



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
POSGRADO DE GEOGRAFÍA

INFLUENCIA DEL USO DE SUELO SOBRE LA DIVERSIDAD Y ESTABILIDAD DE
PAISAJE DE MONTAÑA FRAGMENTADO

CASO DE ESTUDIO:
LA CUENCA DEL RÍO TUXPAN EN EL ESTADO DE MICHOACÁN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

CARLOS ARREDONDO LEÓN

Director de Tesis

Dr. Arturo García Romero

Revisores

Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento
Dr. José Ramón Hernández Santana
Dr. Raymundo Montoya Ayala
Dr. Humberto Reyes Hernández

Esta investigación fue realizada gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Programa de Posgrado en Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras.

Al Instituto de Geografía y Centro de Investigación en Geografía Ambiental.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado (Beca: 181837) para la realización del presente proyecto de investigación.

A mi tutor, comité tutorial y SÍNODO por su valiosa contribución.

DEDICATORIA

*A mi **F**amilia, que siempre estuvo a mi lado.*

RESUMEN

Michoacán es una de las entidades del país más afectadas por los cambios no planificados de uso de suelo, lo que conlleva la deforestación y fragmentación de los bosques templados, en particular la región que comprende la cuenca del río Tuxpan. A fin de explicar esta relación, se analiza la dinámica del uso de suelo, la deforestación y fragmentación de los bosques, y sus consecuencias sobre el paisaje forestal (en términos de los cambios en la diversidad y estructura vertical de las comunidades forestales).

Para alcanzar lo anterior, el área de estudio se caracterizó en paisajes de distinto rango taxonómico-corológico (con criterios morfoestructurales, climáticos, de vegetación y uso de suelo); seguidamente se analizó la dinámica del paisaje, identificando los principales procesos de cambio (positivos y negativos), con base en los Índices de Deforestación (ID) y Transformación Media Anual (ITMA). Finalmente, se determinó, a escala de paisajes elementales, la influencia que guardan ciertos atributos de la fragmentación sobre la diversidad y estructura vertical de las comunidades vegetales.

Los resultados señalan una tendencia a los procesos positivos, entre ellos, la sucesión de vegetación secundaria a bosques maduros, específicamente los bosques mixtos de pino-encino de laderas volcánicas altas y medias, siendo los abetales de las altas cumbres volcánicas los bosques más afectados por los ID. Debe añadirse que el área y la forma del fragmento son los atributos de la fragmentación que más influyen en la composición y estructura de las comunidades vegetales.

ABSTRACT

Michoacan is one of the entities of the country most affected by unplanned changes in land use, leading to deforestation and fragmentation of the temperate forest, particularly the region comprising the Tuxpan River Basin. In order to explain this relation, we analyze the dynamics of land use, deforestation and forest fragmentation, and its impact on the forest landscape (in terms of changes in diversity and vertical structure of forest communities).

To achieve this, the study area was characterized in different taxonomic rank scenery-chorological landscape units (with morpho-structural, climate, vegetation and land use criteria); then we analyzed the dynamics of the landscape, identifying the main processes of change (positives and negative) based on the Deforestation (ID, acronym in Spanish) and Annual Media Transformation (IMAT, acronym in Spanish) Rates. Finally, it was determined at level of elementary landscapes, the influence that keep certain attributes of fragmentation on the diversity and vertical structure of plant communities.

The results show a tendency to the positive processes, including secondary vegetation succession in mature forests, specifically pine-oak mixed forests of middle and high volcanic slopes, being fir forest high volcanic peaks the most affected forest ecosystems due to ID's. Should be added that the area and shape of the snippet are the attributes of the fragmentation that most influence the composition and structure of plant communities.

PREFACIO

En este trabajo de investigación tratamos de explicar de qué manera influye el uso de suelo en el paisaje de montaña (bosques templados, concretamente). Es bien sabido que el ser humano, a través del aprovechamiento y explotación de los bosques, tiene como objetivo primordial la transformación del recurso en un “bien común”. Para ello, el recurso forestal ha sido sometido históricamente a cambios que modifican su estructura y funcionamiento ecológico.

Una manera palpable de comprobar la transformación de los bosques templados es mediante la presencia de parcelas del recurso forestal, cuya transformación es el resultado de la combinación entre el potencial abiótico (PA), explotación biótica (EB) y la acción antrópica (AA). Para evaluar la influencia que ejerce la acción antrópica sobre el paisaje de montaña, es preciso analizar el estado actual y la dinámica del paisaje en términos de los cambios de uso de suelo. El estudio implica, entre otras cosas, primero: analizar el paisaje forestal desde una perspectiva espacio-temporal y, después, analizar la estructura espacial de los espacios abiertos con uso de suelo diversificado. Para este estudio utilizamos técnicas y herramientas propias para el análisis de las estructuras espaciales, que nos permiten determinar la forma y el tamaño de las cubiertas de suelo.

Ahora bien, la distribución de los remanentes o fragmentos del paisaje no se presenta en nuestra realidad concreta como un hecho fortuito, por el contrario, obedece a una peculiar combinación tripartita entre PA, EB y AA –bloque indisociable que caracteriza espacial y funcionalmente a un sistema territorial-. A partir de esta combinación el territorio puede ser caracterizado en Unidades Sistémicas Básicas (USB) para su análisis y evaluación. En ellas, el concepto de horizontalidad y verticalidad se fusionan integralmente para formar los llamados Sistemas de Paisaje o Geosistemas.

Consideramos que la cuenca hidrográfica del río Tuxpan es una porción de territorio que puede ser caracterizada en USB, y que los límites espaciales de estas unidades coinciden parcialmente con los rasgos morfoclimáticos de la región hidrográfica. Al interior de cada unidad se presenta un patrón espacial de uso de suelo (sistema de uso de suelo) diferenciado de otros por la combinación de PA, EB y AA.

El sistema de uso de suelo no es más que un sistema que se genera al interior de una USB, por uno o más sectores productivos –con sus actividades generales y específicas–, pero en la mayoría de los casos uno con primacía sobre los demás. En el caso de la cuenca del río Tuxpan, esto supone un mosaico paisajístico matizado de manchas de bosque de diferente tamaño con uso forestal maderable (leña para uso doméstico, por ejemplo) o no maderable (extracción de pasto, tierra de monte y recolección de frutos y semillas, entre otros usos específicos), segregadas todas ellas por paisajes elementales o fragmentos de monte con uso agrícola intensivo-extensivo (agricultura de temporal, principalmente).

Se puede decir, por tanto, que el proyecto de investigación aborda, desde la perspectiva de la ecología del paisaje, el tema de la fragmentación; por ser uno de los conceptos más abordados por esta disciplina en su quehacer científico. Este fenómeno se ajusta a la organización estructural y espacial del territorio, por lo que dedicamos un capítulo a la comprensión de la organización estructural y espacial de la cuenca; lo que presupone una descripción geográfica. Se acude, por lo tanto, a la geoecología del paisaje –debido a su alto contenido geográfico– como disciplina que permite caracterizar taxonómica y corológicamente un territorio en unidades o sistemas de paisaje. La bondad metodológica de este enfoque reside en el hecho de que otorga un significado jerárquico-funcional al territorio.

De esta manera, el proyecto de investigación inicia con la caracterización de la cuenca del río Tuxpan en unidades de paisaje (capítulo II), seguido del estado actual y dinámica del paisaje. En éste, se analizan las principales cubiertas de suelo de acuerdo el origen, el desarrollo fisonómico de la vegetación, la clase y la intensidad del uso del suelo. Posteriormente, se examina la dinámica del paisaje a escala del área de estudio, de los sistemas y los subsistemas de paisaje. En aquel, se caracteriza la cuenca en unidades morfoestructurales; cuyos límites geográficos se ajustan al contenido geográfico para definir las unidades de paisaje. De esta manera, las unidades de paisaje contienen información de los atributos que las definen: morfoestructural-climática, explotación biótica y acción antrópica. También se plantea caracterizar el área de estudio: a) en unidades morfoestructurales a partir de criterios de inclusión –la morfología, el origen, la edad, composición litológica y arreglo tectónico–; el mesoclima (temperatura y precipitación media anual) y la vegetación potencial de paisaje y, b) en unidades de paisaje o geosistemas; por lo que el producto final de este capítulo son dos mapas: uno con las principales morfoestructuras y, otro, con los sistemas de paisaje. Los resultados del capítulo II se pueden consultar en dos publicaciones: I) Arredondo-León *et al.*, (2008). Recent Changes in Landscape-dynamics trends in tropical highlands, central Mexico. *Interciencia*. Vol. 33. N°. 8: 569-577 y, II) Arredondo y García-Romero (2009). Uso del suelo y transformación del paisaje rural en el centro de México: el caso de la cuenca del río Tuxpan, Michoacán. *Temas de Geografía Latinoamericana*. Reunión de la Conference of Latin Americanist Geographers (CLAG-2005 Morelia): 293-320[s1].

Por su parte, el capítulo IV tiene como objetivo evaluar la influencia o magnitud que ejerce el fenómeno de la fragmentación –en términos del área y la forma de los fragmentos– sobre la composición florística y estructura vertical de la vegetación, específicamente de los bosques mixtos de pino-encino. Por otro, analizar el estado y dinámica de la fragmentación del paisaje total, de las clases

(cubiertas de suelo) y paisajes elementales (parches) en diferentes niveles de integración (cuenca, geosistemas y subgeosistemas). Se emplean, entre otras métricas de la fragmentación, el número y densidad de parches, representatividad paisajística, longitud y densidad de borde, área, forma, conectividad y diversidad.

Para finalizar, se evalúa la correlación que existe entre los atributos de la fragmentación y las variables de la vegetación en términos de la composición (riqueza) y la estructura (densidad de los estratos arbóreo y arbustivo, cobertura, entre otras) y productividad (área basal de los árboles y arbustos) de las comunidades de bosque mixto de pino-encino. Así mismo, se aborda la influencia de los factores antrópicos sobre la diversidad y estructura de las comunidades vegetales.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. ASPECTOS PRELIMINARES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Hipótesis	9
1.4 Objetivos	9
1.4.1 Objetivo general.....	10
1.4.2 Objetivos particulares	10
1.5 Marco teórico-conceptual.....	11
1.5.1 Fundamentos generales	11
1.5.2 Contribuciones de la Ecología del Paisaje al análisis estructural y espacial del territorio	12
1.5.3 Aportaciones de la Geoecología del Paisaje: el geosistema como modelo teórico, el sistema de integración ambiental y la clasificación de los paisajes.....	16
1.6 Área de estudio	23
1.6.1 La cuenca del río Tuxpan.....	23
1.6.2 La cuenca hidrológica como unidad ambiental	25
1.7 Metodología.....	26
BIBLIOGRAFÍA	36
CAPÍTULO II. ORGANIZACIÓN MACROESTRUCTURAL Y TAXONOMÍA DEL PAISAJE EN LA CUENCA DEL RÍO TUXPAN	47
2.1 Las morfoestructuras	48
2.1.1 Geología	49
2.1.2 Litología	52
2.1.3 Unidades litológicas.....	53
2.1.4 Estratigrafía	57
2.1.5 Análisis estructural.....	60
2.1.6 Tectónica.....	62
2.1.7 Morfoestructuras	65
2.2 Mesoclima	80
2.2.1 El clima regional.....	82
2.2.2 El clima local de la cuenca del río Tuxpan	85
2.3 Vegetación Potencial	94
2.3.1. Selva Baja Caducifolia en los lomeríos sedimentarios de la base de la cuenca (<1,400 msnm)	95
2.3.2. Bosques puros y mixtos de pino-encino en las laderas y fondos de los relieves volcánicos (1,600 a 3,500 msnm)	97
2.3.3 Abetales puros en las cumbres de las principales elevaciones volcánicas (>3,500 msnm)	99
2.4 Estructura del paisaje: los geosistemas	100
2.4.1 Geosistemas	103
BIBLIOGRAFÍA	108
CAPÍTULO III. ESTADO ACTUAL Y DINÁMICA DEL PAISAJE	111
3.1. Estado actual del paisaje.....	114

3.2 Dinámica del Paisaje	118
3.2.1 Índice de Transformación Media Anual (ITMA)	118
3.2.2 Índices de deforestación	122
3.2.3 Variabilidad del estado y dinámica del paisaje, a escala de sistemas de paisajes	124
3.2.4 Procesos de la dinámica del paisaje (1976-2000)	130
CAPÍTULO IV. FRAGMENTACIÓN DEL PAISAJE.	147
4.1. Estado actual y dinámica de la fragmentación a escala de la cuenca	147
4.2. Estado actual y dinámica de la fragmentación a escala de geosistemas.....	159
4.3. Estado actual y dinámica de la fragmentación a escala de subgeosistemas	166
4.4. Diversidad y estructura vertical de la vegetación	175
4.4.1 Riqueza (R)	175
4.4.2 Estructura vertical	177
4.4.3 Influencia de la fragmentación sobre las variables de la vegetación.....	179
4.5. Influencia de los factores antrópicos sobre la diversidad y estructura de la vegetación.....	182
CONCLUSIONES.....	188
BIBLIOGRAFÍA	198

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

Figura 1. Modelos de geosistemas	17
Figura 2. Geosistema	18
Figura 3. Componentes macroestructurales y mesoestructurales	21
Figura 4. Mapa de localización. Cuenca del río Tuxpan, Michoacán.	25
Figura 5. Matriz conceptual de los procesos de transición.	32
Figura 6. Flujo Metodológico.	35
Figura 7. Formas de relieve del Sistema Neovolcánico Transmexicano	50
Figura 8. Formaciones litológicas	57
Figura 9. Complejos volcánicos	58
Figura 10. Mapa de los colapsos.	61
Figura 11. Dirección y longitud de los morfoalineamientos	64
Figura 12. Morfoalineamientos.	65
Figura.13. Mapa con las principales morfoestructuras.	79
Figura 14. Distribución de temperatura media anual y de la precipitación total anual en México.	82
Figura 15. Distribución regional de los climas según el patrón altitudinal.	83
Figura 16. Climas de la región	84
Figura 17. Mapa con estaciones meteorológicas.	86
Figura 18. Gradiente térmico altitudinal	87
Figura 19. Gradiente pluviométrico	88
Figura 20. Promedio Pluviométrico Mensual de la Marcha Anual de la Precipitación por estación meteorológica a escala de la cuenca.	90
Figura 21. Se presentan las estaciones meteorológicas con la condición climática para la zona de estudio.	94
Figura 22. Síntesis ambiental.	102
Figura 23. Los geosistemas.	107
Figura 24. Adaptación de los geosistemas a los pisos bioclimáticos.	107
Figura 25. Matriz conceptual de los procesos de transición.	114
Figura 26. Estado actual del paisaje	117
Figura 27. A la izquierda se muestran las cubiertas del suelo en 1976-1986.	121
Figura 28. Porcentaje de la superficie recuperada en los procesos de regeneración	137
Figura 29. Mapa de procesos positivos.	137
Figura 30. Procesos negativos.	142
Figura 31. Estado actual de la fragmentación por tamaño del parche.	151
Figura 32. Dinámica de fragmentación por tamaño y clase de fragmento a escala de cuenca	157
Figura 33. Dinámica de la fragmentación por clases a escala de la cuenca.	158
Figura 34. Clases de cubiertas de suelo por geosistema.	161
Figura 35. Dinámica de la fragmentación por geosistema.	162
Figura 36. Mapa de dinámica de la fragmentación a escala del tamaño del fragmento.	166
Figura 37. Cubierta de suelo a nivel de los subgeosistemas.	167
Figura 38. Abundancia relativa (Pi) a escala del área de estudio.	176
Figura 39. Abundancia relativa (Pi) en los subgeosistemas IIa y IIc.	177
Figura 40. Densidad relativa (D) en los subgeosistemas IIa y IIc.	179

TABLAS

Tabla 1. Cronología porcentual de formaciones geológicas	53
Tabla 2. Morfoestructuras	66
Tabla 3. Estaciones meteorológicas	85
Tabla 4. Estaciones meteorológicas con la condición climática	94
Tabla 5. Índice de Transformación Media Anual (ITMA) a nivel de cuenca	121
Tabla 6. Índice y nivel de deforestación	124
Tabla 7. Índice de Transformación Media Anual por sistemas	127
Tabla 8. Índices de Deforestación	130
Tabla 9. Matriz de transición 1976-2000	132
Tabla 10. Matriz de transición en tres periodos 76-86, 86-95 y 95-00	132
Tabla 11. Dinámica de la fragmentación a escala de paisaje	153
Tabla 12. Clase por tamaño de fragmento	160
Tabla 13. Indicadores de la fragmentación por geosistema a escala de la cuenca	160
Tabla 14. Dinámica de la fragmentación por geosistema, clase de cubierta y tamaño del fragmento	163
Tabla 16. Estado Actual y dinámica de la fragmentación a escala de los subgeosistemas	174
Tabla 17. Riqueza a nivel de los subgeosistemas IIa y IIc	175
Tabla 18. Diversidad y estructura de los inventarios seleccionados	185

CAPÍTULO I. ASPECTOS PRELIMINARES

1.1 Introducción

Los ecosistemas forestales de montaña han sido tradicionalmente considerados como espacios de interés para la sociedad, no sólo por su diversidad biológica y ecosistémica (Jansky *et al.*, 2002), sino también por la dotación de los servicios ambientales básicos para la alimentación (agua y energía, y diversos recursos de la flora, fauna, suelo y minerales de importancia); para el desarrollo socio-económico; así como por ser espacios idóneos para la ocupación, la contemplación y la recreación (García-Ruíz, 1990; Masera, 1996; Matthews, 2000; Smethurst, 2000; Jansky *et al.*, 2002). Debido a lo anterior, cerca del 10% de la población mundial vive en ecosistemas forestales de montaña; en tanto que 40% ocupa áreas adyacentes, principalmente en laderas medias y bajas de las cuencas hidrológicas, representando una quinta parte de la superficie de la Tierra –30 millones de km²– (Jansky *et al.*, 2002).

Por otra parte, las áreas de montaña se caracterizan por fuertes gradientes topográficos con intensas precipitaciones que incrementan la dinámica hidrológica y geomorfológica de las vertientes, así como la susceptibilidad de sus paisajes frente a procesos que provocan disturbios (Price, 1999). Numerosas fuentes (Ramírez *et al.*, 2003; Gordon *et al.*, 2002; He *et al.*, 2002; Jansky *et al.*, 2002; Lambin *et al.*, 2001; Jodha, 2000; Smethurst, 2000; Price and Thompson, 1997 y Riebsame *et al.*, 1996) afirman que esta situación se exagera bajo condiciones de intensa ocupación y uso que alteran las estructuras naturales, las relaciones internas de funcionamiento y los ritmos de la dinámica y evolución del sistema ambiental (Lambin *et al.*, 2001; Martínez de Pisón, 2000).

Con el fin de explicar desde una perspectiva espacio-temporal el impacto de los procesos de ocupación y uso del suelo sobre la dinámica ambiental y del paisaje en las áreas de montaña (Sala *et al.*, 2000), la investigación científica de las últimas décadas se ha centrado en el diagnóstico del estado actual y tendencias de los *cambios de cobertura y uso del suelo* (CCUS). Su estudio se basa en la relación con las actividades humanas que intervienen en diversos procesos ambientales de relevancia global (Ojima, 1994; Houghton, 1994; Olsson *et al.*, 2000; Schweik *et al.*, 1997; Tekle and Hedlund, 2000; Riebsame y Parton, 1994; Turner *et al.*, 2003; Price, 1999), como la deforestación, el cambio climático (Houghton *et al.*, 1999) y la degradación de suelos (Tolba *et al.*, 1992); los cuales han sido señalados como factores que impactan en las estructuras y funciones del sistema ambiental y del paisaje (Everham y Brokaw, 1996; Kasperson *et al.*, 1995; Vitousek *et al.*, 1997), a distintas escalas de análisis: global, regional y local (Cortina *et al.*, 1998).

Una de las consecuencias más graves del cambio de uso del suelo es la deforestación (Bocco *et al.*, 2001). A este proceso (de desaparición de las masas forestales, fundamentalmente causado por las actividades humanas) se atribuye que grandes extensiones de bosque del planeta hayan sido reducidas –en un 44% (Houghton, 1994)–, causando graves daños en el sistema ambiental y los paisajes de montaña. El problema se agrava al considerar que los bosques remanentes – tras el proceso de deforestación– presentan diversos grados de fragmentación¹.

Además, a estos procesos de deforestación se les atribuye la alteración del balance hídrico, la dinámica geomorfológica y el deterioro del suelo –principalmente por erosión y agotamiento de nutrientes y agua–, lo que trae

¹ Como tal se entiende al proceso de segregación espacial de entidades que, al ser segmentadas, manifiestan una disminución del hábitat original, incremento de la heterogeneidad paisajística y mayor aislamiento de los fragmentos (He *et al.*, 2000; Carsjens y Lier, 2002; Jongman, 2002).

como consecuencia una reducción de los almacenes de carbono en suelo y de vegetación (Walker y Homma, 1996; Foster *et al.*, 1998; Eberhardt *et al.*, 2003), un impacto negativo en el clima y microclima, y una emisión global de gases que incrementan el efecto invernadero (Houghton, 1994; Ochoa, 2001). Todos estos daños repercuten en el funcionamiento de las áreas forestales; en otras palabras, incrementan su sensibilidad y la magnitud de las perturbaciones; al tiempo que limitan su resiliencia o rapidez para recuperar su estabilidad tras los eventos de disturbio (Pimm, 1984; Foster *et al.*, 1998; Eberhardt *et al.*, 2003). La disminución o pérdida de la calidad de la cubierta vegetal, por ejemplo, afecta la estructura de las comunidades forestales, incluyendo la pérdida de especies (Burel y Baudry, 2002). Otros autores alertan sobre la reducción de los servicios ambientales debido a las consecuencias negativas de la fragmentación (Velásquez *et al.*, 2003), entre ellas una crisis ambiental en la próximas décadas, llamada también *crisis de la biodiversidad* (Trani y Giles, 1999).

Esta situación es particularmente importante en el caso de las áreas de montaña, donde la dinámica espacial y temporal de los tipos y sistemas de uso de suelo y su relación con los procesos de deforestación y fragmentación forestal ocurre a través de una acusada sucesión de patrones que se ajusta a los gradientes altitudinales. De hecho, se ha reconocido que la diversidad de patrones provee de un marco adecuado para entender la heterogeneidad espacial de las variables ambientales y del uso del suelo, así como de la distribución de los patrones de disturbio y su manifestación en términos de cambios ambientales y paisajísticos.

1.2 Planteamiento del problema

En México, la explosión demográfica, el reparto agrario, el desarrollo y la expansión de las actividades agrícolas, y el programa de desmontes y *ganaderización* han sido señalados entre las principales causas de la

transformación de los usos de suelo. Por ejemplo, entre 1970 y 1990, se registró un incremento del 39% de los terrenos agrícolas y el área dedicada a la ganadería creció en un 15% (INEGI-SEMARNAP, 1999). Debido a lo anterior, la pérdida de superficie arbolada en el país fue de más de 42.7 millones de hectáreas (SEMARNAP, 1998), de las cuales, 82% se debieron a la deforestación, 8% a la tala ilegal, 4% a los incendios forestales y 2% a los cambios de uso del suelo; por lo que la proporción de la cobertura forestal per cápita en México se situó por debajo de la media mundial (Maser, 1996; Velázquez *et al.*, 2001).

Los bosques de pino y encino se cuentan entre los ecosistemas con los más altos niveles de degradación y destrucción. Los factores asociados a estos cambios son múltiples y variados, por ejemplo: a) la agricultura, tanto la moderna que se desarrolla bajo sistemas de producción mecanizada, como la que refiere al sistema tradicional de roza, tumba y quema; b) la explotación forestal, incluyendo la tala forestal legal y furtiva, así como la extracción de una amplia variedad de recursos forestales maderables (celulosa, papel, tablaje, etc.) y no maderables (resinas, fibras, gomas, ceras, rizomas, etc.) y; c) la ganadería extensiva en agostaderos (Gómez-Pompa, 1985; Rzedowski, 1988; Challenger, 1998; Geist y Lambin, 2002; Lambin *et al.*, 2001).

Para Cortina *et al.*, (1998) y Dupuy *et al.*, (2007) la colonización ejidal de principios de los años 1970, el otorgamiento de créditos a los ejidatarios y de concesiones a empresas privadas para la siembra de maíz y frijol y el aprovechamiento forestal, fueron los antecedentes que enmarcaron la expansión de la frontera agrícola y el desmonte de grandes extensiones de terreno en Campeche y sur de Quintana Roo. Otros autores interpretan estos procesos como el resultado de una política inadecuada de conservación (Velázquez *et al.*, 2003), del mal manejo de los incendios forestales (Salazar *et al.*, 2004) y de los

proyectos de desarrollo regional en cuencas hidrológicas (Reyes *et al.*, 2000), así como de la inseguridad en la tenencia de la tierra (Reyes-Hernández *et al.*, 2003).

Toledo *et al.*, (1989), citado por Challenger (1998), calcularon que, para finales del siglo pasado, se habían desmontado más de cuatro millones de hectáreas de bosque de pino y encino –lo que equivale al 20% del total de las tierras de cultivo de México– para destinarlas a la agricultura. En la actualidad, los bosques remanentes ocupan 17% del territorio (Palacio *et al.*, 2000) y el segundo lugar en superficie respecto del total de las zonas ecológicas del país (Challenger, 1998). Sin embargo, los remanentes de bosques presentan, en su mayor parte, tasas de deforestación anuales promedio mayor al 0.5% (Maser *et al.*, 1997), siendo los pinos el principal blanco de la industria forestal mexicana (Challenger, 1998). Los escenarios futuros muestran que, de mantenerse las tendencias actuales, para el año 2030 se podría perder 50% del total de los bosques y selvas del país (Maser, 1996).

Dentro de este marco, el Estado de Michoacán es una de las entidades del país más afectadas por los cambios no planificados del uso de suelo (Maser, 1996; Bocco *et al.*, 1999; SEMARNAP, 2000). De acuerdo con estos autores, Michoacán perdió 513,644 ha de bosques templados en el periodo comprendido entre los años 1970 y 1990, en tanto que la superficie perturbada ascendió a 1,355,878 ha (21.51% del total de los bosques), tan sólo superada por el área destinada a la agricultura y los pastizales (24.61%) (SEMARNAP-INEGI, 1999). Por ejemplo, la superficie ocupada por cultivos semipermanentes, aumentó trece veces (de 39,784 ha a 508,009 ha), en tanto que la superficie de bosques se redujo en un 28.40% (de 1,811,232 ha a 1,297,188 ha).

En este periodo la tasa de deforestación fue de 1.8% anual y las tendencias se dirigen hacia la intensificación de la deforestación, misma que podría llevar al

retroceso del área forestal en un 55.9% respecto de su situación en los años setenta (Bocco *et al.*, 2001). En el caso de los bosques templados, éstos tienen sólo un 23% de probabilidad de conservarse, frente a un 36% de convertirse en bosques abiertos.

De acuerdo con Merino (2004), las condiciones que limitan la conservación y el uso sostenido de los bosques en Michoacán son las siguientes: a) El *rentismo forestal*, esquema que mantiene a los dueños de los bosques ajenos a su manejo, y en el que los prestadores de servicios técnicos forestales tienden a responder más a las demandas de la industria que al interés por la conservación o por el beneficio de las comunidades dueñas del recurso; b) La *reducida extensión de muchos de los predios forestales*, a la que se añade la *parcelación de los bosques ejidales y comunales*, los cuales limitan las posibilidades del manejo forestal –que a menudo se reduce a planear la extracción– y; c) El *avanzado deterioro de los recursos* de la mayoría de las áreas forestales del estado.

Contrariamente a lo que se ha expresado, Cortina *et al* (1998) encontraron sensibles procesos de regeneración que se adjudican a la crisis económica de principios de los años 1980, al súbito incremento en el costo de la producción, y a los cambios en las políticas ambientales y forestales. Más que una política de conservación, otros autores señalan que la recuperación de los bosques es efecto de la migración y de los cambios estructurales en el desarrollo rural, ocurridos entre 1980 y 2000 (Velázquez *et al.*, 2003). Al abandono de la tierras en el primer caso y, a la organización de grupos indígenas forestales dedicados a la conservación de los bosques con prácticas ecoturísticas, en el segundo. Asimismo, Reyes-Hernández (2003) señala que, si bien algunos financiamientos otorgados entre 1993 y 1995 (entre ellos el programa PROCAMPO) tuvieron a bien mejorar las condiciones del campo, estos fueron retomados por los campesinos como un

sustento económico familiar, lo que frenó la extracción de madera y propició la conservación de los espacios forestales.

No obstante el interés por la dinámica del uso del suelo y su influencia sobre los procesos de deforestación y fragmentación de los bosques templados en México y, en particular, en el caso del Estado de Michoacán, existe en la literatura escasa referencia sobre la fragmentación forestal que afecta a los bosques remanentes tras el proceso de la deforestación, su caracterización espacio-temporal y su explicación en términos de la multiplicidad de factores de la dinámica del uso del suelo (urbanización, agricultura mecanizada, ganadería y explotación forestal); en particular sobre la dinámica espacial y temporal de los tipos y sistemas de uso de suelo, la deforestación y su relación con los patrones de fragmentación a distintas escalas de análisis (Forman, 1994; Saunders *et al.*, 1991; Turner, 1996). De igual forma, existe un escaso conocimiento de la influencia de los cambios en la estructura espacial de los fragmentos sobre la diversidad y la estructura vertical de las comunidades forestales (Ochoa, 2001), su dinámica vegetal, pérdidas de biomasa y de productividad que, según se ha señalado, afectan la estructura y la estabilidad –o capacidad de los bosques para mantenerse en equilibrio– (Ojima, 1994; Altieri, 1999; Trani y Giles, 1999; Jansky *et al.*, 2002).

La dinámica ambiental del paisaje en las áreas de montaña está íntimamente relacionada con la forma de apropiación de los recursos naturales, con los procesos de ocupación y con el uso del suelo; lo que impacta las estructuras y funciones del sistema ambiental que caracteriza a estos ecosistemas forestales. Por esta razón, se considera que la fragmentación de los bosques templados es un reflejo de las actividades que el hombre realiza con el fin de apropiarse de los recursos naturales y que, la heterogeneidad espacial de los patrones de fragmentación y de uso de suelo que resultan del proceso de deforestación, influye directa o indirectamente en la diversidad y estabilidad de estos ecosistemas forestales. Esta situación no ocurre de forma aislada, por el

contrario, se exhibe bajo la existencia de ciertas limitantes naturales que, en conjunto con otras de tipo cultural, socioeconómico y político, determinan los tipos específicos y los sistemas de usos del suelo, en relación con los cuales se establecen patrones o estilos diferenciados de fragmentación del paisaje.

La influencia de los procesos de deforestación y fragmentación en la diversidad y estabilidad del paisaje ha sido estudiada en numerosos casos que, alrededor del mundo, han relacionado a la estructura espacial de los fragmentos con cambios en la estructura vertical y la composición florística de las comunidades vegetales, incluyendo cambios en la diversidad y la abundancia de especies; extinción de especies, poblaciones y comunidades nativas; e introducción de especies biológicamente exóticas (Ojima, 1994; Ochoa, 2001). En la mayoría de los casos las investigaciones señalan al tamaño del fragmento; su forma; el grado de aislamiento o vecindad respecto de otros fragmentos del mismo tipo; así como al efecto de borde, como los factores de la estructura espacial que más influyen sobre los organismos (Robbins *et al.*, 1989; Zipperer, 1993; Estrada y Coates, 1994; McIntyre, 1995; Schieck *et al.*, 1995; en Mas, 2000). Así, la teoría biogeográfica de las islas afirma que entre más grande es el tamaño del fragmento, mayor es la abundancia y diversidad de especies (MacArthur and Wilson, 1967; Duran, 1995). También se ha señalado que la proporción y el arreglo espacial de los fragmentos de distintas características influyen de manera directa o indirecta sobre la diversidad vegetal (Ochoa, 2001).

Por tanto, la investigación plantea las siguientes interrogantes: ¿Qué implicaciones tuvieron estos eventos en la configuración del estado actual del paisaje de los bosques templados de la cuenca del río Tuxpan? El interés por el área de estudio se incrementa si se plantean otras interrogantes: a) ¿Cómo han influido e impactado los cambios de uso de suelo en el proceso de deforestación y éste sobre la configuración del paisaje?, b) ¿cuál ha sido la magnitud real de la fragmentación del bosque templado en los últimos treinta años?, c) ¿de qué

manera favorece la organización geocológica natural de la cuenca al cambio de uso de suelo, la deforestación y fragmentación del paisaje?, d) ¿dónde y en qué medida se han presentado los procesos de conversión (deforestación y regeneración) de la cubierta vegetal? y, e) ¿cuáles han sido las consecuencias ecológicas de los cambios de uso de suelo, la deforestación y la fragmentación del paisaje de montaña en términos de la diversidad y estructura vertical de las comunidades?

Para responder a estas preguntas, el estudio se apoya en la ecología del paisaje, la cual propone métodos adecuados para el análisis de los patrones de distribución espacial de los fenómenos ecológicos (Naveh y Lieberman, 1984; Levin, 1992; Wiens, 1995) y su relación con los procesos de disturbio (Keitt *et al.*, 1997; Farina, 1996). Para determinar el nivel de la relación causa-efecto entre los usos de suelo y la fragmentación del paisaje, se considera no sólo la existencia de tipos específicos de uso, sino su organización en sistemas de usos diferenciados (agrícola de temporal y de riego, pecuario, urbano, entre otros), los cuales son entendidos como distintos escenarios asociados a patrones de comportamiento del paisaje fragmentado (He *et al.*, 2000).

1.3 Hipótesis

Los bosques que forman la cuenca del río Tuxpan presentan cambios en la diversidad y estructura vertical de las comunidades, los cuales se relacionan de manera directa con la dinámica del paisaje, y en particular con los patrones de deforestación y fragmentación forestal que caracterizan a los diversos sistemas de paisaje que la integran.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar la dinámica del uso de suelo, la deforestación y la fragmentación de los bosques que forman la cuenca del río Tuxpan, y sus consecuencias sobre el deterioro del paisaje forestal, en términos de los cambios en la diversidad y estructura vertical de las comunidades forestales.

1.4.2 Objetivos particulares

Caracterizar los sistemas de paisajes de distinto rango taxonómico-corológico que forman la cuenca del río Tuxpan, considerando para ello el estudio sectorial y la integración de diversos componentes macroestructurales (morfoestructuras y clima) y mesoestructurales (cubiertas de uso del suelo y vegetación) del sistema ambiental.

Evaluar, a diferentes escalas de integración ambiental y paisajística el impacto de la deforestación –resultado de la dinámica del uso del suelo–, determinando los principales procesos de cambio –conservación, regeneración, intensificación y disturbio– de los bosques templados en los últimos treinta años.

Evaluar la organización biofísica natural en la distribución del sentido y ritmo de la dinámica del uso del suelo y de éste, en la conformación de patrones de deforestación y fragmentación forestal.

Reconocer la influencia de diversos atributos de la fragmentación espacial – tamaño, forma y aislamiento– sobre la estabilidad del paisaje forestal, con especial atención en los cambios sobre la diversidad y la estructura vertical de las comunidades vegetales.

Generar un modelo representativo de los patrones de la fragmentación escala del sitio de estudio, sistemas de paisajes y sus consecuencias sobre diversos parámetros de la estabilidad del paisaje forestal –diversidad y estructura vertical de las comunidades– a escala de paisajes elementales (fragmentos).

1.5 Marco teórico-conceptual

1.5.1 Fundamentos generales

Desde su aparición, el término “paisaje” ha sido definido desde diversos puntos de vista, y su utilización en el análisis ambiental difiere según el enfoque, los métodos y técnicas empleados para su estudio. Sin embargo, hay un consenso por considerarlo como una entidad de carácter ambiental y espacial, compleja e integrada por componentes ambientales que hacen la vez de subsistemas interdependientes de distinta jerarquía (González, 1981). Para la formulación de una teoría sobre el paisaje se considera fundamental abarcar los subsistemas y los procesos naturales y sociales que intervienen en dicha formulación (Laurie, 1983). Para ello, en este caso se propone la integración de diversos conceptos, métodos y herramientas propios de dos de las principales líneas de estudio del paisaje: la geocología del paisaje y la ecología del paisaje.

Uno de los principales problemas que surgen de la integración de distintas orientaciones, como es en este caso una de tipo geográfico y otra ecológica, es la ambigüedad de los términos que se aplican para la descripción –taxonómico-corológica– del paisaje y la diversidad de sus respectivos enfoques, modelos de integración y síntesis ambiental; imprecisiones que complican la unificación conceptual y metodológica entre distintos enfoques.

Sin embargo, Sochava *et al.*, (1974) consideran que los dos modelos de mayor reconocimiento en las investigaciones encaminadas al estudio integral de los

paisajes: el geosistema y el ecosistema, tienen en común el asentamiento de sus bases teórico-conceptuales en la Teoría General de Sistemas, y en la aplicación práctica del concepto de sistema en la concepción sistémica del paisaje (Bolós, 1992). Así, mientras que el geosistema, corresponde al nivel más alto de organización en la epigeosfera, y se define como la *combinación de un geoma o subsistema abiótico y un bioma en donde se incluye un subsistema socioeconómico creado por la sociedad humana* (Bolós, 1992); por su parte, el *ecosistema* (bioma) corresponde a un elemento en la jerarquía de los sistemas físicos que va desde el universo hasta el átomo (Tansley, 1935; en Burel y Baudry, 2002), siendo definido como el *conjunto de los organismos vivos y el medio físico*.

De hecho, Beroutchachvili y Radvanyi (1978; en Burel y Baudry, 2002) encontraron que estos conceptos (geosistema y ecosistema) son equiparables, con la salvedad de una aproximación de carácter biocéntrico y metabólico para el caso del ecosistema; y de carácter holístico en el geosistema; en el cual los procesos bióticos y abióticos se entienden globalmente. Así, el concepto geográfico de geosistema tiene como objetivo designar *una unidad espacial bien delimitada y analizada a una escala dada*, quedando establecido en una serie de trabajos cartográficos o mapas que sintetizan la integración de los diferentes componentes del territorio (morfoestructuras, clima, relieve, agua, suelo, vegetación y usos de suelo) mediante la generación de capas temáticas.

1.5.2 Contribuciones de la Ecología del Paisaje al análisis estructural y espacial del territorio

De acuerdo con Troll (1939), la ecología del paisaje trata del *estudio del complejo de elementos referentes, tanto a la asociación de seres vivos (biocenosis) como de sus condiciones ambientales, los cuales interactúan en una*

división natural del espacio que puede abarcar distintos órdenes de tamaño. Dichos órdenes están determinados por la estructura geológica y por el estado de desarrollo geomorfológico.

La unidad espacial más pequeña es el fisiotopo -biotopo o ecotopo-, que corresponde a la expresión de la relación entre el microclima, las rocas sobresalientes, el relieve, los mantos acuíferos, la vegetación, el mundo animal y el suelo. El mismo autor señala que *la ecología del paisaje es la observación sinóptica de la naturaleza por antonomasia, resultado de la armonía ecológica funcional del suelo, el agua, el aire y el mundo viviente; y que los diferentes niveles de unidades ecológicas-paisajísticas son espacios paisajísticos y vitales de distinto tamaño: desde la unidad más pequeña, el ecotopo, hasta la más grande, la zona paisajística, climática y vegetacional.*

Para la ecología del paisaje (Troll, 1939), el ecosistema, al igual que el geosistema, es un concepto y modelo fundamental de entendimiento del paisaje. Éste hace alusión a la dependencia que guarda el conjunto de organismos vivos respecto de su medio físico concreto, tan estrechamente relacionados que forman un ente único e indisociable (Tansley, 1935; en Burel y Baudry, 2002). Como tal, el ecosistema guarda una estrecha relación con el geosistema, pues ofrece una visión muy concreta del estado de funcionamiento del paisaje, entendido éste como una porción de espacio geográfico concreto que se ajusta al modelo de geosistema (Bolós, 1981).

En atención a las ideas anteriores, Troll (1939) integra en el estudio del paisaje la variabilidad de los procesos ecológicos en distintas estructuras espaciales, resultando el paisaje como la traducción espacial del ecosistema (Richard, 1975; en Burel y Baudry, 2002). De esta forma, la ecología del paisaje, desde sus albores epistemológicos, tuvo como fin fusionar el concepto de espacialidad y/o

horizontalidad de los geógrafos con la funcionalidad o verticalidad de los ecólogos. Si bien la bifocalidad del concepto tuvo resultados positivos al promover la multidisciplinariedad de los estudios relacionados con la complejidad del paisaje en términos espacio-temporales, no es menos cierto que, esta fusión epistemológica haya incitado a la dispersión de los enfoques y de los desarrollos conceptuales y metodológicos (Bastian, 2001).

Uno de los temas recientes de la investigación del enfoque geográfico es que la ecología del paisaje ha centrado sus esfuerzos en el estudio de la estructura y la dinámica de los mosaicos espaciales, sus causas y consecuencias ecológicas, con especial atención en las relaciones implícitas y espaciales que presentan ciertos tipos de parches (Wiens, 1999 a y b); en tanto que el enfoque biológico tiene especial interés por los procesos espacio-temporales que influyen la dinámica de las poblaciones, subrayando el caso de los modelos de “parche-corredor-matriz”, los corredores verdes, la conectividad, la infraestructura ecológica, las barreras ecológicas (Moss, 1999; en Bastian, 2001) y la calidad y estabilidad ecológica de los parches (Wiens, 1999b; en Bastian, 2001). Este enfoque considera que el modelo “parche-corredor-matriz” es loable no sólo para medir la magnitud de estos procesos, sino también para entender y explicar la complejidad biológica y estructural del paisaje (Pietrzak, 1998; en Bastian, 2001), siendo la fragmentación uno de los procesos más estudiados por esta disciplina.

La fragmentación se refiere al proceso de subdivisión de un hábitat continuo en diferentes parches a nivel de paisaje. El concepto de *fragmentación* para Carsjens y Lier (2002) es *el proceso que segrega espacialmente aquellas entidades que permanecían juntas y que, en forma conjunta, tenían una función óptima*. Para Forman y Godron (1986), la fragmentación son *los mosaicos paisajísticos constituidos por espacios naturales y antrópicos que varían de modo progresivo en forma, tamaño y disposición*.

El interés por este proceso radica en su relación probada con los cambios en diversos parámetros descriptivos de la estructura espacial del paisaje, principalmente la disminución del tamaño de los parches, el aumento de su borde (Burel y Baudry, 2002) y la pérdida de la conectividad entre ellos (Farina, 1998). Es a partir de este proceso complejo que se llega a la ruptura del paisaje, creando un mosaico de coberturas forestales y no forestales (parches), donde la tendencia es al incremento de las áreas culturales, por lo que existe un creciente aislamiento de los parches de vegetación natural (Noss, 1991; Pickett y Cadenasso, 1995). Se ha comprobado que el proceso afecta la composición y estructura de las poblaciones y comunidades de plantas y animales, los procesos ecológicos, los hábitats y la biodiversidad (Farina, 1998; Bennett, 1999; Burel y Baudry, 2002).

Forman y Godron (1986) señalan que el análisis de los elementos que componen el paisaje es fundamental para entender los patrones y procesos espaciales de la fragmentación. La unidad básica del paisaje es el *parche*, el cual corresponde a un espacio continuo donde una población local encuentra todos los recursos necesarios para su persistencia. Se les considera como elementos discretos de áreas definidas sobre la superficie terrestre cuyas estructuras o composición difiere de las áreas adyacentes (Pickett y Rogers, 1997; en Farina, 2000).

Para medir y evaluar la magnitud de la fragmentación en términos de los cambios que provoca en la estructura y dinámica del paisaje, la ecología del paisaje se apoya en métodos y herramientas derivadas de las innovaciones tecnológicas –como los sistemas de información geográfica, la percepción remota y los sistemas de manejo de bases de datos digitales– que permiten gestionar la información espacial y analizar las estructuras paisajísticas (Burel y Baudry, 2002).

Para evaluar la fragmentación existen diversos indicadores que consideran dos aspectos: a) la composición del paisaje, es decir, las características asociadas a la presencia y cantidad (por ejemplo, parámetros como número, tamaño, densidad y, riqueza, entre otros) de los tipos de parches dentro de un sistema y, b) la configuración espacial del paisaje, que se refiere a las relaciones de distribución entre los parches del sistema. La conectividad, aislamiento, contagio, yuxtaposición, forma y vecino más cercano son algunas variables que permiten analizar la fragmentación y establecer una clara idea de la estructura espacial del paisaje (Forman y Godron, 1986; Turner, 1989).

1.5.3 Aportaciones de la Geoecología del Paisaje: el geosistema como modelo teórico, el sistema de integración ambiental y la clasificación de los paisajes

La ecología del paisaje contemporánea ha probado su eficacia en la solución de problemas ambientales, y ha contribuido a entender y explicar la complejidad del paisaje y sus procesos (entre ellos la fragmentación), por lo que las referencias recabadas en torno a la aplicación práctica del enfoque basado en el modelo Forman y Godron (1986) parece restringir el estudio del paisaje a tres elementos principales: parche, corredor y matriz. Con el propósito de ampliar el conocimiento, el presente trabajo de investigación aplica las bases de la *geoecología del paisaje*, concretamente en lo referente a la utilización del geosistema como modelo teórico y como sistema taxonómico-corológico de paisajes que permita darle un significado jerárquico-funcional, ubicando a cada unidad del paisaje en el contexto de las relaciones y dependencias espaciales y funcionales que sostiene con otras unidades.

El geosistema, como modelo, es una entidad compleja, cuyos componentes hacen a la vez de subsistemas independientes, complejos y dinámicos (García y Muñoz, 2002). La integración no corresponde a una simple suma de elementos

incoherentes sino, por el contrario, es el resultado de la *combinación dinámica y, por lo tanto, inestable de los componentes físicos, biológicos y antrópicos que actúan dialécticamente los unos con los otros, haciendo del paisaje un conjunto único e indisociable* (Bertrand, 1968).

Partiendo de la base conceptual de que el geosistema es un sistema abierto, su funcionamiento –y de los subsistemas que lo integran (biótico, abiótico y socioeconómico)– es posible gracias a las entradas de energía y de materia. Bolós (1981) señala que dicha fuente de energía proviene, tanto del exterior del planeta, en el caso de la energía solar, como de su interior, en el caso de la tectónica; dando como resultado un sistema complejo compuesto de sistemas más simples o de inferior rango, que se pueden denominar subsistemas que responden a una cierta cantidad de energía que, en niveles inferiores, proviene de otras fuentes como la antrópica (Figura 1).

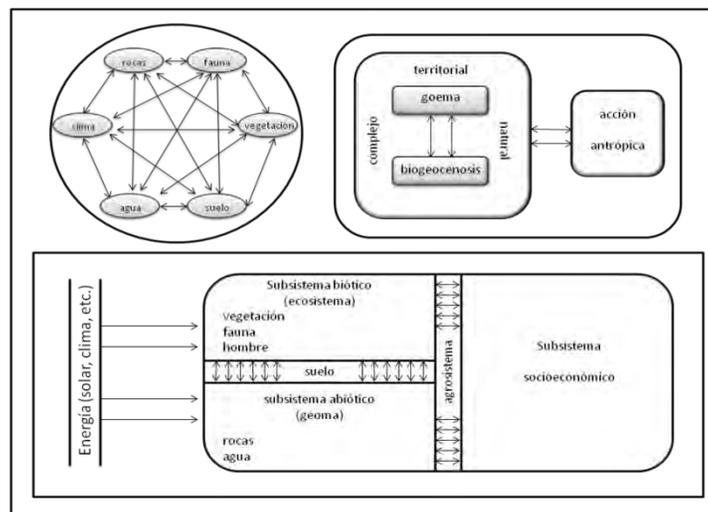


Figura 1. Modelos de geosistemas. 1) Preobrazeskij; 2) Beruchackvili (1977) y,3) Bolós (1981). Cuadro tomado de Bolós (1981).

El concepto de modelo geosistema ha sido objeto de constantes análisis al igual que el intento por ubicarlo en la realidad, es decir, en un espacio geográfico concreto (Bolós, 1981). Para la línea del Análisis Integrado de Paisajes (Bertrand,

1968), por ejemplo, el geosistema es una unidad taxocorológica que se diferencia por una peculiar combinación de “potencial abiótico”, “explotación biótica” y “acción antrópica”. El llamado “clímax geosistémico” ocurre cuando existe un equilibrio entre el potencial ambiental/biofísico y la explotación biológica, posible sólo bajo una adecuada acción antrópica sobre la naturaleza (Figura 2).

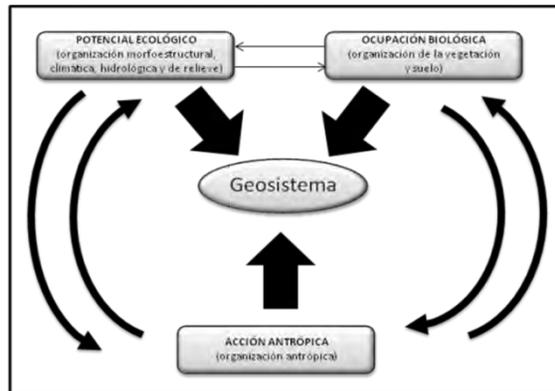


Figura 2. Geosistema de acuerdo con Bertrand (1968). Cuadro tomado de García y Muñoz (2002).

Cuando la intensidad de un disturbio rebasa la capacidad del geosistema se produce un desequilibrio ambiental que se manifiesta con la perturbación, la alteración de la estructura y la aparición de una nueva geofacies, posiblemente pequeña en superficie, pero cuyo significado funcional es importante, ya que supone la pérdida de la estabilidad del geosistema con consecuencias ambientales que varían dependiendo del tipo y de la intensidad del disturbio.

Efectivamente, el entendimiento estructural, funcional y prospectivo del paisaje se obtiene sólo bajo una rigurosa sistematización de las unidades, lo que se consigue mediante clasificaciones taxonómico-corológicas amplias y precisas (Muñoz, 1998). En este sentido, Bertrand (1968) señala que *“un sistema taxonómico debe permitir clasificar los paisajes en función de la escala, es decir, situarlos en la doble perspectiva del tiempo y el espacio”*. Esto es importante porque para cada tipo de hechos y procesos asociados existen unos umbrales de

manifestación y de extinción, que son los únicos que pueden servir legítimamente de base para una delimitación sistemática de paisajes en unidades jerarquizadas.

Bertrand (1968), propone una clasificación taxonómico-corológica del paisaje, la cual parte del reconocimiento de los principales componentes del territorio: morfoestructura, clima, relieve, hidrología, suelo, vegetación y usos de suelo. El sistema de clasificación consiste de seis niveles: zona, dominio, región natural, geosistema, geofacies y geotopo; cada uno de los cuales refleja distinto nivel de integración ambiental, que depende de las relaciones espaciales y temporales entre los componentes ambientales. La zona, diferenciada en su sistema de organización territorial y en su configuración paisajística por su pertenencia al área de uno de los grandes géneros climáticos, es una división cuya dimensión se mide en millones de km². El dominio es una división de una zona, de centenares de miles o muchas decenas de miles de km² de extensión, diferenciada por una particular matización de las condiciones macroclimáticas y por la presencia de una determinada organización morfoestructural y climática. Una región natural es una división de un dominio, cuya extensión se puede expresar en unidades a decenas de km², definida dentro de él por su diferenciada organización geomorfológico-hidrológica y por los caracteres genéricos de su vegetación y uso humano relacionados con ella.

El geosistema y la geofacies son los niveles más adecuados para abordar el estudio funcional del territorio. Mientras que el geosistema, medible normalmente en decenas de km², está definido a partir de la relación entre bioclima y morfoestructura, la geofacies, de hasta centenares de m², es la unidad inferior que corresponde con distintos estados de respuesta del geosistema frente al disturbio; se manifiesta a través de configuraciones específicas de comunidad vegetal, suelo y uso del suelo.

Las relaciones recíprocas de la integración geocológica del paisaje quedan bien definidas por García-Romero (1998), quien conceptualiza un modelo de integración geocológica del paisaje que considera la diferenciación de dos categorías principales de componentes ambientales: por una parte, los llamados componentes macroestructurales –morfoestructuras y clima–, los cuales son los componentes de mayor escala espacio-temporal, es decir, que se manifiestan en grandes extensiones de terreno y que en condiciones naturales requieren de más tiempo para mostrar cambios evolutivos, razón por la cual son los más independientes y dinámicamente estables a escala humana.

Los componentes mesoestructurales –aguas, relieve, suelo, vegetación y antropismos–, son los de menor escala, más dependientes y dinámicos en cuanto a que muestran transformaciones en cortos periodos de tiempo. En este grupo se diferencian los componentes abióticos – hidrología y relieve –, que tienden a ser más estables que los de carácter biótico –suelo, vegetación, fauna y antropismos –, los cuales son los más dinámicos y cambiantes, estando subordinados a la actividad de todos los demás componentes del ambiente. En este sentido, toda porción del territorio corresponde a un nivel máximo dentro de la taxonomía corológica del paisaje (Figura 3).

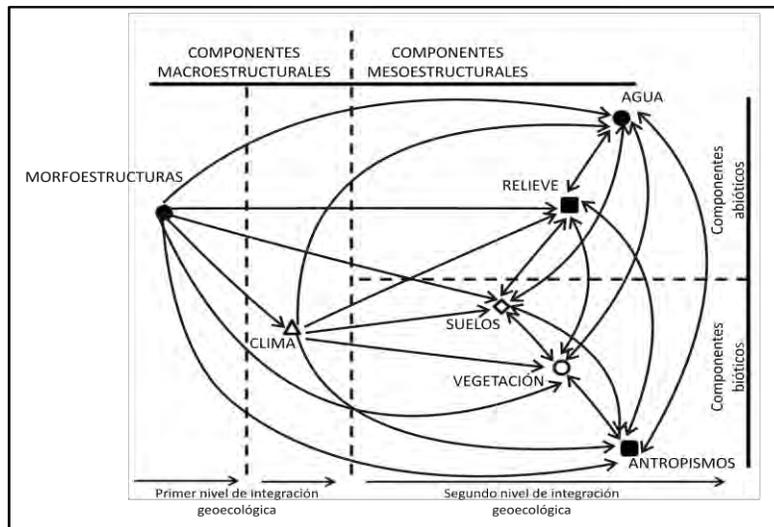


Figura 3. Componentes macroestructurales y mesoestructurales de acuerdo con García y Muñoz (2002).

De acuerdo con Bertrand (1968), el establecimiento de la estructura taxonómico-corológica del paisaje permite ubicar la posición y el nivel del territorio dentro de una taxonomía de validez general (zona, dominio, región natural) y definir orgánica y espacialmente los elementos corológicos de niveles inferiores que lo forman, desde los geosistemas hasta las unidades elementales de paisaje o geofacias. El análisis de estas últimas lleva al conocimiento profundo de la estructura, el funcionamiento, el estado y las tendencias del sistema territorial; esto al considerar que los paisajes elementales responden a distintos estados del geosistema, o etapas seriales de su paisaje –clímax–, es decir, que están funcional y dinámicamente articulados.

Dado que el concepto de geofacias la asume como una “cora” o espacio abierto en el seno de un geosistema, su aparición se considera como inevitablemente relacionado con el proceso de *fragmentación*, de amplio uso en la ecología del paisaje. Además, los caracteres espaciales y funcionales de las geofacias permiten equipararlas a las unidades básicas del estudio de la fragmentación: los “parches” del modelo “parche-corredor-matriz” propuesto por Forman y Godron

(1986). De manera similar a la geofacies, el parche es producto de disturbios naturales y/o culturales, por lo que define un espacio que combina la explotación biótica natural y la acción humana; siendo a su vez, unidades visibles a escala del paisaje (Bolós, 1981). Su semejanza favorece el entendimiento y explicación espacio-temporal de la fragmentación que afecta la estructura y función del paisaje. Se considera que cada geosistema se distingue de los demás por su grado de disturbio y en consecuencia, por el arreglo peculiar de su patrón de fragmentación que, a su vez, corresponde en términos espaciales a un sistema territorial específico.

En consecuencia y no obstante la dispersión de las formas de entender e interpretar la unidad elemental del paisaje (y la confusión que esto genera), el paisaje elemental, el fragmento, el parche y la geofacies se entienden y adoptan en este trabajo como conceptos funcionalmente próximos. Todos ellos definen una porción del territorio resultante de una combinación específica entre el tipo de explotación biótica natural y la acción humana, ambas acordes con los caracteres de otros componentes del paisaje más estables e independientes, llegando el conjunto de todos ellos a formar un mecanismo o sistema más complejo –el sistema de paisajes– en cuyo interior se definen mosaicos de coberturas de vegetación y usos de suelo funcionalmente relacionados –el sistema de uso de suelo–. De esta forma, se puede afirmar que a cada sistema de paisajes le corresponde un sistema de uso de suelo –en tanto que el término “uso de suelo” debe referir al uso o actividad que el hombre hace de una determinada cubierta vegetal que caracteriza a un paisaje elemental, fragmento, parche o geofacies–.

1.6 Área de estudio

1.6.1 La cuenca del río Tuxpan

La cuenca del río Tuxpan (1887 km²) se ubica en la vertiente meridional de la provincia morfotectónica del Eje Volcánico Transversal, entre las ciudades de México y Morelia, Michoacán. El sector alto de la cuenca está delimitado por montañas volcánicas plio-cuaternarias (>3,000 msnm) cuyas vertientes interiores representan 70% de la superficie de la cuenca. Los piedemontes vulcano-clásticos de las montañas convergen en su parte central hasta enlazar con la angosta llanura aluvial del río Tuxpan. La morfología se caracteriza por un extenso campo de lomeríos (16 km de ancho y >1,400 msnm), interrumpido por las pequeñas estructuras de un complejo volcánico monogenético del Cuaternario. En contraste, el fondo del sector bajo de la cuenca (<1,400 msnm) está modelado sobre antiguas calizas, conglomerados y esquistos plegados y fallados que permiten el encajamiento del río y el desarrollo de un profundo valle erosivo de morfología en “V”, con lomeríos y mesas basálticas incididos por la red fluvial.

