



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Posgrado en Geografía  
Facultad de Filosofía y Letras e Instituto de Geografía  
Geografía Ambiental

INFLUENCIA DEL “EFECTO DE BORDE” EN LA DEGRADACIÓN DE LOS  
BOSQUES TEMPLADOS. CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO,  
CENTRO DE MÉXICO

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:  
CARLOS GRANADOS PELÁEZ

TUTOR: ARTURO GARCÍA ROMERO  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

MÉXICO, D. F. JUNIO 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# AGRADECIMIENTOS

Al posgrado en Geografía, UNAM.

A los apoyos recibidos por:

-CONACyT, con número (CVU/Becario):

- DGAP-UNAM PAPIIT (Clave): IN300911

Título del proyecto: Dinámica del paisaje y biodiversidad en los bosques templados del centro de México.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi director de tesis Dr. Arturo García Romero por su guía, por creer en mí, por su confianza, por su afecto y por permitirme compartir sus conocimientos tan valiosos.

De igual forma, quiero agradecer a los miembros del comité tutor: Dr. Raymundo Montoya Ayala, Dr. José López García, Dr. José Fernando Aceves Quesada y Dr. Carlos Arredondo León. Por enriquecer este trabajo con sus observaciones y sugerencias.

A mi querida esposa M en C. Julieta Orozco Martínez, por su paciencia, por su apoyo incondicional y por sobretodo, por su gran amor.

A los compañeros de cubículo que me acompañaron en las faenas de campo, a todos ellos muchas gracias.

Finalmente, a todos aquellos que han tocado mi vida, a mis padres y maestros, que han forjado la persona que soy, a todos ellos...

Mil gracias.

## RESUMEN

En las últimas décadas se ha incrementado el interés por las repercusiones que el efecto de borde tiene sobre las comunidades forestales en paisajes fragmentados. Con el objetivo de evaluar la magnitud y distribución de la perturbación asociada al efecto de borde en los bosques templados de la cuenca del río San Jerónimo, se seleccionaron 29 fragmentos de diferente tamaño, forma y conectividad. En cada caso se estableció un transecto desde el borde hacia el centro del fragmento (2 m de diámetro y longitud variable de entre 50 a 250 m), como base para el registro de 24 variables referentes a la composición, estructura y productividad de la vegetación. Las variables anteriores ayudaron a determinar la amplitud de los bordes y definir los diferentes hábitats y grados de perturbación: borde exterior (0 a 50 m desde el borde de los fragmentos), borde interior (50 a 100 m) y núcleo (> 100 m). Los resultados revelaron una respuesta inversa de las variables relacionadas con la composición (riqueza, abundancia y diversidad) con respecto a la distancia al borde, lo cual se interpreta como normal en hábitats perturbados. Asimismo, que los núcleos de los fragmentos son los únicos hábitats que conservan la composición y diversidad florística originales y que las condiciones existentes en estos hábitats permiten el proceso de recuperación de sus bordes. Para explicar la distribución se evaluaron variables ambientales relacionadas con la morfometría, geología y uso del suelo, de las cuales, las variables relacionadas con la morfometría del relieve son las que controlan el deterioro forestal en el área. Se concluye que es necesario desarrollar un sistema silvicultural que considere la particular composición de los bordes de los fragmentos para favorecer su recuperación, reconociendo el valor de los fragmentos forestales en el mantenimiento de la viabilidad de las poblaciones forestales.

Palabras claves: Fragmentación, efecto de borde, bosques templados, variables de la vegetación y variables ambientales.

## SUMMARY

In recent decades there has been increased interest in the impact of the edge effect has on forest communities in fragmented landscapes. In order to assess the magnitude and distribution of the disturbance associated with edge effects in pine and oak forests of San Jerónimo River basin, we selected 29 fragments of different size, shape and connectivity. In each case established a transect from the edge toward the center of the fragment (2 m in diameter and variable length between 50-250 m) as the basis for the registration of 24 variables concerning the composition, structure and vegetation productivity. The above variables helped determine the extent of the edges and define the different habitats and degrees of disturbance: outer edge (0-50 m from the edge of the fragments), inner edge (50-100 m) and core (> 100 m). The results revealed an inverse response of the variables related to the composition (richness, abundance and diversity) with respect to the distance to the edge, which is interpreted as normal in disturbed habitats. In addition, the cores of the fragments are the only habitats that retain original floristic composition and diversity and that the conditions in these habitats allow the recovery process of its edges. To explain the distribution were evaluated environmental variables related to morphometry, geology and land use, of which, the variables related to the morphometry of the relief are those that control forest degradation in the area. It concludes that it is necessary to develop a silvicultural system that considers the special composition of the edges of the fragments to promote their recovery, recognizing the value of forest fragments in maintaining the viability of pine and oak forest.

Keywords: habitat fragmentation, edge effect, pine and oak forest, variables of vegetation and environmental variables.

# CONTENIDO

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>ii</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>iv</b>
<b>Summary</b> .....	<b>v</b>
<b>Contenido</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>viii</b>
<b>Índice de gráficas</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>x</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo I. Marco Teórico – Metodológico</b> .....	<b>4</b>
1.1 Fragmentación del hábitat .....	4
1.2 Efectos espaciales de la fragmentación .....	4
1.3 Fundamentos teóricos de la fragmentación .....	6
1.4 Efecto de borde y la creación de hábitats de borde .....	8
1.5 Efectos de los hábitats de borde en los fragmentos forestales .....	9
1.6 Factores de la distribución del proceso de degradación.....	11
1.6.1 Dinámica del paisaje .....	11
1.6.2 Heterogeneidad espacial .....	13
1.7 Área de estudio y Planteamiento del problema .....	15
1.8 Objetivos .....	18
1.8.1 Objetivo general .....	18
1.8.2 Objetivo específicos.....	18
1.9 Metodología .....	19
1.9.1 Caracterización de la configuración espacial de los fragmentos forestales.....	19
1.9.2 Obtención de las variables de la vegetación .....	21
1.9.3 Identificación y caracterización de los hábitats de borde .....	25
1.9.4 Obtención y catalogación de los factores relacionados al relieve.....	27

1.9.5 Identificación de las relaciones entre la distribución de los hábitats de borde y posibles factores del relieve y uso del suelo .....	35
<b>Capítulo II. Geomorfología: Unidades y formas del relieve .....</b>	<b>36</b>
2.1 Contexto Geológico Regional .....	36
2.2 Historia Geológica Local .....	41
2.3 Litología de superficie .....	43
2.4 Organización Geomorfológica .....	47
2.4.1 Principales Unidades del Relieve .....	47
2.4.2 Clasificación de las Formas del Relieve .....	53
<b>Capítulo III. Patrón del paisaje y Hábitats de borde.....</b>	<b>58</b>
3.1 Patrón del paisaje en la cuenca del río San Jerónimo .....	58
3.1.1 Principales ejes de la transformación paisajística .....	59
3.1.2 Estado actual de la distribución de las clases paisajísticas .....	61
3.2 Bosque de Pino-Encino: Características y Distribución .....	66
3.2.1 Caracterización de la estructura espacial .....	66
3.2.2 Descripción Florístico-Estructural .....	67
3.3 Efectos de borde en el Bosque de Pino-Encino .....	74
3.3.1 Variables de respuesta de la vegetación al efecto borde .....	74
3.3.2 Identificación y amplitud espacial de los hábitats de borde .....	76
3.3.3 Características del bosque en los distintos hábitats de borde y área núcleo .....	80
<b>Capítulo IV. Hábitats de borde y Factores de distribución .....</b>	<b>84</b>
4.1 Efecto de borde en la degradación del Bosque de Pino-Encino- .....	84
4.2 Influencia del relieve y uso del suelo en la distribución de los niveles de degradación ...	86
<b>Conclusiones .....</b>	<b>97</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>101</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>108</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de localización de la cuenca del río San Jerónimo .....	17
Figura 1.2 Mapa altimétrico de la cuenca del río San Jerónimo .....	29
Figura 1.3 Mapa de pendientes de la cuenca del río San Jerónimo .....	30
Figura 1.4 Mapa de exposición de la cuenca del río San Jerónimo .....	31
Figura 1.5 Mapa de geometría de laderas de la cuenca del río San Jerónimo	33
Figura 1.6 Mapa de energía del relieve de la cuenca del río San Jerónimo .....	34
Figura 2.1 Provincia fisiográfica, Eje Neo Volcánico .....	36
Figura 2.2 Ubicación regional del área de estudio, Eje Neovolcánico .....	37
Figura 2.3 Alineamiento montañoso Sierra de las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo. Localización de los volcanes A: Ajusco, B: La Bufa, C: La Catedral, Ch: Chimalpa, Co: La Corona, I: Iturbide, SM: San Miguel, S: Salazar, Z: Zempoala.....	38
Figura 2.4 Mapa Geológico de la cuenca del río San Jerónimo .....	44
Figura 2.5 Mapa Geomorfológico de la cuenca del río San Jerónimo .....	54
Figura 3.1 Mapa de Cubiertas y Usos del Suelo de la cuenca del río San Jerónimo .....	61
Figura 3.2 Mapa de localización y amplitud de hábitats de borde en la cuenca del río San Jerónimo.....	79
Figura 4.1 Mapa de distribución del grado de perturbación de los bosque de Pino-Encino en la cuenca del río San Jerónimo .....	85

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1 Distribución diamétrica del grupo fisonómico pinos, por individuos.....	72
Gráfica 3.2 Distribución diamétrica del grupo fisonómico Otros Árboles, por individuos .....	72
Gráfica 3.3 Distribución de alturas (m) de la categoría Pinos, por individuos .....	73
Gráfica 3.4 Distribución de alturas de la categoría “Otros Arboles” .....	74
Gráfica 3.5 Representación del espacio generado por las dos primeras componentes.....	75
Gráfica 3.6 Dendrograma de los grupos formados por el análisis de conglomerados .....	77
Gráfica 3.7 Número de familias, géneros y especies por borde .....	80
Gráfica 3.8 Índices de diversidad y equitatividad por bloques de distancia.....	83
Gráfica 4.1 Distribución del grado de perturbación del bosque de pino-encino en 5 rangos de altitud, por porcentaje de cobertura .....	88
Gráfica 4.2 Distribución del grado de perturbación del bosque de pino-encino en 4 clases de de exposición, por porcentaje de cobertura.....	90
Gráfica 4.3 Distribución del grado de perturbación del bosque de pino-encino en 5 rangos de pendiente del terreno, por porcentaje de cobertura .....	92
Gráfica 4.44 Distribución del grado de perturbación del bosque de pino-encino en 3 clases de geometría de laderas, por porcentaje de cobertura.....	93
Gráfica 4.5 Distribución del grado de perturbación del bosque de pino-encino en los tipos de uso del suelo, por porcentaje de cobertura.....	94
Gráfica 4.6 Distribución del grado de perturbación del bosque de pino-encino en las distintas unidades geológica, por porcentaje de cobertura .....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Variables de la vegetación y su respectivo código fuente.....	25
Tabla 3.1 Clases de cubiertas, cantidad de parches y superficie total, Cuenca del río San Jerónimo.....	59
Tabla 3.2 Estructura de las clases de fragmentos de pino-encino.....	67
Tabla 3.3 Número y proporción de géneros, especies e individuos por familias .....	68
Tabla 3.4 Número y proporción de especies e individuos por género .....	69
Tabla 3.5 Número total de familias, géneros y especies de los grupos fisionómicos.....	70
Tabla 3.6 Número y proporción de individuos por especies.....	71
Tabla 3.7 Total de varianza explicada por componentes.....	75
Tabla 3.8 Tabla de resumen del ANOVA .....	77
Tabla 3.9 Tabla del resumen de Tukey.....	78
Tabla 3.10 Número de individuos por grupos fisionómicos y familias por borde .....	81
Tabla 4.1 Características espaciales de los fragmentos del bosque en distintos grados de perturbación.....	84
Tabla 4.2 Relación espacial del grado de perturbación del bosque de pino-encino entre parámetros geomorfológicos y características de uso del suelo, por superficie de cobertura.....	86

## INTRODUCCIÓN

Los bordes son entendidos como las zonas de contacto que se forman entre dos entidades – normalmente tipos de paisajes o de cubiertas del suelo- que son distintas en composición y estructura. En el caso de las áreas forestales, su estudio es considerado clave para entender como la fragmentación del paisaje afecta la calidad de los hábitats. Especial atención se tiene por los llamados “efectos de borde”, es decir, las consecuencias ambientales, pero principalmente ecológicas, que se concentran en la parte exterior de los fragmentos forestales.

La presente investigación ofrece un diagnóstico de la degradación de los bosques templados en la cuenca del río San Jerónimo, estado de México, con énfasis en la evaluación de los daños debidos a la fragmentación y el efecto de borde en remanentes forestales, mediante una base teórico-metodológica en la que se integran elementos propios de la disciplina geográfica con otros provenientes de la ecología del paisaje.

El área en estudio se ubica en el extremo norte de la sierra de Monte Alto y Monte Bajo, misma que junto con la sierra de Las Cruces forman el borde serrano que separa a dos de las cuencas más pobladas del país, la cuenca de México al oriente y la de Toluca al occidente. El interés por el área se justifica porque es representativa de una problemática ambiental que es común al conjunto de las áreas serranas del centro del país, donde no obstante las limitantes de carácter morfológico y climático, la disponibilidad de suelos fértiles, agua y recursos forestales motivaron la expansión histórica de los aprovechamientos agrícolas, pecuarios, forestales y, destacando por su significado para el área, la explotación del carbón vegetal.

En la actualidad el área refleja los impactos causados por los procesos de deforestación y reducción del hábitat forestal. El problema se agrava al considerar que los remanentes forestales exhiben distintos grados de fragmentación y deterioro, situación común a muchas

otras áreas que han sido estudiadas y para las cuales se han obtenido resultados que nos alertan sobre la magnitud del problema. Sin embargo, a diferencia de la mayoría de los trabajos consultados, en este estudio se parte del entendido de que los fragmentos de bosque remanentes son espacios con una estructura interna que no necesariamente es homogénea, sino que debido al contacto con su entorno paisajístico, es posible el desarrollo de bordes o franjas exteriores que exhiben distinto grado de perturbación.

Uno de los objetivos centrales del estudio es investigar las causas del desarrollo de hábitats de bordes en los fragmentos forestales, bajo una perspectiva integral. Para ello se partió del criterio que considera que la distribución de la fragmentación está directamente controlada por los cambios de uso de suelo y aprovechamientos forestales, y de manera indirecta por los cambios de relieve, de los cuales depende de la disponibilidad de recursos y la estabilidad que el hombre requiere para la ocupación y el uso del territorio.

Es por lo anterior que en el Capítulo 2 se presentan los resultados del estudio geomorfológico de la cuenca del río San Jerónimo. El estudio se apoya en información bibliográfica, fotointerpretación, observaciones en campo y en la elaboración y tratamiento de un Modelo Digital de Terreno, para la elaboración del Mapa Geomorfológico. En él se presenta la distribución de las geoformas del área, diferenciadas a partir de sus caracteres geológicos (origen, litología y edad de los materiales) y morfométricos (altitud, pendiente del terreno, exposición de laderas y energía del relieve).

En el Capítulo 3 se presentan los resultados sobre los usos y cubiertas del suelo. La importancia de la elaboración del Mapa de Cubiertas y Usos estriba en el hecho de que la información obtenida es el resultado de la interacción entre los factores físicos-ambientales y factores culturales. En la primera sección se analizaron y describen los diferentes tipos de cobertura y usos asociados a prácticas antropogénicas en la zona de estudio; el capítulo continúa con el análisis detallado y pormenorizado de la configuración espacial de los remanentes del bosque de Pino-Encino. Para ello, se utilizaron diversos indicadores de la

fragmentación –tamaño, forma y aislamiento-, empleados comúnmente en la Ecología del Paisaje. La generación de una robusta base de datos que se obtuvo mediante registros levantados en trabajo de campo, fue la base para caracterizar la composición, estructura y productividad de los bosques en fragmentos de distintas características espaciales.

Los resultados muestran que las variables relacionadas con la composición florística de los bosques, en específico: la abundancia, la riqueza y la diversidad, fueron las que mostraron una respuesta más clara frente al gradiente ambiental generado por los hábitats de borde. Por ello, dichas variables fueron utilizadas para determinar los diferentes grados de perturbación relacionados con distintos hábitats de borde y la amplitud de los mismos. Estos resultados permitieron elaborar el Mapa de la Degradación Forestal, el cual muestra con gran claridad los patrones de distribución de los distintos niveles del deterioro forestal, determinado por la presencia de distintos hábitats de borde.

Finalmente, el Capítulo 4 se analizaron las relaciones espaciales de distribución entre, por una parte la Degradación Forestal, y por otra las variables del relieve y del uso del suelo que de manera predeterminada fueron seleccionadas como posibles factores explicativos. El análisis permitió alcanzar una visión integral de la degradación forestal en la cuenca del río San Jerónimo. Se concluye que el problema está claramente marcado por las múltiples interacciones de factores físicos (bióticos y abióticos) y culturales.

# CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO – METODOLÓGICO

## 1.1 Fragmentación del hábitat

La fragmentación del hábitat es un proceso continuo y dinámico mediante el cual un determinado hábitat se transforma en uno compuesto por fragmentos de diferente tamaño y forma, más o menos conectados entre sí e inmersos en una matriz de hábitats diferentes al original (Burel y Baudry, 2002; Morláns, 2002; Turner *et al.*, 2001).

Este proceso puede deberse a distintas causas, tanto naturales, como es el caso de los incendios y las plagas, así como antropogénicas, como la deforestación y el cambio en las cubiertas del suelo (Wulder *et al.*, 2009). Todas ellas modifican las condiciones ambientales y el funcionamiento de los ecosistemas, con alteraciones del régimen hidrológico, el ciclo de los minerales, el microclima y las propiedades de los suelos (Forman y Godron, 1986). Conforme el proceso evoluciona, los fragmentos disminuyen de tamaño y se aíslan, lo que conlleva a efectos espaciales que impactan en las poblaciones contenidas en el fragmento (Múgica *et al.*, 2002).

## 1.2 Efectos espaciales de la fragmentación y su relación con la degradación

### a. Tamaño

El tamaño de los fragmentos tiene una clara correlación con la diversidad de especies que pueden albergar, siendo los fragmentos grandes preferibles a los pequeños ya que sostienen mayores poblaciones y con menores tasas de extinción (Romero, 2004). En cambio, un incremento en la extensión de los fragmentos facilita el mantenimiento de poblaciones de mayor tamaño y más diversas (Vila *et al.*, 2006). A este hecho se le conoce como el “efecto área”. Laurence *et al.* (2002) reporta que los fragmentos entre 1 y 10 ha tienen menor

cantidad de especies y poblaciones de menor tamaño que los fragmentos de 100 ha. En general, las estrategias de conservación hacen referencia a la necesidad de conservar áreas lo suficientemente extensas para mantener la diversidad de especies y genes en los sistemas naturales.

#### b. Forma

La forma se refiere a la relación entre el área y el perímetro de los fragmentos. En general, en los fragmentos con una baja relación área/perímetro, es decir, fragmentos de forma regular, la proporción del hábitat interior es mayor al tiempo que se reduce la influencia de las perturbaciones externas, lo que brinda consecuencias favorables sobre la conservación. (Forman y Godron, M., 1986; Vila *et al.*, 2006).

Los indicadores de forma de los fragmentos adquieren importancia en la medida que se conoce su relación con el funcionamiento del paisaje, considerándose incluso más relevantes que la dimensión de éstos. Dichos factores están condicionados por la actividad humana y por las características naturales de los territorios, como la topografía, litología, etc (Romero, 2004). En general, los espacios naturales favorecen los fragmentos con formas curvilíneas e irregulares, mientras que el dominio de la actividad humana se relaciona con fragmentos de formas rectilíneas. Asimismo, los espacios con intervención moderada de las actividades humanas favorecen la diversificación de las formas, en tanto que los espacios con actividad intensa conllevan a la simplificación (Morláns, 2002).

#### c. Conectividad

La conectividad es la cualidad que hace posible el flujo de materiales e individuos entre diversos fragmentos del paisaje (Morláns, 2002). En el caso de las especies y poblaciones, permite los movimientos diarios o estacionales, así como los movimientos de dispersión juvenil, las migraciones y el escape de perturbaciones. La conectividad está relacionada con las estructuras lineales del paisaje, principalmente los corredores lineales y de ribera, los cuales desempeñan un papel fundamental para permitir la interconexión entre los distintos

fragmentos y reducir el denominado “efecto distancia”, que conduce a la reducción del número de especies en los fragmentos más aislados (Romero, 2004).

Sin embargo, los corredores también pueden favorecer un conjunto de riesgos, como los asociados a la expansión de especies no deseadas (invasoras), enfermedades, mayor exposición a depredadores, propagación del fuego y otras perturbaciones abióticas. Cabe decir, que los riesgos potenciales quedan en todo caso compensados por los beneficios que la conectividad conlleva (Vila *et al.*, 2006).

Para medir el impacto de la fragmentación en la estructura del paisaje se utilizan índices para determinar la composición y configuración espacial de los fragmentos (Stupino *et al.*, 2004). Entre los índices de composición más ampliamente reportados están el número, proporción y diversidad de los fragmentos. Por su parte, la configuración espacial del paisaje se cuantifica a través del área, densidad, borde, complejidad de la forma, área interior, aislamiento, proximidad, contraste entre parches adyacentes, subdivisión y conectividad entre parches del mismo tipo (Stupino *et al.*, 2004; Chapa *et al.*, 2008). Cabe resaltar que dada la estrecha relación que existe entre las características ecológicas y los efectos espaciales de la fragmentación, en las últimas décadas ha habido un amplio interés por el estudio de la fragmentación del hábitat.

### 1.3 Fundamentos Teóricos de la fragmentación

En general, se reconocen dos fundamentos teóricos: la Teoría de Biogeografía de Islas (MacArthur y Wilson, 1997) y la Teoría de Metapoblaciones (Levins, 1970).

#### a. Teoría de la Biogeografía de Islas

Los primeros estudios sobre la fragmentación de los hábitats forestales se refieren a la Teoría de Biogeografía de Islas, elaborada a partir de una serie de islas distribuidas en el océano Pacífico. Los autores, MacArthur y Wilson (1967), predicen que la riqueza específica de la

comunidad de aves en cada isla está determinada por parámetros espaciales, como la superficie de la isla y su distancia al continente. En este sentido, se puede explicar como la diversidad biológica y el tamaño de las poblaciones de especies en hábitats fragmentados se reducen en la medida que lo hace la extensión de los fragmentos "efecto área" (Burel y Baudry, 2002). Sin embargo, la teoría de biogeografía de islas ha demostrado ser demasiado simplista para entender de manera cabal los efectos de la fragmentación sobre la biota. Por ejemplo, asume que los fragmentos se comportan como verdaderas islas, cuando estudios más recientes han demostrado que los efectos de la fragmentación son muy dependientes de las especies, de la dinámica de las poblaciones, del tipo de ecosistema y de la matriz. (Flaspohler *et al.*, 2010).

#### b. Teoría de Metapoblaciones

Aunque las referencias a la Teoría de la Biogeografía de Islas han disminuido de forma importante en los últimos años, este modelo de gran valor heurístico ha estimulado el desarrollo de una visión moderna de la dinámica de las poblaciones, basada en los procesos de colonización y extinción. En el medio continental, esta teoría ha cedido rápidamente su lugar a la Teoría de las Metapoblaciones (Levins, 1970), relativa a la dinámica de las poblaciones que viven en fragmentos con algún grado de conexión. Donde en fragmentos de hábitats naturales inmersos en una matriz diferente a la original, las poblaciones pueden persistir en el tiempo de manera estable como resultado del balance entre la tasa de extinción y recolonización en cada uno de los fragmentos (Curtis *et al.*, 2008). Este concepto ha sido la base de numerosas investigaciones teóricas y empíricas sobre los efectos de la fragmentación de los hábitats. Su importancia es fundamental en estudios de conservación, dinámica y distribución de poblaciones, y abundancia de especies.

Estas teorías vienen a replantear el problema de la fragmentación de hábitats al considerar los hábitats como sistemas, en el que las poblaciones ecológicas pequeñas y aisladas pero conectadas con otras, se pueden comparar con un paisaje fragmentado.

## 1.4 Efecto de borde y la creación de hábitats de borde

El efecto de borde es el resultado del proceso de fragmentación que crea condiciones que favorecen la aparición y desarrollo de hábitats de exterior o hábitats de borde en los fragmentos, es decir zonas fronterizas, que combina aspectos del sistema adyacente al fragmento y el espacio interior del fragmento (núcleo) (Romero, 2004).

Estos hábitats de borde son, generalmente, zonas de tensión o amortiguamiento, con rasgos bióticos y abióticos distintivos (alta diversidad y abundancia de recursos, modificadores de los flujos y cantidades de materia y nutrientes, organismos e información), que se asocian con propiedades ecológicas como: productividad, diversidad y adaptabilidad específica (Romero, 2004). Con llevan a efectos negativos o positivos sobre especies de plantas y animales, en relación con las características específicas de cada especie y sobre algunos procesos ecológicos, por ejemplo, pueden servir de trampas ecológicas por ser zonas de alto riesgo de depredación o contribuir al mantenimiento de la diversidad biológica, al operar como filtro activo o pasivo, promoviendo la interacción entre los sistemas adyacentes (Burel y Baudry, 2002; Turner *et al.*, 2001).

Estos hábitats de borde, o "ecotonos", sugieren ser un indicador ecológico del nivel de perturbación ambiental. A este respecto, son preferibles las zonas en las que el efecto de borde es menor y donde existe una mayor proporción de hábitat de interior, los cuales reducen las perturbaciones que pudieran resultar de la proximidad con otras matrices (Forman, 1995).

Uno de los temas que ha cobrado gran interés se refiere a la identificación y extensión de los hábitats de borde, particularmente en ambientes templados donde se han realizado la mayor parte de estos estudios. Estudios realizados en hábitats de borde (Wales, 1972; Honnay *et al.*, 2002; Young y Mitchell, 1994; Cardenasso y Pickett, 2000; Watkins, 2003) muestran la diversidad de factores que determinan su extensión. Sin embargo los efectos que llegan a

tener sobre las plantas y los animales constituyen los indicadores más precisos del cambio del gradiente (Romero, 2004), desde el punto de vista en que ciertas especies se benefician del proceso, hecho que a veces es lo suficiente abrupto para pasar desapercibido.

## 1.5 Efectos de los hábitats de borde en los fragmentos forestales

### a. Efectos físicos

Implican cambios en las condiciones ambientales derivadas de la proximidad a matrices estructuralmente distintas. Las modificaciones más evidentes son en el microclima, por variaciones de la insolación, el viento, la evapotranspiración, la temperatura, la lluvia, las heladas, etc. Los cambios microclimáticos son los efectos más evidentes en bosques templados. Las características microclimáticas contrastantes producen un gradiente ambiental desde el borde hacia el interior del fragmento. Estos cambios en algunos casos pueden penetrar varias decenas de metros hacia el interior del fragmento y su importancia relativa dependerá del tamaño del fragmento. Llegan a ser más importantes en los fragmentos pequeños que en los grandes, ya que pueden llegar a abarcar la totalidad de sus superficies (Romero, 2004; Morláns, 2009)

Esta serie de efectos abióticos altera las condiciones de la regeneración arbórea (Bustamante *et al.*, 2004), la abundancia de especies y el número de individuos arbóreos afines a las condiciones de hábitats interiores, al tiempo que favorece el crecimiento de otras especies de arbustos y hierbas, dando como resultado comunidades abiertas y de pobre estructura vertical, indicadoras del impacto negativo de las perturbaciones (Mas y Correa, 2000).

### b. Efectos biológicos directos

Los cambios en las condiciones ambientales en el borde afectan directamente a los organismos, lo que incluye cambios en la abundancia y distribución de especies, favoreciendo a algunas especies tolerantes que llegan a ser características de estas zonas de transición (Romero, 2004; Morláns, 2009). Esto permite que especies externas invadan el fragmento,

con consecuencias deletéreas graves para la biodiversidad, principalmente por pérdida de especies, géneros y material genético original, así como mayor especialización de las especies exóticas introducidas e inducidas (Bastian y Röder, 1998; Mas y Correa, 2000).

c. Efectos biológicos indirectos

Los cambios en el ambiente y estructura de los fragmentos afectan las interacciones de las especies en las proximidades del borde. Por ejemplo, existe un incremento en la biomasa debido a la mayor incidencia de luz, lo que incrementa el número de aves nidificantes, depredadores y parásitos (Romero, 2004; Morláns, 2009).

Esta serie de cambios ecológicos repercute en la óptima funcionalidad y estabilidad de los ecosistemas forestales, su sensibilidad y capacidad de respuesta. Por ejemplo, resiliencia, resistencia y elasticidad frente al disturbio (Bastian y Röder, 1998; García-Romero, 2002), tiene consecuencias sobre la calidad del hábitat y el potencial y modo de aprovechamiento de los recursos que albergan, siendo el tamaño, la forma, el efecto de borde y el aislamiento de los fragmentos las variables más estudiadas en relación a su capacidad de impacto sobre el desarrollo o extinción de organismos (Burel y Baudry, 2002).

Es en este sentido la conservación de la biodiversidad depende de la protección de áreas pequeñas y de la biota fuera de las áreas protegidas. Por lo tanto, se considera que, la presencia de una estructura paisajística que contenga unos parches nodales de vegetación y una red ecológica constituida por corredores y hábitats de borde que den conexión física y funcional al territorio, ayuda a contrarrestar o restaurar la pérdida de biodiversidad (Romero, 2004).

Por lo anterior y debido a la importancia que representa este fenómeno, es necesario incluir metodologías que permitan la identificación y caracterización de áreas fragmentadas, con sus respectivos hábitats interiores y de borde, en estudios ecológico-forestales, de manera que permitan implementar actividades de manejo forestal tendientes a minimizar los impactos

negativos. De acuerdo con Williams-Linera *et al.* (2002) los estudios de fragmentación son necesarios para generar información básica que permita diseñar estrategias de manejo de los bosques naturales.

## 1.6 Factores de la distribución del proceso de fragmentación

### 1.6.1 Dinámica del paisaje

La caracterización de los aspectos estructurales y las de tendencias evolutivas de un territorio, así como de los cambios de los componentes del paisaje es un tema de gran importancia para el ordenamiento territorial y la gestión ambiental por su vinculación con la biodiversidad. Aunque estos aspectos están condicionados por diversos factores biofísicos y antropogénicos, el principal agente de la configuración de los paisajes ha sido el cambio de las cubiertas y usos del suelo.

En el estudio de la dinámica de los paisajes es indispensable distinguir entre los términos cubierta del suelo y uso del suelo. Mientras que la cubierta del suelo (Land cover) describe los objetos físicos y objetivos que se distribuyen sobre el territorio, el uso del suelo (Land-Use) describe los tipos e intensidades de las actividades que reflejan la ocupación y formas de aprovechamiento del territorio (Burel y Baudry, 2002; Bocco *et al.*, 2001). Sin embargo, como una tendencia de la investigación actual, es frecuente encontrar dichos términos de forma conjunta: "usos y cubiertas del suelo". Incluso, en la bibliografía en inglés, es muy común ver las siglas LUCC (Land Use-Land Cover) para referirse a la unión de ambos términos (Galicia y García-Romero, 2007).

El cambio de cubiertas y usos del suelo comúnmente se caracteriza por la conversión de las superficies forestales a zonas agrícolas o pecuarias como respuesta de la presión demográfica sobre los recursos naturales; lo que lleva a que los espacios protegidos estén con frecuencia inmersos en medios o procesos altamente modificables e incluso totalmente

perturbables que conducen en un largo plazo a que funcionen como ecosistemas francamente perturbados (Villavicencio et al., 2000).

