



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y SU RELACIÓN CON
LA INTEGRIDAD DE LA VEGETACIÓN EN LA CUENCA MEDIA
ALTA DEL RÍO TEMBEMBE, MORELOS, MÉX., PARA FINES DE
RESTAURACIÓN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

P R E S E N T A

BIÓL. MARÍA BEATRIZ MARTÍNEZ ROSALES

DIRECTORA DE TESIS: DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ.

Octubre 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

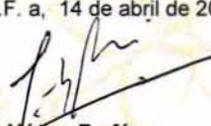
Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 12 de Mayo de 2008, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** de la alumna **MARTÍNEZ ROSALES MARÍA BEATRIZ** con número de cuenta **98535044** con la tesis titulada "**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y SU RELACIÓN CON LA INTEGRIDAD DE LA VEGETACIÓN EN LA CUENCA MEDIA ALTA DEL RÍO TEMBEMBE, MORELOS, MEX., PARA FINES DE RESTAURACIÓN**", realizada bajo la dirección del (la) **DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ**.

Presidente: DR. JORGE LÓPEZ BLANCO
Vocal: DR. JOSÉ RAÚL GARCÍA BARRIOS
Secretario: DRA. ROSA IRMA TREJO VAZQUEZ
Suplente: DR. ROBERTO ANTONIO LINDIG CISNEROS
Suplente: DRA. MA. DEL CONSUELO BONFIL SANDERS

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F. a, 14 de abril de 2009.


Dr. Juan Núñez Farfán
Coordinador del Programa

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

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado en Ciencias Biológicas, por todos los beneficios obtenidos para fortalecer, desarrollar y extender mis conocimientos durante la Maestría en Ciencias Biológicas (Orientación en Biología Ambiental, Restauración Ecológica).

Al CONACYT por el apoyo económico recibido durante los estudios de maestría.

A la DGEP, por la beca otorgada para la realización de éste trabajo.

A la orientación en Restauración Ecológica, por los conocimientos obtenidos.

A la Fundación Packard por el apoyo económico en la adquisición de materiales.

Al proyecto Manejo de Ecosistemas y Desarrollo humano. Las Cuencas del Apatlaco y Tembembe (SDEI-PTID-02) por el apoyo en la adquisición de materiales.

A la Dra. Irma Trejo Vázquez, por su infinita comprensión y por todos los conocimientos aportados durante y después de mis estudios, así como para éste trabajo.

A la Dra. Consuelo Bonfil Sanders, por su valiosa colaboración y su estímulo.

A los miembros del Jurado: Dr. Jorge López Blanco, Dr. José Raúl García Barrios, Dra. Consuelo Bonfil Sanders y Dr. Roberto Lindig Cisneros por todos los comentarios realizados a éste trabajo, y por el largo tiempo dedicado.

A Georgina García Méndez y Luz María Aguilar (Instituto de Ecología) por su gran colaboración durante la maestría y después de ésta.

Índice

II. Índice de Figuras	3
III. Índice de Cuadros	4
Resumen	5
Abstract	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Antecedentes	9
1.1.1 Geomorfología	11
1.1.2 Efectos de la vegetación	14
1.1.3 Modelo Digital del Terreno	15
1.1.4 Índices de vegetación	16
1.1.5 Fragilidad	17
1.2 Objetivos	19
1.3 Descripción del área de estudio	19
1.3.1 Clima	20
1.3.2 Relieve	20
1.3.4 Geología	22
1.3.5 Suelo	23
1.3.6 Vegetación	24
CAPÍTULO 2. MÉTODOS	26
2.1 Delimitación de la Zona	26
2.2 Fotointerpretación y delimitación geomorfológica	26
2.2.1 Digitización de la delimitación geomorfológica	28
2.3 Procesamiento Vectorial	29
2.3.1 Mapa altimétrico	29
2.3.2 Mapa de pendientes	29
2.3.3 Mapa de exposición de ladera	29
2.4 Procesamiento digital de la Imagen SPOT	30
2.4.1 Delimitación de coberturas	30
2.4.2 Estimación de NDVI	31
2.5 Análisis de fragilidad.	31
2.6 Análisis estadístico.	33
CAPÍTULO 3. RESULTADOS	34
3.1 Altimetría, pendientes y orientación	34
3.2 Geomorfología	38
3.2.1 Endógeno volcánico acumulativo	40
3.2.1.1 Sistema morfogénico "Zempoala"	40
3.2.1.2 Sistema morfogénico "El Mirador"	43
3.2.1.3 Sistema morfogénico "El Totoc"	45
3.2.1.4 Sistema morfogénico "El Capulín"	47
3.2.1.5 Sistema morfogénico "Acahualtzingo"	49
3.2.1.6 Sistema morfogénico "Del Aire"	51
3.2.2 Endógeno volcánico acumulativo - exógeno acumulativo aluvial	53
3.2.2.1 Sistema morfogénico Planicie acumulativa "Buenavista"	53
3.2.2.2 Sistema morfogénico "Cuentepec 2"	56
3.2.3 Endógeno estructural plegado	58
3.2.3.1 Sistema morfogénico "La Angostura y Cuentepec"	58
3.2.3.2 Sistema morfogénico "Xochicalco"	60
3.2.3.3 Sistema morfogénico "Laderas andesíticas Xochicalco"	62
3.3 Vegetación y uso del suelo	64

3.3.1 Índice de la vegetación normalizada	65
3.3.2 Vegetación por subcuencas	70
3.3.3 Estado de la vegetación por cuencas	73
3.4. Análisis de fragilidad	77
3.5. Análisis estadístico.	79
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN.	86
4.1 Geomorfología.	86
4.2 Condición de la vegetación.	88
4.3 Fragmentación de la vegetación.	90
4.4 Fragilidad	92
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	94
CAPITULO 6. LITERATURA CITADA	96

II. Índice de Figuras

Figura 1.1 Modelo teórico de los segmentos de la pendiente con la dirección y naturaleza de los procesos dominantes que actúan en cada segmento (Selby, 1982).	13
Figura 1.2. Localización de la cuenca del Río Tembembe en la República Mexicana, Edo. de Morelos. Se muestran los climogramas de las estaciones Ahuatenco, Cuentepec y Xochicalco.	21
Figura 1.2. Localización de la cuenca del Río Tembembe en la República Mexicana, Edo. de Morelos. Se muestran los climogramas de las estaciones Ahuatenco, Cuentepec y Xochicalco.	21
Figura 2.1. Diagrama de flujo de los métodos utilizados	32
Figura 3.1 Mapa altimétrico.	35
Figura 3.2. Mapa de pendientes.	36
Figura 3.3. Mapa de exposición de laderas.	37
Figura 3.4. Tipos de relieve y sistemas morfogenéticos.	39
Figura 3.4.1. Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema Zempoala.	41
Figura 3.4.2. Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema El Mirador.	44
Figura 3.4.3. Morfoestructuras y unidades morfogenéticas sistema El Totoc.	46
Figura 3.4.4. Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema El Capulín.	47
Figura 3.4.5. Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema Acahualtzingo.	50
Figura 3.4.6. Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema Del Aire.	51
Figura 3.5.1 Mapa de los sistemas morfogenéticos del relieve endógeno volcánico acumulativo-exógeno acumulativo aluvial. Planicie acumulativa Buenavista	54
Figura 3.5.2 Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema Cuentepec2.	56
Figura 3.6.1 Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema La Angostura y Cuentepec	59
Figura 3.6.2 Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema La Angostura y Cuentepec	61
Figura 3.7 Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema La Angostura y Cuentepec.	62
Figura 3.8. Ubicación geográfica de las categorías 1, 2 y 3 del NDVI. Las líneas blancas representan las estructuras geomorfológicas.	65
Figura 3.9. Categorías 4, 5 y 6 del NDVI.	67
Figura 3.10. Categoría 7 y agregación de todas las categorías del NDVI.	67
Figura 3.11. Mapa de vegetación y uso de suelo.	69
Figura 3.12. Cobertura relativa porcentual de los tipos de vegetación y uso de suelo en cada subcuenca.	72
Figura 3.13. Condición de la vegetación por secciones.	74
Figura 3.14. Diferentes estados de conservación de la vegetación y el suelo en las secciones. A. Ahuatenco, B. Bosque de Pino en la cabecera de la cuenca; C. zonas erosionadas en Cuentepec. D. Laderas de barranco en Cuentepec.	75
Figura 3.15. Mapa de la condición de la vegetación	76
Figura 3.16. Mapa fragilidad para las geoformas.	78
Figura 3.17. Análisis cluster para las geoformas de la cuenca del Río Tembembe.	79
Figura 3.18. Gráfica de los dos primeros componentes principales.	80