El amplio desnivel altitudinal del área (>3,000 msnm) permite la formación de tres “pisos” bioclimáticos que se adaptan a la distribución de las estructuras geológicas: selva baja caducifolia en los lomeríos sedimentarios de la base de la cuenca (<1,400 msnm); bosques puros y mixtos de pino-encino en las laderas y fondos de los relieves volcánicos (1,600 a 3,500 msnm); y abetales puros en las cumbres de las principales elevaciones volcánicas (>3,500 msnm).

De los siete municipios (194,143 hab.) que integran la cuenca del río Tuxpan, Ciudad Hidalgo es el más poblado con más de 106,426 hab., seguido de Tuxpan (23,959 hab.), Ocampo (18,804 hab.) y Jungapeo de Juárez (18,586 hab.), los cuales representan 86.41% de la población total (INEGI, 2000). Contrariamente a

lo que se ha expresado con relación al municipio más poblado (Ciudad Hidalgo), Ocampo e Irimbo son las municipalidades con mayores tasas de crecimiento (4.22 y 2.63%, respectivamente) en el periodo comprendido de 1990 y 2000, adquiriendo el segundo (Irimbo) el nivel más alto (3.31%), esto durante el periodo los años 1980. En resumen, se puede decir que cinco municipios (Tuxpan, Ciudad Hidalgo, Irimbo, Ocampo y Jungapeo de Juárez) mostraron en todo el periodo (70-00) aumentos constantes de su población, en tanto que Aporo y Angangueo lo hicieron de manera inversa.

Las actividades económicas en 2000 se concentraron en el sector terciario (39.92% de la PEA), seguido del sector secundario (35.55%) y primario (24.52%); sin embargo, la dominancia de estos sectores no se mantuvo constante en los últimos treinta años, como lo demuestra la superioridad de las actividades dedicadas al sector primario (57.91%) en 1970. No fue sino hasta la década de los años 1980 que el sector terciario domino de forma definitiva las actividades productivas en la cuenca del río Tuxpan, afianzándose de esta manera la producción de bienes y servicios requeridos por la población inmigrante que paulatinamente se trasladaba a las principales cabeceras municipales o ciudades urbanas, entre ellas Ciudad Hidalgo, Ocampo y Tuxpan, entre otras (Figura 4).

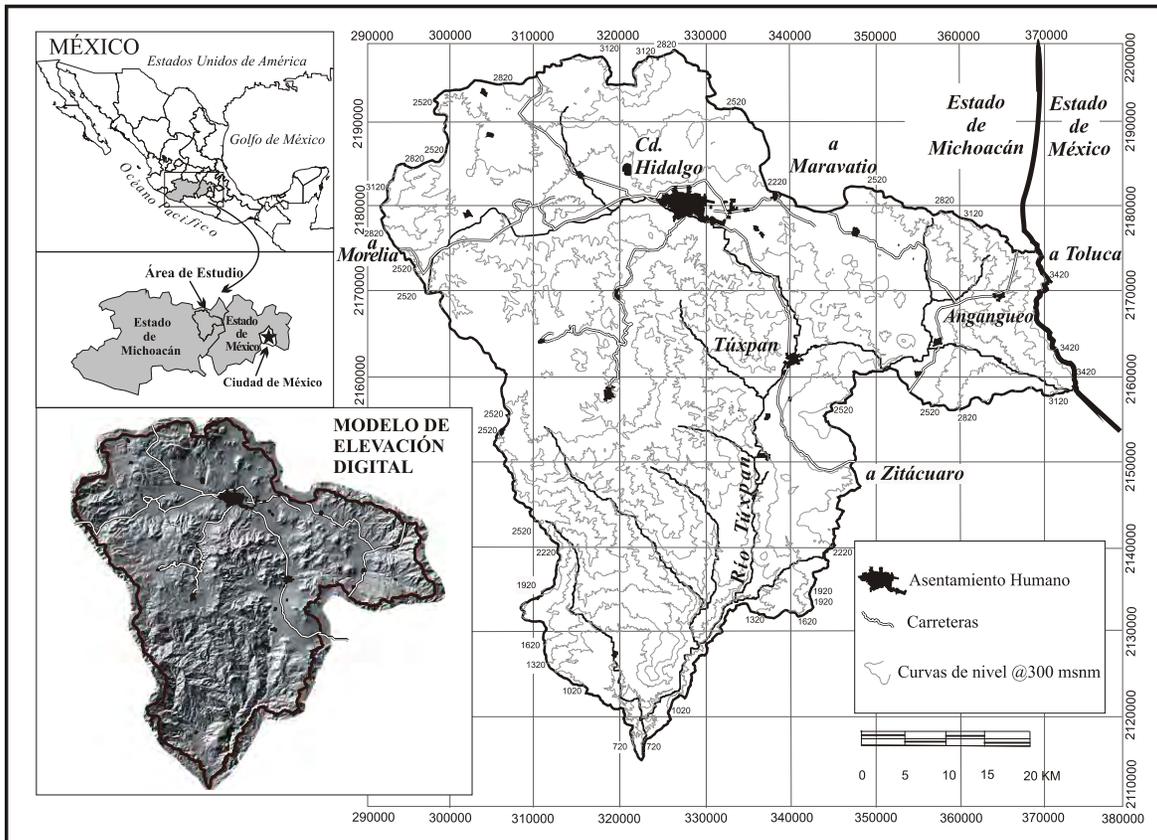


Figura 4. Mapa de localización. Cuenca del río Tuxpan, Michoacán.

1.6.2 La cuenca hidrológica como unidad ambiental

Estudios recientes en el campo de la hidrología terrestre han confirmado la importancia de la “cuenca hidrológica”, como unidad fundamental para la comprensión del sistema ambiental, resaltando el hecho de que su configuración depende, tanto de la morfología terrestre, como de la estructura geológica y del escenario climático (Tóth, 1963; Dunne y Leopold, 1978). Van Buuren (1991) consideró que dentro de una cuenca los diferentes tipos de flujos y sus interacciones en el espacio y en el tiempo son resultado de patrones específicos de las unidades de paisaje y, consecuentemente están relacionados con los usos del suelo.

Se ha estimado que el estudio de las interacciones entre los procesos hidrológicos, las sociedades humanas y los paisajes requiere de un enfoque integral, en el cual, la totalidad del sistema fluvial contenido dentro de la cuenca hidrológica funja como unidad fundamental de organización de la biosfera, ya que: a) los sistemas fluviales integran patrones y procesos de los paisajes terrestres (Karr, 1998), b) el paisaje influye en los sistemas fluviales y su red de drenaje a través de diferentes procesos y mecanismos y a diferentes escalas espaciales y temporales (Allan y Jhonson, 1997), c) el volumen y calidad del agua depende de la habilidad del paisaje para colectarla y mantenerla limpia (O'Neill *et al.*, 1996) y, d) las actividades humanas han fragmentado y perturbado los patrones, las estructuras y los procesos de los sistemas fluviales y sus paisajes, causando alteraciones irreparables (Wissmar y Betschta, 1998).

El concepto de cuenca está encaminado a definir una unidad de carácter ambiental y ecológico, en la cual, el componente paisajístico “agua” interactúa con los demás recursos (bosque, suelo y fauna) y las actividades humanas (usos de suelo), conformando así una unidad compleja de estudio. Aunque el concepto tiene una derivación hidrológica, la presente investigación lo retoma como entidad integral y funcional, adecuada para plasmar espacialmente una variedad de procesos e impactos humanos sobre el paisaje, como los impactos generados por los cambios de uso de suelo y las repercusiones sobre la estabilidad de estos ecosistemas forestales de montaña, que suceden al proceso de la fragmentación.

1.7 Metodología

En esta investigación se utiliza un enfoque del paisaje para evaluar a diferentes escalas de integración la influencia del uso del suelo, la deforestación y fragmentación sobre la estabilidad de los bosques templados en la cuenca del río Tuxpan. Su utilidad es amplia ya que en el paisaje se integra de manera

sintetizada una amplia cantidad de información ambiental de distintos géneros (componentes abióticos, bióticos y antrópicos) (Richard, 1993; Scott, 1993; Huggett, 1995), con miras a la identificación de los paisajes forestales mejor conservados y diferenciarlos de otros que representan estados de perturbación o de recuperación post-disturbio con distintos grados de desarrollo. El problema se aborda desde dos escalas de aproximación: a) escala media (1:50,000), para la clasificación, caracterización y cartografía de los sistemas de paisaje y de sus patrones de fragmentación y, b) escala detallada ($\leq 1:25,000$), para determinar las consecuencias de la fragmentación sobre la estabilidad –en términos de la diversidad y estructura vertical de las comunidades vegetales- del paisaje en fragmentos forestales (paisajes elementales).

Como primer paso, para la caracterización del área de estudio en zonas homogéneas, se procedió a la identificación de la principales morfoestructuras, las cuales refieren a una homogeneidad que resulta de una peculiar combinación entre la estructura geológica, el contenido litológico y tectónico, así como de los principales rasgos morfológicos. Por su grado de estabilidad e independencia, las morfoestructuras definen la estructura o armazón básico del territorio, en la cual se asientan y evolucionan los demás componentes que se manifiestan en el paisaje (García y Muñoz, 2002). El procedimiento para la delimitación de las morfoestructuras comprende tres fases: 1. Recopilación de información bibliográfica y cartográfica, 2. El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la interpretación, procesamiento y análisis, y 3. La obtención de resultados. La primera fase comprende la revisión de trabajos y artículos de investigación relacionados con la geología (Demant, 1982; INEGI, 1978; Quiñones, 1987; Lugo y Córdova, 1990; Garduño, 1987a), la litología (Demant *et al.*, 1975; Demant, 1978, en Palacio, 1985; Garduño, 1987b), la estratigrafía (Garduño, 1987b), la estructura (Garduño, 1987b; Robin y Pradal, 1985) y la tectónica regional y local del área de estudio (Lugo, 1990; Demant *et al.*, 1975; Demant, 1982; Garduño,

1987b; INEGI, 1978). Asimismo, se consultaron mapas temáticos topográficos (INEGI, 2000), geológicos (INEGI, 1978) y edafológicos (INEGI, 1983) a escala 1:50,000, así como 18 fotografías aéreas a escala 1:75,000 (INEGI, 1995) que permiten el trabajo de estereoscopia, siendo el primer acercamiento morfológico con el área de estudio.

La segunda fase consistió en la elaboración e integración de la cartografía temática base para la delimitación preliminar de las unidades morfoestructurales. El criterio para la diferenciación de estas unidades considera la morfología, el origen, la edad y la composición litológica de las unidades, así como del arreglo tectónico. De esta manera, cada unidad morfoestructural se diferencia de las demás por un tipo de geoforma, rango y desnivel altitudinal y densidad de drenaje. La delimitación espacial de cada morfoestructura es el resultado de la interpretación de otros criterios como la ruptura de la pendiente y aspectos más específicos de la tectónica (orientación y densidad de fallas y fracturas) y la litología (tono, patrón, textura, tamaño, etc.). La demarcación de las morfoestructuras se plasmó en el modelo digital de terreno (30 m por píxel) y en el modelo sombreado que se obtiene a partir del mapa topográfico (con curvas de nivel a una equidistancia de 20 m). Éste último permite identificar las principales formas del relieve y la configuración del sistema de drenaje. Finalmente, se realizan salidas de campo con el objetivo de confirmar la fotointerpretación morfológica.

Para caracterizar la cuenca en sistemas de paisajes y paisajes elementales, la investigación se apoyó en el sistema de clasificación taxonómico-corológica de paisajes de Bertrand (1968). Los sistemas de paisajes –equivalentes a los geosistemas del Análisis Integrado de Paisajes– se definen y delimitan a partir de una misma combinación de potencial abiótico, explotación biológica y acción antrópica. Su definición tipológica y cartográfica parte de la descripción de los

componentes macroestructurales –morfoestructuras y clima–, es decir, los más independientes y estables del paisaje. Se parte de considerar que una morfoestructura es una entidad homogénea en cuanto a su origen geológico, litología aflorante, estilo de la tectónica y morfología. Por su grado de estabilidad e independencia, las morfoestructuras definen la estructura o armazón básico del territorio, en la cual se asientan y evolucionan los demás componentes que se manifiestan en el paisaje (García y Muñoz, 2002).

La caracterización climática comprende los valores térmicos y pluviométricos, considerados como factores ambientales clave de la distribución de los potenciales abióticos. Para dicha caracterización, se utilizan catorce estaciones meteorológicas de las bases CLICOM del Sistema Meteorológico Nacional (SARH, 1981), las cuales son seleccionadas por su cobertura temporal, desde 1940 y 1961 hasta 1980 y 1995. Asimismo, la interpretación se apoya en literatura editada (García, 1988; Rzedowski, 1988; INEGI, 1988), así como en material inédito relacionado con el clima regional y local (Vidal, 2005; Ramírez, 2004).

Paso previo a la delimitación de los sistemas de paisaje, se realizó un reconocimiento de los componentes mesoestructurales, los más dependientes y dinámicos del paisaje, concretamente en este caso las coberturas de uso de suelo y vegetación. La tipología de las coberturas de suelo se determinó a partir de una clasificación preliminar basada en los criterios del INEGI (1983). A partir de esta base, se realizaron inspecciones y entrevistas de campo para verificar, corregir y clasificar las coberturas en cuatro tipos principales que difieren en origen –natural/cultural–, desarrollo fisonómico de la vegetación, tipo e intensidad de uso, y permanencia del disturbio asociado al uso. Resultaron 15 tipos de cubiertas pertenecientes a cuatro tipos principales de uso del suelo.

Los sistemas de paisaje (geosistemas) no son homogéneos, sino que están formados por paisajes elementales, o unidades menores correlacionables, con facies de paisaje homogéneos que pertenecen a un mismo ambiente climático, morfoestructural y a una determinada acción antrópica: por lo que la delimitación de los sistemas de paisaje no queda restringida tan solo a una interpretación morfoestructural y climática, sino también a la acción antrópica que, a través de los diferentes usos de suelo, generan los denominados sistemas de uso de suelo que caracterizan y definen a un determinado sistema de paisaje o geosistema. Como resultado de la interpretación de las morfoestructuras, el clima y los antropismos (usos de suelo), se identificaron y delimitaron tres sistemas de paisaje o geosistemas, así como de tres subsistemas de paisaje (subgeosistemas).

Para determinar los patrones y la dinámica del paisaje (entre 1976 y 2000) al interior de los sistemas y subsistemas del paisaje, se procedió al estudio de la dinámica del uso de suelo (1970-2000) y su impacto en la transformación de los paisajes de la cuenca de río Tuxpan, en tres escalas o niveles de observación: cuenca o área de estudio; sistemas; y subsistemas de paisaje. Las cubiertas de suelo se obtuvieron en SIG (ILWIS ver. 3.0), a partir de la interpretación de fotografías aéreas (escala 1:75,000) de 1995 e imágenes de satélite: Landsat MSS, de marzo de 1976 y 1986, Landsat TM de mayo de 1992 y Landsat ETM de enero de 2000. Las fotografías fueron capturadas a una resolución de 500 DPI (*Dot per Inch*, por sus siglas en inglés) e importadas al SIG con una resolución de 2 m por píxel y tamaño de la unidad cartografiada de 4 ha (Campbell, 1996). Estas imágenes son georreferenciadas por medio del método “Tie-Points”, para lo cual se elaboró el DTM (Modelo de Terreno Digital (DTM, por sus siglas en inglés) a partir de datos altitudinales en formato DXF del INEGI, y los puntos de control correspondieron a rasgos culturales del mapa de usos de suelo y vegetación a escala 1: 50,000 (INEGI, 1983).

Para verificar la precisión se utilizó el índice RMSE o SIGMA = < 2 (ITC, 2001). Para mantener las ventajas de la resolución de las fotografías de 1995 (2 m por píxel), la interpretación de las imágenes de satélite se hizo sobre copias del anterior: primero las imágenes más recientes y de mejor resolución (2000 y 1986) y luego la imagen 1976, que se creó sobre una copia de la interpretación de 1986. Para evitar errores de interpretación debidos a la diferente resolución de las imágenes se siguió un método de interpretación de tipo visual, el cual es recomendado para comparar entre series de coberturas detalladas (Mas y Ramírez, 1996; Arnold, 1997; Slaymaker, 2003; Chuvieco, 2002). Se elaboraron sub-escenas de las imágenes y se generaron compuestos de color (rojo, verde y azul): 2, 3, 4 en Landsat MSS y, 3, 2, 1 (color natural) y 4, 5, 7 (falso color) en Landsat TM, para lograr una mejor diferenciación de las coberturas. La interpretación se hizo por medio de técnicas directas, asociativas y deductivas para diferenciar los “rasgos” de las coberturas (Powers y Khon, 1959; Enciso, 1990; Mas y Ramírez, 1996). Finalmente, se midió la magnitud de los cambios de las coberturas del suelo y se calcularon los índices de Deforestación (ID) y de Transformación Media Anual (ITMA) de los periodos comprendidos. Se elaboraron Matrices de Transición para medir y clasificar los cambios según dos tipos de procesos de cambio y cuatro variantes: a) positivos –conservación y regeneración– y b) negativos –intensificación y disturbio– (Figura 5).

		COBERTURAS AL FINAL DEL PERIODO											
		CLAVE	BA	BPQ	BM	SBC	BF	BMF	MP	PAF	CT	AH	SRD
COBERTURAS AL INICIO DEL PERIODO	BA	CONSERVACIÓN	DISTURBIO	DISTURBIO	DISTURBIO	N	D	D	DISTURBIO	DISTURBIO	R	N	D
	BPQ												
	BM												
	SBC												
	BF	REGENERACIÓN	R	N	D	DISTURBIO	DISTURBIO						
	BMF	R	R	N									
	MP	R	R	N									
	PAF	REGENERACIÓN	REGENERACIÓN	INTENSIFICACION	INTENSIFICACION	R	N	D	DISTURBIO	DISTURBIO	INTENSIFICACION	INTENSIFICACION	
	CT												
	AH												
	SRD												
	CA	REGENERACIÓN	REGENERACIÓN	INTENSIFICACION	INTENSIFICACION								

Figura 5. Matriz conceptual de los procesos de transición. Procesos: D= Disturbio, R= Regeneración, N= No definido. Coberturas del suelo: BA= Bosque de abeto, BPQ= Bosque de pino-encino, BM= Bosque mesófilo, SBC= Selva baja caducifolia, BF= Bosque fragmentado, BMF= Bosque muy fragmentado, MP= Matorral secundario y pastizal inducido, PAF= Cultivos de riego, CT= Cultivos de temporal, AH= Asentamiento humano, SRD= Suelo o roca desnudo, CA= Cuerpo de agua.

Dado el alto grado de transformación que afecta a los bosques del área se considera importante analizar la estructura del paisaje y sobre todo, evaluar la magnitud y consecuencias de la fragmentación en términos ambientales y paisajísticos. Para ello, el presente estudio se apoya en la ecología del paisaje, la cual propone métodos adecuados para el análisis de los patrones de distribución espacial de los fenómenos ecológicos (Naveh y Lieberman, 1984; Levin, 1992; Wiens, 1995) y en especial, la influencia de la perturbación sobre la estructura y dinámica de los sistemas naturales (Keitt *et al.*, 1997; Farina, 1996). Se espera que el estudio de la fragmentación derive en un entendimiento más detallado del significado funcional de los paisajes elementales de un mismo tipo. Por ejemplo, si los fragmentos que integran un paisaje elemental muestran diversos estilos de fragmentación y cambios en la diversidad y/o estabilidad, esto supondría una subdivisión del paisaje elemental.

Se propone analizar los fragmentos forestales y sus características espaciales (tamaño, forma y aislamiento) que se dan bajo el amplio abanico de caracteres ambientales y sistemas de uso del suelo que caracterizan a los distintos sistemas de paisaje, a fin de generar un modelo que aporte criterios y lineamientos al estudio integral de los paisajes. Se considera que en la cuenca, a una escala dada, se llegan a identificar patrones espaciales de uso de suelo que conforman los denominados sistemas de uso de suelo. Estos sistemas, a su vez, coinciden espacialmente con otros sistemas o subsistemas de paisaje. (esto debido a la peculiar combinación del potencial abiótico, explotación biótica y a la acción antrópica) en cuyo interior y a una escala mayor, se observan remanentes de

paisajes elementales o parches de bosque organizados espacialmente en patrones de fragmentación que responden a un determinado sistema de uso de suelo. El tamaño, la forma y el aislamiento son atributos de la fragmentación que permiten evaluar tanto la influencia del uso de suelo en la estabilidad de los remanentes de bosque (diversidad y estructura vertical), así como la influencia del sistema de uso de suelo en el funcionamiento del sistema o subsistema de paisaje de que se trate.

Para conocer el estado actual y la dinámica de la fragmentación, los mapas de coberturas de uso de suelo y vegetación obtenidos a nivel de cuenca, geosistemas y subgeosistemas de 1976, 1986 y 2000 fueron exportados al programa *Arcview GIS 3.0*, donde se les asignó una clave numérica para cada cobertura de uso de suelo y vegetación. La información así obtenida fue importada desde *Fragstast 2.0* (McGarigal, 1994), donde se calcularon métricas a nivel de paisaje, clase y parche. Se omitieron aquellas métricas que presentan valores similares o bien, que no exhibieron cambios significativos en el paisaje. Las métricas consideradas a nivel de paisaje y de clase fueron: a) número y densidad de parches (NP, PD), b) representatividad paisajística del parche más grande (LPI), c) longitud y densidad de borde (TE, ED), d) área promedio de los parches (AREA), e) área núcleo (TCA), f) conectividad (CONNECT) y, g) Índice de Diversidad de Shannon (SHDI). Los fragmentos se caracterizan con base al área (AREA) y la forma (SHAPE) de los parches, en tanto que otras métricas –número de parches (NP), perímetro (PERM), área núcleo (CORE)– complementan el análisis y la comprensión del estado actual y dinámica de la fragmentación.

Finalmente, para conocer la influencia del área, la forma y el aislamiento de los fragmentos forestales sobre la estabilidad (diversidad y estructura vertical) de las comunidades, se llevó a cabo el levantamiento de 24 inventarios en dos sistemas de paisaje. Para el muestreo consideró la forma de vida de los individuos. Para el

muestreo de árboles se usaron parcelas cuadrangulares de 30 por 30 m; para el muestreo de arbustos se emplearon cuatro parcelas cuadrangulares de cinco por cinco metros, ubicadas en los extremos del cuadrante principal; y para el muestreo de hierbas se utilizaron ocho parcelas cuadrangulares de 0.5 por 0.5 m, las cuales se ubicaron mediante métodos al azar en el interior de las parcelas de arbustos (dos parcelas pequeñas en cada caso).

Se recopiló la información relacionada con la composición de las comunidades vegetales, a mencionar: la riqueza total; riqueza del estrato arbóreo, arbustivo y herbáceo; así como el total de individuos y número de individuos de los estratos arbóreo y arbustivo. Con relación a la estructura de las comunidades, los datos recopilados incluyen la densidad específica y la densidad de los estratos arbóreo y arbustivo, así como la cobertura específica y cobertura individual por estrato. También se incluye la variante de productividad relacionada con el área basal de los árboles en general que incorporaba las especies de pinos y arbustos.

Para determinar la correlación que existe entre los atributos de la fragmentación (tamaño, forma y aislamiento) y las variables de la vegetación (diversidad y estructura vertical), se aplica el coeficiente de correlación de Pearson (r), el cual varía en el intervalo de -1 a +1: si $r = 0$, no existe relación lineal, si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta, si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva, si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta y si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa (Figura 6).

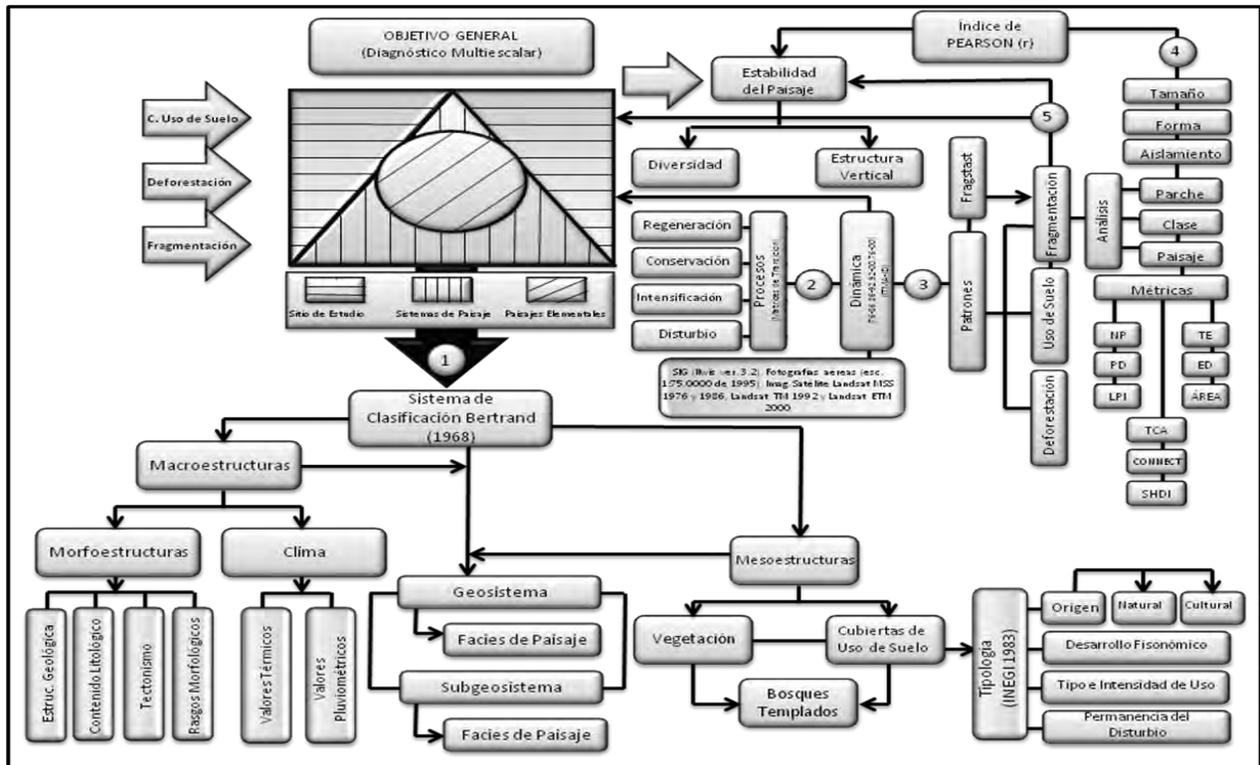


Figura 6. Flujo Metodológico.

BIBLIOGRAFÍA

- Altieri, M. A. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Elsevier. Agriculture Ecosystems y Environment*. 74: 19-31.
- Arnold, R. H. 1997. *Land use and land cover mapping*. In: Interpretation of airphotos and remotely sensed imagery. Prentice Hall, New Jersey, USA. 36-43 pp.
- Bastian O. 2001. Landscape Ecology: Towards a unified discipline? *Landscape Ecology*. 16: 757-766.
- Bennett, A. 1999. *Linkages in the landscape. The role of corridors and conservation*. IUCN. Cambridge.
- Bertrand, G. 1968. "Paysage et géographie physique globale", *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*. 39(3): 249-272.
- Bocco, G., Mendoza, M. 1999. Evaluación de los cambios de la cobertura vegetal y uso del suelo en Michoacán (1975-1995). Lineamientos para la ordenación ecológica de su territorio. Proyecto No. 96 06 042, Programa SIMORELOS-CONACYT. Informe Técnico, Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, Campus Morelia.
- Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. 2001. La Dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*. Instituto de Geografía de la UNAM. México, D.F. 44: 18-38.
- Bolós, M. 1981. Problemática actual de los estudios del paisaje integrado. En: *Revista de Geografía*. Departamento de Geografía de la Universidad de Barcelona. Barcelona. 15:45-68.
- Bolós, M. 1992. *Manual de ciencia del paisaje: Teoría, Métodos y Aplicaciones*. Editorial Masson, Barcelona, España, 273 pp.
- Burel, F. y Baudry, J. 2002. *Ecología del Paisaje: conceptos, métodos y aplicaciones*. Mundi-Prensa. Madrid.

- Buuren, M. V. 1991. A hydrological approach to landscape planning: the framework concept elaborated from a hydrological perspective. *Landscape and Urban Planning*. Volume 21, Issues 1-2; Pp. 91-107.
- Campbell, J. B. 1996. *Introduction to remote sensing*. Guilford. New York, USA. 622 pp.
- Carsjens, G., Lier, V. 2002. Fragmentation and Land-Use Planning: An Introduction. *Landscape and Urban Planning*. 58:79-82.
- Challenger, A. 1998. Utilización de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. *Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad*. México.
- Chuvienco, S. E. 2002 *Teledetección Ambiental*. La observación de la tierra desde el espacio. Ariel Ciencia. Barcelona, España. 586 pp.
- Cortina, V. S., Macario, M. P y Ogneva, H. Y. 1998. Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. *Investigaciones Geográficas*. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F. 38:41-56.
- Demant, A. 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. Instituto de Geología. Revista, Vol. 2, Num. 2: pp.172-187.
- Demant, A. 1982. Interpretación geodinámica de vulcanismo del eje neovolcánico transmexicano. Revista Instituto de Geología. Vol. 5; Num. 2. UNAM, México.
- Demant, A., Mauvois, R., Silva, L. 1975. Reconocimiento geológico de la hojas Morelia, Maravatio (1:100 000) estado de Michoacán. Instituto de Geología. UNAM.
- Dunne, T., Leopold, L. B. 1978. *Water in Environmental Planning*, W. H. Freeman and Company, New. York
- Dupuy, R. J. M., González, I. J. A., Iriarte V. S., Calvo, I. L. M., Espadas, M. C., Tun, D. F., Dorantes, E. A. 2007. Cambios de cobertura y uso del suelo (1979-

- 2000) en dos comunidades rurales en el noroeste de Quintana Roo. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM. Num. 62: pp.104-124.
- Duran, G. R. 1995. Diversidad florística de Los Petenes de Campeche. Acta botánica mexicana. Centro de Investigación Científica de Yucatán. 31: 73-84.
- Eberhardt, R. W., Foster D. R., Motzkin, G., Hall, B. 2003. Conservation of changing landscapes: vegetation and land use history of Cape Cod National seashore. *Ecological Applications*, 13, 68-84.
- Enciso, J. L. 1990. *La fotointerpretación como instrumento de apoyo a la investigación urbana*. Universidad Autónoma Metropolitana, México. 47 pp.
- Estrada, A., Coates-Estrada, R. 1994. Las Selvas de los Tuxtlas, Veracruz: ¿islas de supervivencia de la fauna silvestre? *Ciencia y Desarrollo*. 20:116:50-61.
- Farina, A. 1996. *Principles and Methods in Landscape Ecology*. Chapman y Hall. 235 pp.
- Farina, A. 1998. *Principles and methods in landscape ecology*. Chapman y Hall. London, U.K.
- Farina, A. 2000. *Landscape Ecology in Action*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- Forman, R. 1994. *Land mosaics, the ecology of landscapes and regions*, University Press, Cambridge.
- Forman, R., Godron, M. 1986. *Landscape ecology*. John Wiley and Sons, New York.
- Foster, D. R., Mutzkin G., Slater B. 1998. Land use history as long-term broad-scale: regional forest dynamics in Central New England. *Ecosystems*, 1, 96-119.
- García, A., Muñoz, J. 2002. *El paisaje en el ámbito de la geografía*. Temas selectos de geografía de México. UNAM.

- García, E. 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- García, R. 1990: Geoecología de las áreas de montaña. GEOFORMA Ediciones, Logroño.
- García-Romero, A. 1998. Geoecología del paisaje vegetal en el occidente de la Ciudad de México. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. 18:p.115-137.
- García-Romero, A. 2002. An evaluation of forest deterioration in the disturbed mountains of western México City. *Mountain Research and Development*, 22/3: 270-277.
- Garduño, V. H. 1987b. Estudio geológico regional para conocer las características de las rocas el basamento relativo del campo geotérmico de los Azufres. C.F.E. Reporte 20:87.
- Garduño, V. H. 1987a. Modelo geológico regional del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán.
- Geist, H. J., Lambin, E. F. 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, 52(2):143-50.
- Gómez-Pompa, A. 1985. *Los recursos bióticos de México (reflexiones)*. Alhambra Mexicana, México.
- González, F. 1981. *Ecología y Paisaje*. H. Blume Ediciones. España.
- Gordon, J. E., Dvorak, I. J., Jonasson, C., Josefsson, M., Kocianova, M., Thompson, D. B. A. 2002. Geo-ecology and Management of sensitive montane landscapes. *Geogr. Ann.*, 84 A (3-4): 193-203.
- He, Ch., Malcolm, S., Dahlberg, K., Fu, B. 2002. A conceptual framework for integrating hydrological and biological indicators into watershed management. *Landscape and Urban Planning*. 49: 25-34.
- He, H. S., Hao, Z., Larsen, D. R., Dai, L., Hu, Y., Chang, Y. 2002. A simulation study of landscape scale forest succession in northeastern China. *Ecological Modelling*. 156: p.153-166.

- Houghton, R. A. 1994. The worldwide extent of land-use change. *Bioscience*. 44/5.
- Huggett, R. 1995. *Geoecology, an evolutionary approach*. Routledge, London.
- INEGI, 1978. Carta geológica, hojas E14-A14 E14-A15, E14-A24, E14-A25, E14-A26, E14-A34, E14-A35, escala 1:50000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI, 1983. *Carta de Uso de Suelo y Vegetación*, hojas E14-A34, E14-A35, E14-A34, E14-A24, E14-A14, escala 1:50000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI, 1988. Carta de efectos climáticos regionales, hoja E14-1, escala 1:250 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI, 1995. Conjunto de datos vectoriales. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- INEGI-SEMARNAP. 1999. Estadísticas del Medio Ambiente. México.
- ITC, 2001. *Ilwis 3.0 Academic User's Guide*. ITC. Enschede, Netherland.
- Jansky, L., Ives J., Furuyashiki, K., Watanabe, T. 2002. Global mountain research for sustainable development. *Global Environmental Change*. 12: 231-232.
- Jodha, N. S. 2000. Globalization and fragile mountain environments. *Mountain Research and Development*. 20:4:296-299.
- Jongman, R. 2002. Homogenization and fragmentation of the European landscape: ecological consequences and solutions. *Landscape and Urban Planning*. 58:211-221.
- Karr, J. R. 1998. Rivers as Sentinel: Using the Biology of Rivers to Guide Landscape Management. En: R.J. Naiman R. E. Bilby (eds). *River Ecology and Management. Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*. Springer, EEUU pp. 502-528.
- Kasperson, R. E., Kasperson, J. X., Turner, B. L., Dow, K., Meyer, W. B. 1995. Critical environmental regions: concepts, distinctions and issues. In Kasperson, J. X., Kasperson, R. E., Turner, B. L., editors, *Regions at risk:*

- comparisons of threatened environments*, Tokyo: United Nations University Press, 1-41.
- Keitt, T. H., Urban, D. L., Milne, B. T. 1997. Detecting critical scales in fragmented landscapes. *Conservation Ecology*. 1:13-29.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkam, T. A., Vogel, C., Xu, J. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11: 261-269.
- Laurie, M. 1983. *Introducción a la Arquitectura del Paisaje*. Gustavo Gili. España.
- Levin, S. A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology, *Ecology*, 73:1943-1967.
- Lugo, J., Córdova, C. 1990. Morfogénesis (mapa de la República Mexicana): UNAM, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, hoja Geomorfología 1. Núm. IV.3.3, escala 1:4' 000, 000.
- Lugo, J., 1990. El relieve de la república mexicana. Revista Instituto de Geología. Vol. 9; Núm. 1. UNAM, México.
- MacArthur, R. H., Wilson, E. O. 1967. The theory of island biogeography. Princeton University Press, New Jersey, 203 pp.
- Martínez de Pisón, E. 2000. "La dinámica natural del paisaje". El territorio y su imagen: ponencias y mesas redondas. XVI Congreso de geógrafos españoles. España. pp. 9-26.
- Mas, J. F., Ramírez, I. 1996. Comparison of land use classifications obtained by visual interpretation and digital processing. *ITC J.* 3: 278-283.
- Masera, O. R. 1996. Deforestación y degradación forestal en México, Documentos de Trabajo No. 19, GIRA A. C. Pátzcuaro, México (enero).

- Masera, O., Ordóñez, M. J., Dirzo, R. 1997. Carbon emissions from mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climate Change*. 24: 256-295.
- Matthews, E., Payne, R., Rohweder, M., Murray, S. 2000. *Pilot Analysis of Global Ecosystems. Forest Ecosystems*. WRI. Washington, D. C.
- McGarigal, K., Marks, B. J. 1994. FRAGSTATS. Spatial pattern analysis program for quantifying landscapes structure. Versión 2.0. Oregon State University, Corvallis, 67 pp.
- McIntyre, N. E. 1995. Effects of forest patch size on avian Diversity. *Landscape Ecology*. 10:2:85-99.
- Merino, P. L. 2004. *Conservación o deterioro: el impacto de las políticas públicas en las instituciones comunitarias y en los usos de los bosques en México*. México: Instituto Nacional de Ecología, 2004. 331 pp.
- Muñoz, J. 1998. Paisaje y Geosistema. Una aproximación desde la Geografía Física. En: *Paisaje y medio ambiente* (Martínez de Pisón, E. (Edit.)). Fundación Duques de Soria-Univ. De Valladolid, España. 45-56.
- Naveh, Z., Lieberman, A. S. 1984. *Landscape Ecology: Theory and Applications*. Springer-Verlag, Nueva York.
- Noss, R. F. 1991. Landscape connectivity: different functions and different scales. En: W. E. Hudson (ed.), *Landscape Linkages and Biodiversity*, Island Press, Washington D.C. 27-39.
- O'Neill, C., Hunsaker, T., Timmis, B. L., Jackson, K. B., Jones, K. H., Wickham, J. D. 1996. Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale.
- Ochoa, S. 2001. Traditional Land-Use Systems and Patterns of Forest Fragmentation in the Highlands of Chiapas, México. *Environmental Management*. 27/4: 571-586.
- Ojima, D. S. 1994. The global impact of land-use change. *Bioscience*. 44/5:300, 5.

- Olsson, E., Austrheim, G., Grenne, S. 2000. Landscape change patterns in mountains, land use and environmental diversity, Mid-Norway 1960-1993. *Landscape Ecology*. 15: 155-170.
- Palacio, J. L. 1985. Geomorfología Regional del oriente de Michoacán y occidente del Estado de México. Tesis doctoral. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Palacio-Prieto, J. L., Bocco, G., Velázquez, A. 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: Resultados del Inventario Nacional Forestal 2000. *Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM. 43:183-203.
- Pickett, S. T. A., Cadenasso, M. L. 1995. Landscape ecology: spatial heterogeneity in ecological systems, *Nature*, 269:331-334.
- Pimm, S. L. 1984. The complexity and stability of ecosystems. *Nature*. 307:321-326.
- Powers, W. E., Khon, C. F. 1959. Identification of selected cultural features. Aerial photointerpretation of landforms and rural-cultural features in glaciated and coastal regions, Northwestern University, Illinois. 58-97 pp.
- Pradal, E., Robin, C., 1985, Découvert d'une caldéra majeure associée au champ géothermique Los Azufres Mich.: C. R. Acad. Scs. Paris, T. 301, Série II. N.14., pp. 2069-2074.
- Price, M., Thompson, M. 1997. The complex life: human land uses in mountain ecosystems. *Global Ecology. Biogeography Letters*. 6: 77-90.
- Price, M. 1999. *Global Change in Mountains*. Parthenon Publishing. Oxford.
- Quiñones, H. 1987. El sistema fisiográfico de la Dirección General de Geografía. *Revista de Geografía*. 1:2:13-20.
- Ramírez, M. I. 2004. Los espacios forestales de la Sierra de Angangueo (estados de Michoacán y México. Una visión geográfica. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.

- Ramírez, M. I., Azcárate, J. G., Luna, L. 2003. Effects of human activities on monarch butterfly habitat in protected mountain forest, México. *The Forestry Chronicle*. 79:2:242-246.
- Reyes-Hernández, H., Cortina-Villar, S., Perales-Rivera, H., Kauffer-Michel, E., Pater Fernández, J. M. 2003. Efecto de los subsidios agropecuarios y apoyos gubernamentales sobre la deforestación durante el periodo 1990-2000 en la región de Calakmul. Campeche, México. *Investigaciones Geográficas*. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 51:88-106.
- Richard, J. F. 1993. *Le paysage. Analyse et synthèse*. Ortom. Paris
- Riebsame, W. E., Parton, W. J. 1994. Integrated modeling of land use and cover change. *Bioscience*. 44: 5.
- Riebsame, W. E., Gosnell, H., Theobald, D. M. 1996. Land use and landscape change in Colorado Mountains I: Theory, scale, and pattern. *Mountain Research and Development*. 6:4:395-405.
- Robbins, C. S., Dawson, D. K., Dowell B. A. 1989. Habitat area requirements of breeding forest birds of the Middle Atlantic States, Wildl. Monogr. 103.
- Rzedowski, I. J. 1988. *Vegetación de México*. Limusa, México.
- Salazar, E. C., Zavala, J., Castillo, O. y Cámara, R. 2004. Evaluación espacial y temporal de la vegetación de la Sierra Madrigal, Tabasco, México (1973-2003). *Investigaciones Geográficas*. Instituto de Geografía de la UNAM. México, D.F. 54: 7-23.
- SARH, 1981. Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional. México.
- Saunders, D. A., Hobbs, R. J., Margules, C. R. 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation: A review. *Conservation Biology*. 5:18-32.
- Schieck, J., Lertzman, K., Nyberg, B., Page, R. 1995. Effects of patch size on birds in old-growth montane forest. *Conservation Biology*. 9:5:1072-1084.
- Schweik, C. M., Adhikari, K., Nidhi, P. K. 1997. Land-cover change and forest institutions: a comparison of two sub-basins in the southern siwalik hills of Nepal. *Mountain Research and Development*. 17: 99-116.

- Scott, D. 1993. Environmental planning, ecosystem science and ecosystem approaches for integrating environmental and development. *Environmental Management*. 17:3:289-303.
- SEMARNAP, 2000. Dirección General Forestal. Unidad del Inventario nacional de Recursos Naturales. México.
- Slaymaker, D. 2003. Using georeferenced large-scale aerial videography as a surrogate for ground validation data. In Wulder M A, Franklin, S. E. (Eds.) *Remote Sensing for Forest Environments: Concepts and Case Studies*. Kluwer. Hardbound, USA. 469-488 pp.
- Smethurst, D. 2000. Mountain Geography. *The Geographical Review*, 90, 35-56.
- Smethurst, D. 2003. Mountain Geography. *The Geographical Review*. 90: p.
- Tansley, A. G. 1935. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*. 16: 284-307.
- Tekle, K., Hedlund, L. 2000. Land cover Changes between 1958 and 1986 in Kalu District, Southern Wello, Ethiopia. Mountain Research and Development. 20: 42-51.
- Toth, J. 1963. 'A theoretical analysis of groundwater flow in a small drainage basin', *Journal of Geophysical Resources*, vol. 68(16); pp. 4795-4812.
- Trani, M. K., Giles, R. H. 1999. An analysis of deforestation: metrics used to describe pattern change. *Forest Ecology and Management* 114:459-470.
- Troll, C. 1939. Luftbildplan und ökologische Bodenforschung; Z. Ges. Erdk. Berl., pp. 241-298.
- Turner, I. M. 1996. Species loss in fragments of tropical rain forest: a review of the evidence. *Journal of Applied Ecology*. 33:200-209.
- Turner, M. G., 1989. Landscape ecology: the effect of pattern on processes, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20:171-197.
- Turner, M. G., Pearson, S. M., Bolstad, P., Wear, D. N. 2003. Effects of land-cover change on spatial pattern of forest communities in the Southern Appalachian mountains (USA). *Landscape Ecology*. 18:449-464.

- Velazquez, A., Bocco, G., Torres, A. 2001. Turning scientific approaches into practical conservation actions: the case of Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, México. *Environmental Management*. 3: 21-32.
- Velázquez, A., Durán, E., Ramírez, I., Mas, J. F., Bocco, G., Ramírez, G., Palacio, J. L. 2003. Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca, Mexico. *Global Environmental Change*. Vol. 13. Issue 3:pp. 175-184.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz, G. J., Mayorga, S. R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., Palacio, J. L. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica INE-SEMARNAT. México*. 62:21-37.
- Vidal, R. 2005. *Las regiones climáticas de México*. Temas selectos de geografía de México. UNAM.
- Walker, R., Homma A. K. O. 1996. Land use and land cover dynamics in the Brazilian Amazon: an overview. *Ecological Economics*. 18: 67-80.
- Wiens, J. A. 1995. Landscape mosaics and ecological theory, En: L. Hansson, L. Fahrig y G. Merriam (eds.), *Mosaic Landscapes and Ecological Processes*. Chapman and Hall, Londres. pp. 1-25.
- Wissmar, R. C., Beschta, R. L. 1998. Restoration and management of riparian ecosystems: a catchment perspective. *Freshwater Biology* 40: 571-585.
- Zipperer, W. C. 1993. Deforestation patterns and their effects on forest patches. *Landscape Ecology*. 8:177-184.

CAPÍTULO II. ORGANIZACIÓN MACROESTRUCTURAL Y TAXONOMÍA DEL PAISAJE EN LA CUENCA DEL RÍO TUXPAN

El presente capítulo tiene como propósito conocer: a) el arreglo morfoestructural y, b) la taxonomía del paisaje de la cuenca del río Tuxpan. Se parte de considerar que las macroestructuras² (morfoestructuras y clima) son los componentes más estables e independientes que definen al paisaje.

De entre los factores biofísicos, *el relieve ha sido señalado como un efectivo “attractor” o “precursor” of land-use change* (Bürgi *et al.*, 2004), al cual se le atribuyen innumerables formas de influencia sobre la dinámica del uso del suelo y la vegetación (Forman y Godron, 1986; China, 2002; Turner *et al.*, 2003; Burgos y Mas, 2004; García-Aguirre *et al.*, 2007). Al ser la capa más externa de la Tierra, el relieve hace la vez de interfase funcional entre los potenciales y limitantes geológicos y climáticos, de los cuales dependen los recursos bióticos y abióticos del sistema ambiental (Bertrand, 1968; Rzedowski, 1988). Por ejemplo, interviene en la disponibilidad de agua y suelo, la estabilidad del terreno y la accesibilidad, importantes indicadores de la productividad y de la transformación de los patrones y procesos del uso del suelo (China, 2002; Turner *et al.*, 2003; Bürgi *et al.*, 2004; Burgos y Mas, 2004; Durand y Lazos, 2004; García-Aguirre *et al.*, 2006).

En las últimas décadas la geomorfología ha pasado de ser considerada como una ciencia pura y dedicada a describir y clasificar las formas del relieve – exclusivamente por su origen–, y al reconocimiento de las técnicas de investigación aplicadas en diferentes campos (Verstappen, 1983): cambios de uso y cubiertas del suelo; conservación de recursos naturales; peligros naturales y

²Otro conjunto de elementos inferior a las macroestructuras son la mesoestructuras, “complejo que cambia con relativa rapidez. En este nivel espacio-temporal de organización se incluyen todos los componentes del territorio que se manifiestan a escalas medias – mesoestructuras o componentes mesoestructurales–, dentro de los cuales se pueden distinguir dos grupos; a) el de los componentes abióticos –las aguas y el modelado del relieve– que son más estables y, b) los componentes biótico o menos estables y a la vez los más dependientes, y dinámicos –la vegetación, la fauna, los suelos y el antropismo” (García y Muñoz, 2002).

prevención de desastres; diagnóstico, planeación y recuperación ambiental; atenuación y control de la erosión acelerada; aptitud de uso del suelo y planeación del crecimiento de las áreas urbanas (Burrough, 1986; Tapia y López Blanco, 2002; Aceves-Quesada *et al.*, 2006). En todos ellos se ha considerado al relieve como la unidad básica del análisis espacial, y de los usos del suelo (Bocco *et al.*, 2001).

Este apartado, por consiguiente, se encuentra organizado en cuatro subcapítulos principales: 1) las morfoestructuras, es decir, la configuración arquitectónica de la cuenca definida a partir de los principales rasgos morfológicos; 2) el mesoclima; esta unidad macro-escalar del paisaje está definida por un tipo de clima que es acorde con la configuración morfoestructural del territorio (García-Romero y Muñoz, 2002); 3) la vegetación potencial y finalmente; y 4) la síntesis ambiental que trata la estructura espacial del paisaje.

2.1 Las morfoestructuras

El concepto de “morfoestructura” refiere a una homogeneidad relativa que resulta de una peculiar combinación entre la estructura geológica, contenido litológico y tectónico, así como de los principales rasgos morfológicos. Por su grado de estabilidad e independencia, las morfoestructuras definen la estructura o armazón básico del territorio, en la cual se asientan y evolucionan los demás componentes que se manifiestan en el paisaje (García-Romero y Muñoz, 2002).

Método

La delimitación de las morfoestructuras comprende tres fases: I) recopilación de información bibliográfica y cartográfica, II) interpretación, procesamiento y análisis en SIG y, III) obtención de resultados. La primera fase incluye la revisión

de trabajos y artículos de investigación relacionados con: geología (Demant, 1982; INEGI, 1978; Quiñones, 1987; Lugo y Córdova, 1990; Garduño, 1987a), litología (Demant et al., 1975; Demant et al., 1979, en Palacio, 1985; Garduño, 1987b), estratigrafía (Garduño, 1987b), estructura (Garduño, 1987b; Robin y Pradal, 1985) y tectónica regional y local del área de estudio (Lugo, 1990; Demant et al., 1975; Demant, 1982; Garduño, 1987b; INEGI, 1978); además de consultar mapas topográficos (INEGI, 2000), geológicos (INEGI, 1978) y edafológicos (INEGI, 1983) a escala 1:50,000 e interpretar 18 fotografías aéreas a escala 1:75,000 (INEGI, 1995) mediante procesos técnicos de estereoscopia, siendo el primer acercamiento morfológico con el área de estudio.

La segunda fase consistió en la elaboración e integración de la cartografía temática de base para la delimitación preliminar de las unidades morfoestructurales. El criterio para la diferenciación de estas unidades considera la morfología, el origen, la edad y la composición litológica de las unidades, así como del arreglo tectónico. De esta manera, cada unidad morfoestructural se diferencia de las demás por un tipo de geoforma, rango y desnivel altitudinal y densidad de drenaje; también de otros criterios como la ruptura de la pendiente y otros más específicos de la tectónica (orientación de laderas y densidad de fallas y fracturas) y la litología (tono, patrón, textura, tamaño, etc.). La demarcación de las morfoestructuras se plasma en el modelo digital de elevación de terreno (30 m por píxel) y en el modelo sombreado, los cuales se obtienen a partir de las curvas de nivel a cada 20 m. Ambos modelos permitieron identificar las principales formas del relieve y la configuración del sistema de drenaje. Finalmente, se realizan salidas de campo con el objetivo de confirmar la fotointerpretación morfológica.

2.1.1 Geología

La cuenca del río Tuxpan se enclava en dos subprovincias fisiográficas: al Norte con la *Subprovincia Mil Cumbres o Sierra Volcánica Compleja* que pertenece a la Provincia *Eje Neovolcánico Transversal*, cadena andesítica de edad plio-cuaternaria (Demant, 1982) que delimita el extremo meridional de la altiplanicie mexicana. Lugo y Córdova (1990) señalan que este eje se caracteriza por relieves en forma de planicies escalonadas con montañas y sierras volcánicas; su relieve actual se debe a una conjunción de dos procesos, por una parte la tectónica de bloques y, por otra la actividad volcánica del Cuaternario, los cuales reflejan localmente un esquema topográfico complejo en forma de escarpes y taludes, sobre todo en los sistemas montañosos.

La mitad Sur de la cuenca forma parte de la unidad fisiográfica denominada Depresión del Balsas, la cual, a su vez pertenece a la Provincia Sierra Madre del Sur (INEGI, 1981; Quiñones, 1987). Lugo (1990) señala que la Sierra Madre del Sur es un sistema de bloques montañosos, diversos en su composición y edad, cuyo relieve está condicionado a la actividad tectónica (activa desde el Neógeno, intensa en la actualidad), la litología, la estructura geológica y las condiciones climáticas (Figura 7).

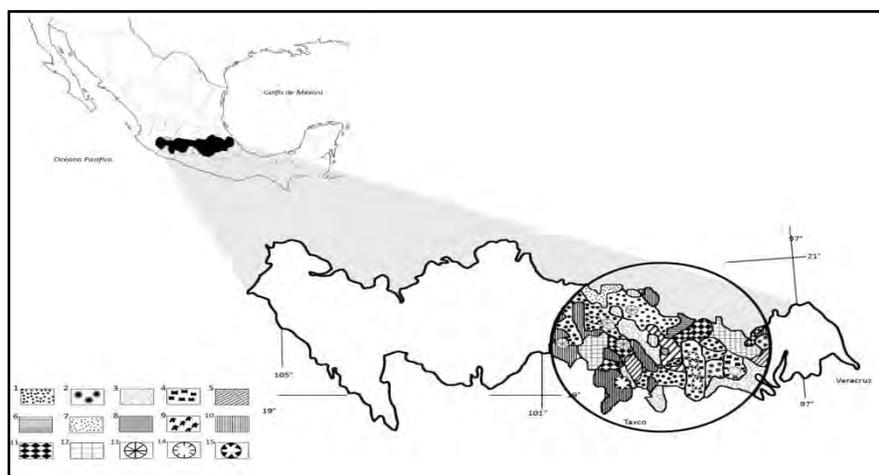


Figura 7. Formas de relieve del Sistema Neovolcánico Transmexicano. Cuaternario. 1- Campos volcánicos; 2- Altiplanicies de tetra; 3- Superficies de acumulación (proluvial) de pie de monte; 4- Piedemonte de acumulación

volcánica; 5- Altiplanicies de acumulación lacustre; 6- Altiplanicies de acumulación fluvial; 7- Altiplanicies de acumulación fluvio-lacustre. Precuaternario. 8- Montañas bloque de rocas intrusivas o metamórficas; 9- Altiplanicies de riolitas; 10- Elevaciones menores constituidas de riolita; 11- Lomeríos volcánicos; 12- Elevaciones plegadas o de bloque no diferidas. Otras formas. 13- Volcanes monogenéticos principales; 14-Calderas; 15- Estratovolcanes mayores (Lugo y Córdova, 1990).

El contacto de estas dos grandes provincias permite que, al interior del área de estudio, afloren rocas metamórficas (esquistos) y sedimentarias (conglomerados y brechas sedimentarias) del Mesozoico y Cenozoico. Es muy probable que las rocas más antiguas del área correspondan a una secuencia de metasedimentarias y metavolcánicas pertenecientes al denominado Macizo de Taxco-Zitácuaro. Sobreyaciendo a esta secuencia, se tienen rocas sedimentarias del Cretácico que ocasionalmente se presentan asociadas a un vulcanismo de tipo andesítico. Finalmente, durante el Plio-pleistoceno ocurrió un vulcanismo basáltico que cubre las rocas más antiguas (CNA, 2002).

A pesar de existir una amplia información bibliográfica del Cinturón Volcano Mexicano, Garduño (1987b) considera que han sido pocos los trabajos realizados con un enfoque vulcanológico en el área de estudio. De los escasos trabajos en vulcanismo, el autor subraya y ordena en tres periodos las investigaciones más relevantes: el primero con trabajos geológicos dedicados a la minería e hidrocarburos; el segundo a una exploración de zonas geotérmicas; y el tercero con un amplio conocimiento del campo geotérmico de los Azufres y el Eje Neovolcánico Transversal. Como resultado de estas investigaciones se identifican unidades volcánicas de composición ignimbrítica que no habían sido consideradas antes de 1985, por lo que se concluye que aún no hay un modelo estructural de la evolución geodinámica y cinemática del Cinturón Volcano Mexicano.

2.1.2 Litología

Secuencia pre-volcánica

Demant *et al.*, (1975) señalan que las rocas más viejas que afloran en la región son los esquistos, cuya edad y fase metamórfica se calcula van desde el Triásico hasta el Cretácico Medio. Por encima de este metamorfismo, se tienen las lutitas del Cretácico Superior. Seguido de los movimientos tectónicos paleocenos, se desarrolla una fase de abrasión que provoca en toda esta zona una “molassa” continental reconocida como parte del Grupo Balsas. En una fase tardía, dichos movimientos originan plegamientos amplios de fondo con orientación Norte-Sur. Dicha historia geológica pertenece a todo el basamento pre-volcánico -del Mioceno Inferior- que aflora en la parte meridional de la región.

Secuencia volcánica

La secuencia volcánica que se desarrolla desde el Mioceno se puede subdividir, de acuerdo con Demant *et al.*, (1975), en cuatro periodos o fases:

1. La fase más antigua da origen a un sustrato de andesitas básicas, andesitas y dacitas, todas ellas cubiertas por un conglomerado proveniente de la erosión de los relieves. Esta secuencia testifica y/o data las primeras manifestaciones de movimientos verticales.
2. La fase del Plioceno inferior al Plioceno consiste en la emisión de ignimbríticas riolíticas y, hacia el final, una etapa de intensos movimientos verticales que dan lugar a procesos de erosión y acumulación de grandes cantidades de arena alrededor del complejo riolítico.