Desde el punto de vista de la ecología del paisaje, el cambio de cubiertas y usos del suelo se considera un proceso indicativo de la fragmentación de hábitats. A medida que aumenta la demanda de recursos naturales por la expansión de las actividades humanas, los ecosistemas se fragmentan aceleradamente y se reducen a “islas”, que progresivamente se tornan de menor tamaño, número y conectividad, lo que incrementa la probabilidad de generar hábitats de borde, y la extinción local de especies de animales y plantas (Ramírez-Bojórquez et al., 2005). Además, este proceso conduce a la modificación de diversos parámetros de la estructura horizontal (cobertura vegetal) y vertical (talla y estratos de vegetación) de las comunidades vegetales (Curtis et al., 2008).

Por otra parte, estos procesos, usualmente englobados en la degradación ambiental, también se asocian a impactos ecológicos importantes en todas las escalas. Localmente inducen la pérdida y degradación de suelos, cambios en el microclima y pérdida en la diversidad de especies; regionalmente afectan el funcionamiento de cuencas hidrográficas y de asentamientos humanos; y a nivel global coadyuvan a las emisiones de gases de efecto invernadero que dan como resultado el cambio climático global (Bocco et al., 2001). Por lo anterior, el cambio de cubiertas y usos del suelo con su correspondiente proceso de fragmentación, son considerados como consecuencias negativas de la expansión y dinámica del uso del suelo, eventos que son calificados como una de las principales causas de impacto, degradación sobre el medio y pérdida de biodiversidad (Burel y Baudry, 2002).

En la actualidad, hay un gran interés en entender la magnitud de los cambios y los procesos que controlan la evolución del uso del suelo. Sin embargo, diversos autores sugieren que los procesos de cambio del uso del suelo no son homogéneos espacialmente, esto debido a que dependen de la variabilidad biofísica y cultural de los territorios (Mazzola et al., 2008). Para entender mejor los procesos de fragmentación y uso del suelo no es suficiente medir dónde y

cuándo ocurren, es necesario estudiar los mecanismos detrás de estos procesos y el contexto ambiental en que se desarrollan (García *et al.*, 2005).

De este modo, cuestiones como la estructura, función y dinámica del paisaje, así como la influencia de la heterogeneidad espacial sobre los procesos bióticos y abióticos, constituyen objetivos centrales de estos estudios (Ritchie, *et al.*, 2009). Sin embargo, hay que tomar en cuenta que las interpretaciones de cómo estos factores interactúan para estimular cambios en la cobertura vegetal y uso de suelo varían ampliamente de una región a otra (García *et al.*, 2005).

### 1.6.2 Heterogeneidad espacial

Uno de los componentes más importantes de la estructura paisajística es la heterogeneidad espacial, la cual está conformada no sólo por los distintos tipos de cubiertas, sino también por la forma en que éstos varían en el espacio (Ritchie, 2009). De entre los atributos de carácter biofísicos, el relieve se constituye como un factor clave de la heterogeneidad espacial (Forman y Godron, 1986; Turner *et al.*, 2001). Al ser la capa más externa de la tierra, el relieve funge como interfase funcional entre los potenciales y limitantes geológicos y climáticos, de los cuales dependen los recursos bióticos y abióticos del sistema ambiental, así como los tipos e intensidades del aprovechamiento que el hombre hace de ellos (Mazzola *et al.*, 2008). Su análisis constituye un paso fundamental en el conocimiento de cómo se modifican y catalizan los procesos del paisaje, como la fragmentación. Además, permite conocer el estado de otros componentes, como el uso del suelo, desarrollar la evaluación del paisaje mismo y conocer las características hidrológicas de una región.

En las últimas décadas, la geomorfología ha pasado de ser considerada como una ciencia pura, dedicada a describir y clasificar las formas del relieve exclusivamente por su origen, a ser reconocida por su aplicación en diferentes campos (Verstappen, 1983). Por ejemplo, en estudios de evaluación de cambios en el uso y cubiertas del suelo, conservación de recursos naturales, evaluación de peligros naturales y prevención de los desastres, diagnóstico,

planeación y recuperación ambiental, estudios de atenuación y control de los procesos de erosión acelerada, determinación de la aptitud de uso del suelo, planeación del crecimiento de las áreas urbanas y reservas ecológicas, y en estudios de paisaje enfocados a la relación Relieve-Uso de Suelo-Cobertura Vegetal (Tapia y López-Blanco, 2002).

Esto se debe a que el conocimiento de la formas del relieve permite llegar a soluciones sobre aspectos que generan impactos, por ejemplo: en la capacidad o potencial de las tierras para el desarrollo de actividades económicas, principalmente a través de la disponibilidad de terreno estable, agua, suelo y accesibilidad, que favorecen la productividad (Turner *et al.*, 2001), así como, en cambios en la composición y estructura de las comunidades vegetales en respuesta a las variaciones en las condiciones ambientales producidas por el relieve (Mazzola *et al.*, 2008).

De esta manera, surgen nuevas disciplinas que realizan el análisis simultáneo de las formas del relieve y la vegetación, como la Fitogeomorfología que sintetiza una serie de características como indicativos de los patrones de distribución de la vegetación, así como su capacidad para la restauración u otros fines. El relieve proporciona información sobre el desarrollo del terreno durante un largo período de tiempo hasta el presente, mientras que la vegetación es indicativa, a corto plazo, de las condiciones ambientales existentes provocadas por perturbaciones históricas y actuales (Rzedowski, 1978).

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha incrementado el interés por el mapeo geomorfológico digital, considerado como una herramienta útil para generar, procesar y analizar información espacial. La aplicación resulta de la combinación o integración de la cartografía geomorfológica con otras variables cartográficas del medio físico o de la actividad humana (Verstappen, 1983). El manejo de los datos cartográficos comprende desde la sobreposición simple de mapas temáticos para la identificación de áreas con condiciones específicas, hasta la utilización de operadores matemáticos o de modelos numéricos integrados para la predicción de la dinámica de los fenómenos y procesos

ambientales (López-Blanco, 2005). El uso de SIG permite la gestión eficaz de bases de datos, uniendo datos geoespaciales y de atributos que hace mapas prácticos a partir de una clasificación asistida por computadora del terreno (García-Aguirre *et al.*, 2007).

## 1.7 Área de estudio y Planteamiento del problema

La cuenca del río San Jerónimo comprende una superficie de 700 km<sup>2</sup>, representados en seis municipios del Estado de México y uno del Estado de Hidalgo. Cartográficamente se localiza en los mapas 1:50,000 Villa del Carbón (E14A29), Tepeji del Río (E14A19), Cuautitlán (E14a28) y Zumpango del Río (E14A18) de INEGI; entre las coordenadas extremas UTM Xmax=472000, Ymax=2202000 y Xmin=440000, Ymin=2165000. La zona urbana de mayor importancia es la cabecera municipal de Villa del Carbón localizada a 2600 msnm (Figura 1.1). Geográficamente forma parte de la Región Hidrográfica No. 26 Río Pánuco (PRUHESA, 2009).

La cabecera del río San Jerónimo tiene sus orígenes en el cerro de la Bufa dentro del municipio de Villa del Carbón, Estado de México, a una elevación de 3600 m de altitud en el parteaguas que separa la cuenca del río Lerma con el Valle de México (Pereyra y Perez, 2005) y desemboca en la presa Taxhimay, que constituye un importante elemento de regulación hidrográfica; a partir de este punto recibe el nombre de río Tepeji que continúa su camino hasta la presa Requena, en el municipio de Tepeji del Río de Ocampo, la cual alimenta a el río Moctezuma; que a su vez, desemboca en el río Pánuco para finalmente drenar sus aguas en el Golfo de México, al sur de Tampico, Tamaulipas (DAEMRH, 2005).

El relieve principal esta caracterizado por zonas accidentadas que corresponden a elevados edificios volcánicos que constituyen los límites al sur por la sierra de Monte Alto y Monte Bajo, con 3600 m de altitud en el cerro La Bufa; al norte por la sierra de Chapa de Mota, con 3200 m de altitud en el cerro El Castillo; al noroeste por la sierra de Las Masas, con 3300 m de altitud por el cerro Los Ídolos y al este por la sierra de Tepotzotlán, con 3000 m de altitud en el cerro Tres Cabezas (Figura 1.1).

Las principales corrientes son los ríos San Jerónimo, Las Animas, Los Sabios y El Oro que se caracterizan por tener cabeceras extensas con cañadas profundas, que dejan entre sí divisorias estrechas en las cimas de la sierra, desembocando en la presa Taxhimay (Palma et al., 1999). Este drenaje está ampliamente desarrollado y forma ramales de régimen perenne e intermitente.

La deforestación ha afectado primordialmente a las planicies y al piedemonte de la sierra, donde en la actualidad el área forestal ha sido reducida a 170.84 km<sup>2</sup> (24 % del área total) favorecida por la expansión histórica de los usos del suelo agrícolas y urbanos, así como un desarrollo turístico de importancia regional. En cambio, la superficie agrícola dedicada tanto al cultivo de maíz y frijol en laderas, como de alfalfa para el comercio en planicies aluviales representa el 35.38 % (244.89 km<sup>2</sup>). Los daños en la condición forestal se agravan debido a que una parte de los bosques remanentes presentan distinto grado de fragmentación, habiendo escasos estudios que a nivel regional den cuenta de la magnitud y distribución del problema (Galicia y García-Romero, 2007).

En este sentido, el estudio pretende contribuir a clarificar diversas preguntas que a nuestro juicio han quedado abiertas. Por ejemplo, dado que la fragmentación forestal está asociada a cambios potenciales en la composición, estructura y funcionamiento de la biodiversidad (Bastian y Röder, 1998), ¿cuáles son los componentes de la biodiversidad que han mostrado mayor sensibilidad a la segregación espacial del hábitat?, y ¿qué parámetros espaciales de la fragmentación son más perjudiciales, en función de las pérdidas de biodiversidad que provocan? Por otra parte, son escasas las aproximaciones que consideran, además de la magnitud y las tendencias del problema (Aguilar et al., 2000), su vinculación a factores causales de índole natural y cultural, siendo del mayor interés conocer ¿cómo es la relación entre el proceso de fragmentación y los diversos factores explicativos, tanto los relacionados con la expansión agrícola y urbana, así como las condiciones ambientales que pueden tener incidencia en el problema?

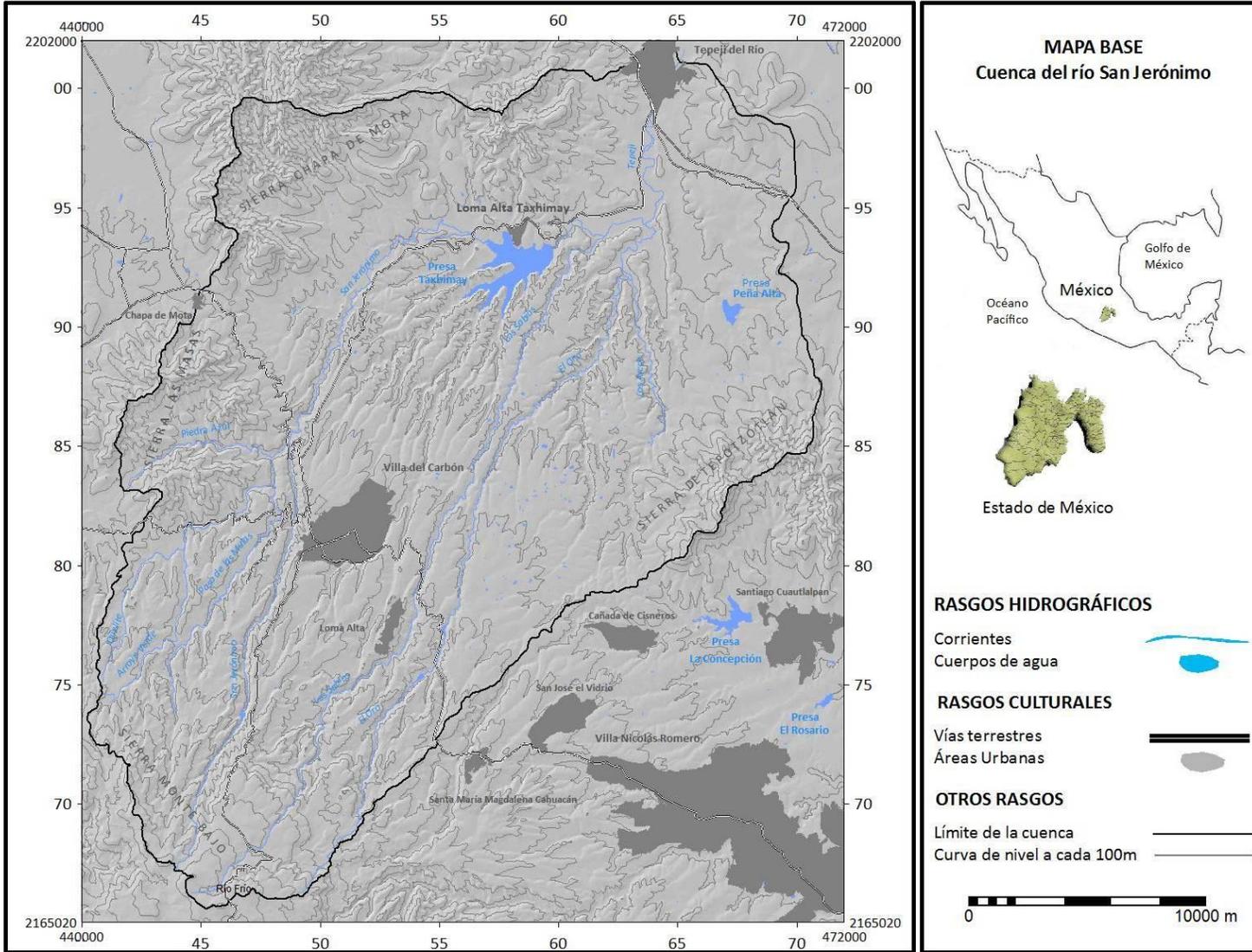


Figura 1.1 Mapa de localización de la cuenca del río San Jerónimo.

## 1.8 Objetivos

### 1.8.1 Objetivo general

Evaluar la magnitud y distribución del efecto de borde en bosques templados con el fin de determinar el grado de perturbación que afecta los remanentes forestales en la cuenca del río San Jerónimo.

### 1.8.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la estructura de los bosques de pino-encino en la cuenca del río San Jerónimo a través de indicadores de la configuración espacial, como el tamaño de los fragmentos, complejidad de la forma y el aislamiento/proximidad entre fragmentos.
- Identificar los indicadores de la composición florística, la estructura y diversidad de las comunidades forestales que determinan los hábitats de borde en fragmentos forestales.
- Evaluar el grado de perturbación mediante indicadores de la composición forestal en los distintos hábitats de borde.
- Elaborar una cartografía de la distribución del grado de deterioro en fragmentos forestales a partir de la composición de hábitats de borde presentes en cada fragmento.
- Conocer las relaciones espaciales de distribución entre el grado de perturbación y los posibles factores explicativos relacionados con el uso del suelo y el relieve.

## 1.9 Metodología

Como se ha descrito en este capítulo, la investigación consistió en aplicar el cuerpo teórico y metodológico de la Ecología del Paisaje al proceso degradatorio en ambientes templados. A continuación se detalla el marco metodológico correspondiente a los objetivos específicos expuestos en el punto anterior.

### 1.9.1 Caracterización de la configuración espacial de los fragmentos forestales

En primera instancia se generó el Mapa de Usos y Cubiertas del suelo en SIG (ILWIS 3.0), con base en la interpretación de ortofotos digitales del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) del año 2009, con resolución de 2 m. Debido a la extensión del área en estudio (700 km<sup>2</sup>), se cartografiaron únicamente las categorías más visibles y reconocibles a un área mínima cartografiable de 1 ha. Posteriormente se llevó a cabo trabajo de campo para la verificación y actualización de los usos y cubiertas en diferentes sitios de la cuenca.

Con base en el Mapa de Usos y Cubiertas del Suelo 2011, se procedió a identificar aquella cubierta de vegetación forestal que presentara dos características particulares. La primera era que estuviera fuertemente fragmentada por las actividades humanas. La segunda es que tuviera una mayor superficie de representación en el área de estudio. Estos dos criterios de selección los cumplía la cubierta de Bosque de Pino-Encino.

Una vez seleccionada la cubierta se caracterizó la configuración espacial de los fragmentos de Bosque de Pino-Encino mediante el cálculo de indicadores desarrollados por la ecología del paisaje, que permitieron evaluar el tamaño, la forma y el grado de aislamiento o conexión física de los fragmentos que configuran la estructura del bosque de pino-encino.

### a. Indicadores de la configuración espacial

El uso de indicadores referentes a la configuración espacial del territorio permitió evaluar de forma indirecta el grado de alteración de sus componentes y los flujos y procesos que lo caracterizan. Entre los indicadores comúnmente encontrados en la literatura que se relacionan con indicadores basados en especies y ecosistemas se encontraron la superficie, la forma del fragmento y la conectividad entre fragmentos.

#### a.1 Superficie de los fragmentos forestales

La justificación del criterio de superficie se basó en la premisa de que el número de especies es mayor en áreas más grandes, efecto de área (ver sección 2.1). El parámetro que se empleó para evaluar el tamaño de los fragmentos fue la superficie en m<sup>2</sup>.

#### a.2 Forma del perímetro del borde

Los indicadores relativos a la forma de los fragmentos van adquiriendo importancia en la medida que se conoce la relación entre la forma del fragmento y su funcionamiento (Forman, 1995). El índice para medir la forma se calculó con base en el cociente perímetro/superficie (Ecuación 1). Este índice evalúa la complejidad de la forma de un fragmento comparándola con un fragmento circular de la misma superficie. Toma el valor de 1 para una forma circular y se incrementa conforme la forma del fragmento es más compleja (Mas y Correa, 2000).

Ecuación 1..... 
$$IF = \frac{p}{2\sqrt{\pi \cdot S}}$$

Donde: IF= índice de forma; p=perímetro y S=superficie.

#### a.3 Conectividad entre fragmentos

La conectividad es la cualidad que hace posible el flujo de materiales e individuos, entre diversos ecosistemas, comunidades, especies o poblaciones (Forman y Godron, 1986). El grado de aislamiento o conexión física de los fragmentos fue evaluado mediante la distancia euclidiana de borde a borde en metros entre los fragmentos más cercanos del mismo tipo.

### 1.9.2 Obtención de las variables de la vegetación

En primer lugar se siguió el criterio de la configuración espacial de los fragmentos de Bosque de Pino-Encino. De acuerdo con ello se agruparon los fragmentos con características homogéneas a partir de los diferentes indicadores (tamaño, forma y conectividad). En seguida se seleccionó el sector meridional de la cuenca que corresponde a las estribaciones de la sierra de Monte Alto y Monte Bajo y la porción proximal de su piedemonte.

Posteriormente se hizo un levantamiento en campo de información detallada de atributos y variables de la vegetación (Anexo 1). A partir de la información espacial se seleccionaron 29 fragmentos por una estratificación al azar. En cada fragmento se utilizó el método de intercepción lineal (línea de campo), uno por cada fragmento. El transecto fue de longitud variable entre 50 y 250 metros (dependiendo del tamaño del fragmento), ubicado perpendicularmente al borde y de un ancho de 2 metros.

Los datos colectados en campo, a partir de un formato de campo previamente establecido, fueron realizados en forma cualitativa y cuantitativa, a fin de establecer categorías en base a las siguientes medidas:

#### a. Medidas basadas en categorías florístico-estructurales

Para la presente investigación el agrupamiento de categorías fisonómicas siguió criterios que pudieran evidenciar patrones de respuesta a efectos de borde tomando como base la forma de vida y la pertenencia a un grupo florístico en particular. La forma de vida incluyó las categorías de árboles y arbustos; y el grupo florístico árboles pertenecientes al género *Pinus*, árboles diferentes al género *Pinus* y arbustos. A partir de estas categorías se midieron los siguientes indicadores.

#### a.1 Abundancia

La abundancia es un indicador que permite conocer la densidad de una especie o grupo fisonómico. Para unidades muestrales lineales se hace referencia al número de individuos

por especie o grupo fisonómico en relación con el número total de individuos. La abundancia en sentido absoluto puede evaluarse en términos del número de individuos. La abundancia relativa (proporción de los individuos de cada especie en el total de los individuos). La abundancia relativa es independiente de la distancia o del patrón espacial de las poblaciones y en algunos estudios son suficientes para hacer comparaciones. La abundancia relativa se calculó de la siguiente forma:

$$P_i = n_i / \sum_{i=1}^S n_i$$

Ecuación 2 .....

Donde:  $P_i$ = abundancia relativa de la especie  $i$ ;  $S$ =número total de especies en la muestra y  $n_i$ =número de individuos de la especie  $i$ .

### a.2 Altura

La altura total (en metros) es uno de los principales parámetros que se utilizan para describir a la vegetación. Se obtuvo la altura para cada individuo interceptado por la línea de campo.

### a.3 Área basal

El área basal es la superficie de una sección transversal del tallo o tronco a una determinada altura del suelo, y que se expresa en  $m^2$  de material vegetal por unidad de superficie de terreno. En árboles este parámetro se mide a 1.3 m desde la línea del suelo, en tanto que en hierbas y arbustos la medición se hace a la altura de la línea del suelo, siempre por debajo de la bifurcación o ramificación. La estimación del área basal se obtuvo a partir de la medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) de los individuos interceptados. De esta manera, el área basal se calculó de la siguiente forma:

$$B_i = p_i * DAP^2 / 4$$

Ecuación 3 .....

Donde:  $B_i$ = área basal de cada individuo de la especie  $i$ ;  $p_i=3.1416$  y  $DAP$ =diámetro a la altura del pecho de cada individuo de la especie  $i$ .

#### a.4 Cobertura

Para la estimación de la cobertura mediante unidades muestrales lineales, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Ecuación 4 ..... 
$$X_i = l_i / L * 100$$

Donde:  $X_i$ = cobertura relativa de la especie  $i$ ;  $l_i$ = longitud de la biomasa aérea interceptada de la especie  $i$  y  $L$ = número total de la longitud interceptada de los individuos en la muestra.

#### a.5 Cociente de Dominancia

Es el indicador que expresa la razón existente entre dos categorías. En este caso se calculó a partir de la abundancia de los grupos fisonómicos, con la fórmula siguiente:

Ecuación 5 ..... 
$$D_i = N_1 / N_2$$

Donde:  $D_i$ = cociente de dominancia;  $N_1$ = número de individuos del grupo fisonómico 1 y  $N_2$ = número de individuos del grupo fisonómico 2.

### b. Medidas basadas en la diversidad de especies

Las medidas de diversidad son aquellas que describen la heterogeneidad de un sitio. Algunas se basan en la cuantificación del número de especies (riqueza específica,  $S$ ) y otras en la abundancia relativa de cada especie y su dominancia.

#### b.1 Riqueza específica

Es el método más simple, basado en la cuantificación del número de especies presentes en la muestra ( $S$ ); en este caso, se aplicó a cada una de las categorías fisonómicas.

#### b.2 Índice de diversidad de Simpson

Es un índice basado en la dominancia, un concepto inverso a la uniformidad o equidad de la comunidad. Toman en cuenta la representatividad de las especies de mayor importancia, sin considerar la contribución del resto de las especies. Manifiesta la probabilidad de que dos individuos extraídos al azar de una muestra sean de diferente especie. Está fuertemente

influido por los cambios de la abundancia de las especies dominantes. Para convertir esta probabilidad como una medida de diversidad, se considera el complemento de Simpson:

Ecuación 6 ..... 
$$1-D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

Donde 1-D=índice del recíproco de Simpson;  $P_i$ =proporción de la especie  $i$  en la muestra=  $n_i / N$ ;  $N$ = número total de individuos de la muestra.

### b.3 Índice de Shannon-Wiener

Es un índice basado en la teoría de la información y miden la cantidad de orden contenido en un sistema. Hace referencia al grado promedio de incertidumbre en predecir a que especie pertenecerá un individuo escogido al azar de una colección. Entre mayor sea el valor de diversidad mayor será el grado de incertidumbre.

Ecuación 7 ..... 
$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log P_i$$

Donde  $H'$ = diversidad de Shannon-Wiener y  $P_i$ =proporción de la especie  $i$  en la muestra.

Asume que los individuos son seleccionados al azar y que todas las especies están representadas en la muestra. Adquiere valores de cero cuando hay una sola especie, y el logaritmo de la riqueza específica  $S$ , cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos. Los índices de diversidad y dominancia presentan comportamientos opuestos, mismos que indican que la baja diversidad se debe a la dominancia de las especies (Curtis, 2008).

### c. Medidas de equitatividad

La equitatividad es una medida de la abundancia relativa de las especies, en la que el valor máximo (1) se presenta cuando todas las especies en la muestra están representadas con la misma abundancia. El índice de equitatividad más comúnmente usado está basado en la función Shannon-Wiener:

Ecuación 13 .....

$$J' = H' / H'_{max}$$

Donde J'= medida de equitatividad; H'= valor de la diversidad de Shannon-Wiener; H'\_{max} = valor máximo de diversidad con la función Shannon-Wiener = log S.

### 1.9.3 Identificación y caracterización de los hábitats de borde

Finalmente, para el reconocimiento de la localización y amplitud de los hábitats de borde, se aborda el siguiente procedimiento:

1. Se organizó la información de la vegetación en una tabla general (Anexo 2), a partir de la definición de las variables (Tabla 1.1) en los 25 bloques de distancia, de diez metros cada uno, en que se dividieron los transectos; de acuerdo a la distancia con respecto al borde del fragmento:

TABLA 1.1 VARIABLES DE LA VEGETACIÓN Y SU RESPECTIVO CÓDIGO FUENTE

<b>Codigo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Codigo</b>	<b>Nombre</b>
<b>AP</b>	Abundancia de pinos	<b>AIP</b>	Altura de pinos
<b>AOA</b>	Abundancia de otros arboles	<b>AIOA</b>	Altura de otros arboles
<b>AAR</b>	Abundancia de arbustos	<b>AIAr</b>	Altura de arbustos
<b>RP</b>	Riqueza de pinos	<b>AbP</b>	Área basal de pinos
<b>ROA</b>	Riqueza de otros arboles	<b>AbOA</b>	Área basal de otros arboles
<b>RAR</b>	Riqueza de arbusto	<b>AbAr</b>	Área basal de arbustos
<b>RT</b>	Riqueza total	<b>CoP</b>	Cobertura de pinos
<b>DS</b>	Diversidad de Simpson	<b>CoOA</b>	Cobertura de otros arboles
<b>DSW</b>	Diversidad de Shannon-Wiener	<b>CoAr</b>	Cobertura de arbustos
<b>H'max</b>	Diversidad máxima	<b>PvsOA</b>	Relación pinos/otros arboles
<b>E</b>	Equitatividad	<b>AvsAr</b>	Relación arboles/arbustos

La tabla se exportó como un archivo de base de datos al software SPSS 14.0, en el cual se realizaron los estadísticos correspondientes.

2. Se realizó un análisis exploratorio con la finalidad de obtener la descripción estadística de los datos, conocer sus interrelaciones y reconocer la técnica estadística más adecuada a las características de las variables. Para ello, se aplicó un análisis de Componentes Principales (ACP), en el cual se tomaron en cuenta todas las métricas de la vegetación con el objetivo de obtener las variables que mejor explican el problema.

3. Posteriormente, se empleó un Análisis de Conglomerados (AC) con el propósito de descubrir asociaciones de bloques a partir de la similitud estadística entre los casos. Para ello, donde se tomaron en cuenta las variables obtenidas del ACP. El AC indicó la pertenencia de cada bloque de distancia aplicando el método de agrupamiento jerárquico aglomerativo, con una medida de distancia euclidiana al cuadrado y con vinculación promedio entre grupos. Las agrupaciones o clústers se interpretaron y clasificaron, asignándoles un número de identificador que fue integrado a la base general.

4. Para comprobar si existen diferencias significativas entre los conglomerados obtenidos se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA), tomando como variable independiente o factor la información del conglomerado al que pertenece cada bloque de distancia y como variables dependientes la composición obtenida en el primer análisis. También se realizó un post-hoc con una prueba de Tukey con el fin de averiguar los conglomerados que difieren en cada una de las variables. Esto fue posible, ya que la solución del Análisis de conglomerados contiene más de dos conglomerados, lo que permite realizar comparaciones múltiples entre las medias de ellos.

5. Una vez realizado e interpretado el análisis multivariado, se procedió a la caracterización de los hábitats de borde, para lo cual se utilizaron de las variables de la vegetación seleccionadas en el primer análisis. Dentro del SIG ILWIS 3.3 se designó el área de borde a cada fragmento de bosque de pino-encino, en función de la distancia obtenida en el análisis de conglomerados, obteniendo el mapa del Estado del bosque de pino-encino.

La ventaja de utilizar estas técnicas es que permiten integrar numerosas variables y sintetizarlas en factores, a partir de los cuales se pueden establecer clasificaciones. Debe tomarse en cuenta que las técnicas utilizadas en la presente investigación (análisis de componentes principales y conglomerados) están basadas en matrices de correlación, por lo que la interpretación requiere del análisis de las tablas y gráficos resultantes.

#### 1.9.4 Obtención y catalogación de los factores relacionados al relieve

El estudio de los factores del relieve que modelan la configuración de los remanentes forestales se inscribe dentro de términos geomorfológicos, para lo cual ha sido necesario desarrollar un método de investigación tendiente al reconocimiento pormenorizado de los elementos constitutivos del paisaje geomorfológico actual, para localizar y catalogar las formas del relieve desde una interpretación morfogenética.

##### 1. Información de entrada

Se recopilaron estudios sobre la historia geológica, tectónica y geomorfología de la región que comprende a las sierras de las Cruces y de Monte Alto-Monte-Bajo; junto con cartas topográficas de INEGI a escala 1:50,000 de las hojas de Villa del Carbón (E14A29), Zumpango del Río (E14A19), Cuautitlán (E14a28) y Tepeji del Río (E14A18) de INEGI; así como datos vectoriales de curvas de nivel con equidistancia de 20 m y ortofotos con una resolución de 2 m por pixel. Además de fotografías aéreas de los años 2005 y 2009, para el área que comprende la cuenca del río San Jerónimo, a escala 1:74,000 (zonas E14-2 y F14-11) de INEGI.

##### a. Generación del Modelo Digital de Elevación (MDE)

El Modelo Digital de Elevación se generó con la operación Contour Interpolation de ILWIS 3.0, a partir de datos vectoriales. Esta operación se basa en el método de distancia de Borgfors, el cual calcula para cada uno de los pixeles entre dos segmentos rasterizados, la distancia más corta a las dos isolíneas más próximas.

## 2. Información de salida

### a. Mapa altimétrico

Para elaborar el mapa altimétrico, al MDE se le aplicó la función Slicing en ILWIS 3.0, para obtener distintos intervalos de valores, diferenciándolos con colores para obtener una mejor representación del mapa. Los intervalos de valores se establecieron a cada 200 m obteniendo un total de ocho intervalos (Figura 1.2).

### b. Mapa de Pendientes

Para la elaboración del mapa de pendientes se aplicó un filtro de gradientes en dirección X (Dx) y Y (Dy) al MED, con la función Filter del ILWIS 3.0; a los valores obtenidos se les aplicó las funciones ATAN y REDDEG funciones internas del MapCalc/TabCalc del ILWIS 3.0, los valores obtenidos se expresan en grados. Este parámetro del relieve puede ser usado para derivar nuevos parámetros, tales como erosión y deposición, humedad del suelo, velocidad de flujo entre otras (Figura 1.3).

### c. Mapa de Exposición solar

El mapa de exposición solar ó de dirección de laderas se obtuvo a partir de los gradientes Dx y Dy y el cálculo de la función RADDEG y ATAN2 del MapCalc/TabCalc de ILWIS 3.0. La formula resultante da valores entre 0° y 360°. Para dar interpretación al mapa se aplicó la función Slicing, la cual fue usada para generar nueve clases de acuerdo a la dirección de la ladera (Figura 1.4).