III. Índice de Cuadros

Cuadro 1.1. Área de las secciones de cuenca Alta y Media del Río Tembembe (Gómez, 2003).	20
Cuadro 3.1. Síntesis de variables biofísicas para el sistema morfogenético "Zempoala".	43
Cuadro 3.2. Síntesis de variables biofísicas para el sistema morfogenético "El Mirador".	45
Cuadro 3.3. Síntesis de variables biofísicas para el SM laderas de montaña "El Capulín".	48
Cuadro 3.4. Síntesis de variables biofísicas para el SM "Acahualtzingo".	50
Cuadro 3.5. Síntesis de variables biofísicas para el SM laderas de montaña "Del Aire".	52
Cuadro 3.6. Síntesis de variables biofísicas para el SM "Planicie Aluvial Buenavista"	55
Cuadro 3.7. Síntesis de variables biofísicas para el SM "Lomeríos Cuentepec2"	57
Cuadro 3.8. Síntesis de variables biofísicas para el SM "Lomeríos La Angostura y Cuentepec"	60
Cuadro 3.9. Síntesis de variables biofísicas para el SM "Lomeríos Xochicalco".	62
Cuadro 3.10. Síntesis de variables biofísicas para el SM "Laderas andesíticas Xochicalco".	63
Cuadro 3.12. Vegetación y uso de suelo en Tlaltizapán y Mexicapa.	70
Cuadro 3.13. Vegetación y uso de suelo en Ahuatenco.	71
Cuadro 3.14. Vegetación y uso de suelo en Cuentepec y Xochicalco.	71
Cuadro 3.15. Condición de la vegetación.	73
Cuadro 3.16. Porcentaje de la vegetación por sección (subcuencas).	74
Cuadro 3.17. Abreviaturas de los sistemas morfogenéticos.	81

Resumen

Uno de los principales problemas que afectan a los ecosistemas en México es la deforestación, se calcula que el 64% del total de la superficie del territorio nacional presenta degradación en diferentes niveles (Semarnat, 2008). En particular, el estado de Morelos tiene una baja disponibilidad de agua, por lo cual la agricultura y los centros urbanos ejercen una fuerte presión hacia las zonas boscosas, lo que resalta la importancia de uno de los ríos con mayor influencia: el Río Tembembe, que presenta en su cuenca vegetación templada bosques de encino, pino y bosque mesófilo de montaña al límite con el estado de México, así como selva baja caducifolia (CETENAL, 1979).

El establecimiento de la estación de restauración “Barrancas del río Tembembe”, pretende ayudar en el diseño de estrategias para la conservación, restauración y el manejo de esta cuenca, de gran importancia para la ciudad de Cuernavaca (García-Barrios, 2002).

En este contexto y ante la necesidad de planificar la información ambiental de la zona, surge el interés de conocer el estado de conservación de la vegetación, con base en la delimitación geomorfológica de la cuenca del Río Tembembe; a fin de obtener una regionalización para los trabajos de restauración (ej. establecimiento y crecimiento de plántulas) basada en la naturaleza del área, y facilitar la planeación del trabajo de campo.

Se realizó un análisis espectral de imagen SPOT (2004) utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), para conocer el estado de la vegetación basados en la densidad de la cubierta vegetal. Al mismo tiempo, con fotografías aéreas escala 1:37,500 (INEGI) se delimitaron sistemas morfogénicos y unidades geomorfológicas (Tapia-Valera y López-Blanco, 2002). A las que se asignaron los resultados de los análisis espectrales, además de las variables climáticas de temperatura y precipitación obtenidos por interpolación (kriging) a partir de información de las estaciones climáticas. Integrando la información en un sistema de información geográfica, con la información cartográfica de geología, edafología y vegetación, además de las variables topográficas.

Se delimitaron un total de 1,253 geoformas, agrupadas en 101 morfoestructuras y finalmente en 10 sistemas morfogenéticos que fueron designadas de acuerdo con el origen y tipo del relieve, la litología y su temporalidad, así como la clase geométrica, adicionando el nombre de la población o rasgos cercanos. El origen del relieve en la zona es de tres tipos: Endógeno volcánico acumulativo, Endógeno volcánico acumulativo-Exógeno acumulativo aluvial y Endógeno estructural plegado y está agrupado de la siguiente forma por los sistemas morfogenéticos:

- 1) Endógeno volcánico acumulativo: Laderas de montaña “Acahualtzingo”, Laderas de montaña “Del Aire”, Laderas de montaña “El Capulín”, Laderas de montaña “El Mirador” Laderas de montaña “Zempoala” y Laderas de montaña “ El Totoc”.
- 2) Endógeno volcánico acumulativo-Exógeno acumulativo aluvial: “Planicie acumulativa “Buenavista” y los Lomeríos Cuentepec2.
- 3) Endógeno estructural plegado. Lomeríos La angostura y Cuentepec, Lomeríos Xochicalco y Laderas andesíticas Xochicalco.

El análisis espectral de la imagen de satélite delimitó que las subcuencas medias (Ahuatenco) predominan los bosques mixtos de *Pinus-Quercus* donde se inicia la transición de los elementos de Bosque templado a Selva Baja Caducifolia, así como Selva Baja Caducifolia en las subcuencas de Cuentepec y Xochicalco. Así mismo, la mayor proporción de pastizal y la agricultura de temporal se localizan al Este y Oeste de la subcuenca de Cuentepec favorecidas por la naturaleza del relieve.

Las coberturas más extensas y conservadas se localizan en la parte norte (Subcuenca Tlaltizapán y Mexicapa), donde las fuertes pendientes han limitado el acceso y la explotación del recurso. En las secciones Cuentepec y Ahuatenco, la vegetación presenta un mosaico más complejo y fragmentado, que se ve afectada por la geomorfología del área además de su historia de manejo y abandono que derivan en un alto porcentaje de erosión y pérdida de horizontes de suelo (Olvera *et al.*, 2000). La sección Xochicalco, presenta características muy particulares, con relación a la vegetación y su condición relacionada con la protección del área arqueológica.

Abstract

The Tembembe River is an important affluent for the Morelos State in Mexico. The Morelos State has a limit water disposer. The loss of vegetation coverage, soils and the change of land use has provoked a reduction of water disposal. The importance of make protected areas and the restoration ecology in there that are most priority can to reduced the cost and time. In this context, the geomorphological delimitation is a tool very important. Geomorphology is especially useful on sites where the natural vegetation composition, soils, and/or water regimes have been altered by past disturbance, either natural or human/induced. The National University of Mexico establishment the Ecological Restoration Station of the Ravine of the Tembembe River and the analysis of the environmental characteristics is important.

This study, aims to prepare a geomorphological map, which can be used for multipurpose. The map is based upon interpretation of the aerial photographs (1: 37,500). A geographical information system (ILWIS) was utilized for map digitization, for the generation of a digital elevation model (DEM), and for the spatial analysis. We used a remote sensing for know the vegetation coverage and your conservation state, has used a spatial enhanced image (SPOT), and normalized difference vegetation index (NDVI) carried out. A total of 1253 geophorms was limited, and together environmental variables (altitude, slope, and aspect) where analyzed using multivariate classification. The geoformas was assembled in three relief's types, based in your origin: endogenous volcanic accumulative, endogenous volcanic accumulative/exogenous accumulative alluvial and endogenous structural fold; a total eleven morphogetics systems was definite.

The Mexicapa basin and Tlaltizapan basin are the best condition for conservation, with vegetation template; while the Cuentepec present the most degraded state with soils loss and reduced vegetation coverage. Finally, the Ahuatenco basin and Xochicalco basin are transition state, with tropical dry forest in different compositions.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas poseen características y propiedades que les permiten responder a las perturbaciones del ambiente, pero la influencia de la intensidad y la duración de la perturbación es crucial, en ciertos casos los daños son demasiado severos, intensos o prolongados y afectan los procesos sucesionales reduciendo la habilidad del ecosistema para recuperarse en forma natural (Bradshaw, 1983). Incluso pueden llegar a abatir las características físicas o bióticas del mismo, impidiendo que recupere su estructura, composición de especies y funcionalidad. (Brown y Lugo, 1990).

Las afectaciones físicas que se producen como consecuencia de los cambios en el uso de suelo, están asociadas a una pérdida de especies y fragmentación de los ecosistemas, es decir el rompimiento de la continuidad de los hábitats convirtiéndolos en elementos aislados (Meffé y Carroll, 1994)

Actualmente, si se considera la alta diversidad biológica, de ecosistemas, hábitats, relieves y climas existentes en México; el cambio de uso de suelo en país, y los factores socioeconómicos que repercuten en el control, manejo y restauración de los ecosistemas, resulta necesario hacer una valoración de los factores que influyen de forma conjunta, considerando las diferentes escalas espaciales y temporales en los que operan. (Cotler, *et. al.*, 2005).

Pueden utilizarse diversos criterios para delimitar la planeación y el análisis, como el enfoque de cuencas hidrológicas, la delimitación política, jurisdicción, unidades de paisaje o unidades geomorfológicas y unidades biofísicas. Sin embargo, se ha fortalecido el uso de las delimitaciones naturales, justificados en la continuidad de los ecosistemas más allá de los límites políticos y en este contexto, la regionalización geomorfológica, es una metodología utilizada frecuentemente. Se basa en criterios de origen del relieve, forma, estructura y altura relativa, que permiten relacionar las unidades derivadas con los factores bióticos y sus interacciones. Su agrupación jerárquica permite trabajar a diferentes escalas espaciales de acuerdo con las necesidades de los objetivos planteados. La asociación del

criterio anterior con el enfoque de cuencas hidrográficas permite definir límites funcionales, así como los procesos que controlan la dinámica en el ecosistema (Maass y Cotler, 2007).