3. La fase del Plioceno superior está caracterizada por la formación de grandes lagos –como el lago de Cuitzeo- y localmente, la zona de Los Azufres en la Sierra de San Andrés, al norte de Ciudad Hidalgo.

4. La fase del Cuaternario se caracteriza por la formación del campo monogenético, con morfología de derrames y conos cineríticos de composición basáltica. La localización de los aparatos (orientación regional, más que local) está relacionada con la tectónica que da origen al graben de Ciudad Hidalgo y Cuitzeo-Maravatio.

2.1.3 Unidades litológicas

Adequando la información de Demant *et al.*, (1979; en Palacio, 1985), Palacio (1985) y Garduño (1987b), las formaciones litológicas más representativas de la cuenca del río Tuxpan son (Tabla 1):

Tabla 1. Cronología porcentual de formaciones geológicas. Elaboración propia con información de Demant *et al.*, (1979; en Palacio, 1985).

Era	Periodo	Unidad geológica	%
Cenozoica	Cuaternario	Aluviones	5.88
		Sedimentos Lacustres	0.12
		Vulcanismo Basáltico	18.23
		Riolitas y Dacitas	13.30
	Plioceno	Vulcanismo Andesítico	12.66
	Mioceno	Domos Volcánicos Ignimbríticos	12.34
		Ignimbritas	4.74
	Oligoceno	Coladas Basálticas Andesíticas y Dacíticas	1.19
		Tobas y Brechas volcánicas	26.93
	Eoceno	Conglomerado de base	3.90
Mesozoica	Cretacio	Calizas	0.09
	Jurásico	Secuencia Metamórfica: esquistos verdes	0.62

Esquistos verdes y calizas del Jurásico-Cretácico.

Al oeste de Zitácuaro afloran depósitos de lutitas afectadas por cierta esquistosidad del Cretácico Superior (facies *flysch*) durante el periodo Paleógeno, específicamente en la época Paleoceno. La formación más dendrítica (tipo malasse continental) que sobreyace a estos *flychs* puede corresponder al grupo Balsas. Se pueden atribuir las areniscas conglomeráticas y las areniscas con intercalaciones de lutitas al Eoceno-Oligoceno. Este grupo Balsas experimenta así una fase de plegamiento (pliegue de fondo) durante el Mioceno Inferior o Medio.

Conglomerado de base del Eoceno.

Es el material rocoso más profundo compuesto de fragmentos (andesita, cuarzo y rocas graníticas) de tamaño mediano (2-5 cm) y de un espesor aproximado de 200 m y en cuyo lecho descansan niveles de arena fina y lutita roja muy bien estratificados.

Coladas basálticas -andesíticas y tobas y brechas volcánicas del Oligoceno.

Estos materiales se encuentran afectados por el plegamiento que dan origen al Anticlinal de Tzitzio. Como resultado de este plegamiento, un sistema de fracturas da origen a una secuencia detrítica que cubre a las coladas. Se estima una edad de 14 MA a las lavas del sector de Mil Cumbres.

Ignimbritas y domos volcánicos ignimbríticos del Mioceno.

Demant *et al.*, (1975) consideran que estas formaciones pertenecen a una época Mio-pliocena. De acuerdo con estos autores, estas ignimbritas forman un afloramiento en la Región de Agostitlán. Este vulcanismo se relaciona con la

primera aparición de movimientos tectónicos verticales. Palacio (1985) considera que esta unidad está integrada por lavas dacíticas e ignimbritas (al sur de Ciudad Hidalgo, específicamente en la Sierra de El Fraile), lo que indica intensos procesos eruptivos. Las ignimbritas cubren zonas más amplias que las dacitas. De las emisiones que dan origen a las ignimbritas se pueden encontrar asociaciones de domos dacíticos y riolíticos que se presentan principalmente al suroeste de Ciudad Hidalgo.

Vulcanismo andesítico del Plioceno.

Un claro ejemplo de esta formación es el complejo dacítico de la Sierra El Fraile (3,000 msnm), que se extiende desde Ciudad Hidalgo hasta Tuxpan. Se trata de lavas porfiríticas de color gris claro con numerosos fenocristales de plagioclasa, hornblenda (anfíbola) y biotita. Dada su edad del Plioceno inferior a medio, no se pueden reconocer los elementos vulcanológicos, pero por la viscosidad del magma ácido se trata probablemente de domos volcánicos con derrames asociados. De acuerdo con Silva (1979; en Garduño, 1987b), este paquete de dacitas descansan sobre las andesitas del Complejo Volcánico Superior. Esta unidad provoca grandes masas de brechas y tobas que afloran al SE de Ciudad Hidalgo debido a su levantamiento y fallamiento. Demant (1975) no sólo considera de esta edad las riolitas que se extienden sobre el Complejo Los Azufres, también un afloramiento del mismo material a lo largo de la carretera Ciudad Hidalgo-Morelia, así como los abanicos de la Sierra El Fraile.

Formaciones cuaternarias.

Palacio (1985) considera dos tipos de vulcanismo cuaternario: el ácido y el andesítico-basáltico. El primero, se caracteriza por emisiones de pómez dacítica y

riolítica de baja viscosidad. Su edad oscila entre 1.57 más menos 0.15 MA, mientras que la edad de los domos de Tuxpan se calcula de 0.36 más-menos 0.008 MA El vulcanismo basáltico se distingue por la formación de conos de escoria, asociados a derrames lávicos y formas compuestas por bombas, lapillis y cenizas. Demant (1975) diferencia claramente este periodo del Plioceno por su actividad volcánica. Se trata de manifestaciones basálticas con presencia abundante de olivino, en donde los aparatos volcánicos (conos de escoria) y los derrames son de tamaño reducido. Se considera que el Cuaternario aparece como una continuidad de la fase lacustre del Plioceno.

Los aluviones se derivan principalmente de cenizas volcánicas y de arcillas de neoformación por intemperismo de la roca basáltica. Por su rico contenido en nutrientes, estabilidad y disponibilidad de agua y suelo, este material es comúnmente utilizado para uso agrícola. El material corresponde con las terrazas en torno al curso del río Tuxpan, el cual discurre por valles fuertemente encajados, por lo que estas formas actuales son escasas y se les puede encontrar principalmente aguas debajo de la cuenca o bien, en pendientes llanas, aunque afectados por las aguas de crecida estacional.

El material lacustre que aflora en el área de estudio surge a partir de la existencia de importantes cuerpos de agua, a mencionar, las presas Mata de Pinos y Sabaneta, las cuales pudieron haber sido cuencas endorreicas en el Plio-Cuaternario. Su origen se relaciona con la actividad tectónica (densidad de fracturas) y volcánica (depósito de materiales), considerados como los principales factores que explican la infiltración de agua y su almacenamiento en las depresiones de nivel de base (Figura 8).

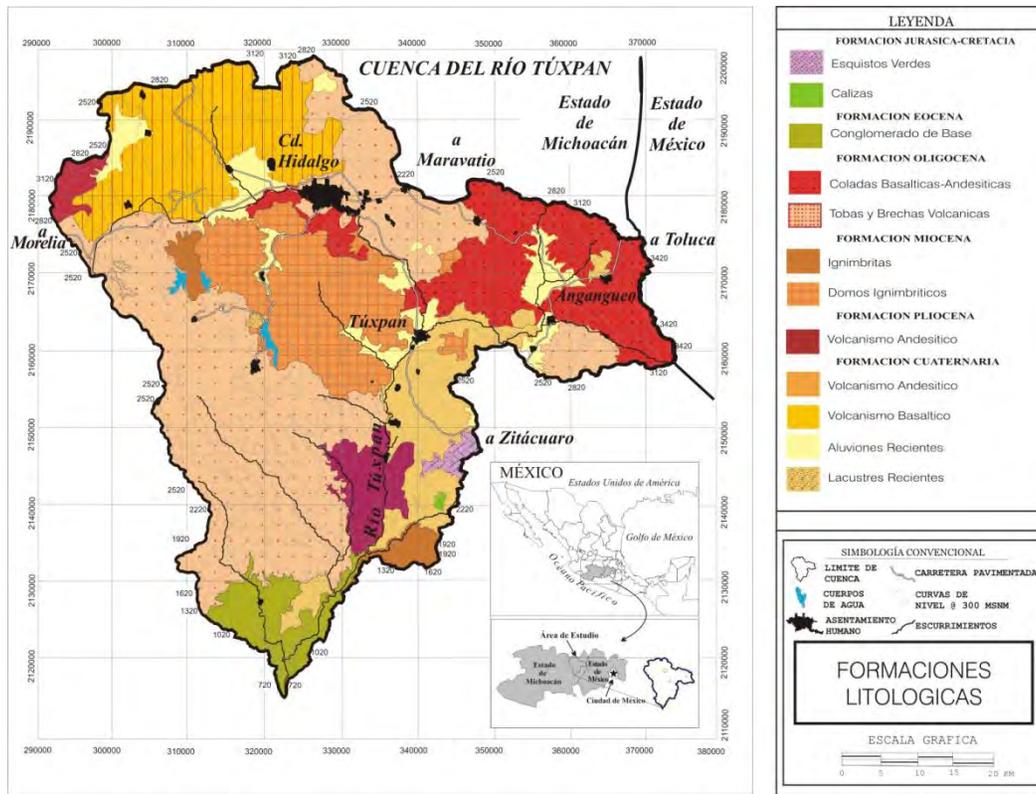


Figura 8. Formaciones litológicas. Mapa geológico en Demant *et al.*, (1979; en Palacio, 1985).

2.1.4 Estratigrafía

De acuerdo con Garduño (1987b), en la región existen dos complejos volcánicos que sobreyacen a las estructuras plegadas: a) el Complejo Volcánico Inferior (CVI), constituido de una secuencia volcánico sedimentaria que en su base data de hace 20 MA, la cual descansa en forma angular sobre las Capas Rojas del Sector Tzintio y, b) el Complejo Volcánico Superior (CVS), compuesto por 700 m de andesitas y brechas andesíticas de hace 5 MA en la cima (Figura 9).

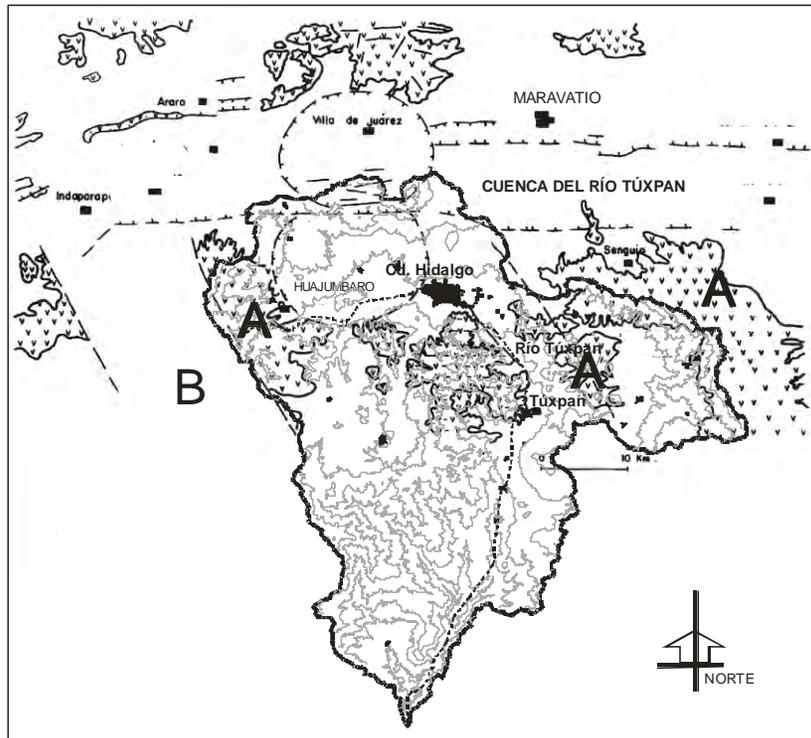


Figura 9. Complejos volcánicos: A) superior; B) inferior. Con información de Garduño (1987).

De acuerdo con Garduño (1987b), la columna estratigráfica del CVS en el poblado de La Escalera (35 km al norte de Ciudad Hidalgo) consiste en las siguientes unidades:

- A 1,770 msnm se encuentra un nivel de tobas riolíticas de color blanco y flujos piroclásticos, que subyacen a derrames andesíticos muy fracturados, todos basculados hacia el norte. Sobreyaciéndolos se ve una discordancia de conglomerados y andesitas de color verde y ocre.
- A 2,000 msnm se continúan las alternancias de tobas arenosas, conglomerados y derrames andesíticos, sin embargo, a partir de esta cota los materiales volcánicos de tipo ácido son más abundantes y la columna se relaciona más a depósitos fluvio-lacustres.

- A 2,060 msnm la secuencia se compone de una alternancia de conglomerados, tobas y posibles paleosuelos que suelen aflorar en escarpes.
- Entre 2,180 y 2,280 msnm la topografía se torna muy escarpada, permitiendo el afloramiento de conglomerados, flujos piroclásticos, tobas y derrames andesíticos. Esta columna está localmente coronada por un nivel de tobas riolíticas que suavizan la topografía. La sección se continúa con los materiales volcánicos de Mil Cumbres, incluyendo brechas, derrames y tobas cubiertas por derrames básicos del Plio-Cuaternario en los alrededores de Indaparapeo, a 40 km al este de Ciudad Hidalgo.

La columna estratigráfica del área de estudio es compleja de establecer debido a la intensa deformación que coexiste en la región de Jungapeo de Juárez, Tuxpan y Ciudad Hidalgo. Sin embargo, Israde y Martínez (op. cit.), la reportaron como una secuencia volcánica, constituida por rocas extrusivas del Terciario Superior (andesitas y tobas) y cuaternarias afectadas por una tectónica sobrepuesta. En tanto que Garduño (1987b), en un intento por describir la estratigrafía de la zona, describió la siguiente columna sobre materiales ignimbríticos antiguos relacionados con el colapso Plioceno-Cuaternario en el área de la Presa de Mata de Pino:

I) A 2,420 m se encuentran ignimbritas líticas con fragmentos de andesita y pómez. Su típica estructura y el color ocre derivado del intemperismo, las hace similares a un conglomerado.

II) A 2,460 m afloran depósitos masivos de pómez fina –de unos milímetros a 5 centímetros– de color gris claro-amarillento.

III) A 2,500 m los depósitos, también masivos, consisten en fragmentos de pómez (80%) en una matriz arenosa de color gris. Existen fragmentos de pómez gris oscuro y de tamaño mayor que los depósitos de pómez de color claro. En ocasiones los depósitos registran concentraciones de bloques de hasta de 50 cm de diámetro.

IV) De 2,510 a 2,520 m se distribuye un paquete ignimbrítico de pómez contenida en una matriz gris tobácea, con líticos de pómez amarillenta y fibrosa, andesitas y pómez negra. Su granulometría va desde arenas hasta conglomerados. Este paquete ocupa toda una mesa morfológica que es difícil de estudiar debido a su alteración.

2.1.5 Análisis estructural

El análisis estructural y microestructural elaborado por Garduño (1987b) señala dos grandes colapsos al norte de la cuenca, los cuales dan origen a la *caldera de Los Azufres* (del Pleistoceno) y la *caldera de La Venta-Ciudad Hidalgo* (del Cuaternario), separadas ambas por dos elementos morfoestructurales mayores; el *Graben de Ciudad Hidalgo* (NW-SE) y el *Graben de Cuitzeo-Maravatio* (E-W), limitado este último al E por el sistema tectónico activo de Acambay. El autor distingue tres sistemas de fracturación principales, de los cuales el sistema orientado al NNW-SSE y NW-SE corresponde al Sistema de Cuencas y Sierras; el sistema orientado al NE-SW que afecta a las rocas volcánicas del Pliocuatnario y, los sistemas E-W o ENE-WSW. Estos últimos asociados al Complejo Volcánico Mexicano.

El análisis microestructural de la cuenca muestra que en el sector Zitácuaro-Ciudad Hidalgo incluye dos sistemas principales de lineamientos, uno orientado al NNW-SSE y otro al NE-SW, ambos relacionados con la actividad volcánica básica que afectó al área de estudio durante el Cuaternario.

Colapso caldera de *Los Azufres*. Descubierta por Robin y Pradal (1985; en Garduño, 1987b), esta fosa de hundimiento de 14 km de radio limita al sur por el corredor de fallas E-W, las cuales corresponden, no a la caldera, sino a un sistema regional. Los flujos Ignimbríticos pleistocénicos se distribuyen desde la Presa Santa Inés hacia el oriente hasta Maravatio y la Presa de Chincua. En este último sector, se datan depósitos lacustres que se encuentran debajo de las ignimbritas (Figura 10).



Figura 10. Mapa de los colapsos: a) caldera de Los Azufres (CCA); b) La Venta-Ciudad Hidalgo (CVCH) de acuerdo con Garduño (1987).

Colapso caldera La Venta-Ciudad Hidalgo. Con un radio de 16 km, los productos ignimbríticos se distribuyen en el área de las presas Pucuató, Mata de Pino y Sabaneta (sector centro-occidente) del área de estudio. Su borde norte está seccionado por el corredor de fallas E-W, que a su vez se relaciona con el vulcanismo ácido del Cuaternario. En el área de la depresión de Huajúmbaro-La Venta, ubicada al WSW de Ciudad Hidalgo, sobresale un rasgo circular de 9 km de radio, cortado en su borde W por una falla NW-SE que se prolonga 10 km hasta la Presa Pucuató, en tanto que hacia el norte, es intersectado por el sistema regional de fallas E-W.

2.1.6 Tectónica

Tectónica regional

El Sistema Neovolcánico Transmexicano (SNT), consiste en una serie de planicies escalonadas que se extienden desde las costas de Colima y Nayarit hasta los volcanes Pico de Orizaba y Cofre de Perote, en el estado de Veracruz (Lugo, 1990). Sin embargo, el autor señala que, de acuerdo a otras investigaciones, este complejo se extiende geológicamente hasta las costas del Golfo de México, existiendo varias teorías relacionadas con el origen del SNT, de las cuales la más viable es la propuesta por Demant (1975), quien atribuye el origen de este complejo estructural a “*la subducción de la placa de Cocos bajo el continente con diversos ángulos*”. En cuanto al vulcanismo del SNT, Demant (1982) considera que aun en la actualidad no se tiene una visión general de su estructura debida, entre otras cosas, a errores de interpretación detallada. No obstante, los trabajos de este autor señalan que el cambio drástico ocurrido en el océano Pacífico centro-oriental durante el Cenozoico tardío (10 MA) es un factor determinante del vulcanismo del SNT.

Tectónica local (morfoalineamientos)

En cuanto a la intensidad de la tectónica local, Garduño (1987b) señala que ésta se incrementó en las rocas más antiguas –del Mioceno–, así como en la zona de Tzitzio y Los Azufres. Distinguimos, por ejemplo, distingue una importante falla NW-SE que se prolonga desde la depresión de Huajúbaro-La Venta, al W del Colapso de Ciudad Hidalgo, hasta la Presa de Pucato, en tanto que al E, en las inmediaciones de Ciudad Hidalgo, se observa un arco de círculo que constituye el borde oriental del Colapso de Ciudad Hidalgo.

El INEGI (1978), por otro lado, identifica 486 morfoalineamientos (fracturas y fallas) para la región que comprende la cuenca del río Tuxpan. Estos morfoalineamientos suman 873.80 km –con una densidad de 0.46 km/km²–. El 22% de los morfoalineamientos tiene una longitud aproximada de 0 a 1,000 m, 43% de 1,000 a 2,000 m y, 21% de 2,000 a 3,000 m, habiendo pocas fracturas o fallas que superan los 5,000 m de longitud (1.85%). La mayor densidad de estos morfoalineamientos se desarrolla en la Sierra de Angangueo, específicamente en las sierras de Chincua y El Campanario-Rancho Grande. Por su orientación, 69% de estos morfoalineamientos se disponen con orientación NE-SW, con predominio NNE-SSW (318.798 km), NEE-SWW (284.16 km) y, NWW-SEE (139.91 km). Los resultados coinciden con los obtenidos por Israde y Martínez (1986), quienes identificaron un sistema de fracturas *NE-SW* con movimientos laterales Plio-Cuaternarios (Figura 11).

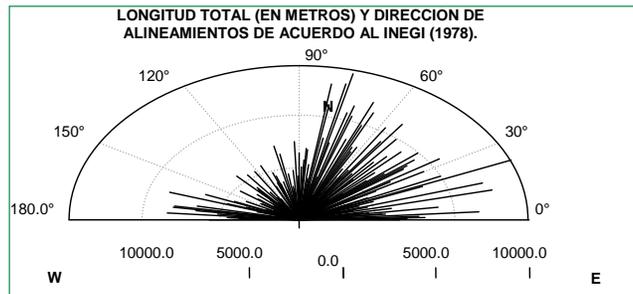


Figura 11. Dirección y longitud de los morfoalineamientos (fracturas y fallas) en la región de la cuenca del río Tuxpan.

De acuerdo a la disposición de las estructuras, la ruptura y orientación de las pendientes, se infirieron cinco morfoalineamientos de longitud variada, de los cuales, dos se localizan en las inmediaciones a la presa Mata de Pinos y en la proximidades de la localidad de Agostitlán. Resalta por su amplitud, un morfoalineamiento con dirección N-S que se extiende 13 km desde el puerto de La Sepultura a 2,400 msnm, cruzando la presa Mata de Pinos y descendiendo hasta la comunidad de San Bartolo Cuitareo, ubicada al SW de Ciudad Hidalgo (2,100 msnm). Finalmente, un morfoalineamiento (17 km) más que se extiende desde el Puente de Tierra ubicado al S del poblado de Agostitlán, específicamente en el contacto del domo exhumado de Agostitlán, cruzando las laderas fuertemente diseccionadas (NW-SE) hasta encontrar el valle encajado del río Tuxpan, con un desnivel altitudinal de 1,000 m.

El mapa de morfoalineamientos (Figura 12) se obtiene a partir de información de Garduño (1987b) y del INEGI (1978), así como de aquella inferida a partir de la interpretación de los principales rasgos de las estructuras (disposición, ruptura y orientación de pendientes).

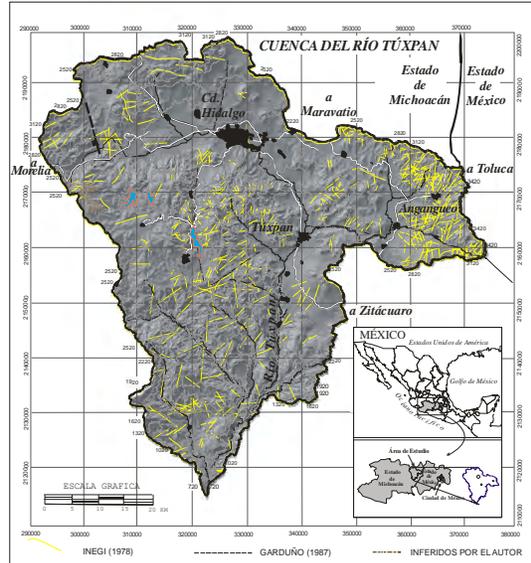


Figura 12. Morfoalineamientos (fracturas y fallas) en la región de la cuenca del río Tuxpan. De acuerdo con Garduño (1987b) e INEGI (1978).

2.1.7 Morfoestructuras

Con base en la información geológica, litológica y tectónica, se cartografiaron veinte unidades morfoestructurales que, de acuerdo a su origen y edad, fueron agrupadas en cuatro grandes categorías: a) estructuras prevolcánicas del Terciario Inferior, b) estructuras volcánicas del Terciario Superior, c) estructuras volcánicas del Cuaternario y, d) planicies aluviales del Cuaternario (Tabla 2).

Tabla 2. Morfoestructuras.

Clave	morfoestructura	area		altitud		drenaje		alineamientos		pendientes					
		(km ²)	%	rango	desnivel	Long(km)	D(km/km ²)	long.(km)	D(km/km ²)	0-3°	3-6°	6-15°	15-30°	30-45°	>45°
1	LOMAS Y VALLES DEL OLIVO	40.04	2.12	620-1420	800	121.76	3.04	27.00	0.7	15.15	10.35	23.81	31.94	15.06	3.70
2	LADERAS DE LA LAJA	154.54	8.19	820-2820	2000	381.00	2.47	74.63	0.5	1.32	2.90	19.83	43.17	26.47	6.31
3	LADERAS DE LAS JOYAS	62.13	3.29	1620-2820	1200	147.42	2.37	22.53	0.4	3.87	6.53	31.25	41.04	15.18	2.13
4	LADERAS DE LA COLMENA	137.63	7.30	1020-2620	1600	331.57	2.41	66.56	0.5	1.94	4.19	21.72	40.70	25.36	6.09
5	LADERAS DEL VENTERO	118.75	6.30	2020-3020	1000	241.27	2.03	31.36	0.3	4.75	8.48	36.38	34.72	13.67	2.02
6	LADERAS DE HUAJUMBARO	55.40	2.94	2220-3220	1000	138.84	2.51	15.36	0.3	5.38	7.05	29.24	39.29	17.17	1.89
7	LADERAS DE ANGANGUEO	144.50	7.66	2220-3640	1420	284.20	1.97	243.13	1.7	5.63	8.52	32.33	38.06	14.21	1.24
8	CONOS Y DOMOS DE LA LAGUNA VERDE	101.60	5.39	1620-3020	1400	150.50	1.48	40.09	0.4	8.50	13.48	38.68	27.46	10.52	1.36
9	DOMOS Y PLANICIES DE AGOSTITLAN	116.70	6.19	2220-3020	800	217.45	1.86	24.45	0.2	18.71	19.98	46.62	12.88	1.65	0.09
10	LADERAS DEL FRAILE	205.44	10.89	1620-3020	1400	482.06	2.35	121.07	0.6	7.07	9.04	26.85	31.94	19.75	5.34
11	DOMOS DE LAGUNA LARGA	51.29	2.72	2020-2820	800	117.25	2.29	19.73	0.4	15.20	22.80	40.83	17.61	3.39	0.22
12	DOMOS DE SAN MATIAS	161.77	8.58	2020-3640	1620	342.03	2.11	47.49	0.3	10.26	17.26	36.35	27.25	8.14	0.72
13	LADERAS DE CD. HIDALGO	140.35	7.44	1620-3220	1600	196.60	1.40	7.72	0.1	39.95	26.07	23.08	7.98	2.66	0.30
14	LADERAS DE TIMBINEO	45.53	2.41	820-2220	1400	85.02	1.87	6.69	0.1	7.02	11.10	28.95	37.17	13.72	1.92
15	CONO DE ZIRAHUATO	97.99	5.19	1220-2620	1400	158.82	1.62	19.64	0.2	12.19	30.66	40.91	10.82	4.41	1.03
16	CONO DEL HUACAL	35.63	1.89	2220-3220	1000	70.11	1.97	64.81	1.8	4.72	13.82	49.55	25.80	5.62	0.49
17	MESAS DE JUNGAPEO	111.93	5.93	620-2020	1400	217.42	1.94	35.82	0.3	6.37	7.61	21.56	35.68	22.43	6.35
18	PLANICIE DE TAJIMAROA	50.06	2.65	2020-2420	400	105.74	2.11	3.75	0.1	62.30	16.98	13.09	6.66	1.11	0.02
19	PLANICIE DE OCAMPO	32.98	1.75	2220-2620	400	71.46	2.17	1.34	0	68.03	17.87	13.05	1.02	0.05	0.02
20	PLANICIE DE TUXPAN	22.15	1.17	1620-2020	400	56.44	2.55	0.26	0	45.87	31.33	18.58	3.69	0.52	0.05

ESTRUCTURAS PREVOLCÁNICAS DEL TERCIARIO INFERIOR

Lomas y Valles del Olivo (1)

Se localiza en el área de confluencia de los ríos Tuxpan y Chiquito, en el sector meridional de la cuenca. Sus lomas y valles se elevan entre los 620 y 1,420 msnm, cuyo desnivel altitudinal (800 m), genera pendientes moderadas (15 y 30°) que se interrumpen con el fondo de valle aluvial y las laderas abruptas de la Mesa Chiquita. Esta morfoestructura (40.04 km²; 2.12% del área de la cuenca) del Eoceno es el resultado de movimientos tectónicos y de una fase de abrasión paleocénicos (Demant, 1975), que derivaron en la acumulación de depósitos continentales (areniscas y conglomerados) y que genéticamente se correlacionan con la formación del *Grupo Balsas*. Estratigráficamente, sobreyace de manera discordante a los *Esquistos del Mesozoico*, al tiempo que aparece localmente cubierta por las rocas volcánicas ácidas del Terciario (andesitas) y los basaltos del Cuaternario. Esta morfoestructura se encuentra afectada por un moderado fracturamiento (0.7 km/km²) y su sensibilidad al modelado se encuentra

altamente acusada por una fuerte densidad de disección (3.04 km/km^2), cuya profundidad de los barrancos oscila entre los 40 y 100 m, alcanzando en algunos sectores los 200 m (Palacio, 1985).

ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS DEL TERCIARIO SUPERIOR

Laderas de la Laja del Mioceno (2)

Ubicada a 32 km al sur de Ciudad Hidalgo y 24 km al SW de Tuxpan y rodeando el Anticlinal de Tzitzio por el Este, esta unidad (154.54 km^2 ; 8.19% de la cuenca) se caracteriza por sus laderas abruptas y fuertemente inclinadas ($15\text{-}30^\circ$ y $>45^\circ$) que forman escarpados paisajes que se extienden entre los 820 y 2,820 msnm (desnivel altitudinal de 2,000 m). Es una estructura de secuencia volcano-sedimentaria de tobas y brechas volcánicas ácidas cuyo relieve (en forma de laderas) se encuentra fuertemente afectado por la actividad tectónica de la región. Su edad se extiende al Mioceno y es el resultado de los movimientos compresivos e impulsos tectónicos regionales (Silva, 1979). Su delimitación obedece, entre otros factores, al marcado control estructural (falla inferida) que se observa siguiendo el arroyo Tetengueo y cuyo valle desciende de NW-SE hacia la desembocadura del río Tuxpan. No obstante, su moderada longitud (74.63 km) y densidad de fracturas (0.5 km/km^2), esta unidad, al igual que la anterior, presenta una fuerte sensibilidad al modelado debido a una marcada red de drenaje (381 km) y densidad de disección (2.47 km/km^2), cuya profundidad de los barrancos oscila entre los 100 y 200 m, alcanzando en algunos sectores los 300 m (Palacio, 1985).

Laderas de las Joyas del Mioceno (3)

Esta estructura volcánica (62.13 km²; 3.29% de la cuenca) se ubica al sur de la comunidad de Agostitlán . Esta morfoestructura marca el inicio del complejo de laderas fuertemente accidentadas ubicadas al SE del área de estudio. Esta morfoestructura se eleva entre los 2,220 y 2,620 msnm. Su desnivel altitudinal (400 m) genera un sistema de laderas de pendientes medias (15 y 30°). Forma parte del Complejo Volcánico Superior Andesítico (CVSa) y su origen obedece al vulcanismo de la Sierra Madre Occidental debido a un *hiatus* que migra en espacio y tiempo desde el Mioceno (Garduño, 1987b). Su delimitación septentrional no sólo obedece a una marcada ruptura de pendiente E-W, también precisa cambios litológicos en cuestión de edad y génesis, lo que la separa y diferencia del domo exhumado de Agostitlán. Esta unidad tiene un marcado control estructural debido a la presencia de dos morfoalineamientos que convergen en el afluente del río Tetengueo: uno con dirección NE-SW y que la separa del sistema morfoestructural “La Laja” y de edad más antigua (Oligo-Mioceno), y otro que la separa de la secuencia volcano-sedimentaria y productos andesíticos del sistema “La Colmena”. Su fracturamiento es moderado (0.4 km/km²) en comparación de las estructuras anteriores, sin embargo, tiene una marcada sensibilidad al modelado debido a una mediana a alta densidad de disección (2.37 km/km²), cuya profundidad de sus barrancos se calcula entre los 100 y 200 m (Palacio, 1985).

Laderas de la Colmena del Mioceno (4)

Al igual que la anterior unidad, las laderas de esta estructura (137. 63 km²; 7.30% de la cuenca) forman parte del CVSa. La delimitación de esta unidad obedece principalmente a tres morfoalineamientos por los cuales se desarrollan valles fuertemente diseccionados: el arroyo “Tetengueo” al S, el río “Tuxpan” al E y el arroyo “El Carrizal” al N, este último paralelo al camino Tuxpan-Agostitlán. Se extiende entre los 1,020 y 1,620 msnm con un desnivel altitudinal que oscila

entre los 550 y 600 m El estado actual de conservación de los productos andesíticos del Mioceno (tobas y brechas) está claramente subordinado a sus laderas de pendientes medias (15 y 45°). Difiere poco de las anteriores dos unidades morfoestructurales en el acomodo de sus laderas y orientación del afallamiento (NE-SW), cuya densidad se sitúa en 0.5 km/km². La sensibilidad al modelado se considera de moderada a alta, debido a la densidad de disección (2.41 km/km²) y profundidad de sus barrancos (entre los 100,200 y hasta 3,000 m). Este sistema morfoestructural presenta cierta vulnerabilidad a los procesos exógenos, sobre todo por la erosión fluvial y eólica, esta última debido a la influencia de los vientos Alisios del pacífico sobre sus vertientes de barlovento.

Laderas del Ventero del Mioceno (5)

Separada por límites precisos de ruptura de pendiente, origen, edad y composición litológica del domo dacítico de Agostitlán, esta estructura (118.74 km²; 6.29% del área de estudio) se situada geográficamente al SO de Ciudad Hidalgo y es parte también del CVSa. Sus laderas (6-30°) con orientación NW-SE se extienden entre los 2,020 y 3,020 msnm sobre un territorio alargado (WE; 22 km), sin embargo, estrecho de N a S (5 km), cuyo desnivel altitudinal alcanza los 1,000 m Su límite E está marcado por un morfoalineamiento con dirección NS que se prolonga desde la presa Mata de Pino hasta el poblado de San Bartolo Cuitareo, siguiendo el arroyo “El Chaparro”. Al NW, esta estructura es cortada por el valle que conduce la antigua carretera Ciudad Hidalgo-Morelia (dirección a Mil Cumbres), en tanto que al NE esta morfoestructura se ve interrumpida por la planicie aluvial del “Arroyo Tajimaroa”. No obstante su edad (Mioceno) y litología (productos ignimbríticos), Garduño (1987b) identifica en el cerro El Ventero derrames de basalto del periodo Cuaternario que subyacen de manera discordante a los materiales andesíticos del Mioceno. Su afallamiento es de tipo moderado (0.3 km/km²), así también su sensibilidad al modelado en términos de

la densidad de disección (2.03 km/km^2), esto en comparación con las anteriores unidades, se encuentra fuertemente acusada si se considera la profundidad de sus barrancos que alcanzan los 100 y 200 m, siendo en ocasiones de 300 m de profundidad.

Laderas de Huajúbaro del Mioceno (6)

Formada por laderas que se extienden a lo largo de la antigua carretera Morelia-México, esta estructura (55.38 km^2 ; 2.94% de la cuenca) se localiza en el extremo oriente del complejo volcánico de Mil Cumbres que, a su vez, se ubica en la parte occidental de la cuenca del río Tuxpan. Esta morfoestructura se extiende entre los 2,220 y 3,220 msnm lo que genera un marcado desnivel altitudinal (1,000 m) y pendientes medias entre los 15 y 30° . Garduño (1987b) la considera una morfoestructura de productos andesíticos del CVSa, por lo que su edad data del Mioceno. Estructuralmente, esta unidad se circunscribe debido a dos morfoalineamientos naturales: uno, que Garduño (1987b) lo describe como una falla que se prolonga hasta la Presa de Pucato y que forma parte de un rasgo circular (Colapso de La Venta-Ciudad Hidalgo) y otro, siguiendo la carretera Ciudad Hidalgo Morelia. No obstante su afallamiento moderado a bajo (0.3 km/km^2), la unidad presenta una alta sensibilidad a modelado resultado de la marcada densidad de disección (2.51 km/km^2) y la profundidad de sus barrancos, que oscila entre los 100 y 200 m (Palacio, 1985).

Laderas de Anganguero del Mioceno (7)

Ubicada en la parte oriental de la cuenca, esta unidad (144.51 km^2 ; 7.66% de la cuenca) forma parte también del CVSa. Su relieve se caracteriza por laderas de origen volcánico fuertemente diseccionadas que se extienden entre los 2,220 y 3,640 msnm, lo que origina, un desnivel altitudinal marcado (1,420 m), así como

de fuertes pendientes que alcanzan los 15° en el piedemonte y los 30° y 45° en ciertas laderas de las cumbres. Su litología está integrada, principalmente, por rocas andesíticas del Mioceno y en menor medida por rocas basálticas del Cuaternario, su estructura geológica obedece a tres grandes fases del vulcanismo (Oligoceno-Mioceno inferior, Mioceno medio y superior y Plio-Cuaternaria). Se trata un complejo montañoso dislocado por un morfoalineamiento que lo separa en dos grandes subsistemas: la sierra de Chincua y El Campanario. Esta zona se ha desarrollado sobre una zona de debilidad cortical expresada por la Fractura Taxco-San Miguel de Allende, de orientación general NNW-SSE (Demant, 1982; Lugo *et al.*, 1985). En términos generales, esta estructura tiene una altitud promedio de 2,600 msnm, cota que marca el inicio de la vertiente occidental. Sus elevaciones muestran una mezcla homogénea de laderas convexas y concavidades asociadas al modelado fluvial y cuyos alineamientos NE-SW y NW-SE obedecen a un arreglo de alineamientos regional (Ramírez, 2004). No obstante que su afallamiento resulta alto (1.7 km/km²), la sensibilidad al modelado es de bajo a moderado, resultado de la densidad de disección (1.97 km/km²), sin embargo alta con relación a la profundidad de sus barrancos (200 y 300 m).

Conos y domos de la Laguna Verde del Mioceno (8)

Circundando la sierra de Anganguero y la planicie aluvial de Ocampo, esta unidad conformada principalmente de conos y domos (101.60 km²; 5.39 % de la cuenca) se extiende entre los 1,620 y 3,020 msnm, generando un desnivel altitudinal que, en la mayoría de los casos, no sobrepasa los 800 m. Es un complejo de conos andesíticos (cerros Camacho, La Cocina, Las Dormidas, La Laguna, Mendoza y Las Iglesias), coladas (El Garrapato) y remanentes de domos ignimbríticos (cerro Ojo de Agua); edificios que no rebasan los 300 m con respecto a su nivel de base, aunque los hay que llegan a alcanzar los 400 m (cerro Camacho) y los 600 m (cerro Las Iglesias). Las pendientes de esta unidad oscilan entre los 6° y 15°, lo

que se corrobora con los resultados obtenidos por Ramírez (2004), la cual, distingue tres niveles de pendientes: un nivel menor a 5° que corresponde con el nivel de base de los edificios volcánicos, otro entre 5° y 15° asociado a las coladas de lava y un tercero entre 25° y más de 30° perteneciente a los conos eruptivos. Esta morfoestructura presenta un sistema de fallas (0.4 km/km^2) con orientación NE-SW. Su sensibilidad al modelado se considera baja al ser la segunda morfoestructura con menor densidad de drenaje en el área de estudio (1.48 km/km^2) y cuyos barrancos no sobrepasan los 100 m de profundidad.

Domos y planicies de Agostitlán del Mio-Plioceno (9)

Considerada como una de las morfoestructuras más grandes de su tipo en la región, esta estructura (116.77 km^2 ; 6.19% de la cuenca) alberga domos y planicies que rodean y forman las presas de Pucuat, Sabaneta y Mata de Pinos. Se extiende en un diámetro de 10 km entre los 2,220 msnm (Mata de Pino) y 3,020 msnm. No obstante su marcado desnivel altitudinal (1,200 m), esta morfoestructura presenta planicies escalonadas integradas por lomas con pendientes de 3° en los poblados de Agostitlán y José María Morelos, alcanzando 30 y 45° en algunas zonas montañosas. Esta morfoestructura emerge sobre materiales ignimbríticos del Plioceno y, que son, de acuerdo con Garduño (1987b), resultado del primer colapso La Venta- Ciudad Hidalgo; Palacio (1985) define a esta estructura como un domo de composición dacítica que asciende a 300 m de altura con respecto de su base. En comparación con las demás unidades, esta morfoestructura presenta bajo grado de afallamiento (0.2 km/km^2). Su sensibilidad al modelado se considera baja, tanto por su densidad de disección (1.86 km/km^2), como por la profundidad de sus barrancos. Sin embargo, el trabajo erosivo de corte vertical ha favorecido el desmantelamiento acelerado de la estructura, llegando a presentar cauces de 40 a 100 m de profundidad, alcanzando los 300 m en algunos sectores.

Laderas del Fraile del Plioceno (10)

Ubicadas al sur de Ciudad Hidalgo y en la denominada Sierra del Fraile, estas laderas conforman un complejo montañoso de aproximadamente 205.46 km² (10.89% del área de la cuenca) que se extienden entre los 1,820 y 2,620 msnm cuyo marcado desnivel altitudinal (1,400 m) genera fuertes pendientes (30° y 45°) en las cimas de los cerros de El Fraile y Las Palmitas y de moderadas a suaves (3° y 6°) en la planicie aluvial de los poblados de El Jazmín y Turundeo. Su composición es de tipo dacítica y sus materiales descansan sobre los productos andesíticos del CVSa. Silva (1979) las define, en su conjunto, como una estructura de levantamiento y fallamiento que generó grandes masas de brechas y tobas dacíticas, que afloran al SE de Ciudad Hidalgo. Demant (1975), por su parte, considera que los abanicos de este sistema fueron en su origen de material riolítico y que posteriormente fueron removidos en el periodo Cuaternario. Su demarcación obedece a dos morfoalineamientos principales: uno con dirección NS que se prolonga desde Mata de Pino hasta el poblado San Bartolo Cuitareo, otro NE-SW siguiendo el arroyo El Carrizal y paralelo al camino Tuxpan-Agostitlán, y finalmente, por la ruptura de la pendiente que se manifiesta en el contacto con los valles y planicies aluviales del río Tuxpan. Su afallamiento (0.6 km/km²) se prolonga principalmente en dirección NE-SW y se considera de moderado a alto su sensibilidad al modelado resultado de la densidad de disección (2.35 km/km²) y la profundidad de sus causes o barrancos que alcanzan los 200 y 300 m.

ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS DEL CUATERNARIO

Domos de La Laguna Larga y San Matías (11 y 12)

De acuerdo con Garduño (1987b), estas estructuras se localizan en el contacto de dos depresiones: una con dirección NW-SE (depresión de Ciudad Hidalgo) ligada a la tectónica de Cuencas y Sierras y otra E-W (depresión de Maravatio-Cuitzeo) de afinidad con el Cinturón Volcánico Mexicano. Sin embargo, los domos de la Laguna Larga y de San Matías se relacionan con el primer colapso o depresión de Ciudad Hidalgo. Ambas morfoestructuras se elevan entre los 2,020 y 3,640 msnm. A diferencia de la primera estructura cuya cima alcanza los 2,820 msnm, la cumbre de la segunda sobrepasa los 3,620 msnm generando en ambos casos discrepancias relacionadas con las pendientes (6° y 15° ; 30° y 45°), desnivel altitudinal (800 m; 1,620 m). Estas unidades morfoestructurales, por otra parte, difieren en superficie, composición y edad. La primera “Laguna Larga” (51.26 km²; 2.72% de la cuenca), se le relaciona con una actividad de domos riolíticos post-caldéricos –domos satélite- del periodo Pleistoceno Medio Superior (Cerros el Guangoche y El Rosario). La segunda “San Matías” (161.82 km²; 8.58% de la cuenca) se le relaciona, por el contrario, con los domos dacíticos -post-caldera- de San Andrés (cerros de San Antonio, Las Palmas y Prieto) que guardan una dirección NW-SE y cuya datación se calcula para el Pleistoceno Medio. Resultado de la discrepancia en cuanto a sus respectivas superficies, la morfoestructura “Laguna Larga” exhibe un mayor afollamiento (0.4 km/km²) que aquella correspondiente a San Matías (0.3 km/km²). De acuerdo con sus respectivas densidades de disección, la primera unidad presenta mayor sensibilidad al modelado (2.29 km/km²) que la segunda (2.11 km/km²); sin embargo, si se considera la profundidad de sus barrancos, esta última morfoestructura es más susceptible a los procesos de modelado al registrar depresiones que superan los 200 m, en comparación de la primera que no excede los 100 m

Laderas de Ciudad Hidalgo (13)

Esta unidad (140.29 km²; 7.44% de la cuenca) ocupa las zonas urbana-rurales de Ciudad Hidalgo. Sus laderas se extienden en promedio entre los 2,020 y los 2,420 msnm, alcanzando los 1,620 msnm en ciertas planicies aluviales y los 3,220 msnm en algunos sectores como el cerro de San Andrés. Sus pendientes (<3°) forman laderas suaves (conformadas de brechas volcánicas basálticas del Holoceno) en las inmediaciones de Ciudad Hidalgo, Epungio, Rincón de Arriba e Irimbo, alcanzando los 30° y 35° en laderas próximas a los cráteres o conos cineríticos y derrames basálticos que, a su vez, coronan las andesitas del Complejo Volcánico Superior. Esta morfoestructura no solo exhibe bajo afallamiento (0.1 km/km²), también es la unidad con menor densidad de disección (1.40 km/km²) que, aunado a la moderada profundidad de sus barrancos (40 m), le confiere una baja sensibilidad al modelado.

Laderas de Timbineo con remanentes del Mesozoico (14)

Esta unidad (45.58 km²; 2.42% de la cuenca) se localiza en las inmediaciones de la presa El Bosque, ubicada al SW de Zitácuaro. Sus laderas abruptas (15° y 30°) que, se extienden entre los 820 y 2,220 msnm, forman escarpados paisajes en los cerros Zacapendo, Las Cebollas y El Puerto, cuyo desnivel altitudinal alcanza los 1,400 m. Afectada por una tectónica sobrepuesta y aparente esquistosidad (Israde y Martínez, 1986), esta unidad es el resultado de una secuencia volcánica sedimentaria metamorfizada constituida de areniscas, lutitas, limonitas, tobas, calizas y andesitas. El corte litológico del Complejo Metamórfico de Zitácuaro (Israde y Martínez, op. cit.) muestra claramente materiales basálticos en el cerro de Zacapendo y una secuencia volcánica sedimentaria con metamorfismo en el cerros de Las Cebollas y el poblado de Timbineo, así como de calizas alrededor del poblado El Puerto, seguido de tobas y areniscas en la Cuesta del Paso. Esta

morfoestructura muestra escaso fracturamiento (0.1 km/km^2), sin embargo un enmarañado sistema de drenaje que, pese a su baja densidad (1.87 km/km^2), exhibe una acusada sensibilidad al modelado debido a la profundidad de sus barrancos que alcanzan en algunos sectores los 300 m

Cono complejo de Zirahuato (15)

Se trata de una morfoestructura de 97.97 km^2 de superficie (5.19% de la cuenca), la cual se ubica en las inmediación de la ciudad de Tuxpan. Su forma estratovolcánica abarca en su totalidad no sólo el cerro “Zirahuato”, del cual recibe su nombre, también de otras manifestaciones volcánicas diferenciadas como los cerros de Tapia, El Pinal, Las Hoyas y La Cruz. Este estratovolcán (con pendientes entre 6 y 15°) se eleva entre los 1,220 y 2,620 msnm, generando un desnivel altitudinal de 1,400 m. Esta morfoestructura se enmarca o delimita en su base por dos morfoalineamientos: uno con dirección NS que corresponde al cauce del río Tuxpan, el cual la separa de los afloramientos andesíticos del Mioceno y, otro de WE, que se prolonga desde el Crucero de la Cofradía hasta llegar a las inmediaciones de Ocampo, siguiendo el cauce del arroyo Anganguero. Su demarcación obedece también al contacto con las unidades de Timbineo, Las Mesas y la planicie aluvial de Tuxpan. Los productos Ignimbríticos del Mioceno (C. La Campana) subyace de forma discordante con los derrames basálticos del Cuaternario. Su afallamiento es escaso (0.2 km/km^2) y la sensibilidad al modelado es baja debido a su discreta densidad de disección (1.62 km/km^2) y profundidad de sus barrancos (20 m).

Cono complejo del Huacal (16)

Esta unidad (35.63 km^2 ; 1.89% de la cuenca) se localiza al E del área de estudio y comparte el espacio geográfico con la Sierra de Anganguero. Se eleva entre los

2,220 y 3,220 msnm, generando un desnivel altitudinal de 1000 m Compuesta de derrames basálticos cuaternarios y de coladas lávicas asociadas al cono que les dio origen, esta morfoestructura presenta una debilidad cortical que se expresa por una línea de falla que se encuentra en la parte SE de la estructura (Ramírez, 2004); está separada de los materiales andesíticos de la Sierra de Angangueo por un morfoalineamiento más o menos recto con en dirección NW-SE. Es la estructura con mayor afallamiento (1.8 km/km^2) del área de estudio, sin embargo, su sensibilidad al modelado es de baja a moderada debido a una red fluvial poco desarrollada (1.97 km/km^2).

Mesas de Jungapeo (17)

Conformada por tres principales mesas (M. Chiquita, M. del Campo y M. La Virgen) con orientación NE-SW, esta estructura (111.92 km^2 ; 5.93% de la cuenca) se extiende entre los 620 y 2,020 msnm con un desnivel altitudinal igual a 1,400 m. Subyace discordadamente sobre los depósitos continentales (areniscas y conglomerado) del Eoceno y la secuencia volcano sedimentaria del Mioceno. Este complejo morfoestructural es el resultado aparente de los derrames de lavas basálticas emitidas posiblemente por el cono compuesto “Zirahuato”, que más tarde fueron expuestas a los agentes externos que produjeron cortes verticales profundos por los procesos erosivos. Las mesas no exhiben intensas pendientes en sus cimas, sin embargo, de forma acusante en sus laderas cuya inclinación llega a superar los 45° . Esta morfoestructura presenta moderados valores de afallamiento (0.3 km/km^2) con una red fluvial poco desarrollada (1.94 km/km^2), sin embargo, su sensibilidad al modelado se ve fuertemente acusada debido a sus barrancos que alcanzan los 200 y 300 m de profundidad.

PLANICIES ALUVIALES DEL CUATERNARIO

Planicie de Acumulación Tajimaroa (18)

Esta morfoestructura (49.98 km² y 2.65% de la cuenca) se ubica en dirección E, respecto a Ciudad Hidalgo. Se trata de una planicie con pendientes suaves (entre 3° y 6°) que se extiende entre los 2,020 y 2,420 msnm con un desnivel altitudinal de 400 m. Emerge entre los materiales riolíticos y dacíticos del Colapso La Venta-Ciudad Hidalgo y los andesíticos del Complejo Volcánico Superior. Garduño (1987b) relacionó los materiales de esta unidad con conglomerados de tipo fluvial y fragmentos de andesita y cementados por material tobáceo. Este mismo autor describe una secuencia fluvio lacustre con fallas donde se observa los depósitos de aluvión en contacto con materiales lacustres de 50 m de espesor que se datan del Pleistoceno Medio (700 a 200 mil años). Su afillamiento es prácticamente nulo (0.1 km/km²), en tanto que su sensibilidad al moderado se considera moderado debido a la presencia de escurrimientos como el río Tajimaroa y San Pedro que generan una red fluvial medianamente desarrollada (2.11 km/km²) con profundidades de 20 a 40 m

Planicie de Acumulación Ocampo (19)

Ubicada al oriente de la cuenca y occidente de la Sierra de Angangueo, esta unidad (32.97 km² y 1.75% de la cuenca) emerge entre los 2,220 y 2,620 msnm y su rango altitudinal no supera los 400 m. Debido a la juventud de las morfoestructuras adyacentes, esta morfoestructura presenta aluviales escasos (Ramírez, 2004). Se trata de depósitos cuaternarios provenientes de las estructuras andesíticas aledañas. Las pendientes de estos depósitos son, en la mayoría de los casos, menores de 3° y máximas de 6°. Su afillamiento es prácticamente nulo, no así su sensibilidad al modelado resultado de un acusada red de drenaje (2.17 km/km²).

Planicie de Acumulación Tuxpan (20)

Esta unidad emerge entre dos morfoestructuras de edad y composición: las dacitas Pliocuaternarias de la Sierra del Fraile y los derrames basálticos del volcán “Zirahuato”. Esta unidad (22.14 km² y 1.17% de la cuenca) probablemente compuesta de depósitos dacíticos provenientes de las laderas de la porción SE de la Sierra del Fraile, se eleva entre los 1,620 y 2,020 msnm generando un desnivel altitudinal (400 m). Su afallamiento es nulo, sin embargo, es considerada como la segunda unidad con mayor densidad de disección (2.55 km/km²) debido a su prolongada red de drenaje (56.44 km), por lo que su sensibilidad al modelado se considera elevada, situación que se exagera debido a la profundidad de sus barrancos que alcanzan los 100 y 150 m (Figura 13).

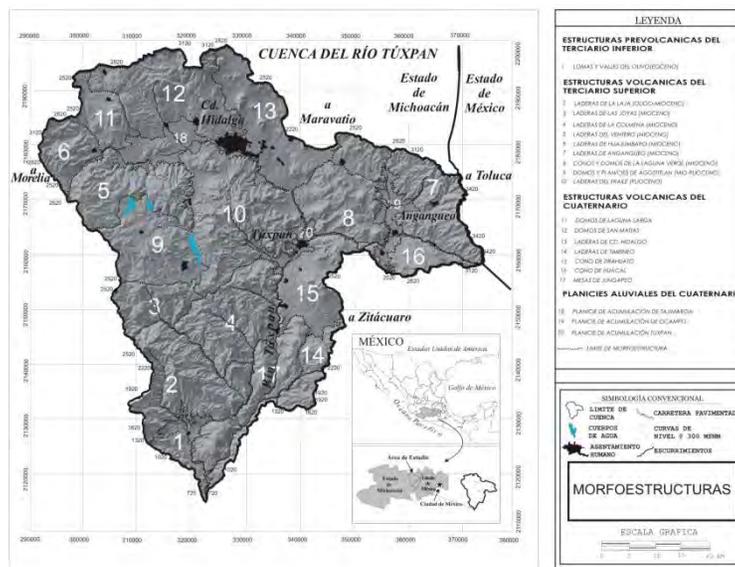


Figura.13. Mapa con las principales morfoestructuras en la cuenca del río Tuxpan.

2.2 Mesoclima

Objetivo

El presente apartado pretende enmarcar el área de estudio dentro de un contexto climático regional, así como identificar los caracteres climáticos más significativos de las inmediaciones e interior de la cuenca del río Tuxpan. La caracterización climática comprende los valores térmicos y pluviométricos, toda vez que estos elementos son considerados como factores más directamente relacionados con la distribución de los potenciales abióticos.

La multiplicidad de climas en México está determinada por la amplitud altitudinal de su territorio, su ubicación a ambos lados del trópico de Cáncer, la influencia oceánica debida a la estrechez de su masa continental y la alineación de sus complejos montañosos. Inmerso en el límite septentrional del trópico de Cáncer, México exhibe una marcada línea o franja de transición entre los climas árido y semiárido del norte y los climas húmedo y semihúmedo influenciados, ambos, por los vientos alisios y ciclones del sur (Rzedowski, 1988). Tal circunstancia contextualiza a México entre ambientes sumamente áridos (Altiplano Mexicano) y extremadamente húmedos (vertientes Pacífico y Atlántico). Por otro lado, la influencia conjugada de su situación intertropical y su ubicación entre los océanos Pacífico y Atlántico, condiciona que, entre junio y noviembre predominen las corrientes aéreas atlánticas, mientras que durante el resto del año son las corrientes occidentales y septentrionales las que, con sus lloviznas, olas de frío y vientos del norte, se adueñen de la mayor parte del territorio.

Las temperaturas medias anuales más elevadas (entre 28 y 30 °C) se registran en la Depresión del Balsas, y las más bajas (-6°C) en la cima del Pico de Orizaba,

siendo los valores más frecuentes entre 10 y 28 °C. Así, en el Altiplano Mexicano se registran temperaturas medias anuales de entre 10 y 20 °C, en tanto que en las Planicies Costeras se registran entre 20 y 28 °C, generándose gradientes térmicos que oscilan entre 0.2 y 0.6 °C por cada 100 m. Este comportamiento térmico está controlado por la altitud y, en algunas partes, el valor latitudinal tiene una influencia secundaria (Figura 14a). La marcha anual de la temperatura muestra que enero es el mes más frío, en tanto que mayo es el más caluroso (centro, sur y sureste del país), habiendo algunas excepciones donde se señalan abril y junio como los meses más calurosos.

Las precipitaciones en México son contrastantes: de menos de 50 mm, en promedio anual (y todos los meses secos), hasta más de 5, 500 mm y todos los meses húmedos, presentándose las más bajas en las zonas áridas de la Planicie Costera de Sonora y Baja California Peninsular, y las más altas en Veracruz, Tabasco, Oaxaca, Puebla e Hidalgo, específicamente en los declives de barlovento de la Sierra Madre Oriental, las Sierras del norte de Oaxaca y el Macizo Central de Chiapas y norte de Tapachula, este último con más de 5,500 mm anuales.

Los meses de junio, julio, agosto y septiembre están considerados como los de mayor abundancia pluviométrica, con excepción de algunos lugares, como el noroeste de Baja California, donde las precipitaciones suceden entre los meses de diciembre y abril. Por el tipo de lluvia, se puede considerar que en México se presentan precipitaciones en forma de aguaceros fuertes a torrenciales, con duración corta (0.5 a 2 horas), seguida de las gotas finas propias de la época más fría y el rocío frecuente en zonas donde la humedad se mantiene alta (Figura 14, parte b).