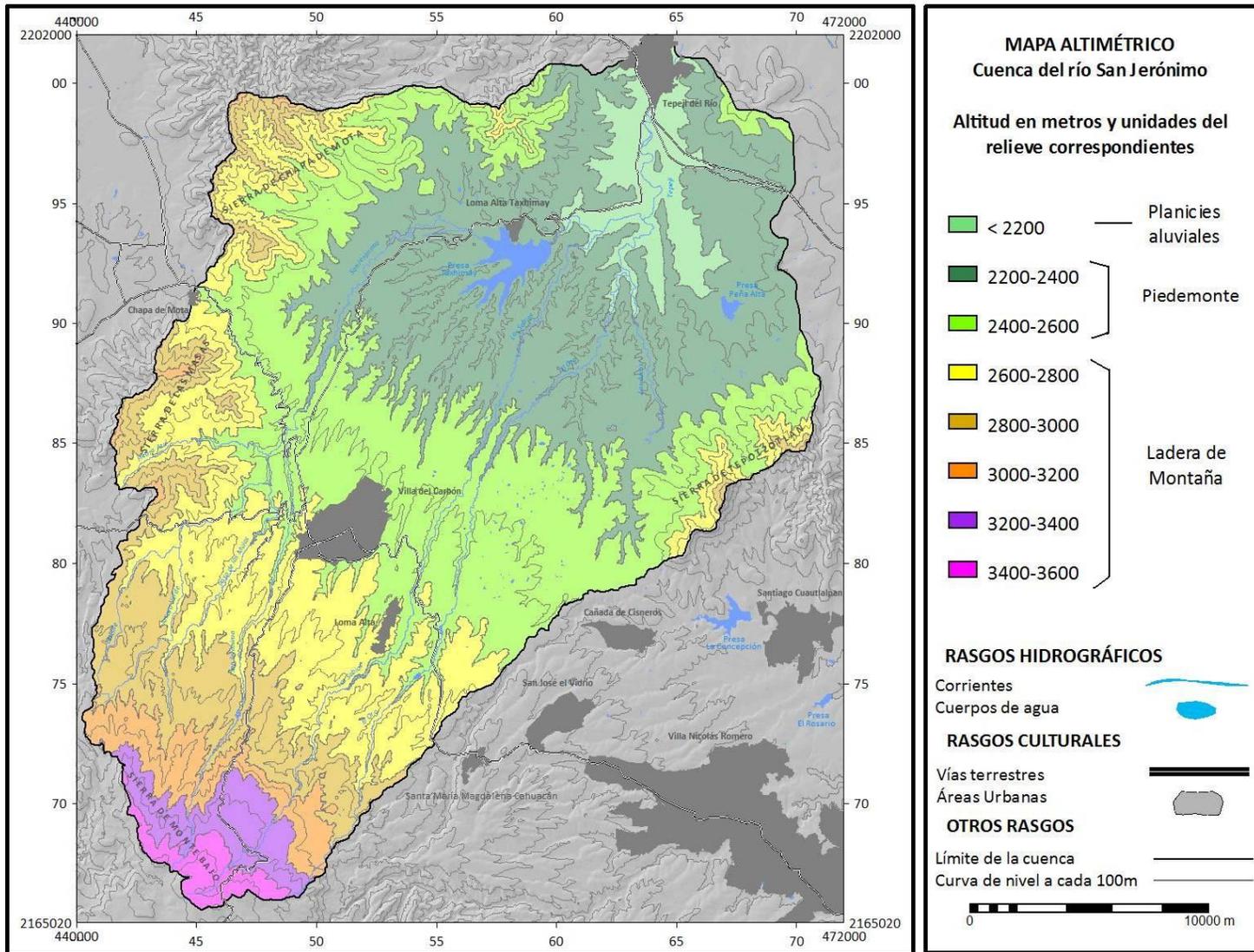


FIGURA 1.2 MAPA ALTIMÉTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

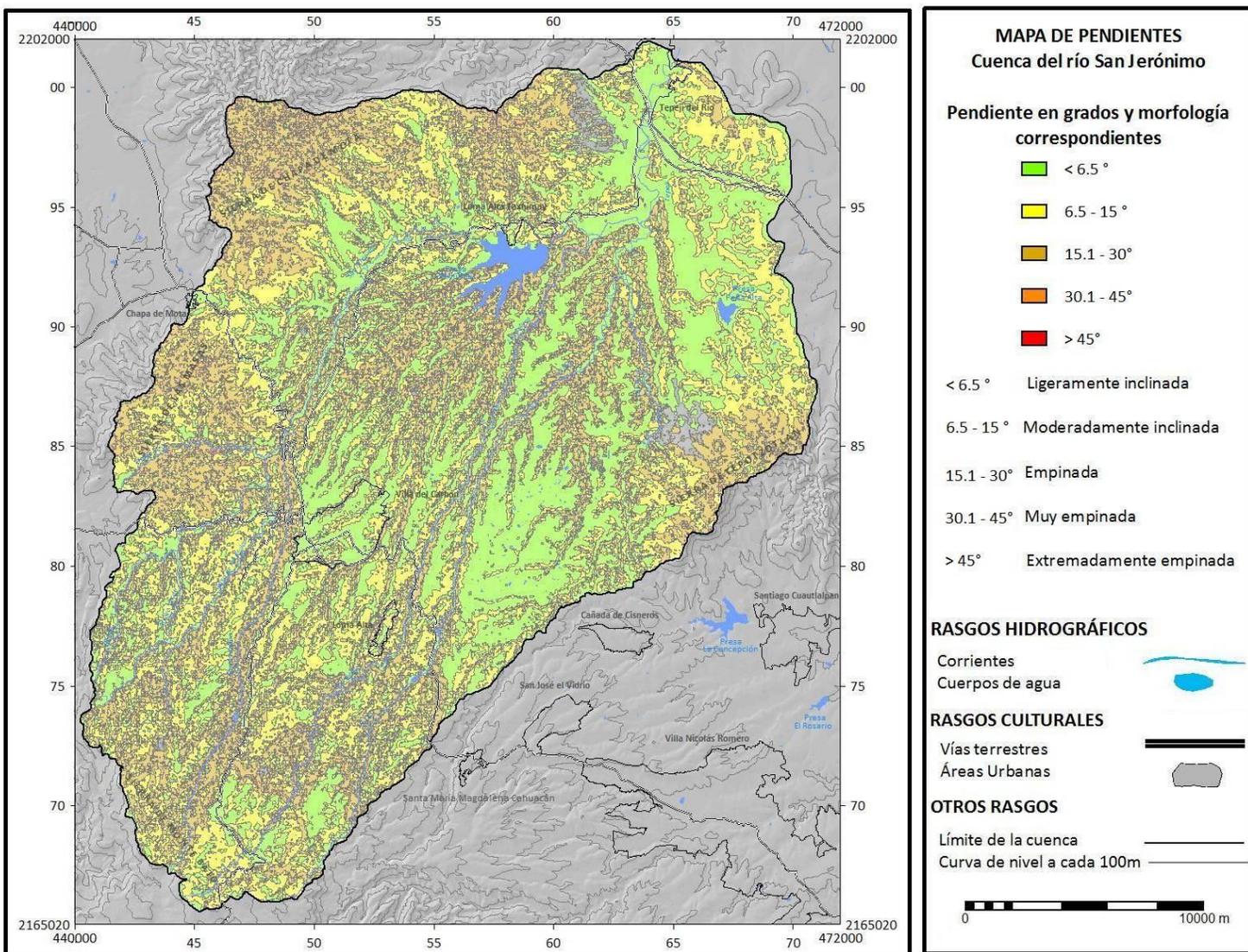


FIGURA 1.3 MAPA DE PENDIENTES DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

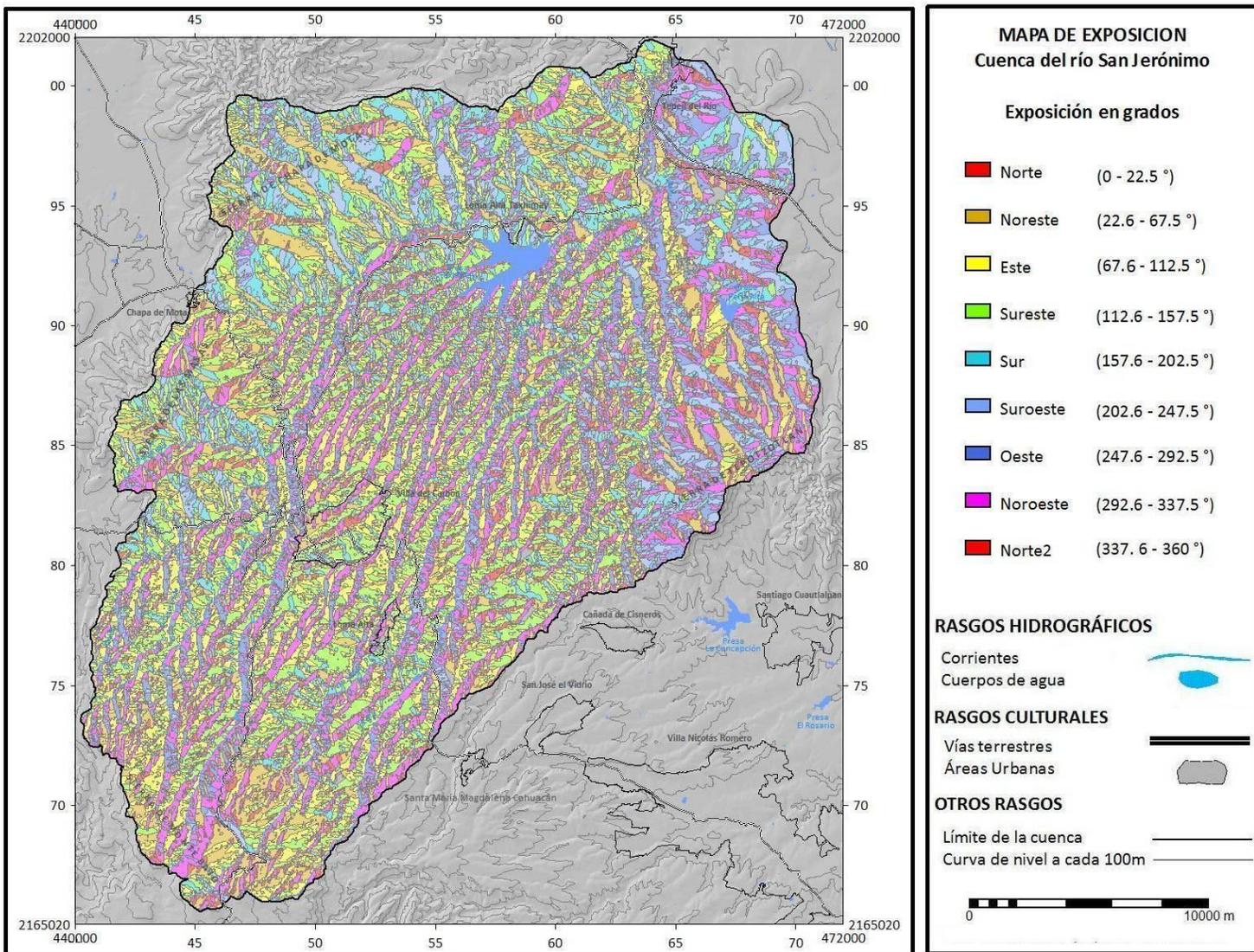


FIGURA 1.4 MAPA DE EXPOSICIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

#### d. Mapa de geometría de laderas

Se obtuvo del cálculo de filtros de gradientes aplicados al MED, los cuales dieron como resultado valores que reflejan el grado de concavidad/convexidad del terreno. El mapa resultante dio valores negativos que indican pendientes convexas, valores positivos para pendientes cóncavas y valores de cero para superficies planas. Los valores obtenidos se agruparon en tres clases: Cóncavos y Convexos, apoyado de la condición "IFF" del MapCalc de ILWIS con la siguiente fórmula: IFF (Shape<-0.5, "Convexo", iff (Shape>0.5, "Concavo", "Convexo")). Para mejorar la lectura del mapa se utilizó el filtro Majority de ILWIS, el cual asignó el nombre de la clase predominante en una malla de 5x5 píxeles (Figura 1.5).

#### e. Mapa de energía del relieve

Para el cálculo de la energía del relieve se aplicó el filtro Rank order de ILWIS al MED; este tipo de filtro toma en cuenta todos los valores dentro de una malla, en este caso como la energía del relieve se calculó por hectárea (100x100 m), se usó una malla de 5x5 píxeles, expresando el valor mínimo o máximo en el píxel central. Este filtro se aplicó dos veces, una vez para obtener el valor mínimo de altitud por hectárea y otra para obtener el valor máximo de altitud por hectárea. Posteriormente se restó la altitud mínima a la máxima para determinar la diferencia altitudinal dentro de una hectárea (Figura 1.6).

### 3. Elaboración de la cartografía geomorfológica

Se comenzó con una interpretación preliminar sobre los mapas topográficos a escala 1:50,000 que abarcan el área en estudio y mapas geológicos de Mooser *et al.* (1996), con el fin de identificar cambios litológicos, estructurales, que permitieran diferenciar las principales unidades del relieve como macizos montañosos, piedemontes y planicies aluviales; con base en criterios de ruptura de pendientes y arreglo topográfico.

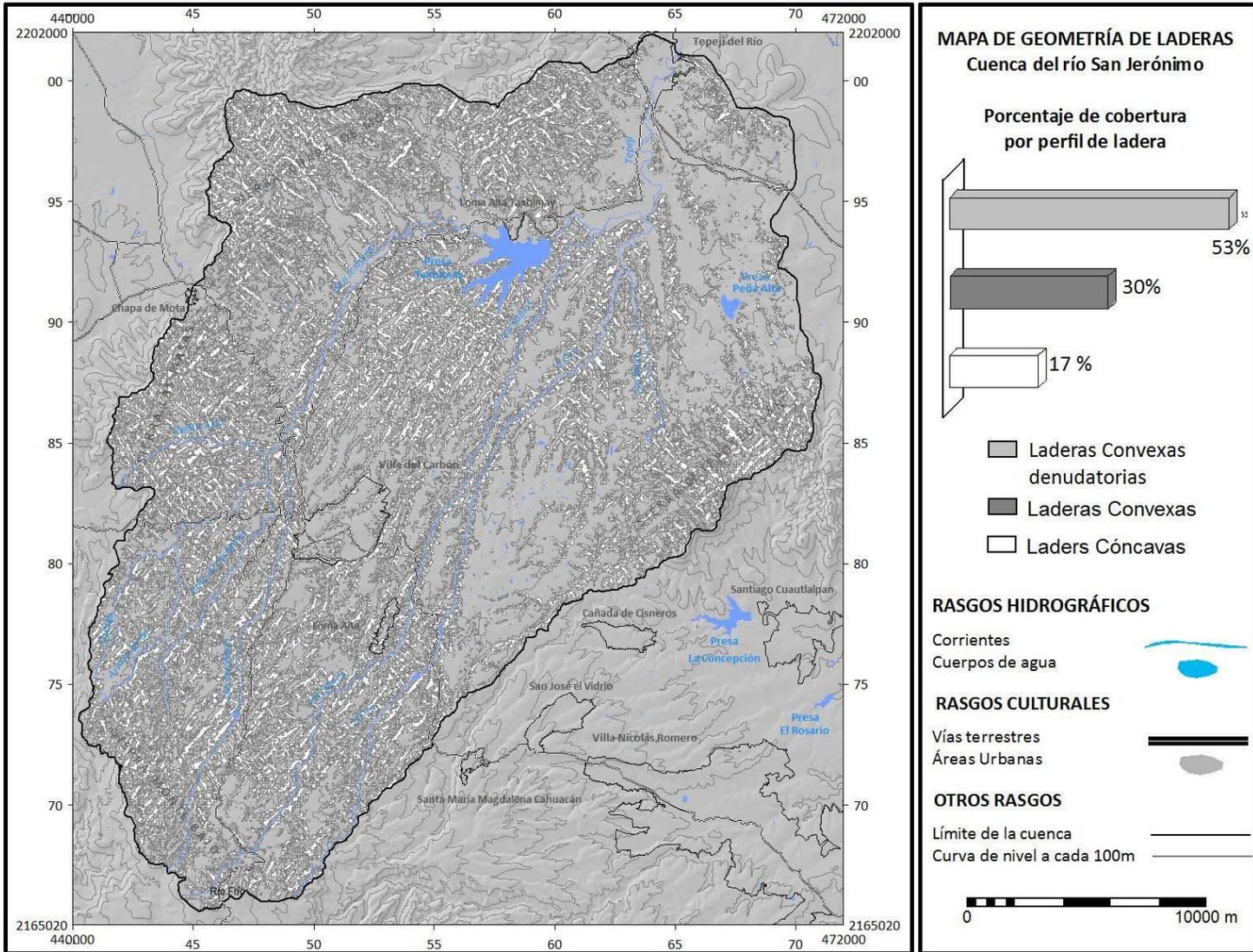


FIGURA 1.5 MAPA DE GEOMETRÍA DE LADERAS DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

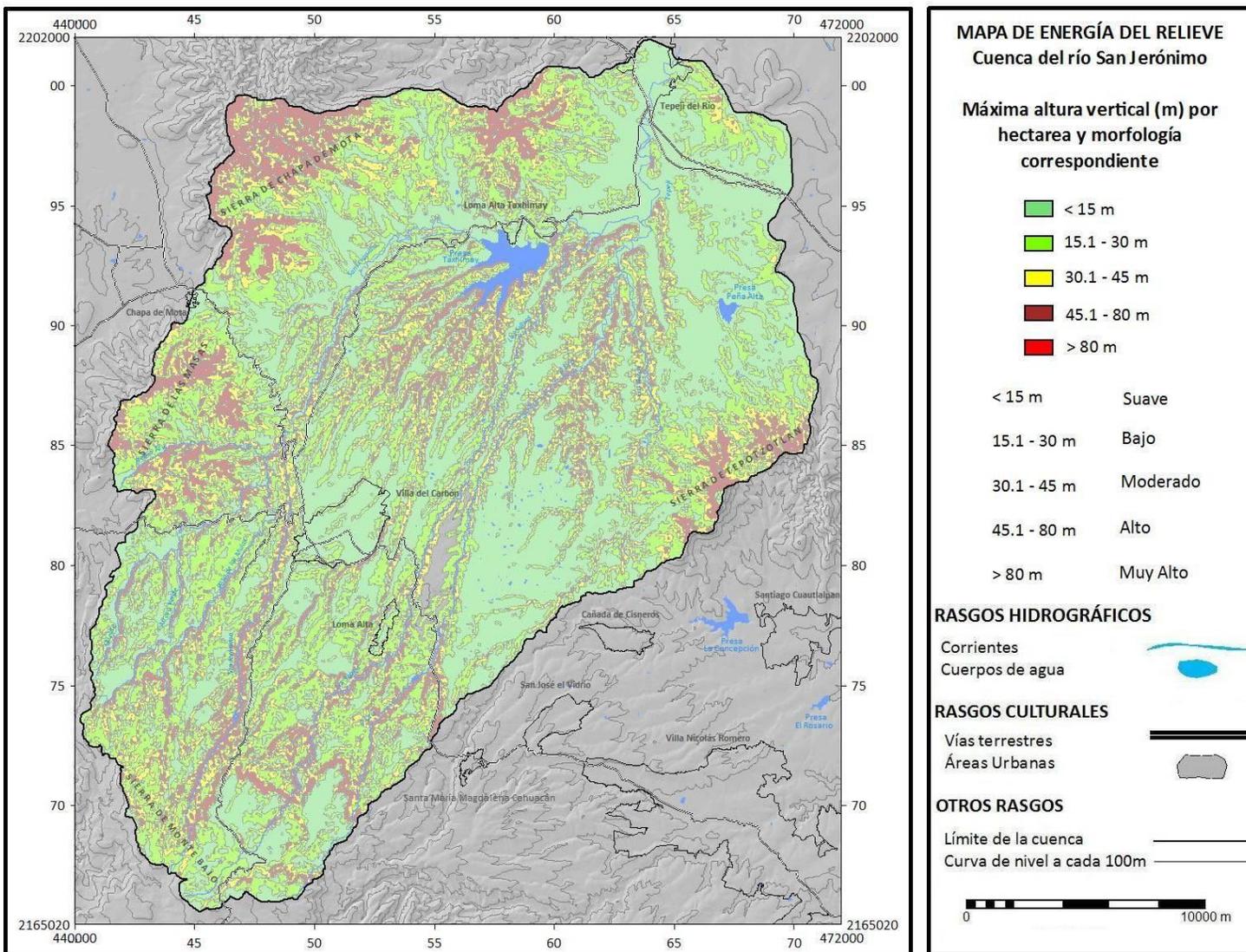


FIGURA 1.6 MAPA DE ENERGÍA DEL RELIEVE DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

Las unidades fueron digitalizadas con ayuda de ortofotos digitales en el SIG ILWIS 3.3, y posteriormente se cruzaron con los mapas de pendientes, altimétrico, exposición, geometría y energía del relieve. La información resultante, junto con la geología (Mooser et al., 1996), permitió la identificación de unidades geomorfológicas. La etapa de verificación se llevó a cabo una vez obtenidas las unidades geomorfológicas con recorridos de campo, donde se corroboraron aquellas unidades donde se tenía duda. La integración de la información se realizó en un solo mapa que contiene información morfogenética, litológica, morfométrica y cronológica (Mapa geomorfológico).

#### 1.9.5 Identificación de las relaciones entre la distribución de los hábitats de borde y posibles factores del relieve y uso del suelo

Para conocer cuales variables biofísicas y tipos de usos del suelo se relacionan con la composición de los hábitats de borde del bosque de pino-encino, se realizó una matriz de correlación con base en el coeficiente de Spearman, el cual es recomendado con datos que no se ajustan a la distribución normal. Se utilizaron indicadores como tipo de uso del suelo y porcentaje de ocupación referido al fragmento; e indicadores ambientales referentes a datos litológicos y morfométricos con medias y desviaciones estándares obtenidos directamente del SIG ILWIS 3.3, estos análisis se realizaron en el programa estadístico SPSS 14.1.

## CAPÍTULO 2. GEOMORFOLOGÍA: UNIDADES Y FORMAS DEL RELIEVE

Conocer el soporte sobre el que se asienta la actividad biológica y humana, es decir, la génesis del territorio cuya expresión natural aparece precisamente en el relieve, nos permite comprender la distribución de los usos del suelo y su influencia en el medio. Por ello, el objetivo de este capítulo es conocer la estructura general del relieve de la cuenca del río San Jerónimo, debido a que su morfología es uno de los factores que condicionan, el modo e intensidad de la actividad humana y como esta se refleja en la distribución del grado de perturbación.

### 2.1 Contexto Geológico Regional

La cuenca del río San Jerónimo está situada dentro del Eje Neovolcánico, una de las grandes regiones cuyo relieve se debe al vulcanismo en México (Figura 2.1). El Eje Neovolcánico es considerado un arco volcánico continental de unos 900 km de longitud, con orientación este-oeste y amplitudes variables de 100 a 300 km (Lugo, 2004; García-Palomo *et al.*, 2008) que abarca desde las costas de Nayarit y el estado de Colima hasta Veracruz. La actividad eruptiva en el Eje Neovolcánico se presenta desde la época del Plioceno hasta el presente, gracias a una de las placas más vigorosas hoy en día, la placa de Cocos (Lugo, 2004).

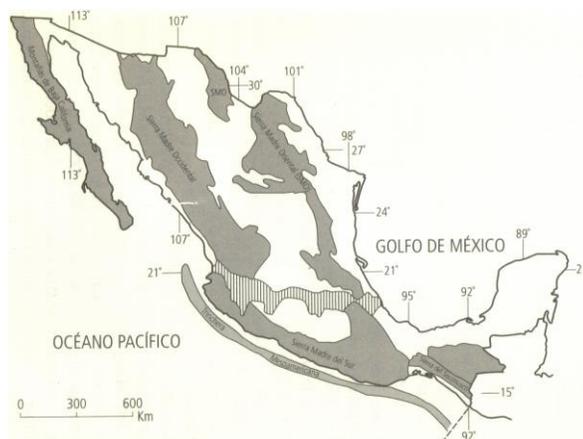


FIGURA 2.1. PROVINCIA FISIAGRÁFICA, EJE NEO VOLCÁNICO (LUGO, 2004)

Morfológicamente consiste en una serie de planicies escalonadas de 500 a 2600 msnm, asentadas por volcanes aislados o en conjunto de diversos tamaños (Palma *et al.*, 1999). En la porción más oriental del Eje Neovolcánico resalta la presencia de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón y Tláloc, entre los estados de Puebla y México (Figura 2.2); así como el Ajusco y su alineamiento con la Sierra de Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo de 833 km<sup>2</sup> de extensión; la cual presentan cumbres superiores a 3,600 m, con más de 1,500 m de desnivel y 40 km de eje mayor, y que conforma el límite occidental de la cuenca de México, donde se ubica la enorme aglomeración urbana de Ciudad de México (García-Romero y Muñoz, 2000).

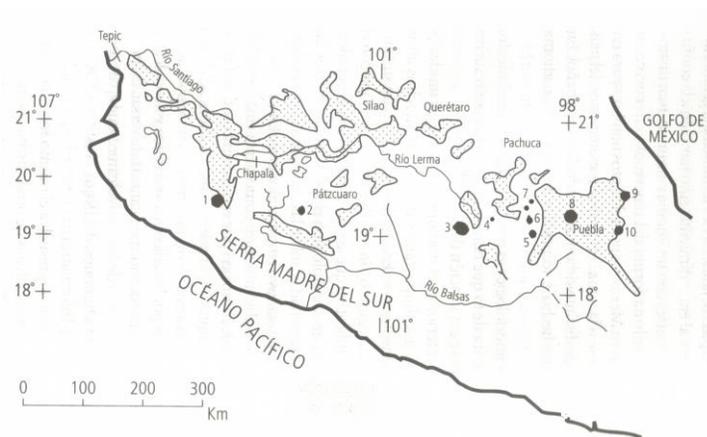


FIGURA 2.2 UBICACIÓN REGIONAL DEL ÁREA DE ESTUDIO, EJE NEOVOLCÁNICO (LUGO, 2004)

Las sierras de Las Cruces y de Monte Alto y Monte Bajo separan a dos de las cuencas más elevadas y pobladas del país: la de Toluca al poniente y la de México al oriente (Figura 2.3). Morfológicamente corresponden a un solo alineamiento serrano en el que tradicionalmente se distinguen tres porciones de límites imprecisos (García-Romero y Muñoz, 2000). El sector más septentrional, donde se encuentra el área en estudio, corresponde a la porción de Monte Alto y Monte Bajo, mientras los sectores central y meridional corresponden a la Sierra de Las Cruces, representando ésta última las tres cuartas partes de su extensión (García-Romero, 1998).

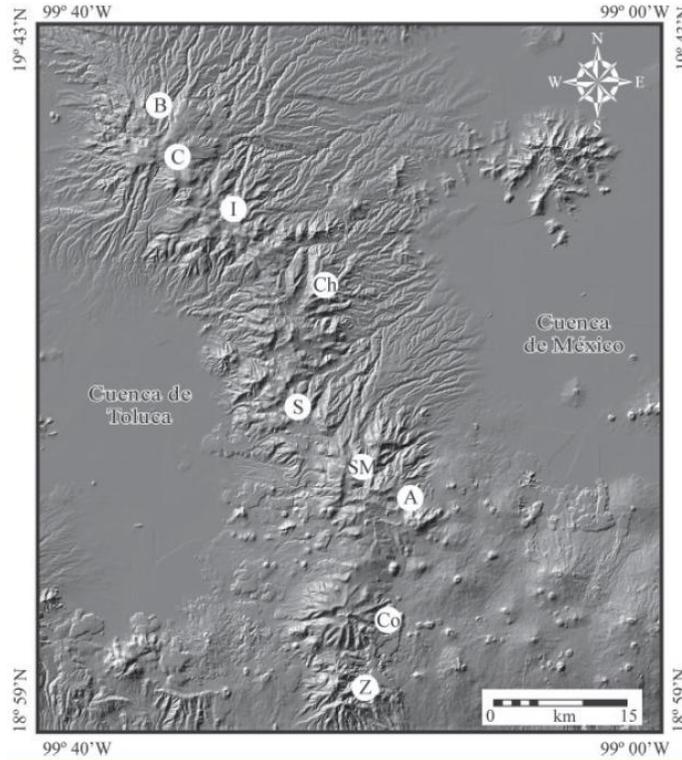


FIGURA 2.3. ALINEAMIENTO MONTAÑOSO SIERRA DE LAS CRUCES, MONTE ALTO, MONTE BAJO. LOCALIZACIÓN DE LOS VOLCANES A: AJUSCO, B: LA BUFA, C: LA CATEDRAL, CH: CHIMALPA, Co: LA CORONA, I: ITURBIDE, SM: SAN MIGUEL, S: SALAZAR, Z: ZEMPOALA (MODIFICADO DE GARCÍA-PALOMO ET AL., 2008)

La sierra de Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo es una estructura volcánica compleja conformada por una cadena de nueve estratovolcanes (Zempoala, La Corona, Ajusco, San Miguel, Salazar, Chimalpa, Iturbide, La Bufa y La Catedral). Los materiales que afloran están asociados a extensos derrames de lava de composición andesítico-dacítica con afinidad calcialcalina, intercalados con materiales poco consolidados que se erosionan con facilidad, lo que ha favorecido la formación de barrancas y cañadas. Se alternan con flujos piroclásticos de bloques y cenizas, flujos de pómez, oleadas piroclásticas, depósitos de caída, flujos de detritos y lodo, así como repetidos colapsos que originaron depósitos de avalanchas de escombros (García-Palomo *et al.*, 2008).

La actividad tectónica que afecta el borde meridional de la placa Norteamérica desde mediados de la era Terciaria -provocada por el ángulo de inclinación de la subducción de la

placa de Cocos y la intensidad de las presiones acumuladas en profundidad- ha producido distintos estilos tectónicos que han impactado en el área de las sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo con la aparición de distintos patrones de fracturación (Garcia-Romero, 1998).

Los patrones de fracturación tectónica mejor representados en el área de estudio son de orientación NE-SW y E-W (Garcia-Romero, 1998; García-Palomo, 2008). El patrón NE-SW es propio de la actividad tectónica simultánea a la construcción de la sierra y se asocia con la subducción dominante en la Trinchera Mesoamericana hasta comienzos del Pleistoceno. El patrón E-W es del Cuaternario y corresponde al establecimiento de un nuevo estilo tectónico, cuya manifestación más importante es la formación de la sierra de Chichinautzin (García-Romero, 1998).

El patrón de fracturas orientadas al NE-SW está compuesto por líneas de dislocación generadas del Plioceno medio al Pleistoceno inferior (Mosser *et al.*, 1996), no obstante la tectónica responsable pudo extenderse hasta el Pleistoceno superior en el sur del piedemonte, donde las fallas normales y transcurrentes cortan materiales fechados en 170,000 años (García-Romero, 1998).

Dentro de este patrón se reconocen varias zonas de fallas importantes, como la zona de La Catedral de 40 km de longitud, con dirección NNE-SSW y buzamiento hacia el NW, escalonándose en esa misma dirección y formando una geometría de semifosa. Estas fallas cortan flujos piroclásticos provenientes del volcán La Catedral con una edad de 3.71 y 2.7 millones de años (García-Palomo, 2008).

Este patrón se encuentra bien representado en el volcán La Bufa y su amplio abanico de productos piroclásticos (Formación Rehilete Moderno). Se asocia con una densa y extensa red de drenaje de los tipos dendrítico, paralelo y recto; lo que indica el control estructural, que ha dado lugar a la compartimentación del relieve en una serie de valles y crestas (o

lomas aplanadas), con pendientes que varían de 12° a 24° y de 30° a 45°. (García-Romero, 1998 y García-Palomo, 2008).

Las fallas orientadas al SW-NE son las que mayor influencia han tenido en el modelado del conjunto de la sierra Monte Alto y Monte Bajo y las que se manifiestan geomorfológicamente con mayor claridad en la red hidrográfica. Las fracturas se concentran en el área de laderas de los macizos montañosos lo que les brinda un carácter particularmente erosivo, además de que algunas fracturas se encuentran activas actualmente y confieren una gran inestabilidad a las laderas (García-Romero, 1998).