La delimitación de unidades ambientales homogéneas, integrada con los criterios de cuencas hidrográficas y los insumos obtenidos de la interpretación de la cobertura vegetal a través de técnicas de percepción remota, puede utilizarse como base para detectar necesidades de restauración, manejo de los ecosistemas, ordenamiento territorial y ecológico, localización de áreas vulnerables a erosión, o zonas susceptibles de manejo forestal, por citar algunos ejemplos (Maass y Cotler, 2007; Cotler, *et. al.*, 2005).

1.1 Antecedentes

Uno de los principales problemas que afectan a los ecosistemas en México es la deforestación, asociada a los cambios en el uso de suelo, como es la conversión de bosques a pastizales para el ganado. Las altas tasas de deforestación ponen en riesgo al país ya que el manejo de pastizales favorece también los incendios forestales; además la pérdida de la cobertura forestal disminuye las tasas y ritmos de infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo.

A nivel nacional la superficie forestal total (considerando bosques templados y tropicales) en el año 2000 era de 636,679 km². De acuerdo con Semarnat (2008) la tasa de cambio para bosques templados era de 259 mil ha/año, mientras que en los bosques tropicales y selvas era 510 mil ha/año, y para la vegetación de zonas áridas de 307 mil ha/año. De 1993 al 2002 se redujo la cobertura de los bosques en 1,815 ha es decir el 5.24% de su cobertura total, mientras que las selvas presentaron en el mismo período una reducción de 3,571 ha, que representa el 10.38% de su cobertura Semarnat (2008). Recientes análisis estiman que en México se perdieron 29,765 km² de bosque (superficie equivalente al estado de Guanajuato) de 1976 a 1993, mientras que de 1993 a 2000 se perdieron 54,306 km² (superficie equivalente al estado de Campeche). La tasa de deforestación aumentó del primer al segundo periodo, de 175 mil hectáreas a 319 mil hectáreas anuales (Velásquez *et al.* 2002).

En particular, el estado de Morelos tiene una baja disponibilidad de agua, presenta una fuerte presión de la agricultura y los centros urbanos hacia las zonas boscosas y es común la presencia de incendios forestales. De la superficie de suelos degradada en el estado, el 56% corresponde a degradación química, principalmente a la pérdida de fertilidad y de materia orgánica, el 25% a la erosión hídrica y sólo el 10% a la degradación física (Semarnat, 2008).

La vegetación más importante en el estado es la Selva Baja Caducifolia (SBC); sus asociaciones están dominadas por árboles de baja estatura (entre 8 y 12 m), con copas extendidas y estrato arbustivo denso. También se presenta vegetación templada, principalmente bosques de encino, pino y bosque mesófilo de montaña hacia el límite con el estado de México (Semarnat, 2008).

Ante la problemática ambiental en el estado, se han realizado diversos proyectos para mejorar el conocimiento y planificación de los programas de restauración. La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se encuentra comprometida desde hace algunos años con el saneamiento de las barrancas y la conservación de la biodiversidad del norponiente del estado, donde desarrolla ya varios proyectos de investigación e intervención socio-ambiental (García-Barrios, 2002).

Las cuencas y barrancas del Alto Apatlaco-Tembembe tienen importancia estratégica, ya que de ellas depende la recarga del acuífero “Cuernavaca”, que abastece la ciudad del mismo nombre, y tienen efectos directos en el clima de la región y la biodiversidad que ésta mantiene.

La historia de manejo en la zona del río Tembembe, comprende actividades que ocasionaron sobrepastoreo y cultivos que han derivado en baja productividad y altas tasas de erosión que alcanzan las 80 ton/ha⁻¹, induciendo al abandono de áreas dedicada a la agricultura y ganadería (García-Barrios, 2002).

Así, en Octubre de 2002 la población indígena de Cuentepec, tomó el acuerdo de destinar parte de sus tierras de uso común, situadas a lo largo de lo taludes del río Tembembe, a la

restauración de la vegetación mediante un acuerdo de comodato con la UNAM, con el propósito de recuperar los servicios ambientales y productivos (García-Barrios, 2002).

El establecimiento de la estación de restauración Barrancas del río Tembembe (Bonfil *et al.*, 2004) tiene como objetivo implementar estrategias para la conservación, restauración y el manejo de esta cuenca; pretende establecer y fomentar la vinculación y cooperación social universitaria, impulsando proyectos de rehabilitación de los suelos agrícolas y ganaderos del pueblo de Cuentepec. Así como, programas de saneamiento ambiental, capacitación y educación ambiental (García-Barrios, 2002).

En este contexto, y ante la necesidad de planificar y organizar la información ambiental de la zona, surge el interés de realizar la delimitación geomorfológica de la cuenca del Río Tembembe, como parte de las primeras fases de trabajo, a fin de obtener una regionalización para los trabajos de restauración basada en el conocimiento y descripción del área, de tal forma que sea posible simplificar y planificar el trabajo de campo y hacer los resultados experimentales comparables entre sí.

Actualmente, algunas de éstas características pueden evaluarse por métodos indirectos, como la valoración de las absorbancias y reflectancias de la luz en la vegetación y el suelo a través del análisis de imágenes de satélite (Estes y Thurley, 1984) y el análisis geomorfológico (Montes, 2005). En este contexto, los sistemas de información geográfica son herramientas para el análisis de datos espaciales que permiten adoptar nuevas tecnologías e integrarlas para analizar procesos ecológicos, dispersión de fauna, uso de hábitat, análisis de paisaje y composición de comunidades (Demers, 2000; Martínez, 2002; Tapia-Varela y López-Blanco, 2002).

1.1.1 Geomorfología

En años recientes la geomorfología ha tenido una gran importancia para el estudio del paisaje (Arellano, 2001; Rhoads, 2006). Los mapas geomorfológicos son documentos que sirven como fuente de información cartográfica para los estudios de recursos naturales, poseen una dimensionalidad de aplicación a problemas específicos (Verstappen, 1983) y su principal propósito es realizar una síntesis del relieve de acuerdo a su origen, edad,

evolución y procesos modeladores (Tapia-Valera y López-Blanco, 2002) a partir de la información geológica y topográfica (Lugo-Hubp, 1991). En este contexto el mapeo morfogenético es la representación cartográfica en función del origen, tipo, edad y geometría del relieve.

Así, el objetivo de la delimitación es obtener áreas homogéneas ligadas a una base de datos geográficos que permitan caracterizar, describir y agrupar sus propiedades ambientales, así como establecer y proponer la mejor aptitud del uso de suelo, obteniendo con ello una síntesis del paisaje que permite un manejo integrado de los recursos presentes (López-Blanco, 1994); o bien en las primeras etapas de planeación, así como para el establecimiento de programas de recuperación ambiental (Tapia-Valera y López-Blanco, 2002; Montes Cruz y López-Blanco, 2004).

La construcción del mapa geomorfológico y la delimitación de las unidades permite conocer la diversidad de geoformas en la zona. Crawley (1998) menciona que la heterogeneidad espacial del ambiente tiene una gran importancia ecológica debido a que influye en el número de hábitas disponibles.

La geomorfología además ha sido relacionada con la vegetación, tanto para explicar patrones de distribución y de composición natural de la vegetación como para restaurar y manejar sitios que han sido alterados por disturbios pasados, incluidos los propiciados por el hombre (Kovalchik, 1990; García-Aguirre *et al.*, 2007).

Los procesos geomorfológicos influyen en la pedogénesis de la zona, en el paisaje y formación del relieve, así como en la sucesión ecológica y las condiciones de restauración (Ruhe, 1975; Selby, 1982). Entre los más significativos se encuentran los procesos de laderas, los cuales están directamente controlados por la fuerza de gravedad.

Después de rebasar la capacidad de infiltración de los suelos, el agua se desplaza pendiente abajo como un flujo subsuperficial, causando erosión y depositación. Aunque la forma de la pendiente, en combinación con la cobertura determina el flujo y la erosión, la

pérdida de suelo está directamente relacionada con la pendiente y su longitud. La figura 1.1 representa la dirección y los procesos en laderas.

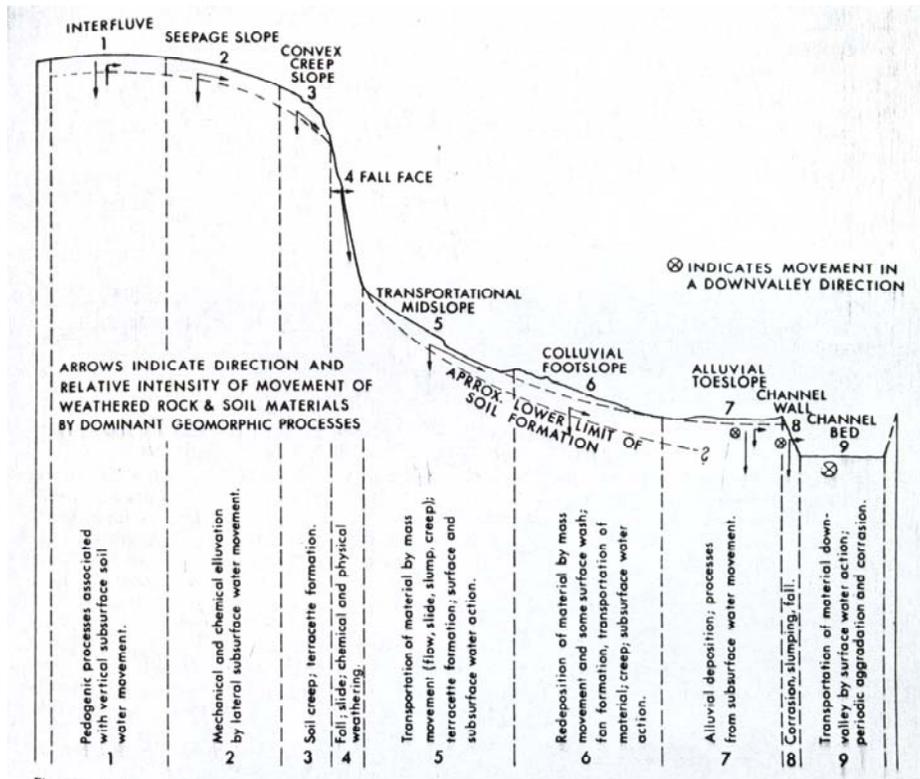


Figura 1.1 Modelo teórico de los segmentos de la pendiente con la dirección y naturaleza de los procesos dominantes que actúan en cada segmento (Selby, 1982).

