el mundo son el crecimiento poblacional y el crecimiento económico. Lo anterior establece una relación entre el aumento de población y el de la economía, que tienen una revolución directa asociada a la agricultura.

De acuerdo con la FAO y el GTIS 2016, se estima que en el año 2050 la población mundial sea de 9.6 billones de habitantes, y se pronostica que este incremento ocurrirá principalmente en los países de bajo ingreso, entre los cuales se encuentran México y Guatemala. Ello trae consecuencias directas en la generación de residuos y en el aumento en la demanda de alimentos, dentro de lo cual la FAO y el GTIS pronostican que para el año 2050, la producción de estos deberá incrementarse entre un 40 y 70%. Aunado a lo anterior, cada vez más población mundial se urbaniza, lo que termina por invadir a los distintos suelos existentes y promover que estos se convierten en cobertura sellada, es decir, en pavimentos.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) para el 2014 indicó que el 54% de la población vivía en áreas urbanas, y prevé que para el 2050 este porcentaje aumente hasta el 66% (FAO & GTIS, 2016). Además, se considera que el cambio climático será un fuerte impulsor del cambio de uso de suelo, debido al impacto que este podría tener con relación al funcionamiento del recurso suelo, lo que queda determinado principalmente por la incertidumbre en las tendencias generadas con respecto a los servicios ecosistémicos que el suelo ofrece, lo que a su vez se relaciona con la vegetación en general y con los cuerpos de agua (FAO & GTIS, 2016).

Es así que, con base en el Informe del Estado Mundial del Recurso Suelo, creado por la FAO y el GTIS en el 2016, se constata la relación anteriormente establecida en la RTMG: ruralidad - población que crece - necesidad de más recursos - actividades económicas - oferta y demanda laboral y - migración. Esta relación genera impactos sociales, económicos, culturales y desde luego, ambientales, por lo que puede ocurrir la degradación del suelo y surgir el proceso de cambio de uso de suelo para satisfacer las necesidades de una población donde la dinámica de los procesos que vive día con día se complejiza.

De esta forma, un escenario tendencial para el año 2030 que pronostica en la RTMG con respecto a lo que había en 2010, un crecimiento de las áreas urbanas en un 67%, de los suelos agropecuarios en un 19%, y una disminución de los bosques en 24%, de otras vegetaciones en 23% y de cuerpos de agua en 11%, trae consecuencias consigo.

Primero, la afectación a los suelos pone en riesgo su función como soporte de los seres vivos, tal es el caso del desarrollo de las plantas y de sus procesos, por lo que hay impactos en los servicios ambientales que estos prestan, como la regulación del ciclo hidrológico y de los ciclos biogeoquímicos (FAO & GTIS, 2016), de los cuales dependen los organismos que ahí viven y que son importantes para que los ecosistemas se desarrollen, de modo que realizar cambios en los suelos

representa transformaciones directas en los sistemas socioecológicos (SEMARNAT, 2010).

Particularmente, el aumento progresivo de los suelos agropecuarios y de las áreas urbanas son una expresión del desarrollo del hombre, por lo que ocurre el consecuente aumento en la demanda de recursos naturales como agua, alimentos y energía, que a su vez son necesarios para sostener los procesos de desarrollo económico donde predominan actividades como agricultura y ganadería, aunado a las actividades sociales y culturales que traen consigo desechos que contribuyen a la contaminación, lo que trae repercusiones al ambiente de forma general (SNIARN, 2010).

Los impactos generados por el crecimiento de suelos agropecuarios y de las áreas urbanas, se manifiestan por medio de la aceleración en la pérdida de bosques, de otras vegetaciones y de cuerpos de agua.

En el caso de la disminución de bosques y otras vegetaciones, estos traen consecuencias de carácter biológico como la pérdida de biodiversidad, cambios en la composición de las especies vegetales y animales, modificación de los ciclos biogeoquímicos y pérdida de productividad de ecosistemas, lo que disminuye su capacidad de resiliencia ante las actividades humanas. Entre las consecuencias socioeconómicas están la migración poblacional, la alteración en el préstamo de servicios ambientales, y la pérdida de recursos naturales; las consecuencias paisajísticas son el aumento en las emisiones de CO₂, las perturbaciones al balance hidrológico y la pérdida de suelos, que terminan por generar modificaciones al clima (Academia Mexicana de Ciencias, 2010).

La pérdida de los cuerpos de agua mantiene una relación con el cambio climático, esto debido a que el aumento de temperatura y la disminución de las precipitaciones, además de traer consigo pérdida de la cantidad de agua, también altera el equilibrio químico y cambia la temperatura de esta, lo que afecta

directamente a los ecosistemas, así mismo, ocurre el deshielo y el aumento en los niveles del mar (Martínez & Patiño, 2012).

Los cuerpos de agua también son afectados por los suelos agropecuarios y urbanos. El crecimiento de las áreas urbanas trae consigo la producción de residuos sólidos y el mal manejo de estos que genera la contaminación de las aguas del sistema de alcantarillado. Por su parte, la agricultura considerada la actividad que representa el mayor consumo del agua superficial del planeta (70%), es una amenaza directa para los cuerpos de agua dada la gran demanda que hace de este recurso, ello además de que en conjunto con la ganadería, se convierten en actividades que generan un mal manejo, ya que el uso de plaguicidas, fertilizantes, generación de residuos, y en general de prácticas inadecuadas, por lo que contribuyen a ser las principales causas de contaminación del agua por nitratos y fósforo (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2018).

Esta pérdida de cuerpos de agua conlleva así a dificultades para la existencia de los seres vivos, y de cualquier proceso que estos requieran para su desarrollo (Martínez & Patiño, 2012).

Es de esta manera que el cambio de uso de suelo como lo ha venido haciendo a través de los años 1990, 2000 y 2010, y como se pronostica en el escenario para el año 2030, de seguir bajo la misma tendencia de comportamiento, generaría grandes impactos en la RTMG contribuyendo con ello al calentamiento global (Academia Mexicana de Ciencias, 2010).

CONCLUSIONES

En la RTMG se tiene una alta complejidad dada la dinámica que establecen sus condiciones físico-geográficas y socioeconómicas, elementos que a su vez son las causas de los cambios de uso de suelo en la región.

Los insumos utilizados para los años 1990, 2000 y 2010 fueron la base para la construcción del escenario tendencial al año 2030. Si se realiza un análisis de los cambios de uso de suelo para estos años, se identifica en todo momento crecimiento de suelos agropecuarios y de áreas urbanas, pérdida de bosques, y un aumento al año 2000 de otras vegetaciones y cuerpos de agua, sin embargo, al año 2010 estos últimos experimentan pérdidas.

La hipótesis de esta investigación se cumplió de forma parcial, ya que en la RTMG los flujos migratorios si han traído consigo un crecimiento de las áreas urbanas y de los suelos agropecuarios, y el escenario construido muestra que esa tendencia se mantendrá para el año 2030; sin embargo, no son la única causa de los cambios de uso de suelo, sino que existen otras causas tales como altitud, cuerpos de agua, incendios, actividades económicas primarias, secundarias, y terciarias, localidades urbanas, localidades rurales, y carreteras.

Las variables de cambio están relacionadas entre sí e inclusive unas son causas y/o consecuencias de las otras, y es hacer notar la predominancia antrópica, por lo que existe un papel protagónico de los humanos sobre el cambio de uso de suelo en la RTMG.