El patrón de fracturas con rumbo E-W, se asocia con esfuerzos tensionales del Cuaternario que resultaron en la formación de fallas listricas y la emisión de lavas basálticas en los complejos volcánicos de Ajusco, Tlalli, Zempoala y sierra de Chichinautzin (García-Romero, 1998). Corta los materiales de la mitad meridional de la sierra de Monte Alto y Monte Bajo, afectando tanto a los complejos volcánicos como a los piedemontes. A diferencia del patrón tectónico anterior y debido a lo reciente de su formación o a su escaso desnivel, no presenta influencia evidente en el modelado externo; sin embargo, con frecuencia mantiene una cierta actividad que favorece la inestabilidad geomorfológica y acelera el modelado de las vertientes (García-Romero, 1998).

La influencia de las fallas y fracturas en la sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo se reflejan en la topografía actual y el grado de evolución alcanzado se ve en los escarpes que se generan. El control estructural en ríos y arroyos es evidencia de que la mayoría del drenaje corresponde a una falla o zona de fractura. Asimismo, la interrelación de estos sistemas de fallas y su carácter de tipo normal a partir del Pleistoceno provoca levantamiento, hundimiento, escalonamiento y basculamiento de los bloques (García-Palomo, 2008).

## 2.2 Historia Geológica Local

La Sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo se encuentra ligada a la formación de la Cuenca de México, para la cual se proponen las siguientes siete fases de formación.

- Primera fase (Cretácico y al Eoceno): se plegaron los sedimentos que constituyen el basamento de la cuenca y se registraron las primeras manifestaciones volcánicas, constituidas en su mayor parte por fragmentos de rocas volcánicas, probablemente basaltos que se mezclaron con guijarros de caliza. La edad del conglomerado está comprendida entre el Cretácico y el Oligoceno Tardío (Ramírez *et al.*, 1983; Cedillo *et al.*, 2007).

- Segunda fase (Oligoceno Medio): se presentaron afectaciones por la geodinámica de fallas transcurrentes que originaron movimientos tectónicos distensivos y comprensivos. Estos movimientos originaron los primeros complejos volcánicos al norte de la cuenca, que corresponden a las primeras emisiones de la base de las sierras Nevada, De las Cruces, Chichinautzin, Xochitepec y Guadalupe, con lavas de composición intermedia y ácida con abundantes tobas e ignimbritas (Ramírez *et al.*, 1983; Cedillo *et al.*, 2007).

- Tercera fase (Oligoceno Tardío): se caracterizó por un período de quietud volcánica. Sin embargo, en este periodo surgieron las estructuras dacíticas del Peñón de los Baños y de los cerros Tigre y Zacatenco, éste último de hace 16 millones de años (Cedillo *et al.*, 2007).

- Cuarta fase (Mioceno): se presentaron nuevos eventos tectónicos, presumiblemente compresivos, produjeron una nueva etapa de vulcanismo en el Eje Volcánico y la Cuenca de México. Durante esta fase se originaron las “Sierras Menores” (Chapa de Mota, Las Mazas y Tepetzotlán), y el complejo principal de la Sierra de Guadalupe, que se caracterizan por lavas intermedias y ácidas. Se formaron grandes domos dacíticos, como los cerros Tenayo, Chiquihuite y Tepeyac, entre otros (Ramírez *et al.*, 1983; Cedillo *et al.*, 2007).

- Quinta fase (fines del Mioceno): se formaron las “Sierras Mayores” que delimitan a la cuenca al poniente y al oriente. Las Sierras de Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo, Río Frío y Nevada pertenecen a esta fase y están constituidas por lavas andesíticas y dacíticas con estructura porfírica. Las rocas de estas formaciones geológicas fueron el producto principal para la acumulación de grandes espesores de brechas, arenas, tobas, lahares y conglomerados de composición intermedia a ácida (Ramírez *et al.*, 1983; Hernán *et al.*, 2000; Cedillo *et al.*, 2007).

- Sexta fase (Plioceno al Pleistoceno): se presentaron movimientos distensivos y comprensivos que se asocian con la emisión de magmas básicos y ácidos con un alto contenido de vidrio. La continua erosión, transporte y acumulación de tobas originaron suelos con horizontes arenosos y arcillas (Cedillo *et al.*, 2007). De esta fase son los últimos eventos volcánicos de la sierra de Monte Alto y Monte Bajo, y que le imprimieron las dimensiones y características morfológicas que presenta en la actualidad.

- Séptima fase (Pleistoceno al Holoceno): se asocia al último período de actividad volcánica dentro de la cuenca y se encuentra representada por la emisión de lavas basálticas que dieron origen a la sierra del Chichinautzin y cuya actividad continua hasta hace 2,000 años con los volcanes Xitle y Chichinautzin. En este periodo también tuvo importante actividad el estratovolcán Popocatepetl, el cual entró en su última fase de actividad volcánica en el año de 1994.

Por lo anterior se puede concluir que la sierra de Monte Alto y Monte Bajo, área en la que se encuentra enclavada el área de la cuenca del río San Jerónimo; surge a finales del Mioceno y finaliza su formación entre el Plioceno y el Pleistoceno (García-Romero, 1998; Medina y Tejero-Díez, 2006), dentro de la sexta fase volcánica formadora de la cuenca de México (Mooser, 1996).

## 2.3 Litología de superficie

De acuerdo con Mooser *et al.* (1996) en la sierra Monte Alto y Monte Bajo se reconocen las siguientes formaciones litológicas (Figura 2.4):

### a. Depósitos Lacustres del Mioceno (T<sub>pL</sub>)

Los depósitos lacustres están conformados por sedimentos que se encuentran en la base de los piedemontes de las “Sierras Menores” (Chapa de Mota y Tepetzotlán). Se formaron por periodos de transporte y acumulación representativos de la cuarta fase de formación de la Cuenca de México. Subyacen a rocas volcánicas -principalmente capas gruesas de ceniza- del Plioceno y del Cuaternario, así como a los depósitos de la formación Tarango (Cedillo, 2007). Afloran con amplitud en el extremo noreste del área de estudio, principalmente en los alrededores de la ciudad de Tepeji del Río y de la presa Requena.

### b. Depósitos Volcánicos del Mioceno-Plioceno (T<sub>pV</sub>)

Incluye a los depósitos volcánicos de hasta 650 m de espesor, que son representativos de la quinta fase de formación de la Cuenca de México. Afloran de manera local en los flancos de las “Sierras Menores” (Chapa de Mota y Tepetzotlán), en otros diversos conos aislados de la cuenca, y en las cumbres del llamado grupo de las “Sierras Mayores” (Monte Alto y Monte Bajo) (Enciso-De la Vega, 1992). Los depósitos sobreyacen rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno y están cubiertos por unidades volcánicas del Plioceno Tardío y el Cuaternario (Mooser *et al.*, 1996).

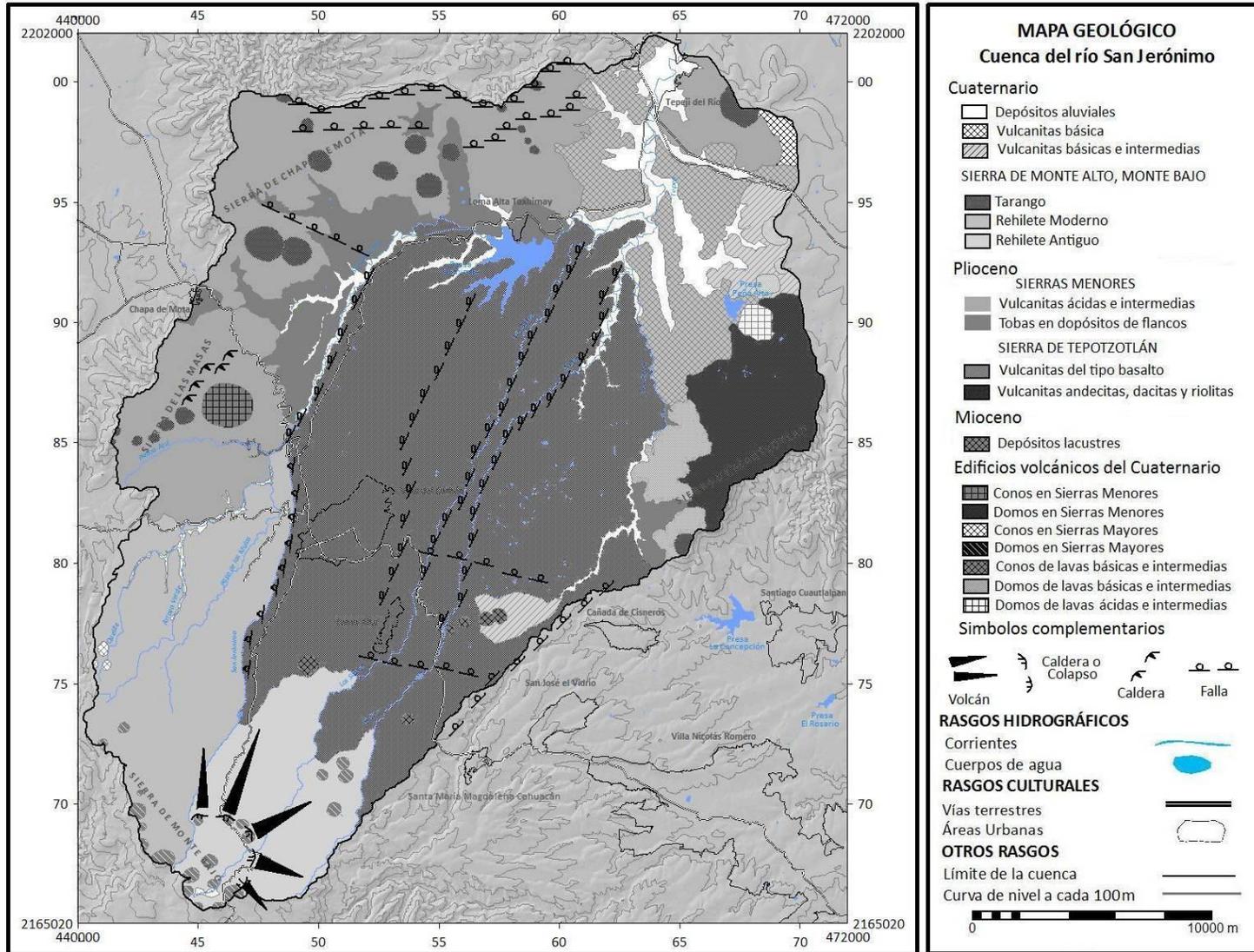


FIGURA 2.4 MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

Las secuencias piroclásticas, de composición andesítica a dacítica, generalmente no son consolidadas e incluyen tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas, tanto de flujo piroclástico como de “surge” piroclástico, las cuales se encuentran cubiertas por intercalaciones de derrames lávicos. Los flujos lávicos más máficos tienen exfoliación regular horizontal, con vesículas alargadas en dirección del derrame, lo que da la idea de regímenes de flujo laminar con alto contenido de volátiles. Los más ácidos tienen un flujo incipiente, generalmente de grano fino a medio. Este tipo de cristalización es inicialmente subterránea con lenta pérdida de energía y posteriormente con rápido enfriamiento (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

#### c. Formación Rehilete

El nombre de esta formación se debe a una caldera cuyos restos afloran en la cumbre de la sierra de Monte Alto y Monte Bajo. Se originó en la quinta fase de formación de la cuenca de México como resultado de erupciones de gran magnitud que formaron una secuencia inferior de ignimbritas con depósitos de lapilli de pómez y ceniza de caída, oleadas piroclásticas y lahares. De acuerdo con la literatura es posible deducir que existen varias secuencias volcánicas dentro de esta formación, entre las que predominan:

##### c.1 Rehilete Antiguo (QcRi)

Agrupar a los productos volcánicos emitidos en el inicio del Plioceno Tardío, correspondiente a la sexta fase de formación de la Cuenca de México. Se caracteriza por una secuencia inferior de ignimbritas y flujos piroclásticos lobulados con gran abundancia de pómez y ceniza, que en comparación con los que se encuentran en otras unidades de la cuenca, son los de mayor extensión. En la porción más elevada de la sierra se asientan un grupo de domos riolíticos intra-caldera (Potrerillos, La Cruz y Río Frío) y depósitos piroclásticos asociados, que en apariencia representan la zona donde se produjo la mayor actividad volcánica.

#### c.2 Rehilete Moderno (QcR)

Se originó en un lapso de actividad volcánica que concluyó una alineación de domos riolíticos en las cumbres de la sierra, seguido de la erosión y colapso del edificio volcánico formando una secuencia de depósitos masivos de avalanchas de escombros y de flujos de bloques y cenizas en las laderas de la sierra, lo cual es característico de la sexta fase de formación de la Cuenca de México. Esta unidad cubre discordantemente a las rocas volcánicas del Plioceno Temprano, por lo que se le ha asignado una edad de finales del Plioceno Tardío (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989; Mooser *et al.*, 1996).

#### d. Formación Tarango (T)

La Formación Tarango, definida por Mooser *et al.* (1996), es característica de los piedemontes de las “Sierras Mayores” que bordean a la Cuenca de México. Se originó a partir de la séptima fase de formación de la cuenca y está compuesta por un conjunto heterogéneo de flujos piroclásticos de composición intermedia a ácida, tobas, capas de pómez, escasos depósitos fluviales, paleosuelos y en algunos sitios depósitos laháricos, depositados en un marco de una importante actividad ígnea explosiva (Tapia-Varela y López-Blanco, 2002; CEAQ, 2005).

La característica principal de esta formación es el estado caótico en el que se encuentran depositadas las innumerables series clásticas que la forman, que en conjunto, conforma una roca semicompacta y porosa, localmente conocida como tepetate (Tapia-Varela y López-Blanco, 2002; CEAQ, 2005). Morfológicamente forma extensos lomeríos bajos, que incluyen los piedemontes volcánicos correspondientes a las Sierras Mayores. Sin embargo, su formación no corresponde a un ciclo cerrado de carácter erosivo, si no a varias fases alternadas de actividad erosivo-denudatoria y volcánico-magmática (Enciso-De la Vega, 1992; García-Romero, 1998).

La formación Tarango cubre con discordancia erosional a las rocas volcánicas del Mioceno Medio al Plioceno Temprano, y a su vez, se encuentra cubierta por depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario. De acuerdo con fechamientos isotópicos, le ha sido asignada una edad del Plioceno Tardío (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

e. Tobas en depósitos de flancos (TQt)

Esta unidad, definida por Mooser *et al.* (1996), corresponde a los depósitos volcánicos (principalmente cenizas) que se acumularon en los flancos de las “Sierras Menores” y que cubren a los depósitos lacustres del Plioceno, siendo característica de la sexta fase de formación de la Cuenca de México y contemporánea a las tobas en depósitos de los flancos. Se incluyen sedimentos aluviales que han sido diferenciados por su edad con respecto a los más recientes -del Holoceno principalmente- que no afloran de manera continua en el área de estudio (Cedillo *et al.*, 2007).

f. Depósitos aluviales del Cuaternario (Qal)

Esta unidad está conformada por los depósitos detríticos no consolidados que consisten en gravas, arenas, limos y arcillas, ubicados en abanicos aluviales, planicies aluviales y como relleno de valles fluviales. Contienen cuerpos lenticulares de caliche, localmente impregnados con óxidos de hierro y en ocasiones con carácter plástico. Los fragmentos líticos tienen diversa composición y grado de madurez de acuerdo con la fuente de aprovisionamiento, resistencia de la roca y tiempo–distancia de transporte. En el área de estudio afloran en las partes bajas del la sierra de Chapa de Mota y como fondos de valle en varios barrancos (CEAQ, 2005; Cedillo *et al.*, 2007).

## 2.4 Organización Geomorfológica

### 2.4.1 Principales Unidades del Relieve

La cuenca del río San Jerónimo abarca el sector más septentrional de la sierra Monte Alto y Monte Bajo (Sierras Mayores), el cual se encuentra constituido por el estratovolcán La Bufa;

así como por estructuras volcánicas antiguas, Chapa de Mota y Las Mazas (Sierras Menores), caracterizadas por una alineación de domos en sus cumbres e importantes colapsos de los edificios volcánicos (Mooser, 1996; García-Palomo *et al.*, 2008).

Predominan los materiales volcánicos (lavas, depósitos de piroclastos, lahares) y proluviales retrabajados durante el Cuaternario. El control estructural y litológico en los macizos montañosos de material lávico y piroclastos ha permitido el desarrollo de una red fluvial densa y notablemente incidida (García-Palomo *et al.*, 2008). Los principales cursos fluviales tienen cabeceras extensas con cañadas profundas; como en el caso de los ríos Los Sabios, San Jerónimo, La Ladera, San Pedro, Paso de las Mulas y La Bufa, que dejan entre sí divisorias estrechas en las cimas de la sierra culminando en una planicie acumulativa fluvio-lacustre de origen tectónico (Palma *et al.*, 1999). Este drenaje está ampliamente desarrollado y forma ramales de régimen perenne e intermitente.

Teniendo en cuenta el análisis de geológico, tectónico y morfométrico, se han reconocido tres unidades morfológicas en la cuenca del río San Jerónimo:

- a. Macizos Montañosos: de productos andesíticos y dacíticos del Plioceno temprano.
- b. Piedemonte: de productos vulcanoclásticos y derivados del arrastre del Pleistoceno, los cuales se presentan profusamente disectados por barrancos asimétricos.
- c. Llanura acumulativa fluvial: cuya formación está relacionada con la actividad tectónico-volcánica del Pleistoceno-Holoceno.

- a. Macizos montañosas

Los macizos montañosos se dividieron de acuerdo a su posición en la cuenca en estudios en tres grupos. El primero de ellos se localiza al sur y está constituido por la sierra de Monte Alto y Monte Bajo, el segundo se localiza al norte y noroeste constituido por la sierra de Chapa de Mota y Las Masas y el tercero su ubica al este constituido por la sierra Tepozotlán.

En su conjunto presentan relieves de culminaciones lineales y formas domíticas de moderada altitud (altitud máxima 3,600 m en el cerro de La Cruz y mínima 2,500 en el cerro El Epazote). Consisten en elevados edificios volcánicos, derrames lávicos y depósitos piroclásticos de composición andesítica y dacítica, todos los cuales se originaron como parte de la actividad tectónica-volcánica del Plioceno-Pleistoceno, en lo que corresponde a la sexta fase de formación de la Cuenca de México. El enlace topográfico con la zona de piedemonte tiene lugar generalmente con rupturas de pendiente.

Morfológicamente, el límite sur de la cuenca está constituido por la sierra Monte Alto y Monte Bajo, forman un mega bloque perteneciente al grupo de Sierras Mayores y por montañas bloque de orden menor, sobre la cual se localiza la cota más alta de la cuenca del río San Jerónimo en el cerro La Cruz (3,620 m). Se extiende desde los 2,650 m a los 3,600 m con un desnivel general de 950 m y una superficie de 94 km<sup>2</sup>, lo cual representa cerca del 14% del área de la cuenca, y corresponde litológicamente a productos volcánicos emitidos durante la parte más temprana del Plioceno Tardío.

En el sector de la sierra que corresponde a la formación Rehilete Antiguo (inicios del Plioceno Tardío) (Figuras 2.4 y 2.5) presenta un escalonamiento, con laderas de pendientes bajas (<15°) y enlazadas con laderas de pendientes fuertes (entre 30 y 45°). En el sector perteneciente al Rehilete Moderno (final de Plioceno Tardío) existen numerosas rupturas de pendiente que incrementan la susceptibilidad a la erosión. Las fracturas orientadas NE-SW coinciden con la dirección de los principales valles fluviales como El Oro, Los Sabios, San Jerónimo y Paso de Mulas, los cuales presentan un corte erosivo simétrico hasta su entrada al piedemonte, donde se torna asimétrico.

En el conjunto de la sierra de Monte Alto y Monte Bajo, las laderas presentan un perfil generalmente entre cóncavo y convexo de vertientes modeladas en rocas volcánicas andesíticas, donde la dirección de las corrientes tiende a encauzarse, por el control estructural que favorece la erosión vertical. La acción neotectónica y la erosión regresiva

activa han favorecido la formación de pequeñas cuencas de captación. A pesar de presentar amplitudes fuertes (80 m) y pendientes de moderadas a muy escarpadas ( $> 30^\circ$ ) que favorecen avenidas peligrosas, éstas no son muy frecuentes ya que el agua precipita sobre laderas bien protegidas por vegetación arbórea y suelos volcánicos con alta capacidad de infiltración.

En el norte y noroeste de la cuenca, las elevaciones montañosas del grupo de Sierras Menores (Chapa de Mota y Las Mazas) se extienden desde los 2,450 m a los 3,100 m, con un desnivel general de 650 m y una superficie de 153 km<sup>2</sup>, lo que representa cerca del 22% del área de la cuenca y corresponde litológicamente a los depósitos volcánicos del Plioceno Temprano.

La alineación de las principales cumbres de la sierra Chapa de Mota refleja el control tectónico de una estructura con dirección E-W. Entre dichas elevaciones destacan El Castillo (3,200 m), Iglesia Vieja (3,100 m), El Escorpión (2,700 m), Vicente Barrancas (2,750 m), Grande (2,600 m) y Los Cardones (2,500 m). Están formadas por depósitos andesítico-dacíticos y secuencias piroclásticas no consolidadas que permiten tanto la infiltración como la movilidad de los materiales; esto, aunado con la escasa cubierta vegetal permite elevadas aportaciones de sedimentos provenientes de las laderas convexas.

En las laderas de las Sierras Menores, la presencia de cortes erosivos influenciados por fallas de dirección SE-NW y secuencias piroclásticas no consolidada van compartimentando esta unidad en cuencas de moderado tamaño, rodeadas de parteaguas de tipo lineal. Desde su formación, estas cuencas, han sido sujetas a un control estructural fuerte, que junto con las pendientes muy fuertes ( $> 30^\circ$ ) y amplitudes muy fuertes ( $> 80$  m) permiten suponer una dinámica actual bastante intensa. Esta amplitud del relieve hace que en la parte más alta las corrientes se encajonan formando valles profundos y encajonados.

## b. Piedemonte

Topográficamente aparece como una extensa franja de piedemonte que circunda las elevaciones montañosas. Se origina a partir de depósitos vulcanoclásticos re TRABAJADOS, que formaron extensos depósitos proluviales que coalescieron formando una amplia rampa o glacis de acumulación.

Ortíz (1987) considera que la formación del piedemonte se puede relacionar a variaciones del clima ocurridas en el Cuaternario. Así, mientras que los climas áridos o semiáridos, con ausencia o insuficiencia de cobertura vegetal, permitieron el desarrollo acumulativo de los glacis, los climas más húmedos permitieron la incisión de los cauces sobre la superficie del glacis. De esta manera el glacis quedó constituido por potentes acumulaciones de tobas, cenizas y brechas volcánicas, que se mezclaron con sedimentos de origen proluvial y deluvial. Además, la posición del piedemonte también guarda una relación con la edad, ya que se ubica en la porción proximal a las elevaciones montañosas con una edad del Plioceno tardío y la porción distal a partir del Pleistoceno tardío-Holoceno. Lo que corresponde a la sexta y séptima fase de formación de la Cuenca de México.

Los relictos de la antigua explanada del glacis se reconocen fácilmente por presentar superficies convexas denudativas de escasa pendiente ( $< 6.5^\circ$ ), que se restringen a pequeñas áreas ubicadas en la parte terminal del piedemonte (Ortiz, 1987). La superficies convexas denudativas están circundadas por valles erosivos de fuerte pendiente ( $> 45^\circ$ ) con una elevada densidad de drenaje, asociada a una alta proliferación de causas de primer orden que se integran al sistema de drenaje. El aporte, cada vez mayor, de material proveniente de laderas convexas denudativas, aunado a la remoción antropogénica de la vegetación han contribuido al azolve de la presa Tahximay, restándole vida útil (Oropeza, 1979).

La configuración morfológica del piedemonte parece estar controlada por fracturas de dirección NE-SW, que dan lugar a un sistema de lomeríos paralelos entre sí, así como una extensa red de barrancos con un patrón erosivo asimétrico. Ortiz (1987) explica esta

asimetría por una migración lateral o cambios en el nivel de base en grandes extensiones de las llanuras de nivel de base. En los barrancos del área de estudio las laderas expuestas hacia el norte son cóncavas, de fuerte pendiente y estrechas en superficie, en tanto que las laderas orientadas hacia el sur muestran una superficie convexa, de baja pendiente y son muy extensas.

El patrón erosivo varía de acuerdo a su posición en el piedemonte. A mayor altitud (a partir de los 2,850 msnm) la profundidad de disección se incrementa, mientras que en la parte más distal y próxima a las llanuras lacustres (2,550 msnm) los valles aumentan su amplitud horizontal debido a la disminución del desnivel local respecto del fondo de la cuenca y a que hay un ataque más directo sobre las orillas de los valles, en donde el material no es consolidado y se pierde con facilidad.

El enlace con la zona de llanuras aluviales tiene lugar por una topografía alomada de formas convexas y con inclinación general hacia el interior de la cuenca, siendo inclinado cuanto más próximo a la llanura, de la que queda desconectada topográficamente por un borde con una inclinación de  $< 15^\circ$ .

#### c. Llanura acumulativa fluvial

Esta estructura corresponde a la depresión Taxhimay, se localiza en la parte centro-nororiental de la cuenca. La composición litológica es muy similar al piedemonte, además incluye, material aluvial aportado por los ríos y arroyos de las laderas denudatorias. Los procesos morfogenéticos más importantes son los hídricos cuyo incremento es favorecido por la acción antrópica negativa (Oropeza 1979).

## 2.4.2 Clasificación de las Formas del Relieve

La morfogénesis se refiere al origen y evolución de las formas del relieve originadas por procesos endógenos (volcánicos y tectonismo) y exógenos (intemperismo, erosión-transporte y acumulación). Las formas del relieve del área de estudio se muestran en el mapa de la figura 2.5.

### a. RELIEVE ENDÓGENO

Incluye al conjunto de formas del relieve originadas a partir de la actividad interna de la Tierra (movimientos verticales y horizontales, y vulcanismo), que conservan su aspecto original. Cuando se origina por erupciones (vulcanismo) y no ha sido modificado sustancialmente por procesos exógenos, se dice que es un relieve volcánico acumulativo y puede ser: explosivo, efusivo y extrusivo.

#### a.1 Volcánico acumulativo explosivo

**Planicies de tefra:** se forman a partir de material piroclástico acumulado durante una erupción volcánica, el cual rellena depresiones u oquedades en el terreno. En el área de estudio se encuentran en la formación Rehilete Antiguo, ubicada en la parte alta de la Sierra de Monte Alto y Monte Bajo.

### b. RELIEVE ENDÓGENO MODELADO

Se refiere al relieve de origen endógeno (volcánico o tectónico) que ha sido más o menos modelado por procesos exógenos, en función de la litología (tipo de roca, textura), edad de las rocas, tiempo que ha permanecido a la intemperie, pendiente, condiciones climáticas, fracturas y actividad social. Entre las geoformas que constituyen este tipo de relieve se encontraron las siguientes:

#### b.1 Volcánico modelado

**Laderas modeladas:** son laderas inferiores de las montañas compuestas por coladas lávicas y piroclastos, que comienzan a ser disecadas por una densa red de barrancos.

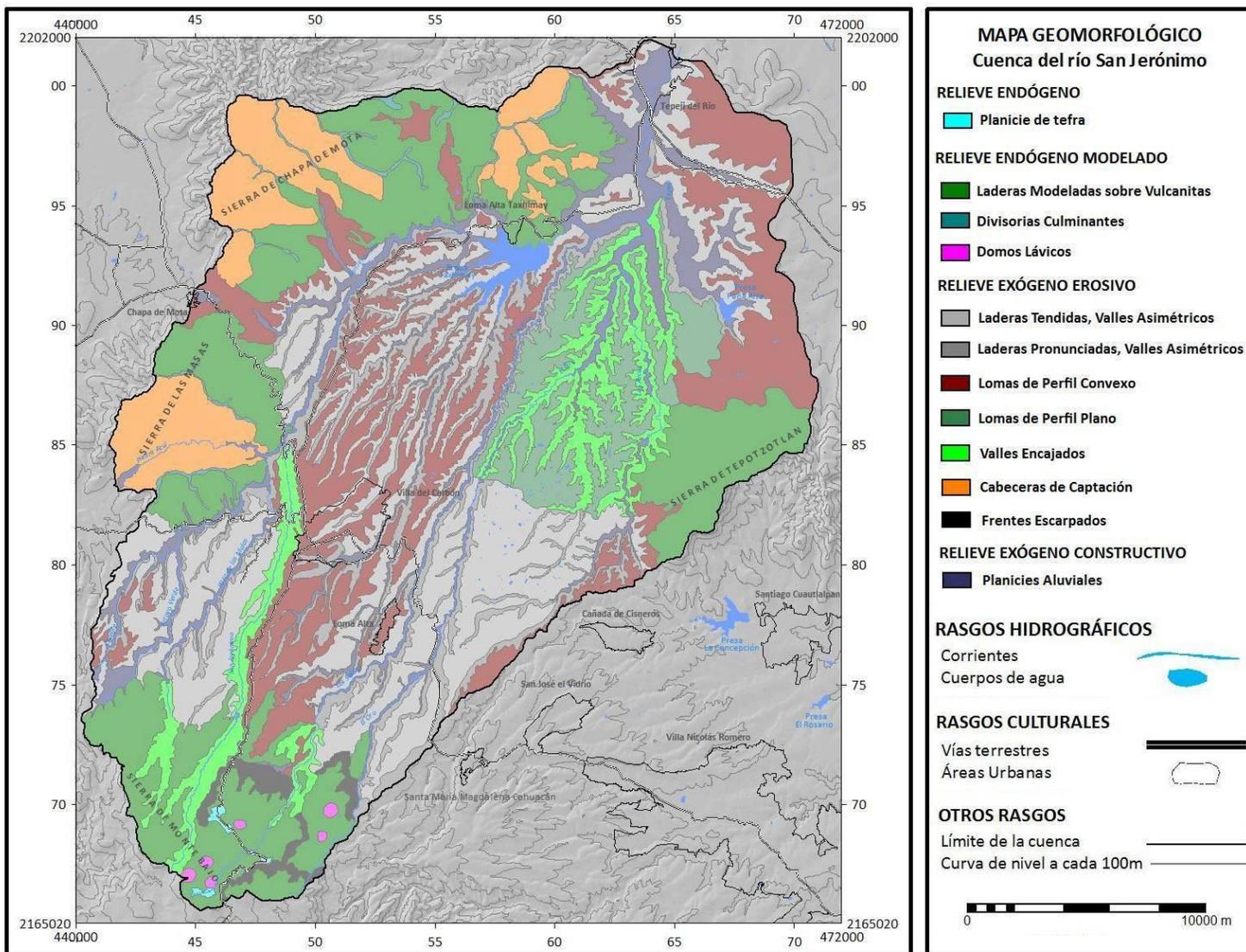


FIGURA 2.5 MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

**Divisorias culminantes:** son áreas estrechas de menos de 250 m constituidas por una ladera volcánica original de lavas, piroclastos o ambos materiales, que han sido disecadas por la erosión fluvial. En el área de estudio se encuentran en las partes superiores de la Sierra de Chapa de Mota y Las Masas.

**Domos lávicos:** los domos se pueden distinguir fácilmente debido a su geometría casi perfecta, se encuentran en un grupo de domos intracaldera (caldera Rehilete) que coronan la parte más elevada de la sierra Monte Alto-Monte Bajo en la formación Rehilete Antiguo.

### c. RELIEVE EXÓGENO

Es el resultado de la acción modeladora del hielo, el agua superficial, el agua subterránea, la gravedad, el mar y el viento. Se manifiestan por tres procesos principales: intemperismo, erosión (transporte) y acumulación, que a su vez dan lugar al relieve erosivo y acumulativo.