Los procesos más importantes que se generan en las laderas y tienen una fuerte influencia en la modificación del paisaje y sus características son: la remoción en masa, la acumulación hídrica y la erosión. La remoción en masa consiste en un movimiento masivo de materiales por la influencia de la gravedad; se distinguen por su velocidad en dos tipos, fenómenos rápidos (caída, deslizamientos, flujos) y lentos (reptación, soliflucción). El modelado hídrico es el movimiento del agua en la superficie del terreno, y está relacionado con el tipo de erosión (pluvial, laminar, linear o subsuperficial) (Selby, 1982).

La erosión pluvial, ocasionada por las gotas de lluvia, afecta directamente a los agregados del suelo, liberando y movilizandopartículas, provocando la colmatación de los poros que evita la infiltración del agua a profundidad (Selby, 1982; Brady, 1999). Los factores que determinan el grado de la erosión pluvial son la cobertura vegetal, el suelo (textura y

estructura), tipo de lluvia y el grado de la pendiente. Con la impermeabilización del suelo inicia la erosión laminar, saturando el suelo superficial e iniciando el escurrimiento, que favorece la formación de surcos y cárcavas (erosión lineal). Por lo tanto, el transporte de partículas de suelo por el flujo subsuperficial de agua, transporta limos, arcillas, sustancias orgánicas, etc., y su importancia radica en el desarrollo de suelos de las partes alta y baja de las laderas.

La erosión del suelo, está determinada por diversos factores como la erosividad, es decir la capacidad de las lluvias de erosionar el suelo; la intensidad de la lluvia y su duración; la erodabilidad, que se refiere a la susceptibilidad del suelo a ser erosionado y está relacionada con las propiedades físicas y químicas del suelo (la textura, la estabilidad de los agregados, la capacidad de infiltración, el contenido de materia orgánica, el tipo de arcilla); la influencia del relieve debida al grado de la pendiente y la longitud de esta, además del uso de suelo y su manejo (Selby, 1982; Brady, 1999).

Aproximadamente el 64% de los suelos del país presentan problemas de degradación en diferentes niveles, de este porcentaje el tipo de erosión más importante es la erosión hídrica que afecta aproximadamente 73 millones de ha (CONAFOR, 2004).

1.1.2 Efectos de la vegetación

La vegetación es un factor que contrarresta fuertemente la erosión causada por otros agentes (clima, topografía y suelo). Sus principales efectos son:

1. Intercepción de la lluvia por el dosel de la vegetación.
2. Decremento en la velocidad de la corriente, al interrumpir el flujo del agua y su capacidad para trasladar sedimentos.
3. Efectos de las raíces, que incrementan la estabilidad del suelo, y afectan su textura y porosidad.
4. Actividades biológicas asociadas con la vegetación y su influencia sobre la porosidad del suelo.
5. Transpiración del agua, principalmente por el subsecuente drenaje fuera del suelo.
6. Amortigua al suelo de los cambios de temperatura.

La intercepción del dosel de la vegetación con las gotas de lluvia impide que éstas alcancen el suelo directamente (permite que una parte del agua se evapore directamente de las hojas y tallos) absorbiendo además, el impacto de las gotas de lluvia y reduciendo la fuerza de éstas sobre la estructura del suelo. Así, una cubierta vegetal densa, no sólo reduce la velocidad, también previene la formación de canales y cárcavas. Además del efecto de la vegetación en la protección del dosel y las raíces, la acumulación de arcillas en la superficie también reduce el impacto de la lluvia (Selby, 1982; Henbo, 2004).

1.1.3 Modelo Digital del Terreno

En la actualidad, los procesos dinámicos superficiales son de gran interés para la investigación de las relaciones existentes entre los atributos geométricos y morfológicos y las tipologías de los distintos procesos erosivos, hidrológicos y gravitacionales (Lugo, 1991). La elaboración de cartografía geomorfológica, con base en el conocimiento de los procesos que ocurren como resultado de la interacción del tipo de roca y relieve, incorpora además información proveniente de levantamientos de suelo, muestreo de vegetación y uso del suelo actual.

Los modelos digitales de terreno (MDT) son bases de datos geográficos que describen las diferencias en el relieve de una cuenca. Se elaboran en un Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante interpolación de datos de altitud, de tal manera que, con una cierta resolución, cada porción de la cuenca recibe un cierto valor de elevación. De éstos se puede derivar el trazado de cauces y parteaguas. Permite la construcción de pisos altitudinales, y de mapas de inclinación y exposición que son importantes en los modelos de escorrentía y erosión (Bocco, 2004; Cobos, 2006).

Los mapas que contienen información relacionada con el aspecto y la inclinación de la ladera, se generan a partir del MDT y posteriormente se asignan a los píxeles valores de azimut en grados, considerando el cero como norte y 90° el este, 180° para el sur, 270° para el oeste. Está información tiene aplicaciones en estudios específicos sobre laderas dado la detección de alineamientos producidos por fallas o fracturas de origen tectónico

(López Blanco et al., 1996). La importancia de la exposición radica en la cantidad de luz que recibe el terreno por los tiempos de exposición a la radiación solar que tienen las diferentes exposiciones (Poortes et al., (2005).

1.1.4 Índices de vegetación

Algunos métodos para interpretar la cobertura vegetal de manera indirecta son los índices de vegetación. Son útiles en la diferenciación de la vegetación, aunque se utilizan principalmente para conocer su estado de conservación o bien para distinguir entre elementos como los suelos y la vegetación en la porción visible e infrarrojo cercano (IRC) del espectro electromagnético, así como para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral. Uno de los más utilizados es el Índice de vegetación de diferencias normalizado (NDVI).

Un aspecto de gran interés es que los valores del NDVI varían en un intervalo entre -1 y $+1$, lo que facilita la interpretación; por ejemplo es posible señalar el umbral crítico para cubiertas vegetales en un valor de NDVI en torno de 0.1 y para la vegetación densa entre 0.5 y 0.7 (Holben, 1986; Chuvieco, 2002).

Las interpretaciones del NDVI, aun no se encuentran del todo explotadas, se ha buscado la posibilidad de relacionarlo con otros factores, como los fenómenos de crecimiento y estacionalidad de la vegetación y los cultivos. Gamon et al., (2005) caracterizaron la conducta fotosintética de diversas especies presentes en el dosel utilizando indicadores de los componentes estructurales y fisiológicos, concluye que el NDVI muestra una estrecha correlación con la estructura y la radiación absorbida; pero no detecta los cambios en las variaciones fotosintéticas, ni variaciones en el flujo de CO_2 .

Kalacska et al., (2005) relacionan el NDVI con el índice de área de las plantas (PAI) y el índice de área foliar (LAI) e indirectamente con la estructura vegetal de la comunidad. La estrecha relación que existe entre la composición de especies y la fenología de la vegetación con respecto a la estacionalidad, modifica los patrones de la relación rojo-infrarrojo. Por lo que no es factible utilizarlo para representar las relaciones PAI/LAI. Sin

embargo, puede ser utilizado para diferenciar etapas sucesionales de la SBC, ya que se ha relacionado con la distribución del dosel y la estructura vertical (Arroyo-Mora *et al.*, 2005) por lo que puede utilizarse para identificar y delimitar comunidades secundarias.

Para el procesamiento tanto del NDVI como para el mapeo de las unidades geomorfológicas, las bandas 5, 4 y 3, relacionadas con los rojos e infrarrojos son las más empleadas. (Maksud y Midorikawa, 2004).

1.1.5 Fragilidad

El medio ambiente está formado por elementos naturales que son influenciados en diversos grados por acción natural y la acción humana, como los incendios, derrumbes; las áreas urbanas, minas, presas, etc. Sin embargo, las condiciones de asimilación de los impactos naturales y antrópicos son muy diferentes dependiendo de la capacidad del medio. A partir de esta idea, se han manejado los conceptos de resistencia, resiliencia y fragilidad (Peterson, *et. al.*, 1998).