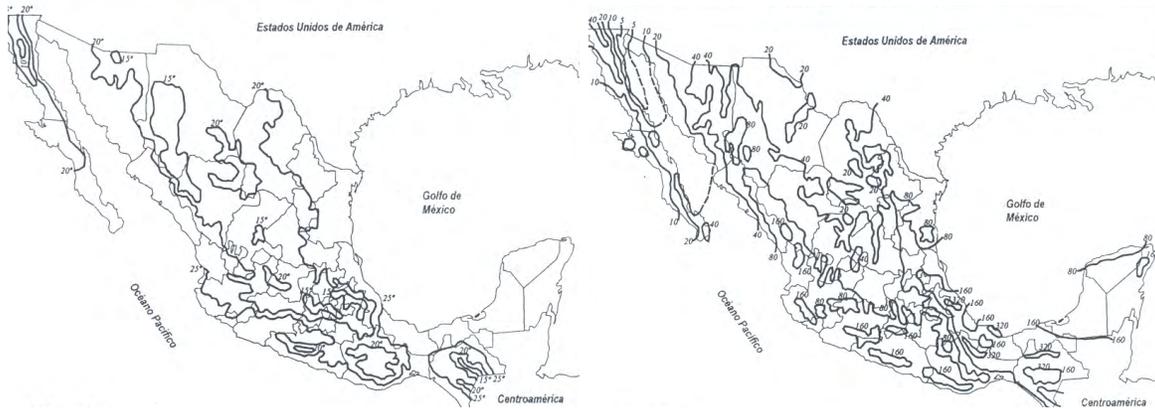


Figura 14. Distribución de temperatura media anual (a) y de la precipitación total anual (b) en México.

2.2.1 El clima regional

Por su ubicación en las laderas meridionales del Eje Neovolcánico Transversal, la cuenca del río Tuxpan forma parte de la región climática Cuenca del Río Balsas y Valles de Oaxaca (Vidal, 2005). Esta región se localiza en la zona tropical (16 y 20° N), estando delimitada al norte por el Eje Neovolcánico Transversal y, al Sur y Oriente por la Sierra Madre del Sur y las montañas de la Mixteca. Abarca los estados de Jalisco, Michoacán, Guerrero, México, Morelos, Puebla y Oaxaca. Su altitud varía entre 100 m en la cañada de Coahuayutla -próxima a la desembocadura al Océano Pacífico- y 5,452 m en el volcán Popocatepetl.

Los climas se distribuyen según un patrón altitudinal, según el cual los climas cálidos A, con temperatura media anual superior a 22 °C, se distribuyen en las partes bajas de la cuenca del río Balsas, entre 1,300 y 1,400 m de altitud, donde se registran los climas Aw y BS. Los climas semicálidos A(C) y (A) C, con temperatura media anual entre 18 y 22 °C, se distribuyen desde los 1,400 hasta los 2,000 msnm, alcanzando 1,800 m en las vertientes expuestas a los vientos.

Los climas templados C, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, se distribuyen entre 2,000 y 2,800 m, sobre las laderas meridionales del Eje Neovolcánico Transversal. Entre 2,800 y 4,000 m de altitud se presentan climas semifríos Cb' y Cc (estribaciones del Nevado de Toluca, Ajusco, Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Malinche). Los climas fríos ET se presentan en altitudes de 4,000 a 5,000 m (Nevado de Toluca, Iztaccíhuatl y Popocatepetl) (Figura 15).

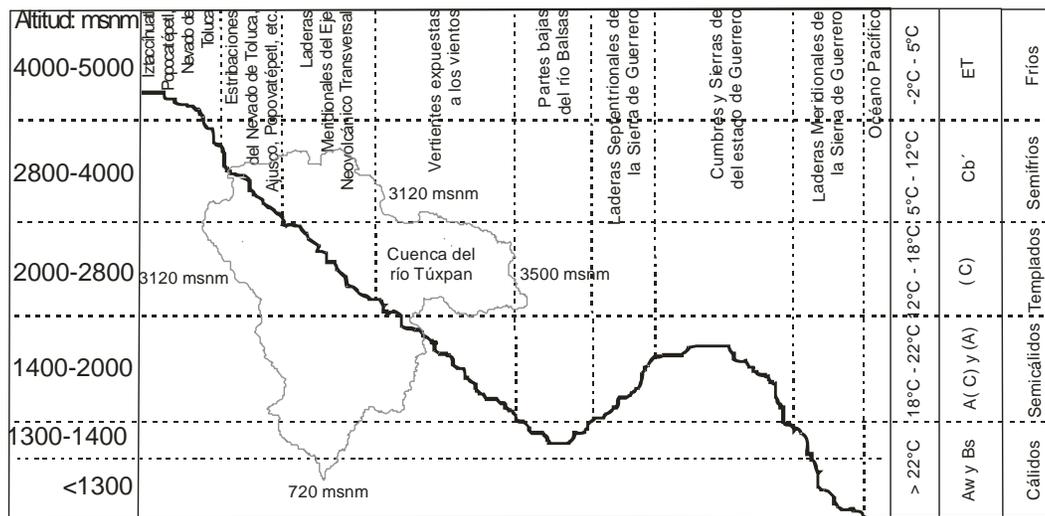


Figura 15. Distribución regional de los climas según el patrón altitudinal.

En cuanto a la variabilidad de las precipitaciones, la región climática de la cuenca del río Balsas y valles de Oaxaca se encuentra en el dominio de los vientos alisios del hemisferio norte, los cuales descargan humedad en las laderas exteriores de la Sierra Madre Oriental y en las elevaciones del Eje Neovolcánico Transversal, para posteriormente continuar como vientos secos descendentes. En el verano y parte de otoño las precipitaciones se incrementan por la influencia de los ciclones tropicales del Pacífico, cuya humedad penetra por el sur, asociada con el efecto monzónico, que se genera por la elevada temperatura de la altiplanicie y de la cuenca del río Balsas.

Esta situación genera una notable variabilidad de la humedad al interior de la cuenca del río Balsas. Así, se tienen los climas áridos BS en la cuenca baja del río Tepalcatepec, la cañada de Coahuayutla y la cuenca del río Cutzamala, en el estado de Michoacán. Los climas cálidos (los más secos de los subhúmedos) se presentan en la cuenca baja del río Balsas, entre 200 y 1,300 m de altitud. Al norte, sobre las laderas meridionales del Eje Neovolcánico Transversal, el clima es Aw_0 , de los climas más secos y más húmedos de los subhúmedos. Entre los 1,300 y 1,800 o 2,000 m del sector oriental y suroriental de la cuenca se forman los climas semicálidos de menor humedad $A(C)w_0$, en tanto que los climas de mayor humedad $A(C)w_2$ se distribuyen en una franja de mayor altitud que se extiende, entre otros lugares, de Uruapan a Tacámbaro, en Michoacán. Los climas templados C y subhúmedos Cw_2 (2,000 a 2,800 m de altitud) se distribuyen en la laderas altas del Eje Neovolcánico Transversal, en tanto que los climas fríos y subhúmedos Cw_2b' y Cw_2c ocurren en elevaciones mayores de 2,800 m (Figura 16).



Figura 16. Climas de la región de acuerdo con Vidal (2005).

2.2.2 El clima local de la cuenca del río Tuxpan

Método

Para la caracterización climática del área de estudio se utilizan catorce estaciones meteorológicas de las bases CLICOM del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), las cuales son seleccionadas por su cobertura temporal, desde 1940 y 1961 hasta 1980 y 1995. Asimismo, la interpretación se apoyó en literatura ya editada (García, 1988 y Rzedowski, 1988), así como en material inédito relacionado con el clima regional y local (Vidal, 2005 y Ramírez, 2004). Finalmente, se examinan las cartas (1:250,000) de efectos climáticos regionales de de INEGI (1988), de los meses de noviembre a abril, y de mayo a junio; carta Morelia, E14-1 (Tabla 3; Figura 17).

Tabla 3. Estaciones meteorológicas de acuerdo con la base de datos CLICLOM (Instituto de Geografía, UNAM).

clave	Nombre de la estación	Latitud	Longitud	Altitud	tiempo de observación	
					T	P
16002	Agostitlán (7)	19° 32´	100° 37´	2380	1950-1998	1950-1998
16020	Cd. Hidalgo (4)	19° 42´	100° 34´	2020	1961-2000	1961-2000
16033	Chincua, Senguio (3)	19° 48´	100° 20´	2456	1968-1986	1966-1986
16036	El Bosque, Zitácuaro (12)	19° 23´	100° 23´	1750	1952-1989	1953-1989
16058	Jungapeo (10)	19° 26´	100° 30´	1430	1940-1988	1940-1987
16071	Los Azufres (1)	19° 48´	100° 38´	2800	1967-1984	1964-1984
16097	Presa Pucuató (5)	19° 38´	100° 42´	2505	1950-1999	1950-1999
16098	Presa Sabaneta (6)	19° 37´	100° 41´	2513	1953-1999	1953-1999
16099	Presa Tuxpan (8)	19° 33´	100° 29´	1771	1952-1982	1952-1982
16134	Tuxpan (9)	19° 34´	100° 27´	1800	1941-1981	1941-1985
16135	Tuzantla (13)	19° 13´	100° 35´	666	1940-1983	1940-1983
16148	Zitácuaro (11)	19° 26´	100° 22´	1981	1922-1983	1921-1983
16213	Irimbo (2)	19° 45´	100° 30´	2200	1978-1999	1978-1999

P= Precipitación; T= Temperatura; Altitud= metros sobre el nivel del mar (msnm)

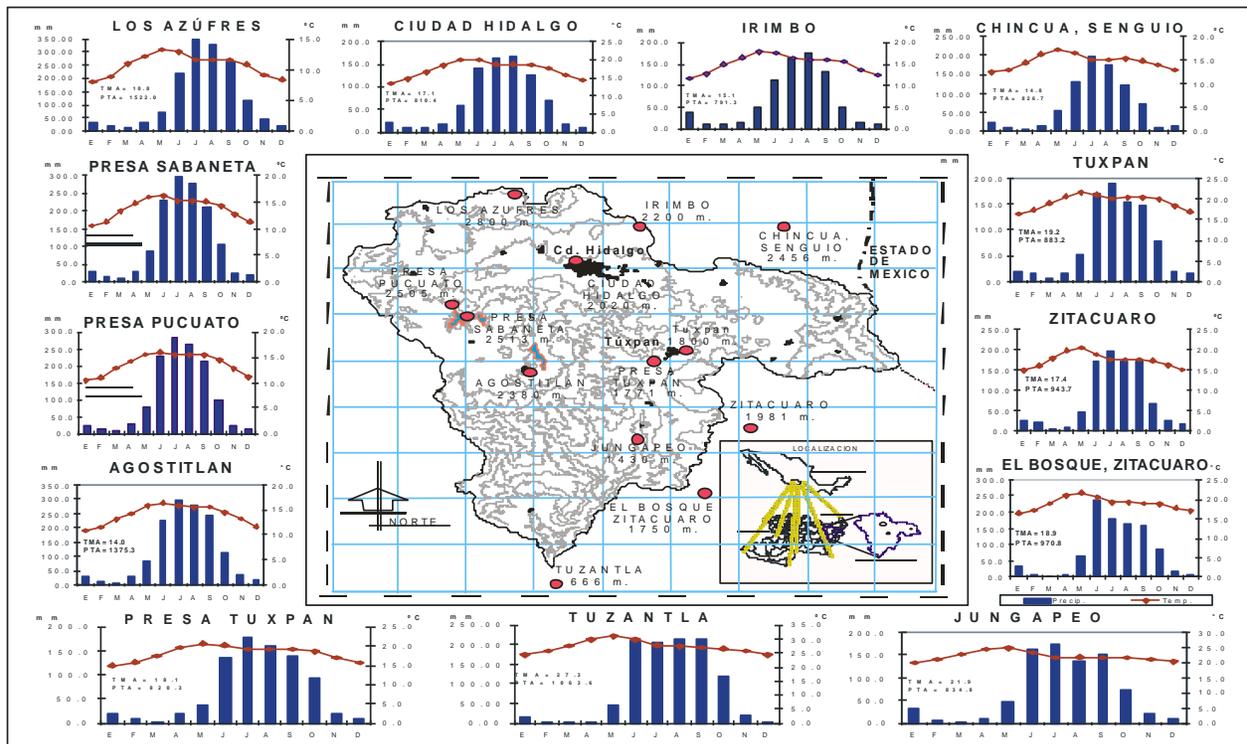


Figura 17. Mapa con estaciones meteorológicas.

Temperatura

El desnivel altitudinal de la cuenca del río Tuxpan (3,020 m) es un factor determinante en la distribución y comportamiento de las temperaturas medias anuales (TMA) y de las precipitaciones totales anuales (PTA). El gradiente térmico altitudinal (0.6 °C por cada 100 m) calculado para el área de estudio es similar al obtenido por García (1988) para algunos sectores del territorio mexicano, Vidal (2005) para la cuenca del Balsas y Ramírez (2001) para la zona de Anganguero. Este gradiente permite registrar temperaturas medias anuales de 27.3 °C en la base de la cuenca (620 msnm), ubicada en la desembocadura de los ríos Tuxpan y Grande, y de 9 °C en las cumbres de la sierra de Anganguero (sobre los 3,200 msnm) (Figura 18).

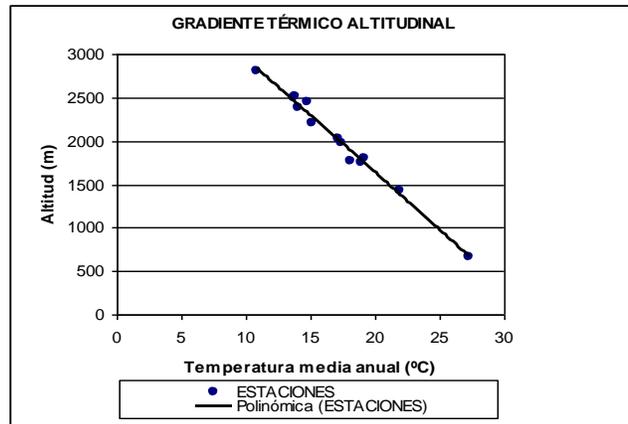


Figura 18. Gradiente térmico altitudinal. Elaboración propia con información del Sistema Meteorológico Nacional.

La diferencia de temperaturas entre la parte más alta y baja del área de estudio es de 18.3 °C, en tanto que en otros lugares al interior de la cuenca la diferencia se presenta de manera más discreta. Tal es el caso de las laderas altas y cumbres volcánicas (13.7 °C < TMA < 19.2 °C), lo que permite a los bosques de pino-encino tener afinidad con los climas templados a fríos que se localizan por lo general entre los 1,500 y 3,000 msnm y en temperaturas que oscilan entre los 10 °C y 20 °C (Rzedowski, 1988). Las cumbres del macizo de Agostitlán, por ejemplo, registran TMA equivalentes a los 13.7 y 14 °C, mientras que las laderas altas y medias alcanzan los 14 y 17 °C, aumentando la temperatura en las laderas bajas y fondo de cuenca (17.1 a 19.2 °C). Por debajo de los 1,420 msnm, se exhibe un clima cálido con temperaturas medias anuales del orden de los 21.9 y 27.3 °C. Contrariamente a esta tendencia, se pueden percibir en la parte septentrional de la cuenca temperaturas medias anuales entre 9 y 10 °C, principalmente en las laderas y cumbres volcánicas de la sierra de Angangueo, Mil Cumbres y Zona de los Azufres, que ocupan elevaciones por arriba de los 2,800 msnm.

Marcha anual de la temperatura

Las temperaturas medias mensuales más elevadas se registran durante los meses de mayo y junio, siendo Tuzantla (80 km al sur de Tuxpan) la estación que registra, en el mes de mayo, la temperatura media mensual más elevada (31.1 °C). La diferencia entre la temperatura máxima mensual de la parte meridional de la cuenca (Tuzantla) es de hasta 17.9 °C, con respecto a la zona de Los Azufres (13.2 °C), que se ubica en la parte septentrional de la cuenca a 2800 msnm. El resto de las estaciones presentan temperaturas máximas mensuales que oscilan entre los 15.6 (Presa Pucuateo) y 24.7 °C (Jungapeo) en los meses de mayo y junio. La diferencia térmica promedio que se registra en la cuenca; entre el mes más frío (enero) y el más caliente (mayo y junio); es de 5.6 °C, exhibiéndose la mayor diferencia en las proximidades de las estaciones meteorológicas de Tuzantla (6.5 °C), Ciudad Hidalgo (6.2 °C) e Irimbo (6.2 °C).

Precipitación

La cuenca del río Tuxpan registra valores pluviométricos medios y altos con relación al resto de la provincia climática. Esto obedece a los efectos monzónicos, que aunado a la influencia de los vientos alisios, generan grandes precipitaciones en las principales elevaciones y laderas meridionales del Eje Neovolcánico Transversal (Figura 19).

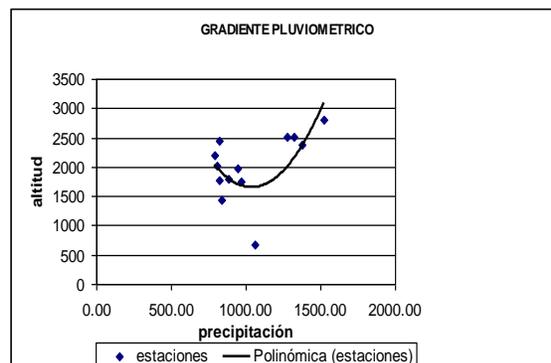


Figura 19. Gradiente pluviométrico. Elaboración propia con información del Sistema Meteorológico Nacional.

La distribución de las precipitaciones en el interior de la cuenca se encuentra condicionada por la altitud, sin embargo, los ciclones tropicales del Pacífico, que penetran por el sur de forma ascendente, depositan excedentes de agua en las áreas de menor altitud, como se observa en la estación meteorológica de Tuzantla (666 msnm), que registra una precipitación media anual de alrededor de 1,063.6 mm, en comparación, por ejemplo, con Zitácuaro, Presa de Tuxpan, Irimbo, Ciudad Hidalgo, Tuxpan y Jungapeo –entre 1,430 y 2,220 msnm– que exhiben precipitaciones medias anuales de alrededor 864 mm.

La menor precipitación media anual corresponde a la estación Irimbo (791.3 mm), en tanto que la máxima se ubica en las proximidades a las estaciones de Los Azufres (1,522 mm) y Agostitlán (1,375 mm), así como las cumbres de la sierra de Angangueo (1,321 mm). Entre los límites que forman ambos extremos, se localiza una franja pluviométrica formada por Ciudad Hidalgo, Tuxpan y Zitácuaro, donde se registran PTA entre los 800 y 900 mm.

Marcha anual de la precipitación

Las máximas precipitaciones se registran entre los meses de junio y septiembre, siendo julio el mes más húmedo con una pluviosidad mensual promedio de 221 mm, seguido de agosto (205.8 mm), junio (182.7 mm) y septiembre (176.9 mm), siendo marzo el mes más seco del año (7 mm). A partir de octubre se observa una caída paulatina de las precipitaciones hasta situarse del orden de los 13.1 mm en el mes de diciembre. El mes de enero registra un ligero incremento de la pluviosidad (26.7 mm), marcando los meses de febrero y marzo el inicio de la temporada de secas, con 11.4 mm (Figura 20).

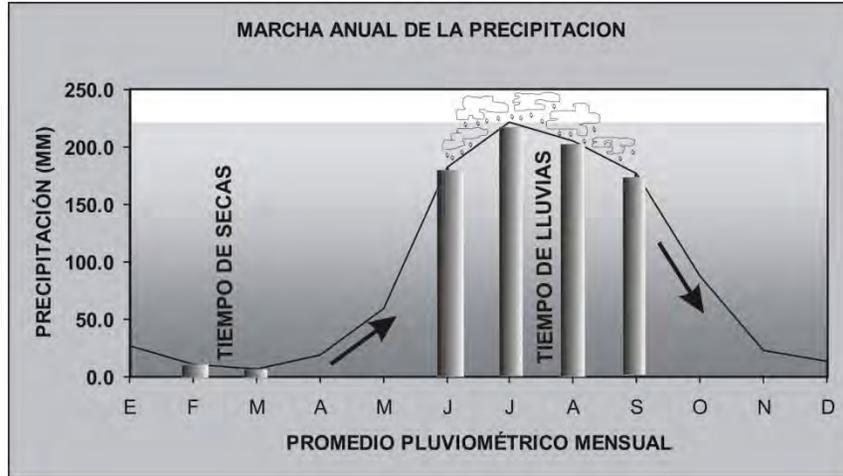


Figura 20. Promedio Pluviométrico Mensual de la Marcha Anual de la Precipitación por estación meteorológica a escala de la cuenca.

Los climas de la cuenca

A partir de la información obtenida en las trece estaciones meteorológicas, se identifican cinco grupos climáticos con régimen de lluvias en verano: *a)* cálido muy lluvioso, *b)* semicálido lluvioso, *c)* templado lluvioso, *d)* templado muy lluvioso y, *e)* semifrío muy lluvioso. Se considera como clima cálido en aquellas estaciones cuyas TMA son superiores a los 22 °C., y la temperatura del mes más frío por encima a 18 °C (*A*); como clima semicálido donde las TMA oscilan entre 18 y 22 °C (*A(C)*); o bien clima templado con TMA entre 12 y 18 °C (*C*) y, clima semifrío con TMA entre 5 a 12 °C (*Cb'*). Por otra parte, se considera como clima lluvioso al de las estaciones meteorológicas que registran precipitaciones total anuales menores de 1,000 mm, en tanto que por clima muy lluvioso entiéndase aquellos sitios o estaciones cuyos valores pluviométricos superan los 1,000 mm

Cálido muy lluvioso (*a*)

Este el clima caracteriza al sector meridional de la cuenca, específicamente el cinturón que envuelve las estructuras prevolcánicas (Lomas y Valles del Olivo)

del Terciario Inferior y lugar de confluencia de los dos principales ríos de la cuenca: Tuxpan y Grande, a 35 y 25 km al suroeste de los poblados de Tuxpan y Jungapeo, respectivamente. De acuerdo con García (1988), este tipo de clima se sitúa entre los climas muy cálidos, caracterizados todos ellos por una TMA por encima de 26 °C, y una temperatura media del mes más frío mayor a 18 °C. La oscilación anual de la temperatura –menor a 5 °C– es de tipo isotermal (i), siendo enero el mes más frío (24.5 °C), y mayo el más caliente (31.1 °C). No obstante que se trata de las estructuras localizadas a menor altitud, la influencia de los ciclones tropicales del Pacífico, que penetran por el sur durante el mes de septiembre en forma de grandes chubascos (216.88 mm), permite PTA por encima de 1,000 mm, incluso superiores a los observados en otras áreas de mayor altitud.

Semicálido Lluvioso (A (C) y (A) C)

Este clima corresponde a la zona de transición entre los relieves volcánicos del norte y las antiguas estructuras sedimentarias del sur de la cuenca, abarcando una amplia franja que tiene su base en las proximidades del poblado de Jungapeo (1,430 msnm), donde el clima es de tipo A(C), próximo al cálido (TMA = 21.9 °C), y con TMA entre 18 y 22 °C y la temperatura del mes más frío mayor a 18 °C. El límite superior de la franja se extiende hasta las proximidades de la ciudad de Tuxpan (1,800 msnm), caracterizada por un clima de tipo (A)C, semicálido (TMA=19.2 °C), y con TMA mayores a 18 °C, y la temperatura del mes más frío menor a 18 °C. Pese a que la oscilación térmica se mantiene entre 5 y 5.1 °C, en los alrededores de esta ciudad (Presa de Tuxpan), el mes más frío registra los 15 °C. Esta franja presenta valores pluviométricos entre 820 y 970 mm anuales, siendo la zona de Zitácuaro y Tuxpan las más lluviosas (883 y 970 mm, respectivamente) con excedentes de lluvia en los meses de agosto y septiembre.

Templado Lluvioso (C)

Se trata de un piso climático ubicado en el fondo de la mitad norte de la cuenca, abarcando la base de los piedemontes volcánicos, el complejo volcánico monogenético del Cuaternario, así como las angostas llanuras en torno al curso río Tuxpan. Su distribución altitudinal va de 1,980 msnm en los alrededores de Zitácuaro a los 2,450 msnm en Senguio. Se trata de un clima templado de tipo C, cuyas TMA oscilan entre 12 y 18 °C, aunque en Ciudad Hidalgo e Irimbo se exhiben TMA entre 17.1 y 15.1 °C y oscilaciones 6.2 °C en promedio, presentándose los meses más calurosos (mayo y junio) en la inmediaciones de Ciudad Hidalgo (19.7 °C) y los más fríos (diciembre y enero) en Irimbo (12.4 y 11.6 °C). Las PTA tienden a ser altas –sobre todo en los meses de junio a agosto–, y notablemente variante con la altitud, siendo mayor en Ciudad Hidalgo (810 mm) que en Irimbo (791 mm).

Templado Muy Lluvioso (C)

Este clima se presenta en las cumbres del macizo volcánico Agostitlán, el cual se extiende entre los 2,380 y 2,513 msnm, formando un cinturón climático semifrío. Al igual que el caso anterior, la TMA se ubica entre 12 y 18 °C y la oscilación es de 5.6 °C, sin embargo, la mayor TMA que se registra en esta estación no sobrepasa los 14 °C, en tanto que su menor TMA es próxima a los 12 °C. La mayor temperatura media mensual, de 16.3 °C, se registra en el mes junio en las proximidades del poblado de Agostitlán, en tanto que la menor temperatura, de 10.5 °C, se presenta en el mes de enero en la presa de Sabaneta. Se considera como un clima muy lluvioso, ya que tiene PTA mayores a 1,000 mm, obteniendo 1,277.83 mm a 2,505 msnm y hasta los 1,375.31 mm en altitudes como los 2,380 msnm

Semifrío Muy Lluvioso (CB´)

Este tipo climático se distribuye sobre los 2,800 msnm, en el área de Los Azufres y en las cumbres volcánicas de Angangueo. Se caracteriza por un verano fresco y largo, con una TMA de entre 5 y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C y del mes más cálido entre 6.5 y 22 °C; es de tipo isotermal (5.2 °C), siendo mayo el mes más cálido (13.2 °C) y enero el más frío (8 °C). Asimismo, destaca por la mayor pluviosidad de la cuenca (1,522 mm), siendo julio el mes más lluvioso, con 350 mm, y febrero el más seco, con 18.62 mm (Tabla 4 y Figura 21).

Tabla 4. Se presentan las estaciones meteorológicas con la condición climática para la zona de estudio.

ESTACION	TMA	CONDICION	CLAVE	PTA	CONDICION	ALTURA
TUZANTLA	27.3	CÁLIDO	A	1063.55	MUY LLUVIOSO	666
JUNGAPEO	21.9	SEMICÁLIDO	A(C)	834.78	LLUVIOSO	1430
EL BOSQUE, ZITACUARO	18.9	SEMICÁLIDO	(A)C	970.84	LLUVIOSO	1750
PRESA TUXPAN	18.1	SEMICÁLIDO	(A)C	820.34	LLUVIOSO	1771
TUXPAN	19.2	SEMICÁLIDO	(A)C	883.18	LLUVIOSO	1800
ZITACUARO	17.4	TEMPLADO	C	943.68	LLUVIOSO	1981
CD. HIDALGO	17.1	TEMPLADO	C	810.38	LLUVIOSO	2020
IRIMBO	15.1	TEMPLADO	C	791.32	LLUVIOSO	2200
AGOSTITLAN	14	TEMPLADO	C	1375.31	MUY LLUVIOSO	2380
CHINCUA, SENGUIO	14.8	TEMPLADO	C	826.73	LLUVIOSO	2456
PRESA DE PUCUATO	13.7	TEMPLADO	C	1277.83	MUY LLUVIOSO	2505
PRESA SABANETA	13.8	TEMPLADO	C	1326.56	MUY LLUVIOSO	2513
LOS AZUFRES	10.8	SEMIFRÍO	Cb'	1522.03	MUY LLUVIOSO	2800

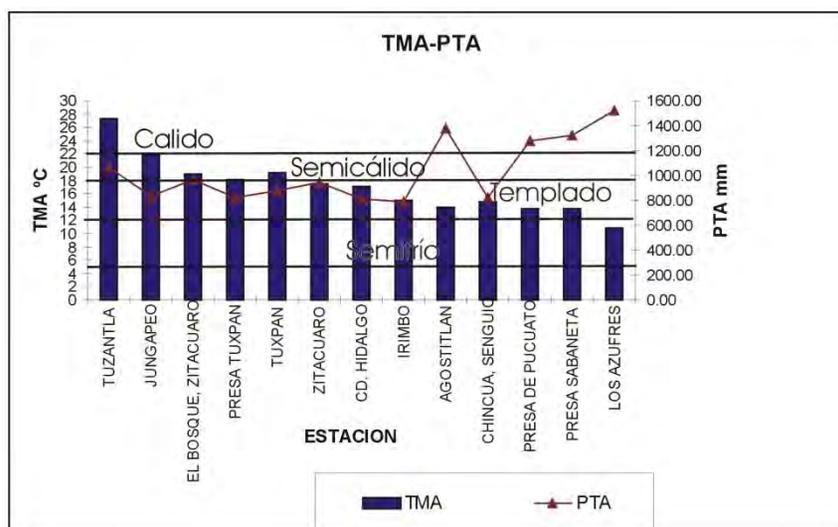


Figura 21. Se presentan las estaciones meteorológicas con la condición climática para la zona de estudio.

2.3 Vegetación Potencial

El amplio desnivel altitudinal que caracteriza a la cuenca del río Tuxpan (>3,000 msnm) permite la conformación de tres “pisos” bioclimáticos que se adaptan a la distribución de las estructuras geológicas y a los climas locales:

2.3.1. Selva Baja Caducifolia en los lomeríos sedimentarios de la base de la cuenca (<1,400 msnm)

La selva baja caducifolia (SBC), conocida también como bosque tropical caducifolio, bosque tropical deciduo, bosque tropical seco y, recientemente, como bosque tropical seco estacional, es una vegetación de elementos tropicales, dominada por árboles de copas extendidas con alturas promedio entre 7 y 8 m, siendo su estrato arbustivo muy denso. El marco ambiental en el que se desarrolla la SBC es muy heterogéneo, ya que depende de la orientación de la ladera, el grado de pendiente, las diferencias en la insolación, las condiciones microclimáticas, el tipo de roca, sus características físico-químicas y la disponibilidad de nutrientes. De esta manera, la estructura de las comunidades vegetales está condicionada a la heterogeneidad de los recursos en tiempo y espacio, de tal suerte que dicha variación influye directamente en los parámetros estructurales de la vegetación, como la densidad, la altura, la cobertura y riqueza del bosque tropical seco (Trejo, 1999).

Este piso bioclimático se caracteriza por: a) comunidades de amplia diversidad florística y fenológica, con predominio de árboles bajos (8-12 m), principalmente *Bursera* spp., que se ramifican a poca distancia del suelo; b) amplio número de endemismos (60% de las especies de selva) (Trejo y Dirzo, 2000) y, c) elementos de bosque templado y de otras formas de vida como arbustos, principalmente de *Acacia* spp, y lianas (Rzedowski, 1988).

Según la CONABIO (2005), las principales especies arbóreas características de esta comunidad son las siguientes: copales o papelillos (*Bursera* spp), cuachalalate (*Amphypteringium adstringens*), chupandía, chucumpú o congupo (*Cyrtocarpa procera*), pochote (*Ceiba aesculifolia*), tepehuaje o tepemezquite

(*Lysiloma acapulcense*), cuitaz (*L. divaricatum*), cazahuate o palo bobo (*Ipomoea murucoides*), pitayos (*Stenocereus spp.*) y nopales (*Opuntia spp.*).

El estado actual de deterioro que guarda esta cobertura vegetal se debe, entre otros procesos, a la fragmentación (subdivisión del paisaje) de la comunidad vegetal con consecuencias negativas en el ambiente como resultado de la expansión y dinámica de uso de suelo (García *et al.*, 2005). Pese a su limitado acceso debido a su localización en ambientes con morfología abrupta (pendiente $\geq 45^\circ$ y energía del relieve >100 m) estos bosques se caracterizan por una notable perturbación de los sotobosques.

En estos ecosistemas, el sistema de usos de suelo se caracteriza por la agricultura de temporal combinada con la ganadería extensiva de ganado caprino, así como la extracción de leña para uso doméstico y comercial. La dinámica del sistema se intensifica en la cercanía de los asentamientos humanos debido a la expansión de los usos de suelo. De acuerdo con García *et al.*, (2005), el patrón de fragmentación de la SBC está dominado por pequeños rodales inmersos en extensos acahuales y parcelas agrícolas, tanto activas como inactivas. Dichas manchas o parches presentan constantes cambios en las coberturas, limitando la recuperación forestal por la intensificación del uso de suelo. Se mantienen las coberturas secundarias (matorrales). De esta manera, el sistema de acahuales: i) constituye un conjunto de paisajes elementales, lo que les proporciona un papel importante en la estructura y dinámica del paisaje; ii) representa en sí mismo una pérdida de la naturalidad del paisaje, bajos niveles de productividad y mayor sensibilidad del suelo y, iii) supone un deterioro ambiental asociado al pastoreo –el caprino afecta la composición, estructura y funcionamiento del sistema–, y a la extracción de leña.

2.3.2. Bosques puros y mixtos de pino-encino en las laderas y fondos de los relieves volcánicos (1,600 a 3,500 msnm)

De acuerdo con Rzedowski (1978), los bosques mixtos de pino-encino (fases de transición en el desarrollo de bosques puros de encino o de pino) son, en ocasiones, la vegetación clímax de extensas áreas de las zonas montañosas de México. Señalamos que los bosques típicos de pino y encino de la zona ecológica templada subhúmeda miden de 8 a 30 m de altura, y en ellos predominan una o más especies de los géneros *Quercus* y *Pinus*. Aunque ambos pueden ser codominantes en el dosel, es frecuente que dominen exclusivamente los pinos, ya que demandan más luz, en tanto que los encinos, que toleran mejor la sombra, forman un subdosel arbóreo.

Estas comunidades de bosques mixtos se extienden en la porción central de la cuenca. Debido al desnivel altitudinal que caracteriza a esta región de Michoacán. Es común encontrar en las zonas transicionales de la cuenca (1,400 a 1,600 msnm) *Pinus oocarpa* y *P. pringlei*, en tanto que al piso climático que compete (1,600 a 3,500 msnm), se pueden identificar *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*, además de *P. leiophylla*, *P. teocote*, *P. devoniana*, *P. douglasiana* y *P. lawsoniise*, encontrando en las partes más altas (>3,500 msnm) *P. hartwegii*. Asociados a esta comunidad, se hallan agrupaciones de encinos (*Quercus spp.*) de 5 a 30 m de altura. En las partes más altas y conviviendo con ciertas especies de pinos (*Pinus spp*) y oyamel (*Abies religiosa*), se encuentra cierta especie de encino, principalmente *Q. laurina*. En porciones de menor altitud, pero arriba de los 1,800 m, es común encontrar *Q. rugosa*, *Q. castanea*, *Q. crassifolia*, *Q. crassipes*, *Q. candicans* y *Q. obtusata*, mientras que menores elevaciones predominan *Q. magnoliifolia*, *Q. glaucoides*, *Q. urbanii* y *Q. resinosa* (CONABIO, 2005).

Entre los usos tradicionales que se practican en los suelos ocupados por bosques de pino y encino se encuentran la agricultura, la producción ganadera y las prácticas forestales. Estas actividades de origen antrópico testifican el estado actual de deterioro que experimentan estos ecosistemas de montaña. Por un lado, la agricultura tradicional (maíz, frijol y chilacayote, principalmente) requiere grandes extensiones de tierra, lo que se traduce en la apertura –por parte de los campesinos más pobres–, de milpas en laderas cuya pendiente es muy pronunciada que, combinada con la agricultura de roza, tumba y quema intensifica los procesos exógenos que afectan la composición edafológica. Con relación a la producción ganadera, los campesinos alteran la vegetación del bosque al incrementar las áreas para el pastoreo, quemando el sotobosque para el ganado bovino.

Challenger (1998) señala que en muchas ocasiones la presión del pastoreo es superior a la capacidad de carga del bosque, lo que trae como consecuencia una alteración negativa de la estructura y composición de especies del bosque. Adicionalmente, la práctica del pastoreo directo del sotobosque disminuye considerablemente la densidad de los mejores pastos y reduce o elimina la población de las plántulas de los árboles del dosel. La práctica forestal consiste principalmente en el aprovechamiento maderable del bosque para la construcción y como fuente extraordinaria de combustible en forma de leña o carbón, así como recurso de extracción de resina para la producción de aguarrás y la fabricación de muebles. Todo lo anterior ha traído como consecuencia la fragmentación y deterioro de estos ecosistemas forestales al disminuir su diversidad ecológica.

2.3.3 *Abetales puros en las cumbres de las principales elevaciones volcánicas (>3,500 msnm)*

Este cinturón bioclimático se encuentra en las cumbres de la sierra de Angangueo y Mil Cumbres, ubicadas respectivamente al E y W de la cuenca. Esta franja está dominada por comunidades de *Abies religiosa*, cuyos individuos alcanzan 40 m de altura, o más. Los oyameles forman comunidades de estructura y composición peculiar, considerándoseles como comunidades relictas. Por su preferencia a ambientes fríos u húmedos, se les puede localizar en barracas y en lugares protegidos, aunque no parecen tener una exposición concreta (Azcárate y Ramírez, 2004). Esta condición de humedad permite que los bosques mexicanos de oyamel se mantengan fotosintéticamente activos todo el año, y la vegetación del sotobosque está casi siempre verde (Challenger, 1998).

Como ya se dijo, los oyameles son una comunidad vegetal relativamente alta, en cuyo dosel predomina una sola especie; los oyameles se ramifican desde la base del tronco y forman copas cónicas, muy densas y alargadas, donde es posible la penetración de la luz, es decir en aquellas comunidades ligeramente abiertas, se desarrolla un estrato arbustivo moderadamente denso que, en muchos casos, se encuentra vinculado a las situaciones de disturbio (Azcárate y Ramírez, 2004). Esta comunidad se asocia principalmente con pinos (*P. spp.*), encinos (*Q. spp.*), aile (*Alnus acuminata*), madroños (*Arbutus spp.*) huejote (*Salix paradoxa*), cedro blanco (*Xupressus lusitanica*) y cucharillo (*Clethra mexicana*), entre otras especies de árboles. Ramírez (2004) identificó especies del estrato arbustivo que acompañan a los oyameles de la Sierra de Angangueo, entre las que destacan: *Senecio angulifolius* y *Ribes ciliatum*, que pueden alcanzar alturas superiores a los cuatro metros, así como *Cestrum thyrsoides*, *Salvia fulgens*, *Fuchsia microphylla*, *Juniperus monticola* y *Symphoricarpos microphyllus*.

El estado actual de estas comunidades vegetales se encuentra actualmente altamente perturbado por las actividades económicas primarias (agricultura de temporal), la ganadería, la fruticultura con las plantaciones de aguacate, higo, manzana, pera, ciruela y granada china, la producción maderera y la producción de resina, entre otras (Azcárate y Ramírez, 2004). En aquellos bosques donde se observa sitios perturbados se encuentra vegetación secundaria (especies como *Juniperus monticola*, *Baccharis conferta* y varias especies de *Senecio* y *Acaena elongata*) y pastizales (*Muhlenbergia*, *Bidens*, *Stipa*, *Potentilla*, *Trifolium*, *Gnaphallium* y *Viola*).

2.4 Estructura del paisaje: los geosistemas

Objetivo

Dada la peculiar combinación de “potencial abiótico”, “explotación biótica” y “acción antrópica” que caracteriza a los sistemas territoriales, esta sección se plantea como objetivo caracterizar la cuenca del río Tuxpan en unidades sistémicas básicas que permitan, en una fase posterior y a diferentes niveles de integración, analizar el estado actual y dinámica del paisaje.

Método

Para abordar este apartado que se relaciona con la estructura del paisaje –entendido éste como un conjunto geográfico indisociable que evoluciona en bloque, tanto bajo el efecto de las interrelaciones entre los elementos que lo constituyen, como bajo el efecto de la dinámica propia de cada uno de los elementos considerados por separado (Bertrand, 1968)– se empleó un modelo que representa, con sumo detalle, los caracteres estructurales y funcionales del territorio de esta cuenca hidrológica. Para abordar lo anterior, este apartado retoma el concepto de geosistema como modelo que integra de forma eficiente

los aspectos espaciales, de localización y de distribución de los fenómenos naturales, siendo ampliamente utilizado en propuestas metodológicas con diversos matices. En nuestro caso, el concepto de geosistema refiere aquel de carácter taxo-corológico propuesto por Bertrand (1968) y que se utiliza ampliamente en la segunda fase del método que corresponde al establecimiento de la estructura taxonómico-corológica.

Para efectos de este trabajo, entendemos al geosistema (o unidad sistémica básica) como un sistema geográfico natural homogéneo ligado a un territorio que se diferencia por una peculiar combinación de “potencial abiótico”, “explotación biótica” y “acción antrópica”. En la cuenca del río Tuxpan, nuestra área de estudio constó de algunas decenas de kilómetros cuadrados, cuyos límites coincidieron con las unidades morfoclimáticas, –con carácter inicial o provisional–, delimitando los sectores de dimensión media, en los que parece darse una misma combinación del potencial abiótico, explotación biológica y acción antrópica. Esta fase es importante y desempeñó un papel central, ya que se integraron datos sectoriales, apreciándose con un alto grado de aproximación, la organización del espacio estudiado (Muñoz, 1998).

Definida el área de estudio se procedió al reconocimiento de las unidades de escala dimensional reducida y coincidente con los paisajes elementales (geofacies) que los forman. Se partió del supuesto de que a cada geosistema le corresponde un fenosistema (es decir un único paisaje), por lo que las geofacies o unidades de paisaje que se reconocen en su ámbito no son sino expresión de distintos estados de dicho geosistema. Consecuentemente, el geosistema es en realidad un conjunto de geofacies, no sólo contiguas o dotadas de cierta similitud formal, sino también funcional y dinámicamente articuladas, por lo que el análisis de estas unidades de paisaje, y de sus relaciones, lleva al conocimiento

en profundidad de la estructura, el funcionamiento, el estado y las tendencias del sistema territorial (Muñoz, 1998).

La integración de las bases de datos estadísticos y de la cartografía ambiental permite determinar seis sistemas de paisajes: a) tres geosistemas definidos por cambios morfoestructurales y mesoclimáticos, en donde se han desarrollado tipos de vegetación y usos de suelo específicos; y b) tres subgeosistemas o variantes de un geosistema; debido a cambios morfológicos que alteran la sensibilidad y respuesta del sistema, con consecuencias sobre la disponibilidad de recursos y los patrones de uso del suelo (Figura 22).

SUPERFICIE	ESTRUCTURA	FORMA	MESOClima	VEGETACIÓN POTENCIAL Y USO		GEOSISTEMA	ENERGIA DEL RELIEVE													
							HAS.	(%)	0-3				5-10				10-30		>30	
									km ²	%	km ²	%								
4774.00	2.53	PLUO → TOBAS Y BRECHAS → LADERAS MUY CUATERNARIO → ANDESITA-RIOJITA → DISECCIONADAS	6-30 → >3500	SEMIFRIO SUBHUMEDO	0-18 → 800-900	BOSQUE DE ABETO	FORESTAL	ABETAL DE LAS ALTAS CUMBRES VOLCANICAS	0.12	0.25	1.69	3.54	26.28	56	17.75	37.21				
19.379.00	10.27	CUAGO → DOMOS → DOMOS MUY MIOCENO → IGNIMBRICOS → EROSIONADOS	3-30 → 2500-2800	TEMPLADO SUBHUMEDO	6-20 → >1000	BOSQUE DE PINO-ENCINO	PECUARIO	BOSQUE DE PINO-ENCINO DE LAS CUMBRES VOLCANICAS	23.12	11.43	67.97	33.6	99.35	49.11	11.94	5.55				
86.990.00	46.10	PIEDEMUNTE → PLUO → TOBAS Y BRECHAS VOLCANICO → CUATERNARIO → VOLC. SEDIMENTOS	LADERAS MUY DISECCIONADAS → 6-45 → 1600-2220	TEMPLADO SUBHUMEDO	0-27 → 800-1000	BOSQUE DE PINO-ENCINO	FORESTAL AGRICOLA	BOSQUE DE PINO-ENCINO DE LADERAS VOLCANICAS ALTAS Y MEDIAS	28.05	3.22	140.31	18.12	450.0	47.0	259.8	33.31				
48.652.00	25.73	CAMPO → CUATERNARIO → DERRAMES MONOGENETICO → BASALTICOS	LADERAS POCO EROSIONADAS → 0-15 → 1600-2600	TEMPLADO SUBHUMEDO	6-27 → 600-900	BOSQUE DE PINO-ENCINO	AGRICOLA PECUARIO	BOSQUE RESIDUAL DE PINO-ENCINO DE LADERAS BAJAS Y FONDO DE CUENCA	126.58	29.07	177.50	36.5	139.0	28.6	39.92	8.20				
29.010.00	14.93	ESTRUCTURA DE → EOCENO → CALIZAS Y PLEGAMIENTO → CONGLOMERADOS	LOMAS Y VALLES EN CONGLOMERADO Y ESQUISTOS → 6-45 → <1400	SEMICALIDO SUBHUMEDO	12-38 → 800-900	SELVA BAJA CADUCIFOLIA	AGRICOLA PECUARIO	SELVA BAJA CADUCIFOLIA DE LADERAS SEDIMENTARIAS BAJAS	12.37	4.39	29.91	10.6	116.8	41.4	120.7	42.8				

Figura 22. Síntesis ambiental.

2.4.1 Geosistemas

Geosistema I

ABETAL DE LAS ALTAS CUMBRES VOLCÁNICAS. Las cumbres y vertientes más altas de las sierras de Chincua y El Campanario, al oriente cuenca (2.53% de la superficie), están modeladas sobre tobas y brechas volcánicas de andesita del Pliocuaternario. La altitud supera los 3,500 msnm lo que permite el establecimiento de un cinturón bioclimático semifrío con verano fresco largo ($5\text{ }^{\circ}\text{C} < \text{TMA} < 12\text{ }^{\circ}\text{C}$), y subhúmedo ($>1,000\text{ mm}$) -C(E)(w₂)(w) (García, 1973)-, con lluvias en verano. En relación a este clima, la vegetación potencial es de bosque monoespecífico de abeto (*Abies religiosa*), con escasa presencia de individuos de los géneros *Pinus*, *Quercus* y *Cupressus*. La morfología abrupta de las vertientes (pendientes de hasta 30°) ha permitido el modelado de laderas densamente incididas por la red fluvial y, en la actualidad las intensas precipitaciones del verano incrementan la sensibilidad a procesos de escorrentía y erosión de suelo (Price, 1999).

Geosistema II

BOSQUE DE PINO-ENCINO DE LADERAS Y CUMBRES VOLCÁNICAS. Es la unidad más extensa (82.48% de la superficie) y diversa de la cuenca. Abarca las cumbres y laderas ubicadas en un piso bioclimático inferior al geosistema I (1,600 a 2,800 msnm), caracterizadas por un clima templado y subhúmedo (C(w₂)(w); García, 1973), con lluvias en verano. La vegetación potencial corresponde al bosque mixto de pino-encino, formado por comunidades monoespecíficas de pinos - principalmente pino lacio (*Pinus Pseudostrobus*)- y comunidades mixtas de pinos con individuos de los géneros *Juniperus* y *Quercus* (*Q. crassipes*, *Q. castanea*, *Q. laurina*, *Q. mexicana*, *Q. obtusata*, *Q. rugosa*, etc.). El pino chino (*Pinus leiophylla*

y *P. teocote*) se introdujo por medio del cultivo y en la actualidad su distribución es extensa, pudiéndose reproducir de manera silvestre. El bosque de neblina ocupa nichos húmedos, donde *Abies religiosa*, *Carpinus caroliniana*, *Clethra mexicana*, *Pinus michoacana*, *P. pringlei*, *Quercus crassifolia* y *Q. Scytophylla* son las especies más representativas. La diversidad morfológica del relieve del geosistema II permite notables cambios en la disponibilidad del agua, del suelo, y del uso del suelo (pecuario, forestal-agrícola y agrícola-pecuario), los cuales llevan a la conformación de subgeosistemas, es decir, sistemas de paisajes de rango inferior al geosistema, independientes aunque vinculados por su pertenencia a un mismo marco morfo-estructural y bioclimático.

Subgeosistema IIa

BOSQUE DE PINO-ENCINO DE LAS CUMBRES VOLCÁNICAS. Las cumbres del macizo volcánico Agostitlán (10.27% de la superficie) están formadas por un arco de elevaciones que corresponden a antiguos domos ignimbríticos del Oligo-mioceno. Sus vertientes exteriores, de fuerte pendiente (de 30°), son inestables y están afectadas por procesos de arroyada. Al interior del arco, los domos envuelven una extensa cuenca altimontana, con piedemontes y llanuras intermontanas (pendiente de 3°), de origen vulcano-sedimentario, parcialmente erosionados, aunque actualmente estables. La posición altitudinal del macizo (2,500 a 2,800 msnm) permite el mesoclima más fresco (<6 a 20 °C) y húmedo (>1,000 mm) del geosistema II, siendo su vegetación potencial de pinares y bosques mixtos de pino-encino.

Subgeosistema IIb

BOSQUE DE PINO-ENCINO DE LADERAS VOLCÁNICAS ALTAS Y MEDIAS. Este subgeosistema comprende las laderas medias y altas (1,600 a 2,200 msnm) que bordean a las

cumbres de Agostitlán, Mil Cumbres y Anganguero. Se trata de extensos cinturones bioclimáticos (46.10% de la superficie total), caracterizados por un mesoclima fresco (0° a 27 °C) y húmedo (800 a 1,000 mm), y vegetación potencial de pinares y bosques mixtos de pino-encino. La pendiente de las laderas es alta (6 a 45°) e incrementa la fragilidad natural del sistema a desarrollar intensos procesos de erosión por lavados, desarrollo de barrancos y procesos gravitacionales.

Subgeosistema IIc

BOSQUE RESIDUAL DE PINO-ENCINO DE LADERAS BAJAS Y FONDO DE CUENCA. Este subgeosistema (25.73% de la superficie) se caracteriza por una compleja organización morfoestructural que incluye: un sector bajo de los piedemontes volcánicos; extensos derrames basálticos y conos cineríticos que forman parte de un complejo volcánico monogenético del Cuaternario; y angostas llanuras y terrazas aluviales en torno al curso río Tuxpan. No obstante la diversidad morfogénica y litológica del sistema, el conjunto se caracteriza por una topografía de llanuras y lomeríos suaves (pendientes de 0 a 15°). Su posición relativamente baja (1,600 a 2,400 msnm) permite una variante mesoclimática de tipo templado (6-27 °C) y subhúmedo (600 a 900 mm), aunque con continuidad del bosque mixto de pino-encino como vegetación potencial.

Geosistema III

SELVA BAJA CADUCIFOLIA DE LADERAS SEDIMENTARIAS BAJAS. Este geosistema forma el sector más bajo (<1,400 msnm) de la cuenca (14.93% de la superficie), coincidiendo con la zona de transición entre los relieves volcánicos del norte y antiguas estructuras sedimentarias (calizas y conglomerados) plegados y fallados en el Terciario. El encajamiento del río Tuxpan a través de un sistema de

dislocaciones tectónicas ha permitido la formación de un profundo valle central y la inestabilidad de sus vertientes, las cuales han sido modeladas por una densa red de barrancos (hasta 500 m de desnivel y pendiente de hasta 45°). La “erosión remontante” ha permitido la disección de los derrames basálticos genéticamente asociados con el geosistema tipo II y la formación de las “mesas” del Complejo Volcánico Zitácuaro. El clima del geosistema es semicálido y subhúmedo ((A)C(w₁)(w); García, 1973), en él se presentan los promedios más altos de temperatura (12 a 33 °C) y una distribución irregular de las precipitaciones (800 a 900 mm en 3 a 4 meses del verano). La vegetación potencial corresponde a la selva baja caducifolia, caracterizada por comunidades de amplia diversidad florística y fenológica, con predominio de árboles bajos (de 8 a 12 m), - principalmente *Bursera spp.*, que se ramifican a poca distancia del suelo, amplio número de endemismos (60% de las especies de selva) (Trejo y Dirzo, 2000), y elementos de bosque templado y de otras formas de vida como arbustos - principalmente de *Acacia spp.* y lianas (Rzedowski, 1988) (Figura 23 y 24).

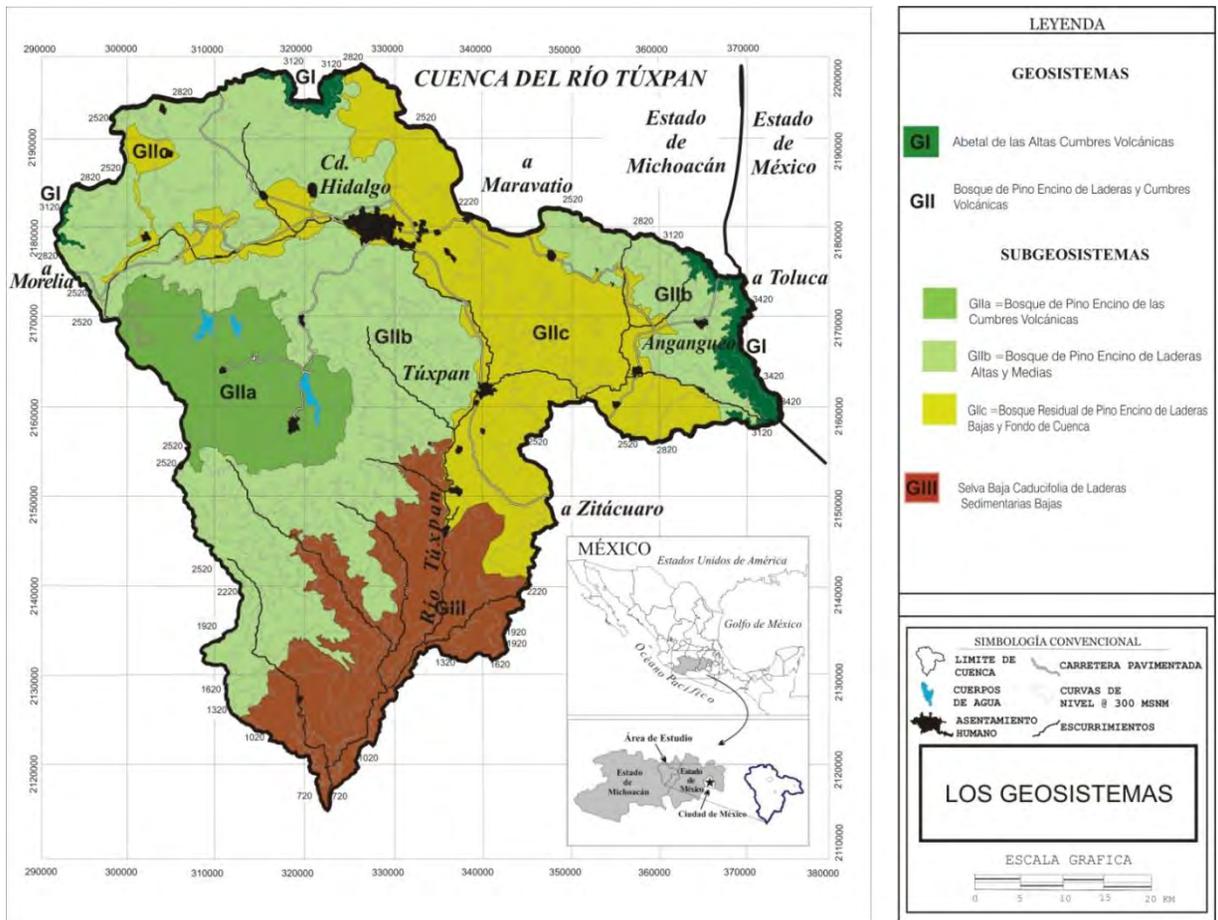


Figura 23. Los geosistemas (I, II y III).



Figura 24. Adaptación de los geosistemas a los pisos bioclimáticos.