#### c.1 Relieve erosivo fluvial

El principal agente modelador es el agua de escurrimiento superficial, cuya eficacia erosiva depende del régimen, el caudal y la velocidad de la escorrentía, así como de la naturaleza de la litología, las condiciones del subsuelo (percolación, sufusión y humedad), la geometría del colector, la actividad biológica y la intervención antrópica (canalizaciones, drenajes, urbanización, represamiento, dragos, etc.).

**Laderas tendidas en valles asimétricos:** son laderas internas de barranco, caracterizadas por una geometría convexa, débil pendiente y notable extensión (>300 m). A pesar de que estos rasgos no favorecen la erosión, la presencia de materiales volcanoclásticos muy intemperizados, genera un proceso de acarabamiento intensivo muy favorecido por la deforestación y el aprovechamiento agrícola en una alta proporción de su superficie.

**Laderas pronunciadas en valles asimétricos:** son laderas internas de barranco, caracterizadas por una geometría recta a cóncava, de fuerte pendiente y cortas de longitud (algunas solo alcanzan 175 m), distribuidas en contra-vertiente de las laderas tendidas.

No obstante el aparente estado de equilibrio que presentan debido a estar cubiertas de vegetación, sus caracteres morfológicos y la perturbación antrópica favorecen el abarrancamiento y localmente los procesos de gravedad.

**Lomas de perfil convexo:** son superficies interfluviales de morfología convexa, las cuales se distribuyen con amplitud en toda el área de piedemonte, y sobre las cuales se desarrolla una importante actividad agrícola y ganadera.

**Lomas de perfil plano:** son superficies interfluviales de morfología llana, las cuales se distribuyen en una amplia superficie del sector más distal del piedemonte. Están delimitadas por las laderas internas de barrancos erosivos de fuerte pendiente, no obstante lo cual, en su superficie llana se desarrolla una importante actividad agrícola.

**Valles encajados:** son valles fluviales de morfología recta y con perfil transversal en “V”. Su origen se relaciona con importantes fracturas tectónicas que han favorecido el encajamiento de las corrientes fluviales, tanto sobre el lecho fijo formado por materiales muy compactos (andesitas y traquiandesitas) de las áreas de montaña, donde son frecuentes los saltos con procesos de abrasión intensos, así como sobre los materiales clásticos e intemperizados del piedemonte.

**Cabeceras de captación:** es una forma cóncava del relieve montañoso, a manera de semicírculo y con laderas empinadas, que se origina por desprendimiento y deslizamiento (erosión remontante), y la acción erosivo-fluvial de escorrentías que inciden en un canal principal. Estas formas las encontramos claramente en la sierra de Chapa de Mota y Las Masas, donde forman cabeceras de grandes y alargadas sobre vulcanitas antiguas.

#### c.2 Relieve erosivo gravitacional

Este tipo de relieve se produce por procesos de caída que derivan en el desarrollo de laderas escarpadas o de fuerte pendiente.

**Frentes escarpados:** se incluyen los sectores de las laderas montañosas caracterizados por una morfología escarpada o abrupta, debido a la ocurrencia en ellos de procesos de desprendimiento o caída, desplome, deslizamiento, flujo, expansión lateral o movimiento complejo del material rocoso. Su origen puede ser erosivo, litológico, estructural o tectónico. Se distribuyen en la formación Rehilete Antiguo, formando escalonamientos con laderas modeladas.

### c.3 Relieve constructivo fluvial

Incluye a las geoformas derivadas de la acumulación de sedimentos aluviales en las áreas de confluencia de barrancos o bien, en la zona de desembocadura de las principales corrientes de la cuenca. Allí, el cambio brusco de pendiente entre el piedemonte y las planicies de nivel de base provoca que las corrientes fluviales pierdan capacidad de carga y la depositen en extensas planicies. Las geoformas fluviales acumulativas presentes en el área de estudios son:

**Planicie aluvial:** las principales planicies se distribuyen en las áreas de desembocadura próximas al nivel de base en el fondo de la cuenca. Las planicies se formaron a partir de ríos con cabeceras en sectores con depósitos deleznable que aportan grandes volúmenes de sedimentos.

## CAPÍTULO III. PATRÓN DEL PAISAJE Y HÁBITATS DE BORDE

### 3.1 Patrón del paisaje en la cuenca del río San Jerónimo

#### 3.1.1 Principales ejes de la transformación paisajística

La configuración actual del paisaje en la cuenca del río San Jerónimo es compleja al responder tanto a la combinación de elementos bióticos y abióticos (relieve, litología, clima, vegetación y suelos) que le imprimen una diversidad de ambientes naturales, como a un extenso legado histórico de diversas actuaciones humanas que han incidido sobre su dinámica. Cabe destacar que debido al alto valor agrícola de los suelos, ocurrió una importante expansión del cultivo de cereales, legumbres, hortalizas y forrajes, principalmente en las planicies aluviales y en las divisorias y laderas tendidas de los barrancos del piedemonte, actividad que ha sido asociada a la destrucción parcial del espacio arbolado. Esta situación explica porque en la actualidad la superficie forestal haya sido reducida a tan sólo el 37% de la cobertura total de la cuenca (257.8 km<sup>2</sup>), y que se distribuya en su mayor parte replegada en las laderas y cumbres de la sierra, donde conforma masas aisladas dominadas por árboles de tamaño medio (*Crataegus*, *Arbutus*) y estratos arborescentes (*Buddleia*) que dan cuenta del intenso uso del que han sido objeto.

Las actividades forestales, aunque también han sido de importancia en la transformación del paisaje, estas no ha sido constante, ya que el desarrollo histórico de la economía y la sociedad ha motivado la alternancia de etapas de conservación y destrucción del espacio arbolado. Los usos forestales se adaptaron a las nuevas demandas pero manteniendo una gran continuidad con el pasado, como es el caso del carboneo, el ramoneo y las quemas, así como otras prácticas ligadas a la supervivencia de los primeros pobladores de la cuenca, tales como la recolección de diversos productos del bosque y la obtención de leña como combustible.

Sin embargo, en la última década las poblaciones forestales están experimentando un ligero incremento de sus superficies por efecto de repoblaciones (en fragmentos reducidos) tanto privada como estatal. Además, las entidades locales y los particulares parecen estar acogiendo positivamente los programas forestales, transformando antiguas tierras de labor, barbechos y pastizales en terrenos forestales.

A continuación se describen las 16 clases de cubiertas del suelo que forman el patrón paisajístico del área de estudio. La localización y extensión de cada uno de ellos aparece en la Tabla 3.1 y el Mapa de Cubiertas y Usos del Suelo del 2011 (Figura 3.1).

TABLA 3.1 CLASES DE CUBIERTAS, CANTIDAD DE PARCHES Y SUPERFICIE TOTAL, CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

<b>Clases (Cubiertas)</b>	<b>Uso del suelo</b>	<b>Superf. (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Superf. (%)</b>
<b>Bosque de Pino</b>	Recreativo	12.35	1.78
<b>Bosque de Coníferas</b>	Forestal	21.41	3.09
<b>Bosque de Encino</b>	Forestal/Agrícola	87.53	12.64
<b>Bosque de Coníferas y Latifoliadas</b>	Forestal	53.26	7.69
<b>Bosque de Pino - Encino</b>	Forestal/Agrícola	83.30	12.03
<b>Matorral Inducido</b>	Forestal/Pecuario	41.76	6.03
<b>Pastizal Natural</b>	Pecuario	0.70	0.10
<b>Pastizal - Coníferas</b>	Pecuario	1.88	0.27
<b>Pastizal - Encino</b>	Pecuario	64.92	9.38
<b>Pastizal Inducido</b>	Agrícola	56.63	8.18
<b>Cultivo</b>	Agrícola	244.89	35.38
<b>Asentamiento humano</b>	Residencial	8.49	1.23
<b>Cantera</b>	Minero	0.12	0.02
<b>Cuerpo de agua</b>	Recreativo	4.26	0.61
<b>Erosión</b>	Sin uso aparente	8.61	1.24
<b>Suelo desnudo</b>	Sin uso aparente	2.14	0.31

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL MAPA DE USOS Y CUBIERTAS DEL SUELO DEL 2011.

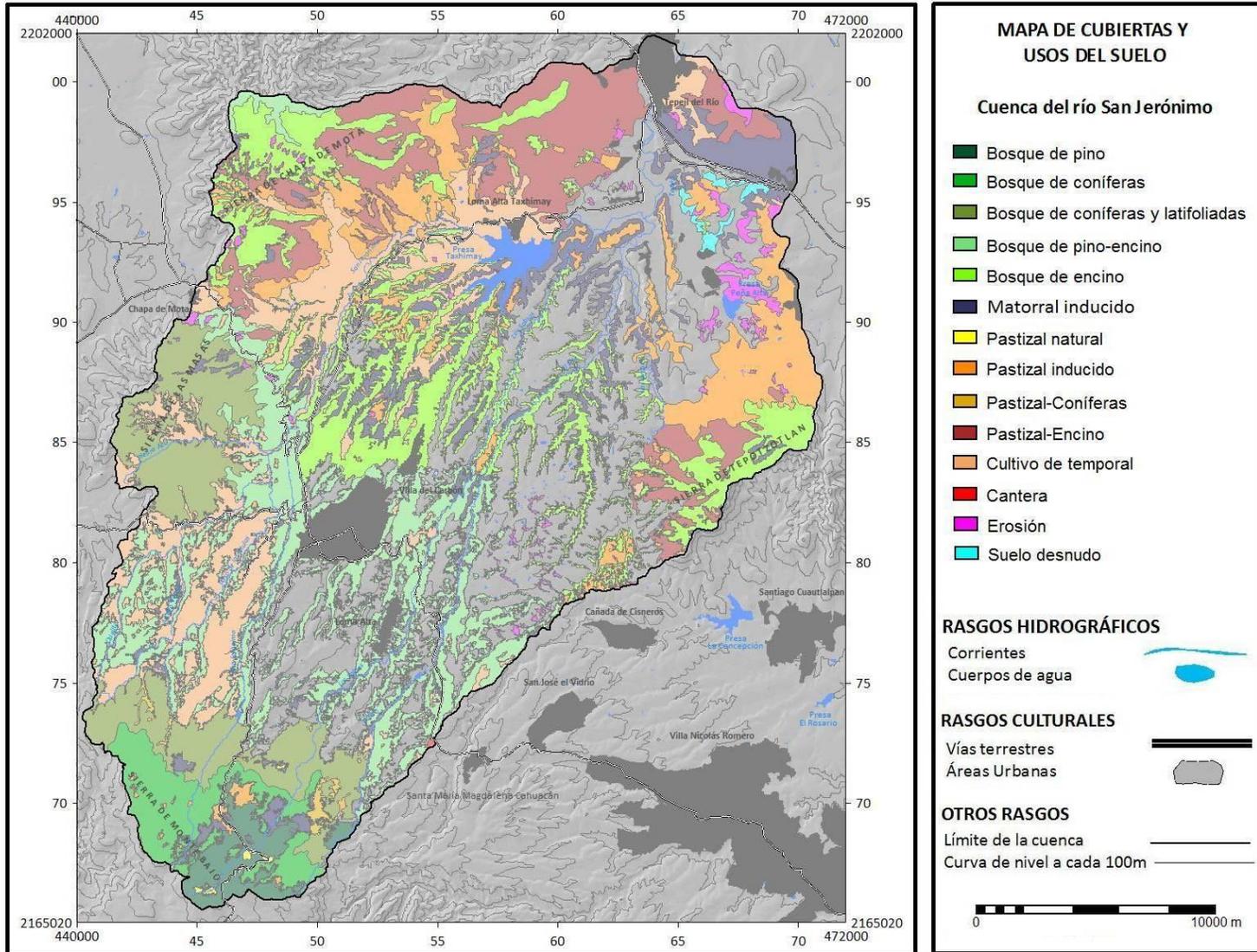


FIGURA 3.1 MAPA DE CUBIERTAS Y USOS DEL SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

### 3.1.2 Estado actual de la distribución de las clases paisajísticas

#### a. Bosque de *Pino montezumae*

Destaca entre el conjunto de los bosques de coníferas por formar comunidades dominadas por individuos de *Pinus montezumae*, bien desarrollados, aunque de cobertura abierta y de estructura sencilla, con sólo un estrato arbóreo y uno herbáceo. Se distribuye de manera localizada (12.3 km<sup>2</sup>; 1.8% del total de la cuenca) en sitios de alta montaña (3200 a 3600 m de altitud), coincidiendo con terrenos planos o poco inclinados del sector más alto de la formación geológica del Rehilete Antiguo. Tiene un carácter eminentemente forestal, siendo el ocoteo y el uso recreativo las formas más comunes de aprovechamiento.

#### b. Bosques de Coníferas

Forma comunidades cerradas dominadas por *Abies religiosa* y *Pinus* spp., de esta forma se protegen de la acción de los vientos y la insolación, al tiempo que exhiben un microclima forestal particular en su interior, con desarrollo inferior del sotobosque. Los bosques de coníferas forman grandes fragmentos que se distribuyen entre los 3000 y 3600 m de altitud, sobre las formaciones Rehilete Antiguo y Moderno de las laderas de la sierra de Monte Alto y Monte Bajo, y sobre vulcanitas del Mioceno-Plioceno de las porciones más elevadas de la sierra de Las Mazas, ocupando el 3% (21.4 km<sup>2</sup>) de la superficie de la cuenca.

#### c. Bosque de Coníferas-Latifoliadas

En bosques de Coníferas-Latifoliadas predominan especies (*Pinus* spp. y *Quercus* spp.) se distribuyen entorno a los 2800 m de altitud, ocupando el 7.7% (53.3 km<sup>2</sup>) de la superficie de la cuenca, ocupando las laderas escarpadas y fuertemente disecadas de las formaciones Rehilete Antiguo y Moderno de la sierras de Monte Alto y Monte Bajo, así como de las vulcanitas de Mioceno-Plioceno de la sierra de Las Masas. El aprovechamiento forestal que tradicionalmente se ha derivado de estos bosques, es el destinado a la obtención de leña y carbón vegetal, el cual, ha dando lugar a la aparición de comunidades arbustivas y herbáceas que favorecen el pastoreo en estas comunidades. Aunque el tipo de ganado más extendido

es el ovino, al parecer no ha tenido impactos notables en la estructura de los bosques (Rzedowski, 1978).

d. Bosque de Pino – Encino

Forman comunidades densas, en las cuales los géneros *Pinus* y *Quercus* son dominantes sobre otros géneros arbóreos *Cupressus*, *Salix*, *Alnus* y *Fraxinus*. El recubrimiento arbustivo es denso y diverso, destacando entre otros géneros *Bacharis*, *Eupatorium*, *Senecio* y *Gaultheria*. Se distribuye entre 2500 y 2800 m de altitud, ocupando el 12% (83.3 km<sup>2</sup>) de la superficie de la cuenca. Por lo general se encuentran confinados en barrancos profundos y en pequeños parches adhesionados a laderas pronunciadas del piedemonte de la sierra de Monte Alto-Monte Bajo, sobre materiales diversos de la formación Tarango.

En algunos sectores de la cuenca, los bosques han sido sustituidos por cultivos o por repoblaciones de *Pinus patula*, lo que explica en parte la presencia de pinares de repoblación en el dominio del Pino-Encino y el carácter agrícola-forestal de esta comunidad. La superficie forestal ha sufrido un grave proceso de fragmentación ante la presión de una ancestral e intensa actividad antrópica, principalmente por la introducción de cultivos.

e. Bosque de Encinos

El dominio del encinar en la cuenca del río San Jerónimo es del 12.6% (83.5 km<sup>2</sup>) de su superficie y queda limitado entre los 2200 y 2500 m de altitud. Se desarrolla en zonas de topografía más o menos pronunciada y sobre suelos someros de las laderas de las sierras Chapa de Mota y Tepetzotlán y en la porción distal del piedemonte de la sierra de Monte Alto y Monte Bajo. El paisaje típico se caracteriza por encinares aislados que acompañan a las laderas pronunciadas, donde se ha conservado el árbol dominante (*Quercus* spp.) y remplazado el sotobosque por comunidades de pastizal o cultivos.

En los últimos años amplias extensiones de encinares se han aprovechado con fines ganaderos, destacando por el grave impacto que provoca la costumbre de someterlos a la acción periódica del fuego para estimular la producción de brotes tiernos de plantas herbáceas y arbustivas (Rzedowski, 1978).

#### f. Matorral Inducido

Dado que su origen es inducido o propiciado por acciones humanas, su representatividad en la cuenca es alta (41.7 km<sup>2</sup>) y equivalente al 6% de la superficie total. El matorral inducido destaca por la variedad de asociaciones, algunas distribuidas en manchones relativamente pequeños asociados a *Quercus* spp. y *Pinus* spp., y cuya presencia es indicativa de diversas fases de degradación o sustitución del bosque; otras veces, su avance responde a la colonización-invasión de antiguos campos de cultivo, abandonados y en proceso de regeneración. Con frecuencia se les atribuye un origen y mantenimiento asociados al fuego y la tala.

Se desarrollan de manera preferente en las porciones más secas y degradadas de la cuenca, en altitudes entre los 2200 y 3600, sobre suelos poco profundos. Estas condiciones se presentan en las laderas altas y piedemontes de las sierras Chapa de Mota y Tepotztlán, donde se tienen las mayores extensiones de matorral, ubicándose el fragmento más extenso en las faldas del cerro El Tepozán, aún costado de la población de Tepeji del Río.

#### g. Pastizal

Dentro de los pastizales dominan gramíneas como *Festuca tolucensis*, *Poa annua* y *Muhlenbergia macroura* en asociación con *Pinus* spp. y *Quercus* spp.

##### g.1 Pastizal-Encino

Se ubican entre los 2250 y 2800 m de altitud ocupando una 9.4% de la superficie de la cuenca (65 km<sup>2</sup>); por lo general coincidiendo con sitios que denotan una fuerte perturbación humana o bien en claros de bosque dentro de los bosques de encinos, principalmente de las laderas inferiores de las sierras menores.

## g.2 Pastizal-Coníferas

Se trata de asociaciones secundarias que aparecen tras la destrucción o aclareo del bosque de Coníferas en la sierra de Monte Alto – Monte Bajo, y se caracterizan por la presencia de individuos arbóreos dispersos, tanto de *Abies* (oyamel) como de *Pinus* (pino). Se distribuyen entre los 2800 y 3000 m de altitud, con una extensión de 1.87 km<sup>2</sup> (0.27% de la superficie de la cuenca); ocupa los fondos de barrancos y en laderas de fuerte pendiente y afectadas por avenidas extraordinarias en época de lluvias.

## g.3 Pastizal Natural

Los pastizales naturales se distribuyen entre los 3300 y 3500 m de altitud, principalmente sobre rocas volcánicas ácidas de la sierra de Monte Alto-Monte Bajo. Son la vegetación característica de sitios donde el drenaje del suelo es lento. Forman claros en los bosques de *Pinus montezumae* y del Mixto de Coníferas, en la cuenca ocupan el 0.1% de su superficie total (0.7 km<sup>2</sup>).

## g.4 Pastizal Inducido

Esta comunidad está representada por especies de gramíneas de talla baja. Dada su reproducción por estolones, las gramíneas desarrollan extensas y densas coberturas, en las que sobresalen individuos dispersos de arbustos propios de los matorrales xerófilos (Rzedowski, 1975). Dentro de la cuenca se distribuyen entre 2250 y 3300 m de altitud, con afinidad por pendientes moderadas de lomeríos y sierras, abarcan una extensión de 56.6 km<sup>2</sup> (8.1% de la superficie de la cuenca). Destaca un extenso fragmento ubicado en el piedemonte de la sierra de Tepetzotlán. Sin embargo, se trata de comunidades de origen antrópico, las cuales en las últimas décadas han mostrado un ligero incremento (18.2% de la superficie total) que se relaciona con el auge del pastoreo y el abandono de antiguas tierras de cultivo. En muchos casos, dichos pastizales están evolucionando hacia matorrales con géneros de tipo xerófilo, como *Opuntia*.

#### h. Cultivo

Dentro de esta categoría se han diferenciado dos grupos de cultivos en función del manejo: a) los cultivos de temporal se destinan a la producción estacional de cereales como maíz y otros productos tradicionales, principalmente en las cimas y laderas del sistema de lomeríos del piedemonte y en menor grado en las laderas de montaña de las sierras, y b) los cultivos de riego destinados a productos de abastecimiento diario como chiles, jitomate, cebolla, etc. Se concentran en las planicies aluviales, caracterizadas por condiciones topográficas, hidrológicas y edáficas favorables; allí, se les ubica en pequeñas huertas localizadas en las proximidades de los pueblos, cuerpos de agua y a lo largo del cauce de arroyos y ríos. Cabe destacar que la superficie agrícola de la cuenca (244.8 km<sup>2</sup> y 35.4% del total) se extiende mayoritariamente en terrenos otrora ocupados por formaciones forestales de encinos y pinos, las cuales han cedido su espacio a un paisaje cultural muy importante desde el punto de vista de la producción de alimentos y el comercio.

#### i. Erosión

Refiere a las áreas de vocación forestal que han sido afectadas por procesos de deforestación y en algunos casos por la expansión del pastoreo y la agricultura, con consecuencias sobre la pérdida de la estabilidad de las laderas y el desarrollo de procesos de erosión de suelo y/o roca. Se distribuyen en pequeños fragmentos que en conjunto abarcan una superficie poco representativa (8.61 km<sup>2</sup> y 1.2% del total de la cuenca), la mayoría concentrados en el piedemonte de la sierra de Tepotzotlán y por lo regular, en laderas de baja pendiente y próximos a asentamientos humanos y construcciones aisladas.

#### j. Canteras

En el área de estudio se tiene registro de un pequeño polígono (0.12 km<sup>2</sup> y 0.02% del total) destinado a la extracción de material lítico de construcción. No obstante la práctica ausencia de suelo en la cantera, se ha identificado en ella un proceso de colonización vegetal a partir de diversas especies arbustivas, las cuales forman una cobertura vegetal baja y discontinua, aunque de gran significado desde el punto de vista de la regeneración de espacios que han sido intensamente perturbados.

#### k. Asentamiento humano y suelo desnudo

Los asentamientos humanos han sido reconocidos por el alto impacto ambiental y ecológico que provocan, por ejemplo, debido a su función como barreras potenciales al movimiento de especies. Destacan por su importancia la cabecera municipal de Villa del Carbón ubicada sobre una ladera tendida del sector central de la sierra de Monte Alto y Monte Bajo, y Tepeji del Río ubicado sobre una extensa llanura aluvial al pie de la sierra. Además, existen otros escasos y pequeños asentamientos que junto a los anteriores suman una superficie de 8.5 km<sup>2</sup> (1.23% del área). Ellos se localizan en las planicies aluviales y laderas tendidas dentro del piedemonte de Monte Alto y Monte Bajo.

Los suelos desnudos son áreas cuya cubierta vegetal original –por lo general de bosques- ha sido removida, por lo que la capa de suelo o roca ha quedado expuesta y más sensible a procesos de erosión. En algunos casos presentan un desarrollo discontinuo de vegetación secundaria, principalmente de especies arbustivas y herbáceas. A pesar de la poca superficie que cubren en relación al área total de estudio (0.3%, 2.13 km<sup>2</sup>). Los encontramos en el piedemonte de la sierra de Tepotzotlán y por lo general entorno a áreas de agostadero que han sido recientemente abandonadas por pérdida de productividad.

## 3.2 Bosque de Pino-Encino: Características y Distribución

### 3.2.1 Caracterización de la estructura espacial

En el área en estudio se identificaron 334 fragmentos del bosque de pino-encino, lo cuales fueron clasificados en tres grupos de distinto tamaño (Tabla 3.2). Los de mayor tamaño corresponde a cuatro fragmentos, con superficies que van de 4.25 a 6.55 km<sup>2</sup> (Clase 1). Seguidos de 14 fragmentos de tamaño medio (Clase 2) con superficies que van de 1.45 a 3.71 km<sup>2</sup> y, finalmente, 316 fragmentos con superficies inferiores a 1.05 km<sup>2</sup> (Clase 3), distribuidos por lo general próximos a los fragmentos de tamaño medio, que en cantidad son los más representativos.

Existe una diferencia fundamental entre los fragmentos grandes, que albergan en su interior comunidades menos perturbadas, y los fragmentos de bosque de tamaño medio y pequeño, que son relictos del proceso de fragmentación que tuvo lugar en la década de los 60's con la expansión de los usos agrícola y pecuario, que albergan en su interior comunidades más perturbadas.

TABLA 3.2 ESTRUCTURA DE LAS CLASES DE FRAGMENTOS DE PINO-ENCINO

Clases	Fragmentos (#)	Área (km <sup>2</sup> )	Índice de Forma	Distancia (m)
1	4	5.5 ± 0.95	7.53 ± 2.72	1742.84 ± 2029.47
2	14	2.39 ± 0.79	6.63 ± 1.86	336.52 ± 1058.88
3	316	0.1 ± 0.18	2.91 ± 1.11	53.05 ± 154.49

Respecto a la índice de forma, los resultados muestran que los fragmentos pequeños (Clase 3) presentan formas más o menos simples, con índices de forma entre 1.12 y 7.6, en tanto que los fragmentos de tamaño medio (Clase 2) tienen un índice de forma del orden de 3.31 a 8.86, y los fragmentos grandes (Clase 1) presentan las formas más complejas, al mostrar índices de forma entre 4.83 y 10.66.

El análisis de la distancia que separa a los fragmentos forestales de su vecino de mayor tamaño y más cercano, revela un alto grado de fragmentación forestal que, sin embargo, es relativamente bajo entre los fragmentos medianos y pequeños (53 m en promedio), lo que sugiere un cierto grado de asociación física entre ellos. En cambio, la distancia que separa a los fragmentos medianos y grandes es en promedio elevada (300 m).

### 3.4 Descripción florística-estructural

#### a. Composición florística

El levantamiento de datos de la vegetación en campo generó un registro 1397 individuos, 703 del estrato arbóreo y 694 del estrato arbustivo. Estos individuos representan un total de 40 especies distribuidas en 25 géneros y 19 familias (Tabla 3.3).

Los individuos del estrato arbustivo se distribuyeron en 13 familias y 16 géneros, abarcando el 49.7% del total de individuos registrados, siendo Asteraceae y Compositae las familias más dominantes al representar en conjunto más 35% del total de individuos (Tabla 3.3). *Eupatorium* fue el género que mayor número de individuos agrupó con un 23% del total, seguido de Baccharis con poco más del 8% del total (Tabla 3.4).

Los individuos del estrato arbóreo se distribuyeron en siete familias y nueve géneros, con el 50.3% de los individuos registrados, siendo Pinaceae y Rosaceae las familias mejor representadas al ocupar poco más del 44% de los individuos (Tabla 3.4). Después de Fagaceae, con *Quercus* como el género más abundante (31.57% del total de individuos), las familias más representativas fueron Pinaceae con *Pinus* como el género más abundante (7.44% el total de individuos) y Rosaceae con *Prunus* como el género emergente más abundante (4.58% del total de individuos).

TABLA 3.3 NÚMERO Y PROPORCIÓN DE GÉNEROS, ESPECIES E INDIVIDUOS POR FAMILIAS

	Familias	Género		Especies		Individuos	
		#	%	#	%	#	%
Estrato arbustivo	Agavaceae	1	4	1	2.5	3	0.21
	Asteraceae	2	8	4	10	373	26.70
	Cactaceae	1	4	1	2.5	14	1.00
	Caprifoliaceae	1	4	1	2.5	2	0.14
	Compositae	1	4	2	5	123	8.80
	Ericaceae	3	12	3	7.5	105	7.52
	Garryaceae	1	4	1	2.5	12	0.86
	Loganiaceae	1	4	2	5	47	3.36
	Onagraceae	1	4	1	2.5	5	0.36
	Polygalaceae	1	4	1	2.5	25	1.79
	Rubiaceae	1	4	1	2.5	1	0.07
	Senecio	1	4	1	2.5	2	0.14
	Solanaceae	2	8	4	10	28	2.00
Estrato arbóreo	Betulaceae	1	4	1	2.5	20	1.43
	Cupressaceae	1	4	1	2.5	19	1.36
	Fagaceae	1	4	6	15	441	31.57
	Oleaceae	1	4	1	2.5	1	0.07
	Pinaceae	2	8	6	15	108	7.73
	Rosaceae	2	8	2	5	68	4.87

TABLA 3.4 NÚMERO Y PROPORCIÓN DE ESPECIES E INDIVIDUOS POR GÉNERO

	Género	Especies		Individuos	
		#	%	#	%
Estrato arbustivo	Agave	1	2.56	3	0.21
	Baccharis	2	5.13	123	8.80
	Bouvardia	1	2.56	1	0.07
	Buddleia	2	5.13	47	3.36
	Cestrum	2	5.13	20	1.43
	Comarostaphylis	1	2.56	20	1.43
	Eupatorium	2	5.13	331	23.69
	Fuchsia	1	2.56	5	0.36
	Garrya	1	2.56	12	0.86
	Gaultheria	1	2.56	39	2.79
	Monnina	1	2.56	25	1.79
	Opuntia	1	2.56	14	1.00
	Senecio	2	5.13	44	3.15
	Solanum	2	5.13	8	0.57
Symphoricarpus	1	2.56	2	0.14	
Estrato arbóreo	Abies	1	2.56	4	0.29
	Alnus	1	2.56	20	1.43
	Arbutus	1	2.56	46	3.29
	Crataegus	1	2.56	4	0.29
	Cupressus	1	2.56	19	1.36
	Fraxinus	1	2.56	1	0.07
	Pinus	5	12.82	104	7.44
	Prunus	1	2.56	64	4.58
	Quercus	6	15.38	441	31.57

b. Abundancia y riqueza florística

En la Tabla 3.5 se muestra el comportamiento de la abundancia y riqueza de los tipos fisonómicos tomados de los registros de campo. El grupo fisonómico de Arbustos fue el que presentó la mayor abundancia, con 694 individuos que representan el 50% de la abundancia total. De entre las 21 especies de arbustos registradas, las que obtuvieron los mayores porcentajes respecto del total de individuos fueron *Eupatorium glabratum* (21%), *Baccharis conferta* (4%), *B. heterophylla* (4%), *Gaultheria acuminata* (3%) y *Buddleia cordata* (3%) (Tabla 3.6).

El siguiente grupo fisionómico mejor representado fue el de Otros árboles con un total de 599 individuos, que representan el 43% de la abundancia total. De entre las 13 especies registradas, *Quercus obtusata* (18%), *Q. crassifolia* (5%), *Q. rugosa* (3%), *Q. crassipes* (3%), *Prunus serotina* (5%) y *Arbutus xalapensis* (3%) fueron las especies mejor representadas (Tabla 3.6). El grupo fisionómico Pinos obtuvo 104 individuos que representan el 7% de la abundancia total (Tabla 3.5). De entre cinco especies registradas, *Pinus teocote* fue la más representativa, con el 3% de la abundancia total (Tabla 3.6).

TABLA 3.5 NÚMERO TOTAL DE FAMILIAS, GÉNEROS Y ESPECIES DE LOS GRUPOS FISIONÓMICOS

	Familia		Género		Especie		Individuos	
	#	%	#	%	#	%	#	%
<b>Arbustos</b>	13	62	15	63	21	54	694	50
<b>Otros Árboles</b>	7	33	8	33	13	33	599	43
<b>Pinos</b>	1	5	1	4	5	13	104	7

En cuanto al análisis de la dominancia entre grupos fisionómicos, los resultados fueron favorables al grupo Otros árboles, el cual mantiene una relación 6 a 1 contra los pinos, principalmente debido al aporte de los géneros *Quercus*, *Prunus* y *Arbutus*. Por su parte, el estrato arbóreo en su conjunto presenta una relación equitativa (1:1) con respecto al estrato arbustivo (“Arbustos”), es decir, que la mayoría de los fragmentos forestales presentan seis individuos arbóreos distintos al Pino (*Pinus*) por cada uno de éste, mientras que por cada individuo del estrato arbóreo se encuentra un individuo del estrato arbustivo, relación que sugiere un alto grado de disturbio de la comunidad de pino-encino.