El escenario de cambio de uso de suelo para el año 2030 pronosticó que en la RTMG se mantendrá la tendencia que ha venido tomando fuerza desde el año 1990, pasando por el 2000, y acentuándose hacia el año 2010, la cual identifica el crecimiento de los suelos agropecuarios y de las áreas urbanas a costa de la cobertura de bosques, de otras vegetaciones y de cuerpos de agua, de forma evidente y con impresionantes cifras, y cuyos efectos representan consecuencias directas para el bienestar socioambiental a nivel mundial.

Aunque de forma general se obtuvo un buen resultado del escenario tendencial de cambio de uso de suelo por medio de la metodología realizada en esta tesis, se identifican las siguientes limitantes y perspectivas:

- ✓ Dificultades en cuanto a la selección del modelo, insumos base a utilizar, escala espacial y temporal, definición de los parámetros, estructura y mecanismos internos de este, de modo que es importante profundizar sobre los modelos para llegar a comprenderlos de la forma más completa posible.
- ✓ Complicaciones en cuanto a la disponibilidad, confiabilidad, así como actualización de la información que se utilizó como insumos para el modelo para ambos países, pero principalmente para el lado de Guatemala; por lo que se deberían realizar estudios de mayor profundidad para entender mejor la dinámica biofísica y socioeconómica que ocurre en la RTMG, y que además estos se caractericen por permitir el acceso a la información con su respectiva actualización, siempre bajo un enfoque interdisciplinario entre la ciencia y la práctica, en este aspecto el trabajo de campo podría resultar de gran utilidad.
- ✓ El tamaño de la RTMG oscila alrededor de los 27 millones de hectáreas, dada la complejidad determinada por las grandes extensiones del área de estudio, se considera que realizar modelos prospectivos en menores escalas de análisis permitirían tener mejor control de estas, y al mismo tiempo, obtener una mayor confiabilidad en los resultados.
- ✓ Imposibilidad de los modelos para predecir un futuro certero, de esta forma, se necesita aprender a vivir con el error de incertidumbre, y de forma particular, con la aleatoriedad de las redes neuronales.
- ✓ La RTMG mostró una dinámica conjunta entre Chiapas, Campeche, Tabasco y Guatemala, que podría ser determinada por lo que establece la primera Ley de la Geografía “Todo está relacionado con todo, pero lo que está más cerca, más” (Tobler, 1970). Sin embargo, la influencia que existe en esta frontera podría extenderse más allá, por lo que la

construcción de modelos prospectivos de cambio de uso de suelo que abarquen otros países centroamericanos e inclusive sudamericanos, permitiría identificar patrones a nivel regional que incidan en la mejora de su desarrollo.

- ✓ Se recomienda dar impulso al desarrollo urbano de la frontera sur para lograr descentralizar las oportunidades en los países México y Guatemala, pero esto no debería hacerse a costa de terminar con la vegetación de la región, por lo que se necesita un plan de desarrollo acorde a las características y necesidades de la región de la frontera entre México y Guatemala, teniendo como base una visión sistémica y la búsqueda de la sostenibilidad.
- ✓ Es necesaria la creación de políticas públicas de control poblacional, migración, salud y educación, y en particular, educación ambiental. Estas políticas de planeación y conservación del recurso suelo, deben tomarlo como un regulador de servicios y soporte de procesos de los seres vivos, e incluirlo en el ordenamiento de los paisajes, a partir de analizar, planear, diseñar, y definir su manejo e implementación, corrección y supervisión.

La presente tesis mostró un área de oportunidad en la que los geógrafos pueden aportar para estos temas, ya que su capacidad de análisis integral y visión sistémica son útiles para comprender las transformaciones socioambientales que ocurren en el espacio geográfico, para analizar la dinámica que experimentan los paisajes, y el cambio de uso de suelo como una forma de expresión de esta dinámica.

Una vez entendidos los elementos anteriores, el geógrafo puede utilizar herramientas cartográficas y matemáticas para mostrar esa relación y para buscar formas de pronosticarla a futuro, por ejemplo, por medio de la generación de modelos prospectivos, cuyas bases en los Sistemas de Información Geográfica y en la Percepción Remota, servirían para prevenir y reducir problemáticas concretas asociadas al bienestar socioambiental.

Así, esta investigación permitió aportar información espacial sobre las probables dinámicas del uso del suelo en la RTMG, donde se identifica que los cambios de uso de suelo y vegetación generan procesos diversos sobre el ambiente, y es por ello que estos deben ser analizados, dado que, una vez que se sobrepase la resiliencia de los suelos se habrán perdido sus estructuras, su función y, por tanto, se verán alterados los sistemas socioecológicos; lo anterior resalta la importancia de estudiar el cambio de uso de suelo, de utilizar escenarios de cambio, y de aplicar estrategias de manejo sostenible de recursos, de modo que los escenarios realmente sirvan a los tomadores de decisiones y que estos los enfoquen a las políticas públicas, pasando de una reacción pasiva a una pro-activa; es importante mencionar al respecto que ya se tienen iniciativas de este tipo de políticas públicas para México y que llegan a extenderse y/o están teniendo influencia en Guatemala y en el resto de los países centroamericanos, entre estos se encuentran programas como el ya mencionado Plan de Desarrollo Integral Guatemala-Honduras-México-El Salvador, el programa Sembrando Vida, así como el programa Producción para el Bienestar, de cualquier manera, es importante mantener un monitoreo constante del desarrollo de estos y de sus resultados.

Es de esta forma que no se debe olvidar que entender los cambios históricos de los usos de suelo y pronosticar donde serán los futuros y cómo serán estos, no sirve de nada si no se toman acciones que intenten frenar estos impactos, como dijo el economista francés Michel Godet en 1995: “Quien ignora su pasado no puede anticipar sus posibles futuros, la mayoría de los sucesos llamados a producirse tienen sus raíces hundidas en un pasado lejano. Por esto, una ojeada frecuente al retrovisor forma parte una nueva conducta frente al futuro”.

REFERENCIAS

- ✓ Academia Mexicana de las Ciencias, Revista Ciencias, 2010. “La degradación de los recursos forestales en México”, (En línea). Consultado 1 de agosto de 2018.
Disponible:<http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/component/content/article/82/135-cambio-de-uso-del-suelo-y-degradacion-ambiental.html>.
- ✓ Alegría Arallely, 2010. “Política de operación óptima del sistema de presas del Río Grijalva. Efectos de la Curva Guía”. Tesis maestría en ingeniería. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- ✓ Almenar R., Diago M., 2002. “El proyecto necesario. Construir un desarrollo sostenible a escala regional y local”. La Nau Solidaria, Valencia.
- ✓ Alvarado Figueroa L. D., 2017. “Externalidades y multifuncionalidad en sistemas de producción ganadera del estado de Yucatán” (Tesis de maestría). Instituto de Ecología, UNAM, México.
- ✓ Amozurrutia J., 2014. “Apuntes para el Análisis prospectivo y la construcción de escenarios” (En línea). Fecha de consulta: 24 de octubre de 2018. Disponible en: computo.ceiich.unam.mx/webceiich/docs/amoz/Apuntes_Prospectiva.pdf
- ✓ Arnold Cathalifaud, M., & Osorio, F., 1998. “Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas”. Cinta de Moebio, (En línea). Fecha de consulta: 8 de julio de 2018. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10100306> ISSN.
- ✓ Arqhys, 2014. “Tipos de clima”. (En línea). Disponible en: <https://www.arqhys.com/arquitectura/tiposde-clima.html>.
- ✓ Bermejo G. R., 2014. Del desarrollo sostenible según Brundlant a la sostenibilidad como Biomesis. Universidad del País Vasco, Bilbao.
- ✓ Bertrand C., Bertrand G., 2006. “Geografía del Medio Ambiente, El sistema GTP Geosistema Territorio y Paisaje”. Universidad de Granada.
- ✓ Bienes R. & Marqués M. J., 2006. “Conservación del medio ambiente: revegetación, recuperación del suelo y empleo de residuos en el control de

la erosión”. Instituto Madrileño de Investigación en Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (MIDRA), Consejería de Economía e Innovación Tecnológica. Comunidad de Madrid.