BIBLIOGRAFÍA

- Azcárate, J. G., Ramírez, M. I. 2004. Análisis fitosociológico de los bosques de oyamel [*Abies religiosa* (H.B.K.) Cham y Schlecht.] de la Sierra de Angangueo, región Central de México. Fitosociología. Societa Italiana di Fitosociología. Vol. 41:91-100.
- Bertrand, G. 1968. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Oest, 39/3: 249-272.
- Challenger, A. 1998. Utilización de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. *Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad*. México.
- CNA, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Ciudad Hidalgo-Tuxpan, estado de Michoacán.
- CONABIO, 2005. La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 266 pp.
- Demant, A. 1982. Interpretación geodinámica de vulcanismo del eje neovolcánico transmexicano. Revista Instituto de Geología. Vol. 5; Núm. 2. UNAM, México.
- Demant, A., Mauvois, R., Silva, L. 1975. Reconocimiento geológico de la hojas Morelia, Maravatio (1:100 000) estado de Michoacán. Instituto de Geología. UNAM.
- García, A., Muñoz, J. 2002. El paisaje en el ámbito de la geografía. Temas selectos de geografía de México. UNAM.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- García, R. A., Mendoza, R. K. I., Galicia, S. L. 2005. Valoración del paisaje de la selva baja caducifolia en la cuenca baja del río Papagayo (Guerrero),

- México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Num. 56, 2005, pp. 77-100.
- Garduño, V. H. 1987a. Modelo geológico regional del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán.
- Garduño, V. H. 1987b. Estudio geológico regional para conocer las características de las rocas el basamento relativo del campo geotérmico de los Azufres. C.F.E. Reporte 20:87.
- INEGI, 1978. Carta geológica, hojas E14-A14 E14-A15, E14-A24, E14-A25, E14-A26, E14-A34, E14-A35, escala 1:50000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI, 1988. Carta de efectos climáticos regionales, hoja E14-1, escala 1:250000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Israde, A. I., Martínez, A. L. 1986. Contribución al estudio geológico de la transición Pacífico-Tethys, en el área de Zitácuaro, Mich. IPN. Tesis de Lic. ESIA.
- Lugo, J. 1990. El relieve de la república mexicana. Revista Instituto de Geología. Vol. 9; Núm. 1. UNAM, México.
- Lugo, J., Córdova, C. 1990. Morfogénesis (mapa de la República Mexicana): UNAM, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, hoja Geomorfología 1. Núm. IV.3.3, escala 1:4' 000, 000.
- Lugo-Huip, J., Ortiz-Pérez, M. A., Palacio-Prieto, J. L., Bocco-Verdinelli, G. 1985. Las zonas más activas en el Cinturón Volcánico Mexicano (entre Michoacán y Tlaxcala): Geofísica Internacional. México. 24:83-96.
- Muñoz, J. 1998. Paisaje y Geosistema. Una aproximación desde la Geografía Física. En: Martínez de Pisón E. (ed.), Paisaje y medio ambiente. Fundación Duques de Soria-Universidad de Valladolid, pp. 45-56.
- Palacio, J. L. 1985. Geomorfología Regional del oriente de Michoacán y occidente del Estado de México. Tesis doctoral. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

- Price, M. 1999. *Global Change in Mountains*. Parthenon Publishing. Oxford.
- Quiñones, H. 1987. El sistema fisiográfico de la Dirección General de Geografía. *Revista de Geografía*. 1:2:13-20.
- Ramírez, M. I. 2004. Los espacios forestales de la Sierra de Angangueo (estados de Michoacán y México. Una visión geográfica. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.
- Ramírez, R. I. 2001. Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000. *Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*. Num. 45: pp. 39-55.
- Rzedowski, J. 1988. *La vegetación en México*. Limusa. México.
- SARH, 1981. Dirección general del Servicio Meteorológico Nacional. México.
- Silva, L. 1979. Contribution a la connaissance de l' Axe Volcanique et petrologique des laves du Michoacán Oriental. Tesis de Doctor Ingeniero. Universidad d' Aix Marseille, France.
- Trejo, I. V. 1999. El clima de la selva baja caducifolia en México. *Investigaciones Geográficas* 39: 40-52.
- Trejo, I., Dirzo, R. 2000. Deforestation of seasonally tropical dry forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation*, 94, 133-142.
- Vidal, R. 2005. Las regiones climáticas de México. *Temas selectos de geografía de México*. UNAM.
- Wiens, J. A. 1995. Landscape mosaics and ecological theory, En: L. Hansson, L. Fahrig y G. Merriam (eds.), *Mosaic Landscapes and Ecological Processes*. Chapman and Hall, Londres. pp. 1-25.
- Zipperer, W. C. 1993. Deforestation patterns and their effects on forest patches. *Landscape Ecology*. 8:177-184.

CAPÍTULO III. ESTADO ACTUAL Y DINÁMICA DEL PAISAJE

Objetivo

Evaluar el estado actual y la dinámica de los paisajes de distinto rango (área de estudio, geosistemas y geofacies) que contribuya a comprender la magnitud de los cambios del uso del suelo³ y su impacto en la deforestación y fragmentación de los bosques en los últimos treinta años.

Método

Para conocer los cambios en el uso del suelo y en consecuencia en el sentido y ritmo de los cambios recientes en el paisaje, este estudio se apoyó en la elaboración de los mapas de cubiertas del suelo⁴. Para ello, los mapas se elaboraron en SIG (ILWIS ver. 3.0), a partir de la interpretación de fotografías aéreas (escala 1:75,000) de 1995 e imágenes de satélite Landsat MSS de los meses de marzo de 1976 y 1986, y Landsat ETM de enero de 2000. Las fotografías fueron convertidas a formato digital, a una resolución de 500 pixeles por pulgada o densidad de pixeles por pulgada (DPI), e importadas al SIG con una resolución de 2 m por píxel (Campbell, 1996). Las imágenes de satélite fueron georreferenciadas por medio del método “Tie-Points”, para lo cual se elaboró el DTM a partir de datos altitudinales en formato digital DXF de INEGI (1995), con un registro de 8 puntos de control como mínimo. Estos puntos son extraídos del mapa de cubiertas de suelo a escala 1:50,000 (INEGI, 1983). Para verificar la sobreposición correcta de las imágenes se utilizó el Índice de Precisión RMSE o $\text{SIGMA} = < 2$ (ITC, 2001).

³ Expresa el aprovechamiento o los fines económicos de las cubiertas de suelo.

⁴ Elementos físicos, visibles y objetivos que cubren la superficie del terreno, incluyendo tanto a las cubiertas vegetales naturales e inducidas, como a todos aquellos materiales derivados del disturbio que suponen la eliminación de aquellas.

La digitalización de las cubiertas de suelo se inició interpretando las fotografías aéreas de 1995 –las cuales ofrecen la mejor resolución (2 m por píxel)–, con un área mínima cartografiable de 4 ha (Campbell, 1996). A partir del mapa resultante se interpretaron las imágenes de satélite; primero las más recientes y de mejor resolución (2000 y 1986); y luego las imágenes de 1976. Esta última se realizó por medio la interpretación que se hace sobre el mapa de cubiertas del año 1986. Para evitar fallos, debidos a la diferente resolución de las imágenes, las cubiertas fueron digitalizadas mediante un método de interpretación de clase “visual” (Mas y Ramírez, 1996; Arnold, 1997; Slaymaker, 2003; Chuvieco, 2002), el cual consiste en una serie de técnicas de interpretación directas, asociativas y deductivas para diferenciar los “rasgos” de las cubiertas sobre las imágenes (Powers y Khon, 1959; Enciso, 1990; Mas y Ramírez, 1996). Para obtener una mejor diferenciación de las cubiertas se utilizaron compuestos de color (rojo, verde y azul): 2, 3, 4 en Landsat MSS, y 3, 2, 1 (color natural) y 4, 5, 7 (falso color) en Landsat TM.

Para establecer las clases de las cubiertas de suelo se consideró el origen –natural/cultural–, el desarrollo fisonómico de la vegetación, la clase y la intensidad del uso del suelo, así como la permanencia del disturbio asociado al uso. Para verificar, adecuar y en su caso corregir la información cartográfica y tipológica se consideraron los criterios del mapa de uso del suelo y de vegetación (1:50,000) de INEGI (1983), con inspecciones y entrevistas de campo.

Los mapas resultantes se sometieron a un análisis estadístico para evaluar la magnitud de la dinámica de las cubiertas de suelo. Para ello, los datos obtenidos en SIG fueron exportados a un paquete estadístico para calcular las superficies y los Índices de Deforestación (ID) y de Transformación Media Anual (ITMA), propuestos por Dirzo y García (1992) y Nascimento (1991), respectivamente. Se elaboraron Matrices de Transición para medir y clasificar los cambios según dos

tipos de procesos y cuatro variantes: a) positivos –conservación y regeneración–y b) negativos –intensificación y disturbio–.

PROCESOS POSITIVOS: a) *conservación* o permanencia de bosques maduros con uso forestal disperso. El proceso refleja baja intensidad de uso y alta estabilidad del ambiente “natural”, que favorece la regeneración del entorno; b) *regeneración* o sustitución de un tipo de cobertura por otra de mayor “naturalidad” y desarrollo (se toma como referencia a la vegetación madura). El proceso supone el abandono de la actividad productiva causante del disturbio y el establecimiento de una tendencia regenerativa de los paisajes naturales

PROCESOS NEGATIVOS: a) *disturbio*. Es un caso donde la sustitución lleva al establecimiento de paisajes “no naturales” y de menor desarrollo (se toma como referencia a la vegetación madura), b) *intensificación* o permanencia de cualquier cobertura de origen “no natural” y que sostiene un uso del suelo distinto al forestal. El proceso supone un efecto acumulativo del daño provocado por el manejo de recursos por parte del hombre, con consecuencias negativas sobre el estado y capacidad de regeneración forestal (Bastian and Roder, 1998).

PROCESOS INCIERTOS. Se refieren a la permanencia durante un periodo de tiempo de bosques fragmentados, bosques muy fragmentados y vegetación inducida, en los cuales no es clara la tendencia positiva o negativa del proceso. Los primeros pueden interpretarse como procesos positivos que requieren de más tiempo para mostrar cambios evidentes en la regeneración del paisaje. Sin embargo, la explicación puede residir en procesos negativos debidos a disturbios (sobrepisoteo, extracción de recursos, contaminación, etc.) que limitan la regeneración de los bosques. En el caso del matorral secundario y del pastizal inducido, su permanencia sugiere un proceso de intensificación debido a procesos de disturbio que impiden el paso a paisajes de mayor desarrollo. Debe considerarse,

en ambos casos, una posible regeneración –entre distintas facies de sucesión de pastizales y matorrales–, pero que no es evidente (Figura 25).

		COBERTURAS AL FINAL DEL PERIODO												
		BA	BPQ	BM	SBC	BF	BMF	MP	PAF	CT	AH	SRD	CA	
COBERTURAS AL INICIO DEL PERIODO	BA	CONSERVACIÓN			DISTURBIO			DISTURBIO		DISTURBIO				
	BPQ	CONSERVACIÓN			DISTURBIO			DISTURBIO		DISTURBIO				
	BM	CONSERVACIÓN			DISTURBIO			DISTURBIO		DISTURBIO				
	SBC	CONSERVACIÓN			DISTURBIO			DISTURBIO		DISTURBIO				
	BF	REGENERACIÓN			N	D	D	DISTURBIO		DISTURBIO				
	BMF	REGENERACIÓN			R	N	D	DISTURBIO		DISTURBIO				
	MP	REGENERACIÓN			R	R	N	DISTURBIO		DISTURBIO				
	PAF	REGENERACIÓN			REGENERACIÓN			INTENSIFICACION		INTENSIFICACION				
	CT	REGENERACIÓN			REGENERACIÓN			INTENSIFICACION		INTENSIFICACION				
	AH	REGENERACIÓN			REGENERACIÓN			INTENSIFICACION		INTENSIFICACION				
	SRD	REGENERACIÓN			REGENERACIÓN			INTENSIFICACION		INTENSIFICACION				
	CA	REGENERACIÓN			REGENERACIÓN			INTENSIFICACION		INTENSIFICACION				

Figura 25. Matriz conceptual de los procesos de transición. Procesos: D= Disturbio, R= Regeneración, N= No definido. Coberturas del suelo: BA= Bosque de abeto, BPQ= Bosque de pino-encino, BM= Bosque mesófilo, SBC= Selva baja caducifolia, BF= Bosque fragmentado, BMF= Bosque muy fragmentado, MP= Matorral secundario y pastizal inducido, PAF= Cultivos de riego, CT= Cultivos de temporal, AH= Asentamiento humano, SRD= Suelo o roca desnudo, CA= Cuerpo de agua.

3.1. Estado actual del paisaje

Como en otras áreas del centro de México, la distribución de las cubiertas del suelo deja ver que el patrón del paisaje en la cuenca del río Tuxpan es agropecuario y forestal, con 47% del área ocupada por bosques maduros; 30% por vegetación secundaria con uso extensivo, incluyendo bosques fragmentados, matorrales secundarios y pastizales inducidos; 20% por vegetación cultivada con uso agrícola extensivo/intensivo; y 3% por áreas de uso intensivo sin vegetación.

BOSQUES MADUROS CON USO AGROPECUARIO Y FORESTAL DISPERSO. Los bosques de abeto (BA), pino-encino (BPQ), mesófilo (BM) y la selva baja caducifolia (SBC) abarcan una superficie de 873.60 km², de los cuales 77% corresponde a bosque de pino-encino que se distribuye entre 1,820 y 2,820 msnm, en las cumbres del domo

exhumado de Agostitlán y laderas volcánicas de Tuxpan, Angangueo y Ciudad Hidalgo. De distribución más localizada son la selva baja caducifolia (138 km²), el bosque de abeto (50.70 km²) y el bosque mesófilo (9.60 km²). A excepción de este último, que se distribuye en un patrón azonal, los bosques representan en su conjunto la vegetación potencial de los tres pisos bioclimáticos de la cuenca. El uso del suelo consiste en actividades agrícolas y pecuarias que se llevan a cabo en pequeñas parcelas familiares, las cuales se distribuyen de manera dispersa en las laderas y abanicos aluviales de las montañas, principalmente en el interior del bosque de pino-encino y de la selva baja caducifolia. Este uso se combina con la tala clandestina y la extracción de resinas y ceras para el comercio, principalmente en los bosques de abeto y pino-encino.

VEGETACIÓN SECUNDARIA CON USO EXTENSIVO. Abarca una extensa superficie (564.70 km² y 30% del área de la cuenca) de bosques fragmentados (BF) y muy fragmentados (BMF), matorrales secundarios y pastizales inducidos (MP), de los cuales, los matorrales y pastizales comprenden 68%. Los pastizales de *Aristida orizabensis* y *Bouteloua filiformis*, entre otras especies, dominan el paisaje de los piedemontes bajos, mesas volcánicas y llanuras de las cumbres y el fondo de la cuenca. Su origen se relaciona con las primeras fases de regeneración post-disturbio o bien, con potreros abiertos y mantenidos exprofeso para la ganadería extensiva. Dada la existencia de pastos cultivados, se ha preferido el término “pastizal inducido” sobre el de “pastizal secundario”.

La diversidad bioclimática de la cuenca se refleja en numerosas comunidades de vegetación secundaria, entre las que destacan los matorrales densos (>40% de cubierta) de los géneros *Baccharis*, *Eupatorium*, *Salvia* y *Senecio* (Giménez de Azcárate y Ramírez, 2004), algunas comunidades de gramíneas altas y amacolladas de los géneros *Festuca*, *muhlenbergia* y *stipa*, propias de los pinares (Giménez de Azcárate *et al.*, 2003), así como algunas comunidades con individuos

arbóreos juveniles de hasta 4 m los matorrales de la selva baja caducifolia –o acahuales- incluyen individuos de *Acacia cymbispina*, *Bursera spp.*, *Eufhorbia schlachtendalii*, *Ipomoea sp.*, *Jatropha dioica* y *Wimmeria pallida*.

Los bosques fragmentados (82.90 km²) y muy fragmentados (100.20 km²) corresponden a paisajes de origen natural, aunque inducidos por las actividades del hombre. A diferencia de los matorrales que representan las primeras fases de regeneración post-disturbio, los bosques fragmentados representan estados avanzados de la regeneración. Sin embargo, su origen es complejo y también se vincula con procesos de disturbio debidos al aclareo o a un lento y prolongado deterioro ambiental que se refleja en la enfermedad y muerte de individuos.

VEGETACIÓN CULTIVADA CON USO AGRÍCOLA INTENSIVO/EXTENSIVO. La superficie agrícola de la cuenca –en parcelas activas y en descanso (<2 años)– es extensa (404.40 km²) y constituye el paisaje dominante en las cumbres del macizo volcánico de Agostitlán y en los piedemontes bajos y llanuras de Ciudad Hidalgo, Irimbo, Aporo y Ocampo. La llamada agricultura tradicional, reconocida en diversas montañas de América Latina como la base de la economía rural (Byers, 2000; Preston *et al.*, 2003; Quiroga 2004), consiste en este caso en un sistema de pequeñas parcelas para el Cultivo Temporal (CT) de maíz y frijol de consumo doméstico (298.70 km²). El sistema comprende un ciclo de cultivo, seguido de dos años de descanso, durante los cuales la tierra se aprovecha para el pastoreo o queda sin uso (Tiscareño *et al.*, 1999). La falta de financiamiento y de programas de desarrollo incrementa la vulnerabilidad a colapsos provocados por erosión de suelo, eventos hidroclimáticos o gravitacionales que comprometen la permanencia del uso. En contraste, los sistemas de riego o Cultivos de Riego (PAF) (105.70 km²) se definen por una mayor intensidad y permanencia de la producción (de avena forrajera, trigo, haba, jitomate, cebolla y floricultura) para

el comercio y consumo doméstico, característicos de las extensas llanuras de la mitad norte de la cuenca.

ÁREAS DE USO INTENSIVO SIN VEGETACIÓN. Los paisajes desprovistos de cobertura vegetal alcanzan una superficie de 46.20 km², de los cuales 30% corresponde a más de 470 localidades, principalmente pequeños pueblos y rancherías (asentamiento humanos; AH) que forman parte del paisaje agropecuario de las llanuras y lomeríos bajos de la cuenca. En muchos casos se distribuyen dispersos en las laderas de montaña, donde la accesibilidad entre localidades es alta debido a una red de caminos asfaltados y terracerías que las comunican con el sector de las llanuras. Los cuerpos de agua –CA– (6.50 km²) corresponden a las tres presas hidrológicas de la cuenca (Pucuató, Sabaneta y Mata de Pinos), en tanto que el suelo o roca desnudo (SRD) (26.10 km²), por lo general son canteras de extracción de líticos, planos de deslizamiento de tierra, abanicos y terrazas aluviales activos (Figura 26).

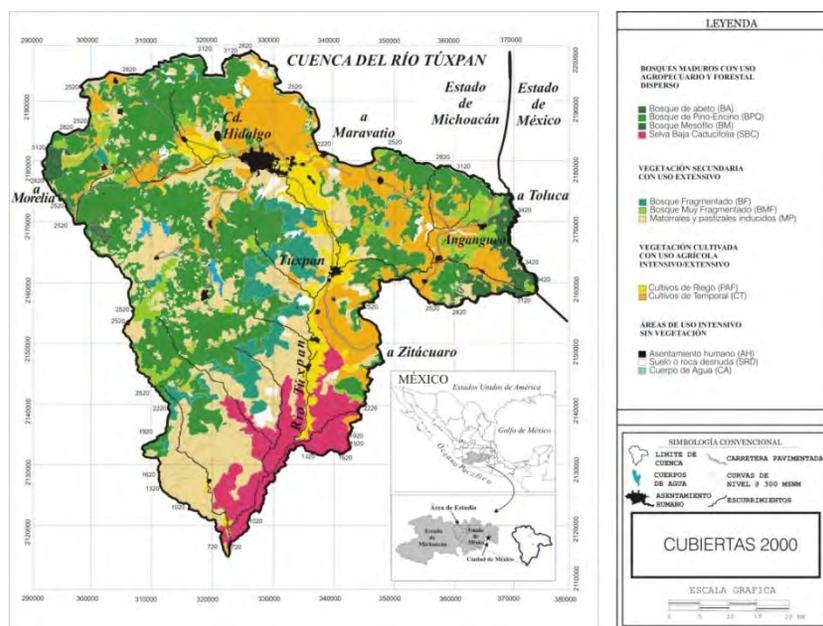


Figura 26. Estado actual del paisaje en la cuenca del río Tuxpan.

3.2 Dinámica del Paisaje

Diversos reportes señalan a México como uno de los países con mayores tasas de deforestación (Dirzo y García, 1992; Ortiz y Toledo, 1998); sin embargo, los resultados de esta investigación muestran que en los últimos 30 años los paisajes forestales y en particular los bosques maduros de la cuenca del río Tuxpan registraron una tendencia positiva que coincide con algunos estudios que señalan procesos de regeneración forestal en diversos puntos del Eje Neovolcánico (Mendoza et al., 2002; Galicia y García-Romero, 2007; Rodríguez y López, 2006).

3.2.1 Índice de Transformación Media Anual (ITMA)

Los procesos de regeneración de la vegetación fueron comprobados, durante esta investigación, al observar la tendencia de la superficie forestal obtenida. Así, mientras que en 1976 la superficie forestal contaba con 781.10 km² (41% del área total), esta pasó a 801.20 km² en 1986 (Figura 27), 803.80 km² en 1995 y 873.60 km² (46%) en el año 2000 (Figura 26). Como es de esperar, la dinámica de los paisajes forestales no mostró un comportamiento unidireccional, sino en distintos sentidos y tiempos que responden, tanto a la variabilidad del uso del suelo, como a cambios en la sensibilidad y respuesta de los ecosistemas frente al disturbio (Miles *et al.*, 2001; Guerrard, 1993). Los Índices de Transformación Media Anual (ITMA) muestran que el bosque de pino-encino obtiene las mayores ganancias de superficie (ITMA= 0.004, 0.000, 0.025 y 0.007 en las cuatro fechas de análisis), lo cual representa un incremento de 102.50 km² entre los años 1976 (572.80 km²) y 2000 (675.30 km²). Estas ganancias se relacionan con el abandono gradual de una extensa superficie agropecuaria en la base de las montañas volcánicas. Por su parte, el bosque de abeto y mesófilo, así como la

selva baja caducifolia muestran cambios poco significativos (ITMA = -0.001 a 0.025 en todo el periodo).

Los matorrales y pastizales, que representan la segunda cubierta de suelo con mayor superficie de la cuenca (381.50 km²), debieron tener una importante expansión entre las décadas de los años cincuenta y sesenta, del siglo pasado, coincidiendo con el periodo de mayor crecimiento agrícola del área. Sin embargo, la vegetación secundaria retrocedió 110 km² en los tres periodos de análisis (ITMA= -0.0040, -0.000, y -0.0268), debido principalmente a la reducción del bosque fragmentado; mientras que el área de matorrales y pastizales sólo creció en 4.80 km² y los extensos pastizales que sostienen una importante actividad ganadera se mantuvieron, pero sin expansión debido a la incorporación de la agricultura para la producción de forrajes. Estos resultados son contrarios a otros reportes anteriores que indican una tendencia a la expansión de los pastizales a partir de la década de los sesentas, tanto en ecosistemas templados como tropicales de México (Toledo *et al.*, 1989; Lazos-Chaveros, 1996; Challenger, 1998).

Los paisajes agrícolas muestran cambios poco significativos - en torno a un 21%-, en las cuatro fechas y respecto al total de la cuenca. Sin embargo, este dato proviene de un comportamiento contrario entre cultivos de temporal y de riego. En el primer caso, los resultados sugieren que la expansión de los cultivos de temporal debió ocurrir antes del periodo de estudio, en las décadas de los años 1950 y 1960. En tanto que las últimas tres décadas se caracterizan por una tendencia decreciente de la superficie agrícola de temporal, la cual se mantuvo en constante decremento en todo el periodo (ITMA= -0.001). Este dato resulta de interés frente a otros reportes que señalan a la Agricultura de Temporal -para la producción de maíz y frijol- como la actividad antrópica que más ha contribuido a la pérdida de bosques en México (Fuentes-Aguilar, 1975; Toledo *et al.*, 1989;

INEGI, 2000) y Latinoamérica (Byers, 2000; Preston *et al.*, 2003; Tanner, 2003; Quiroga, 2004).

Sin embargo, los resultados de esta investigación coinciden con algunos reportes para el centro del país. Giménez de Azcárate *et al.*, reportaron desde 2003 que existen retrocesos crecientes en la agricultura en los últimos treinta años. El sistema agrícola tradicional recae en la población más atrasada y marginada del país; carente de programas de desarrollo y financiamiento que limitan la productividad e incrementan la fragilidad del sistema frente a disturbios naturales y económicos (Tiscareño *et al.*, 1999). En contraste, los cultivos de riego de las llanuras aluviales de Ciudad Hidalgo incrementaron su superficie entre 1976 y 1986 (ITMA = 0.010) y hacia el final del periodo (ITMA = 0.033). En términos generales, los ITMA de los cultivos pasaron de 0.002 (de 1976 a 1986) a -0.001 (de 1986 a 1995) y 0.007 (de 1995 a 2000).

Los paisajes desprovistos de vegetación ocuparon 2 o 3 % de la superficie de la cuenca en las cuatro fechas de análisis. Sin embargo, estos datos resultan de un comportamiento contrario entre los asentamientos humanos, que mostraron una notable expansión (ITMA=0.023, 0.058, 0.073 y 0.046); las áreas de suelo desnudo, que registraron una paulatina pérdida de superficie, con índices de transformación negativos en todos los periodos (ITMA= -0.007, 0.000, -0.032 y -0.010); y los cuerpos de agua, que se mantuvieron sin cambios (Figura 27; Tabla 5).

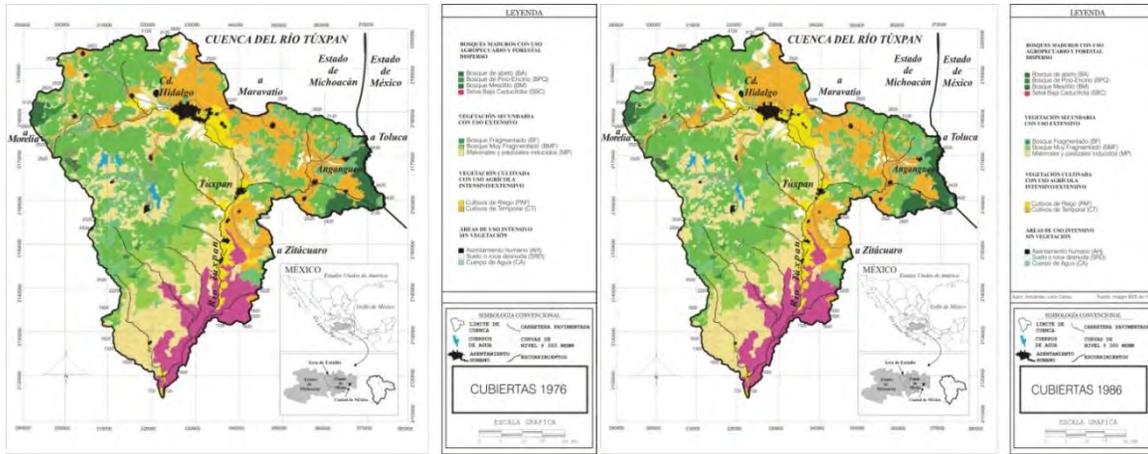


Figura 27. A la izquierda se muestran las cubiertas del suelo en 1976. La imagen de la derecha presenta las cubiertas de suelo correspondientes al año de 1986.

Tabla 5. Índice de Transformación Media Anual (ITMA) a nivel de cuenca. BA= Bosque de abeto, BPQ= Bosque de pino-encino, BM= Bosque mesófilo, SBC= Selva baja caducifolia, BF= Bosque fragmentado, BMF= Bosque muy fragmentado, MP= Matorral secundario y pastizal inducido, PAF= Cultivos de riego, CT= Cultivos de temporal, AH= Asentamiento humano, SRD= Suelo o roca desnudo, CA= Cuerpo de agua.

CUBIERTA	SUPERFICIE(km ²)				ÍNDICE DE TRANSFORMACIÓN MEDIA ANUAL (ITMA)			
	1976	1986	1995	2000	1976-1986	1986-1995	1995-2000	1976-2000
BA	56,69	56,10	56,10	50,66	-0,001	0,000	-0,020	-0,005
BPQ	572,76	593,23	595,72	675,30	0,004	0,000	0,025	0,007
BM	9,40	9,59	9,59	9,59	0,002	0,000	0,000	0,001
SBC	142,24	142,28	142,40	138,05	0,000	0,000	-0,006	-0,001
subtotal	781,09	801,19	803,81	873,59	0,003	0,000	0,017	0,005
%	41,38	42,45	42,59	46,28				
BF	148,75	127,65	126,66	82,92	-0,015	-0,001	-0,081	-0,024
BMF.	151,02	136,04	136,00	100,19	-0,010	0,000	-0,059	-0,017
MP	374,77	384,68	384,30	381,54	0,003	0,000	-0,001	0,001
subtotal	674,55	648,36	646,96	564,65	-0,004	0,000	-0,027	-0,007
%	35,74	34,35	34,28	29,92				
PAF	84,36	92,90	89,94	105,69	0,010	-0,004	0,033	0,009
CT	303,42	302,10	300,08	298,71	0,000	-0,001	-0,001	-0,001
subtotal	387,78	395,00	390,02	404,40	0,002	-0,001	0,007	0,002
%	20,55	20,93	20,66	21,43				
AH	4,63	5,82	9,64	13,70	0,023	0,058	0,073	0,046
SRD	32,94	30,60	30,60	26,07	-0,007	0,000	-0,032	-0,010
CA	6,47	6,47	6,47	6,45	0,000	0,000	-0,001	0,000
subtotal	44,03	42,89	46,71	46,22	-0,003	0,010	-0,002	0,002
%	2,33	2,27	2,47	2,45				
totales	1887,45	1887,45	1887,45	1887,45				

3.2.2 Índices de deforestación

La Tabla 6 muestra los Índices y Niveles de Deforestación a escala de la cuenca (r) para los periodos 1976-1986, 1986-1995, 1995-2000 y 1976-2000, los cuales se agrupan en tres niveles cualitativos: a) Alta Deforestación: $r = >0.01\%$, b) Baja Deforestación: $r = \text{entre } 0 \text{ y } 0.01\%$ y, c) Sin Deforestación: $r < 0.000\%$. A partir de los valores obtenidos, de las tasas de cambio, en los cuatro periodos de estudio, que oscilaron entre $ID = -0.0254\%$ y $ID = 0.0812\%$, los datos se agrupan de tal manera que su representatividad porcentual es, en lo más posible, ecuánime. Así, por ejemplo, de las 24 tasas de cambio, 33.33% corresponden al primer nivel, 37.50% al segundo y 29.17% al tercero.

Puede considerarse que el Índice de Deforestación obtenido para toda el área de estudio es bajo (0.0009%) cuando es comparado con los valores obtenidos, para el país por: Carabias (1990), quien obtuvo para los bosques del país un índice de 0.5%; Masera *et al.* (1997), que reportó un índice de 0.95% para los bosques de coníferas; la SEMARNAP (1997), reportó 0.6% para la región de la mariposa monarca; Ochoa y González (2000), reportaron un 3% para áreas no protegidas del sureste; siendo similar al obtenido por Galicia y García-Romero (2007), para el área protegida del volcán Iztaccíhuatl (0.35%).

De manera inesperada, las mayores pérdidas afectan al bosque de oyamel ($r = 0.0047$ en todo el periodo), como resultado de una alta deforestación ($r = 0.020$) en el tercer periodo de análisis. Al igual que ocurre en otras áreas de montaña, el ambiente del abetal se caracteriza por restricciones naturales de altitud (>3000 msnm), topografía agreste e inestabilidad morfodinámica de las vertientes (Smethurst, 2000; Jansky *et al.*, 2002), los cuales limitan la accesibilidad y el desarrollo residencial y agropecuario. Además, una parte del área de estudio está inmersa en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (Giménez de

Azcárate *et al.*, 2003), suponiendo restricciones legales y protección gubernamental. No obstante que estas condiciones han sido factor clave de la conservación del sistema, todo parece indicar que el área ha sido afectada por actividades clandestinas de alto impacto ambiental, principalmente debido a la tala clandestina (Rzedowski, 1988).

Hay que destacar que en México la extracción de leña es la base para la generación de energía en muchas comunidades rurales que viven en las montañas templadas y tropicales (Toledo *et al.*, 1989; Challenger, 1998). En el área de estudio este uso se combina con la extracción de resina y suelos (Rzedowski, 1988; Giménez de Azcárate y Ramírez, 2004). Así, la selva baja caducifolia muestra datos positivos de niveles bajos deforestación ($r = 0.001$ en todo el periodo), como lo demuestra el primer y tercer periodo de estudio ($r = 0.00$ y $r = 0.006$), y todo el periodo de 1976 a 2000 ($r = 0.0012$). De manera inesperada, el bosque de pino-encino de los piedemontes bajos de mayor desarrollo agropecuario y residencial (Rzedowski, 1988), obtuvo el Índice de Deforestación más bajo ($r = -0.0069$ en todo el periodo), con valores negativos en los tres periodos de análisis ($r = -0.003$, -0.0005 y -0.025 , respectivamente); seguido del bosque mesófilo, que se presenta sin deforestación en los tres periodos ($r = -0.001$, 0.000 y 0.020 , respectivamente).

Destaca el caso de los bosques fragmentados y muy fragmentados, que exhiben un comportamiento similar al de los bosques maduros, al obtener alta y baja deforestación en todos los periodos de análisis (Tabla 6).

Tabla 6. Índice y nivel de deforestación. BA= Bosque de abeto, BPQ= Bosque de pino-encino, BM= Bosque mesófilo, SBC= Selva baja caducifolia, BF= Bosque fragmentado, BMF= Bosque muy fragmentado. r= Índice de Deforestación, A1= área forestal al inicio del periodo, A2= área forestal al final del periodo, y t= periodo de tiempo en años (Dirzo y García, 1992).

ÍNDICE Y NIVEL DE DEFORESTACIÓN (r)								
$r=1-[1-(A1-A2/A1)]^{1/t}$								
CUBIERTA	1976-1986	NIVEL	1986-1995	NIVEL	1995-2000	NIVEL	1976-2000	NIVEL
BA	0.0010	bajo	0.0000	Bajo	0.0202	alto	0.0047	bajo
BPQ	-0.0035	s/def	-0.0005	s/def	-0.0254	s/def	-0.0069	s/def
BM	-0.0019	s/def	-0.0001	s/def	0.0001	bajo	-0.0008	s/def
SBC	0.0000	bajo	-0.0001	s/def	0.0062	bajo	0.0012	bajo
subtotal	-0.0025	s/def	-0.0004	s/def	-0.0168	s/def	-0.0047	s/def
BF	0.0152	alto	0.0009	Bajo	0.0812	alto	0.0241	alto
BMF	0.0104	alto	0.0000	Bajo	0.0593	alto	0.0170	alto
subtotal	0.0127	alto	0.0004	Bajo	0.0696	alto	0.0203	alto
TOTAL	0.0015	bajo	-0.0002	s/def	0.0018	bajo	0.0009	bajo

s/def=sin deforestación

3.2.3 Variabilidad del estado y dinámica del paisaje, a escala de sistemas de paisajes

La estructura interna de los seis sistemas de paisajes revela la existencia de distintos patrones espaciales. Como es de esperar, el patrón del paisaje en el geosistema II del bosque de pino-encino de laderas y cumbres volcánicas, que corresponde al geosistema más extenso (82.5% de la superficie total), es similar al patrón general obtenido para toda el área de la cuenca. En ambos casos se obtuvo la mayor diversidad (12 clases de geofacies), siendo el bosque de pino-encino la geofacies dominante (42% de su superficie), seguida del cultivo de temporal (19%) y del matorral secundario y pastizal inducido (17%). Asimismo, este patrón se repite en el subgeosistema de laderas volcánicas altas y medias (subgeosistema IIb), donde las geofacies dominantes son el bosque de pino-encino (50%), el matorral secundario y pastizal inducido (17%), el cultivo de temporal (11%) y el bosque muy fragmentado (11%). En contraste, el subgeosistema de las cumbres volcánicas (subgeosistema IIa) se caracteriza por

un patrón menos diverso (nueve clases de geofacies), con predominio del bosque de pino-encino (55%) y de matorral secundario y pastizal inducido (32%); en tanto que el subgeosistema de las laderas bajas y conos volcánicos (subgeosistema IIc) se caracteriza por una notable expansión del cultivo de temporal (42%) y del cultivo de riego (16%), que contrastan con la mayor reducción del bosque de pino-encino (23%), no obstante lo cual, la diversidad interna se mantiene alta (11 clases de geofacies).

A diferencia del geosistema anterior, en abetal de las cumbres volcánicas (geosistema I) y la selva baja caducifolia de laderas sedimentarias bajas (geosistema III) la estructura espacial contrasta con el patrón general de la cuenca. Como es de esperar, el geosistema I se caracteriza por una estructura sencilla, que consiste en cinco clases de geofacies distribuidas en extensos fragmentos, principalmente forestales (bosque de abeto y bosque de pino-encino concentran 85% de la superficie). En el caso del geosistema III, aunque la diversidad es intermedia (nueve clases de geofacies), el patrón espacial refleja altos niveles de perturbación debida al predominio de paisajes secundarios (matorral secundario y pastizal inducido = 41%), que contrastan con un escaso desarrollo de los agrícolas (cultivo de temporal = 1% y cultivo de riego = 6%), en tanto que los paisajes forestales más desarrollados (selva baja caducifolia = 49%) corresponden con selvas arbóreas perturbadas.

El comportamiento de la dinámica del paisaje entre los diversos sistemas de paisajes y fechas de análisis (1976-1986, 1986-1995 y 1995-2000 y 1976-2000) deja ver una notable variabilidad espacial y temporal al interior de la cuenca. La Tabla 7 muestra que el incremento de la superficie forestal se distribuye entre todos los sistemas de paisajes, de tal forma que las ganancias son bajas en la mayoría de los casos. Sólo la geofacies del bosque de pino-encino del geosistema II mostró una recuperación sensible (ITMA = 0.004, 0.010 y 0.026) en los tres

periodos de análisis. Sin embargo, esta situación resultó de un comportamiento complejo entre los tres subgeosistemas que lo integran. Por ejemplo, mientras que el subgeosistema de las cumbres volcánicas (subgeosistema IIa) obtuvo altas ganancias de vegetación (ITMA = 0.013, 0.002 y 0.046) que permitieron recuperar 34.50 km² de bosques en todo el periodo, el subgeosistema de las laderas volcánicas altas y medias (subgeosistema IIb) obtuvo tasas de crecimiento menores pero que afectaron a una mayor superficie forestal, obteniendo una recuperación de 57.20 km² de bosques. En contraste, el subgeosistema de las Laderas bajas y conos volcánicos (subgeosistema IIc) mostró una recuperación a partir del tercer periodo (ITMA = 0.024).

Otros resultados significativos pero de distribución localizada fueron el retroceso de la geofacies del bosque de abeto que se concentró en geosistema I (ITMA = -0.000, 0.000 y -0.007) y subgeosistema IIc (-0.001, -0.000 y -0.067), el decremento de la selva baja caducifolia en el tercer periodo (ITMA = -0.004) que afectó a geosistema III, así como la expansión del bosque mesófilo en el primer periodo (ITMA = 0.002) que afectó sólo algunos barrancos y laderas de umbría en geosistema II, en tanto que el bosque de pino-encino del geosistema III se incrementó de manera muy poco sensible (0.07 a 0.017 km²) en todo el periodo.

Mientras que el comportamiento de la vegetación secundaria fue muy estable en el geosistema de la selva baja caducifolia de laderas sedimentarias bajas (geosistema III), en los geosistemas de bosques templados (I y II) ocurrieron notables cambios. La mayor pérdida afectó al bosque fragmentado del geosistema II, del bosque de pino-encino de laderas y cumbres volcánicas (ITMA = -0.015, -0.032 y -0.025), que pasó de 144.10 km² a 79.10 km² en todo el periodo. Esto se explica por pérdidas en sus tres subgeosistemas, siendo el de las cumbres volcánicas (subgeosistema IIa) el que registró los mayores retrocesos (ITMA = -0.045, -0.058 y -0.053). En contraste, la geofacies del matorral secundario y

pastizal inducido mostraron una tendencia alcista en casi todos los sistemas, y principalmente en geosistema I (ITMA = 0.0387 en el segundo periodo).

Tabla 7. Índice de Transformación Media Anual por sistemas.

Sist.de Paisajes	Coberturas (km ²)				Dinámica del paisaje				ITMA*			
	1976	1986	1995	2000	76-86	86-95	95-00	76-20	76-86	86-95	95-00	76-20
ÁREA DE ESTUDIO												
BA	56.69	56.10	56.10	50.66	-1.04	0.00	-9.70	-10.64	-0.001	0.000	-0.020	-0.005
BPO	572.76	593.23	595.72	675.30	3.57	0.42	13.36	17.90	0.004	0.000	0.025	0.007
BM	9.40	9.59	9.59	9.59	1.95	0.05	-0.05	1.95	0.002	0.000	0.000	0.001
SBC	142.24	142.28	142.40	138.05	0.03	0.09	-3.06	-2.95	0.000	0.000	-0.006	-0.001
BF	148.75	127.65	126.66	82.92	-14.18	-0.78	-34.53	-44.25	-0.015	-0.001	-0.081	-0.024
BMF	151.02	136.04	136.00	100.19	-9.92	-0.03	-26.33	-33.66	-0.010	0.000	-0.059	-0.017
MP	374.77	384.68	384.30	381.54	2.64	-0.10	-0.72	1.80	0.003	0.000	-0.001	0.001
PAF	84.36	92.90	89.94	105.69	10.12	-3.19	17.51	25.28	0.010	-0.004	0.033	0.009
CT	303.42	302.10	300.08	298.71	-0.44	-0.67	-0.46	-1.55	0.000	-0.001	-0.001	-0.001
AH	4.63	5.82	9.64	13.70	25.88	65.53	42.13	196.16	0.023	0.058	0.073	0.046
SRD	32.94	30.60	30.60	26.07	-7.10	0.00	-14.81	-20.86	-0.007	0.000	-0.032	-0.010
CA	6.47	6.47	6.47	6.45	0.00	0.03	-0.33	-0.30	0.000	0.000	-0.001	0.000
TOTAL	1887.4	1887.4		1888.9								
GEOSISTEMA I. Abetal de cumbres volcánicas												
BA	25.99	26.07	26.07	25.15	0.29	0.01	-3.53	-3.24	0.000	0.000	-0.007	-0.001
BPO	15.10	15.36	14.79	15.25	1.73	-3.73	3.10	0.97	0.002	-0.004	0.006	0.000
BF	3.66	2.76	2.76	2.76	-24.50	-0.01	0.01	-24.50	-0.028	0.000	0.000	-0.012
MP	1.03	0.77	1.34	1.29	-25.39	74.75	-3.75	25.48	-0.029	0.064	-0.008	0.010
CT	1.96	2.78	2.78	3.29	41.79	-0.07	18.36	67.71	0.036	0.000	0.034	0.022
GEOSISTEMA II. Bosque de pino-encino de laderas volcánicas												
BA	30.76	30.11	30.11	25.52	-2.13	0.00	-15.23	-17.03	-0.002	0.000	-0.033	-0.008
BPO	557.79	577.81	580.90	659.74	3.59	0.53	13.57	18.28	0.004	0.001	0.026	0.007
BM	9.39	9.57	9.57	9.5688	1.90	0.00	-0.01	1.89	0.002	0.000	0.000	0.001
SBC	2.94	2.94	3.06	1.7064	0.00	3.91	-44.24	-42.05	0.000	0.004	-0.110	-0.022
BF	144.13	123.85	122.86	79.10	-14.07	-0.80	-35.62	-45.12	-0.015	-0.001	-0.084	-0.025
BMF	145.78	130.92	130.90	95.14	-10.19	-0.02	-27.32	-34.74	-0.011	0.000	-0.062	-0.018
MP	258.33	268.45	267.54	265.28	3.92	-0.34	-0.85	2.69	0.004	0.000	-0.002	0.001
PAF	69.61	78.14	75.07	87.9858	12.26	-3.93	17.21	26.41	0.012	-0.004	0.032	0.010
CT	298.14	296.01	294.02	291.25	-0.72	-0.67	-0.94	-2.31	-0.001	-0.001	-0.002	-0.001
AH	4.44	5.66	9.47	13.53	27.44	67.31	42.87	204.62	0.025	0.059	0.074	0.048
SRD	30.21	28.06	27.95	22.73	-7.12	-0.40	-18.66	-24.75	-0.007	0.000	-0.040	-0.012
CA	6.50	6.50	6.50	6.47	0.00	-0.04	-0.46	-0.50	0.000	0.000	-0.001	0.000
GEOSISTEMA III. Selva baja caducifolia de laderas bajas												
BPO	0.07	0.17	0.17	0.17	141.25	-2.13	2.71	142.50	0.092	-0.002	0.005	0.038
BF	139.27	139.30	139.30	136.31	0.02	0.00	-2.15	-2.12	0.000	0.000	-0.004	-0.001
BMF	1.03	1.03	1.03	1.03	0.00	-0.22	-0.13	-0.35	0.000	0.000	0.000	0.000
MP	5.23	5.12	5.12	5.13	-2.12	0.05	0.11	-1.96	-0.002	0.000	0.000	-0.001
PAF	115.27	115.47	115.40	115.00	0.17	-0.06	-0.35	-0.24	0.000	0.000	-0.001	0.000
CT	14.83	14.76	14.76	17.75	-0.49	-0.01	20.27	19.67	0.000	0.000	0.038	0.008
AH	3.12	3.15	3.12	2.85	0.92	-0.90	-8.56	-8.54	0.001	-0.001	-0.018	-0.004
SRD	0.17	0.14	0.14	0.14	-14.97	-2.17	2.21	-14.97	-0.016	-0.002	0.004	-0.007
CA	2.71	2.56	2.66	3.32	-5.71	4.07	24.82	22.48	-0.006	0.004	0.045	0.008
SUBGEOSISTEMA Ila. Bosque de pino-encino de las cumbres volcánicas												
BA	3.81	3.81	3.81	3.85	0.00	0.10	1.06	1.16	0.000	0.000	0.002	0.000
BPO	76.48	87.12	88.65	110.97	13.91	1.76	25.18	45.10	0.013	0.002	0.046	0.016
BF	45.72	28.79	27.95	12.44	-37.05	-2.90	-55.51	-72.80	-0.045	-0.003	-0.150	-0.053
BMF	0.48	0.16	0.94	1.91	-65.92	470.73	103.07	294.97	-0.102	0.214	0.152	0.059
MP	69.69	76.22	74.75	65.30	9.37	-1.92	-12.64	-6.30	0.009	-0.002	-0.027	-0.003
CT	0.00	0.00	0.00	1.41	0.00	0.00	0.00	100.00	0.000	0.000	0.000	1.000
AH	0.20	0.30	0.30	0.62	44.93	1.32	105.20	201.32	0.038	0.001	0.155	0.047
SRD	0.14	0.14	0.14	0.04	0.00	-0.92	-68.50	-68.79	0.000	-0.001	-0.206	-0.047
CA	5.75	5.75	5.75	5.74	0.00	0.00	-0.11	-0.11	0.000	0.000	0.000	0.000
SUBGEOSISTEMA IIb. Bosque de pino-encino de laderas volcánicas altas y medias												
BA	13.84	13.34	13.34	12.51	-3.59	-0.01	-6.19	-9.57	-0.004	0.000	-0.013	-0.004
BPO	380.27	393.24	393.40	437.44	3.41	0.04	11.19	15.03	0.003	0.000	0.021	0.006
BM	9.39	9.57	9.57	9.57	1.90	0.00	0.01	1.89	0.002	0.000	0.000	0.001
SBC	0.16	0.16	0.16	0.16	0.00	-0.12	-0.44	-0.56	0.000	0.000	-0.001	0.000
BF	75.51	72.12	72.08	55.01	-4.49	-0.05	-23.68	-27.14	-0.005	0.000	-0.053	-0.013
BMF	143.75	126.82	126.02	92.31	-11.78	-0.63	-26.75	-35.78	-0.012	-0.001	-0.060	-0.018
MP	135.31	140.02	141.03	145.54	3.48	0.72	3.20	7.57	0.003	0.001	0.006	0.003
PAF	8.92	9.95	9.88	8.95	11.63	-0.73	-9.45	0.34	0.011	-0.001	-0.020	0.000
CT	91.74	92.38	91.78	92.43	0.69	-0.65	0.71	0.75	0.001	-0.001	0.001	0.000
AH	0.67	1.06	1.39	2.78	57.58	31.55	99.68	313.96	0.047	0.031	0.148	0.061
SRD	10.30	11.19	11.19	13.16	8.72	-0.02	17.60	27.83	0.008	0.000	0.033	0.010
CA	0.33	0.33	0.33	0.30	0.00	0.18	-8.09	-7.92	0.000	0.000	-0.017	-0.003
SUBGEOSISTEMA IIc. Bosque residual de pino-encino de laderas bajas y conos volcánicos												
BA	13.12	12.96	12.96	9.16	-1.20	-0.02	-29.33	-30.19	-0.001	0.000	0.067	-0.015
BPO	101.04	97.45	98.85	111.33	-3.55	1.43	12.63	10.19	-0.004	0.002	0.024	0.004
SBC	2.78	2.78	2.90	1.55	0.00	4.14	-46.65	-44.44	0.000	0.005	-0.118	-0.024
BF	22.90	22.95	22.84	11.65	0.23	-0.48	-48.99	-49.12	0.000	-0.001	-0.126	-0.028
BMF	1.55	3.94	3.94	0.91	154.50	-0.05	-76.81	-41.02	0.098	0.000	-0.253	-0.022
MP	53.33	52.22	51.76	54.43	-2.10	-0.87	5.17	2.06	-0.002	-0.001	0.010	0.001
PAF	60.69	68.19	65.19	79.04	12.35	-4.39	21.25	30.23	0.012	-0.005	0.039	0.011
CT	206.40	203.63	202.24	197.40	-1.34	-0.68	-2.39	-4.36	-0.001	-0.001	-0.005	-0.002
AH	3.57	4.31	7.78	10.14	20.77	80.62	30.31	184.25	0.019	0.068	0.054	0.044
SRD	19.78	16.73	16.62	9.53	-15.42	-0.64	-42.65	-51.81	-0.017	-0.001	-0.105	-0.039
CA	0.42	0.42	0.42	0.42	0.00	-0.71	0.71	0.00	0.000	-0.001	0.001	0.000

Claves:
 BA - Bosque de abeto
 BPO - Bosque de pino-encino
 BM - Bosque mesófilo
 SBC - Selva baja caducifolia
 BF - Bosque fragmentado
 BMF - Bosque muy fragmentado
 MP - Matorrales sec/pastizal inducido
 PAF - Cultivos de riego
 CT - Cultivo de temporal
 AH - Asentamiento humano
 SRD - Suelo o roca desnudo
 CA - Cuerpo de agua

En el caso de la vegetación cultivada, la geofacies del cultivo de temporal mostró un ligero retroceso debido a tendencias contrarias entre los sistemas de paisajes. Mientras que la mayoría de los geosistemas de bosques templados (geosistema I, y subgeosistemas IIa y IIb) registraron ligeras ganancias, el subgeosistema de las laderas bajas y conos volcánicos (subgeosistema IIc) redujo la superficie cultivada en nueve kilómetros cuadrados (ITMA = -0.001, -0.002 y -0.002). De manera inesperada el cultivo de riego mostró una notable expansión en todos los sistemas de paisajes, destacando el caso de geosistema II (ITMA = 0.012, 0.009 y 0.010), y principalmente su sector de laderas bajas (subgeosistema IIc), donde ocurrieron los mayores incrementos (ITMA = 0.012, 0.011 y 0.011). En contraste, el geosistema I y el subgeosistema IIa (cumbres y laderas altas de la cuenca) la geofacies del cultivo de riego no existe y la del cultivo de temporal registró notables incrementos.

De igual forma, los paisajes carentes de vegetación se distribuyeron de manera contrastada entre los distintos sistemas de paisajes, por ejemplo, mientras que el geosistema de los abetales de cumbres volcánicas (geosistema I) carece de esta clase de geofacies, el de los bosques de pino-encino de laderas y cumbres volcánicas (geosistema II) mostró una notable expansión de los asentamientos humanos (ITMA = 0.025, 0.064 y 0.048), sobre todo en el subgeosistema de las laderas bajas y conos volcánicos (subgeosistema IIc), donde se expandieron en 6.60 km² (ITMA= 0.044) durante el periodo 1976-2000. Por su parte, la geofacies de suelo o roca desnudo mostró una tendencia general al retroceso, con las mayores pérdidas en geosistema II (ITMA = -0.007, -0.015 y -0.012) y principalmente en los subgeosistemas de las cumbres volcánicas (subgeosistema IIa) y de las laderas bajas y conos volcánicos (subgeosistema IIc). Cabe señalar que el geosistema de la selva baja caducifolia de laderas sedimentarias bajas (geosistema III) mostró un patrón distinto, con decrementos de la superficie de

los asentamientos humanos (ITMA = -0.016 en el primer periodo) y discretos incrementos del suelo o roca desnudo.

A escala de los geosistemas, resalta el alto grado de deforestación de las geofacies de los bosques fragmentado y muy fragmentado del geosistema II ($r = 0.0128$, 0.0724), esto durante el primer y tercer periodo, siendo este proceso más localizado en el bosque de pino-encino de las cumbres volcánicas ($r = 0.045$ y 0.130) y de las laderas bajas y conos volcánicos ($r = 0.140$ en el tercer periodo). No obstante que los bosques maduros registraron bajos índices de deforestación en todos los sistemas de paisajes, en el geosistema del bosque de pino-encino de las laderas volcánicas (geosistema II) se obtuvieron importantes reducciones del área forestal que afectaron a las geofacies de la selva baja caducifolia y del bosque de abeto ($r = 0.110$ y 0.032 en el tercer periodo, respectivamente) (Tabla 8).

Tabla 8. Índices de Deforestación.

Sist.de Paisajes	Coberturas (km ²)				INDICES DE DEFORESTACION			
	1976	1986	1995	2000	76-86	86-95	95-00	76-00
ÁREA DE ESTUDIO								
BA	56.69	56.10	56.10	50.66	0.0010	0.0000	0.0202	0.0047
BPO	572.76	593.23	595.72	675.30	-0.0035	-0.0005	-0.0254	-0.0069
BM	9.40	9.59	9.59	9.59	-0.0019	-0.0001	0.0001	-0.0008
SBC	142.24	142.28	142.40	138.05	0.0000	-0.0001	0.0062	0.0012
	781.09	801.19	803.81	873.59	-0.0025	-0.0004	-0.0168	-0.0047
BF	148.75	127.65	128.66	82.92	0.0152	0.0009	0.0812	0.0241
BMF	151.02	136.04	136.00	100.19	0.0104	0.0000	0.0593	0.0170
	299.77	263.69	262.66	183.11	0.0127	0.0004	0.0696	0.0203
	1080.86	1064.88	1066.47	1056.70	0.0015	-0.0002	0.0018	0.0009
GEOSISTEMA I. Abetal de cumbres volcánicas								
BA	25.99	26.07	26.07	25.15	-0.0003	0.0000	0.0072	0.0014
BPO	15.10	15.36	14.73	15.25	-0.0017	0.0042	-0.0061	-0.0004
	41.09	41.43	40.86	40.40	-0.0008	0.0015	0.0023	0.0007
BF	3.86	2.76	2.76	2.76	0.0277	0.0000	0.0000	0.0116
	3.66	2.76	2.76	2.76	0.0277	0.0000	0.0000	0.0116
	44.75	44.19	43.62	43.16	0.0013	0.0014	0.0021	0.0015
GEOSISTEMA II. Bosque de pino-encino de laderas volcánicas								
BA	30.76	30.11	30.11	25.52	0.0021	0.0000	0.0325	0.0078
BPO	557.79	577.81	580.90	659.74	-0.0035	-0.0006	-0.0258	-0.0070
BM	9.39	9.57	9.57	9.5889	-0.0019	0.0000	0.0000	-0.0008
SBC	2.94	2.94	3.06	1.7054	0.0000	-0.0043	0.1102	0.0225
	600.89	620.43	623.64	696.54	-0.0032	-0.0006	-0.0224	-0.0062
BF	144.13	123.85	122.86	79.10	0.0150	0.0009	0.0843	0.0247
BMF	145.78	130.82	130.90	95.14	0.0107	0.0000	0.0618	0.0176
	289.91	254.78	253.76	174.24	0.0128	0.0004	0.0724	0.0210
	890.80	875.21	877.40	870.78	0.0018	-0.0003	0.0015	0.0009
GEOSISTEMA III. Selva baja caducifolia de laderas bajas								
BPO	0.07	0.17	0.17	0.17	-0.0921	0.0024	-0.0054	-0.0376
SBC	139.27	139.30	139.30	136.31	0.0000	0.0000	0.0043	0.0009
	139.34	139.47	139.47	136.48	-0.0001	0.0000	0.0043	0.0009
BF	1.03	1.03	1.03	1.03	0.0000	0.0002	0.0003	0.0001
BMF	5.23	5.12	5.12	5.13	0.0021	-0.0001	-0.0002	0.0008
	6.26	6.15	6.15	6.15	0.0018	0.0000	-0.0001	0.0007
	145.60	145.62	145.62	142.64	0.0000	0.0000	0.0041	0.0009
SUBGEOSISTEMA Ila. Bosque de pino-encino de las cumbres volcánicas								
BA	3.81	3.81	3.81	3.85	0.0000	-0.0001	-0.0021	-0.0005
BPO	76.48	87.12	88.65	110.97	-0.0131	-0.0019	-0.0459	-0.0156
	80.29	90.92	92.46	114.82	-0.0125	-0.0019	-0.0443	-0.0150
BF	45.72	28.79	27.95	12.44	0.0452	0.0033	0.1495	0.0528
BMF	0.48	0.16	0.94	1.91	0.1021	-0.2135	-0.1522	-0.0589
	46.21	28.95	28.89	14.34	0.0457	0.0002	0.1307	0.0476
	126.49	119.87	121.35	129.16	0.0054	-0.0014	-0.0126	-0.0009
SUBGEOSISTEMA Ilib. Bosque de pino-encino de laderas volcánicas altas y medias								
BA	13.84	13.34	13.34	12.51	0.0036	0.0000	0.0127	0.0042
BPO	380.27	393.24	393.40	437.44	-0.0034	0.0000	-0.0214	-0.0059
BM	9.39	9.57	9.57	9.57	-0.0019	0.0000	0.0000	-0.0008
SBC	0.16	0.16	0.16	0.16	0.0000	0.0001	0.0009	0.0002
	403.66	416.31	416.47	459.68	-0.0031	0.0000	-0.0199	-0.0054
BF	75.51	72.12	72.08	55.01	0.0046	0.0001	0.0526	0.0131
BMF	143.75	136.82	126.02	92.31	0.0125	0.0007	0.0603	0.0183
	219.26	198.93	198.10	147.33	0.0097	0.0005	0.0575	0.0164
	622.91	615.24	614.57	607.01	0.0012	0.0001	0.0025	0.0011
SUBGEOSISTEMA Ilic. Bosque residual de pino-encino de laderas bajas y conos volcánicos								
BA	13.12	12.96	12.96	9.16	0.0012	0.0000	0.0671	0.0149
BPO	101.04	97.45	98.85	111.33	0.0036	-0.0016	-0.0241	-0.0041
SBC	2.78	2.78	2.90	1.56	0.0000	-0.0045	0.1181	0.0242
	116.94	113.20	114.71	122.04	0.0032	-0.0015	-0.0125	-0.0018
BF	22.30	22.95	22.84	11.65	-0.0002	0.0005	0.1260	0.0278
BMF	1.55	3.94	3.94	0.91	-0.0979	0.0001	0.2535	0.0218
	24.45	26.89	26.78	12.56	-0.0096	0.0005	0.1405	0.0274
	141.39	140.09	141.49	134.60	0.0009	-0.0011	0.0099	0.0020

Claves:
 BA - Bosque de abeto
 BPO - Bosque de pino-encino
 BM - Bosque mesófilo
 SBC - Selva baja caducifolia
 BF - Bosque fragmentado
 BMF - Bosque muy fragmentado
 MP - Matorrales sepiopantol inducido
 PAF - Cultivos de riego
 CT - Cultivo de temporal
 AH - Asentamiento humano
 SRD - Suelo o roca desnudo
 CA - Cuenca de agua

3.2.4 Procesos de la dinámica del paisaje (1976-2000)

La matriz de transición del periodo 1976 a 2000 (Tabla 9) muestra los procesos de cambio más significativos de la dinámica del paisaje en el área de estudio. En contraste a otros reportes que destacan al Estado de Michoacán por la intensa degradación de sus recursos forestales (Bocco *et al.*, 2001), en este caso los procesos positivos que reflejan conservación y/o regeneración de los paisajes naturales abarcaron una extensa superficie (914.54 km²), equivalente al 48.4% de la superficie total, en tanto que los procesos negativos asociados a la intensificación y al disturbio sólo afectaron 523.52 km² (27.70%), y 453.40 km²

(23.97%) correspondieron a procesos inciertos que no reflejan una tendencia clara de la pérdida o recuperación del paisaje forestal. Entre los procesos positivos destaca la conservación de una extensa superficie de bosques maduros (710.84 km²), de la cual el 72.40% correspondió a la geofacies del bosque de pino-encino, 19.4% a selva baja caducifolia y 6.90% a bosque de abeto. Sin embargo, es importante destacar la efectividad de los procesos positivos, al permitir la recuperación de las geofacies de bosques maduros (17.85%). Esta regeneración se presentó a partir de la conversión de geofacies de vegetación secundaria con uso extensivo (148.30 km²), principalmente de antiguos bosques fragmentados y muy fragmentados de pino-encino que se desarrollaron a geofacies maduras (49.8% y 30.1%, respectivamente). Estos datos coinciden con Ramírez (2001), quien ha comprobado la recuperación de la cubierta forestal y su relación con la caída del sistema agrícola en el área de la sierra de Angangueo.