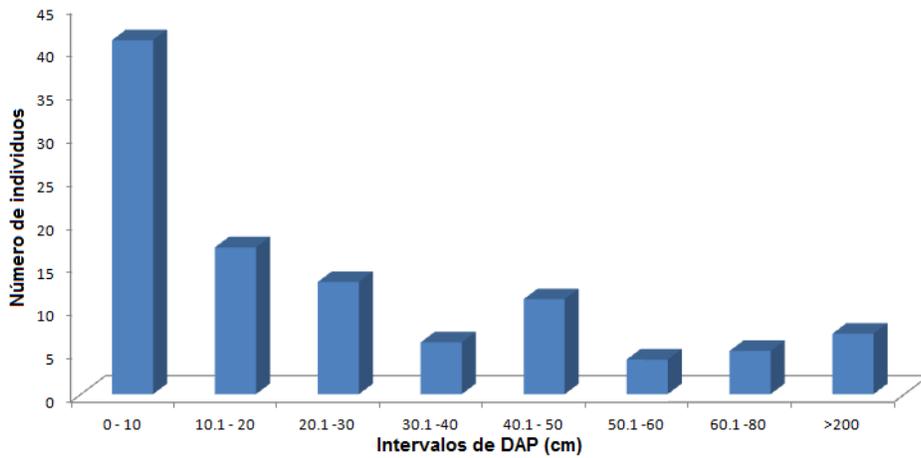
TABLA 3.6 NÚMERO Y PROPORCIÓN DE INDIVIDUOS POR ESPECIES

Grupo fisonómico	Especie	Individuos	
		#	%
Arbustos	<i>Agave salmiana</i>	3	0.2
	<i>Baccharis conferta</i>	62	4.4
	<i>Baccharis heterophylla</i>	61	4.4
	<i>Bouvardia ternifolia</i>	1	0.1
	<i>Buddleia cordata</i>	40	2.7
	<i>Buddleia parviflora</i>	7	0.5
	<i>Cestrum nitidum</i>	8	0.6
	<i>Cestrum thyrsoides</i>	12	0.9
	<i>Comarostaphylis discolor</i>	20	1.4
	<i>Eupatorium glabratum</i>	295	21.1
	<i>Eupatorium sp.</i>	36	2.6
	<i>Fuchsia thymifolia</i>	5	0.3
	<i>Garrya laurifolia</i>	12	0.9
	<i>Gaultheria acuminata</i>	39	2.8
	<i>Monnina ciliolata</i>	25	1.8
	<i>Opuntia ficus-indica</i>	14	1.0
	<i>Senecio salignus</i>	34	2.4
	<i>Senescio sinuatus</i>	10	0.7
	<i>Solanum cervantesii</i>	5	0.4
<i>Solanum sp.</i>	3	0.2	
	<i>Symphoricarpus microphyllus</i>	2	0.1
Otros Árboles	<i>Abies religiosa</i>	4	0.3
	<i>Alnus acuminata</i>	20	1.4
	<i>Arbutus xalapensis</i>	46	3.3
	<i>Crataegus mexicana</i>	4	0.3
	<i>Cupressus lindleyi</i>	19	1.4
	<i>Fraxinus uhdei</i>	1	0.1
	<i>Prunus serotina</i>	64	4.6
	<i>Quercus crassifolia</i>	74	5.3
	<i>Quercus crassipes</i>	42	3.0
	<i>Quercus laeta</i>	18	1.3
	<i>Quercus laurina</i>	16	1.2
	<i>Quercus obtusata</i>	244	17.5
	<i>Quercus rugosa</i>	47	3.4
Pinos	<i>Pinus leiophylla</i>	17	1.2
	<i>Pinus montezumae</i>	19	1.4
	<i>Pinus patula</i>	30	2.2
	<i>Pinus pseudostrobus</i>	1	0.07
	<i>Pinus teocote</i>	37	2.7

c. Distribución diamétrica

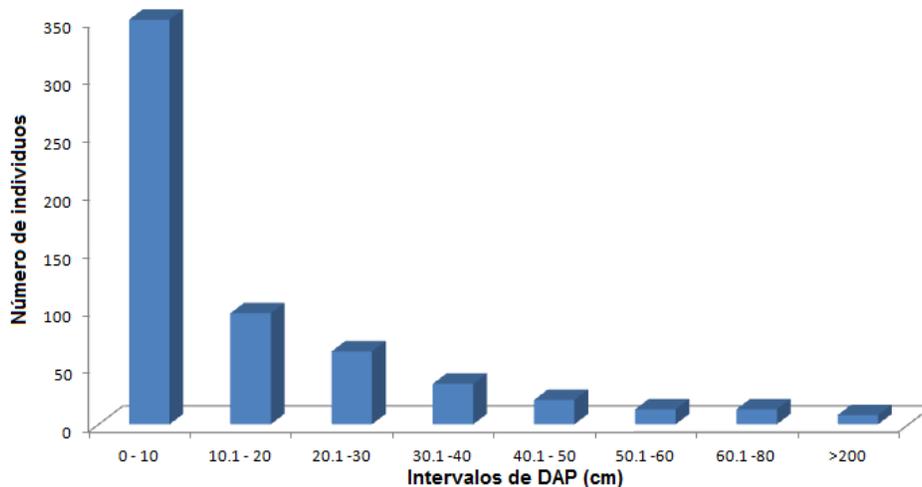
Para representar el comportamiento de la distribución diamétrica, se agruparon los registros en ocho rangos. El grupo fisionómico Pinos presentó el mayor número de individuos (71 individuos) con diámetros a la altura del pecho menores a 30 cm, en comparación con los 12 individuos con diámetros entre los 80 cm a más de 2 m (Grafica 3.1).

GRAFICA 3.1 DISTRIBUCIÓN DIAMÉTRICA DEL GRUPO FISIONÓMICO PINOS, POR INDIVIDUOS



Para el caso del grupo fisionómico Otros Árboles se registraron un total de 509 individuos con diámetros menor a 30cm, encontrando una disminución en el registro de diámetros de 80 cm a más de 2 m (21 individuos) (Grafica 3.2).

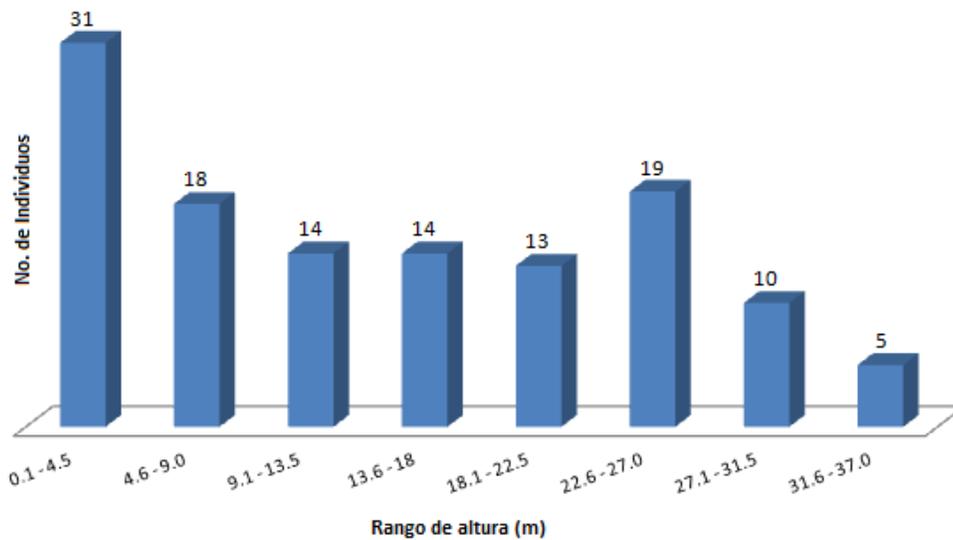
GRAFICA 3.2 DISTRIBUCIÓN DIAMÉTRICA DEL GRUPO FISIONÓMICO OTROS ÁRBOLES, POR INDIVIDUOS



d. Distribución de alturas

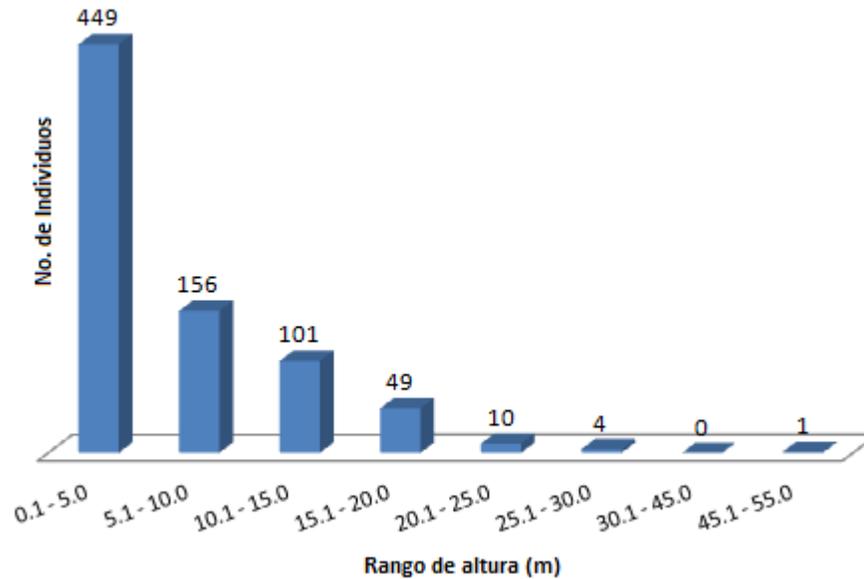
Para la caracterización de la altura de los grupos fisonómicos evaluados, se agruparon los registros en ocho rangos. En la Grafica 3.3 se muestra que la categoría fisonómica de Pinos concentra el mayor número de individuos con alturas menores a 4.5m de altura (31 individuos), lo que corresponde a un estrato juvenil. Sin embargo, presenta también un importante número de individuos con alturas entre 4.6 a 9.0m y 22.6 a 27.0m, lo que sugiere una condición de recuperación o madurez para estos bosques.

GRAFICA 3.3 DISTRIBUCIÓN DE ALTURAS (M) DE LA CATEGORÍA PINOS, POR INDIVIDUOS



En la Gráfica 3.4 se muestra que la categoría fisionómica Otros Arboles está compuesta de individuos mayoritariamente bajos (< 5m de altura), lo que de igual manera que los pinares corresponde a un estrato juvenil en posible estado de recuperación.

GRAFICA 3.4. DISTRIBUCIÓN DE ALTURAS DE LA CATEGORÍA “OTROS ARBOLES”.



### 3.3 Efecto de borde en el Bosque de Pino-Encino

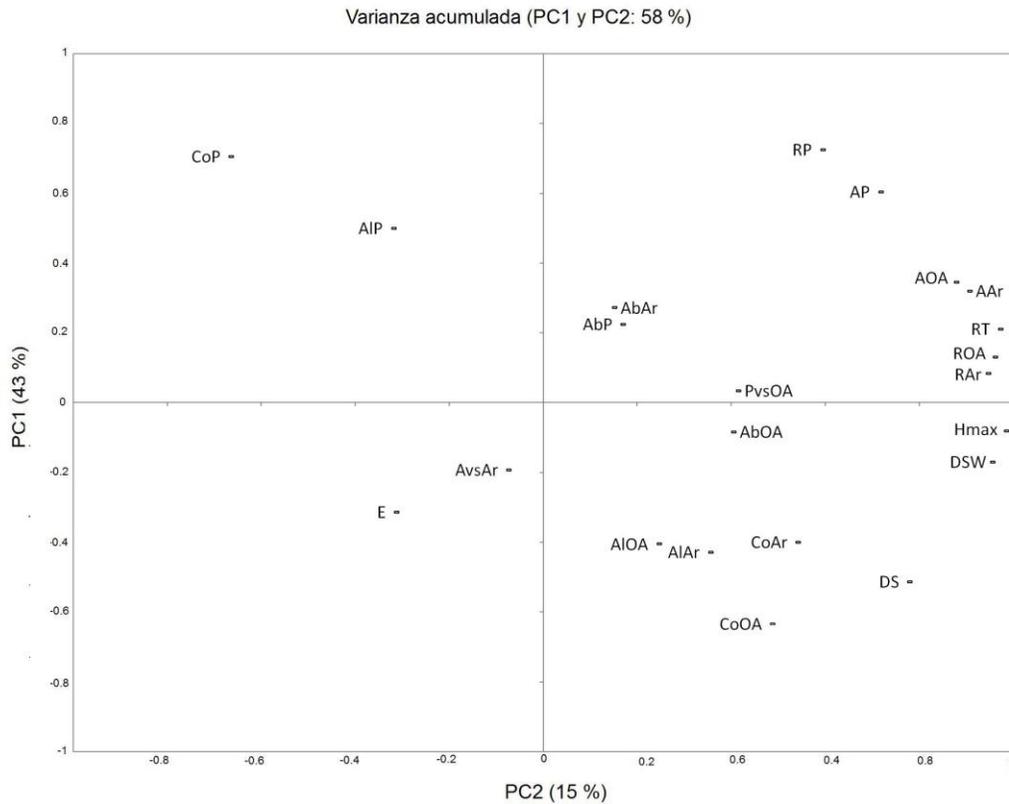
#### 3.3.1 Variables de respuesta de la vegetación al efecto borde

El resultado del Análisis de Componentes Principales (ACP) para el total de las variables en el espacio conformado por las dos primeras componentes se muestra en la gráfica 3.5. La primera componente explica un 43% de la varianza en tanto que la componente 2 explica un 15%; la varianza explicada por las dos primeras componentes fue de un 58% (Tabla 3.7). Las variables que otorgan una mayor contribución a la primera componente son la abundancia de otros árboles (AOA), abundancia de arbustos (AAR), riqueza de otros árboles (ROA), riqueza de arbustos (RAR), riqueza total (RT), diversidad de Shannon-Wiener (DSW) y diversidad máxima (H'max).

TABLA 3.7 TOTAL DE VARIANZA EXPLICADA POR COMPONENTES

Componente	Eigenvalores		
	Total	% de Varianza	% Acumulada
1	9.391	43	43
2	3.407	15	58
3	2.949	13	72
4	1.724	8	79
5	1.101	5	84

GRAFICA 3.5 REPRESENTACIÓN DEL ESPACIO GENERADO POR LAS DOS PRIMERAS COMPONENTES



El análisis de Componentes Principales permitió determinar que las variables mejor representadas en la primera componente, relacionadas con la *composición* de la vegetación, son las que mejor reflejan diferencias estadísticas; por lo que, fueron empleadas para la determinación de los bordes hacia el interior de los fragmentos.

### 3.3.2 Identificación y amplitud espacial de los Hábitats de borde

El dendrograma de la gráfica 3.6 muestra las etapas del proceso de aglomeración, así como las distancias existentes entre los elementos aglomerados. Las distancias están representadas a una escala estandarizada de 25 puntos.

Como se puede observar, los primeros cinco bloques de distancia se diferencian perfectamente del resto, puesto que se unen sólo en la etapa final y a una distancia muy superior al resto de las distancias de aglomeración. Por el contrario, los bloques del 11 al 25 se funden en un primer conglomerado en la primera etapa, a una distancia de 2 puntos. Mientras que los bloques del 6 al 10 se funden con el conglomerado anterior a una distancia de 7 puntos.

Por lo anterior, el dendrograma refleja con suficiente precisión el agrupamiento de los bloques de distancia en función de las variables obtenidas por ACP, dio como resultado la formación de tres grupos.

El primer grupo quedó establecido por cinco bloques de distancia que en conjunto definen el borde exterior de los fragmentos forestales, que va de 0 a 50 m a partir del borde. El segundo grupo incluye cinco bloques que en conjunto definen el borde interior de los fragmentos, que va de 50 a 100 metros. El tercero incluye 19 bloques que en conjunto definen el núcleo de los fragmentos, de 100 metros en adelante.

La Tabla 3.8 muestra que los valores estadísticos F tienen asociados niveles críticos muy pequeños de significancia ( $P \leq 0.05$ ), lo cual demuestra que las variables seleccionadas tienen coherencia al agrupar bloques de distancia que poseen similitud estadística en términos de sus características de *Composición*.

GRÁFICA 3.6 DENDROGRAMA DE LOS GRUPOS FORMADOS POR EL ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS

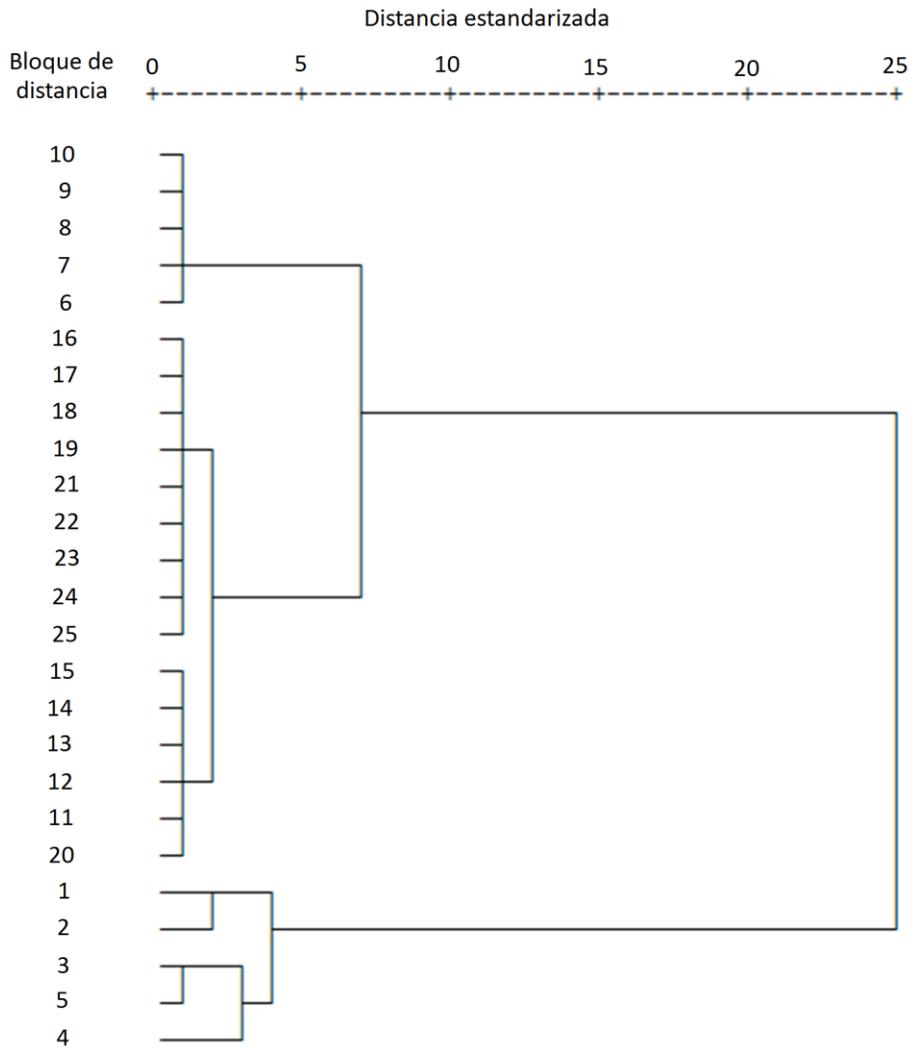


TABLA 3.8 TABLA DE RESUMEN DEL ANOVA

	Suma de Cuadrados	gl.	Media cuadrática	F	<i>p</i>
<b>ROA</b>	281	2	140.48	47.99	0.000
<b>RAr</b>	295.1	2	147.53	26.4	0.000
<b>RT</b>	1487	2	743.52	68.38	0.000
<b>DSW</b>	0.7	2	0.35	8.78	0.001
<b>Hmax</b>	1.4	2	0.69	17.49	0.000
<b>AOA</b>	17053.3	2	8526.65	165.69	0.000
<b>AAr</b>	14702.7	2	7351.33	86.33	0.000

Para conocer las variables de la vegetación que mejor definen a los bordes y el núcleo de los fragmentos forestales se aplicó una prueba de Tukey (Tabla 3.10). Los resultados muestran que las variables ROA, RT, AOA, AAr presentan diferencias claras en todos los casos, en tanto que las variables Hmax presentan diferencias claras sólo el núcleo, la variable RAr sólo en el borde exterior y la variable DSW en el borde exterior y área núcleo.

TABLA 3.9 TABLA DEL RESUMEN DE TUKEY

Bordes	Variables							
	N	ROA	RAr	RT	DSW	DM	AOA	AAr
<b>100 a 250</b>	15	*	ND	*	*	*	*	*
<b>50 a 100</b>	5	*	ND	*	NF	ND	*	*
<b>0 a 50</b>	5	*	*	*	*	ND	*	*

De esta forma, las técnicas estadísticas aplicadas al conjunto de las especies registradas en los 29 transectos muestreados, tanto en el estrato arbóreo como en el arbustivo, permitió establecer que las especies se distribuyen en tres franjas que hacia el interior del fragmento quedaron definidas como borde exterior (0 a 50 m), borde interior (50 a 100 m) y núcleo (>100 m) (Figura 3.2).

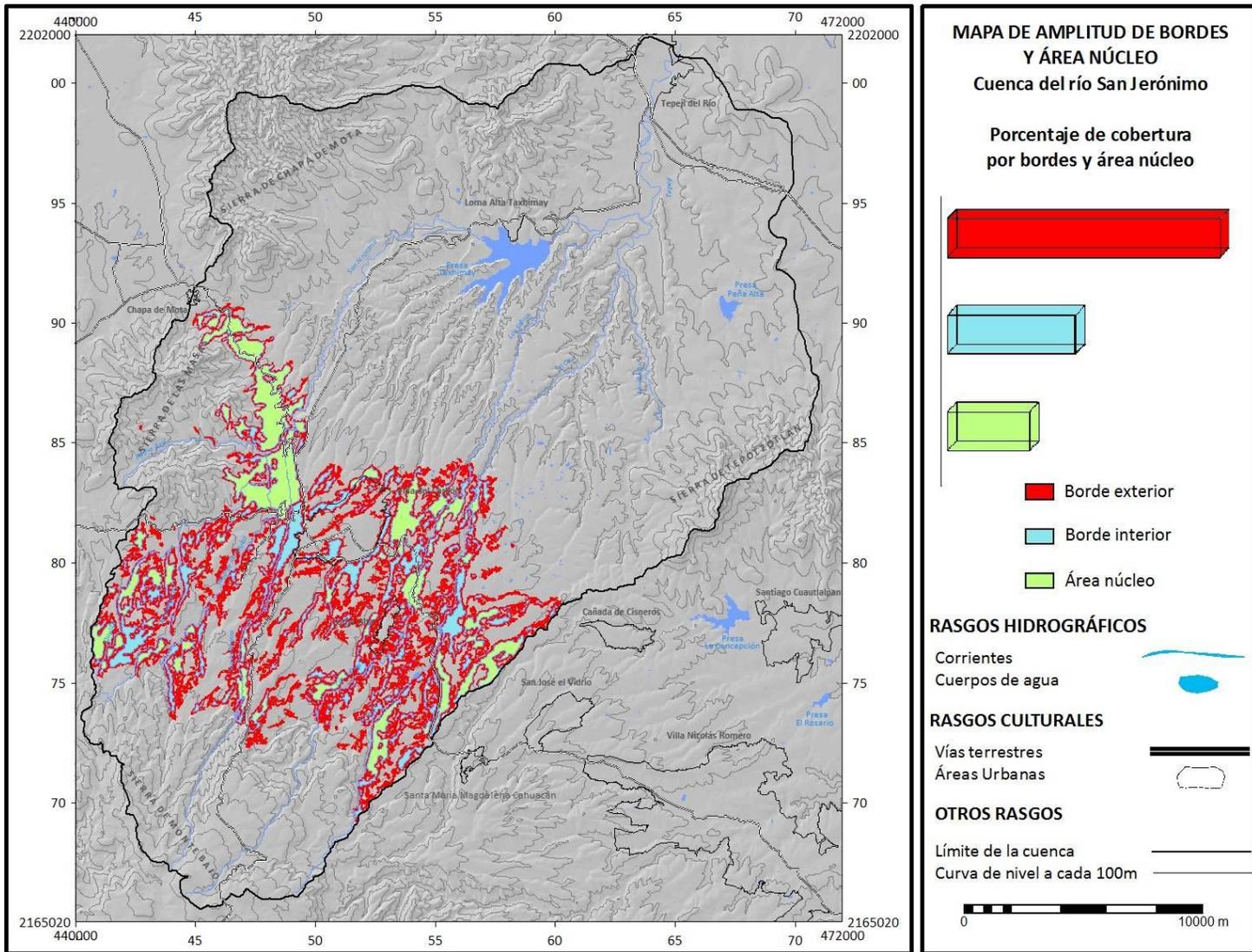


FIGURA 3.2 MAPA DE LOCALIZACIÓN Y AMPLITUD DE HÁBITATS DE BORDE EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

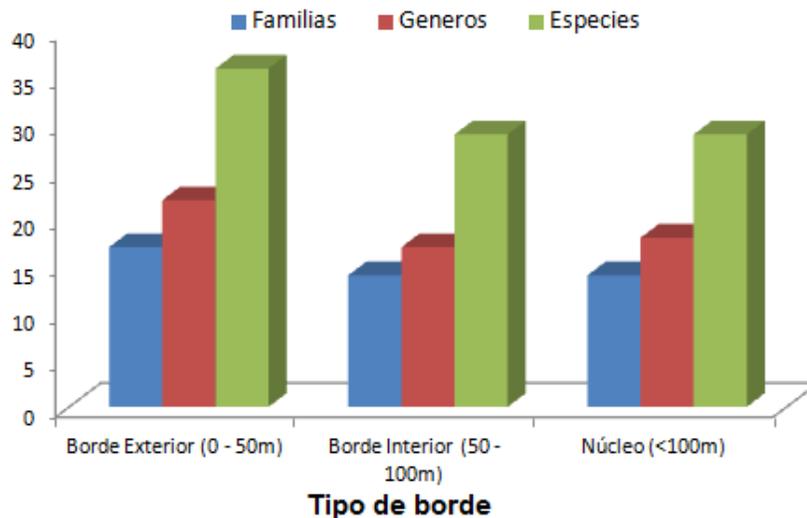
### 3.3.3 Características del bosque en los distintos hábitats de bordes y área núcleo

#### a. Abundancia y riqueza florística

##### Borde exterior (0 – 50 m)

En lo que respecta a la riqueza y abundancia florística, el borde exterior es el más diverso al registrar 16 familias, 22 géneros y 36 especies (Grafica 3.6), de las cuales 17 especies corresponden al estrato arbóreo: *Abies religiosa*, *Alnus firmifolia*, *Arbutus xalapensis*, *Crataegus mexicana*, *Cupressus lindleyi*, *Fraxinus uhdeis*, *Pinus leiophylla*, *P. montezumae*, *P. patula*, *P. teocote*, *Prunus serotina*, *Quercus crassifolia*, *Q. crassipes*, *Q. laeta*, *Q. laurina*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa*.

GRAFICA 3.7 NÚMERO DE FAMILIAS, GÉNEROS Y ESPECIES POR BORDE



Para el estrato arbustivo las 19 especies registradas fueron *Agave salmiana*, *Baccharis conferta*, *B. heterophylla*, *Bouvardia ternifolia*, *Buddleia cordata*, *B. parviflora*, *Cestrum nitidum*, *C. Thyrsoides*, *Comarostaphylis discolor*, *Eupatorium glabratum*, *E. sp.*, *Fuchsia thymifolia*, *Garrya laurifolia*, *Gaultheria acuminata*, *Opuntia ficus-indica*, *Senecio sp.*, *S. salignus*, *S. sinuatus* y *Solanum cervantesii*.

Los levantamientos realizados a este borde presentaron un importante número de individuos del grupo fisonómico Arbustos (379 individuos) (Tabla 3.11). Las familias más importantes por número de individuos fueron Asteraceae y Compositae. La densidad de individuos de la familia *Asteraceae* (202 individuos) encontrada en estos bordes, constituye un elemento importante en el porcentaje total de abundancia para este grupo.

TABLA 3.10 NÚMERO DE INDIVIDUOS POR GRUPOS FISONÓMICOS Y FAMILIAS POR BORDE

	<b>Borde Exterior (0 - 50m)</b>	<b>Borde Interior (50 - 100m)</b>	<b>Núcleo (&gt;100m)</b>
<b>Grupo Fisonómico</b>			
<b>Arbustos</b>	379	170	145
<b>Otros arboles</b>	300	171	128
<b>Pinos</b>	50	36	18
<b>Total general</b>	729	377	291
<b>Familias</b>			
<b>Agavaceae</b>	3		
<b>Asteraceae</b>	202	103	70
<b>Cactaceae</b>	13	1	
<b>Caprifoliaceae</b>			2
<b>Compositae</b>	81	23	19
<b>Ericaceae</b>	21	11	27
<b>Garryaceae</b>	2	6	4
<b>Loganiaceae</b>	29	8	10
<b>Polygalaceae</b>		15	10
<b>Onagraceae</b>	5		
<b>Rubiaceae</b>	1		
<b>Solanaceae</b>	22	3	3
<b>Betulaceae</b>	9	8	3
<b>Cupressaceae</b>	10	8	1
<b>Ericaceae</b>	23	14	9
<b>Fagaceae</b>	207	125	109
<b>Oleaceae</b>	1		
<b>Pinaceae</b>	52	36	20
<b>Rosaceae</b>	48	125	4

### **Borde Interior (50 – 100 m)**

Se encontraron en total 14 familias, 17 géneros y 29 especies (Grafica 12). De estas especies 15 se registraron en el estrato arbóreo: *Alnus firmifolia*, *Arbutus xalapensis*, *Cupressus lindleyi*, *Pinus leiophylla*, *P. montezumae*, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *Prunus serótina*, *Quercus crassifolia*, *Q. crassipes*, *Q. laeta*, *Q. laurina*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa*. Para el estrato arbustivo se tienen 14 especies: *Baccharis conferta*, *B. heterophylla*, *Buddleia cordata*, *Cestrum nitidum*, *Comarostaphylis*, *Eupatorium glabratum*, *E. sp.*, *Garrya laurifolia*, *Gaultheria acuminata*, *Monnina ciliolata*, *Opuntia ficus-indica*, *Senecio sinutus*, *S. salignus* y *Solanum cervantesii*.

Por los levantamientos registrados, el borde interior está caracterizado por la dominancia del grupo fisonómico Otros Árboles (171 individuos) (Tabla 3.11), principalmente de las familias *Fagaceae* y *Pinaceae*; también son comunes los individuos juveniles de las especies arbóreas mencionadas.