- ✓ Brüscheiler S., Höggel U. & Kläy A., 2004. “Los bosques y el agua: interrelaciones y su manejo”. Informes de desarrollo y medio ambiente: Centre for development and Environment, Berna, Suiza.
- ✓ Buzai, G., 2016. “Geografía cuantitativa, paradigmas y simplicidad” Rev. Univ. geogr. vol.25 no.1 Bahía Blanca.
- ✓ Buzai G. et.al., 2015. “Teoría y Métodos de la Geografía Cuantitativa: Ordenar el territorio con base en la Geografía Cuantitativa”. MCA, Argentina, pp.39-51.
- ✓ Cabrera Mendieta D.R., 2018. “Modelado de sistemas dinámicos con Machine Learning: aplicaciones al mantenimiento basado en la condición”, (Tesis Doctoral Inédita). Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial. Universidad de Sevilla, España.
- ✓ Camacho et al., 2018. “Geomatic approaches for modeling land change scenarios”. Springer, Switzerland.
- ✓ Canales A., Vargas E., Montiel I., 2010. “Migración y salud en zonas fronterizas: Guatemala y México”. Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE)- División de Población de la CEPAL, Santiago de Chile.
- ✓ Castillo & Velázquez, 2015. “Sistemas complejos adaptativos, sistemas socio-ecológicos y resiliencia”. Quivera, ISSN 1405-8626, 11-32. Noviembre, 2014, De Universidad Autónoma del Estado de México, Base de datos.
- ✓ Censos Nacionales XI de Población y VI de habitación 2002, República de Guatemala. Instituto Nacional de Estadística. Disponible en: <https://www.ine.gob.gt>.
- ✓ CentroGeo, SEMARNAT-CONACYT, 2017. “Modelos prospectivos de cobertura terrestre para el Complejo Áreas Naturales Protegidas Sierra Madre de Chiapas”. Proyecto: Valoración económica de servicios ecosistémicos en el complejo de Áreas Naturales Protegidas de la Sierra Madre de Chiapas, México.

- ✓ Chávez Arturo, 2001. “Río Usumacinta, Tabasco”. (En línea). Disponible en: <https://www.mexicodesconocido.com.mx/rio-usumacinta-tabasco.html>.
- ✓ Colegio de la Frontera Norte (COLEF), 2015. “Encuestas sobre migración en las fronteras norte y sur de México (EMIF), para el año 2015. Disponible en: <https://www.colef.mx>
- ✓ Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo, 2011. “Atlas Centroamericano para la Gestión Sostenible del Territorio”. Programa Regional para la Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental, Sistema de la Integración Centroamericana, (En línea). Disponible en: https://issuu.com/cathalac/docs/atlas_prevda.
- ✓ Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL), 2019. “Plan de Desarrollo Integral: El Salvador-Guatemala-Honduras-México: Diagnostico, áreas de oportunidad y recomendaciones de la CEPAL”.
- ✓ Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP), 2008. “Guatemala y su biodiversidad: un enfoque histórico, cultural, biológico y económico”. Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- ✓ Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), 2012. “Informe de pobreza y evaluación en el estado de Chiapas”. Disponible en: www.coneval.gob.mx.
- ✓ Contreras K. & J., Corti M., De Sousa J., Durán M., Escalante M., 2008. “El agua un recurso para preservar”. Universidad de Los Andes, Departamento de Medicina Preventiva y Social.
- ✓ Datos macro Expansión, 2012. “Índice de Desarrollo Humano (IDH)”. Naciones Unidas.
- ✓ Dawn C. Parker, Steven M. Manson, Marco A. Janssen, Matthew J. Hoffmann, and Peter Deadman, 2003. “Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review”. (En línea). *Annals of the Association of American Geographers*, 93:2, 314-337. Disponible en: DOI: 10.1111/1467-8306.9302004.
- ✓ Degenne, P., Lo Seen D., 2016. “Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graph”, (En línea) Cirad, Environment and

Societies Department, UMR TETIS, Montpellier, France. Disponible en: www.sciencedirect.com.

- ✓ Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R., 2013. “Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación de dos aplicaciones de software”, *GeoFocus (Sección)*, n° x, p. x-xx. ISSN.
- ✓ Dixon, J., Gulliver, A., Gibbon, D., Hall, M. 2001: “Farming Systems and Poverty”. FAO and World Bank Rome and Washington DC.
- ✓ Dorronsoro C., 2010. *Introducción a la Edafología*. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada.
- ✓ Dudley, N. (Editor), 2008. “Directrices para la aplicación de las categorías de gestión de áreas protegidas”. Gland, Suiza: UICNx+96pp. ISBN: 978-2-8317-1088-4.
- ✓ Duval Soledad, Benedetti Graciela, Campo Alicia, 2015. “Relación clima-vegetación: adaptaciones de la comunidad del jarillal al clima semiárido, Parque Nacional Lihué Calel, provincia de La Pampa, Argentina”. *Investigaciones Geográficas*, Instituto de Geografía, UNAM.
- ✓ Dyama K., Castillo A., 2006. *Manejo Conservación y Restauración de Recursos Naturales de México*. UNAM, Siglo XXI.
- ✓ Eastman J. R., 2012. “IDRISI Selva manual”. Worcester, MA, USA: Clark Labs, Clark University.
- ✓ Eastman J.R., Solorzano A., and Fossen, M. E., 2005. “Transition Potential Modeling for Land-Cover Change”. In: D. J. Maguire, M. Batty and M. F. Goodchild, Eds., *GIS, Spatyal Analysis and Modeling*, ESRI Press, Redlands, 2005, pp. 357-385,
- ✓ Edín Cuadra D., 2014. “Los enfoques de la Geografía en su evolución como ciencia”. *Revista Geográfica Digital (En línea)*. IGUNNE. Facultad de Humanidades. UNNE. Año 11. N° 21. Enero a junio, 2014. ISSN 1668-5180 Resistencia, Chaco. Disponible en: <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/default.htm>.
- ✓ Encuesta Intercensal INEGI, 2015. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/>.