En cuanto a los procesos negativos, las geofacies de bosques maduros no registraron grandes pérdidas (9.6% de la superficie pasó a geofacies de Matorral Secundario y Pastizal Inducido, 3.5% a vegetación cultivada y 0.3% a suelo desprovisto de vegetación). Sin embargo, destaca la intensificación –o incremento de los disturbios asociados a la permanencia– de la geofacies de vegetación cultivada con uso agroforestal extensivo/intensivo (65.0% de la superficie afectada por procesos de disturbio). La expansión de los paisajes agropecuarios sobre antiguos matorrales y pastizales fue otro de los procesos de disturbio dominantes, principalmente en el caso de la geofacies de agricultura de riego que se ha beneficiado de la dotación de infraestructura en la región (Ramírez, 2001). En otros casos el disturbio se ha intensificado debido a la conversión de las geofacies de cultivo de riego a asentamientos humanos y la permanencia de las geofacies desprovistas de vegetación (Tabla 9 y 10).

Tabla 9. Matriz de transición 1976-2000. BA= Bosque de abeto, BPQ= Bosque de pino-encino, BM= Bosque mesófilo, SBC= Selva baja caducifolia, BF= Bosque fragmentado, BMF= Bosque muy fragmentado, MP= Matorral secundario y pastizal inducido, PAF= Cultivos de riego, CT= Cultivos de temporal, AH= Asentamiento humano, SRD= Suelo o roca desnudo, CA= Cuerpo de agua.

CUBIERTA	BA	BPQ	BM	SBC	BF	BMF	MP	PAF	CT	AH	SRD	CA
BA	49,06	0,01	0,00	0,00	0,05	0,00	4,27	0,00	3,35	0,00	0,00	0,00
BPQ	0,01	514,47	0,06	0,00	14,84	4,76	26,21	0,21	10,67	0,09	1,66	0,00
BM	0,00	0,11	9,24	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SBA	0,00	0,07	0,00	137,82	0,17	0,00	0,00	4,14	0,00	0,00	0,00	0,00
subtotal				710,84			50,34		18,38			1,75
BF	0,95	73,79	0,00	0,13	55,04	1,30	11,59	2,08	3,78	0,16	0,00	0,00
BMF	0,00	44,70	0,00	0,00	4,25	91,05	10,97	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
MP	0,57	27,89	0,27	0,00	4,56	2,76	307,27	13,14	13,20	1,50	3,43	0,03
subtotal				148,30			488,79		32,24			5,12
PAF	0,00	0,15	0,00	0,07	0,00	0,01	3,76	72,57	2,89	4,96	0,04	0,00
CT	0,08	13,59	0,00	0,00	3,98	0,04	16,36	7,52	257,40	2,43	1,83	0,00
subtotal				13,89			24,14		340,38			9,26
AH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,04	4,48	0,00	0,00
SRD	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,32	1,07	5,99	6,01	0,06	19,10	0,00
CA	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	6,44
subtotal				0,39			1,45		12,13			30,07
										total=		1887,45

Tabla 10. Matriz de transición en tres periodos 76-86, 86-95 y 95-00. BA= Bosque de abeto, BPQ= Bosque de pino-encino, BM= Bosque mesófilo, SBC= Selva baja caducifolia, BF= Bosque fragmentado, BMF= Bosque muy fragmentado, MP= Matorral secundario y pastizal inducido, PAF= Cultivos de riego, CT= Cultivos de temporal, AH= Asentamiento humano, SRD= Suelo o roca desnudo, CA= Cuerpo de agua.

	CLAVE	Cubierta de uso de suelo al final del periodo												
		BA	BPQ	BM	SBC	BF	BMF	MP	PAF	CT	AH	SRD	CA	
Cubierta de uso de suelo al inicio del periodo	1976/1986	BA	55,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,34	0,00	1,36	0,00	0,00	0,00
	BPQ	0,00	532,73	0,06	0,00	10,33	11,93	11,42	0,06	5,26	0,00	1,19	0,00	
	BM	0,00	0,00	9,24	0,00	0,00	0,13	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	SBC	0,00	0,00	0,00	142,18	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	
	subtotal				739,21			34,22		6,70			1,19	
	BF	0,95	27,35	0,00	0,00	105,54	5,07	9,45	0,00	0,41	0,04	0,00	0,00	
	BMF	0,00	22,84	0,00	0,00	6,65	118,58	2,87	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	
	MP	0,21	8,08	0,27	0,00	4,22	0,33	355,82	4,62	0,00	0,34	0,74	0,00	
	subtotal				59,70			608,54		5,08			1,12	
	PAF	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	1,92	81,82	0,14	0,46	0,04	0,00	
	CT	0,02	2,34	0,00	0,00	0,84	0,01	1,45	4,15	293,35	0,65	0,42	0,00	
	subtotal				2,42			4,22		379,46			1,57	
	AH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,25	0,02	4,38	0,00	0,00	
	SRD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,37	1,97	1,35	0,00	28,23	0,00	
CA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,50		

	subtotal				0,00			1,39		3,60			39,11
	BA	BPQ	BM	SBC	BF	BMF	MP	PAF	CT	AH	SRD	CA	
	BA	56,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	BPQ	0,00	591,93	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00
	BM	0,00	0,00	9,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SBC	0,00	0,00	0,00	132,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	subtotal				790,01			1,25		0,16			0,00
	BF	0,00	0,16	0,00	0,12	126,64	0,00	0,68	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
	BMF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	135,24	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	MP	0,00	2,12	0,00	0,00	0,00	0,77	381,55	0,00	0,00	0,17	0,08	0,00
	subtotal				2,40			645,67		0,05			0,25
	PAF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89,83	0,00	2,99	0,00	0,00
	CT	0,00	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	299,71	0,65	0,03	0,00
	subtotal				1,55			0,01		389,54			3,66
	AH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,80	0,00	0,00
	SRD	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,51	0,00
	CA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,50
	subtotal				0,11			0,00		0,00			42,81
1986/1995	BA	50,20	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	4,17	0,00	1,80	0,00	0,00	0,00
	BPQ	0,01	555,14	0,00	0,00	10,01	1,64	21,66	0,09	6,52	0,09	0,71	0,00
	BM	0,00	0,00	9,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SBC	0,00	0,07	0,00	138,00	0,18	0,00	0,00	4,11	0,00	0,00	0,00	0,00
	subtotal				752,99			37,66		12,51			0,81
	BF	0,00	53,35	0,00	0,01	59,20	3,83	4,81	2,13	3,20	0,11	0,00	0,00
	BMF	0,00	27,28	0,00	0,00	7,14	91,56	9,34	0,00	0,69	0,01	0,00	0,00
	MP	0,40	26,48	0,00	0,00	3,05	2,83	323,51	8,60	15,12	1,04	3,21	0,03
	subtotal				107,52			505,26		29,74			4,41
	PAF	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,08	2,19	82,87	2,58	1,96	0,00	0,00
	CT	0,07	12,29	0,00	0,00	3,31	0,00	15,04	3,75	263,13	1,12	1,20	0,00
	subtotal				12,51			20,62		352,33			4,28
1995/2000	AH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,07	0,14	9,26	0,00	0,00
	SRD	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,32	0,67	4,11	4,21	0,00	20,93	0,00
	CA	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	6,44
	subtotal				0,39			1,17		8,53			36,62

PROCESOS DE CONSERVACIÓN. No obstante que la expansión de la frontera agrícola promovida por una larga tradición agropecuaria derivó en altos niveles de deforestación y fragmentación, en las últimas décadas, la dinámica del paisaje se define por una tendencia a la conservación de los remanentes forestales, principalmente en el caso de los bosques maduros retuvieron su área en un 39.2% (739.20 km²) entre los años de 1976 y 1986 del área total de estudio (1,887 km²), incrementándose hacia el segundo periodo de análisis (41.90%); sin embargo, con un ligero decremento hacia el último periodo (39.89%). Esta situación favoreció principalmente al bosque de pino-encino (532.70 km² entre 1976-1986; 591.90 km² entre 1986-1995, y 551.10 km² entre 1995-2000) y a la

selva baja caducifolia (142.18 km²; 132.33 km² y 138.00 km² en los tres periodos, respectivamente).

Este proceso fue significativo en el geosistema de los bosques de pino-encino de laderas y cumbres volcánicas (geosistema II) en los cuatro periodos respectivos (29.66%, 32.83%, 30.57% y 28.39% del área de la cuenca). La geofacies del bosque de pino-encino abarcó la mayor superficie de este proceso (90% del área conservada de los bosques maduros en los cuatro periodos). Es de resaltar, sin embargo, que la mayor superficie conservada de bosque de pino-encino se presentó en los ambientes frescos del subgeosistema de las laderas altas y medias de la cuenca (subgeosistema IIb). Esta superficie de conservación de bosque de pino-encino, si bien sometida a una explotación forestal inadecuada, la inaccesibilidad al recurso maderable y el abandono de tierras han permeado, en los últimos treinta años, la tala ilegal, extracción de leña y la poca agricultura de temporal que, hasta finales de los años 1960, habían sido las principales actividades productivas en estos ambientes naturales.

PROCESOS DE REGENERACIÓN. La recuperación de bosques maduros a partir de vegetación secundaria mostró una tendencia favorable, al pasar de 59.70 km² (75.63% del área con procesos de regeneración) en el periodo 1976-1986; siendo escaso el proceso en el periodo 1986-1995 (2.40 km²), sin embargo nuevamente significativo en el último periodo (107.52 km²; 69.25%) en el periodo 1995-2000. El principal proceso fue la modificación de antiguos bosques fragmentados y matorrales secundarios y pastizales inducidos que se convirtieron a bosques de pino-encino (34.36% y 17.05% del área de regeneración en el último periodo, respectivamente). Más discreta fue la recuperación de bosques maduros a partir principalmente de geofacies de bosques muy fragmentados (hasta un 17.57% de la superficie regenerada). Las ganancias se distribuyeron favorablemente en las laderas altas y medias (1,600 a 2,200 msnm y entre 6 y 45° de pendiente) de los

domos y complejos volcánicos de Agostitlán, Mil Cumbres y Anganguero (46.10% de la superficie total).

Otra clase de procesos de regeneración refiere a cambios que no alcanzan la recuperación de bosques maduros. Este es el caso de los matorrales secundarios y pastizales inducidos que se desarrollan durante los primeros años posteriores al abandono agrícola. Su importancia en la biodiversidad de etapas de sucesión y en la composición de especies de las comunidades ha sido reconocida bajo diversos ambientes (Tasser y Tappeiner, 2002). En el área de estudio este proceso mostró una tendencia positiva al incrementarse de 3.33 km² a 17.23 km² (1976-1986 y 1995-2000, respectivamente). Esta recuperación se llevó a cabo principalmente en el entorno de bosques residuales sobre llanuras y lomeríos suaves (0 a 15° de pendiente) de los piedemontes bajos, derrames basálticos y llanuras aluviales del fondo de la cuenca (1,600 a 2,400 msnm). Sin embargo, este proceso se ha visto mermado debido a la falta de interés por parte de los gobiernos estatales y locales para proveer de programas de desarrollo y subsidios, lo que ha traído como consecuencia que los actores locales, principalmente los ganaderos, sean obligados a tomar créditos para fomentar sus actividades agropecuarias (Toledo *et al.*, 1989; Ochoa y González, 2000).

A escala de paisaje, la recuperación de los bosques maduros a partir de la vegetación secundaria fue muy significativa en el geosistema del bosque de pino-encino de laderas y cumbres volcánicas (geosistema II) (146.50 km² en todo el periodo), representando el 74.35% de los procesos de regeneración. El proceso fue más importante en el último periodo de análisis, de 1995 a 2000 (106.78 km²), con relación al primer periodo (58.37 km²). La modificación de los bosques fragmentados a bosques maduros de pino-encino fue el proceso más representativo en ambos periodos (53.35 km² y 27.35 km², respectivamente), principalmente en las laderas bajas, conos y cumbres volcánicas. Contrariamente

a los resultados obtenidos a escala de área de estudio, en la cual los bosques fragmentados pasaron a bosques maduros, a escala de sistema de paisajes y sobre todo en el subgeosistema de las laderas altas y medias (subgeosistema IIb), la geofacies del bosque muy fragmentado presentó los más altos índices de conversión (44.35 km² en todo el periodo).

La explicación de este proceso de regeneración de vegetación, cada vez más común en el contexto rural de México y Latinoamérica (Preston *et al.*, 2003), se relaciona con la decadencia y sustitución de la agricultura tradicional por la ganadería de bovinos en tierras templadas y de cabras en tierras secas. La explicación es compleja y se relaciona con la penetración reciente de las economías de mercado, la caída en los precios del maíz y la eventual sustitución de los métodos tradicionales del manejo de recursos. Todo ello, acentúa la pobreza, el atraso, la marginación, así como el deterioro de los ecosistemas (Giménez de Azcárate *et al.*, 2003). Frente a esta situación existe la creencia de que la ganadería asegura la alimentación (uso doméstico) y minimiza la pobreza (uso comercial). Así, el proceso de cambio inicia con el abandono de la agricultura y el desarrollo silvestre de pastizales potencialmente aprovechables para la ganadería (Ochoa y González, 2000). Una vez establecidos los pastizales, la actividad se sostiene bajo un sistema que incluye menor fuerza de labor y la utilización de la quema como herramienta para propiciar el renuevo de los pastos en periodos regulares de tiempo (Figuras 28 y 29).

Dinámica del paisaje. Porcentaje de la superficie de los procesos de generación de vegetación en km² respecto al área total de la cuenca.

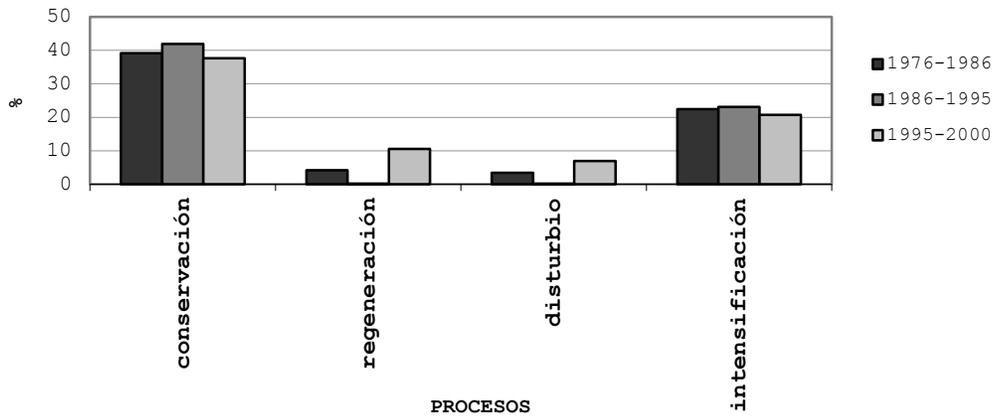


Figura 28. Se muestra el porcentaje de la superficie recuperada en los procesos de regeneración en la cuenca de estudio.

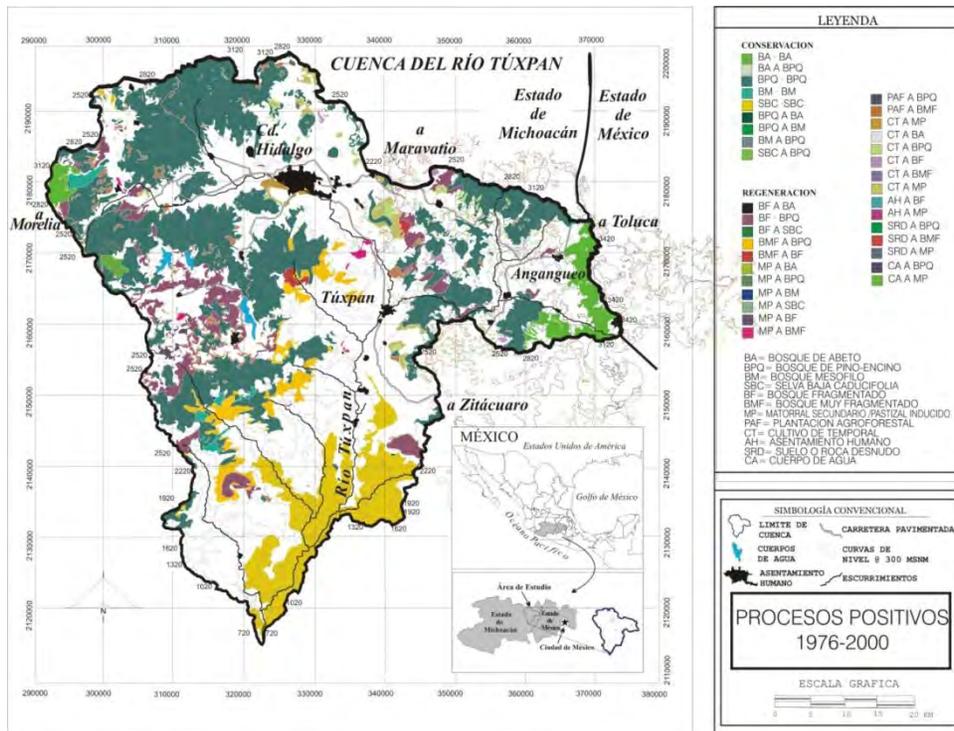


Figura 29. Mapa de procesos positivos.

PROCESOS DE DISTURBIO. La literatura internacional señala a la agricultura de subsistencia, la rotación de cultivos, la ganaderización (Serrão *et al.*, 1996) y la expansión dispersa de la población como las principales causas del disturbio en ecosistemas forestales (Rzedowski, 1988; Lawrence *et al.*, 1998; Ochoa y González, 2000; Nagashima *et al.*, 2002). Los resultados indican que este proceso se comportó de manera discreta. Dicho proceso se presentó de manera más intensa hacia el último periodo de análisis (103.11 km²), en comparación con el primero (65.70 km²), pasando desapercibido en el segundo periodo (3.19 km²).

En el primer periodo de análisis el principal proceso de disturbio fue la conversión de bosques maduros a vegetación secundaria (52.1% de la superficie de disturbio), afectando principalmente a los bosques de pino-encino (33.68 km²) que fueron sustituidos por matorrales secundarios y pastizales inducidos. La causa del cambio se debe a una fuerte expansión de la vegetación cultivada que se constituyó como el principal agente del disturbio. Los procesos se centraron en la conversión de bosques maduros de pino-encino a cultivos de temporal, y selva baja caducifolia a cultivos de riego.

Cabe señalar que el incremento de la vegetación cultivada afectó principalmente a la vegetación secundaria de matorrales y pastizales, principalmente en el último periodo de análisis. La distribución de los procesos de disturbio dejó ver una clara diferencia entre las laderas medias y altas de bosque de pino-encino (subgeosistema IIb) que bordean las Cumbres de los Complejos Volcánicos en Agostitlán (subgeosistema IIa), Mil Cumbres y Angangueo (geosistema I), donde se concentraron los avances de la agricultura de temporal y, por otra parte los sectores bajos de los piedemontes volcánicos y angostas llanuras y terrazas aluviales en torno al curso río Tuxpan (subgeosistema IIc), donde el proceso más importante se debió a la expansión de la agricultura de riego. Esto se debió principalmente a la intensificación de infraestructura para las actividades

agrícolas en la región que, aunado a las pendientes suaves (0-15°), su variante mesoclimática de tipo templado (6-27 °C) y subhúmedo (600 a 900 mm), permiten áreas estratégicas para el aprovechamiento agropecuario.

El proceso de disturbio que más se presentó a escala de paisaje fue la conversión en el geosistema II, por un lado, de los bosques maduros a vegetación secundaria (49.29 km² en todo el periodo) y que afectó principalmente a los bosques de pino-encino de los subgeosistemas de las laderas volcánicas altas y medias (subgeosistema IIb, 31.16 km²) y de las laderas bajas y conos volcánicos (subgeosistema IIc, 10.32 km²); y por el otro, la modificación de la vegetación secundaria a vegetación cultivada con uso agrícola (subgeosistema IIc, 21.06 km²). En el primer caso, resalta la conversión de los bosques de pino-encino a matorrales secundarios y pastizales inducidos (58.24% del área de este proceso); en el segundo, por su parte, destaca la modificación de los matorrales secundarios y pastizales inducidos en cultivos de riego y de temporal (41.59% y 37.55%, respectivamente).

PROCESOS DE INTENSIFICACIÓN. Esta clase de procesos se presentó, en los tres periodos de estudio, entre el 21 y 23% del área de la cuenca, sólo superado por el proceso de conservación, que se mantuvo entre 39 y 42% del área total de la cuenca y de los procesos inciertos (25 y 34%). Así también, el porcentaje del área que abarcaron los procesos negativos fue considerable en los tres periodos (86.62%, 99.27% y 79.57%, respectivamente). El proceso de intensificación más agudo que se registró en los tres periodos favoreció a la vegetación cultivada con uso agroforestal intensivo-extensivo (entre el 87 y 90% del área de intensificación) seguida del suelo desprovisto de vegetación que representó tan sólo el 9% de la misma.

Los cultivos de temporal también se intensificaron, incluso muy por encima de los cultivos de riego. En los tres periodos de estudio, la permanencia de los cultivos de temporal representó 88.52%, 89.34% y 86.12% de los procesos de intensificación. La permanencia de una vasta superficie de agricultura de riego (81.82 km²) durante el primer periodo de estudio (1976-1986) se mantuvo discretamente durante el segundo (89.83 km²) y tercero periodo (82.87 km²). Por su parte, la agricultura de temporal aumentó discretamente su superficie en los dos primeros periodos (293.35 km², 299.71 km²) decayendo hacia el tercero (263.13 km²).

Cabe también mencionar la transición de los cultivos de riego a suelo urbano, principalmente del primero al segundo periodo (0.46 km² a 2.99 km²), decayendo discretamente hacia el último (1.96 km²). Por su parte, el área de cultivos de temporal que fue sustituida por Asentamiento Humano se mantuvo hacia los dos primeros periodos (0.65 km²), incrementándose hacia el último (1.96 km²).

La intensificación y expansión de los asentamientos humanos refiere pequeñas superficies que apenas inciden sobre la deforestación, pero que alcanzan amplio significado paisajístico y funcional. De manera casi invariable, los asentamientos humanos forman orlas de intenso deterioro por contaminación de suelo y agua, vertederos de basura y drenajes abiertos, remoción de suelo, alteración de la topografía e incremento de la dinámica de vertientes y en general, deterioro asociado al incremento de la demanda de recursos en torno a los bosques (Jansky *et al.*, 2002; Giménez de Azcárate *et al.*, 2003). Como es normal la expansión urbana se correlaciona con crecimiento poblacional (Ochoa y González, 2000), que en el área fue de 113,279 habitantes en 1976; 134,807 en 1986; 162,335 en 1995 y 194,148 en 2000 (INEGI, 2000). Sin embargo, se explica también como una consecuencia de progresivo abandono y conversión de la

agricultura tradicional a otras clases de uso, como lo demuestra el comportamiento de la PEA, ya que desde 1976 el sector primario (58%) mostró una tendencia decreciente (39% en 1980, 33% en 1990 y 25% en 2000) que contrasta con la tendencia a la alza de los sectores terciario (24, 46, 37 y 40%, respectivamente) y secundario (19, 16, 30 y 25%, respectivamente), relacionados, asimismo, con la migración del campo a la ciudad.

Este proceso se presentó en el geosistema II (94.35% de los procesos en todo el periodo) principalmente. Resalta por su gran extensión, la intensificación de la vegetación cultivada (321.01 km²) con la permanencia de los cultivos de temporal (252.67 km²) seguida de los cultivos de riego (57.96 km²). La geofacies cultivo de temporal fue permanente en las laderas bajas y conos volcánicos (geosistema IIc, 173.25 km²) y en las laderas altas y medias (subgeosistema IIb, 79.42 km²). La geofacies cultivo de riego fue notoria en el geosistema II, sin embargo tuvo un comportamiento más discreto (57.96 km²) en todo el periodo. Aún cuando el cultivo de riego tuvo un comportamiento discreto en el geosistema II, la intensificación de esta geofacies fue significativa en geosistema III (71.97% de los procesos en el sistema) (Figura 30).

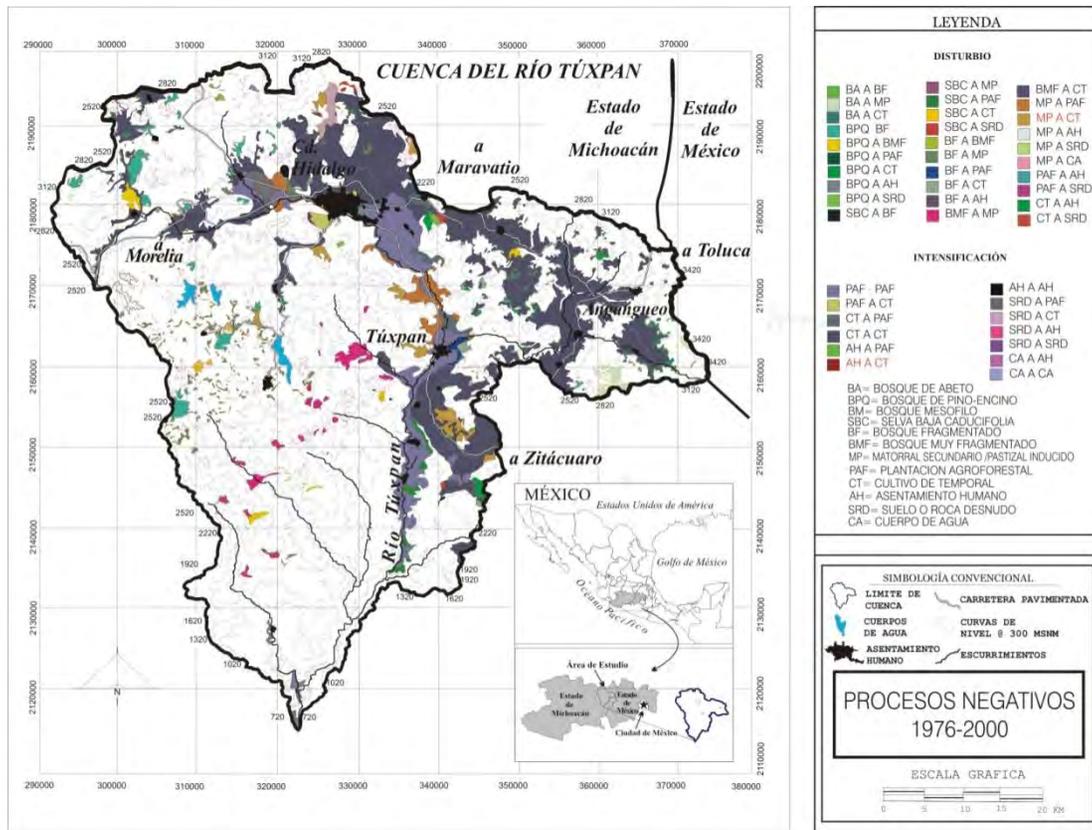


Figura 30. Procesos negativos.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnold, R. H. 1997. *Land use and land cover mapping*. In: Interpretation of airphotos and remotely sensed imagery. Prentice Hall, New Jersey, USA. 36-43 pp.
- Bastian, O., Röder, M. 1998. Assessment of landscape change by land evaluation of past and present situation. *Landscape and Urban Planning* 41, 171-182.
- Bocco, G., Mendoza, M., Masera, O. 2001. La Dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*. Instituto de Geografía de la UNAM. México, D.F. 44: 18-38.
- Byers, A. C. 2000. Contemporary landscape change in the Huascarán National Park and buffer zone, Cordillera Blanca, Perú. *Mountain Research and Development* 20, 52-63
- Campbell, J. B. 1996. *Introduction to remote sensing*. Guilford. New York, USA. 622 pp.
- Carabias, J. 1990. En búsqueda de alternativas ecológicas para el uso de los recursos. In: R. ROJAS, coord. *En busca del equilibrio perdido. El uso de los recursos naturales en México*. Universidad de Guadalajara, México. 47-62.
- Chuvienco, S. E. 2002 *Teledetección Ambiental*. La observación de la tierra desde el espacio. Ariel Ciencia. Barcelona, España. 586 pp.
- Dirzo, R., García, M. 1992. Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a tropical area in southeast Mexico. *Conservation Biology* 6, 84-90.
- Enciso, J. L. 1990. *La fotointerpretación como instrumento de apoyo a la investigación urbana*. Universidad Autónoma Metropolitana, México. 47 pp.
- Fuentes-Aguilar, L. 1975. El paisaje en el piedemonte poblano de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl. *Boletín del Instituto de Geografía* 6, 117-152.

- Galicia, L., García-Romero, A. 2007. Land use and land cover change in highland temperate forests in the Izta-Popo National Park, Central Mexico. *Mountain Research and Development*. 27/1: 48-57.
- Giménez de Azcárate, J., Ramírez, M. I. 2004. Análisis fitosociológico de los bosques de oyamel [*Abies religiosa* (H.B.K.) Chan.y Schlecht.] de la Sierra de Angangueo, Región Central de México. *Fitosociología* 1, 91-100.
- Giménez de Azcárate, J., Ramírez, M. I., PINTO, M. 2003. Las comunidades vegetales de la Sierra de Angangueo (estados de Michoacán y México, México): clasificación, composición y distribución. *Lazaroa* 24, 87-111.
- Guerrard, A. J. 1993. Landscape sensitivity and change on Dartmoor. In: D. S. G. THOMAS AND R. J. ALLISON, eds. *Landscape sensitivity*. John Wiley y sons, London.
- INEGI, 1983. *Carta de Uso de Suelo y Vegetación*, hojas E14-A34, E14-A35, E14-A34, E14-A24, E14-A14, escala 1:50000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI, 1995. Conjunto de datos vectoriales. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- INEGI, 2000. Censo Nacional de Población. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Jansky, L., Ives J., Furuyashiki, K., Watanabe, T. 2002. Global mountain research for sustainable development. *Global Environmental Change*. 12: 231-232.
- Lawrence, D., Peart, D., Loughton, M. 1998. The impact of shifting cultivation on a rain forest landscape in West Kalimantan: spatial and temporal dynamics. *Landscape Ecology* 13, 135-148.
- Mas, J. F., Ramírez, I. 1996. Comparison of land use classifications obtained by visual interpretation and digital processing. *ITC J.* 3: 278-283.
- Mendoza, M., Bocco, G., López, E., Bravo, M. 2002. Implicaciones hidrológicas del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo, una propuesta de análisis

- espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones Geográficas* 49, 92-117.
- Miles, J., Cummins, R. P., French, D. D., Gardner, S., Orr, J. L., Cegrí, M. C. 2001. Landscape sensitivity: an ecological view. *Catena* 42, 125-141.
- Nagashima, K., Sands, R., White, A. G. D., Bilek, E. M., Nakagoshi, N. 2002. Regional landscape change as a consequence of plantation forestry expansion: an example in the Nelson region, New Zeland. *Forest Ecology and Management* 163, 245-261.
- Nascimento, J. R. 1991. Discutendo números do desmatamento. *Interciencia* 16: 232-239.
- Ochoa, S., González, M. 2000. Land-use and deforestation in the highlands of Chiapas. *Applied Geography* 20, 17-42.
- Ortiz, B., Toledo, V. 1998. Tendencias de la deforestación de la selva Lacandona (Chiapas, México): el caso de Las Cañadas. *Interciencia* 23 (6), 318-327.
- Powers, W. E., Khon, C. F. 1959. Identification of selected cultural features. Aerial photointer-pretation of landforms and rural-cultural features in glaciated and coastal regions, Northwestern University, Illinois. 58-97 pp.
- Preston, D., Fairbairn, J., Paniagua, N., Maas, G., Yevara, M. 2003. Grazing and environmental change on the Tarija Altiplano, Bolivia. *Mountain Research and Development* 23, 141-148.
- Quiroga, M. 2004. Highland grassland vegetation in the Northwestern Andes of Argentina. *Mountain Research and Development* 24, 243-250.
- Ramírez, I. 2001. Cambios en las cubiertas del suelo en la sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971- 2000. *Invest. Geogr.* 45: 39-55.
- Rodríguez, M. L., López, J. 2006. Caracterización de unidades biofísicas a partir de indicadores ambientales en Milpa Alta, Centro de México. *Invest. Geogr.* 60: 46-61.
- Rzedowski, I. J. 1988. *Vegetación de México*. Limusa, México.

- Serrão, E., Nepstad, D., Walker, R. 1996. Upland agricultural and forestry development in the Amazon: sustainability, criticality and resilience. *Ecological Economics*, 18, 3-13.
- Slaymaker, D. 2003. Using georeferenced large-scale aerial videography as a surrogate for ground validation data. In Wulder M A, Franklin, S. E. (Eds.) *Remote Sensing for Forest Environments: Concepts and Case Studies*. Kluwer. Hardbound, USA. 469-488 pp.
- Smethurst, D. 2000. Mountain Geography. *The Geographical Review*, 90, 35-56.
- Tanner, T. 2003. Peopling mountain environments: changing, Andean livelihoods in north-west Argentina. *The Geographical Journal* 169, 205-214.
- Tasser, E., Tappeiner, U. 2002. Impact of land use changes on mountain vegetation. *Applied Vegetation Science* 5, 173-184.
- Tiscareño, M., Báez, A. D., Velásquez, M., Potter, K. N., Stone, J. J., Tapia, M., Claverán, R. 1999. Agricultural research for watershed restoration in Central Mexico. *Journal of Soil y Water Conservation* 54, 686-692.
- Toledo, V. M., Carabias, J., Toledo, C., González, P. 1989. La población rural en México: alternativas ecológicas. Colección medio ambiente. Num. 6. Fundación Universo Veintiuno, México.

CAPÍTULO IV. FRAGMENTACIÓN DEL PAISAJE.

Dado el alto grado de transformación que afecta a los bosques del área, se considera importante analizar la estructura del paisaje y sobre todo, evaluar la magnitud y consecuencias de la fragmentación en términos ambientales y paisajísticos. Para ello, el presente estudio se apoya en la ecología del paisaje, la cual propone métodos adecuados para el análisis de los patrones de distribución espacial de los fenómenos ecológicos (Naveh y Lieberman, 1984; Levin, 1992; Wiens, 1995) y en especial, la influencia de la perturbación sobre la estructura y dinámica de los sistemas naturales (Keitt *et al.*, 1997; Farina, 1996). Se espera que este capítulo de la fragmentación derive en un entendimiento más detallado del significado funcional de los paisajes elementales de un mismo tipo (clases). Por ejemplo, si los fragmentos que integran un paisaje elemental muestran diversos estilos de fragmentación y cambios en la diversidad y/o estabilidad, esto supondría una subdivisión del paisaje elemental.

4.1. Estado actual y dinámica de la fragmentación a escala de la cuenca

Método

Para conocer el estado actual y la dinámica de la fragmentación a nivel de cuenca, geosistemas y subgeosistemas de 1976, 1986 y 2000, los mapas de cubiertas de suelo fueron exportados al programa Arcview GIS 3.2, donde se les asignó una clave numérica por cada cubierta de suelo. La información resultante fue exportada al programa estadístico Fragatas 2.0 (McGarigal, 1994) donde se calcularon métricas a nivel de paisaje, clase y parche. Las métricas consideradas a nivel de paisaje y de clases fueron: a) número y densidad de parches (NP, PD), b) representatividad paisajística del parche más grande (LPI), c) longitud y densidad de borde (TE, ED), d) área promedio de los parches (AREA), e) área

núcleo (TCA), f) conectividad (CONNECT) y, g) Índice de Diversidad de Shannon (SHDI). Los fragmentos se caracterizan con base al área (AREA: pequeños 0-5 ha, medianos 5-100 ha, grandes 100-1000 ha, y, muy grandes > 1000 ha) y la forma (SHAPE: muy compactos SHAPE = 1, compactos $1 > \text{SHAPE} < 3$, irregulares $3 > \text{SHAPE} < 5$ y, muy irregulares $\text{SHAPE} > 5$) de los parches. La descripción de otras métricas –número de parches (NP), perímetro (PERM) y área núcleo (CORE)– complementaron el análisis y la comprensión del estado actual y dinámica de la fragmentación.

La información relacionada con la diversidad y estructura de la vegetación se agrupó siguiendo los siguientes parámetros de la vegetación: a) Composición Florística: riqueza total (RT), riqueza del estrato arbóreo (REA), arbustivo (REAB) y herbáceo (REH), así como número de individuos del estrato arbóreo (NEA), arbustivo (NEAB) y abundancia relativa (P_i); b) Estructura: perímetro a la altura del pecho (PAP), talla de árboles (TA) y arbustos (TAB), talla promedio de árboles (TPromA) y arbustos (TPromAB), densidad total (D) y densidad de estratos arbóreo (DEA) y arbustivo (DEAB), así como cobertura específica (CE) y cobertura individual por estrato (CEA; CEAB; CEH); y c) Productividad (P), área basal de los árboles y arbustos.

Para conocer la influencia del área, la forma y el aislamiento de los fragmentos forestales sobre la estabilidad (diversidad y estructura vertical) de las comunidades, se llevó a cabo el levantamiento de 24 inventarios en dos sistemas de paisaje (SGIIA y SGIIC). El criterio de selección de los subgeosistemas consideró, primero, que el sistema de paisaje debía incluir el dominio de la cubierta de suelo de los bosques mixtos de pino-encino, por otro, que las formas del relieve no fueran un factor determinante que incidiera en los resultados, especialmente en relación a la orientación de las laderas de los inventarios seleccionados.

El muestreo consideró la forma de vida de los individuos, de tal forma que para el muestro de árboles se usan parcelas cuadrangulares de 30 x 30 m, para el muestreo de arbustos se emplearon cuatro parcelas cuadrangulares de 5 x 5 m, ubicadas en los extremos del cuadrante principal, y para el muestreo de hierbas ocho parcelas cuadrangulares de 0.5 x 0.5 m, las cuales se ubicaron mediante métodos al azar en el interior de las parcelas de arbustos (dos parcelas pequeñas en cada caso).

En cada caso se recopiló información relacionada con la composición de las comunidades vegetales, a mencionar: la riqueza total, riqueza del estrato arbóreo, arbustivo y herbáceo, así como el total de individuos y número de individuos de los estratos arbóreo y arbustivo. Con relación a la estructura de las comunidades, los datos recopilados incluyen la densidad específica y la densidad de los estratos arbóreo y arbustivo, así como la cobertura específica y cobertura individual por estrato. También se incluye la variante de productividad relacionada con el área basal de los árboles en general que incorporaba las especies de pinos y arbustos.

Para determinar la correlación que existe entre los atributos de la fragmentación (tamaño, forma y aislamiento) y las variables de la vegetación (diversidad y estructura vertical) se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (r), el cual varió en el intervalo de -1 a +1: si $r = 0$ no existe relación lineal, si $r = 1$ existe una correlación positiva perfecta, si $0 < r < 1$ existe una correlación positiva, si $r = -1$ existe una correlación negativa perfecta y si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.

Estado Actual de la Fragmentación

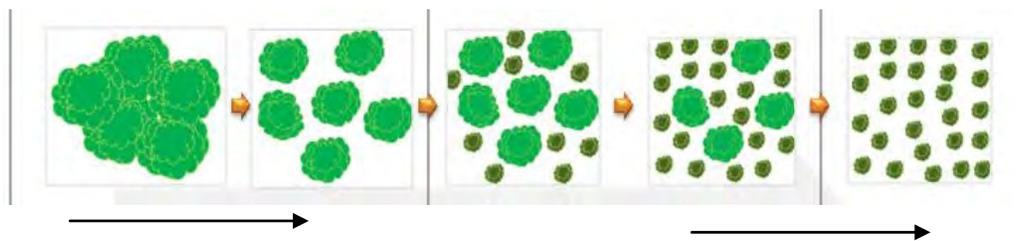
Los resultados muestran un total de 12 tipos de cubiertas de suelo para el año 2000, distribuidos en 539 parches con una densidad de 0.12 parches/100 ha⁵. El área del parche más pequeño (1.62 ha) difiere en proporción y tamaño del parche más grande (RPPG = 29,243.88 ha), el cual constituye 6.73% de la superficie total de la cuenca. El área promedio de los parches es de AREA = 350.17 ha, los cuales adquieren valores moderados de compacidad (COMP = 1.94) y bajos en adyacencia⁶, como lo demuestra el índice de conectividad (CONNECT = 0.52).

La vegetación secundaria con uso extensivo exhibió, para el año 2000, el mayor número de fragmentos (NP = 292), representando 45.45% del total de la fragmentación; 83.90% de ella alude a matorral secundario (NP = 245), siendo a su vez la segunda cubierta de suelo con mayor representatividad en el paisaje (RP = 8.77%), como lo demuestra la significación de su parche más grande (RPPG = 3.88). Por su parte, los bosques maduros con uso agropecuario y forestal disperso representan 22% de la fragmentación del área de estudio (NP=119), con una densidad de parches de DP=0.027, y una representatividad paisajística de RP= 20.10, lo que le permite exhibir un remanente de área núcleo igual a NAREA = 2,2971.08 ha. De este último grupo, el bosque de pino-encino es la cubierta de suelo con mayor fragmentación (NP=103), seguido del bosque mesófilo (NP = 8), bosque de oyamel (NP = 7), y finalmente de la selva baja caducifolia (NP = 1), con una representación paisajística (RP) de 15.54, 1.16, 0.22 y 3.17, respectivamente.

⁵ PD= N/A (10,000) (100); donde: N=Número total de parches en la cuenca; A= Área total de la cuenca (m²); Unidad: Número por cada 100 hectáreas.

⁶ número de uniones funcionales/número de uniones posibles

A nivel de la cuenca, el patrón de fragmentación en 2000 se mostró poco diverso (IDSH = 1.86), el cual se caracteriza por fragmentos grandes (100-1,000 ha) y muy grandes (>1,000 ha) de bosque de pino-encino que, contiguos a parches pequeños y medianos de matorral secundario y cultivo de temporal, hacen del bosque de pino-encino una cubierta de suelo de baja agregación⁷ (IC = 21.70) y escasa adyacencia (CONNECT = 1.25), como lo demuestra la longitud de borde (LB = 134, 980 m). En este sentido, el matorral secundario y el cultivo de temporal adquieren un papel trascendente en el patrón de fragmentación debido a su representación paisajística (RP = 15.61) y longitud de borde (LB = 892, 390 m), en comparación con las demás cubiertas de suelo (Figura 31).



Proceso de fragmentación

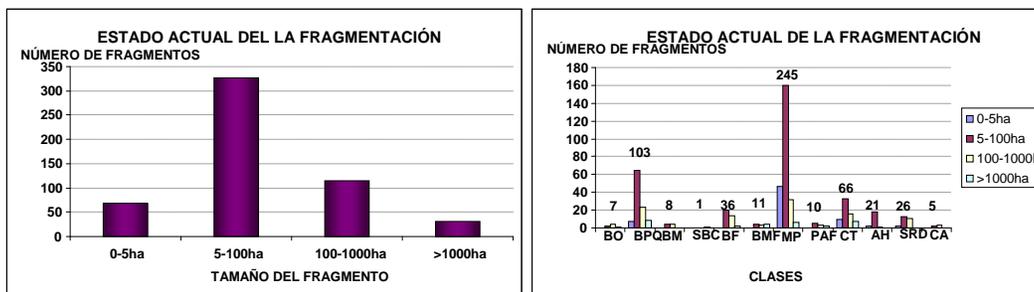


Figura 31. Estado actual de la fragmentación por tamaño del parche. BA= Bosque de abeto, BPO= Bosque de pino-encino, BM= Bosque mesófilo, SBC= Selva baja caducifolia, BF= Bosque fragmentado, BMF= Bosque muy fragmentado, MP= Matorral secundario y pastizal inducido, PAF= Cultivos de riego, CT= Cultivos de temporal, AH= Asentamiento humano, SRD= Suelo o roca desnudo, CA= Cuerpo de agua.

⁷ IC= cuando el paisaje consiste en un parche que tiene la forma de cuadrado simple y casi compacto. IC se incrementa sin límite alguno, lo que significa que el parche se encuentra más disgregado (la longitud del borde dentro del paisaje de un tipo de parche se incrementa, por ejemplo).

Este patrón es común en los ecosistemas forestales de la cuenca, donde la vegetación original consiste en bosques puros y mixtos de pino-encino. Se trata de un patrón que se caracteriza por fragmentos de bosque mixto de pino-encino de grandes dimensiones que se encuentran inmersos en una matriz de matorral secundario y cultivo de temporal. El proceso de fragmentación se caracteriza por una disminución de la superficie total del hábitat (bosque) y su ruptura en fragmentos más pequeños o islotes (Burel and Baudry, 2002). Este patrón es similar al encontrado, por un lado, en los Altos de Chiapas por Ochoa (2001), donde una matriz compuesta de pequeños (≤ 10 ha) y densos, pero dispersos fragmentos de bosque domina el paisaje forestal de montaña, separados todos ellos por vegetación secundaria (Matorrales Secundarios y Pastizales Inducidos) y, por otro, lo encontrado por Mas (1998) en la región de La Laguna de Términos, Campeche. En este último caso, por ejemplo, se observó un patrón representado por fragmentos pequeños. Así, la reducción del tamaño de los parches y la desaparición de otros tiene por consecuencia el aislamiento de los parches remanentes. El decrecimiento continuo del índice de proximidad refleja un patrón con parches pequeños y compactos, alrededor de los cuales se desarrolla un mosaico de usos de suelo, predominantemente de cultivos de temporal y matorrales secundarios.

Dinámica de la Fragmentación

A escala de las clases o paisajes

El incremento de la fragmentación trae consigo un aumento en la densidad y longitud de borde de los fragmentos, lo que repercute negativamente en otras variables, como el área promedio (disminución en el tamaño de la población; Hanski, 1989), el área núcleo, la adyacencia (llegada de nuevos colonizadores y reducción de la tasa de crecimiento; Fahrig y Merriam, 1985) y la diversidad de

los parches, sobre todo los de bosques maduros con vegetación potencial donde la pérdida de especies es evidente (Burel y Baudry, 2002).

Los resultados indican que el número de fragmentos en el año 2000 es 1.5 veces mayor que en 1976 (NP = 382) y 1986 (NP = 385), lo que conduce, por un lado, al incremento de la densidad de parches y, por otro, al decremento del área promedio de los mismos entre el periodo 1976 (AREA = 494 ha) y 2000 (AREA = 350 ha). Como resultado de lo anterior, se observa un incremento en el año 2000 de la longitud de borde entre los parches (LB = 3' 417, 780 m) que afecta el área núcleo y la adyacencia entre ellos, como lo evidencia la pérdida de conectividad entre de los fragmentos en 2000 (CONNECT = 0.52) con relación a 1986 (CONNECT = 0.59) y 1976 (CONNECT = 0.62); también se afecta la distribución de los parches a nivel del paisaje, como lo demuestra el índice de diversidad de Shannon que disminuye 0.08 fracciones porcentuales entre 1976 y 2000 (Tabla 11).

Tabla 11. Dinámica de la fragmentación a escala de paisaje.

DINAMICA DE LA FRAGMENTACION A ESCALA DE PAISAJE	NP	DP	DB	RPPG	LB	AREA	F	NAREA	CONNECT	IDSH
1976	382.000	0.088	7.117	3.879	3093000.000	494.082	2.063	46965.870	0.621	1.949
1986	385.000	0.089	7.360	3.879	3198660.000	490.232	2.061	44747.010	0.589	1.931
2000	539.000	0.124	7.864	6.729	3417780.000	350.166	1.943	43270.830	0.515	1.866

a) número y densidad de parches (NP, DP), b) representatividad paisajística del parche más grande (RPPG),

c) longitud y densidad de borde (LB, DB), d) área promedio de los parches (AREA), e) área núcleo (NAREA), f) conectividad (CONNECT) y, g) índice de diversidad de Shannon (I

El aumento de la longitud de borde y de la densidad de parches en el último periodo afecta la adyacencia y el área promedio de los parches del bosque de pino-encino que, contrariamente a lo esperado, incrementa en 1.2 y 2 veces su área núcleo y la proporción del parche más grande, respectivamente. Los resultados son comprensibles si se toma en cuenta que las pérdidas del área núcleo del bosque fragmentado afectaron al bosque de pino-encino en el año

2000. Por otro lado, el matorral secundario mostró una ligera fragmentación en el primer periodo, y una intensa en el segundo (1.7 veces), lo que lleva a una pérdida del 58% del área promedio de sus parches, y un incremento de 1.1 veces la longitud de borde.

Los efectos negativos en las condiciones ambientales y el funcionamiento de los ecosistemas forestales por la deforestación de los bosques templados de montaña son por demás evidentes. Mas (1998) señala, por ejemplo, que existe una pérdida de especies que afecta la riqueza biológica y la conservación de las especies amenazadas o en vía de extinción en la medida que el tamaño de los fragmentos disminuye, en tanto que el incremento del borde de los parches induce al desarrollo de vegetación secundaria, afectando de manera negativa el estrato arbustivo y herbáceo del bosque (Ochoa, 2001).

El patrón de la dinámica de la fragmentación a nivel de clases se caracteriza por grandes manchas de forma muy irregular ($F = 4.94$ y 5.28) de bosque de pino-encino, los cuales exceden las 1,000 ha en superficie, como lo evidencia la permanencia del parche más grande en las tres fechas de análisis y su representatividad en el paisaje que adquiere valores a la alza (1.17 veces) y parches más pequeños y compactos que oscilan entre las 5 y 1,000 ha, resaltando aquellos medianos (5 a 100 ha) que se incrementan en los últimos treinta años ($NP = 29, 32$ y 65). Este cambio se manifiesta, a su vez, en el aumento del borde y la reducción del área promedio de los parches de bosque de pino-encino y menor adyacencia entre los mismos.

De acuerdo al área promedio de los fragmentos por tipo de clase, el grupo de los bosques maduros experimenta pérdidas considerables, como lo demuestra bosque de oyamel, clase que reduce 61% del área en 2000, comparado a las exhibidas en 1976 y 1986; en tanto que los bosques de pino-encino

disminuyeron en un 30.24% aproximadamente. Como resultado del incremento constante de la longitud de borde en ambas clases, el área núcleo es el indicador de la fragmentación que muestra mayor dinamismo. Así, por ejemplo, el índice es más evidente en el bosque de oyamel, clase que pierde 45% de su área núcleo en el último periodo, respecto a lo exhibido durante el periodo de 1976 a 1986. Por otro lado, la clase correspondiente a los bosques de pino-encino elevó inesperadamente el valor. Este último ejemplo es entendible si se considera que los bosques de pino-encino muestran uno de ocho fragmentos muy grandes (> 1,000 ha) que permite aminorar la pérdida de este indicador de la fragmentación.

Un indicador importante que mide el grado de fragmentación a escala de clases es lo referente a la conectividad⁸. Este indicador considera que un parche individual de una misma clase tiene un valor nulo de conectancia. Este caso se ejemplifica con la selva baja caducifolia, cuya clase está representada sólo por un fragmento, lo que le confiere un índice de conectividad igual a cero. Con base en la misma forma, se puede observar como el cultivo de riego, que si bien está representado por 10 fragmentos en los tres periodos y lo cual supone mayor conectividad, al igual que la selva baja caducifolia obtiene valores de cero durante los dos primeros periodos, lo cual contrasta con el último donde esta clase adquiere parches con adyacencia igual a $CONNECT = 2.22$. Esto se explica debido a que los fragmentos se encuentran separados unos de los otros por radios de proximidad que superan los 250 m; localizándose muchos de ellos en las laderas bajas y fondo de cuenca pertenecientes al subgeosistema Ilc. Con

⁸ $0 \leq CONNECT \leq 100$

$CONNECT = 0$ cuando la clase consiste de un solo fragmento, bien cuando ninguno de los parches de una clase están conectados. (el radio de proximidad empleado en este caso es de 250 m para los parches del mismo tipo). $CONNECT = 100$ cuando el parche de una clase focal está conectado.

relación a la clase de bosques de pino-encino, la adyacencia entre fragmentos decrece entre 1976 y 2000 (CONNECT = 1.69 y 1.25, respectivamente), debido al incremento de aberturas en los terrenos de vegetación secundaria (matorrales y pastizales) y cultivada, como en los cultivos de temporal.

La sustitución de los bosques maduros, y por ende la fragmentación de estos ecosistemas por la vegetación secundaria, no fue del toda notoria durante el primer periodo de estudio, no obstante, hubo incrementos sustanciales entre los años 1986 y 2000 (NP = 201 y 292, respectivamente), siendo, a escala de clases, los matorrales secundarios y pastizales inducidos las cubiertas que presentaron la mayor fragmentación y también los fragmentos más dinámicos, en cuanto a su forma y estructura, en los últimos treinta años (NP=163 en 1976 a NP=245 en 2000). El tamaño de los fragmentos de este grupo obedece a la parcelación paulatina de un fragmento muy grande (>1,000 ha) en parches grandes (100-1,000 ha), durante el primer periodo, y medianos (5-100 ha) durante el segundo. Este grupo se caracterizó por una parcelación exacerbada de matorrales secundarios y pastizales inducidos en las tres fechas de análisis (NP = 163, 144, 245). Se trata de fragmentos medianos (5-100 ha) cuyo número se elevó sustancialmente entre el periodo de 1976 al 2000 (NP = 129 y 160, respectivamente), seguido de fragmentos grandes (100-1,000 ha; NP = 23 y 32). El bosque fragmentado, por otro lado, es una clase de cubierta de suelo que se caracteriza por fragmentos medianos y grandes, los cuales representan el 95% de la fragmentación de esta clase. De menor cuantía se exhibe el bosque muy fragmentado, cuya fragmentación está personificada por fragmentos grandes (100-1,000 ha) y muy grandes (>1,000 ha), que llegaron a representar entre 60 y 90% de la fragmentación de esta clase. Cabe mencionar que, mientras el bosque muy fragmentado eleva sus fragmentos medianos (grandes y muy grandes en el primer periodo), el bosque fragmentado muestra al mismo tiempo detrimentos de parches del mismo tamaño (Figura 32).