La resistencia muestra la habilidad de una unidad del paisaje para evitar desplazamientos desde el lugar inicial o estado de equilibrio dinámico. La capacidad de permanencia o resistencia dependerá del arreglo y la estructura de los componentes que integran la unidad territorial, así como de la magnitud de la presión ejercida. A la capacidad de retorno al estado inicial, se le llama elasticidad y a la velocidad a la cual regresa a su estado se conoce como resiliencia. La asociación de la resistencia y la resiliencia es la fragilidad, que de manera general se considera como la capacidad intrínseca de la unidad territorial a enfrentar agentes de cambio, basados en la fortaleza de los componentes y en la capacidad y velocidad de regeneración del medio. Así la fragilidad territorial está determinada por la correlación del relieve, la inclinación del terreno, el tipo de suelo y la comunidad vegetal (Sánchez *et al.*, 2005; Semarnap, 2000; Peterson, *et. al.*, 1998).

Las afectaciones físicas que se producen como consecuencia de los cambios en el uso de suelo, están asociadas a una pérdida de especies y fragmentación de los ecosistemas, es decir el rompimiento de la continuidad de los hábitats y de la integridad de sus procesos ecológicos (Meffé y Carroll 1994). Por tal motivo, al restaurar un ecosistema es conveniente

considerar no sólo el componente biótico y el físico sino las relaciones que existen dentro y entre los mismos, así como el conjunto de interacciones que ocurren al interior del ecosistema, y entre éste y los ecosistemas o paisajes aledaños. Considerar estos aspectos antes de comenzar un aprovechamiento o realizar la restauración al finalizar el mismo, permite que antes de afectar un sitio se consideren características relacionadas con las propiedades de los ecosistemas como la fragilidad, la resistencia y la elasticidad, vinculadas a la capacidad del ecosistema para recuperar sus propiedades originales y que dependen de que su riqueza y composición de especies nativas no se deteriore; de que la estructura física formada por suelo, agua, microorganismos, hongos, plantas conserve la integridad de sus procesos ecológicos (Márquez-Huitzil, 2005; Nilsson y Grelsson, 1995).

En la planeación de trabajos de conservación y restauración de suelos, ya sea para la construcción de obras de captación in situ o en aquellas para frenar el avance de las cárcavas, es necesario conocer el comportamiento de los escurrimientos superficiales de cada área. Algunos ejemplos de las medidas utilizadas para controlar la erosión e impedir el crecimiento de las cárcavas son las presas de malla, presas de morillos, de ramas o bien de piedra acomodada. En la actualidad se han incorporado a estas técnicas materiales de desecho como llantas, geocostales y gaviones comerciales; también se pueden emplear técnicas como formación de terrazas y zanjas de bordo (Conafor, 2004). De acuerdo con Arreaga (1994) las características ambientales a considerar para reforestar son:

- Profundidad del suelo (por lo menos 30 cm)
- Textura que permita la infiltración de agua.
- 80% de presencia de estrato herbáceo
- Erosión ligera o bien controlada por prácticas de conservación de suelo.
- Disponibilidad de propágulos de condiciones ambientales similares a las zonas a reforestar.

Sin embargo, en suelos muy compactos o degradados aún los métodos de restauración más utilizados varían sus resultados esperados, tanto en la porcentaje de supervivencia, como en el desarrollo de la planta o en la captación de agua; y a su vez la planta modifica las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

1.2 Objetivos

General

Generar un mapa de unidades geomorfológicas y de vegetación para aplicar criterios de conservación y restauración e identificar las zonas con necesidades de protección o restauración.

Particulares

- Identificar el origen y tipo de relieve en la zona.
- Delimitar unidades estructurales de relieve homogéneo.
- Elaborar un mapa morfogenético de la zona.
- Delimitar áreas homogéneas de vegetación y sus coberturas recientes.
- Evaluar el porcentaje de cobertura vegetal de las unidades delimitadas.
- Relacionar las capacidades espectrales para obtener criterios de condición de la vegetación.
- Conocer la fragilidad y fragmentación de las comunidades vegetales delimitadas.
- Elaborar un sistema de información geográfica (SIG) con la información generada para ubicar geográficamente las zonas elegidas.
- Identificar las áreas susceptibles de restauración, aprovechamiento y conservación.

1.3 Descripción del área de estudio

La cuenca del río Tembembe se ubica al noroeste del Estado de Morelos y al sureste del Estado de México, (19°04'-18°62' latitud norte; 99°43'-99°29' longitud oeste); pertenece a la Región Hidrológica No. 18 Río Balsas, en la cuenca río grande de Amacuzac 18FF (Figura 1.2). Tiene una superficie total de 32,535 ha, (Cuadro 1.1) es de tipo exorreica y su longitud axial es de 45.2 km, con un ancho promedio de 16 km Fue subdividida para su manejo en: Alto Tembembe, Medio Alto Tembembe, Medio Bajo Tembembe y Bajo Tembembe (Gómez, 2003).

Sección	Área (ha)	Perímetro
Tlaltizapán	2,149.06	20,543
Mexicana	863.15	16,966
Ahuatenco	1,503.53	18,378
Cuentepec	1,126.55	23,269
Xochicalco	1,116.13	26,560

Cuadro 1.1. Área de las secciones de cuenca Alta y Media del Río Tembembe (Gómez, 2003).

Políticamente, la zona se ubica en los estados de Morelos y México, en los municipios de Cuernavaca, Temixco, Miacatlán y el municipio de Ocuilán de Arteaga respectivamente; en este último se localiza la cabecera de la cuenca, y su mayor extensión.

1.3.1 Clima

La cuenca presenta un gradiente altitudinal al que se asocia una variación climática que incluye clima templado, semicálido y cálido subhúmedo. En la parte norte (estación Ahuatenco, 1,916 msnm) el clima templado subhúmedo, con una temperatura media anual de 17.4°C y una precipitación anual de 1,160 mm En la parte baja, es cálido subhúmedo con una temperatura media anual de 22.8°C y una precipitación anual de 1,055 mm La temporada seca se extiende de noviembre a mayo (Camacho *et al.*, 2006) (Figura 1.2).

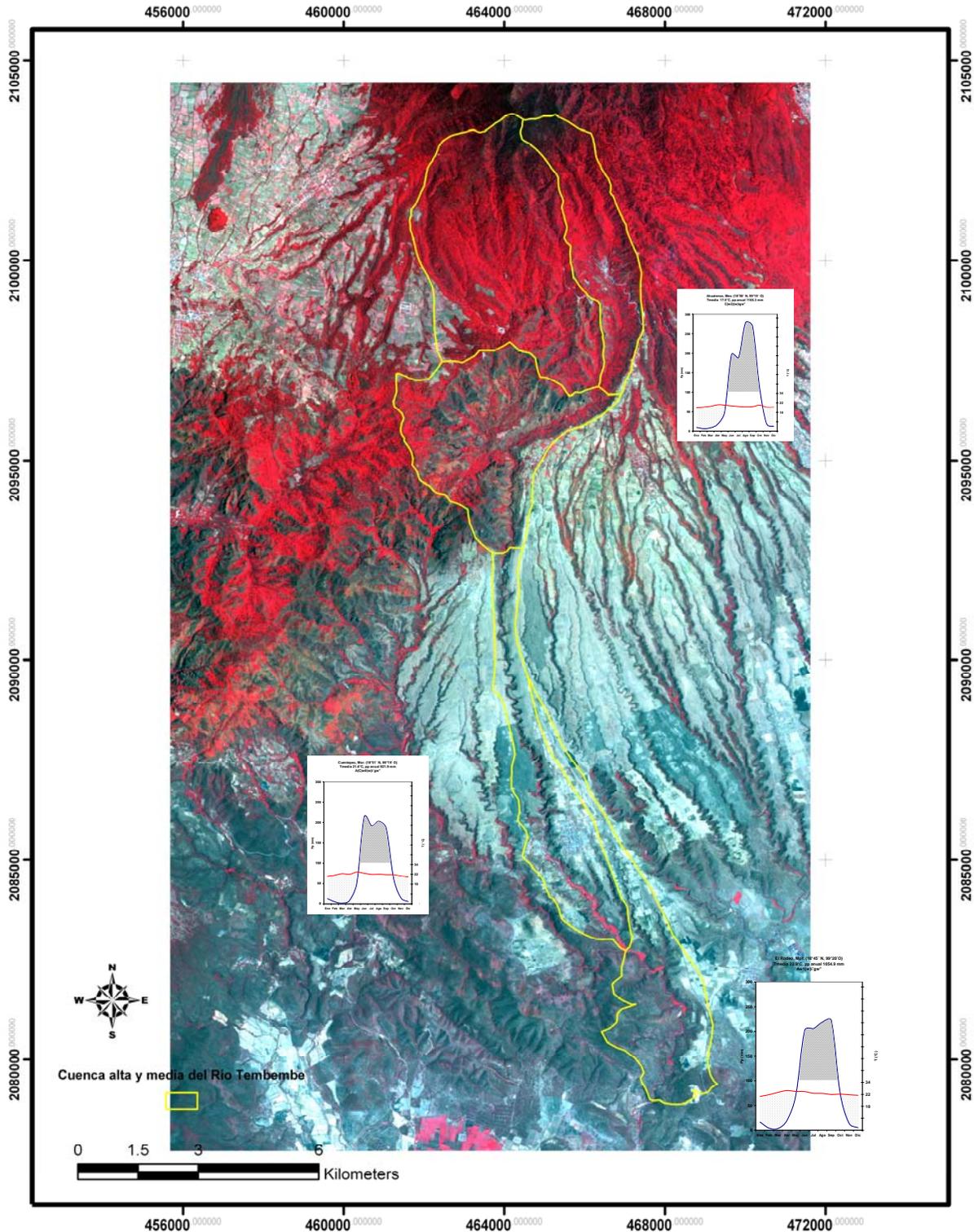
1.3.2 Relieve

De acuerdo con Aguilar (1999) el relieve en la zona es principalmente de tres tipos: a) endógeno, b) endógeno modelado y c) exógeno. A continuación se describe brevemente cada uno:

- A. Relieve endógeno volcánico acumulativo, de coladas lávicas y domos basálticos. Una de estas coladas se encuentra en el extremo noroeste conocida como “La Colada de la Gloria” (LG) y “La Mesa el Tabaquillo”. Martín (1980) explica que el derrame de LG llega hasta la capital del estado, donde entra en contacto con la formación “Cuernavaca” y da origen al Salto de San Antón.