- ✓ Etter A., 1991. “Introducción a la Ecología del Paisaje: Un marco de integración para los levantamientos ecológicos”. Bogotá, Colombia.
- ✓ FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura) & Banco Mundial, 2018. “Plataforma de territorios inteligentes: El equilibrio rural-urbano en América Latina y El Caribe”.
- ✓ FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura) & GTIS (Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo), 2016. “Estado mundial del recurso suelo”. Resumen técnico. Roma, Italia.
- ✓ Feeny D., Berkes F., 1990. The tragedy of de commons 22 years later. Human Ecology Vol. 18, No. 1.
- ✓ Flores López, José Manuel, 2006. “Chontales de Tabasco: Pueblos indígenas del México Contemporáneo”. Comisión Nacional de los Pueblos Indígenas (CDI), México. (En línea). Disponible en <http://www.cdi.gob.mx>.
- ✓ Folke C., Holling CS., et.al., 2002. “Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems”. Royal Swedish Academy of Sciences, Vol. 31, 437-440.
- ✓ Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A. C., 2017. “Cuencas hidrográficas” (En línea). Disponible en: <https://agua.org.mx/que-es-una-cuenca>.
- ✓ Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2018. “Contaminación del agua”. (En línea). Disponible en: <https://agua.org.mx/contaminacion-del-agua/>.
- ✓ FORDECYT, 2017. “Demanda 2007-06: Frontera Sur de México: dimensión regional y bases para su desarrollo integral”. Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECyT), CONACYT.
- ✓ FORDECYT, 2017-2018. “Propuesta de Investigación. Frontera Sur de México, dimensión regional y bases para su desarrollo integral. Primera fase 2017-2018”. FORDECyT, CONACYT.

- ✓ Forrester Jay, 2009. "Some Basic Concepts in System Dynamics". (En línea). Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology. Disponible en: www.clexchange.org.
- ✓ Galeana, Cotler, et al., 2019 "Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación". (En revisión). Revista de Investigaciones Geográficas.
- ✓ Galeana Pizaña, J. M., 2016. "Expansión de los Sistemas productivos en Centroamérica". CentroGeo, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Corredor Seco Centroamericano, Plataforma Geoespacial de Divulgación.
- ✓ García D., 2006. "La escala y su importancia en el análisis espacial". Asociación Española de Ecología Terrestre, Departamento de Biología de Organismos y Sistemas (Ecología). Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente, Ecosistemas 15 (3): 7-18. Septiembre, 2006. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=432>.
- ✓ García López, Yahír G., 2014. "Geografía Económica de México". Editorial Patria, México.
- ✓ García Quintero, Janett Josefina, 2007. "Geometría, sismicidad y deformación de la placa de cocos subducida". Tesis de maestría en Ciencias de la Tierra. Centro de Geociencias, UNAM, México.
- ✓ García R., 2011. "Interdisciplinarietà y sistemas complejos". Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales, Vol. 1, 66-101.
- ✓ GeoEnciclopedia, 2016. "Tipos de clima, información y características" (En línea). Disponible en: <https://www.geoenciclopedia.com/tipos-de-clima/>.
- ✓ Geografía Infinita, 2015. "El clima de México a través de los mapas". (En línea). Disponible en: <https://www.geografiainfinita.com/2015/07/el-clima-de-mexico-a-traves-de-los-mapas/>.
- ✓ Geoweb IDEGeo, 2018. Insumos Centrogeo mapas, (<http://idegeo.centrogeo.org.mx>).

- ✓ González O. & Ramírez A., 1994. “Geografía del Medio Ambiente. Una Alternativa del Ordenamiento Ecológico”. Universidad Autónoma del Estado de México.
- ✓ GuateValley, 2018. Río Chixoy. (En línea). Disponible en: <https://bit.ly/2GuhVNB>.
- ✓ Hagen-Zanker Alex, 2002. “Multi-method assessment of map similarity”. International Journal of Geographical Information Science - GIS.
- ✓ Holland C., 2010. “Enciclopedia de grupos religiosos en las Américas y la Península Ibérica: Religión en Guatemala”. Programa Latinoamericano de Estudios Socio-religiosos (PROLADES). Recuperado el 3 de agosto del 2018, de <https://goo.gl/u2UmMQ>.
- ✓ Holloway J. and Mergensen K., 2018. “Statistical Machine Learning Methods and Remote Sensing for Sustainable Development Goals: A review”. School of Mathematical Sciences, Queensland University of Technology, Australia. Remote Sensing. 2018; 10(9):1365.
- ✓ Ibáñez Juan José & Manríquez Francisco Javier, 2011. “Los andosoles (WRB, 1998), suelos volcánicos”. Fundación para el conocimiento, Madrid, España.
- ✓ Instituto de Estudios y Divulgación sobre Migración (INEDIM), 2017. México. Disponible en: <https://www.estudiosdemigracion.org>
- ✓ Instituto Geográfico Nacional (IGN), España. Suelos, Atlas Geográfico Nacional. España.
- ✓ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010. “Información por entidad y Cuéntame INEGI”. (En línea). Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx>.
- ✓ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2017. “Clasificación para Actividades Económicas”, México. (En línea). Disponible en: www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/205/download/5998.
- ✓ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), 2016. Datos Norte de Guanajuato, climas. (En línea). Disponible en: www.inifap.gob.mx/circe/SitePages/internas/datosnort.aspx.

- ✓ Institute of Medicine (IOM), 2015. “Assessing the use of agent-based models for tobacco regulation”. Washington, DC: The National Academies Press.
- ✓ Jaramillo D., 2002. “Introducción a la ciencia del suelo”. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Medellín.
- ✓ Joorabian & Gholamalifard, 2015. “Scenario-based land cover change modeling and its implications for landscape pattern analysis in the Neka Watershed, Iran”. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. Volume 1, July 2015.
- ✓ Kanevski M., Pozdnoukhov A., Timonin V., 2009. “Machine Learning for Spatial Environmental Data: Theory, applications and software”. Environmental Sciences, Environmental Engineering. Swiss Academy, Switzerland.
- ✓ Khoi, D.D.; Murayama, Y., 2010. “Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam”. *Remote Sens.* 2010, 2, 1249-1272.
- ✓ Leh M., Bajwa S., Chaubey I., 2011. “Impact of land use change on erosion risk: an integrated remote sensing, geographic information system and modeling methodology”. Department of Agricultural and Biological Engineering and Department of Earth and Atmospheric Sciences, Purdue University, West Lafayette, IN, USA Received 8 October 2010; Revised 27 April 2011; Accepted 27 May 2011.
- ✓ Liping C, Yujun S., & Saeed S, 2018. “Monitoring and predicting land use and land cover changes using remote sensing and GIS techniques DA case study of a hilly area, Jiangle, China”. *PLoS ONE* 13(7): e0200493. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200493>.
- ✓ Liu J., Folke C., Ostrom E., et.al., 2007. *Coupled Human and Natural Systems*. *Ambio*. Vol. 36, No. 8, pp. 639-649.
- ✓ López I., Changollan F., et.al., 2006. *Ecología*. Ed. Umbral, México.
- ✓ Magaña Rueda, Víctor y Pérez José Luis, Conde Cecilia, 1998. El fenómeno de El Niño y la oscilación del sur. Sus impactos en México. *Ciencias* 51, julio-septiembre, 14-18.