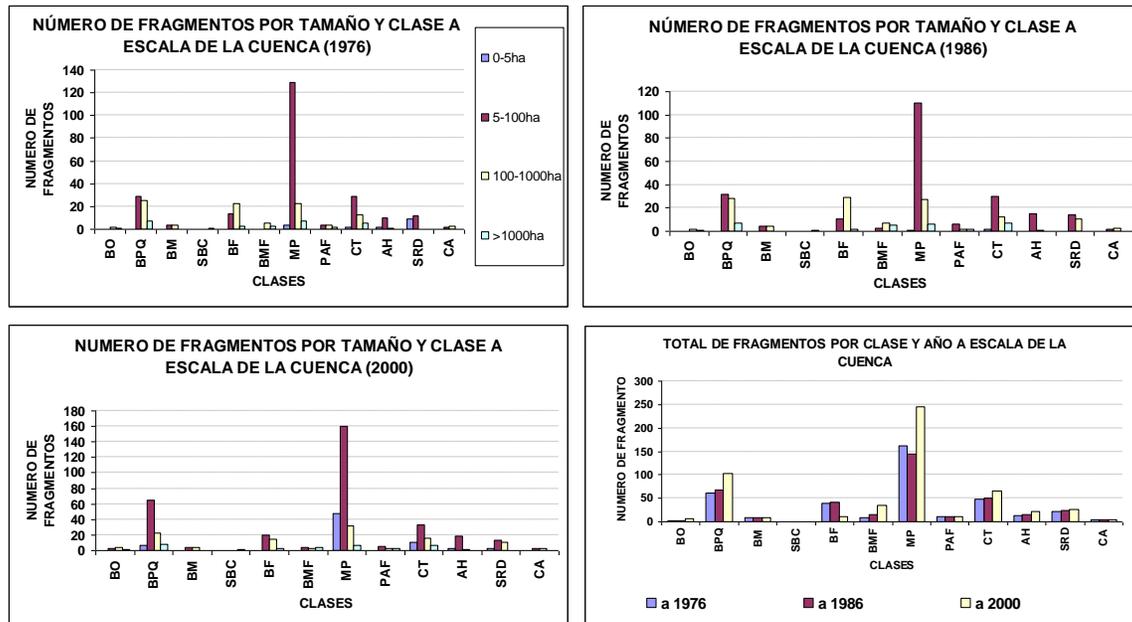


Figura 32. Dinámica de fragmentación por tamaño y clase de fragmento a escala de cuenca. BA= Bosque de abeto, BPQ= Bosque de pino-encino, BM= Bosque mesófilo, SBC= Selva baja caducifolia, BF= Bosque fragmentado, BMF= Bosque muy fragmentado, MP= Matorral secundario y pastizal inducido, PAF= Cultivos de riego, CT= Cultivos de temporal, AH= Asentamiento humano, SRD= Suelo o roca desnudo, CA= Cuerpo de agua.

Uno de los indicadores para evaluar los efectos de la fragmentación sobre ciertas variables ambientales es la longitud de borde. Su reducción afecta de manera directa otros indicadores de la fragmentación, a mencionar: el área promedio de los parches, el área núcleo, la representación paisajística del parche más grande y la adyacencia entre fragmentos de una misma clase. Ejemplificando lo antes expuesto, se observa como el área promedio de los fragmentos de bosque fragmentado y de los matorrales y pastizales decrece considerablemente en los últimos treinta años, a partir de la pérdida o reducción de borde, como lo demuestra la fragmentación de los pastizales que tuvo incrementos entre 1976 y 2000 (NP = 163 y 245, respectivamente).

Del mismo modo, la dinámica mostrada por el borde no sólo influyó, de forma negativa, en el remanente de área núcleo, sino también en la conectividad entre fragmentos. Así, por ejemplo, sobresale la pérdida de área núcleo que exhibió el bosque fragmentando al pasar de 1,031 ha, en 1976, a 694 ha en 1986, para finalmente situarse en las 429 ha en el año 2000. De la misma manera que la anterior clase, el bosque muy fragmentado mostró pérdidas significativas de área núcleo (alrededor de 2,358 ha) en el primer periodo, y de 442 ha en el segundo. No menos importante que los anteriores casos, los matorrales y pastizales también registraron un retroceso, mostrando un decremento igual a 234 y 387 ha en el primer y segundo periodo, respectivamente.

Si en 1976 las clases de bosques fragmentados y muy fragmentados exhibieron un índice de conectividad similar al grupo de clases de los bosques maduros, este indicador de la fragmentación mostró pérdidas notables en 1986 y 2000. Tal comportamiento se explica debido al retroceso del área boscosa en los bordes de los fragmentos medianos y chicos en las dos últimas fechas, así como de los bosques fragmentados y muy fragmentados, los cuales se localizan unos con respecto de otros más allá del umbral establecido por el criterio de distancia: 250 m (Figura 33).

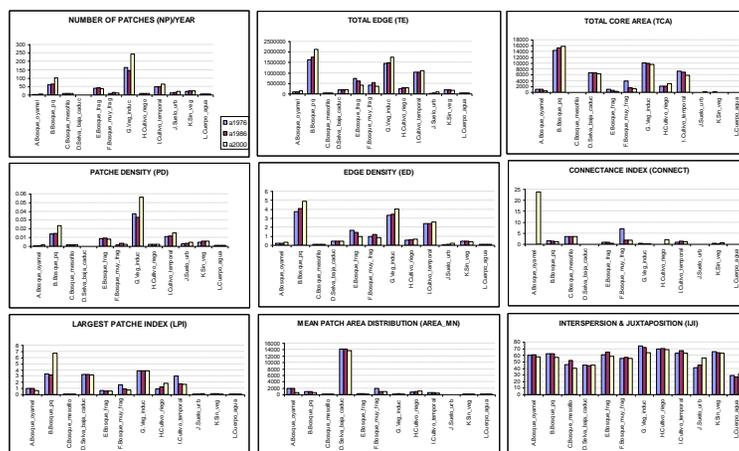


Figura 33. Dinámica de la fragmentación por clases a escala de la cuenca.

4.2. Estado actual y dinámica de la fragmentación a escala de geosistemas

Estado Actual

El patrón de fragmentación se presentó de forma contrastante en los tres geosistemas de la cuenca en estudio. En el abetal de altas cumbres volcánicas (geosistema I), el patrón está definido por una moderada presencia de fragmentos pequeños (NP = 13) y medianos (NP = 18) que en conjunto representaron 80% de la fragmentación, seguido de los parches grandes (NP = 7) y muy grandes (NP = 1). El bosque de pino-encino de las laderas y cumbres volcánicas (geosistema II) es el geosistema que exhibió la mayor fragmentación, la cual se caracteriza, al igual que el geosistema I, por fragmentos medianos (NP = 331), seguido de pequeños (NP = 114) y grandes (NP = 114), los cuales sumaron en conjunto 95% de la parcelación de este sistema. Por otro lado, la Selva Baja Caducifolia de laderas sedimentarias bajas (geosistema III) no presentaron, como en los geosistemas I y II, cambios sustanciales en su patrón de fragmentación, ya que entre 33% y 47% de su fragmentación corresponde a parches chicos y medianos.

Al considerar las clases de cubiertas de suelo y el tamaño de los fragmentos, geosistema II destacó como el sistema con mayor fragmentación, caracterizada por numerosos fragmentos (NP = 270) de matorrales secundarios y pastizales, que representaron 46% de la fragmentación del sistema, siendo los medianos (5-100 ha) los parches con mayor representación (NP = 170), seguidos de fragmentos de igual tamaño de bosque de pino-encino (NP = 65) y cultivo de temporal (NP = 26). En cambio, el geosistema I se distinguió por el dominio de los fragmentos de cultivo de temporal (47% de la fragmentación del sistema), seguidos de aquellos de bosque fragmentado (33%) y bosque de pino-encino (10%). Por su tamaño, en el geosistema I resaltaron los fragmentos pequeños y medianos, exceptuando el bosque de pino-encino, que está representado por dos

fragmentos grandes que ocupan las más altas cumbres de este sistema (Tabla 12).

Tabla 12. Clase por tamaño de fragmento. BA= Bosque de abeto, BPQ= Bosque de pino-encino, BM= Bosque mesófilo, SBC= Selva baja caducifolia, BF= Bosque fragmentado, BMF= Bosque muy fragmentado, MP= Matorral secundario y pastizal inducido, PAF= Cultivos de riego, CT= Cultivos de temporal, AH= Asentamiento humano, SRD= Suelo o roca desnudo, CA= Cuerpo de agua.

G1	BA	BPQ	BM	SBC	BF	BMF	MP	PAF	CT	AH	SRD	CA	TOTAL	%
0-5ha	0	1	0	0	6	0	0	0	6	0	0	0	13	33.33
5-100ha	0	1	0	0	6	0	1	0	10	0	0	0	18	46.15
100-1000ha	1	2	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	7	17.95
>1000ha	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2.56
total	2	4	0	0	13	0	3	0	17	0	0	0	39	
%	5.13	10.26	0.00	0.00	33.33	0.00	7.69	0.00	43.59	0.00	0.00	0.00		100.00
G2														
0-5ha	7	14	0	1	3	3	61		14	3	8	0	114	19.39
5-100ha	6	65	4	3	21	4	170	3	26	18	9	2	331	56.29
100-1000ha	7	21	4	0	13	5	33	2	15	1	10	3	114	19.39
>1000ha		8	0	0	2	4	6	2	7	0	0	0	29	4.93
total	20	108	8	4	39	16	270	7	62	22	27	5	588	
%	3.40	18.37	1.36	0.68	6.63	2.72	45.92	1.19	10.54	3.74	4.59	0.85		100.00
G3														
0-5ha	0	5	0	0	0	7	0	4	0	0	3	0	19	33.33
5-100ha	0	1	0	0	0	10	1	6	4	1	4	0	27	47.37
100-1000ha	0	0	0	0	1	2	1	2	1	0	1	0	8	14.04
>1000ha	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	3	5.26
total	0	6	0	1	1	19	4	12	5	1	8	0	57	
%	0	10.53	0.00	1.75	1.75	33.33	7.02	21.05	8.77	1.75	14.04	0.00		100.00

La Tabla 13 demuestra que pese a que el geosistema II fue el sistema más diverso (IDSH = 1.70), sus fragmentos fueron los menos conectados (CONNECT = 0.51) en sus 3,116 km de borde.

Tabla 13. Indicadores de la fragmentación por geosistema a escala de la cuenca. a) número y densidad de parches (NP, DP), b) representatividad paisajística del parche más grande (RPPG), c) longitud y densidad de borde (LB, DB), d) área promedio de los parches (AREA), e) área núcleo (NAREA), f) conectividad (CONNECT) y, g) índice de diversidad de Shannon (IDSH).

SISTEMA	NP	DP	RPPG	LB	DB	AREA	NAREA	CONNECT	IDSH
G1	39.00	0.01	0.52	53910.00	0.12	122.40	164.34	2.68	1.15
G2	588.00	0.14	6.83	3116100.00	7.17	264.90	28275.66	0.51	1.70
G3	57.00	0.01	3.14	248460.00	0.57	494.22	10915.29	4.73	1.09

A nivel de clases, el geosistema II fue el más diverso (12 clases de cubiertas del suelo), seguido de los geosistemas III y I (con 9 y 5, respectivamente). Las cubiertas del suelo con la mayor cantidad de fragmentos fueron el matorral secundario (NP = 270 parches) y el bosque de pino-encino (NP = 108) en geosistema II, en tanto que el bosque muy fragmentado lo es en G3 (NP=19) y el cultivo de temporal en geosistema I (NP=17). El parche más grande correspondió a un fragmento de bosque de pino-encino en el geosistema II (LPI=6.83), seguido de uno de selva baja caducifolia en geosistema III (LPI=3.13), y de uno de bosque de abeto en geosistema I (LPI=0.52). Como es de esperar, el bosque de pino-encino, en el geosistema II, fue la cubierta de suelo con la mayor área núcleo (TCA=15,150 ha). Cabe destacar también la representatividad paisajística de los parches más grandes, tanto en cultivo de riego (LPI=1.56) como en cultivo de temporal (LPI = 1.68) en geosistema II, siendo PAF la clase con la segunda mayor conectividad (CONNECT = 4.76) en el paisaje de las laderas y cumbres volcánicas, sólo por debajo de bosque de oyamel (CONNECT = 5.79) (Figura 34).

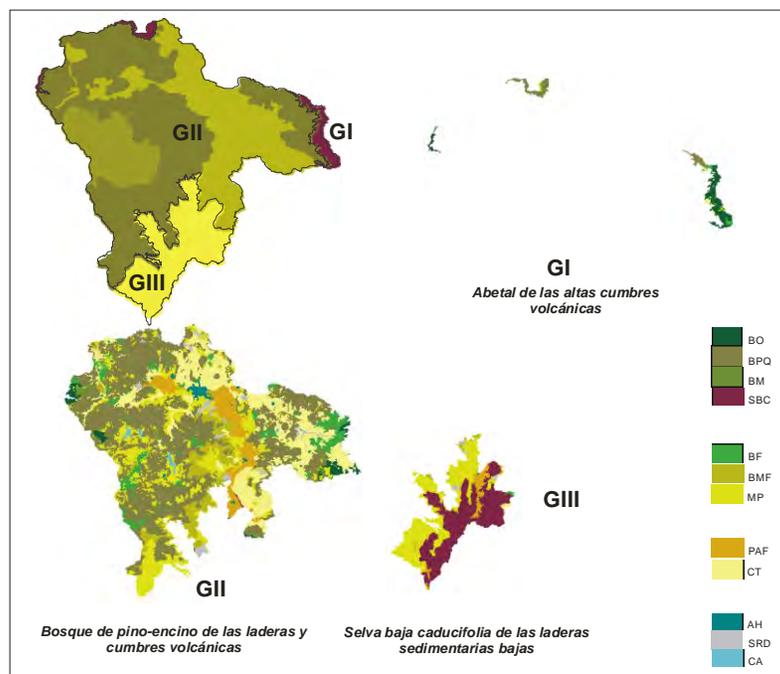


Figura 34. Clases de cubiertas de suelo por geosistema.

Dinámica

A escala detallada, la fragmentación mostró que los parches chicos, medianos y grandes son los más dinámicos en la escala de los sistemas, específicamente en el geosistema II, donde para el año 2000 el proceso se intensificó 1.40 veces respecto del ocurrido en 1976, en tanto que los geosistema I y III mantuvieron prácticamente el mismo número de parches en el mismo periodo. De la fragmentación exhibida en el geosistema II, resaltan los fragmentos chicos (0-5 ha) y medianos (5-100 ha) que se incrementaron a razón 2.92 y 1.40 veces durante el año 2000, en comparación con 1976. La Figura 35 muestra que la cantidad de fragmentos grandes (100-1,000 ha) y muy grandes (>1,000 ha) se mantiene prácticamente sin cambios importantes en sitios inaccesibles de las altas cumbres volcánicas y sobre las laderas sedimentarias bajas de la cuenca.

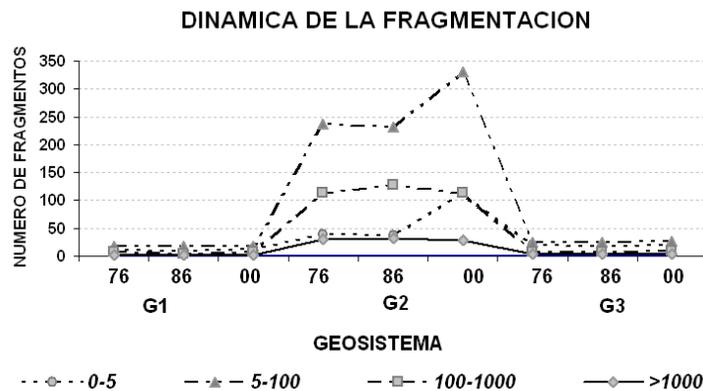


Figura 35. Dinámica de la fragmentación por geosistema.

A escala de clases, resalta la fragmentación de matorrales secundarios y pastizales inducidos (MP) en el geosistema II, representando el 44% (en 1976) y el 45% (en 2000) de la fragmentación total del sistema en los últimos treinta años, resaltando los fragmentos medianos (5-100 ha) y chicos (0-5 ha), así como parches medianos y grandes de cultivos de temporal en las tres fechas de análisis. Los bosques de pino-encino se encuentran separados por un intrincado mosaico de fragmentos MP y CT, que si bien no exhiben la misma fragmentación

(entre 15 y 18% de la fragmentación del geosistema II) que MP, si llegan a tener una representatividad paisajística destacada, como lo demuestran sus fragmentos grandes y muy grandes en 1976 (NP = 25;7), 1986 (NP = 26;7) y 2000 (NP = 21;8).

De las nueve clases de cubiertas del suelo que exhibe la selva baja caducifolia de las laderas sedimentarias bajas (geosistema III), resaltan por su dinámica: los bosques muy fragmentados, el suelo desprovisto de vegetación y los bosques de pino-encino. Los bosques de pino-encino, por ejemplo, incrementaron sus fragmentos chicos (0-5 ha) y medianos (5-100 ha) en los dos periodos de análisis, mientras que los bosques muy fragmentados los redujeron entre 1976 y 1986 (NP = 9 y 7, respectivamente), manteniendo el mismo número de fragmentos medianos y grandes (100-1,000 ha) en los últimos treinta años (Tabla 14).

Tabla 14. Dinámica de la fragmentación por geosistema, clase de cubierta y tamaño del fragmento.

TAMAÑO (HA)	G1												G2						G3								
	1970			1986			2000			1970			1986			2000			1970		1986		2000				
	BO	BPO	BM	SBC	BF	BMF	MP	PAF	CT	AH	SRD	CA	TOTAL	BO	BPO	BM	SBC	BF	BMF	MP	PAF	CT	AH	SRD	CA	TOTAL	
TOTAL	35	30	39	418	427	588	55	53	57																		
a1976	0	1	0	0	6	0	0	0	3	0	0	0	10	0	1	0	0	6	0	1	0	9	0	0	0	17	
0-5ha	0	1	0	0	6	0	0	0	3	0	0	0	10	0	1	0	0	6	0	1	0	9	0	0	0	17	
5-100ha	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	7	
100-1000ha	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
>1000ha	2	4	0	0	13	0	4	0	12	0	0	0	35	2	4	0	0	13	0	4	0	12	0	0	0	35	
a1986	0	1	0	0	6	0	0	0	1	0	0	0	8	0	1	0	0	6	0	2	0	8	0	0	0	17	
0-5ha	0	1	0	0	6	0	0	0	1	0	0	0	17	0	1	0	0	6	0	2	0	8	0	0	0	17	
5-100ha	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	7	
100-1000ha	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
>1000ha	2	4	0	0	13	0	2	0	9	0	0	0	30	2	4	0	0	13	0	2	0	9	0	0	0	30	
a2000	0	1	0	0	6	0	0	0	5	0	0	0	13	0	1	0	0	6	0	0	10	0	0	0	0	18	
0-5ha	0	1	0	0	6	0	0	0	5	0	0	0	13	0	1	0	0	6	0	0	10	0	0	0	0	18	
5-100ha	1	2	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	7	1	2	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	7	
100-1000ha	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
>1000ha	2	4	0	0	13	0	3	0	17	0	0	0	39	2	4	0	0	13	0	3	0	17	0	0	0	39	
a1976	3	2	0	1	0	1	19	7	1	5			39	3	2	0	1	0	1	19	7	1	5			39	
0-5ha	3	2	0	1	0	1	19	7	1	5			39	3	2	0	1	0	1	19	7	1	5			39	
5-100ha	4	29	4	3	14	1	136	2	24	11	6	2	236	4	25	4	3	11	4	170	3	26	18	9	2	331	
100-1000ha	4	25	4	1	22	5	23	3	11	1	11	3	113	4	21	4	3	13	5	33	2	15	1	10	3	114	
>1000ha	1	7	0	3	4	7	2	6					30	1	7	0	3	4	7	2	6					30	
total	12	63	8	5	39	11	185	7	48	13	22	5	418	12	63	8	5	39	11	185	7	48	13	22	5	418	
a1986	0	4	0	1	0	3	15	7	2	5			37	0	4	0	1	0	3	15	7	2	5			37	
0-5ha	0	4	0	1	0	3	15	7	2	5			37	0	4	0	1	0	3	15	7	2	5			37	
5-100ha	4	32	4	3	11	4	117	4	25	14	12	2	232	4	32	4	3	11	4	117	4	25	14	12	2	232	
100-1000ha	4	26	4	1	28	9	29	1	11	1	10	3	127	4	26	4	1	28	9	29	1	11	1	10	3	127	
>1000ha	1	7	0	3	4	7	2	6					31	1	7	0	3	4	7	2	6					31	
total	9	69	8	5	41	22	167	7	50	17	27	5	427	9	69	8	5	41	22	167	7	50	17	27	5	427	
a2000	7	14	4	3	21	4	170	3	26	18	9	2	331	7	14	4	3	21	4	170	3	26	18	9	2	331	
0-5ha	7	14	4	3	21	4	170	3	26	18	9	2	331	7	14	4	3	21	4	170	3	26	18	9	2	331	
5-100ha	6	65	4	3	13	5	33	2	15	1	10	3	114	6	65	4	3	13	5	33	2	15	1	10	3	114	
100-1000ha	7	21	4	3	24	1	2	1	1	0	1	0	7	7	21	4	3	24	1	2	1	1	0	1	0	7	
>1000ha	8	2	4	6	2	7							29	8	2	4	6	2	7							29	
total	20	108	8	4	39	16	270	7	62	22	27	5	588	20	108	8	4	39	16	270	7	62	22	27	5	588	
a1976	0	4	0	0	1	9	0	4	0	2	0	0	20	0	4	0	0	1	9	0	4	0	2	0	0	0	20
0-5ha	0	4	0	0	1	9	0	4	0	2	0	0	20	0	4	0	0	1	9	0	4	0	2	0	0	0	20
5-100ha	0	0	0	0	0	10	1	6	3	1	3	0	24	0	0	0	0	0	10	1	6	3	1	3	0	0	24
100-1000ha	0	0	0	0	1	2	1	1	1	0	1	0	7	0	0	0	0	1	2	1	1	0	1	0	0	0	7
>1000ha	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	4
total	0	4	0	1	2	21	4	12	4	1	6	0	55	0	4	0	1	2	21	4	12	4	1	6	0	55	
a1986	0	4	0	0	1	7	0	4	0	2	0	0	18	0	4	0	0	1	7	0	4	0	2	0	0	0	18
0-5ha	0	4	0	0	1	7	0	4	0	2	0	0	18	0	4	0	0	1	7	0	4	0	2	0	0	0	18
5-100ha	0	1	0	0	10	1	6	3	1	2	0	0	24	0	1	0	0	10	1	6	3	1	2	0	0	0	24
100-1000ha	0	0	0	0	1	2	1	1	0	1	0	0	7	0	0	0	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0	7
>1000ha	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	4
total	0	5	0	1	2	19	4	12	4	1	5	0	53	0	5	0	1	2	19	4	12	4	1	5	0	53	
a2000	0	5	0	0	7	0	4	0	0	3	0	0	19	0	5	0	0	7	0	4	0	0	3	0	0	0	19
0-5ha	0	5	0	0	7	0	4	0	0	3	0	0	19	0	5	0	0	7	0	4	0	0	3	0	0	0	19
5-100ha	0	1	0	0	10	1	6	3	1	4	0	0	27	0	1	0	0	10	1	6	3	1	4	0	0	0	27
100-1000ha	0	0	0	0	1	2	1	1	0	1	0	0	8	0	0	0	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0	8
>1000ha	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	3
total	0	6	0	1	1	19	4	12	5	1	8	0	57	0	6	0	1	1	19	4	12	5	1	8	0	57	

De los tres geosistemas, el geosistema II es el que muestra mayor incremento de la fragmentación entre 1986 y 2000 (NP = 427 y 588, respectivamente), con consecuencias en el incremento de la diversidad ($1.69 < \text{SHDI} < 1.79$), la densidad de parches (0.098 y 0.13/100 ha) y la longitud de borde (TE = 2,917,200 y 3,116,100 m), afectando la adyacencia entre parches (CONNECT = 0.50) en la última fecha. Con relación al área núcleo (TCA), los tres geosistemas presentan valores decrecientes entre el inicio y final del periodo de estudio, siendo geosistema II el que resultó con mayores pérdidas (3,239 ha), seguido de geosistema I (151 ha) y geosistema III (117 ha). Sin embargo, en las laderas y cumbres volcánicas (geosistema II) la representación del parche más grande incrementa 2.12 veces su tamaño en el último periodo, beneficiando el remanente de área núcleo de los bosques de pino-encino.

La fragmentación en geosistema II afecta también el remanente de área núcleo del matorral secundario que se redujo de 3,354 ha a 2,812 ha, contrario al bosque de pino-encino que presenta aumentos significativos de 1976 a 2000 (TCA=13, 863 y 15, 150 ha, respectivamente). Sin embargo, la adyacencia entre parches decae en ambas clases, afectando principalmente al bosque de pino-encino. Dentro del grupo de la vegetación secundaria, los bosques fragmentados y muy fragmentados exhibieron una parcelación más aguda en el primer periodo que afectó no sólo la representatividad de sus parches más grandes, sino también el área promedio de los fragmentos, siendo el bosque muy fragmentado la clase más afectada en relación al área núcleo y adyacencia entre parches, con decrementos de 2.5 y 1.68 veces, respectivamente. La fragmentación del grupo vegetación cultivada fue más acusada en el caso del cultivo de temporal que incrementa 1.2 veces el número de fragmentos, en tanto que el cultivo de riego se mantiene constante. No obstante lo anterior, en el geosistema II la representatividad del parche más grande de cultivo de riego aumenta el valor de LPI de 0.90 a 1.56 entre el inicio y el final del periodo.

Cabe aclarar que otras clases de cubierta de suelo no presentan cambios significativos en el número de fragmentos en los tres geosistemas, a mencionar: BO, BPQ y BF en el geosistema I; BM, PAF y CA en el geosistema II y; SBC, PAF y AH en el geosistema III, aunque sí en otras métricas de la fragmentación. Por ejemplo, en el geosistema I el bosque de abeto disminuyó la representatividad del parche más grande en el último periodo, lo que trajo como consecuencia la reducción de 123 ha de área núcleo y 46 ha de área promedio de los fragmentos. En este mismo sistema se observa que, a pesar que BPQ, mantiene su fragmentación en las tres fechas de análisis, la longitud de borde disminuye paulatinamente, lo que amplía en 3.55 veces el remanente de área núcleo entre 1976 y 2000 (NAREA = 10.62 y 37.80, respectivamente) (Tabla 15 y Figura 36).

Tabla 15. Métricas de la fragmentación a escala de clases por geosistema. 1) Número y densidad de parches (NP, DP), 2) representatividad paisajística del parche más grande (RPPG), 3) longitud y densidad de borde (LB, DB), 4) área promedio de los parches (AREA), 5) área núcleo (NAREA) y, 6) conectividad (CONNECT).

	NP			DP			RPPG			LB		
	76	86	2000	76	86	2000	76	86	2000	76	86	2000
G1												
BO	2	2	2	0.00	0.00	0.00	0.54	0.54	0.52	25020.00	29160.00	41640.00
BPQ	4	4	4	0.00	0.00	0.00	0.22	0.23	0.22	14010.00	10110.00	9990.00
BF	13	13	13	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.03	14910.00	17100.00	17100.00
MP	4	2	3	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	10650.00	6750.00	12390.00
CT	12	9	17	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	18030.00	19980.00	26700.00
G2												
BO	12	9	20	0.00	0.00	0.00	0.38	0.37	0.16	80580.00	75180.00	107790.00
BPQ	63	69	108	0.01	0.02	0.02	3.24	3.23	6.83	1618080.00	1757880.00	2125320.00
BM	8	8	8	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.10	60180.00	61500.00	60000.00
SBC	5	5	4	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	19560.00	19560.00	16530.00
BF	39	41	39	0.01	0.01	0.01	0.65	0.52	0.52	716250.00	602760.00	404820.00
BMF	11	22	16	0.00	0.01	0.00	1.58	0.90	0.79	400740.00	508620.00	340050.00
MP	185	167	270	0.04	0.04	0.06	1.06	1.05	1.08	1282170.00	1324620.00	1589190.00
PAF	7	7	7	0.00	0.00	0.00	0.91	1.22	1.56	175650.00	208860.00	214230.00
CT	48	50	62	0.01	0.01	0.01	2.99	1.78	1.68	1020360.00	1013730.00	1083510.00
AH	13	17	22	0.00	0.00	0.01	0.07	0.07	0.20	35190.00	45990.00	92880.00
SRD	22	27	27	0.01	0.01	0.01	0.19	0.13	0.08	171300.00	173910.00	156360.00
CA	5	5	5	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.06	41520.00	41700.00	41520.00
G3												
BPQ	4	5	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1530.00	2790.00	2850.00
SBC	1	1	1	0.00	0.00	0.00	3.20	3.21	3.14	176310.00	176310.00	178110.00
BF	2	2	1	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	4140.00	4140.00	4110.00
BMF	21	19	19	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04	26580.00	27420.00	27180.00
MP	4	4	4	0.00	0.00	0.00	1.64	1.64	1.64	164670.00	164310.00	166320.00
PAF	12	12	12	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	0.32	79410.00	79050.00	80940.00
CT	4	4	5	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04	13320.00	13140.00	12870.00
AH	1	1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1950.00	1770.00	1770.00
SRD	6	5	8	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	18810.00	16110.00	22770.00
G4												
	DB			AREA			NAREA			CONNECT		
BO	0.06	0.07	0.10	1299.60	1303.34	1257.44	290.34	249.84	126.54	0.00	0.00	0.00
BPQ	0.03	0.02	0.02	377.57	384.10	381.20	10.62	35.82	37.80	0.00	0.00	0.00
BF	0.03	0.04	0.04	28.12	21.23	21.23	14.40	0.00	0.00	3.85	3.85	3.85
MP	0.02	0.02	0.03	25.72	38.39	43.02	0.00	0.00	0.00	16.67	0.00	0.00
CT	0.04	0.05	0.06	16.35	30.90	19.36	0.00	0.00	0.00	1.52	5.56	2.21
G5												
BO	0.19	0.17	0.25	256.37	334.55	127.63	419.67	425.79	141.57	1.52	2.78	5.79
BPQ	3.72	4.04	4.89	885.37	837.50	610.77	13863.06	14682.60	15150.33	1.54	1.28	1.25
BM	0.14	0.14	0.14	117.42	119.63	119.62	31.77	35.73	35.73	3.57	3.57	3.57
SBC	0.05	0.05	0.04	58.90	58.90	42.64	0.00	0.00	0.00	10.00	10.00	0.00
BF	1.65	1.39	0.93	369.53	302.07	202.82	975.60	652.50	388.44	0.94	0.98	1.08
BMF	0.92	1.17	0.78	1325.30	595.14	594.64	3833.82	1528.65	1043.28	3.64	2.16	2.50
MP	2.95	3.05	3.66	139.64	160.75	98.25	3354.48	3187.89	2812.14	0.34	0.29	0.30
PAF	0.40	0.48	0.49	994.33	1116.19	1256.91	2010.33	2106.72	2791.53	0.00	0.00	4.76
CT	2.35	2.33	2.49	621.12	591.99	469.26	7132.95	6814.08	5757.21	1.24	1.47	1.16
AH	0.08	0.11	0.21	34.19	33.32	61.50	4.50	4.50	117.27	0.00	0.00	0.00
SRD	0.39	0.40	0.36	137.34	103.94	84.22	98.64	25.83	38.16	1.30	0.85	1.14
CA	0.10	0.10	0.10	130.07	130.07	129.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G6												
BPQ	0.00	0.01	0.01	1.80	3.47	2.91	0.00	0.00	0.00	83.33	30.00	20.00
SBC	0.41	0.41	0.41	13926.69	13930.02	13631.04	6654.51	6654.06	6388.38	0.00	0.00	0.00
BF	0.01	0.01	0.01	51.62	51.62	102.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BMF	0.06	0.06	0.06	24.90	26.94	26.99	0.00	0.00	0.00	3.33	2.92	2.92
MP	0.38	0.38	0.38	2881.85	2886.82	2874.92	4400.01	4394.97	4394.97	0.00	0.00	0.00
PAF	0.18	0.18	0.19	123.62	123.01	147.94	37.89	37.89	131.94	1.52	1.52	1.52
CT	0.03	0.03	0.03	78.01	78.73	57.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00
AH	0.00	0.00	0.00	16.83	14.31	14.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SRD	0.04	0.04	0.05	45.18	51.10	41.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.29

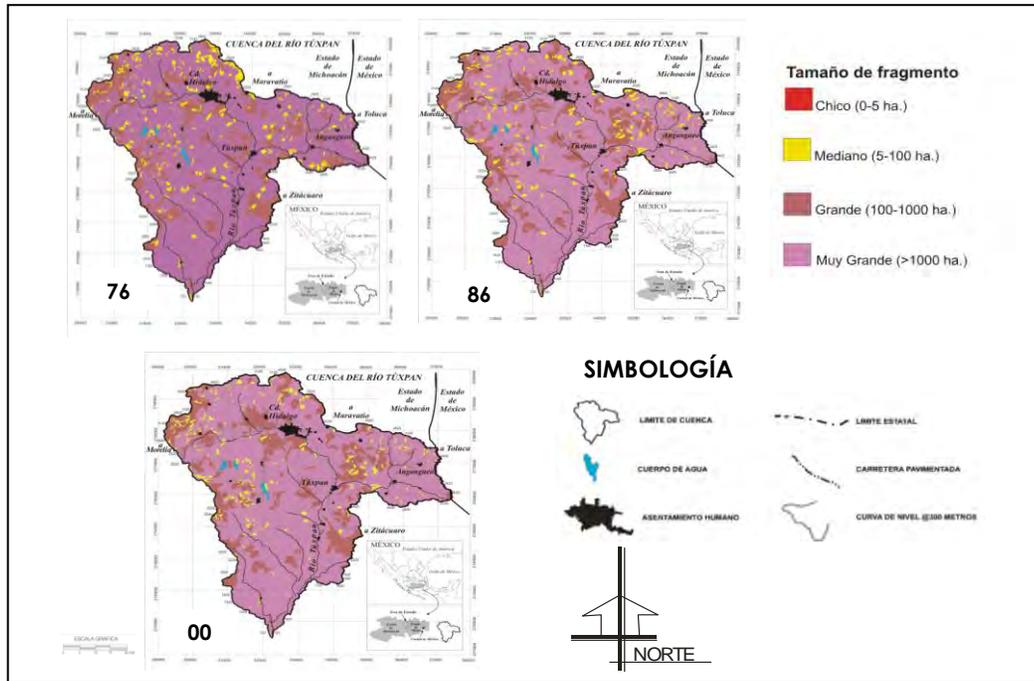


Figura 36. Mapa de dinámica de la fragmentación a escala del tamaño del fragmento.

4.3. Estado actual y dinámica de la fragmentación a escala de subgeosistemas

El geosistema de bosque de pino-encino de laderas y cumbres volcánicas (geosistema II) ha sido diferenciado en subunidades taxonómicas: los subgeosistemas. Si bien es cierto que estas subunidades no comparten un mismo ambiente bioclimático, no es menos cierto que subgeosistemas difieran en sus contenidos morfo-litológicos, con consecuencias sobre la distribución de recursos, la sensibilidad de las laderas y el patrón de usos de suelo (Romero *et al.*, 2005). En su interior, estas unidades de paisaje no son homogéneas, por el contrario están formadas por paisajes elementales los cuales corresponden con estados específicos de respuesta del subgeosistema frente a procesos de disturbio o regeneración post-disturbio (Muñoz, 1998) (Figura 37).

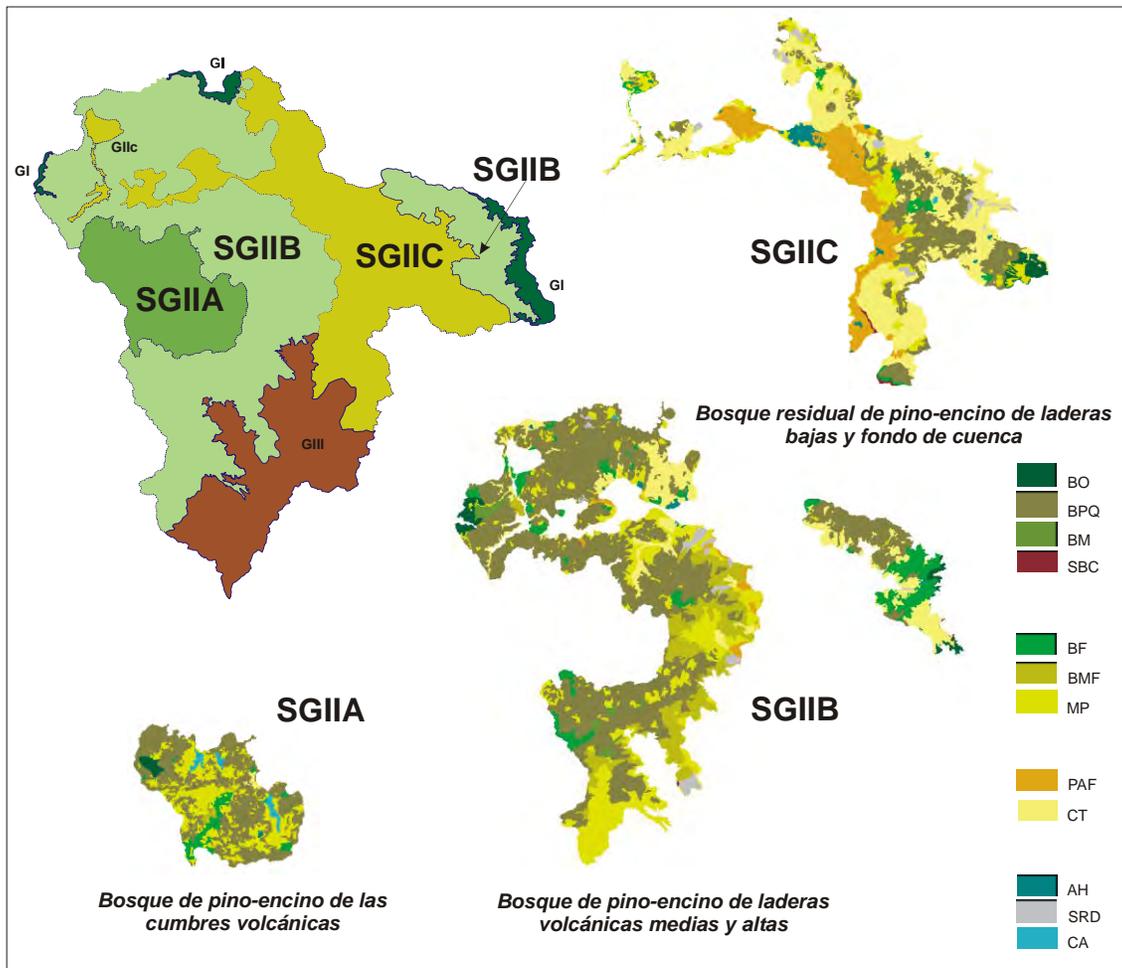


Figura 37. Cubierta de suelo a nivel de los subgeosistemas.

Estado Actual

El subgeosistema del bosque de pino-encino de las laderas volcánicas medianas y altas (subgeosistema IIb) es el más fragmentado ($NP = 522$), como lo evidencia la densidad de parches ($PD = 0.12$) y la longitud de borde ($TE=1'558, 230$ m), seguido del bosque residual de pino-encino de las laderas bajas y fondo de cuenca (SGIIC) ($NP=358$) y bosque de pino-encino de las cumbres volcánicas (subgeosistema IIa) ($NP=124$). Si bien SGIIB exhibe la mayor cantidad de área núcleo ($TCA = 14,262$ ha), el subgeosistema IIc muestra una distribución más equitativa de los parches ($SHDI = 1.60$), en tanto que el subgeosistema IIa

presenta la mayor adyacencia ($CONNECT = 2.46$) de los subgeosistemas, siendo el subgeosistema Iib el menos conectado ($CONNECT = 0.75$). El área promedio de los parches fue similar en el subgeosistema Iia ($AREA=163$ ha) y el subgeosistema Iib ($AREA=165$ ha), en tanto que en el subgeosistema Iic adquiere valores inferiores ($AREA=135$ ha). La representación paisajística del parche más grande fue notable en el subgeosistema Iib ($LPI=2.60$), representado por un fragmento de amplias dimensiones (11,333 ha).

A nivel de clases, el matorral secundario mostró la mayor cantidad y densidad de parches en el subgeosistema Iib ($NP = 184$) y el subgeosistema Iia ($NP = 78$), en comparación con el subgeosistema Iic, donde el bosque de pino-encino adquirió los valores más altos ($NP = 134$). Al igual que en los geosistemas, el parche más grande de bosque de pino-encino obtuvo valores altos de representatividad paisajística, específicamente en el subgeosistema Iib ($LPI=2.60$) y el subgeosistema Iia ($LPI=1.39$), en tanto que en el subgeosistema Iic el cultivo de riego superó 1.8 veces al bosque de pino-encino. Del total de área núcleo, el bosque de pino-encino exhibió un 75% en el subgeosistema Iia, un 68% en el subgeosistema Iib y tan sólo 14% en el subgeosistema Iic, donde el cultivo de temporal adquiere 50% del área núcleo. Los bosques fragmentado y muy fragmentado obtienen valores casi nulos de área núcleo en los subgeosistemas Iic y Iia, y altos en el subgeosistema Iib ($TCA = 364$ y $1,035$ ha, respectivamente), al igual que el matorral secundario ($TCA = 2,274$ ha). Respecto a la adyacencia entre parches, el bosque muy fragmentado registra los datos más favorables en los subgeosistemas Iia ($CONNECT = 13.33$) y subgeosistema Iib ($CONNECT = 3.84$), en tanto que el cultivo de riego los obtiene en subgeosistema Iic ($CONNECT = 6.66$). Por su parte, el bosque de pino-encino exhibe moderada adyacencia en el subgeosistema Iia ($CONNECT = 7.97$) y subgeosistema Iib ($CONNECT = 2.39$) y restringida en el subgeosistema Iic ($CONNECT = 0.78$).

El patrón de fragmentación en el subgeosistema Iib consiste en fragmentos medianos (5-100 ha) de matorral secundario (NP = 105 y PD = 0.042), el cual se presenta en parches compactos (SHAPE = 1,67) con escasa adyacencia entre ellos (CONNECT=0.36), que no rebasan las 26.55 ha en área promedio, así como fragmentos medianos (NP=18) y muy grandes (NP=2) caracterizados por su forma irregular ($2.52 > \text{SHAPE} > 3.67$). También resalta la alta densidad de parches de cultivo de temporal (PD=0.034) que, contrariamente al matorral secundario, son relativamente pequeños (AREA=1.18 ha), compactos (SHAPE= 1.31) y con alta conectividad (CONNECT=0.87), excepto por dos fragmentos irregulares y muy grandes: uno de 1,413 ha y otro de 2,534 ha, ambos con baja adyacencia.

Resalta la representatividad paisajística del bosque de pino-encino, con fragmentos que superan las 1,000 ha (44.06% de la superficie de SGIIB). Se trata de parches irregulares (SHAPE=5.29) cuya área promedio supera las 6,300 ha, como lo evidencia la representación paisajística que adquiere el parche más grande (LPI=6.83). Por su parte, los bosques fragmentado y muy fragmentado exhiben fragmentos grandes y muy grandes que muestran cierta relevancia en SGIIB. El bosque muy fragmentado, por ejemplo, tiene cuatro fragmentos con un área promedio de 1,977 ha, de los cuales, el más grande (3,412 ha) representa 0.78% del paisaje.

En cambio, en el subgeosistema Iic la fragmentación del bosque de pino-encino fue más acusada (NP = 72), y se caracteriza por fragmentos chicos (NP=72) y medianos (NP=50). Los primeros muestran una forma más compacta (SHAPE = 1.35) que los segundos (SHAPE = 1.87), como lo evidencia el área promedio de los parches (1.13 y 27.54 ha, respectivamente), todos ellos inmersos en una matriz de cultivo de temporal y matorral secundario (AREA = 2, 862 y 1,058 ha, respectivamente). Destaca el predominio del cultivo de riego, cuyos fragmentos representaron el 16.28% del área total del subgeosistema Iic, como lo evidencia

la representación paisajística del parche más grande (LPI = 1.4) que superó 1.88 veces el parche más grande del bosque de pino-encino.

Por su parte, el subgeosistema Ila exhibió un patrón de fragmentación caracterizado por fragmentos chicos (NP = 23) y medianos (PD = 46) de matorral secundario, con un promedio de área entre parches que oscilan entre 2.98 y 20.29 ha, respectivamente y, por parches medianos (NP = 14) de bosque de pino-encino con un área promedio de 18.33 ha. Sin embargo, destaca un mayor número de fragmentos grandes de matorral secundario (NP = 7) que de bosque de pino-encino (NP = 2), el cual presentó una parcelación más irregular (SHAPE = 4.09) que la exhibida por el matorral secundario (SHAPE = 2.54). Como es de esperar, la representatividad paisajística en el subgeosistema Ila está determinada por el bosque de pino-encino y el matorral secundario, que representan el 54.85 y 32.28% del área total. Sobresalen, por sus dimensiones, dos fragmentos de matorral secundario y dos de bosque de pino-encino que, sin embargo, son los parches con mayor irregularidad (SHAPE = 7.50) en toda la cuenca; se trata de dos fragmentos, uno de 3,703 ha y el otro de 6,084 ha, cuyo perímetro oscila entre los 152 520 m y 273,000 m, respectivamente, lo que ha generado, a su vez, bajos valores de compacidad (SHAPE= 6.26 y 8.73, respectivamente). Contrario a lo esperado, el fragmento más grande (6,084 ha) muestra menor área núcleo (CORE=464.58 ha) que representa sólo 7.63% (CAI) del área total del fragmento, en comparación del más pequeño (152,520 ha) cuya área núcleo (CORE=14.56) exhibe 14.56% del área total del fragmento.

Dinámica

El subgeosistema más dinámico entre los años 1976 y 2000 fue el bosque de pino-encino de las cumbres volcánicas (subgeosistema Ila) el cual experimentó un incremento de 1.36 veces el número de fragmentos; seguido de bosque

residual de pino-encino de laderas bajas y fondo de cuenca (subgeosistema IIc, con 1.21 veces); y el bosque de pino-encino de las laderas volcánicas medias y altas (subgeosistema IIb, con 1.16 veces). Si bien los tres subgeosistemas muestran una declinación de la fragmentación entre 1976 y 1986, en el segundo periodo adquirieron valores altas, de 1.46, 1.24 y 1.17 veces el número de fragmentos. El subgeosistema IIb es el que presenta mayor fragmentación en los tres periodos de análisis, como lo demostró el incremento de la densidad de parches entre 1976 (PD=0.10) y 2000 (PD=0.12). No obstante que los tres subgeosistemas exhibieron entre 1976 y 2000 incrementos moderados de longitud de borde (de 1.10 a 1.12 veces), el subgeosistema IIb muestra pérdidas agudas de área núcleo (3,178 ha), con relación a subgeosistema IIc (431 ha) y SGIIC (9.81 ha), siendo éste el subgeosistema con menor alteración en la adyacencia y distribución de los parches entre 1976 (CONNECT = 1.11; SHDI = 1.65) y 2000 (CONNECT = 1.05; SHDI = 1.60). Contrario a lo esperado, y pese a la dinámica de la fragmentación experimentada por el subgeosistema IIa en el último periodo, este subgeosistema mostró incrementos notables en la representatividad paisajística del parche más grande en el año 2000 (LPI = 1.39), en comparación con 1986 (LPI = 0.62), en tanto que los fragmentos más grandes de los subgeosistemas IIb y IIc perdieron entre 12.89 y 31.77% de su área durante el periodo de 1976 y 2000, respectivamente.

A nivel de clases, el matorral secundario es la cubierta de suelo más afectada por la fragmentación en las tres fechas de análisis, sobre todo en los subgeosistemas IIa y IIb, como lo evidencia el incremento de las densidades de parches entre 1976 (PD = 0.0097 y 0.035) y 2000 (PD = 0.017 y 0.042, respectivamente). La explicación obedece a una intensa fragmentación en el último periodo, cuando eleva 1.25 y 2 veces el número de fragmentos en todos los subgeosistemas. Por su parte, el bosque de pino-encino en el subgeosistema IIc tuvieron el mayor número de fragmentos en las tres fechas de análisis (NP = 112, 105 y 134), al

tiempo que se incrementó sustancialmente la densidad de parches desde 1976 (PD = 0.028) hasta 2000 (PD = 0.030).

El patrón de fragmentación del bosque de pino-encino y de matorral secundario es disímil entre 1976 y 2000. Por ejemplo, el parche más grande del bosque de pino-encino muestra incrementos de 2.24 a 1.25 veces en el subgeosistema IIa y subgeosistema IIc, aunque decrementos moderados en el subgeosistema IIb. Por su parte, el matorral secundario presenta aumentos en los subgeosistemas IIa y IIb, pero no en el subgeosistema IIc. Tanto el bosque de pino-encino como el matorral secundario exhibieron incrementos de longitud de borde en los tres subgeosistemas, siendo más evidente este índice de la fragmentación en el bosque de pino-encino perteneciente a los subgeosistemas IIa y IIb, al incrementar 1.82 y 1.25 veces esta condición en el año 2000, que la mostrada para 1976 (TE = 255,030 m y TE = 882,600 m, respectivamente); en tanto que el matorral secundario fue la cubierta de suelo con el mayor incremento de borde en el subgeosistema IIc.

Si bien el bosque de pino-encino y el matorral secundario presentaron incrementos de borde en los tres subgeosistemas y fechas de análisis, estos tienen consecuencias en otros índices de la fragmentación. Así, por ejemplo, en el subgeosistema IIa el bosque de pino-encino tuvo incrementos en el área promedio, el área núcleo y la conectancia entre parches durante la etapa de 1976 a 2000. Un ejemplo más elocuente de esta relación es el bosque de pino-encino y el matorral secundario en el subgeosistema IIb, donde a mayor longitud de borde corresponde un aumento de área núcleo. Por otra parte, el matorral secundario se encontró más influenciado por condiciones más direccionales en los subgeosistemas IIa y IIc, donde al exhibir mayor borde, esta cubierta de suelo presentó decrementos de área promedio, área núcleo y conectancia entre parches.

Se puede decir, en términos generales, que el patrón espacial y la fragmentación se relacionan con la heterogeneidad a nivel de paisaje (cuenca, subgeosistemas y subgeosistemas) y la distribución espacial a nivel de clases (cubierta de suelo) respectivamente. En ambas escalas, los conceptos (paisaje y clases) se enriquecen y complementan con las propiedades y características de los fragmentos (tamaño, forma, perímetro, etc.). Dicho de otro modo, un mismo patrón de fragmentación no se repite de la misma forma en tiempo y espacio, y mucho menos si se toma en cuenta un esquema jerarquizado, es decir, taxonómico - corológico ordenado.

Los resultados muestran que la cubierta de suelo conservaron un área núcleo mayor (TCA) y una distribución proporcional de área (SHDI) más equitativa a escala de cuenca que a escala de sistemas o subgeosistemas. Por otro lado, se observó que a escala de subgeosistemas (subgeosistemas IIb y IIc, por ejemplo) el índice de diversidad (SHDI) es más significativo que a nivel de los geosistemas I y III. La percepción de conectancia también difiere con la escala, como lo demuestra el geosistema III y los subgeosistemas que adquieren valores más representativos con relación a la cuenca (Tabla 16).

Tabla 16. Estado Actual y dinámica de la fragmentación a escala de los subgeosistemas. 1) Número y densidad de parches (NP, DP), 2) representatividad paisajística del parche más grande (RPPG), 3) longitud y densidad de borde (LB, DB), 4) área promedio de los parches (AREA), 5) área núcleo (NAREA) y, 6) conectividad (CONNECT).

	NP			DP			RPPG			LB		
	76	86	2000	76	86	2000	76	86	2000	76	86	2000
SGIIA												
BO	1	1	1	0.0002	0.0002	0.0002	0.0876	0.0876	0.0886	12000	12000	12240
BPO	21	21	24	0.0048	0.0048	0.0055	0.629	0.6274	1.3999	255030	319320	465060
BF	16	13	8	0.0037	0.003	0.0018	0.5007	0.3408	0.222	263730	158610	73590
BMF	6	6	6	0.0014	0.0014	0.0014	0.0067	0.0028	0.0357	7020	3210	13950
MP	42	39	78	0.0097	0.009	0.0179	0.3079	0.5284	0.6181	413040	418860	497400
CT	0	0	1	0.0002	0.0002	0.0002	0	0	0.0325	0	0	13080
AH	1	1	2	0.0002	0.0002	0.0005	0.0047	0.0068	0.0105	2400	3180	6720
SRD	1	1	1	0.0007	0.0007	0.0002	0.0033	0.0033	0.001	1740	1740	1140
CA	3	3	3	0.0007	0.0007	0.0007	0.0806	0.0606	0.0606	35160	35160	35100
SGIIB												
BO	12	9	16	0.0028	0.0021	0.0037	0.1169	0.1171	0.1193	47940	43080	42600
BPO	41	44	53	0.0094	0.0101	0.0122	2.9938	2.6999	2.6078	882600	974040	1106310
BM	8	8	8	0.0018	0.0018	0.0018	0.0977	0.1017	0.1017	60180	61500	60390
SBC	2	2	2	0.0005	0.0005	0.0005	0.0034	0.0034	0.0034	1410	1410	1410
BF	26	24	29	0.006	0.0055	0.0067	0.645	0.5229	0.5229	291420	286320	232710
BMF	10	21	13	0.0023	0.0048	0.003	1.5693	0.8934	0.7851	380760	467100	312720
MP	152	147	184	0.035	0.0338	0.0423	1.0594	1.0509	1.0805	602550	628950	713640
PAF	21	31	29	0.0048	0.0071	0.0067	0.1036	0.0628	0.0453	38820	53670	59700
CT	139	131	150	0.032	0.0301	0.0345	0.6414	0.639	0.5831	442740	432420	482280
AH	5	7	12	0.0012	0.0016	0.0028	0.0101	0.0101	0.0255	7320	11280	24630
SRD	32	22	25	0.0074	0.0051	0.0058	0.0643	0.0643	0.0841	68970	75690	77070
CA	1	1	1	0.0002	0.0002	0.0002	0.0076	0.0076	0.007	3330	3240	3000
SGIIC												
BO	1	1	4	0.0002	0.0002	0.0009	0.3019	0.2983	0.1611	20040	19950	52560
BPO	122	105	134	0.0281	0.0242	0.0308	0.6067	0.5917	0.7539	466050	454830	537900
SBC	3	3	2	0.0007	0.0007	0.0005	0.0437	0.0437	0.0179	18150	18150	15120
BF	39	36	37	0.009	0.0083	0.0085	0.1002	0.1002	0.0865	156480	153870	93750
BMF	5	16	11	0.0012	0.0037	0.0025	0.0317	0.0333	0.0142	11250	35820	11310
MP	57	56	86	0.0131	0.0129	0.0198	0.3059	0.289	0.2436	258600	270870	371370
PAF	10	8	6	0.0023	0.0018	0.0014	0.7631	1.0072	1.408	134820	152700	152370
CT	35	35	45	0.0081	0.0081	0.0104	2.0637	1.1279	1.0829	564390	569250	575520
AH	10	13	18	0.0023	0.003	0.0041	0.0557	0.0557	0.1579	25260	31290	60840
SRD	12	14	14	0.0028	0.0032	0.0032	0.1869	0.1327	0.0383	98220	95610	73860
CA	1	1	1	0.0002	0.0002	0.0002	0.0097	0.0097	0.0097	3120	3120	3120
DB												
AREA												
SGIIA												
BO	0.03	0.03	0.0282	380.61	380.61	385.02	41.85	41.85	44.28	0	0	0
BPO	0.59	0.73	1.0701	364.204	414.8186	462.3562	722.79	880.47	1004.04	5.7143	6.6667	7.971
BF	0.61	0.37	0.1693	285.699	221.4069	155.4075	176.94	67.23	1.08	4.1667	3.8462	7.1429
BMF	0.02	0.01	0.0321	8.07	2.745	31.815	0	0	0	6.6667	13.3333	13.3333
MP	0.95	0.96	1.1445	165.943	195.4454	83.7208	399.78	509.58	282.15	2.5552	2.2942	1.8648
CT	0	0	0.0301	0	0	141.21	0	0	0	0	0	0
AH	0.01	0.01	0.0155	20.43	29.7	30.825	0	0	0	0	0	0
SRD	0	0	0.0026	14.13	14.13	4.41	0	0	0	0	0	0
CA	0.08	0.08	0.0808	191.7	191.7	191.49	0	0	0	0	0	0
SGIIB												
BO	0.11	0.1	0.098	115.305	148.22	78.2212	7.02	13.14	20.97	1.5152	2.7778	5
BPO	2.03	2.24	2.5456	926.35	893.7082	817.8385	9664.38	10650.87	9703.53	2.439	2.0085	2.3948
BM	0.14	0.14	0.139	117.416	119.6325	119.6212	31.77	35.73	35.73	3.5714	3.5714	3.5714
SBC	0	0	0.0032	8.01	8.01	7.965	0	0	0	0	0	0
BF	0.67	0.66	0.5355	290.389	300.4688	189.7107	729.18	535.5	364.77	2.4615	1.087	0.7389
BMF	0.88	1.07	0.7196	1437.5	603.9129	710.1208	3819.24	1498.59	1035.81	4.4444	2.8571	3.8462
MP	1.39	1.45	1.6421	89.0212	95.2494	79.0983	2037.51	1951.02	2274.75	0.4705	0.4193	0.3683
PAF	0.09	0.12	0.1374	42.45	32.1068	30.8545	29.7	27.9	0.18	5.2381	3.4409	3.4483
CT	1.02	1	1.1097	66.0121	70.5263	61.6308	1115.73	1188.18	788.58	1.0635	1.1274	0.877
AH	0.02	0.03	0.0567	13.464	15.12	23.145	0	0	0	0	0	0.3003
SRD	0.16	0.17	0.1773	32.1778	50.8786	52.6428	6.57	6.57	37.98	2.4194	1.7316	3.3333
CA	0.01	0.01	0.0069	32.94	32.94	30.42	0	0	0	0	0	0
SGIIC												
BO	0.05	0.05	0.1209	1312.2	1296.45	229.005	370.8	370.8	76.32	0	0	66.6667
BPO	1.07	1.05	1.2377	82.8236	92.8226	83.1351	949.23	921.15	1259.91	1.0161	0.9707	0.7855
SBC	0.04	0.04	0.0348	92.82	92.82	77.31	0	0	0	33.3333	33.3333	0
BF	0.36	0.35	0.2157	58.7169	63.7525	31.4805	22.77	16.74	0	1.2146	1.2898	3.6036
BMF	0.03	0.08	0.026	30.996	24.6488	8.3045	0	0	0	10	8.3333	1.8182
MP	0.6	0.62	0.8545	93.5621	93.2352	63.2962	486.72	490.95	205.29	0.6892	0.9091	0.7114
PAF	0.31	0.35	0.3506	606.915	852.3338	1317.345	1794.69	1878.75	2555.37	8.8889	10.7143	6.6667
CT	1.3	1.31	1.3243	589.688	581.7574	437.96	5121.36	4642.92	4206.78	2.1849	3.0252	2.4242
AH	0.06	0.07	0.14	35.694	33.1477	56.32	4.5	4.5	106.38	2.2222	1.2821	0.6536
SRD	0.23	0.22	0.1699	164.813	119.4943	68.0979	91.71	19.17	0.18	3.0303	2.1978	3.2967
CA	0.01	0.01	0.0072	42.3	42.3	42.3	0	0	0	0	0	0

4.4. Diversidad y estructura vertical de la vegetación

4.4.1 Riqueza (R)

De los dos geosistemas seleccionados (SGIIA y SGIIC), el Bosque residual de pino-encino de las laderas bajas y fondo de cuenca (SGIIC) presenta la mayor riqueza promedio ($R_{Prom}=25$), sobre todo del estrato herbáceo ($R_{promEH}=16$), seguido del arbustivo ($R_{promEAB}=5$) y el arbóreo ($R_{promEA}=3$). Por su parte, el Bosque de pino-encino de las cumbres volcánicas (SGIIA) exhibe 24% menos riqueza que SGIIC, como lo demuestra el promedio de su riqueza total (19), del estrato herbáceo (12), el arbustivo (4) y el arbóreo (3). La máxima riqueza encontrada en los fragmentos inventariados se identifica en SGIIA ($RT=38$), y la menor riqueza (13) en tres inventarios de SGIIA y uno de SGIIC (Tabla 16).