### **Núcleo (>100 m)**

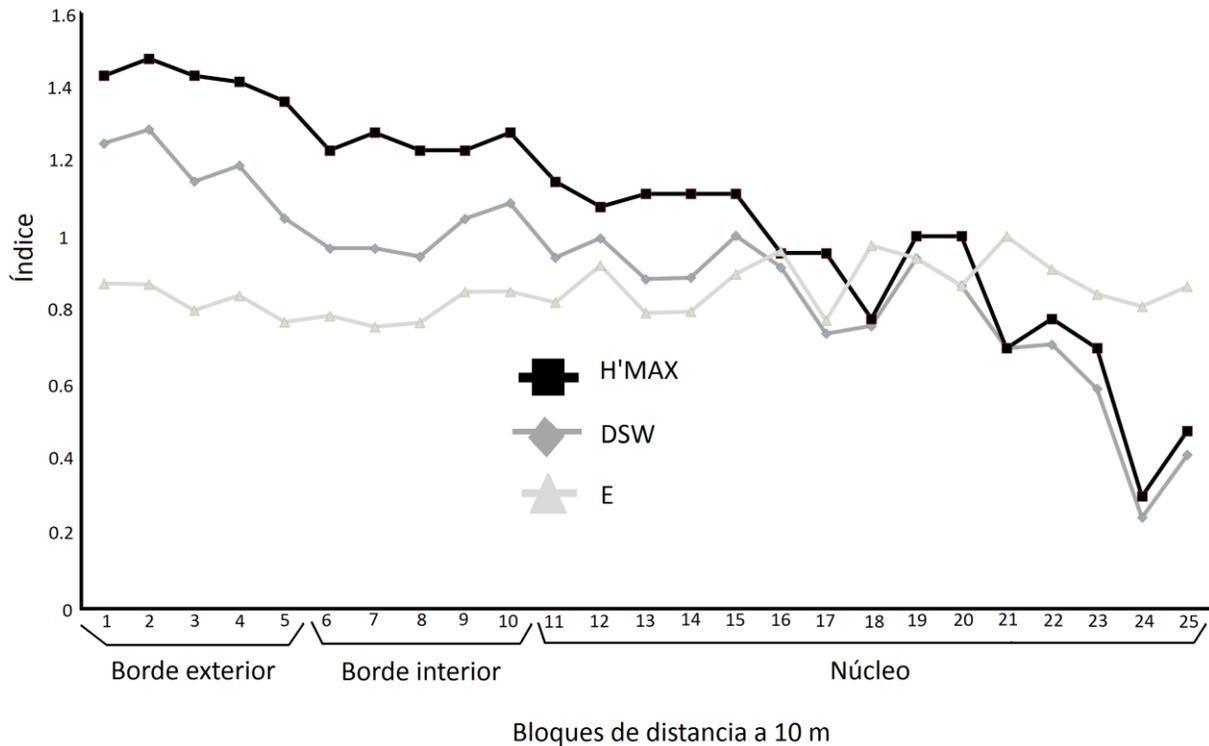
Se encontraron en total 14 familias, 18 géneros y 29 especies. De estas especies 15 se registraron en el estrato arbóreo: *Abies religiosa*, *Alnus firmifolia*, *Arbutus xalapensis*, *Crataegus mexicana*, *Cupressus lindleyi*, *Pinus leiophylla*, *P. montezumae*, *P. teocote*, *Prunus serotina*, *Quercus crassifolia*, *Q. crassipes*, *Q. laeta*, *Q. laurina*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa*. Para el estrato arbustivo las 14 especies registradas fueron *Baccharis conferta*, *B. heterophylla*, *Buddleia cordata*, *Comarostaphylis discolor*, *Eupatorium glabratum* *E. sp.*, *Garrya laurifolia*, *Gaultheria acuminata*, *Monnina ciliolata*, *Senecio salignus*, *S. sinuatus*, *Solanum cervantesii*, *Solanum sp.* y *Symphoricarpus microphyllus*.

Por los levantamientos registrados, el núcleo está caracterizado por la dominancia del grupo fisonómico Arbustos (145 individuos) (Tabla 3.11), principalmente de las familias *Asteraceae* y *Ericaceae*.

b. Diversidad de los bordes

Los resultados muestran no solo un efecto en la relación matriz/parche en la diversidad de especies sino también un efecto de la relación borde/interior, siendo que la diversidad tiende a decaer conforme avanza la distancia hacia el interior del fragmento. Como se puede observar en la gráfica 3.7 los mayor valores de diversidad de Shannon-Wiener los encontramos en los primeros 50 m (borde exterior), mientras que los valores más bajos los ubicamos distancias de 100 a 250 m (área núcleo). Esto corresponde con los valores de equidad, donde se observa que a los primeros 100 m esta no varía significativamente; sin embargo, esta tiende a aumentar colocándose por encima de la diversidad a distancias mayores. Estos resultados demuestran que las comunidades forestales al interior del fragmento (área núcleo) tienden a disminuir en el número de especies, pero, las especies presentes están casi representadas con la misma abundancia.

GRAFICA 3.8 ÍNDICES DE DIVERSIDAD Y EQUITATIVIDAD POR BLOQUES DE DISTANCIA



## CAPÍTULO IV. HÁBITATS DE BORDE Y FACTORES DE DISTRIBUCIÓN

En los capítulos anteriores se dio a conocer el territorio desde un contexto integral de la cuenca del río San Jerónimo, orientado a la caracterización del grado de perturbación que afecta los remanentes forestales

### 4.1 Efecto de borde en el Bosque de Pino-Encino

En la cuenca del río San Jerónimo los procesos de fragmentación forestal han sido intensos, sin embargo, ha sido posible identificar la existencia de 41 fragmentos de bosque poco perturbado. La mayor parte de ellos se distribuye en el sector sureste del área en estudio, coincidiendo con la zona de contacto entre el piedemonte y el complejo volcánico de la sierra de Monte Alto y Monte Bajo (Figura 4.1). El fragmento más grande cubre una superficie de 6.6 km<sup>2</sup>, sin embargo, el conjunto de los fragmentos abarca una superficie que equivale a tan sólo el 10% del área total de la cuenca (Tabla 4.1).

TABLA 4.1 CARACTERÍSTICAS ESPACIALES DE LOS FRAGMENTOS DEL BOSQUE EN DISTINTOS GRADOS DE PERTURBACIÓN

Grado de perturbación	Fragmentos	Tamaño en km <sup>2</sup>			Superficie	
		Medio	Mínimo	Máximo	(km <sup>2</sup> )	(%)
<b>Muy perturbado</b>	228	0.027	0.004	0.158	6.21	7
<b>Moderadamente perturbado</b>	64	0.172	0.036	0.833	10.98	13
<b>Poco perturbado</b>	41	1.612	0.020	6.556	66.11	79

En cambio, el bosque muy perturbado se distribuye en una gran cantidad de fragmentos (228 fragmentos), pero de tamaños muy pequeños (en promedio 0.027 km<sup>2</sup>) por lo que en conjunto representa una superficie equivalente a tan sólo el 7% del área total de la cuenca.

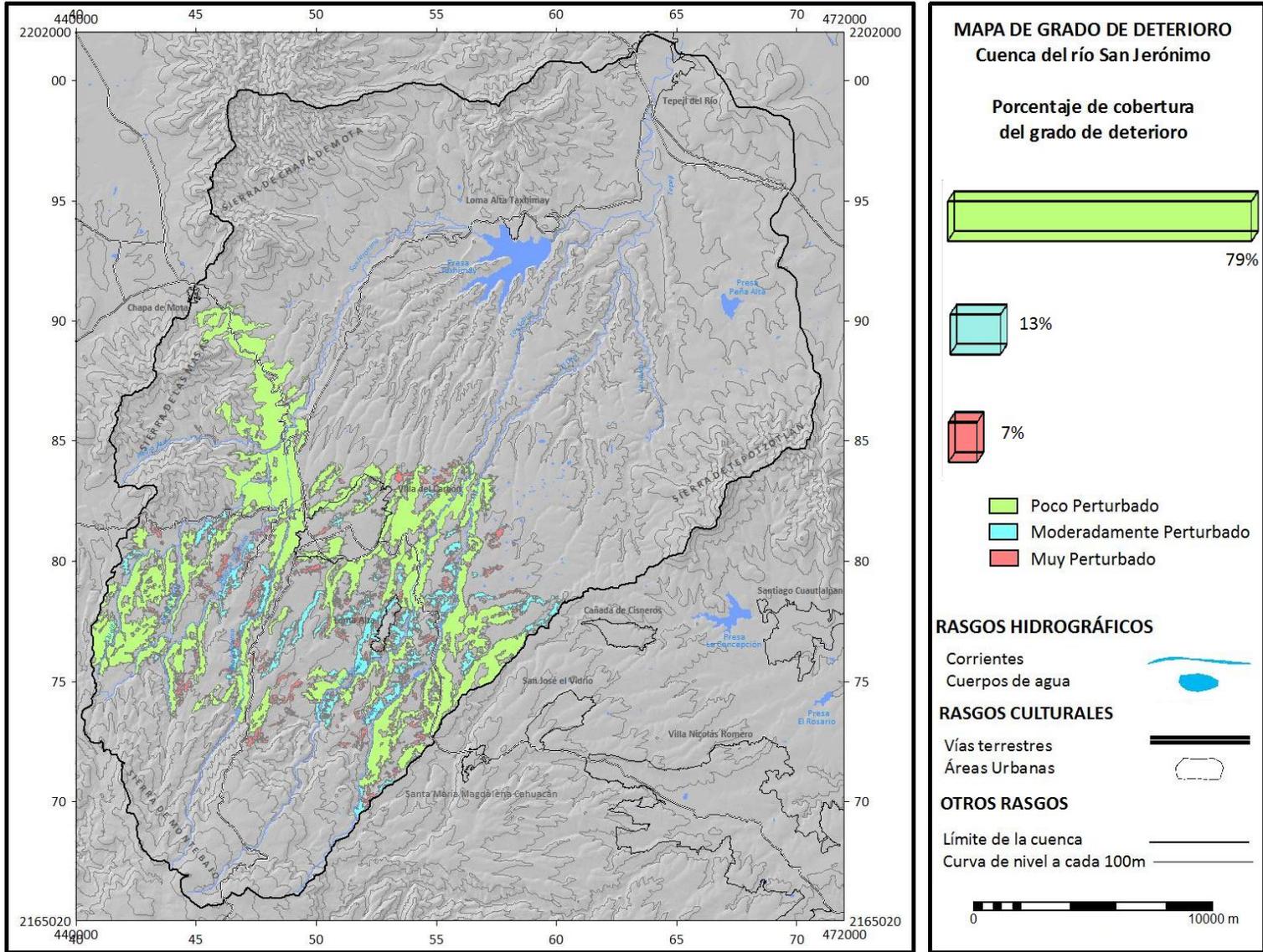


FIGURA 4.1 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DEL GRADO DE PERTURBACIÓN DE LOS BOSQUE DE PINO-ENCINO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JERÓNIMO

Por su parte, el bosque moderadamente perturbado se distribuye en una cantidad más bien baja de fragmentos (64 fragmentos), cuya superficie de conjunto representa tan sólo el 13% del total de la cuenca. Las observaciones en campo, permitieron ver un incremento de la cuantía de fragmentos de este tipo, lo cual se explica porque gran parte de la superficie del bosque poco perturbado está tendiendo a la fragmentación, derivado de actividades productivas no sostenibles como; por ejemplo, ganadería extensiva, tala clandestina, etc.

## 4.2 Influencia del relieve y uso del suelo en la distribución de los niveles de degradación

Para explicar la distribución de los fragmentos forestales con distinto grado de perturbación se llevó a cabo el análisis de sus correspondencias espaciales con distintos parámetros geomorfológicos y características del uso del suelo, ambos aspectos considerados como factores que controlan la distribución del proceso de fragmentación y de sus efectos, a través de cambios en el estado o condición de los bosques. Para el análisis de la importancia del relieve se consideraron los siguientes parámetros: geología, altimetría, pendiente, exposición de ladera, geometría de laderas y energía de relieve, todos los cuales han sido previamente utilizados para caracterizar a las geoformas de la cuenca en estudio. Del análisis realizado, conforme a la metodología propuesta en el Capítulo 1, derivan los resultados que se resumen en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2 RELACIÓN ESPACIAL DEL GRADO DE PERTURBACIÓN DEL BOSQUE DE PINO-ENCINO ENTRE PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS Y CARACTERÍSTICAS DE USO DEL SUELO, POR SUPERFICIE DE COBERTURA

Variables	Muy Perturbado	Moderadamente Perturbado	Poco Perturbado
	Superficie (%)		
<b>Altitud (msnm)</b>			
< 2400	0	0	100
2400 - 2600	4.6	10.8	84.5
2600 - 2800	10.5	19.4	70.1
2800 - 3000	7.7	5.2	87.1
> 3000	29.9	0	70.1

## Continuación...

Variables	Muy Perturbado	Moderadamente Perturbado	Poco Perturbado
	Superficie (%)		
<b>Pendiente (°)</b>			
0 - 6.5	7.1	9.3	83.6
6.6 - 15	8.7	12.9	78.4
15.1 - 30	7.6	14.7	77.7
30.1 - 45	3.2	15.9	80.9
> 45	0.8	12.5	86.6
<b>Exposición</b>			
Noroeste	5.4	13	81.6
Norte	8.3	13.3	78.3
Noreste	8.9	12.6	78.5
Oeste	3.2	8.8	88
Norte1	5.7	11.2	83.1
Este	10	16.2	73.8
Suroeste	6.9	9.4	83.7
Sur	12.6	16.4	70.9
Sureste	9.9	16	74.1
<b>Geometría</b>			
Laderas cóncavas de barrancos	7.5	14.1	78.5
Laderas convexas denudatorias	7.7	11.2	81.1
Laderas convexas de barrancos	7.3	13.7	79
<b>Energía del relieve</b>			
Muy baja	7.1	8.3	84.5
Baja	10.1	12.3	77.6
Moderada	7.7	15.4	76.9
Alta	2.6	15.8	81.6
Muy alta	0	5.6	94.4
<b>Uso del Suelo</b>			
Bosque	0.4	1.3	98.3
Matorral	3.7	4.2	92.1
Pastizal	0.0	3.6	96.4
Bosque Poco perturbado	1.4	0.8	97.9
Bosque Moderadamente perturbado	0	0	100
Bosque Muy perturbado	0	0	100
Cultivo de temporal	13.4	7.7	78.9
Asentamiento Humano	63.8	4.0	32.2
Cuerpo de agua	0	0	100.0
Erosión	0	0.9	99.1

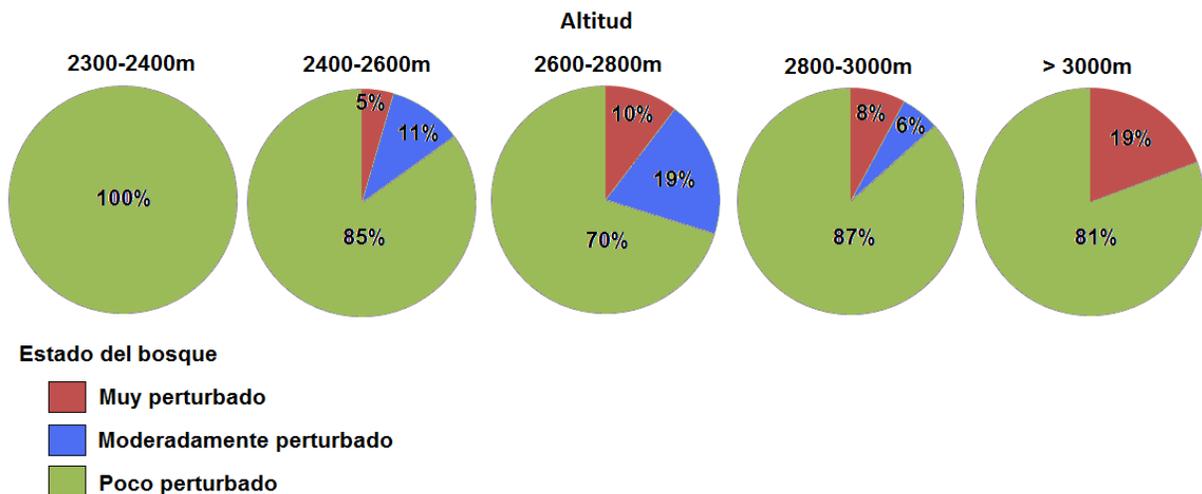
Continuación...

Variables	Muy Perturbado	Moderadamente Perturbado	Poco Perturbado
	Superficie (%)		
<b>Litología y Edad</b>			
Qal	8.2	13.1	78.7
Tpc	0	0	100
Tpv	1.2	0	98.8
TQt	0	0	100
Qv	10.0	54.5	35.4
Qcc	0	0	100
QcRi	27.9	5.2	67.0
QcR	7.8	10.4	81.8
Qvc	0	0	100
T	7.6	17.3	75.1

### 1. ALTITUD

La Gráfica 4.1 muestra la distribución de la superficie de los grados de perturbación del bosque de pino-encino, en cinco rangos de altitud. Destaca del conjunto la existencia de tendencias claras, aunque, hasta cierto punto inesperadas, ya que mientras el bosque moderadamente perturbado tiende a concentrarse en el sector central de la franja altitudinal analizada, el bosque muy perturbado tiende a aumentar conforme a la altitud.

GRÁFICA 4.1 DISTRIBUCIÓN DEL GRADO DE PERTURBACIÓN DEL BOSQUE DE PINO-ENCINO EN 5 RANGOS DE ALTITUD, POR PORCENTAJE DE COBERTURA



La zona con en el menor rango de altitud (2300 – 2400m) corresponde al piedemonte medio de la sierra, donde de manera inesperada el 100% de la superficie forestal fue catalogada como bosque poco perturbado. Este resultado se debe a que los fragmentos forestales que encontramos a estas alturas son prolongaciones de masas forestales extensas y compactas que asientan la mayor proporción de su área en las laderas de los complejos volcánicos de la sierra.

Otro indicador de la intervención humana a alturas mayores a 3000m es el alto porcentaje de la superficie (19%) que está ocupada por bosques muy perturbados. Este resultado es de gran interés, ya que al tratarse de áreas con altos gradientes morfométricos que incrementan la susceptibilidad de las laderas, esto permite suponer que la perturbación forestal puede resultar en el catalizador de la erosión del suelo y de procesos geomorfológicos que comprometan la inestabilidad ambiental y ecológica de las ladera altas, escarpes y cumbres de la sierra. De hecho, en el área se tiene registro de algunos procesos de deslizamientos y flujos de escombras que pudieran tener relación con la perturbación de los bosques.

La zona ubicada en el rango altitudinal que va de 2600 a 2800m corresponde a la base de los complejos volcánicos y al piedemonte proximal de la sierra, donde la mayor parte de la superficie forestal (entre 70 y 80%) es de bosques poco perturbados. En cambio, los bosques muy y moderadamente perturbados ocupan una superficie minoritaria (entre el 16 y 29%), con tendencia a incrementarse hacia los sectores más altos de la zona. Nuevamente, la heterogeneidad ambiental promovida por el relieve agreste es el principal factor que limita o favorece la ocupación y el uso del suelo, con consecuencias sobre los procesos de perturbación de las masas forestales.

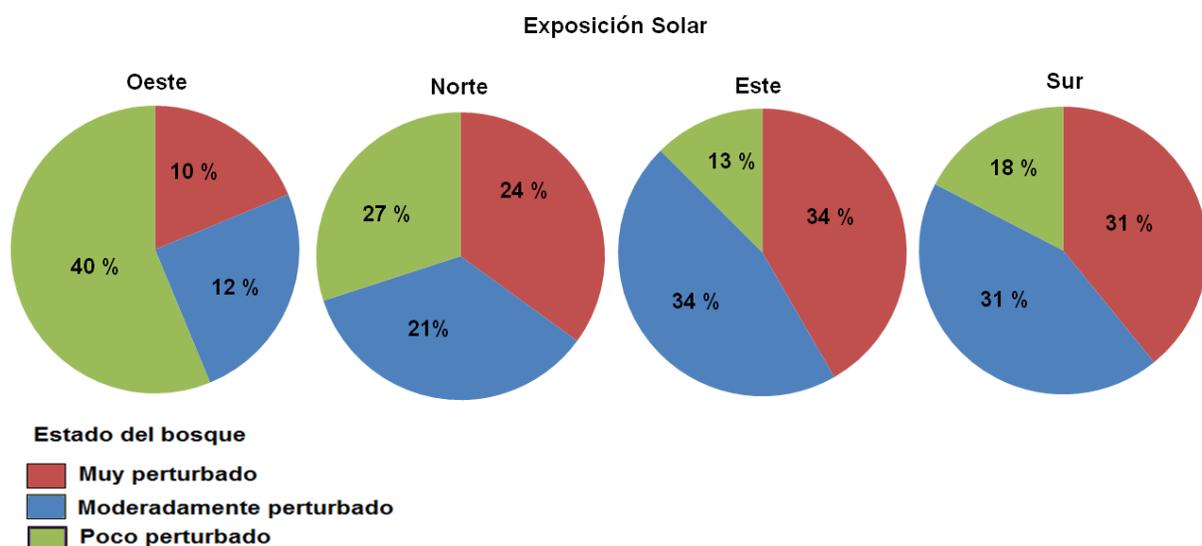
Es importante aclarar que los bajos porcentajes de cobertura que obtuvieron los bosques muy y moderadamente perturbados, así como la extensa superficie del bosque Poco perturbado (Gráfica 4.1) no son necesariamente indicativos de un bajo grado de deterioro o de la recuperación de los bosques de pino-encino. De hecho, las tendencias recientes hacia la

expansión de los usos del suelo que han sido reportadas para la sierra, nos permiten suponer que si estos procesos se mantienen o intensifican, las consecuencias sobre la condición de los bosques serían graves. Por ejemplo, los bosques moderadamente perturbados podrían convertirse a bosques muy perturbados, al tiempo que los bosques poco perturbados darían paso a bosques moderadamente perturbados, es decir, un proceso de perturbación gradual que podría llevar, como ya ha ocurrido en otras partes del centro del país, a la destrucción del ecosistema.

## 2. EXPOSICIÓN

En la Gráfica 4.2 se analizan las relaciones espaciales entre el grado de deterioro del bosque de pino-encino y la orientación de las laderas reclasificada en cuatro rangos: N, S, E y W.

GRÁFICA 4.2 DISTRIBUCIÓN DEL GRADO DE PERTURBACIÓN DEL BOSQUE DE PINO-ENCINO EN 4 CLASES DE DE EXPOSICIÓN, POR PORCENTAJE DE COBERTURA



Los resultados muestran que la distribución de los distintos grados de perturbación del bosque de pino-encino está de alguna manera controlada por la exposición de las laderas. Por ejemplo, la mayor proporción de la superficie ocupada por fragmentos en estado muy o moderadamente perturbado coincide con exposiciones este y sur, es decir, con laderas que reciben alta insolación desde las primeras horas del día; en tanto que es poco significativa

sobre en laderas orientadas al norte. Es característico que durante el estiaje estos fragmentos exhiben los efectos de la sequedad superficial, sobre todo en los individuos arbóreos de algunas especies caducifolias.

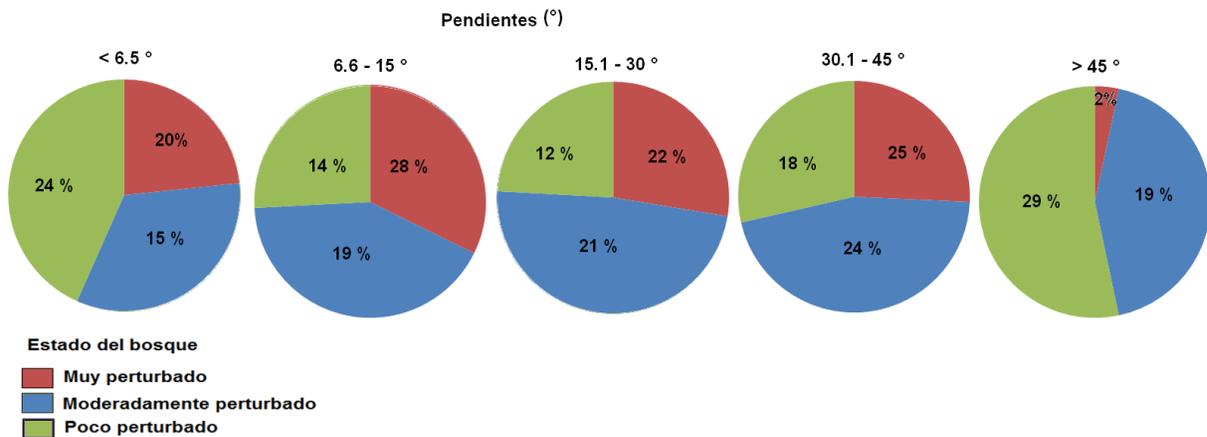
Por su parte, los fragmentos de bosque poco perturbados tienen un comportamiento opuesto al caso anterior, con la mayor proporción de su superficie en dirección al norte y oeste, es decir, en coincidencia con laderas de baja insolación y altos niveles de humedad. En cambio, es poco representativa la proporción de su superficie que coincide con laderas orientadas al este y al sur.

Se concluye que la exposición de laderas puede alcanzar gran importancia, principalmente para los fragmentos de bosque localizados en dirección sureste, dada las restricciones ecológicas que podrían derivar de las restricciones de humedad que se tienen durante la temporada del estiaje. Cabe destacar que en el área en estudio, los efectos de la insolación sobre la vegetación no depende sólo de variables naturales, sino también de procesos culturales como la deforestación, la urbanización y el desarrollo de actividades agropecuarias, los cuales son factores que incrementan la aridez ambiental. Pero al no ser objetivo de este proyecto modelar el factor humano, esta aseveración no ha sido probada, además que para corroborar esta aseveración hay que tener en cuenta las características particulares del hábitat del pino-encino e información sobre las actividades humanas recientes e históricas.

### 3. PENDIENTE

Ha sido ampliamente reconocida la influencia de la pendiente del terreno en la distribución de los tipos e intensidades del uso del suelo, de ahí que la cartografía y el análisis de la pendiente sea uno de los temas de la morfometría más frecuentes en estudios de fragmentación. En este caso se analizan las relaciones espaciales entre el grado de perturbación del bosque de pino-encino y la pendiente del terreno reclasificada en cinco rangos (Gráfica 4.3).

GRÁFICA 4.3 DISTRIBUCIÓN DEL GRADO DE PERTURBACIÓN DEL BOSQUE DE PINO-ENCINO EN 5 RANGOS DE PENDIENTE DEL TERRENO, POR PORCENTAJE DE COBERTURA

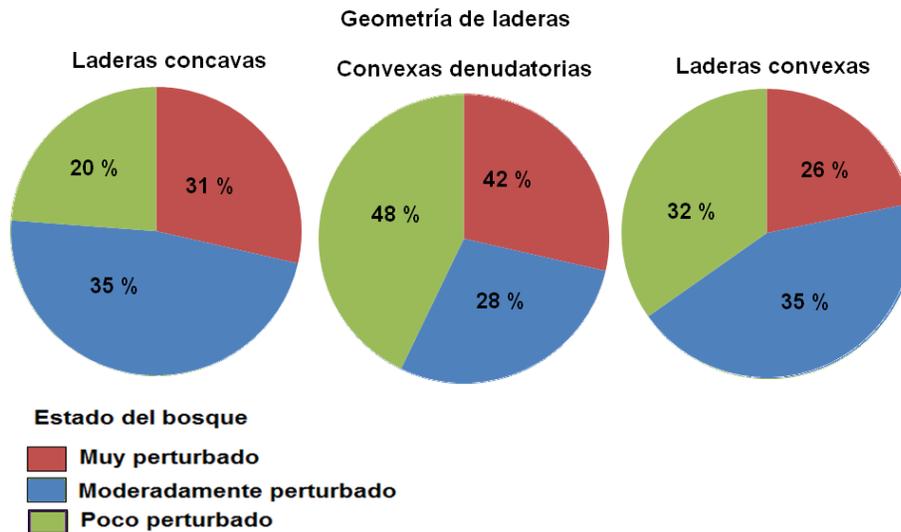


Como se observa en la Gráfica 4.3, los 3 grados de perturbación del bosque de pino-encino presentan tendencias bien definidas, aunque distintas entre sí respecto a la pendiente del terreno. Mientras que el bosque Muy perturbado concentra el mayor porcentaje de su superficie sobre planicies y laderas bajas < 6.5° de pendiente, el bosque Poco perturbado se distribuye más favorablemente en laderas con pendientes muy pronunciadas (> 45°). Estos resultados se explican por la incidencia del factor humano, ya que las laderas de baja pendiente están asociadas a condiciones preferidas para el desarrollo agropecuario, como son suelos bien desarrollados, disponibilidad de agua y estabilidad ambiental.

#### 4. GEOMETRÍA DE LADERAS

La importancia de la geometría de laderas se debe al impacto de la curvatura de la superficie del terreno sobre la distribución y movimiento del agua en superficie y subterránea, con efectos sobre la estabilidad de las vertientes y la disponibilidad de los recursos que se requieren para el desarrollo de las actividades humanas. En consecuencia, se parte del entendido de que este parámetro es, por lo menos de manera indirecta, un importante control de la distribución de los procesos de fragmentación en bosques templados. En este caso se analizan las relaciones espaciales entre los grados de perturbación del bosque de pino-encino y la geometría de laderas reclasificada en tres rangos (Gráfica 4.4).

GRÁFICA 4.4 DISTRIBUCIÓN DEL GRADO DE PERTURBACIÓN DEL BOSQUE DE PINO-ENCINO EN 3 CLASES DE GEOMETRÍA DE LADERAS, POR PORCENTAJE DE COBERTURA



Los resultados dejan ver que el bosque muy perturbado se relaciona con laderas de morfología convexa y con laderas denudatorias. Nuevamente, el factor humano interviene en el sentido de que este tipo de geometría favorece el desarrollo de las actividades agrícolas: mientras que las laderas convexas no asociadas a red de drenaje son de morfología llana y fáciles de trabajar, las laderas cóncavas de barrancos concentran la humedad y la retienen a consecuencia de una menor velocidad de flujo –respecto al de las laderas convexas-, por lo que suelo está mucho más tiempo en contacto con el agua.

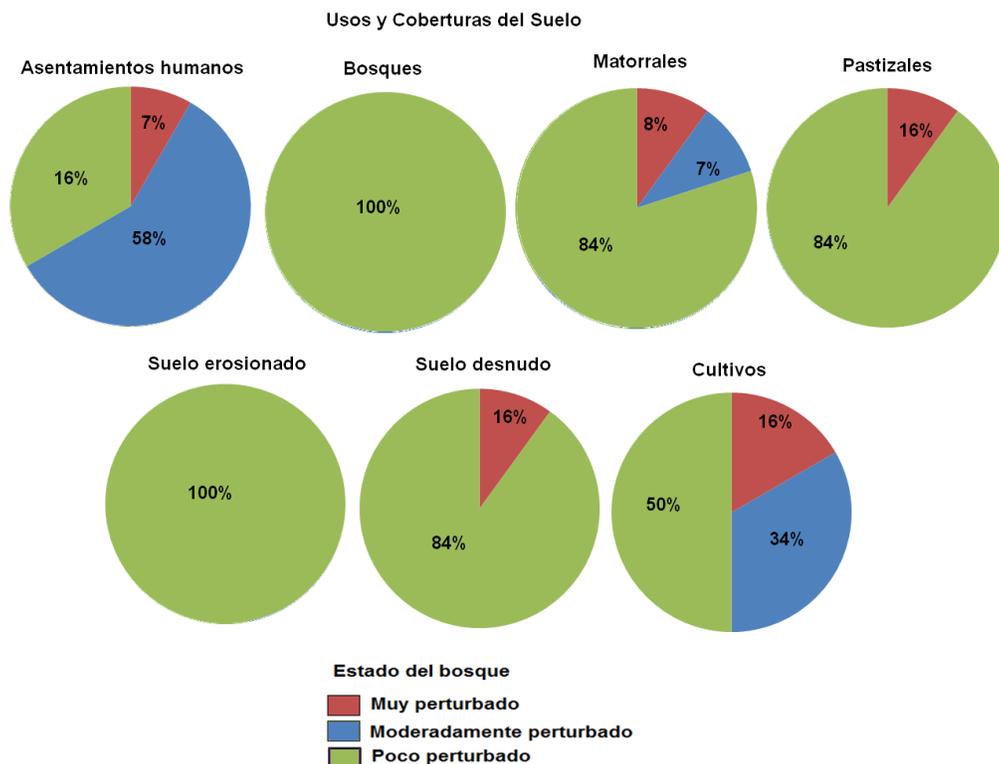
Por su parte, el bosque poco perturbado también se relaciona con laderas de morfología convexa y denudatorias, aunque en relación con caso anterior, también coincide con laderas denudatorias. Este comportamiento se debe no sólo a la baja humedad sino a la intensa actividad geomorfológica; caídas de roca, deslizamientos y avalanchas que condicionan la actividad antrópica.

## 5. COBERTURAS Y USOS DEL SUELO

La matriz de uso del suelo que envuelve a los fragmentos forestales ha sido reconocida como un importante factor que incide en la condición de las comunidades vegetales que albergan.