- ✓ March Ignacio & Castro Marco, 2013. “La cuenca del río Usumacinta: Perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable”. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México.
- ✓ Martínez P. & Patiño C., 2012. “Efectos del cambio climático en la disponibilidad del agua en México”. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, vol. III, núm. 1, enero-marzo de 2012, pp. 5-20.
- ✓ Mas Jean-Francois, Kolb Melanie, Paegelow Martin, Camacho Maria, Houet Thomas, 2013. “Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages”. *Environmental Modelling & Software* 51 (2014) 94.11.
- ✓ Murayama Y. & Thapa R. B., 2011. “Spatyal analysis and modeling in geographical transformation process: GIS-based applications”. (Vol. 100). Springer Science Business Media. 302 p. doi: 10.1007/978-9-007-071-2.
- ✓ National Research Council, 2014. “Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements”. (En línea). Washington, DC: The National Academies Press. Disponible en: <https://doi.org/10.17226/18385>.
- ✓ Navarrete A., 2016. “Aproximaciones teóricas sobre la resiliencia de los Sistemas Socio Ecológicos (SSE) y la importancia de la inclusión de las mujeres en Cherán, Michoacán (Ensayo para obtener el grado de especialista en Economía Ambiental y Ecología). UNAM, Ciudad de México.
- ✓ Nemec, K. T., J. Chan, C. Hoffman, et.al., 2013. “Assessing resilience in stressed watersheds”. *Ecology and Society* 19(1): 34. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06156-190134>.
- ✓ Nuñez Juan M., 2018. “Aplicaciones del Análisis Espacial: Análisis Espacial para la valoración de Servicios Ecosistémicos”. CentroGeo, CONACYT, México.
- ✓ Organización de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (FAO) & Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo (GTIS), 2016. “Estado Mundial del Recurso Suelo”, Resumen Técnico. Roma, Italia.

- ✓ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2018. “Panorama de la pobreza rural en América Latina y El Caribe”, Santiago Chile.
- ✓ Organización del Sector Pesquero y Acuícola del Istmo Centroamericano (OSPESCA), 2017. “Lago de Izabal” (En línea). Disponible en: <https://climapesca.org/2017/05/11/lago-de-izabal/>.
- ✓ Organización Internacional para las migraciones (OIM), ONU, 2018.
- ✓ Organización Meteorológica Mundial (OMM) & Global Water Partnership (GWP), 2006. “Gestión integrada de crecientes, caso de estudio: México, río Grijalva”. Programa Asociado de Gestión de Crecientes OMM/GWP.
- ✓ Ortega R., 2018. “Estructura territorial del turismo y su asociación con el comercio de artesanías en Chichicastenango, Guatemala”. Tesis de licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- ✓ Ostrom E., 2009. A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecoloycal Systems. Science. DOI: 10.1126/science.1172133 pp. 325-419
- ✓ Parker, Manson, Janssen, Hoffman and Deadman, 2003. “Multi-Agent Systems for the Simulation of Land Use and Land-Cover Change: A review.
- ✓ Piscitelli M., 2015. “Conservación y Manejo de Suelos”. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN). Consultado el 20 de julio de 2018. Disponible en: <https://www.unicen.edu.ar/content/degradaci%C3%B3n-de-suelos>.
- ✓ Plataforma Proyecto Región Transfronteriza México-Guatemala, CentroGeo, CONACYT, 2018. Disponible en: www.rtmg.org/
- ✓ Plataforma de Servicios de Información Geoespacial, CentroGeo. Series de uso de suelo y vegetación II, III y V del INEGI. Disponible en: <http://idegeo.centrogeo.org.mx/>
- ✓ Pontius, R.G.J., 2000. “Quantification error versus location error in comparison of categorical maps”. Photogramm. Eng. Rem. Sens. 66, 1011-1016.

- ✓ Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2015. “Índice de Desarrollo Humano para las entidades federativas, México. Avance continuo diferencias persistentes”. DF., México.
- ✓ Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2015. “Informe Nacional de Desarrollo Humano, Guatemala, 2014. Guatemala.
- ✓ Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2016. Informe Regional sobre el Desarrollo Humano para América Latina y el Caribe. Progreso multidimensional: bienestar más allá del ingreso. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, USA, 2016.
- ✓ Quiroz G., 2013. “Plan de Adaptación, Ordenamiento y Manejo Integral de las Cuencas de los Ríos Grijalva y Usumacinta: Cuaderno cartográfico”, CentroGeo, CONACYT.
- ✓ Radio Televisión Española (RTVE). Pilar Samuel, 2016. ¿En qué consiste el fenómeno El Niño y qué intensidad está alcanzando este año? Noticias Ciencia y Tecnología, España.
- ✓ Rathe L, 2017. “La sustentabilidad en los Sistemas Socioecológicos. Utopía y Praxis Latinoamericana”, (En línea). Consultado el: 14 de julio de 2018. Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=27952381006>> SSN 1315-5216.
- ✓ Revista Geográfica Digital, 2014. “Los enfoques de la Geografía en su Evolución como ciencia”. Dr. Dante Edín Cuadra. IGUNNE. Facultad de Humanidades. UNNE. Año 11. Nº 21. Enero - junio 2014. ISSN 1668-5180 Resistencia, Chaco.
- ✓ Reyes L. M., 2018. “Análisis de los instrumentos de política pública y sus efectos de contención en la expansión de sistemas agropecuarios en el complejo de ANPs de la Sierra Madre de Chiapas”. Tesis de licenciatura. Geografía, Filosofía y Letras, UNAM.
- ✓ Ríos del planeta, 2016. “Río Motagua”. (En línea). Disponible en: <https://www.guatevalley.com/que-visitari/rio-motagua-los-amates-izabal>.
- ✓ Ruiz Ruiz, T. M., 2017. “Análisis comparativo de índices de eutrofización en lagunas costeras del estado de Sonora”. Tesis de Doctorado en Ciencias:

Uso, manejo y preservación de los recursos naturales. Baja California Sur, México.

- ✓ Rzedowski, J., 2006. “Vegetación de México”. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 p.
- ✓ Salinas C. & Ramón A., 2013. “Propuesta metodológica para la delimitación semiautomatizada de unidades de paisaje de nivel local”. Revista del Departamento de Geografía. USP, Volume 25 (2013), p. 1-19.
- ✓ SEDESOL, 2014. Reglas de Operación del Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias (PDZP), para el ejercicio fiscal 2014, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28/12/2013. Disponible en: http://www.microrregiones.gob.mx/documentos/2014/RO_PDZP2014_DOF.pdf.
- ✓ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2010. “Características principales de los tipos y subtipos de climas”. (En línea). Disponible en: http://www.sema.gob.mx/SRN/SIIAEC/POETE/CUADROS/Cuadro_6_Descripcion_de_los_Tipos_de_Climas.pdf.
- ✓ Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia (SEGEPLAN), 2012. “Etnias de Guatemala”. Geoportal: Infraestructura de Datos Espaciales en Guatemala (IDEG). Disponible en: <http://ideg.segeplan.gob.gt/geoportal>.
- ✓ Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE), 2013. “Diagnóstico General de la Frontera México Guatemala” (En línea). Disponible en: http://www.senado.gob.mx/comisiones/relext_orgint/eventos/docs/fronterasur_ponencia.pdf.
- ✓ SEMARNAT, Compendio de Estadísticas Ambientales, 2010. Vegetación, uso y degradación de suelos en México. (En línea). Consultado el 30 de julio de 2018. Disponible en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/

- ✓ Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2017. Tectónica de placas. (En línea). Disponible en: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Tectonica-de-placas.html>.
- ✓ Sharma N., 2013. "Importance of Distance Metrics in Machine Learning Modelling". (En línea). Disponible en: towardsdatascience.com.
- ✓ Sherman F., 2012. Los Sistemas Socio Ecológicos. Una aproximación conceptual y metodológica. Departamento de Economía, Métodos cuantitativos e Historia económica, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España.
- ✓ Sistema de Información Cultural (SIC) México, 2009. Pueblos indígenas.
- ✓ Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales - SNIARN-, 2010. "Compendio de Estadísticas Ambientales 2010". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México.
- ✓ Tobler W. R., 1970. "A computer model simulation of urban growth in the Detroit region". *Economic Geography* 46(2).
- ✓ Tobler W. R., 1987. "Measuring Spatial Resolution". Department of Geography, University of California. USA.
- ✓ Tonini, Marj & Amato, Federico & Murgante, Beniamino & Kanevski, Mikhail, 2018. "Fuzzy definition of Rural Urban Interface: An application based on land use change scenarios in Portugal". *Environmental Modelling and Software*. 104. 10.1016/j.envsoft.2018.03.016.
- ✓ Toro, F. J., 2007. "El desarrollo sostenible un concepto de interés para la Geografía". Editorial Universidad de Granada, España.
- ✓ Tribunal Centroamericano del agua, 2004. "Caso: Infestación de la planta herbácea *Hydrilla verticillata* en el Lago Izabal". República de Guatemala. (En línea). Disponible en: http://tragua.com/wp-content/uploads/2012/04/caso_lago_izabal.pdf.
- ✓ Troll Carl, 2010. "Ecología del Paisaje". *Investigación ambiental* 2(1), 2010.
- ✓ Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), 2008. "Categorías de manejo de Áreas Protegidas". (En línea). Disponible en: <https://bit.ly/2txnHr3>.