Figura 1.2. Localización de la cuenca del Río Tembembe en la República Mexicana, Edo. de Morelos. Se muestran los climogramas de las estaciones Ahuatenco, Cuentepec y Xochicalco.



- B. Relieve endógeno modelado de montañas de plegamiento con erosión leve, constituidos por rocas calcáreas cretácicas plegadas. Al Oeste de Morelos, con dirección noroeste-sureste corresponden a las Sierras de Xochicalco, Ocuilan, Chalma y Cacahuamilpa, constituidas por caliza y dolomita, así como por lutita y areniscas calcáreas.
- C. Relieve exógeno acumulativo erosivo de pie de monte (PM). El PM de la formación Cuernavaca ha sido cubierto en su parte oriental por lavas del Chichinautzin, designada por Ortiz (1977) como “Glacís” de Buenavista, formado en épocas glaciales del pleistoceno, a partir del intemperismo físico de la S. de Zempoala, lo que ocasionó una fuerte gelifracción. Posteriormente, las lluvias torrenciales dieron lugar a la soliflucción, transportando las rocas previamente intemperizadas. Finalmente, concluye que al encontrarse la Sierra de Xochicalco como una barrera, las rocas transportadas sufrieron un proceso de acumulación, colmatación y desbordamiento y así cubrieron las rocas cretácicas que se localizan en el centro oriente de la entidad.
- D. Relieve exógeno erosivo de “Karst” del cuaternario, se ha desarrollado al suroeste de la cuenca, rodeada por el complejo oligomiocénico y volcánico y por las sierras cretácicas plegadas. Dos factores lo han determinado: el drenaje y la estructura geológica; ocupa miles de kilómetros de la superficie del estado. Por su composición influyen en la existencia de dolinas como las de Alpuyeca, Coatetelco y El Rodeo. Son muy susceptibles a ser erosionadas por el agua.

1.3.4 Geología

La litología de la cuenca está representada por andesitas, basaltos, areniscas y conglomerados; así como calizas, riolitas, dacitas y piroclastos, y materiales de conos volcánicos y suelos residuales. Martínez (2002) presenta un resumen de las diferentes formaciones y grupos de roca:

1. Formación Xochicalco y Morelos. Cretácico. La primera está constituida por calizas y lutitas, Interestratificadas en capas delgadas. Afloran desde la zona arqueológica del mismo nombre hasta el límite noroeste del estado; la segunda de calizas y dolomitas, se distribuye ampliamente por todo el estado, presenta erosión karstica.

2. Riolita Tilzapotla. Oligoceno. Brecha riolítica. Se encuentra en las cercanías del lago de Tequesquitengo y Tilzapotla.
3. Granito Colotepec. Pre-mioceno. Se encuentra intrusionado en la formación Xochicalco, al sureste de la zona arqueológica y noroeste del cerro de Colotepec.
4. Volcanes y coladas de Zempoala. Plioceno. Andesita. Se localizan en la cabecera de la cuenca, al noroeste de Cuernavaca, constituyen la Andesita Zempoala del Plioceno.
5. Formación Cuernavaca o Glacís de Buenavista. Constituido por depósitos clásticos continentales poco consolidados de la Andesita Zempoala y piroclastos, pómez y materiales aluviales.
6. Depósitos clásticos continentales. Pleistoceno, posteriores a la formación Cuernavaca, no formados por lavas. Incluyen materiales poco o nada consolidados como detritos angulosos hasta arcillas y limos.
7. Aluviones. Cuaternarios. Sedimentos de depósitos clásticos. Se distribuyen en todo el estado de Morelos en las partes planas, bajas y altas, piedemontes locales y planicies aluviales.

1.3.5 Suelo

Los suelos en el área de estudio son derivados de rocas calizas, basálticas y andesíticas, además de cenizas y materiales fluviales.

El Glacís de Buenavista, por ejemplo, es una estructura geomórfica formada por repetidos períodos de sedimentación y degradación que permitieron procesos coluviales en el Pleistoceno. Los conglomerados y materiales detríticos derivan de rocas andesíticas de la formación Zempoala (Terciario), y se encuentran entreverados con flujos de lava, ceniza y depósitos de lahares de diferentes espesores, que constituyen la formación Cuernavaca, del Pleistoceno tardío (Fries, 1960; Ortíz-Pérez, 1977). Como consecuencia de procesos geológicos naturales, en el Glacís se ha creado un sistema erosivo compuesto por 6 barrancas mayores y cerca de 500 menores (García-Barrios, 2002).

Los suelos actuales pueden diferenciarse de acuerdo con la altitud. A elevaciones mayores a 2,200 msnm se presentan Cambisoles y Andosoles, bajo los bosques de Pino; los luvisoles ocurren entre los 2,200 y los 1,900 msnm, algunas veces con horizonte andico en la superficie (desarrollado por cenizas recientes). Finalmente entre los 1900 y 1800 msnm, se presentan luvisoles asociados con horizontes cementados de tepetates (Solleiro-Rebolledo *et al*, 2003).

1.3.6 Vegetación

La conjunción de los gradientes altitudinal y climático, se relaciona con la distribución de la vegetación en la cuenca del Tembembe, en donde se establecen elementos de afinidad neártica y neotropical. En este gradiente de vegetación, las comunidades que están presentes son la selva baja caducifolia, bosques de encino, bosques de pino-encino, bosque mesófilo de montaña y porciones de bosque de oyamel, además de los pastizales inducidos y los matorrales (INEGI, 1990).

Originalmente, la zona del Glacis de Buenavista estuvo cubierta en su parte más elevada (aprox. 1,900 msnm) por bosques templados, con predominio de encinares, y en su parte baja (aprox. 1,200 msnm) por selvas bajas caducifolias. Sin embargo, fuera de las cañadas, la mayor parte de los bosques fueron arrasados por los ingenios azucareros a finales del siglo XIX y posteriormente sobrepastoreados por la población campesina local; en la actualidad son terrenos de muy baja productividad, con cultivos agrícolas y potreros muy magros que experimentan, en algunas zonas, tasas de erosión de hasta 80 ton/ha (García-Barrios, 2002).

Trejo (1998) estimó que a principios de los 90's sólo persistía el 27% de la superficie original de SBC del país permanecía en estado relativamente conservado, 28% se encontraba alterado, 23% estaba deteriorado y el 23% había sido reemplazado por actividades agropecuarias. Plantea también, que el 60% del estado de Morelos potencialmente podría estar cubierto de SBC, pero se ha perdido cerca del 60% de ésta superficie, sin sitios que no presenten efectos de perturbación, de forma que menos del 15% contiene una cobertura arbórea representativa de SBC (Trejo y Hernández 1996; Trejo, 1998; Trejo y Dirzo, 2000).

El establecimiento de la EBRBRT ha estimulado la investigación relacionada con la vegetación local, con la finalidad de conocer su estructura y composición. En los bosques del norte Flores (2006) caracterizó el mosaico de vegetación de *Abies-Pinus* así como la estructura del sotobosque en la zona de Zempoala, que se encuentra al límite norte de la zona de estudio. Piña (2005) analizó la estructura y composición de la selva baja de Xochicalco, encontrando diferencias en la composición florística a nivel local y registrando un total de 36 especies arbóreas y 37 arbustivas, las que tienen mayor valor de importancia son: *Bursera copallifera*, *B. glabrifolia*, *B. longipes*, *Lysiloma divaricatum*, *Pseudosmodium permiciosum*, *Dodonea viscosa*, *Acacia bilimekii* y *Serjania triquetra*.

Camacho (2004) identificó 66 especies de la vegetación ribereña y encontró diferencias en la composición derivadas del gradiente altitudinal; señala que la familia Leguminosae es la mejor representada. Menciona que *Agnus acuminata*, *Daphnopsis salicifolia*, *Randia aff. canescens*, *Lysiloma acapulcense*, *Astianthus viminalis*, *Solanum aligerum*, *Salix bonplandiana*, *Sapium macrocarpum*, *Mangifera indica* y *Critonia quadrangularis* tienen los mayores valores de importancia relativa en este tipo de vegetación.

En cuanto a los estudios de reintroducción de plantas en los terrenos de la estación, Galindo (2006) realizó pruebas de establecimiento en sitios perturbados en las laderas de la barranca con especies nativas, entre ellas *Pithecellobium dulce*, *Acacia cochliacantha*, *Leucaena leucocephala*, *Ipomoea wolcottiana*, *Heliocarpus velutinus*, y *Guazuma ulmifolia*. Solo *L. leucocephala* y *G. ulmifolia* sobrevivieron a las condiciones de anegamiento en las planicies de la barranca derivadas de las diferencias geomorfológicas que se presentan en ellas.