Tabla 17. Riqueza a nivel de los subgeosistemas IIA y IIC.

N° de Inventario	SGIIA				N° de Inventario	SGIIC			
	RT	REA	REAB	REH		RT	REA	REAB	REH
INVENTARIOS					NÚMERO DE ESPECIES				
1	19	5	7	7	8	29	4	7	18
2	18	4	4	10	9	18	3	1	14
3	38	7	10	21	10	33	6	8	19
4	13	2	1	10	11	28	1	10	17
5	20	2	4	14	12	29	2	4	23
6	23	2	4	17	13	30	2	4	24
7	24	2	6	16	14	27	1	3	23
20	13	2	3	8	15	18	2	4	12
21	15	5	1	9	16	27	3	7	17
22	14	2	2	10	17	22	5	6	11
23	13	3	3	7	18	13	3	2	8
24	15	2	3	10	19	21	4	6	11
Rprom	19	3	4	12	Rprom	25	3	5	16

RT=Riqueza Total por comunidad; REA=Riqueza del Estrato arbóreo;
 REAB=Riqueza del Estrato Arbustivo; REH=Riqueza del estrato herbáceo
 REH=Riqueza del estrato herbáceo

Del estrato arbóreo, resalta la abundancia relativa⁹ (Pi) de la especie *Pinus pseudostrobus* (Pi=0.72), seguida de *Quercus martinezii* (Pi=0.64), *P. montezumae* (Pi=0.55), *Pinus sp.* (Pi=0.47), *Q. crassifolia* (Pi=0.47), *Quercus sp.* (Pi=0.22) y *Clethra mexicana* (Pi=0.21). También se muestran especies con una abundancia relativa moderada (0.10<Pi<0.20): *Arbutus glandulosa*, *Q. crassipes*, *Q. obtusata*, *Cupressus lindleyi* y *P. teocote*. Por su parte, las especies con la menor abundancia relativa (0>Pi<0.10) son: *Q. candicans*, *Crataegus pubescens*, *Q. castanea*, *Arbutus sp.* y *Cornus disciflora* (Figura 38).

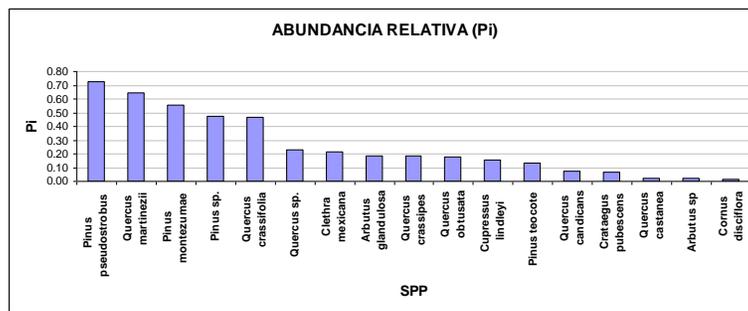


Figura 38. Abundancia relativa (Pi) a escala del área de estudio.

De los dos geosistemas inventariados, el subgeosistema IIa muestra una abundancia relativa mayor de *Pinus montezumae* (Pi=0.84) que el subgeosistema IIc (Pi=0.27). Las especies de *Pinus sp.* (Pi=0.61), *Quercus sp.* (Pi=0.22), *Q. obtusata* (Pi=0.17), *Cupressus lindleyi* (Pi=0.13) y *Q. crassifolia* (Pi=0.92) son exclusivas del subgeosistema IIc, en tanto que *Q. martinezii* (Pi=0.64), *Clethra mexicana* (Pi=0.21), *P. Teocote* (Pi=0.12), *Arbutus sp.* (Pi=0.02) y *Cornus disciflora* (Pi=0.01) lo son del subgeosistema IIa. Por otro lado, *P. pseudostrobus*, *Crataegus pubescens*, *A. glandulosa* y *Q. crassipes* se encuentran en ambos subgeosistemas, como lo demuestran sus respectivos valores de abundancia relativa (Figura 39).

⁹ Refiérase a la abundancia de una especie en términos de su presencia dentro del total de especies de una comunidad $P_i = E_i / \sum E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n$.

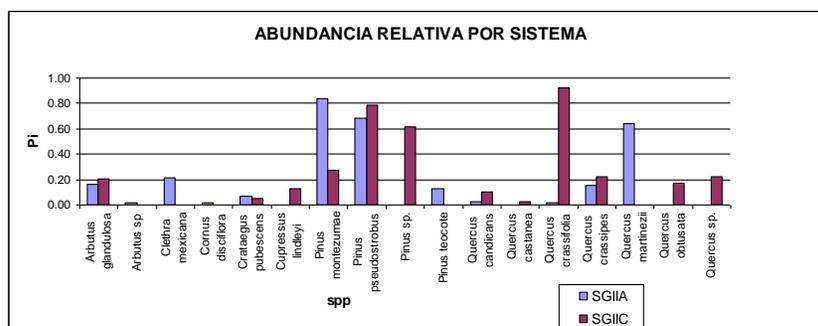


Figura 39. Abundancia relativa (Pi) en los subgeosistemas Ila y IIC.

4.4.2 Estructura vertical

La talla promedio de las especies arbóreas es de 11.26 m con un diámetro de 0.62 m. Sobresalen por sus tallas *Pinus teocote* (25 m), *P. pseudostrobus* (18.50 m), *P. montezumae* (17.50 m), *Quercus crassipes* (17.43 m) y *Pinus sp.* (16.50 m). Por otro lado, las especies de menor talla son *Q. castanea* (4 m), *Cupressus Lindley* (5 m), *Arbutus glandulosa* (5.20 m), *Arbutus sp.* (6 m), *Crataegus pubescens* (6 m) y *Clethra mexicana* (6.67 m). La talla promedio de los árboles en el subgeosistema Ila (8.90 m) difiere de la obtenida para el subgeosistema IIC (6.94 m), pese a compartir similitudes en cuanto al perímetro a la altura del pecho (PAP=0.40 m). Tal situación ubica a el subgeosistema Ila como el subgeosistema que posee los árboles con mayor talla. En este subgeosistema las especies *P. pseudostrobus*, *P. montezumae* y *Q. crassipes* superan en 4,15 y 6 m, respectivamente, a las encontradas en el el subgeosistema IIC. Sin embargo, otras especies en el subgeosistema IIC como *Q. crassifolia* y *Q. candicans* superan en 8 y 3.5 m respectivamente a sus similares en el subgeosistema Ila.

Por otro lado, el estrato arbustivo muestra una talla promedio de 1.17 m con un perímetro de 0.087 m, siendo el subgeosistema Ila el subsistema que exhibió las mayores tallas (1.24 m; PAP=0.10 m), en comparación con el subgeosistema IIC, donde la talla y PAP de los árboles presenta 0.15 m y 0.02 m abajo del promedio

de SGIIA, respectivamente. Las especies con mayores tallas son *Baccharis heterophylla* (3 m) y *Senecio* (2.5 m). La densidad promedio indicó una mayor abundancia de las especies arbustivas ($D_{promAB}=0.59/m^2$) frente a las arbóreas ($D_{promA}=0.043/m^2$), resultado que se refleja también entre subgeosistemas. Por ejemplo, el estrato arbustivo en el subgeosistema Ila excedió en densidad de individuos ($0.633/m^2$) al arbóreo ($0.048/m^2$), cuya tendencia en el subgeosistema IIC ($0.038/m^2$) difiere, al igual que en el subgeosistema IIA, marcadamente con respecto del estrato arbustivo ($0.59/m^2$). Sin embargo, el subgeosistema IIA es el subsistema con mayor densidad de individuos, tanto del estrato arbóreo ($0.048/m^2$) como del arbustivo ($0.633/m^2$). En cuanto a la densidad (D)¹⁰, *Pinus pseudostrobus* obtiene el dato más alto (D=52.32), seguida de *Clethra mexicana* (D=6.36) y *Quercus martinezii* (D=5.29). Las especies con menor densidad son *Cornus disciflora* (D=0.11), *Q. castanea* (D=0.11), *Arbutus sp.* (D=0.11) y *Q. candicans* (D=0.97), en tanto que el resto de las especies muestran valores que oscilan entre 0 y 5.

Es de destacar también la alta densidad de *Pinus pseudostrobus* en los subgeosistemas IIA (D=58.43) y IIC (D=44.02). De las cinco especies que no se encuentran en el subgeosistema IIA (*Cupressus lindleyi*, *Pinus sp.*, *Quercus obtusata*, *Quercus sp.* y *Q. castanea*), pero que son propias de las comunidades del subgeosistema IIA, resaltan, en segundo y cuarto lugar, *Pinus sp.* (D=10.69) y *Q. obtusata* (D=8.14), respectivamente. Una tendencia similar la muestran las especies que no son propias de las comunidades del subgeosistema IIC (*Clethra mexicana*, *Q. martinezii* y *P. teocote*), pero que adquieren los tres lugares en orden descendente después de *P. pseudostrobus* en el subgeosistema IIA, a mencionar: *C. mexicana* (D=11.05), *Q. martinezii* (D=9.18) y *P. teocote* (D=4.87) (Figura40).

¹⁰ Densidad relativa = (Número de individuos de la especie / Número de individuos de todas las especies) x 100

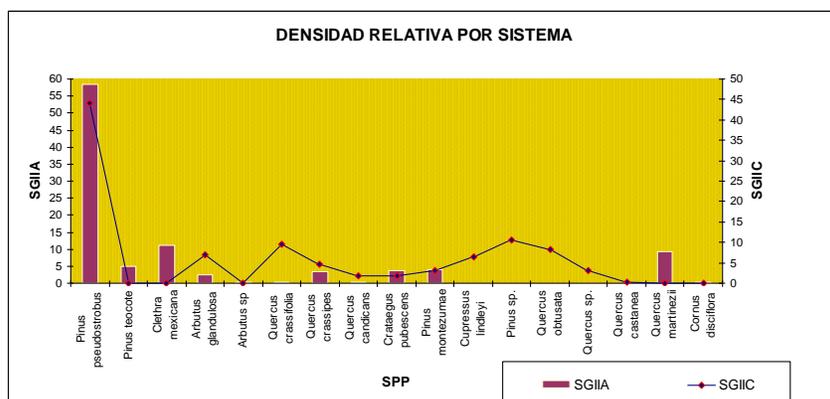


Figura 40. Densidad relativa (D) en los subgeosistemas IIa y IIc.

4.4.3 Influencia de la fragmentación sobre las variables de la vegetación

A escala de la cuenca

Las variables de la fragmentación que más influyeron sobre los rasgos de la vegetación (composición, estructura y productividad), son el área ($r = 0.289$) y la forma ($r = 0.212$) del parche, sobre todo en la productividad. El área del parche también influyó sobre la estructura de la vegetación ($r = 0.211$), en tanto que la forma se correlaciona moderadamente con la composición ($r=0.206$) y la estructura ($r = 0.198$) de la vegetación. En cambio, el aislamiento del parche no presentó una influencia sensible sobre los rasgos fisonómico-estructurales de la vegetación, excepto por la composición ($r = 0.129$).

Las variables de la fragmentación que más se correlacionan con sus similares vegetales fueron, como ya se mencionó, el área y la forma del parche. La primera, por ejemplo, se correlaciona con la máxima y la desviación estándar (Dst) de la talla de los pinos ($r = 0.556$; $r = 0.597$, respectivamente), seguida del área basal por hectárea ($r=0.455$) y la riqueza del estrato arbóreo ($r = 0.454$). En cuanto a la productividad, el área del parche impactó tanto al diámetro a la altura de

pecho en los pinos ($r = 0.419$), como basal en arbustos (DAB) ($r=0.408$). Otras variables de la vegetación presentaron valores moderados a poco significativos, por ejemplo, la densidad del estrato arbóreo ($r= 0.296$) y arbustivo ($r = 0.162$), exhibiendo la densidad específica y el total del número de individuos una correlación baja con relación al área del fragmento ($r = 0.162$). La cobertura de los tres estratos vegetales (arbóreo, arbustivo y herbáceo) tuvo baja correlación ($r = 0.069$) con el área del fragmento, siendo la riqueza del estrato herbáceo la variable que menos se correlaciona ($r = -0.145$) con esta variable de la fragmentación.

También la forma del parche presentó alta correlación con Dst y máxima talla de los pinos ($r = 0.593$ y $r = 0.507$, respectivamente). En contraste con el área del fragmento, la forma se correlaciona en tercer y cuarto orden con la riqueza del estrato arbóreo ($r = 0.437$) y la talla máxima de los árboles ($r = 0.387$), sin incluir los pinos. El área basal del estrato arbustivo (medida en m^2/ha) presentó menor correlación con la forma del fragmento ($r = 0.353$) que con el área del fragmento ($r = 0.455$). Otras variables como la abundancia y la densidad presentan baja correlación ($r = 0.108$ y $r = 0.277$), destacando la cobertura como la variable con la menor correlación, en este caso con la forma del fragmento ($r = 0.056$).

Por otro lado, el aislamiento del fragmento tuvo un comportamiento que puede considerarse peculiar. Contrariamente a lo esperado, la riqueza del estrato herbáceo fue la variable más sensible a cambios en el aislamiento del fragmento ($r = 0.376$), seguido de la densidad y abundancia del estrato arbóreo ($r = 0.332$) y de la riqueza total ($r = 0.220$), la densidad específica y total de individuos ($r = 0.204$). De igual forma, la productividad no mostró sensibilidad al índice de aislamiento, como lo demuestra el área basal en árboles que no incluyen pinos (r

= -0.315) y que, de incluirlos, el índice de correlación tan solo llega a ser de $r = -0.209$.

A escala de los subgeosistemas

La influencia de la fragmentación en los atributos de la vegetación forestal deja ver algunas diferencias notables entre subgeosistemas. Por ejemplo, en SGIIA la composición presentó mayor correlación con las variables AREA ($r = 0.404$) e IF ($r = 0.367$) de la fragmentación, que en el subgeosistema IIc ($r=0.269$; $r = 0.208$, respectivamente). Sin embargo, en el subgeosistema IIc la composición de la vegetación parece estar más influida por el aislamiento del fragmento ($r = 0.217$), correlación que carece de importancia en el subgeosistema IIa. En ambos subgeosistemas las variables de la composición que son más susceptibles a la fragmentación (AREA e IF) son la riqueza total, la riqueza del estrato arbóreo y arbustivo, y el número de individuos del estrato arbustivo. En el subgeosistema IIc, la riqueza del estrato herbáceo es la variable que mejor se correlaciona con el aislamiento del fragmento ($r = 0.459$).

En general, la estructura de la vegetación tuvo una moderada correlación con las variables de la fragmentación, al mostrar tanto en el subgeosistema IIa como en el subgeosistema IIc valores de AREA entre $r = 0.249$ y $r = 0.253$ e IF entre $r = 0.157$ y $r = 0.232$, no existiendo correlación alguna con el grado o índice de aislamiento del fragmento, excepto por el subgeosistema IIc, donde esta variable de la fragmentación se relacionó con la densidad del estrato arbóreo ($r=0.495$) y con la densidad específica ($r=0.415$). La correlación del AREA e IF sobre la estructura vegetación se concentra en la densidad y máxima talla del estrato arbóreo en el subgeosistema IIa y, en la cobertura del estrato herbáceo y cobertura específica en el subgeosistema IIc.

Por su parte, la relación entre la fragmentación y la productividad de la vegetación es escasa, al registrar valores entre $r = -0.096$ y $r = 0.167$ en los subgeosistemas IIa, y IIc, sin embargo, ambos sistemas exhibieron correlaciones de moderadas a altas en variables específicas. Por ejemplo, el ÁREA e IF tienen alta correlación en SGIIA con el máximo diámetro a la altura de pecho y con el promedio del diámetro a la altura basal ($0.4 > r < 0.5$), así como del área basal de los árboles –sin incluir los pinos– ($0.4 > r < 0.45$). Es de destacar que el Índice de Aislamiento se correlacionó con el promedio del diámetro a la altura de pecho de los pinos ($r = 0.466$), como lo demuestra de igual forma su área basal ($r = 0.469$). En el subgeosistema IIc los valores del área y aislamiento del fragmento se correlacionan con la máxima del diámetro a la altura basal y área basal de los arbustos. El IF, por su parte, se correlaciona con el promedio a la altura de pecho de los árboles ($r = 0.537$).

4.5. Influencia de los factores antrópicos sobre la diversidad y estructura de la vegetación.

Si bien la presencia humana al interior de los fragmentos analizada a través de: D1 = incidencia de fuego, D2 = tocones y D3 = cobertura de ramas en el suelo, no parece dar una explicación *per se* al proceso de la fragmentación, ha sido considerada como una evidencia del estado o condición actual de la composición de la vegetación. Esto debido a que D2 y D3 obtienen valores positivos de $r = 0.020$ y $r = 0.105$, respectivamente; en tanto que la estructura se correlaciona, si bien no de manera importante, si con valores positivos con D1 ($r = 0.048$) y D3 ($r = 0.066$), no habiendo correlación de estos factores del uso del suelo con la productividad de la vegetación.

Si bien los factores antrópicos o factores de uso de suelo no se vinculan directamente con el proceso de fragmentación, éstos permiten dar una

explicación del estado actual que guardan los fragmentos debido al impacto de las actividades humanas (D1: quemas, D2: tala, D3: cobertura de ramas en el suelo y, D4: individuos con ocoteo). Pese a lo anterior, a escala del área de estudio, se puede observar que la forma y área del fragmento exhibe moderada correlación (entre 0.364 y 0.381) con individuos o árboles con señales de ocoteo. Estas mismas variables de la fragmentación (AREA e IF) presentan bajas y moderadas correlaciones con relación al número de tocones encontrados en los fragmentos inventariados (entre 0.199 y 0.212).

A escala de los subgeosistemas, el comportamiento no presenta cambios significativos, sobre todo si se comparan con los valores obtenidos en el subgeosistema IIa, excepto que en este subgeosistema el aislamiento del fragmento se correlaciona con valores altos de ocoteo ($r=0.418$). Por otro lado, se observa que en el subgeosistema IIc el tamaño y la forma del fragmento no sólo se correlacionaron con el número de tocones y con señales de ocoteo, sino también con fragmentos afectados por fuego (entre 0.479 y 0.482) y con alto porcentaje de cobertura de ramas en el suelo.

La influencia antrópica más representativa en el área de estudio fue la incidencia al fuego, presentándose dicho factor humano en 26.10% de los individuos del estrato arbóreo, seguido de la tala (18.66%) y la extracción de resina (16.05%). La afectación por fuego en el estrato arbóreo es del 64% en el subgeosistema IIa y 36% en el subgeosistema IIc, en tanto que del número de tocones y de individuos con ocoteo, 60.83% y 84.55% corresponden al subgeosistema IIa, respectivamente. Por otro lado, la presencia de ramas en el suelo es más significativa en SGIIC (35.8%) que en el área de estudio (28.7%) y el subgeosistema IIa (21.6%).

La máxima correlación encontrada entre los factores humanos y las variables de la vegetación se ubica en la extracción de resina, es decir, individuos con ocoteo ($r = 0.283$), como lo demuestran los altos valores del área basal de los pinos ($r = 0.736$) y del estrato arbóreo incluyendo los pinos ($r = 0.715$), así como del máximo ($r = 0.480$) diámetro a la altura de pecho de los pinos. A nivel de los sistemas de paisaje no parece existir evidencia alguna entre los factores humanos, la estructura en el subgeosistema IIa, y la productividad en el subgeosistema IIc. Sin embargo, se presenta una correlación moderada entre la extracción de resina, la composición y la productividad vegetal en el subgeosistema IIa, específicamente lo relacionado con el número de individuos y área basal del estrato arbóreo. Por otro lado, la incidencia al fuego y la presencia de ramas en el suelo se correlaciona con mayor intensidad con la composición y la estructura de la vegetación en el subgeosistema IIc, respectivamente (Tabla 18).

Tabla 18. Diversidad y estructura de los inventarios seleccionados. alt=altitud sobre el nivel del mar; pend=pendiente; exp=exposición; área (ha)=superficie del fragmento en hectáreas; if=índice de forma, rt=riqueza total; ro=riqueza del estrato arbóreo; ri=riqueza del estrato arbustivo; re=riqueza; del estrato herbáceo; io=número de individuos del estrato arbóreo; ii=número de individuos del estrato arbustivo; it=total de individuos; do=densidad del estrato arbóreo; di=densidad del estrato arbustivo; dt=densidad específica; co=cobertura del estrato arbóreo; ci=cobertura del estrato arbustivo; ce=cobertura del estrato herbáceo; ct=cobertura específica; max=máxima prom=promedio; dst=desviación estándar; pj=área basal solo de los pinos(no incluye otros árboles); a= área basal solo árboles (no incluyen pinos); ao=área basal del estrato arbóreo (incluye pinos); ai=área basal del estrato arbustivo; Σ =suma; d1= individuos con incidencia de fuego; d2=numero de tocones; d3=cobertura de ramas en el suelo; d4=individuos con ocoteo; ab=área basal.

SUBSISTEMA	INV.	DATOS GENERALES						COMPOSICIÓN													
		COORDENADAS		ALT	PEND	EXP	ÁREA (HA)	FORMA	RIQUEZA				INDIVIDUOS								
		Lat	Long						Rt	Ro	Ri	Re	Io	II	It	Id					
SGIA	inv1	321042.00	2173731.00	2415	1.2	N	25519.2	14.2	19	5	7	7	50	78	128						
	inv2	320248.00	2171903.00	2560	5	SW	25519.2	14.2	18	4	4	10	67	88	155						
	inv3	324580.00	2170699.00	2465	40	NW	25519.2	14.2	38	7	10	21	67	31	98						
	inv4	321570.00	2170431.00	2513	3.2	SE	11.4	1.9	13	1	10	25	10	35	10						
	inv5	321386.00	2169930.00	2500	8	NE	11.4	1.9	20	2	4	14	25	13	38						
	inv6	330267.00	2162313.00	2471	24	SW	25210.6	16.2	23	2	4	17	19	13	32						
	inv7	328485.00	2160933.00	2540	22	NE	25210.6	16.2	24	2	6	16	38	27	65						
SGIC	inv8	351388.00	2175202.00	2260	25	N	3.4	1.4	29	4	7	18	20	28	48						
	inv9	352492.00	2174239.00	2321	20	NE	6.1	1.5	18	3	1	14	40	2	42						
	inv10	353704.00	2173398.00	2326	15	W	7737.7	10.1	33	6	8	19	37	40	97						
	inv11	358681.00	2172122.00	2327	8	NE	1.2	1.3	28	10	17	14	25	39	5						
	inv12	358073.00	2173161.00	2360	5	W	3.7	1.4	29	2	4	23	74	42	116						
	inv13	357217.00	2174354.00	2416	5	E	4836.9	11.7	30	2	4	24	26	25	51						
	inv14	355957.42	2173365.84	2355	0	NE	8.1	2.1	27	1	3	23	14	32	46						
SGIA	inv15	356601.00	2174068.00	2388	2	SW	4.2	1.5	18	2	4	12	10	8	18						
	inv16	355188.00	2174974.00	2373	10	SW	4836.9	11.7	27	3	7	17	30	14	44						
	inv17	355276.00	2174113.00	2334	10	SW	9.6	1.7	22	5	6	11	33	73	126						
	inv18	354356.00	2174113.00	2343	5	SW	2.7	1.6	13	3	2	8	23	5	28						
	inv19	351155.00	2174133.00	2340	10	NE	7737.7	10.1	21	4	6	11	44	34	78						
	inv20	326266.00	2166671.00	2576	23	E	84.9	2.7	13	2	3	8	12	81	93						
	inv21	323997.00	2162034.00	2619	14	NW	25210.6	16.2	15	5	1	9	19	3	18						
SGIA	inv22	321684.2	2164531.41	2642	13	NE	21.6	2.5	14	2	10	15	35	3	22						
	inv23	325245.00	2170345.00	2520	13	S	25519.2	14.2	13	3	3	7	14	8	22						
	inv24	324028.39	2164393.60	2656	23	NW	4.5	1.7	15	2	3	10	10	25	35						
SUBSISTEMA	INV.	ESTRUCTURA																			
		DENSIDAD (HA)			COBERTURA (%)				PINOS		ARBORES		ARBUSTOS								
		Do	Di	Di	Co	Ce	Ct	Max	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Dst							
SGIA	inv1	555.6	868.7	1422.2	40	80	60	180	35	11	17	8	5.17	1.44	3	1.47	0.82				
	inv2	744.4	977.8	1722.2	50	70	5	126	35	27	6.8	3.2	6.59	2.25	2.2	1	0.42				
	inv3	744.4	344.4	1088.9	80	40	80	200	32	15	9.4	2.2	7.53	6.2	2.8	1.19	0.77				
	inv4	277.8	111.1	388.9	40	10	5	55	35	30	5	3.5	3.5	0	0.32	0.24	0.05				
	inv5	277.8	144.4	422.2	60	30	20	110	34	25	9.6	3.5	3.5	0	0.94	0.56	0.26				
	inv6	211.1	144.4	355.6	40	10	20	70	34	27	6.7	0	0	0	1.9	0.8	0.6				
	inv7	422.2	300	722.2	60	80	30	140	32	16	6.5	18	18	0	3	0.96	0.73				
SGIC	inv8	222.2	311.1	533.3	30	50	60	140	32	17	10	14	5.8	4.6	2	0.63	0.48				
	inv9	444.4	22.2	466.7	80	60	20	160	0	0	18	11.2	4.2	1.8	1	1.13					
	inv10	833.3	444.4	1077.8	60	70	80	210	33	16	6.4	16	7.98	4.33	3	1.23	0.58				
	inv11	155.6	277.8	433.3	35	10	75	120	26	21	2.0	0	0	0	1.8	0.92	0.52				
	inv12	822.2	466.7	1288.9	60	80	35	175	14	7	2.3	7	5.34	1.13	2	0.98	0.47				
	inv13	289.9	277.8	566.7	45	15	90	150	26	15	9.1	5	0	0	1.5	0.66	0.28				
	inv14	155.6	355.6	511.1	65	5	65	135	26	22	0.5	0	0	0	1.1	0.38	0.17				
SGIA	inv15	111.1	88.9	200	25	40	75	140	24	20	3	4	4	0	2.5	1.3	0.58				
	inv16	333.3	155.6	488.9	25	40	75	140	22	8.8	5.3	14	6.18	3.17	2.5	1.3	0.55				
	inv17	588.9	811.1	1400	35	40	35	160	26	18	4.7	20	10.3	4.28	1.8	0.88	0.43				
	inv18	255.6	355.6	311.1	75	80	25	180	0	0	0	22	10.6	6.61	2.1	1.4	0.51				
	inv19	489.9	377.8	866.7	40	90	85	215	14	9.9	3.4	18	9.58	4.32	2.6	1.43	0.49				
	inv20	133.3	900	1033.3	50	85	10	145	17	12	3.4	18	13	3.42	2.3	1.07	0.44				
	inv21	211.1	33.3	244.4	80	20	20	120	45	35	13	45	12.3	8.45	0	0	0				
SGIA	inv22	166.7	33.3	200	75	50	40	165	30	22	6.2	15	6.94	3.69	2	1.2	0.76				
	inv23	155.6	88.9	244.4	30	70	40	140	35	14	8	35	20.0	11.23	2.5	1.14	0.57				
	inv24	111.1	277.8	388.9	85	50	75	210	20	15	3.8	5	4.4	0.7	2.2	1.44	0.28				
SUBSISTEMA	INV.	PRODUCTIVIDAD												D1	D2	D3	D4				
		DAP (cm)			DAB (cm)			AB total (m ²)			AB (m ²) / ha										
		Pinus	árboles	arbustos	Pinus	árboles	arbustos	P	A	Ac	Ai	P	A					Ao	Ai	P	A
SGIA	inv1	87.53	17.22	19.73	7.13	59.84	3.53	2.4	0.1	2.4	0.4	2.9	26.3	0.906	27.2	4.90	32.2	0	10	30	7
	inv2	71.61	36.75	20.05	6.38	25.62	5.08	3.9	0.2	4	0.4	4.4	32.9	1.754	44.6	4.49	49.1	0	0	30	23
	inv3	70.96	29.11	50.29	12.7	6.37	1.78	3.4	0.4	3.8	0	3.8	37.2	4.653	42.4	0.13	42.5	0	1	10	14
	inv4	68.76	47.91	7.95	2.32	2.16	0.85	4.3	0	4.3	0	4.3	45.1	0.094	46.2	0.01	46.2	0	13	40	23
	inv5	62.7	39.53	22.28	15	3.81	1.13	3	0.1	3.1	0	3.1	33	0.917	33.9	0.03	34	0	0	10	13
	inv6	64.93	37.04	0	0	2.22	1.06	1.7	0.6	2.3	0	2.3	19.3	6.706	26.1	0.02	26.1	0	20	10	12
	inv7	66.2	22.54	29.28	29.3	22.91	4.22	2	0.1	2	0.1	2.1	21.9	0.748	22.7	1.06	23.7	0	8	40	7
SGIC	inv8	71.95	35.54	18.46	12.4	4.77	1.72	2.2	0.1	2.3	0	2.3	24.3	0.753	26	0.1	26.1	0	2	20	0
	inv9	0	0	38.19	15.3	5.09	3.66	0	1.3	1.3	0	1.3	14.4	14.4	0.03	14.4	0	16	60	0	
	inv10	33.1	20.27	47.74	14.5	20.05	2.09	1	0.8	1.8	0.1	1.9	11.3	0.064	20.3	0.65	21	27	16	80	0
	inv11	53.79	32.83	0	0	7.63	1.96	1.4	0	1.4	0	1.4	15.2	0	15.2	0.14	15.4	0	6	40	0
	inv12	42.97	11.92	8.59	5.21	18.14	3.04	0.9	0	0.9	0.1	1	9.61	0.491	10.1	0.95	11	0	0	20	0
	inv13	53.47	24.72	21.6	21.6	2.54	0.63	1.9	0	1.9	0	1.9	21	0.409	21.4	0.02	21.4	23	3	15	19
	inv14	88.75	41.67	0	0	5.09	0.82	2.1	0	2.1	0	2.2	23.9	0	23.9	0.05	23.9	7	4	10	0
SGIA	inv15	71.61	42.88	83.86	13.2	9.54	4.87	1.4	0	1.4	0	1.5	15.8	0.021	15.8	0.24	16.2	0	4	4	4
	inv16	22	9.06	50.61	23.1	8.59	2.61	0.6	0.6	1.2	0	1.2	6.76	6.718	13.5	0.19	13.7	0	2	25	0
	inv17	54.43	26.03	58.88	20.2	5.72	0.77	2.5	0.8	3.2	0	3.2	27.4	8.557	35.9	0.08	36	15	0	35	0
	inv18	0	0	65.67	22.5	2.86	1.84	0	1.6	1.6	0	1.6	0	17.79	17.8	0.02	17.8	0	2	40	0
	inv19	31.19	13.31	38.19	18.8	12.73	3.47	0.2	1	1.2	0.1	1.3	2.24	11.64	13.9	0.59	14.5	0	2	35	0
	inv20	38.19	22.45	57.29	34.4	25.78	2.4	0													

BIBLIOGRAFÍA

- Burel, F., Baudry, J. 2002. *Ecología del Paisaje: conceptos, métodos y aplicaciones*. Mundi-Prensa. Madrid.
- Fahrig, L., Merriam, H. G. 1985. Habitat patch connectivity and population survival. *Ecology*, 66: pp. 1762-1768.
- Farina, A. 1996. *Principles and Methods in Landscape Ecology*. Chapman y Hall. 235 pp.
- García, R. A., Mendoza, R. K. I., Galicia, S. L. 2005. Valoración del paisaje de la selva baja caducifolia en la cuenca baja del río Papagayo (Guerrero), México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Num. 56, 2005, pp. 77-100*.
- Hanski, I. 1989. Metapopulation dynamics: does it helps to have more the same. *TREE*, 4: pp. 113-114.
- Keitt, T. H., Urban, D. L., Milne, B. T. 1997. Detecting critical scales in fragmented landscapes. *Conservation Ecology*. 1:13-29.
- Levin, S. A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology, *Ecology*, 73:1943-1967.
- Mas, J.F. 1998. Deforestación y fragmentación en la región de la Laguna de Términos, Campeche: un análisis del periodo 1974-1991. Los Petenes. *Mem. IX Reunión Nacional de la Soc. Latinoamer. de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial. Desarrollo Sustentable*. 8-9 de Oct. Zacatecas, México.
- Mateo, J. M., Ortiz, M. A. 2001. La degradación de los paisajes como concepción teórico-metodológica. Serie Varia, Nueva Época, Num. 1. Instituto de Geografía, UNAM. México. 40 pp.
- Muñoz, J. 1998. Paisaje y Geosistema. Una aproximación desde la Geografía Física. En: *Paisaje y medio ambiente* (Martínez de Pisón, E. (Edit.)). Fundación Duques de Soria-Univ. De Valladolid, España. 45-56.

- Naveh, Z., Lieberman, A. S. 1984. *Landscape Ecology: Theory and Applications*. Springer-Verlag, Nueva York.
- Ochoa, S. 2001. Traditional Land-Use Systems and Patterns of Forest Fragmentation in the Highlands of Chiapas, México. *Environmental Management*. 27/4: 571-586.
- Wiens, J. A. 1995. Landscape mosaics and ecological theory, En: L. Hansson, L. Fahrig y G. Merriam (eds.), *Mosaic Landscapes and Ecological Processes*. Chapman and Hall, Londres. pp. 1-25.
- Zonneveld, I. 1995. Land Ecology, an introduction to Landscape Ecology as a base for Land Evaluation. Land Management and Conservation. SBP Academic Publishing. Amsterdam, Holanda. 199 pp.

CONCLUSIONES

La investigación presenta una manera de comprender el estado y dinámica del paisaje de la cuenca del río Tuxpan a partir de la influencia que ejerce la ocupación y usos de suelo y los procesos de deforestación y fragmentación que afectan las estructuras y funciones del sistema ambiental y del paisaje, específicamente aquel relacionado con la diversidad y estabilidad de los ecosistemas forestales. Esto es relevante ya que los bosques templados en el Estado de Michoacán se encuentran entre uno de los ecosistemas más afectados por los cambios no planificados del uso del suelo (Maser, 1996; Bocco *et al.*, 1999; SEMARNAP, 2000).

Se puede reflexionar, a partir de los resultados obtenidos, que los patrones de uso de suelo en la cuenca del río Tuxpan son el resultado de la intervención antrópica de los habitantes de los municipios, grupos sociales y pequeños propietarios sobre los recursos forestales y que, el patrón de actuación se relaciona con la morfoestructura donde se establece y desarrolla el sistema de uso de suelo. Así, por ejemplo, se puede hablar a escala del área de estudio de tres sistemas: 1.- *Abetal de las altas cumbres*, 2.- *Bosque de pino-encino de las laderas y cumbres volcánicas* y, 3.- *Selva baja caducifolia de laderas sedimentarias bajas*, así como de tres subsistemas: 2a.- *Bosque de pino-encino de las cumbres volcánicas*, 2b.- *Bosque de pino-encino de laderas volcánicas medias y altas* y, 2c. - *Bosque residual de pino-encino de laderas bajas y fondo de cuenca*, debido a cambios morfológicos que alteran la sensibilidad y respuesta del sistema, con consecuencias sobre la disponibilidad de recursos y los patrones de uso de suelo.

Así por ejemplo, se pueden identificar sistemas de uso de suelo que corresponden: a) los aluviones y volcanismo basáltico y andesítico de las laderas

bajas y fondo de cuenca del plio-cuaternario; b) las formaciones volcánico-andesítico y domos ignimbríticos de las laderas bajas y medias y; c) las formaciones jurasico-cretácicas -calizas y esquistos verdes- que se exhiben en las partes meridionales de la cuenca, específicamente en las laderas sedimentarias bajas.

A partir del criterio de nivel de integración utilizado en esta investigación - diferenciación de los contenidos del territorio- se logró identificar, a escala del área de estudio, estructuras volcánicas del periodo cuaternario, seguido aquellas del Terciario Superior. Las formas más representativas de estas estructuras son: las laderas, los conos y domos, las mesas y, las planicies. A escala de los sistemas de paisaje, resaltan las laderas del Mioceno correspondientes al *Bosque de pino-encino de las laderas y cumbres volcánicas*, seguido de los domos, laderas, conos y mesas del Cuaternario *de la Selva baja caducifolia de laderas sedimentarias bajas*. A escala de los subsistemas resaltan, por otro lado, las estructuras volcánicas del periodo Mio-plioceno, específicamente las laderas y conos.

Con relación a la dinámica del paisaje, los mayores índices de deforestación afectan a los bosques de oyamel, cuyos ambientes, particularmente altos e inaccesibles, favorecen el desarrollo de actividades clandestinas. En contraste a los reportes recientes que señalan a la agricultura como un factor clave de la deforestación en América Latina, en este caso la expansión agrícola que afectó los bosques de pino-encino de los piedemontes y llanuras templadas, debió ocurrir antes del periodo de estudio. Las tendencias de las últimas tres décadas miran hacia un abandono de la agricultura de temporal que se correlaciona con una notable regeneración de las coberturas forestales. Este dato es importante porque, frente a numerosos trabajos que señalan a México como uno de los países con mayores tasas de deforestación, nuestros datos revelan una ligera

tendencia positiva que coincide con algunos trabajos recientes en diversos puntos del Eje Neovolcánico.

Asimismo, las tendencias actuales señalan a la agricultura tradicional como la actividad económica más relacionada con la expansión poblacional del campo y que ha generado mayor deforestación y deterioro ambiental en México y América Latina, sin embargo, nuestros datos revelan una tendencia, ya citada en algunos trabajos del centro del país, en el sentido de que en los últimos 30 años esta actividad ha entrado en un proceso de abandono, y en ocasiones ha sido sustituida por la expansión e intensificación de la ganadería. La penetración de la economía de mercado, la caída en los precios del maíz y el alto riesgo que supone la actividad agrícola, carente de programas de desarrollo y subsidios que incrementan la susceptibilidad ante eventos naturales, han sido señalados como causas principales del problema.

En la cuenca del río Tuxpan se observa una clara tendencia al predominio de los procesos de cambio positivos -conservación y regeneración- en comparación con los procesos negativos -disturbio e intensificación-, siendo el principal proceso positivo la modificación de la vegetación secundaria con uso extensivo que pasa a bosques maduros, principalmente en el ecosistema del bosque de pino-encino.

Que la mayor concentración de los procesos negativos que se presentan en la cuenca del río Tuxpan es debido a la permanencia e intensificación de la vegetación cultivada con uso extensivo e intensivo, principalmente de la agricultura de temporal lo que trae como consecuencia la no regeneración del bosque. La dotación de infraestructura en la región ha permitido la expansión de la agricultura de riego, principalmente sobre antiguos matorrales y pastizales, resultado del abandono agrícola.

Los resultados dejan ver que el proceso de expansión agropecuaria pudo ser intenso hasta la década de los setentas, tras lo cual prevaleció el abandono de la actividad y la regeneración de las coberturas de vegetación natural, situación que ha sido reportada para otras áreas de México.

Es importante resaltar el retroceso de los paisajes elementales de los bosques de abeto (ba) y el decremento de la selva baja caducifolia (SBC) hacia el último periodo (76-00), así como la expansión del bosque mesófilo (BM) hacia el primero (76-86). La vegetación secundaria fue muy estable en la selva baja caducifolia y en los bosques templados de abetal y pino-encino. Los paisajes de matorrales y pastizales inducidos (MP) presentaron una tendencia alcista casi en todos los geosistemas. La vegetación cultivada (CT) mostró un ligero retroceso en los diferentes geosistemas. Los cultivos de riego (PAF), por su parte mostraron una notable expansión. Las áreas sin vegetación aparente mostraron comportamientos distintos: carecieron en los bosques de abetal y se incrementaron en los bosques de pino-encino (BPQ).

Se observa, asimismo, una clara tendencia al predominio de los procesos de cambio positivos (conservación y regeneración) en comparación con los procesos de tipo negativo (disturbio e intensificación), siendo el principal proceso positivo la modificación de la vegetación secundaria con uso extensivo que pasó a bosques maduros en el ecosistema del bosque de pino-encino, principalmente.

El comportamiento de la dinámica del paisaje (1976-1986, 1986-2000 y 1976-2000) dejó ver una notable variabilidad espacial y temporal al interior de la cuenca. Sólo el paisaje elemental de BPQ del geosistema de bosque de pino-encino de laderas y cumbres volcánicas mostró una recuperación sensible (ITMA= 0.004, 0.010 y 0.07) en los tres periodos de análisis.

El patrón general del uso del suelo en la cuenca del río Tuxpan es similar a otras áreas del centro del país: a) predominio de bosques maduros, aunque alto valor de la deforestación histórica que en este caso ha reducido la superficie forestal al 46% del total de la cuenca en el año 2000, b) retroceso de los bosques fragmentados, aunque expansión de matorrales y pastizales secundarios y, c) retroceso de los cultivos de temporal, aunque incremento de las plantaciones agroforestales y de los usos intensivos en asentamientos humanos y minas de arena volcánica.

El patrón del paisaje en la cuenca, como en otras áreas del centro de México, es agropecuario y forestal. Este hecho pone en evidencia que grandes extensiones de bosques maduros se vean amenazadas por el constante cambio de uso de suelo lo que ha llevado a la pérdida de estos ecosistemas forestales. El reemplazo de estas cubiertas por otras –resultado de las actividades humanas (Jean-Francois y Correa, 2000)–, es evidente en la cuenca del río Tuxpan, como lo demuestra Ramírez *et al.*, (2003) para la zona de la Mariposa Monarca. Dicha intervención antrópica ha llevado a la degradación misma de estos ecosistemas (González-Espinosa *et al.*, 1995) que, gradualmente exhibieron una modificación en la estructura y composición vegetal y una pérdida notable de especies (Burel y Baudry, 2002). Carsjens y Hubert (2002) señalan, por ejemplo, que esta intervención antrópica tiene efectos negativos sobre los paisajes forestales, a nombrar: la pérdida del hábitat natural, un decremento en el tamaño del hábitat del parche y un impacto eminente sobre las poblaciones vegetales.

La segregación espacial de los ecosistemas forestales por los procesos de destrucción, deforestación y disturbio no es ajena a la cuenca del río Tuxpan, al contrario, es un proceso ampliamente abordado por otras fuentes que explican las causas de la pérdida de la masa arbórea en algunas zonas aledañas al área de estudio. Ramírez *et al.*, (2003), por ejemplo, señalan que para la zona

denominada “Área Protegida de la Mariposa Monarca” dicho proceso afectó entre 1971 y 2000 cerca de 1, 092 ha de bosque, de las cuales, 70% fueron bosques densos. Los resultados indican como posibles causas la extracción de madera y la intensificación de las actividades agrícolas.

Un primer acercamiento al estado actual y dinámica de la fragmentación a nivel de cuenca muestra como los bosques mixtos de pino-encino, pese a su representatividad paisajística, es la cubierta de suelo más afectada del conjunto de los bosques maduros. Esto se explica ya que la industria forestal en el estado de Michoacán se basa en el uso de diferentes especies de pinos –extracción de resina– y encinos. Estos últimos, por ejemplo, se les utiliza como leña, carbón y postes, en muebles, pisos, artesanías, en la industria de celulosa y papel, entre otros usos (CONABIO, 2005). Esta forma de apropiación y transformación del recurso maderable es muy común en poblaciones asentadas de manera dispersa en regiones que exhiben señales de pobreza (Lambin, 2001).

La fragmentación de los bosques de pino-encino en la cuenca del río Tuxpan está estrechamente vinculada a las anteriores actividades humanas que, de alguna forma u otra, se ven favorecidas o restringidas por las condiciones del relieve local. Por ejemplo, Guevara *et al.*, (1998) señalan que en las zonas planas la densidad de árboles aislados es menor a la encontrada en laderas accidentadas y que en estos, los terrenos semiplanos, son los más aptos para la agricultura y ganadería, siendo los primeros en talarse y aprovecharse para las actividades agropecuarias modernas e intensivas.

En la cuenca del río Tuxpan, esta condición se establece en las cumbres volcánicas de Agostitlán y las laderas bajas y fondo de cuenca que comprenden parte de los municipios de Ciudad Hidalgo, Irimbo, Aporo y Ocampo. En tanto que los fragmentos de bosque mixto de pino-encino densos se sitúan en otras

latitudes donde el acceso es limitado debido a las fuertes pendientes -laderas volcánicas altas y medias. No obstante su inaccesibilidad al recurso maderable, estos bosques presentan una transición de bosques densos a otro tipo de vegetación -bosques fragmentados y abiertos con vegetación secundaria. Bocco *et al.*, (2001) señalan que, a nivel estatal, del total de los cambios de bosques a otro tipo de vegetación, 91.2% se presentó en relieves escarpados, 6.5% transicionales y 2.3% planos, todos ellos influenciados, de alguna forma u otra, por la tala legal o clandestina (Ramírez, 2001).

Tras la revisión preliminar de la bibliografía e imágenes de satélite de las últimas tres décadas, se determinó que la cuenca del río Tuxpan estuvo afectada por un intenso proceso de expansión de los usos agropecuarios, el cual pudo haberse mantenido hasta los primeros años de la década de los setenta, resultando en sensibles grados de deforestación y fragmentación de los bosques. Este escenario se justifica si se considera que, de la población total que existía a principios de las décadas de los cincuenta y sesenta en los principales municipios de la cuenca del río Tuxpan (Irimbo, Aporo, Angangueo, Ocampo, Jungapeo de Juárez y Ciudad Hidalgo), 71.88% y 76.27% se dedicaba a las actividades primarias, principalmente la agricultura, la ganadería y los aprovechamientos forestales. Sin embargo, en las décadas subsecuentes esta población decayó súbitamente: 57.91% en la década de los setenta, 38.65% en los ochenta y 33.14% en los noventa, situándose en 24.52% a principios del año 2000. La brecha porcentual de la población dedicada al sector primario entre mediados del siglo pasado y el año 2000 decayó en 2.93 puntos porcentuales.

Por ahora basta mencionar la relación que guarda, de acuerdo a varios autores, el área, la forma y el aislamiento de los fragmentos (indicadores de la fragmentación), con las variables de la vegetación (Estrada y Coates, 1994; McIntyre, 1995; Robbins *et al.*, 1989; Schieck *et al.*, 1995; en Mas, 2000), siendo

el tamaño y forma del fragmento los índices más utilizados y de más fácil comprensión en los estudios de fragmentación (Gigord *et al.* 1999, Armenteras *et al.* 2003, Fitzsimmons, 2003, Echeverría *et al.* 2006, en: Altamirano *et al.*, 2007). Se considera, por ejemplo, que a mayor superficie del fragmento, mayor es el número de especies y, viceversa, fragmentos con áreas más reducidas albergan menos especies (Debinski and Holt, 2000, en Fahring, 2003). Con relación a la forma del fragmento, teóricamente aquellos fragmentos con mayor perímetro muestran mayor cantidad de organismos (Hamazaki, 1996). El aislamiento del fragmento, sin embargo, presenta ciertas controversias, pues su noción depende de las especies estudiadas (Mas, 2000). Por otro lado, este índice de la fragmentación mide la cantidad de hábitat en el paisaje y puede interpretarse que, a mayor aislamiento de un determinado parche, menor será el hábitat que lo rodea o circunscribe (Fahrig, 2003). Se trata pues de un índice que explica por un lado, la cantidad de hábitat que rodea un determinado parche y, por otro, la configuración de hábitat a nivel de paisaje.

Se ha demostrado que la abundancia de ciertas especies está relacionada con el tamaño y el grado de aislamiento de los parches de vegetación (Estrada y Coates, 1994; McIntyre, 1995; Robbins *et al.*, 1989; Schieck *et al.*, 1995; en Mas, 2000), siendo la superficie del parche el dato más importante y útil en el análisis de un paisaje (McGarigal y Marks, 1994). Sin embargo, los resultados muestran que, a nivel del área de estudio, el aislamiento del parche o fragmento tiene poca correlación con las variables de la vegetación, como lo demuestran los valores negativos de este atributo de la fragmentación que se presenta en más del 61.53% de las variables de la vegetación consideradas, en tanto que 92.30% y 87.17% de éstas tuvieron valores positivos con la forma y tamaño de los fragmentos, respectivamente.

Por otro lado, el incremento discreto de la población al sector primario en las décadas de los años 1950 y 1970 obedeció, al igual que en otras partes del país, al subsidio otorgado por el gobierno federal a empresas paraestatales para la extracción de la materia prima maderable. Esta práctica, sin embargo, se vio afectada en 1937 por un decreto del gobierno estatal que prohibió por un lapso de 20 años la extracción de madera con fines comerciales e industriales (Guzmán Ávila, 1982, en: Works and Hadley, 2004). Si bien dicha iniciativa logró frenar la extracción forestal entre 1937 y 1957, esto no impidió que, para los años venideros, el retroceso de la masa arbórea y por ende la fragmentación forestal continuará debido a la expansión de la frontera agropecuaria.

No obstante las tendencias que señalan a la cuenca del río Tuxpan como una zona altamente dedicada a las actividades terciarias, su población rural que se ubica en las zonas marginales del área de estudio realiza actividades silvícolas sin un plan de manejo adecuado, lo que trae graves repercusiones a los ecosistemas de bosque de pino-encino. Entre algunas de las actividades económicas que se practican en las zonas marginales de la cuenca y que exacerban el proceso de fragmentación se pueden citar, entre otras, la extracción de madera y la agricultura de subsistencia, como lo demuestran dichas actividades en la zona de la Mariposa Monarca (Ramírez *et al.*, 2003).

De esta manera, no se puede entender totalmente la situación actual y dinámica del paisaje forestal en la cuenca del río Tuxpan sin abordar de que manera los cambios de cubierta y uso de suelo incidieron en el estado actual y dinámica de la fragmentación en los diferentes niveles de integración (cuenca, geosistema y subgeosistema), y como algunos indicadores de esta fragmentación influyen sobre la diversidad y estructura vertical de los bosques mixtos de pino-encino. En una primera parte, como ya se observó, se describe a nivel de cuenca, sistemas y subsistemas los atributos más importantes de la fragmentación. Este ejercicio

tuvo a bien identificar patrones de fragmentación al interior de cada sistema y subsistema. El análisis de dichos atributos se centra principalmente en el subsistema II y sus respectivos subsistemas (IIa, IIb y IIc), esto en respuesta al objeto que da atención al proyecto de investigación: los ecosistemas de bosques templados, específicamente los bosques mixtos de pino-encino.

Esta parte no discute temas que aborden cuestiones de dinámica del paisaje, específicamente lo relacionado con la fragmentación, aun cuando dan una clara idea de las variaciones espaciales de los fragmentos en el tiempo -tamaño, forma y grado de aislamiento, entre otros. Dicho estudio temporal se aborda en los primeros subcapítulos de este apartado de la fragmentación. Más que eso, esta fase de discusión pretende explicar como la diversidad y estructura vertical de los bosques de pino-encino se encuentra subordinada a ciertos indicadores de la fragmentación.

BIBLIOGRAFÍA

- Altamirano, A., Echeverría, C., Lara, A. 2007. Efecto de la fragmentación forestal sobre la estructura vegetacional de las poblaciones amenazadas de *Legrandia concinna* (Myrtaceae) del centro-sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. 80: 27-42.
- Armenteras, D., Gast, F., Villareal, H. 2003. Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes, Colombia. *Biological Conservation* 113: 245-256.
- Bocco, G. y M. Mendoza. 1999. Evaluación de los cambios de la cobertura vegetal y uso del suelo en Michoacán (1975-1995). Lineamientos para la ordenación ecológica de su territorio. Proyecto No. 96 06 042, Programa SIMORELOS-CONACYT. Informe Técnico, Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, Campus Morelia.
- Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. 2001. La Dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*. Instituto de Geografía de la UNAM. México, D.F. 44: 18-38.
- Burel, F., Baudry, J. 2002. *Ecología del Paisaje: conceptos, métodos y aplicaciones*. Mundi-Prensa. Madrid.
- CONABIO, 2005. La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 266 pp.
- Debinski, D. M., Holt, R. D. 2000. A survey and overview of habitat fragmentation experiments. *Conserv. Biol.* 14:342-55.
- Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Reybenayas, J. M., Lara, A., Newton, A. 2006. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biological Conservation* 130: 481-494.
- Estrada, A., Coates-Estrada, R. 1994. Las Selvas de los Tuxtlas, Veracruz: ¿islas de supervivencia de la fauna silvestre? *Ciencia y Desarrollo*. 20:116:50-61.

- Fahrig, L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Reviews of Ecology and Systematics* 34: 487-515.
- Fitzsimmons, M. 2003. Effects of deforestation and reforestation on landscape spatial structure in boreal Saskatchewan, Canada. *Forest Ecology and Management* 174: 577-592.
- Gigord, L., Picot, F., Shycoff, J. 1999. Effects of habitat fragmentation on *Dombeya acutangula* (Sterculiaceae), a native tree on La Réunion (Indian Ocean). *Biological Conservation* 88: 43-51.
- González, M., Ochoa, S., Ramírez, N., Quintana, P. 1995. Current land-use trends and conservation of old-growth forest habitats in the highlands of Chiapas, Mexico. In: Wilson, M. y S. Sader (eds.). *Conservation of neotropical migratory birds in Mexico*. Maine Agric. For. Exper. Stn. Misc. Publ. 727: 190-198.
- Guevara, S., Laborde, J., Sánchez, G. 1998. Are isolated remanent trees in pastures a fragmented canopy? *Selbyana* 19:34-43.
- Guzmán Ávila, J. N. 1982. *Michoacán y la inversión extranjera, 1880-1911*. Universidad Michoacana. Morelia. México.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkam, T. A., Vogel, C., Xu, J. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11: 261-269.
- Mas, Jean-Francois., Correa, S. J. 2000. Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida "Los Petenes", Campeche, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 43*, pp. 42-59.
- Masera, O. R. 1996. *Deforestación y degradación forestal en México, Documentos de Trabajo No. 19*, GIRA A. C. Pátzcuaro, México (enero).

- McGarigal, K., Marks, B. J. 1994. FRAGSTATS. Spatial pattern analysis program for quantifying landscapes structure. Versión 2.0. Oregon State University, Corvallis, 67 pp.
- McIntyre, N. E. 1995. Effects of forest patch size on avian Diversity. *Landscape Ecology*. 10:2:85-99.
- Ramírez, M. I., Azcárate, J. G., Luna, L. 2003. Effects of human activities on monarch butterfly habitat in protected mountain forest, México. *The Forestry Chronicle*. 79:2:242-246.
- Ramírez, R. I. 2001. Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000. investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM. *Num. 45: pp 39-55*.
- Robbins, C. S., Dawson, D. K., Dowell B. A. 1989. Habitat area requirements of breeding forest birds of the middle atlantic states, *Wildl. Monogr*. 103.
- Schieck, J., Lertzman, K., Nyberg, B., Page, R. 1995. Effects of patch size on birds in old-growth montane forest. *Conservation Biology*. 9:5:1072-1084.
- SEMARNAP, 2000. Dirección General Forestal. Unidad del Inventario nacional de Recursos Naturales . México.
- Works, M. A., Hadley, K. 2004. The cultural context of forest degradation in adjacent Purépechan communities, Michoacán, Mexico. *The Geographical Journal*, 170/1, 22-38.