- ✓ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), 2013. “Introducción en áreas naturales protegidas”. Hojas técnicas de divulgación científica, UACJ, México. (En línea). Disponible en: <https://bit.ly/2DP7LCL>.
- ✓ Viera A. & Garrett J., 2005. “Understanding Interobserver Agreement: The Kappa Statistic”. (En línea). University of California. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15883903>.
- ✓ Viggiano Julio César, 2014. “Las rocas: clasificación, propiedades y usos en ingeniería”. (En línea). Disponible en: <https://bit.ly/2NeQHuu>.
- ✓ Walker B., Holling C.S., et.al., 2004. “Resilience, adaptability and transformability in Social Ecological Systems”. *Ecology and Society* 9(2):5. (En línea). Disponible en: <http://www.ecologyandsociety.org/org/vol9/iss2/art5>.
- ✓ Weichselgartner J., Kelman I., 2015. "Geographies of resilience: Challenges and opportunities of a descriptive concept". *Progress in Human Geography*. Vol. 39 (3) 2cuatro9- 2seis7.
- ✓ World Database on Protected Areas (WDPA), 2014. “Protected Areas”. (En línea). Disponible en: <https://bit.ly/2TW8FUO>.

ANEXOS

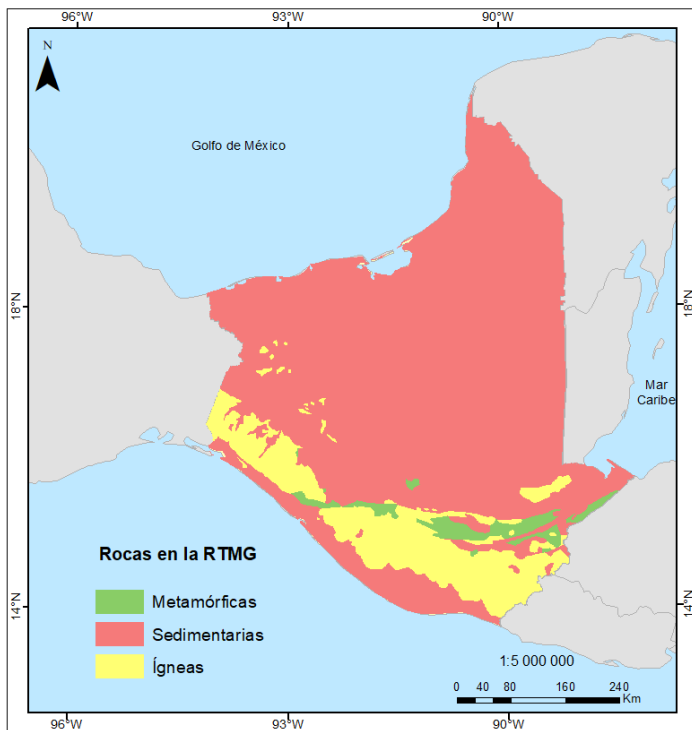
Características biofísicas y culturales de la RTMG.

Geología

La distribución y área que abarcan las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias en la RTMG pueden observarse a continuación.

Mapa- Geología de la RTMG. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.

Tabla- Rocas que componen la RTMG. Fuente: Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.



Rocas	Hectáreas en la RTMG	Porcentaje en la RTMG
Sedimentarias	33,390,976	72%
Ígneas	9,395,036	21%
Metamórficas	3,383,825	7%

Como se identifica, la mayor parte de la región, es decir, el 72% del norte y centro, así como la franja sur, están conformados por rocas sedimentarias. Un 21% de la RTMG, que se localiza al sur de la región es de rocas ígneas, y estas se distribuyen principalmente en la zona que recorre la cordillera centroamericana, permitiendo identificar la presencia de la más alta actividad volcánica y tectónica de toda la RTMG, por lo que se establece así una relación entre altimetría y geología.

Por su parte, las rocas metamórficas cubren únicamente el 7% y se localizan al sureste de la RTMG (SGM, 2017). A partir de lo anterior se establece que son los sedimentos los que predominan en la RTMG, y su importancia radica fundamentalmente en su uso industrial (Viggiano, 2014).

Edafología

En la RTMG se distribuyen 11 distintos tipos de suelo:

Mapa- Distribución de suelos en la RTMG. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la Plataforma Proyecto Región Transfronteriza, 2018.

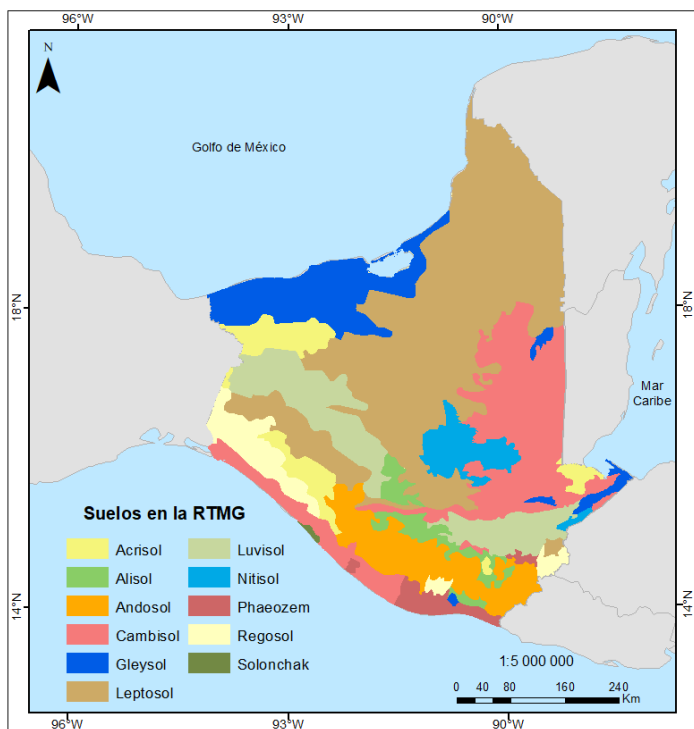


Tabla- Suelos de la RTMG. Fuente: Plataforma proyecto Región Transfronteriza, 2018.