Por su parte, Ulloa-Nieto (2006) introdujo cuatro especies nativas y encontró que dos de ellas presentaron la mayor supervivencia y crecimiento: *Dodonea viscosa* y *Gliricidia sepium*. Ayala (2008) encontró que la supervivencia de las plantúlas introducidas experimentalmente es mayor en el hombro de ladera y en la ladera convexa que en el pie de ladera.

CAPÍTULO 2. MÉTODOS

2.1 Delimitación de la Zona

Se realizó a partir del trazo de las Cuenca Alta y Media Alta del Río Tembembe, utilizando para este propósito las cartas topográficas E14A48, E14A49, E14A58 y E14A59 escala 1:50000 (INEGI, 1990); se omite la zona que corresponde a la Cuenca del Río Tejaltepec que también es parte de la cuenca Media Alta, debido a las diferencias de origen del relieve.

La recopilación de cartografía temática (geología, edafología y uso de suelo y vegetación) de la zona a escala 1:50,000 (INEGI, 1990 y CETENAL, 1980) para su posterior digitalización en el software Ilwis ver. 3.0 (ITC, 2000) previa georeferenciación con proyección UTM y Datum ITRF92.

Las curvas de nivel extraídas del mapa topográfico se digitalizaron cada 20 metros. En el caso de los mapas edafológicos y geológicos se realizó una ligera corrección para empatar los límites en ambos temas.

2.2 Fotointerpretación y delimitación geomorfológica

La delimitación de las unidades de relieve existentes en el área se basó principalmente en la definición de diferentes parámetros geomorfológicos, como son el origen de relieve, la geometría de las laderas, la posición topográfica, su altura relativa y la pendiente (Arellano, 2001; Tapia-Varela y López-Blanco, 2002; Montes, 2005).

La delimitación geomorfológica está basada en los lineamientos y conceptos del Sistema para el levantamiento y el Mapeo Geomorfológico del ITC (Verstappen *et al.* 1991), además del método de Van Zuidam modificado por López-Blanco (Tapia-Valera y López-Blanco, 2002), y criterios propuestos por Arellano (2001), Martínez García (2002), Tapia-Varela y López-Blanco (2002); como son la morfología del relieve, y la posición jerárquica con

respecto a la topografía.

Se realizó la delimitación utilizando fotografías aéreas en escala 1:37,500 realizadas por el INEGI (2000) con la clave E14B, correspondientes a la línea de vuelo 11 y 12 del Bloque 3 “Sultepec” y con ayuda de un estereoscopio.

El primer paso fue la delimitación de las estructuras mayores, a partir de las fallas y fracturas observadas en las fotografías aéreas, la textura y color de los materiales geológicos además de la altura. De acuerdo a la homogeneidad, se delimitaron los sistemas morfogénéticos así como las morfoestructuras y finalmente los tipos de relieve. Se subdividieron considerando su origen, litología y geometría del relieve, además de los valores de altura relativa obtenidos del MDT (Figura 3.4).

Se consideraron las cuatro unidades básicas o generales de relieve: montaña, piedemonte, lomerío y planicie, con las que se delimitó y nombró a las unidades morfopedológicas de manera general (jerárquica) y en forma particular se diferenciaron los tipos de relieve con base en la altura relativa de la siguiente manera:

1) Laderas de montaña.

Para delimitar estas unidades, se consideró el criterio de altura relativa mayor a 200 m, además de rupturas de pendiente y cobertura vegetal densa para diferenciar el tipo de relieve de laderas montañosas. Dentro de este grupo, se hicieron divisiones para delimitar los tipos de relieve basados en los cambios de pendiente, posición topográfica y textura de las laderas, diferenciando así laderas bajas, medias, altas y superficies cumbresales, piedemontes; en algunos casos se delimitaron laderas en pared de barranco.

2) Lomeríos

La diferenciación de los lomeríos se consideró a partir de una altura relativa menor a 200 m, además de considerar el patrón dómico para la separación de éstos. De acuerdo con el primer criterio se delimitaron tres grupos de lomeríos:

- Lomeríos altos con altura mayor o igual a 150 m y menor a 200 m
- Lomeríos medios altura mayor o igual a 100 m y menor a 150 m,
- Lomeríos bajos mayor o igual a 50 m y menor a 100 m

Otro criterio fue la separación de lomeríos con base en los materiales geológicos que los conforman, consultado en la cartografía geológica y observado en la imagen de satélite; con este criterio se distinguieron lomeríos de diferente origen y litología, los formados de calizas del Cretácico, de flujos lávicos y piroclastos del Terciario, así como lomeríos andesíticos.

3) Piedemontes

Son aquellas superficies delimitadas a partir de características de depósito y acumulación de material, así como las rupturas de pendiente. Algunos criterios adicionales, como la escasez de cobertura vegetal, la densidad de la cobertura y el patrón de drenaje pueden ayudar a diferenciar los piedemontes. Por su posición topográfica, se subdividió al piedemonte en superior e inferior. De manera similar, la delimitación de los piedelomerios, se realizó aplicando los criterios anteriores, considerándolos como áreas acumulativas entre los lomeríos.

4) Planicies

Para diferenciar y agrupar a las planicies se consideraron elementos como el uso de suelo y el cambio de pendiente. Estas unidades son fáciles de delimitar por la mínima variación que presentan en los elementos mencionados. Se agruparon, con relación a los cambios de altura relativa y posición topográfica que presentaron: terrazas superiores, medias e inferiores.

2.2.1 Digitización de la delimitación geomorfológica

Finalmente, para la transformación de los trazos realizados en las fotografías aéreas a formatos digitales fue necesaria la digitalización de este material.

Se escanearon las fotografías aéreas junto con los acetatos de la delimitación, en un formato de alta resolución, conservando los puntos de referencia (tics). Las imágenes se importaron al programa Ilwis Ver. 3.0, donde se elaboró el sistema de georeferencia de ortofoto, que utiliza el modelo de elevación digital (generado con las curvas de nivel), y la ortofoto digital. Para elaborar el sistema se utilizaron por lo menos 75 puntos de control que vincularon elementos identificados en la fotografía y en la ortofoto. Este proceso

se efectúa para asignar propiedades cartográficas y coordenadas a la imagen digital (Montes-Cruz y López-Blanco, 2004).

Posteriormente, sobre la imagen obtenida se digitizaron las líneas trazadas en la fotografía; el siguiente paso es verificar la unión, intercepción, identidad y existencia de falsos polígonos, para crear una tipología de polígono y asignar el nombre de la unidad. Para realizar lo anterior se utilizaron los softwares Ilwis Ver 3.0 y Erdas Ver. 8.5.

2.3 Procesamiento Vectorial

2.3.1 Mapa altimétrico

Este mapa se genera a través de la información de las curvas de nivel y presenta los valores máximos y mínimos de altitud en el área. El número de intervalos o categorías se define por los objetivos del trabajo. En este caso se realizó una interpolación de las curvas de nivel en el software Arc View 3.2, el cual posteriormente se transformó a un formato ráster llamado modelo de elevación del terreno (MDT) para la elaboración de dicho mapa.

2.3.2 Mapa de pendientes

La finalidad de este producto es diferenciar los niveles de inclinación, así como los cambios que ocurren, distinguiendo las zonas planas, semiplanas, inclinadas o abruptas.

La fórmula general para obtener la inclinación del terreno en grados es:

$$\text{Pendiente en grados} = \text{ang tg } (h/d)$$

Donde h es la diferencia altitudinal entre curvas de nivel y d es la distancia entre ellos en ese punto (Arellano, 2001).

Este mapa se obtuvo a partir del MDT utilizando el módulo Surfe de Arc View 3.2 aplicando la función Slope generando un archivo ráster.

2.3.3 Mapa de exposición de ladera

De igual forma que el mapa de pendientes, se deriva del MDT y fue generado con la función Derive Aspect de Arc View 3.2 (ESRI, 1999). Ofrece información relacionada con la orientación de las laderas y se encuentra organizado como una brújula, de tal forma que el

valor cero grados equivale al Norte, el de 90 al Este, 180 al Sur y 270 Oeste. La resolución de este producto se modifica con respecto al tamaño de píxel, que se fija durante el proceso, a mayor tamaño, menor resolución y viceversa.

Es necesario señalar la importancia en la equivalencia en los tamaños de píxel, para facilitar el algebra de los mapas y los procesos de extracción de información, conocidos como "Cross".

2.4 Procesamiento digital de la Imagen SPOT

Se empleó una imagen SPOT (Semarnat, 2004) de febrero de 2004 con resolución de 10 metros. Después de la identificación de la zona, ésta se recorto para trabajarla a mayor detalle y realizar la corrección geométrica aplicando el software Erdas Imagine 8.4, (Schowengerdt, 2002; Carranza *et al.*, 2003).