En este caso se analizan las relaciones espaciales entre los grados de perturbación del bosque de Pino-Encino y las distintas clases de uso del suelo (Gráfica 4.5). Sin embargo, la relación se establece no en términos areales, sino de la proporción del perímetro de cada uno de los fragmentos que da frente a distintos tipos de uso del suelo de su matriz.

GRÁFICA 4.5 DISTRIBUCIÓN DEL GRADO DE PERTURBACIÓN DEL BOSQUE DE PINO-ENCINO EN LOS TIPOS DE USO DEL SUELO, POR PORCENTAJE DE COBERTURA



Como es de esperar la importancia de los distintos tipos de uso del suelo en la matriz depende de la proporción de sus superficies. De esta forma, el cultivo de temporal, que es el tipo de cubierta del suelo más extendido en el área de estudio, se constituye como la principal matriz que envuelve a todas la demás coberturas, y en el caso de los bosques de pino-encino representa el 99% del perímetro de todos los fragmentos analizados.

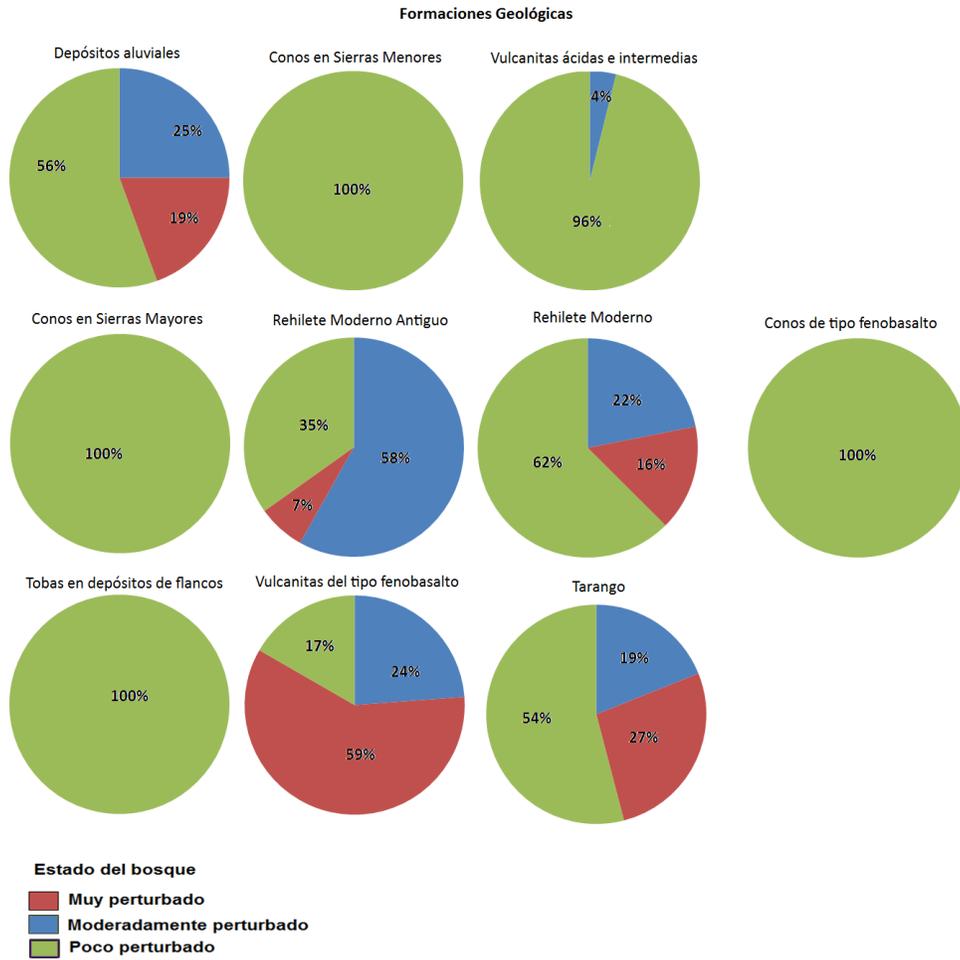
En la Gráfica 4.5, se puede observar que los bosques muy y moderadamente perturbados tienen una relación proporcional a los asentamientos humanos y los cultivos de temporal; a diferencia del bosque poco perturbado que se encuentra, proporcionalmente, más asociado a usos de suelo con cobertura vegetal.

#### GEOLOGÍA

La importancia de la geología en la distribución del estado de los bosques se debe a que la composición, estructura y mecánica de los materiales del roquedo de superficie, junto a los caracteres morfológicos del terreno inciden directamente en la distribución de los suelos, la disponibilidad de agua y la estabilidad de las laderas, que se requieren para el desarrollo de los tipos e intensidades del uso del suelo. En consecuencia, la geología es, por lo menos de manera indirecta, un importante control de la distribución de los procesos de fragmentación y del estado de conservación de los bosques. En este caso se analizan las relaciones espaciales entre los estados de conservación del bosque de Pino-Encino y las unidades geológicas que afloran en el área de estudio (Gráfica 4.6).

La Gráfica 4.6 muestra una marcada diferencia, por una parte, entre los bosques muy y moderadamente perturbados los cuales tienden a distribuirse sobre tobas y lavas básicas e intermedias del tipo fenobasalto y, por otra parte, el bosque poco perturbado que evita ese tipo de depósitos. De la misma manera, los bosques poco perturbados prefieren estructuras de composición ácida o básica, que los dos primeros. También se observa que, a diferencia de los bosques muy perturbados y moderadamente perturbados, el bosque poco perturbado se distribuye más favorablemente sobre vulcanitas ácidas e intermedias de estratovolcanes, así como sobre las tobas en depósitos de flancos de la sierras menores, al tiempo que no se le asocia con material volcánico revuelto, como lo es la formación Tarango.

GRÁFICA 4.6 DISTRIBUCIÓN DEL GRADO DE PERTURBACIÓN DEL BOSQUE DE PINO-ENCINO EN LAS DISTINTAS UNIDADES GEOLÓGICA, POR PORCENTAJE DE COBERTURA



## CONCLUSIONES

Los efectos de borde en ecosistemas forestales son un componente clave para entender la influencia de la estructura del paisaje sobre la calidad del hábitat. Sin embargo, en México ha habido una grave desatención a este importante tema, no obstante los altos niveles de deterioro que aquejan a muchos ecosistemas forestales. Los resultados de la presente investigación arrojaron nuevo conocimiento en tres ejes principales.

a) Aplicación de conceptos, métodos y técnicas utilizadas en la Ecología del Paisaje para el estudio del proceso de fragmentación y efecto de borde en la estructura del paisaje.

Los resultados muestran que la actual estructura del paisaje refleja que el proceso de fragmentación ha derivado en dos hechos, por una parte una grave reducción de la superficie de distribución del hábitat del bosque de pino-encino y por otra, la conformación de un patrón paisajístico en el que los remanentes forestales se distribuyen en fragmentos de distintas características espaciales.

Los criterios utilizados basados en la superficie total, cantidad de parches, tamaño, forma y distancia al parche de mayor tamaño; permitió allegar procesos asociados con la formación de hábitats de borde.

b) Evaluación de las consecuencias del efecto borde en la condición o estado de los bosques de pino-encino.

La identificación y caracterización de los hábitats de borde y su amplitud, con criterios basados en la *Composición* del bosque (abundancia, riqueza y diversidad) permitió la obtención de tres hábitats de borde el Borde Exterior, el Borde Interior y Núcleo.

Este importante hallazgo pone en relieve la importancia de los levantamientos de campo como herramienta para el diagnóstico detallado y veraz del estado de los bosques; esto frente a la tendencia que desde hace décadas ha encontrado en la teledetección técnicas de fácil y pronta evaluación, pero en las cuales los fragmentos forestales han sido entendidos y tratados como espacios unitarios y homogéneos, situación alejada de la condición real.

c) Aplicación de instrumentos teóricos y metodológicos para extrapolar la respuesta de los fragmentos forestales de distinto grado de deterioro ante diversas variables del uso del suelo y el relieve. Esto permitió determinar patrones de comportamiento que son de gran importancia como instrumento para el uso de la información en posteriores esfuerzos dirigidos al manejo y la conservación.

El estudio de la configuración espacial de los usos del suelo facilitó el análisis de la matriz paisajística de los fragmentos forestales, en el marco de la relación sociedad-naturaleza en un tiempo y espacio dado. Así, hemos demostrado que el principal agente de transformación que ha influido de manera significativa al proceso de fragmentación y homogenización del paisaje, es el cambio de uso del suelo.

Por su parte, el sistema geomorfológico fue importante para la integración funcional de los hábitats forestales, ya que, al margen del origen cultural del problema, las variables morfométricas del relieve (altitud, pendiente, orientación, perfil de laderas y energía del relieve) tuvieron altas correlaciones espaciales con la distribución de los remanentes forestales y su respectivo grado de deterioro, por lo que se consideraron como factores clave que subyacen a la distribución del problema. Así, se han diferenciado dos tipos de ambientes geomorfológicos de distinta sensibilidad morfológica, cada uno de los cuales alberga un patrón de uso del suelo asociado a un estilo propio de fragmentación forestal.

Un patrón ocurre en las laderas del piedemonte superior y de la base del complejo volcánico de la sierra de Monte Alto-Monte Bajo, caracterizado por una morfología abrupta que incrementa la sensibilidad de las laderas y limita la accesibilidad y la disponibilidad de recursos. Por esta razón, la conversión de la vegetación primaria a otros tipos de cubiertas es un proceso que está limitado al paso de infraestructuras y pequeños enclaves agropecuarios y de asentamientos humanos, en tanto que los fragmentos forestales son extensos, conteniendo comunidades maduras y de Baja perturbación.

Otro patrón de uso del suelo y fragmentación presenta una condición opuesta al corresponder a las laderas medias del piedemonte, caracterizado por una mayor cercanía a la base de la sierra y condiciones topográficas que permiten una mayor accesibilidad, disponibilidad de recursos y estabilidad, con consecuencias en la expansión agropecuaria y de los asentamientos humanos. El patrón de fragmentación se caracteriza por pequeños rodales de bosque, replegados en el interior de los barrancos e inmersos en una matriz agrícola. Este patrón es muy dinámico debido a la sistemática conversión entre la actividad y el abandono de las parcelas, al tiempo que impide la regeneración forestal, favorece la expansión de coberturas secundarias (matorrales) en amplias extensiones, e incrementa la intensificación de los daños por efecto de la permanencia del sistema.

Es importante mencionar, que la metodología empleada forma parte de una adaptación, con base en una revisión teórica y conceptual, que ha permitido una aproximación inicial, tanto de los criterios y variables a considerar, para determinar el grado de deterioro de hábitats forestales altamente fragmentados.

Finalmente, la importancia del presente estudio no sólo estriba en los aportes al conocimiento de las relaciones relieve-uso del suelo-vegetación en el área de estudio, sino también en la aplicación de una propuesta metodológica que constituye una base de referencia para futuras investigaciones relacionadas con la evaluación del deterioro y el

planteamiento de propuestas de recuperación en áreas degradadas del bosque de pino-encino de la porción central de México.

Estas acciones deben considerar según se ha dado a conocer, que los remanentes o fragmentos forestales no son entes unitarios u homogéneos, sino que presentan una estructura interna, con dos bordes y un núcleo, los cuales reflejan la compleja interacción de los fragmentos con el entorno cultural de su matriz paisajística, así como con la diversidad de recursos y limitantes propios del relieve, diferencias que deben ser reconocidas y atendidas en futuros planes de acción con fines de recuperación ambiental y ecológica.

## Bibliografía

- Aguilar, C.E., E. Martínez y L. Arriaga (2000), "Deforestación y fragmentación de ecosistemas: ¿Qué tan grave es el problema en México?", *Biodiversitas*, no.30, pp. 7-11.
- Bastian O. y M. Röder (1998), "Assessment of landscape change by land evaluation of past and present situation", *Landscape and Urban Planning*, no. 41, pp. 171-182.
- Bocco, G., M. Mendoza y O. R. Masera (2001), "La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacan. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 44, pp. 16-38.
- Burel, F. y J. Baudry (2002), *Ecología del paisaje. Conceptos, métodos y aplicaciones*, Ed. Mundi-Prensa, España.
- Bustamante, R. O., J. A. Simonetti, A. A. Grez y J. San Martín (2004) "Fragmentación y dinámica de regeneración del bosque Maulino: diagnóstico actual y perspectivas futuras", *Memorias*, pp. 18-26.
- Cadenasso M. y S. Pickett (2000), "Linking forest edge structure to edge function: meditation of herbivore damage", *Journal of Ecology*, no. 88, pp. 31-44.
- Castelán, R., J. Ruiz, G. Linares, R. Pérez y V. Tamariz (2007) "Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 64, pp. 75-89.

- Cedillo, A. O., Rivas, S. M. y Rodríguez C. F. (2007), "El área natural protegida sujeta a conservación ecológica "Sierra de Guadalupe", *Revista Sistemas Ambientales*, vol. 1, no. 1, pp. 1-14.
- Chapa, D., J. Sosa y A. De Alba (2008), "Estudio multitemporal de fragmentación de los bosques en la Sierra Fría, Aguascalientes, México", *Madera y Bosques*, vol. 14, no. 1, pp. 37-51.
- Collado, A. D. y C. M. Dellafiore (1999) "Influencia de la fragmentación del paisaje sobre la población del venado de las Pampas en el sur de la Provincia de San Luis", *INTA-Argentina*, vol. 31, no. 2, pp. 39-56.
- Comisión Estatal de Aguas de Querétaro, CEAQ (2005), "*Topografía y geotecnia de la línea de conducción Tramo Gravedad, para el abastecimiento de agua potable de la Ciudad de Querétaro*", Servicios de ingeniería, recomendaciones, análisis, reporte y asesoría para: Línea de conducción.
- Curtis, H., N. S. Barnes, A. Schnek y A. Massarini (2008), *Biología*, Ed. Médica Panamericana, España.
- Enciso-De la Vega, S. (1992), "Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la Cuenca de México", *Revista del Instituto de Geología UNAM*, vol.10, no. 1, pp. 26-36.
- Farfán, R. E. y M. E. Orozco (2007), "Caracterización biofísica y social del Centro Ceremonial Otomí-Mexica, Estado de México", *Revista de estudios urbanos, regionales, territoriales, ambientales y sociales UAEM*, vol. 9, no. 2, pp. 263-278.
- Farina A. (2007), *Principles and methods in landscape ecology*, Dordrecht: Springer. 412 p.

- Figuerola, E. (2007), *Estudio geomorfológico general y aplicado a peligros en la zona del lago de Chalco, Estado de México*, tesis de Licenciatura, UNAM, México.
- Flaspohler, D., C. Giardina, G. Asner, P. Hart, J. Price, C. Ka'apu Lyons, X. Castaneda (2010), "Long-term effects of fragmentation and fragment properties on bird species richness in Hawaiian forests", *Biological Conservation*, no. 143, pp. 280-288.
- Forman R.T.T. y M. Godron (1986), *Landscape ecology*, John Wiley & Sons, New York.
- Galicia, L. y A. García-Romero (2007) "Land use and land cover change in highland temperate forests in the Izta-Popo National Park, Central Mexico", *Mountain Research and Development*, vol. 27, no. 1, pp. 48-57.
- García, G., B. Schmook y I. Espejel (2005), "Dinámica en el uso del suelo en tres ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 58, pp. 122-139.
- García-Aguirre, M. C., M. A. Ortiz, J. J. Zamorano y Y. Reyes (2007) "Vegetation and landform relationships at Ajusco volcano Mexico, using a geographic information system (GIS)", *Forest Ecology and Management*, no. 239, pp. 1-12.
- García-Palomo, A., J. J. Zamorano, C. López-Miguel, A. Galván-García, V. Carlos-Valerio, R. Ortega y J. L. Macías (2008), "El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 25, no.1, pp. 158-178.
- García-Romero A (2002), "An evaluation of forest deterioration in the disturbed mountains of Western Mexico", *Mountain Research and Development*, no. 22, pp. 270-277.

- García-Romero, A. (1998), "Geoecología del paisaje vegetal en el occidente de la ciudad de México", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, no. 18, pp. 115-137.
- García-Romero, A. y J. Muñoz (2000), "Transformaciones ambientales y paisajísticas en el borde accidental del área metropolitana de Ciudad de México", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, no. 20, pp. 265-282.
- Hernán, F., R. Ángeles, A. Medina, R. Marines y J. Urrutia (2000), "Estimación de las constantes elásticas del terreno en el área de Salazar, Estado de México, a través de exploración sísmica", *Revista científica multidisciplinaria de la Universidad Autónoma del Estado de México, Ciecnia Ergo Sum*, vol. 7, no. 3.
- Hoersch, B., G. Braun y U. Schmidt (2002), "Relation between landform and vegetation in alpine region of Wallis, Switzarland. A multiscale remote sensing and GIS approach", *Computers, Environment and Urban Systems*, no. 26, pp. 113-139.
- Honnay O., K. Verheyen, M. Hermy (2002), "Permeability of ancient forest edges for weedy plant species invasión", *Forest Ecology and Management*, no. 161, pp. 109-122.
- Laurance, W. F., G. B. Williamson, P. Delamonica, A. Olivera, C. Gascon, T. E. Lovejoy y L. Pohl (2002), "Effects of severe drought on Amazonian forest fragments and edges", *Journal of Tropical Ecology*, no. 17, pp. 771-785.
- Levins, R. (1970), Extinction. In: M. Grestenhaber (Ed.), *Some Mathamtical Questions in Biology: Lectures on Mathematics in the Life Sciences*, *American Mathematical Society*, Providence, RI.
- López-Blanco, J. (2005), *Sistemas de Información Geográfica en estudios de Geomorfología ambiental y recursos naturales*, UNAM, Facultad de Filosofía y Letras, Seminarios, 187 p.

- Lugo, H. (2004), *El relieve de la tierra y otras sorpresas*. FCE, SEP, CONACYT, México.
- MacArthur, R. H. y E. O. Wilson (1997), *The theory of island biogeography*, Princeton University Press, Princeton, New-Jersey.
- Mas, F.J. y J. Correa (2000), "Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida Los Petenes, Campeche, México" *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 43, pp. 42-59.
- Mazzola, M. B., A. G. Kin, E. F. Morici, F. J. Babinec y G. Tamborini (2008), "Efecto del gradiente altitudinal sobre la vegetación de las Sierras de Lihue Calel (La Pamap, Argentina)", *Bol. Soc. Argent. Bot.*, vol. 43, no. 1-2, pp. 103-119.
- Medina, J. G. y J. D. Tejero-Díez (2006), "Flora y vegetación del parque estatal Atizapán-Valle Escondido, Estado de México, México", *Polibotánica*, no. 21, pp. 1-43.
- Mooser, F., A. Montiel y A. Zúñiga (1996), *Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla: estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos: México*, Comisión Federal de Electricidad.
- Morláns, M. (2002), "Estructura del paisaje (matriz, parches, bordes, corredores) y sus funciones. Fragmentación del hábitat y su efecto borde", *Editorial Científica Universitaria*, Universidad Nacional de Catamarca, Argentina.
- Música, M. y J.V. De Lucio (2002), "Integración territorial de espacios naturales protegidos y conectividad ecológica en paisajes mediterráneos", *Junta de Andalucía*, Sevilla. España.

- Norton, D. (2002), "Edge effects in a lowland temperate New Zealand rainforest". *DOC Science internal Series*, Department of Conservation, New Zealand.
- Oropeza, O. (1979), "Dinámica fluvial de la cuenca alta del río Tepeji", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 9, pp. 93-115.
- Ortiz P. (1987), "Los cambios de nivel base como mecanismo morfogenético de la asimetría de valles", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 17, pp. 9-44.
- Palma, M., Cram, S., Bocco, G. y A. Velázquez (1999), "Caracterización abiótica de la región de montaña del sur de la Cuenca de México", *Biodiversidad de la región de montaña del sur de la cuenca de México*, UAM-SEMARNAP-Gobierno del DF. ISBN 970-654-538-7, pp. 52-63.
- Ramírez, J., H. Hernández y G. Rueda (1983), "Origen, tectónica y cronología volcánica de la Cuenca de México", *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, vol. 35, no. 2.
- Ramírez-Bojórquez, P. R., A. Ruiz-Luna y C. A. Berlanga-Robles (2005), "Análisis espacial de la cobertura de manglar en los municipios de Tecuala y Santiago Ixcuintla, Nayarit en el periodo de 1973-2005", *CIAD-Mazatlán*, México.
- Ritchie, L. E., M. G. Betts, G. Forbes y K. Vernes (2009), " Effects of lands composition and configuration on northern flying squirrels in a forest mosaic", *Forest Ecology and Management*, no. 257, pp. 1920-1929.
- Romero, M, (2004), Análisis de los cambios en la estructura del paisaje de l'Alt Empordá en el periodo 1957-2001", tesis Doctoral, Universitat de Girona, España.

Rzedowski J. (1988) *Vegetación de México*, Limusa, México.

Schlaepfer, C.P. (1968), *Resumen de la geología de la hoja México, Distrito Federal y estados de México y Morelos: México, D.F.*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, Serie 1: 100,000.

Stupino, S. A., M. F. Arturi y J. L. Frangi (2004), "Estructura del paisaje y conservación de los bosques de *Celtis tala Gill ex Planch* del NE de la provincia de Buenos Aires", *Revista de la Facultad de Agronomía*, vol. 105, no. 2, pp. 37-45.

Tapia-Varela G. y J. López-Blanco (2002), Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100,000", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 19, no. 1, pp. 50-65

Turner, M. G., R. H. Gardner y R. V. O'Neill (2001), *Landscape Ecology in Theory and Practice*, Springer-Verlag, New York.

Vazquéz-Sanchez, E. y R. Jaimes-Palomera (1989), "Geología de la cuenca de México", *Geofísica Internacional, Revista de la Unión Geofísica Mexicana*, Auspiciada por el Instituto de Geofísica UNAM, vol. 28, no. 2, pp. 133-190.

Verstappen, H.Th. (1983), *Applied geomorphology; geomorphological surveys for environmental development*: Amsterdam, Elsevier, 437 p.

Vila, J., D. Varga, A. Llausás y A. Ribas (2006), "Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía" *Doc. Anal. Geogra.* Universitat de Girona, no. 48, pp.151-166.

- Villavicencio, G., A. Santiago, A. Gallegos y C. Ortega (2005), "Análisis temporal de la fragmentación forestal y estructura del paisaje en espacios protegidos", Universidad de Guadalajara, México.
- Villers, L., García, L. y López, J. (1998), "Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el parque nacional Nevado de Toluca", *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, no. 36, pp. 7-19.
- Wales B. (1972), "Vegetation analysis of north and south edges in a mature oak-hickory forest", *Ecological monographs*, no. 42, pp. 451-471.
- Watkins R., J. Chen, J. Pickens, K. Brosofske (2003), "Effects of forest roads on understory plants in a managed hardwood landscape", *Conservation Biology*, no. 17, pp. 411-419.
- Williams-Linera, G., R. H. Manson y E. Isunza (2002) "La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso del suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz, México", *Madera y Bosques*, vol. 8, no. 1, pp. 73-89.
- Wulder, M. A., J. C. White, M. E. Andrew, N. E. Seitz y N. C. Coops (2009), "Forest fragmentation, structure, and age characteristics as a legacy of forest management", *Forest Ecology and Management*, no. 258, pp. 1938-1949.
- Young A. y N. Mitchell (1994), "Microclimate and vegetation edge effects in a fragmented podocarp-broadleaf forest in New Zealand", *Biological conservation*, no. 67, pp. 63-72.
- Zamorano-Orozco, J., L. Tanarro-García, J. Lugo-Hubp y G. Sánchez-Rubio (2002), "Evolución geológica y geomorfológica del complejo dómico Los Pitos, norte de la Cuenca de México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 19, no. 1, pp. 66-79.



## ANEXO 2

Estimaciones realizadas de las medidas florístico-estructurales y de diversidad, por bloques de distancia.

Distancia	AAr	AOA	AP	RAr	ROA	RP	RT	DS	DSW	H'max	E
<b>0 a 10</b>	93	57	12	12	12	4	28	0.92	1.25		0.9
<b>10 a 20</b>	81	47	13	16	10	4	30	0.93	1.29		0.9
<b>20 a 30</b>	58	57	10	12	11	4	27	0.88	1.15		0.8
<b>30 a 40</b>	80	75	6	15	9	2	26	0.90	1.19		0.8
<b>40 a 50</b>	62	63	8	11	9	3	23	0.85	1.05		0.8
<b>50 a 60</b>	33	38	8	6	8	3	17	0.83	0.97		0.8
<b>60 a 70</b>	35	41	11	9	7	3	19	0.83	0.97		0.8
<b>70 a 80</b>	35	35	6	7	8	2	17	0.82	0.94		0.8
<b>80 a 90</b>	34	35	6	8	8	1	17	0.88	1.05		0.9
<b>90 a 100</b>	36	24	4	9	7	3	19	0.89	1.09		0.9
<b>100 a 110</b>	17	13	1	8	5	1	14	0.83	0.94		0.8
<b>110 a 120</b>	15	14	2	5	6	1	12	0.88	0.99		0.9
<b>120 a 130</b>	17	19	0	7	6	0	13	0.81	0.88		0.8
<b>130 a 140</b>	16	15	1	7	5	1	13	0.81	0.89		0.8
<b>140 a 150</b>	18	20	2	7	5	1	13	0.88	1		0.9
<b>150 a 160</b>	11	7	0	6	3	0	9	0.87	0.92		1
<b>160 a 170</b>	11	5	0	5	4	0	9	0.91	0.74		0.8
<b>170 a 180</b>	4	2	1	3	2	1	6	0.82	0.76		1
<b>180 a 190</b>	9	7	0	5	5	0	10	0.87	0.94		0.9
<b>190 a 200</b>	24	5	2	6	3	1	10	0.82	0.87		0.9
<b>200 a 210</b>	1	3	1	1	3	1	5	0.80	0.7		1
<b>210 a 220</b>	3	8	1	2	3	1	6	0.78	0.71		0.9
<b>220 a 230</b>	0	7	3	0	3	2	5	0.68	0.59		0.8
<b>230 a 240</b>	0	0	4	0	0	2	2	0.38	0.24		0.8
<b>240 a 250</b>	1	3	1	1	1	1	3	0.56	0.41		0.9

Continuación...

Distancia	AIAr	AIOA	AIP	AbAr	AbOA	AbP	CoAr	CoOA	CoP	PvsOA	AvsAr
<b>0 a 10</b>	1.338	7.33	12	0.01	0.058	0.09	28.14	56.36	15.5	3	1
<b>10 a 20</b>	1.419	6.37	16	0.011	0.171	0.19	33.18	44.39	22.4	3	1
<b>20 a 30</b>	1.544	7.73	11	0.014	0.038	0.08	24.61	61.91	13.5	3	1
<b>30 a 40</b>	1.417	3.19	14	0.013	0.018	0.18	38.41	49.71	11.9	5	1
<b>40 a 50</b>	1.477	6.75	10	0.015	0.066	0.47	26.85	62.7	10.4	3	1
<b>50 a 60</b>	1.248	7.83	9.1	0.013	0.061	0.03	20.08	62.76	17.2	3	2
<b>60 a 70</b>	1.586	2.12	6.4	0.015	0.007	0.03	36.68	36.57	26.8	2	1
<b>70 a 80</b>	1.511	4.39	12	0.014	0.017	0.2	28.55	53.73	17.7	4	1
<b>80 a 90</b>	2.323	6.18	4.9	0.008	0.043	0.01	33.11	59.14	7.76	8	1
<b>90 a 100</b>	1.831	8.45	20	0.014	0.061	0.08	30.84	50.08	19.1	2	1
<b>100 a 110</b>	1.506	7.93	24	0.007	0.058	0.18	25.86	61.1	13	5	1
<b>110 a 120</b>	1.407	9.94	14	0.008	0.078	0.38	16.4	61.08	22.5	6	1
<b>120 a 130</b>	1.339	5.52	0	0.005	0.045	0	21.14	78.86	0	0	1
<b>130 a 140</b>	1.004	3.87	16	0.008	0.027	0.01	31.92	56.88	11.2	5	1
<b>140 a 150</b>	0.894	3.56	11	0.001	0.018	0.05	18.43	63.19	18.4	5	1
<b>150 a 160</b>	1.395	6.24	0	7E-04	0.043	0	33.56	66.44	0	0	1
<b>160 a 170</b>	1.773	5.36	0	0.002	0.013	0	58.78	41.22	0	0	1
<b>170 a 180</b>	1.718	4.5	24	0.011	0.010	0.27	30.77	17.86	51.4	2	1
<b>180 a 190</b>	1.347	8.36	0	5E-04	0.040	0	21.26	78.74	0	0	1
<b>190 a 200</b>	1.57	12.9	17	0.002	0.161	0.29	35.11	39.64	25.3	3	1
<b>200 a 210</b>	2.13	4.33	30	0.028	0.082	0.24	8.456	49.01	42.5	3	4
<b>210 a 220</b>	1.383	5.11	19	0.014	0.005	0.05	18.67	52.97	28.4	3	2
<b>220 a 230</b>	0	6.79	18	0	0.021	0.08	0	43.85	56.2	2	0
<b>230 a 240</b>	0	0	20	0	0.000	0.07	0	0	100	0	0
<b>240 a 250</b>	1.88	7.33	21	0.024	0.006	0.06	13.51	34.14	52.4	1	2

## ANEXO 3

Listado especies encontradas en 29 fragmentos de bosque de pino-encino (Villa del Carbón, Estado de México) y su clasificación según el grupo fisonómico.

<b>Familia</b>	<b>Genero</b>	<b>Especie</b>	<b>Grupo fisonómico</b>
<b>Agavaceae</b>			
	Agave	A. salmiana	Arbustos
<b>Asteraceae</b>			
	Eupatorium	E. glabratum E. sp.	Arbustos
	Senecio	S. salignus S. sinuatus	Arbustos
<b>Betulaceae</b>			
	Alnus	A. acuminata	Otros árboles
<b>Cactaceae</b>			
	Opuntia	O. ficus-indica	Arbustos
<b>Caprifoliaceae</b>			
	Symphoricarpus	S. microphyllus	Arbustos
<b>Compositae</b>			
	Baccharis	B. conferta B. heterophylla	Arbustos
<b>Cupressaceae</b>			
	Cupressus	C. lindleyi	Otros árboles
<b>Ericaceae</b>			
	Arbutus	A. xalapensis	Otros árboles
	Comarostaphylis	C. discolor	Arbustos
	Gaultheria	G. acuminata	Arbustos
<b>Fagaceae</b>			
	Quercus	Q. crassifolia Q. crassipes Q. laeta Q. laurina Q. obtusata Q. rugosa	Otros árboles
<b>Garryaceae</b>			
	Garrya	G. laurifolia	Arbustos
<b>Loganiaceae</b>			
	Buddleia	B. cordata B. parviflora	Arbustos

<b>Familia</b>	<b>Genero</b>	<b>Especie</b>	<b>Grupo fisonómico</b>
<b>Onagraceae</b>	Fraxinus	F. uhdei	Otros árboles
	Fuchsia	F. thymifolia	Arbustos
<b>Pinaceae</b>	Abies	A. religiosa	Otros árboles
	Pinus	P. leiophylla	Pinos
		P. montezumae	
		P. patula	
		P. pseudostrobus	
P. teocote			
<b>Polygalaceae</b>	Monnina	M. ciliolata	Arbustos
<b>Rosaceae</b>	Crataegus	C. mexicana	Otros árboles
	Prunus	P. serotina	Otros árboles
<b>Rubiaceae</b>	Bouvardia	B. ternifolia	Arbustos
<b>Senescio</b>	Senecio	S. sinuatus	Arbustos
<b>Solanaceae</b>	Cestrum	C. nitidum	Arbustos
		C. thyrsoideum	Arbustos
	Solanum	S. cervantesii	Arbustos
		S. sp.	Arbustos