Suelos	Hectáreas que abarcan en la RTMG	Porcentaje que cubren de la RTMG
Leptosol	14,142,233	32%
Cambisol	9,778,983	22%
Regosol	4,704,716	11%
Nitisol	3,611,984	8%
Gleysol	3,236,354	7%
Andosol	2,825,581	7%
Luvisol	2,691,511	6%
Acrisol	1,411,046	3%
Phaeozem	936,208	2%
Alisol	766,643	2%
Solonchak	27,013	0%

Como se observa en el mapa, los leptosoles y cambisoles son los que mayormente predominan en la región, estos suelos son aptos para la ganadería, pero no lo son del todo para la agricultura, por lo que esta actividad podría ser más compleja de efectuarse en las zonas en las que estos se distribuyen, que es principalmente al norte y al este de la RTMG. También se puede identificar en el mapa que en la zona donde atraviesa la cordillera centroamericana predominan además de las

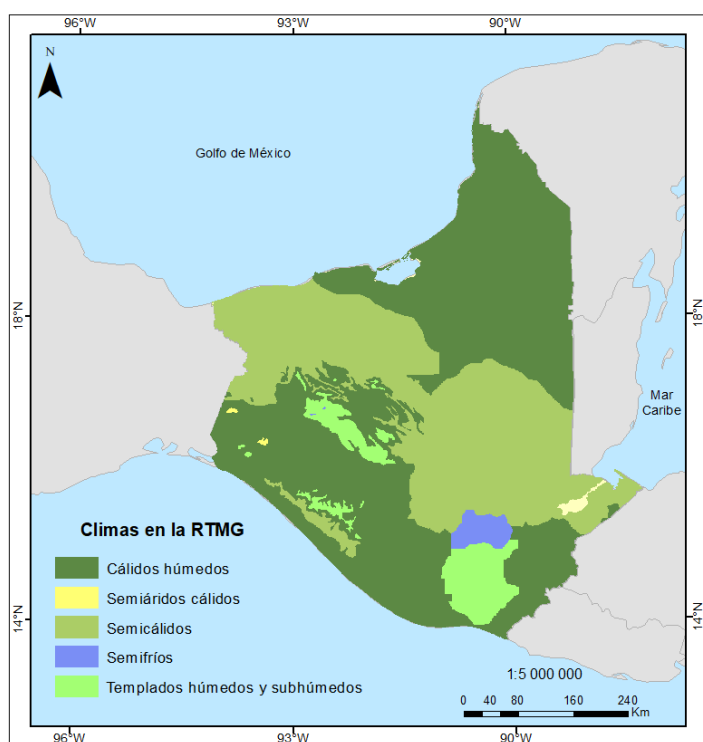
rocas ígneas y las más altas elevaciones, los andosoles, que son suelos volcánicos, y que, aunque cubren únicamente el 7% de la RTMG son altamente fértiles para el desarrollo de cultivos, lo que podría indicar el potencial que tiene esta zona de la RTMG para la agricultura y el desarrollo forestal (Ibáñez & Manríquez, 2011).

Climatología

La RTMG presenta cinco climas distintos:

Mapa- Distribución de los climas en la RTMG.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de CONABIO, 2008 & Atlas Centroamericano para la Gestión Sostenible del Territorio, 2007.

Tabla- Climas de la RTMG. Fuente: CONABIO, 2008 & Atlas Centroamericano para la Gestión Sostenible del Territorio, 2007.



Climas	Hectáreas que cubren de la RTMG	Porcentaje que representan de la RTMG
Cálidos húmedos	14,699,430	56%
Semicálidos	9,563,200	37%
Templados húmedos y subhúmedos	1,558,963	6%
Semifríos	366,165	1%
Semiáridos cálidos	19,906	0%

La tabla anterior muestra que los climas cálidos húmedos son los predominantes en la RTMG abarcando el 56%. Estos climas se caracterizan porque la temperatura media anual es de 22°C, y como su nombre lo dice, se trata de climas con mucha humedad, con precipitación, nubosidad y altos grados de radiación solar, por lo que la temperatura es elevada y los vientos se presentan de forma irregular, las

vegetaciones características son bosques y sabanas (Arqhys, 2014), y se distribuyen principalmente al norte y sur de la RTMG.

Los Climas semicálidos cubren el 37% de la región, y se distribuyen en la parte central de la RTMG. La temperatura media anual oscila entre los 18 y 22 °C, las precipitaciones son escasas, y el cielo puede presentar nubosidad. Se relacionan con la vegetación de matorral, chaparral, pastos y periodos de sequía (INIFAP, 2016).

Las condiciones climáticas son importantes porque quedan determinadas por la altitud, y porque mantienen relación directa con el tipo de vegetación, así como con la aptitud que pueda presentar un sistema para ser agrícola (Duval et al., 2015).

Flora y fauna

Se considera que a lo largo de la RTMG se distribuyen siete distintos tipos de vegetación:

Mapa- Distribución de la vegetación en la RTMG. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI, 2010 & Atlas Centroamericano para la Gestión Sostenible del Territorio, 2007.

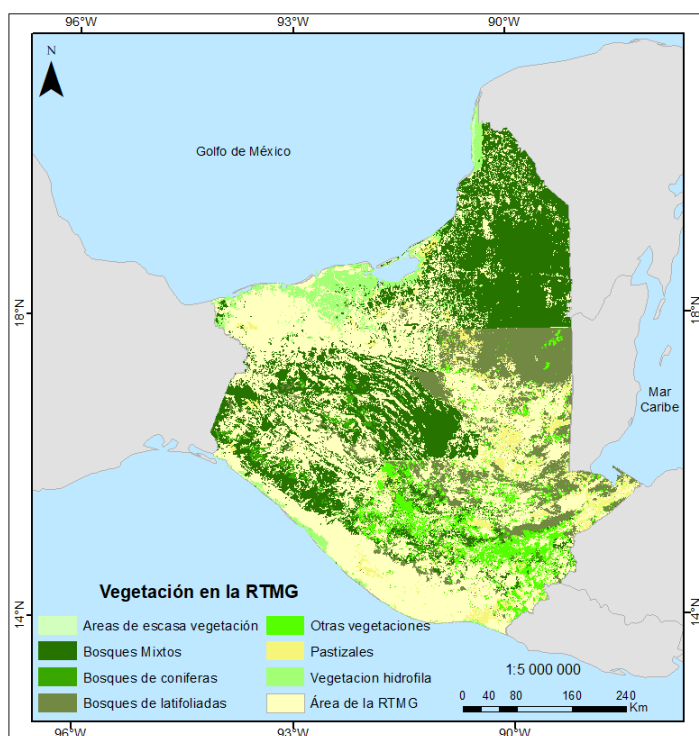


Tabla- Tipos de vegetación existente en la RTMG. Fuente: INEGI -USV, 2010- & Atlas Centroamericano para la Gestión Sostenible del Territorio -USV, 2010-, 2007.

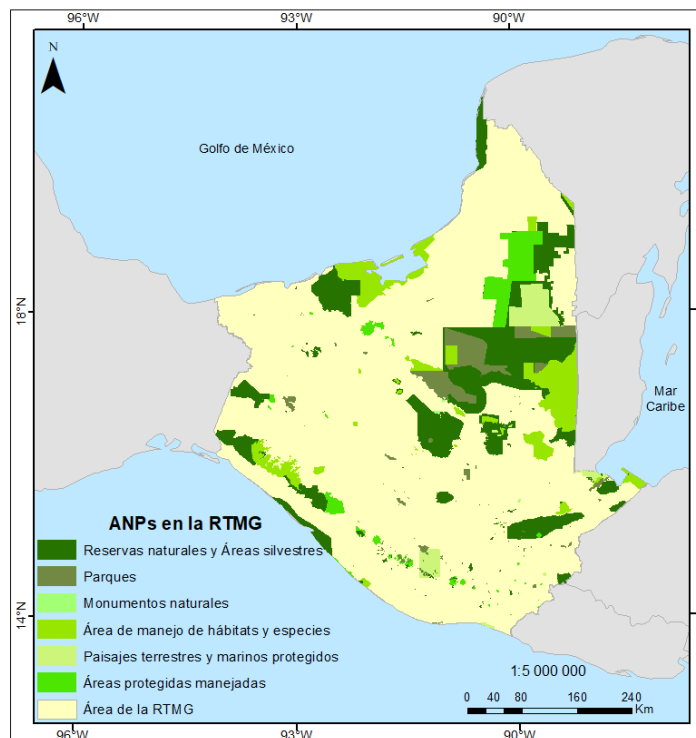
Tipo de vegetación	Área (hectáreas)
Bosques mixtos -bosques de coníferas-latifoliadas, bosques mesófilos de montaña, plantaciones forestales y selvas-	7,732,320
Bosques de latifoliadas	2,988,710
Otras vegetaciones -tales como arbustales, páramos y sabanas-	1,659,370
Pastizales	1,190,430
Vegetación hidrófila	1,052,940
Bosques de coníferas	489,954
Áreas de escasa vegetación	44,676

Respecto a la fauna de la RTMG, se encuentran las siguientes especies:

- ✓ Mamíferos: mono araña, jaguar, murciélagos, ardillas, saraguato, oso hormiguero.
- ✓ Anfibios: ranas, sapos, salamandras.
- ✓ Aves: quetzales, guacamayas, colibríes, loros, gaviñanes.
- ✓ Reptiles: cocodrilos, lagartijas, tortugas.
- ✓ Especies marinas: tiburones, ballenas, y peces como robalos, mojaras, entre otros (INEGI, 2010).

Gran parte de la biodiversidad con la que cuenta la RTMG está resguardada bajo el concepto de las Áreas Naturales Protegidas (ANPs) como se observa en el mapa siguiente.

Mapa- Distribución de las Áreas Naturales Protegidas en la RTMG. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la WDPA, 2014.



El Mapa anterior muestra que en la existe una importante cantidad de ANPs que se encuentran distribuidas a lo largo de todo el territorio, y donde las de mayor

extensión se encuentran en áreas de poca altitud, en las que predominan los climas cálidos húmedos, es decir, al noreste de la RTMG.

De acuerdo con datos de la World Database on Protected Areas, al año 2014 en la zona que cubre la RTMG existían un total de 479 Áreas Naturales Protegidas. Estas ANP fueron categorizadas con base en la información de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza -UICN-, la cual considera seis distintas categorías de ANPs:

Tabla- Áreas Naturales Protegidas en la RTMG. Fuentes: UICN, 2008 & WDPA, 2014.

Categoría de ANP	Descripción	ANPs que incluye	Cantidad en la RTMG	Importantes por su extensión en hectáreas	
I	Protección estricta	Reservas naturales y Áreas naturales silvestres	212	Maya	1,273,780
				Calakmul	1,259,230
				Montes Azules	327,602
II	Conservación y protección del ecosistema	Parques Nacionales	166	Laguna de tigre	289,750
				Sierra del Lacandón	200,606
				Mirador Río Azul	118,824
III	Conservación de rasgos naturales	Monumentos naturales	3	Bonampak	4,357
				Yaxchilan	2,627
				Semuc Champey	1,841
IV	Conservación mediante manejo activo	Áreas de manejo de hábitats y especies	36	Laguna de Términos	547,641
				Parque Nacional Yaxh'Áj-Nakum-Naranjo	488,843
				Punta de Manabique	152,909
V	Conservación de paisajes terrestres, marinos y recreación	Paisajes terrestres y marinos protegidos	11	Ancient Maya City and Protected Tropical Forests of	328,140

				Calakmul, Campeche	
				Cuenca del Lago Atitlán	110,230
				Tikal National Park	57,679
VI	Usos sostenible de los recursos naturales	Áreas protegidas manejadas	50	Balam-Ku	408,712
				Balan-Kin	98,830
				Pico El Loro-Paxtal	61,264

En la Tabla anterior se observa que las ANPs que predominan en la RTMG son las Reservas naturales y Áreas naturales silvestres con un total de 212; en segundo lugar, predominan los parques nacionales que son un total de 166; y en tercero, se encuentran las Áreas Protegidas Manejadas, ya que son 50 las que había al año 2014.

Diversidad cultural

En Chiapas, existen once pueblos indígenas, de acuerdo a la zona en la que se asientan, estos son: Jacatelco y Mame en Amatenango de la Frontera; Tojolabal en Las Margaritas; Cakchiquel en Mazapa de Madero; Motozintleco en Motozintla; Tzeltal y Lacandón en Ocosingo; Zoque en Rayón; Tsotsil en San Cristóbal de las casas; Chol en Tila y Chuj en La Trinitaria (SIC México, 2009). Con respecto a las lenguas habladas en Chiapas un 27% de la población habla una lengua indígena, y las cuatro lenguas más importantes son: Tzeltal, Tzotzil, Chol y Zoque (INEGI, 2010).

En Campeche existen cuatro etnias, que por su lugar de asentamiento son: Ixil en la ciudad de Campeche, y Kanjobal, Quiché y Kekchi en Champotón (SIC México, 2009). En este estado, el 12% de la población total habla una lengua indígena, predominando las lenguas Maya, Chol, Tzeltal y Kanjobal (INEGI, 2010).

En Tabasco solo se tienen una etnia, la cual se trata de los Chontales de Tabasco (SIC México, 2009). Estos se asientan en las tierras tropicales y húmedas principalmente en los municipios de Nacajuca y Centro, al centro-norte del estado de Tabasco; también se asientan en Centla y Macuspana en menor medida, y de

forma más dispersa en Jonuta y Jalpa de Méndez (Flores, 2006). En este estado, sólo el 3% de la población total habla una lengua indígena, y las lenguas que hablan son Chontal de Tabasco, Chol, Tzeltal y Tzotzil (INEGI, 2010).

En el caso de Guatemala, existen 25 grupos étnicos, 22 de ellos son de origen maya -su lengua es el maya-, los otras tres son la landina -idioma español-, xinka -lengua maya- y garífuna -lengua maya- (SEGEPLAN, 2012). Estos grupos hablantes de lengua indígena representan el 41% de la población total del país (Censo Guatemala, 2002). En el caso de la población de origen maya y xinka, estos residen áreas rurales, y la población landina y garífuna vive en áreas urbanas (Censo Guatemala, 2002).

Ahora bien, con respecto a las cuestiones de religión, en Chiapas para el año 2010, un 58% profesa la religión católica, esto mientras en Campeche se tiene 63% y en Tabasco un 65% (INEGI, 2010); y en Guatemala entre el 65% y el 70% (Holland, 2010). Así, en la RTMG más de la mitad de la población de la región tiene creencias religiosas y en sus creencias predomina la religión católica.

Se identifica de esta manera que en la RTMG una importante cantidad de la población es indígena, se hablan varias lenguas indígenas y además son fuertes las creencias religiosas.

La existencia de rasgos culturales comunes y a su vez la relación de estos con las características sociales, económicas y biofísicas, crean una dinámica en la RTMG de carácter complejo.