Posteriormente, fue re proyectada utilizando 120 puntos de control del terreno, identificados en la imagen de satélite, en las ortofotos digitales E14A48f, E14A49d, E14A58c, E14A58f, E14A59a y E14A59d (INEGI, 2000) y en el modelo digital del terreno, con el fin de aplicar la información de georeferencia y relieve a la imagen (Colwell, 1990; Eastman, 1999; Chuvieco, 2002; Schowengerdt, 2002).

Para lograr lo anterior, se ensambló un mosaico con todas las ortofotos en la misma proyección (Erdas Imagine 8.4). Finalmente se integro un compuesto de tres bandas en falso color, utilizando las bandas 1, 2 y 3.

2.4.1 Delimitación de coberturas

La delimitación visual de la cobertura vegetal en la imagen SPOT (2004) se realizó con el compuesto de falso color RGB generado anteriormente. Se consideraron los criterios de interpretación fotográfica como el color, la textura, y el brillo para la división de unidades homogéneas de vegetación, mismas que fueron posteriormente cotejadas con los datos del Inventario Nacional Forestal (Carta Cuernavaca).

2.4.2 Estimación de NDVI

Se procesaron las bandas roja e infrarroja para obtener el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), en Idrisi Ver. 4.1. En particular, el NDVI se basa en las bandas de mayor respuesta de la vegetación y su uso en el reconocimiento de la cobertura es de fácil interpretación. Con base al histograma de frecuencias, se realizaron categorías de NDVI.

Finalmente se correlacionó con las capas de uso de suelo y vegetación, la clasificación no supervisada, para generar una clasificación respecto a tres criterios:

- Tipo de vegetación (Bosque, Selva baja, etc.)
- Condición de la vegetación (con respecto a la clasificación no supervisada y NDVI.
- Cobertura vegetal (porcentaje).

Ambos productos fueron transpuestos al final para observar las concordancias de la información, y confrontados con las cartas de uso de suelo y vegetación de la zona.

2.5 Análisis de fragilidad.

Para obtener la evaluación de fragilidad, se ponderará cada componente del análisis, de acuerdo a los lineamientos del Ordenamiento General del Territorio. (Semarnap, 2000). El cual define cinco categorías de fragilidad: muy alta, alta, media, baja y mínima con referencia a la estabilidad o inestabilidad del relieve, influencia de la pendiente, erodabilidad. El uso de SIG en el análisis de fragilidad facilitó la correlación de cada variable, para integrar las capas de relieve, pendiente, suelo y vegetación con los polígonos de las geoformas obtenidas y definir cinco categorías de fragilidad. Considerando como referencia los criterios de estabilidad e inestabilidad del relieve relacionado con la pendiente; la erodabilidad del suelo y su posibilidad de cambio en sus propiedades físicas y químicas; finalmente la capacidad de autorregeneración de la vegetación y su resistencia a disturbios naturales (SEMARNAP, 2000).

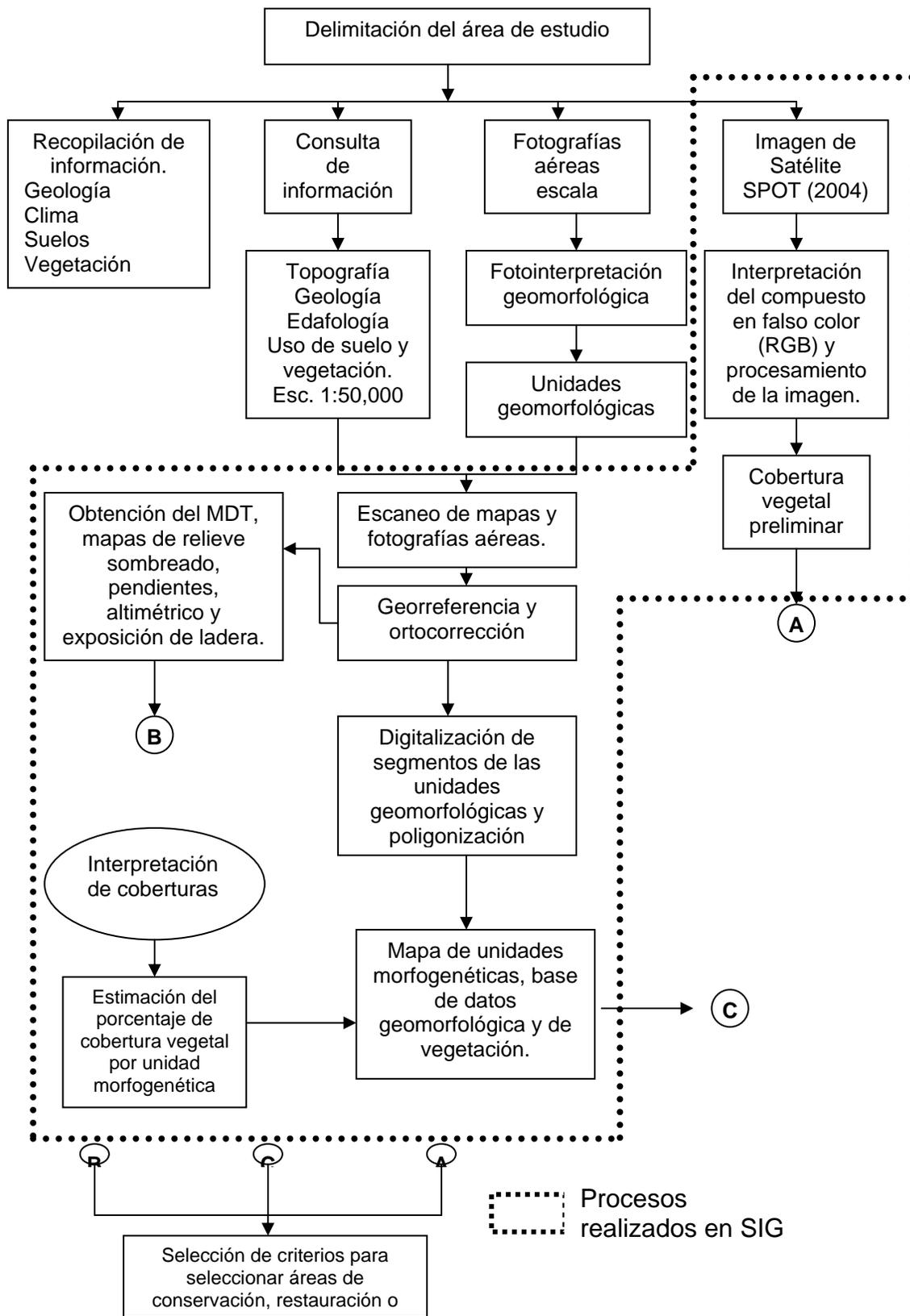


Figura 2.1. Diagrama de flujo de los métodos utilizados

2.6 Análisis estadístico.

Se utilizaron técnicas de estadística multivariada para relacionar los parámetros de vegetación, suelo, condición y NDVI con las unidades geomorfológicas. Las variables que se manejaron para el análisis fueron: pendiente, altitud, origen del relieve, litología, vegetación, condición de la vegetación; temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación máxima y precipitación mínima. Las variables climáticas se consultaron del trabajo de Hernández (2008) para el Estado de Morelos.

Se realizó primeramente un análisis de cluster para observar diferencias y similitudes de las geoformas utilizando para esto la distancia Euclidiana (Statistical Graphics Corp, 2000) en la formación de grupos, con criterios de “vecinos lejanos” para la separación de éstos. Posteriormente, se aplicó un análisis de componentes principales para definir las variables de mayor influencia en el análisis, a través de una matriz de correlación. Para la elaboración de los análisis se utilizó el software Statgraphics Ver. 5.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.1 Altimetría, pendientes y orientación

La zona se ubica en un gradiente altitudinal donde se registran valores de elevación desde los 1,100 msnm hasta los 3500 msnm como máximo; disminuye la elevación de norte (Mexicapa) a sur (Xochicalco), lo que deriva en un relieve que presenta desde montañas altas en la cabecera de la cuenca (parte norte) hasta planicies en zona centro y lomeríos al sur. Se presentan además conjuntos de pequeñas elevaciones aisladas en la parte media de la cuenca, específicamente en la sección Ahuatenco (Figura 3.1).

Las variaciones de altitud son ligeras en la subcuenca Cuentepec, lo cual está relacionado a su origen, sin embargo este patrón cambia en las subcuencas Ahuatenco, Mexicapa y Tlaltizapán ubicadas al norte, donde las variaciones son más abruptas y se localizan las mayores elevaciones.

Se presenta una relación directa con las pendientes, las más pronunciadas se encuentran al norte con valores mayores a 35°, y hasta 60° de pendiente, favorecidas por la alta disección del relieve en la zona como puede observarse en la Figura 3.2. En la subcuenca Cuentepec, las pendientes son ligeras en la parte superficial y fuertes en las abundantes laderas de barranco, principalmente las del Río Tembembe.

Con respecto a la orientación, en las laderas de la zona norte (Mexicapa, Tlaltizapán y Ahuatenco), es mayoritariamente hacia el sureste; en la parte intermedia (Cuentepec) aunque es muy homogénea, tiene ligeras tendencias hacia el norte. El cauce del Río Tembembe divide el área generando laderas de orientación Este y Oeste. En Xochicalco, se presenta un grupo de laderas orientadas al Este y otro grupo orientado al Oeste, derivadas del tipo de relieve.

Mapa altimétrico de la cuenca Alta y Media del Río Tembembe

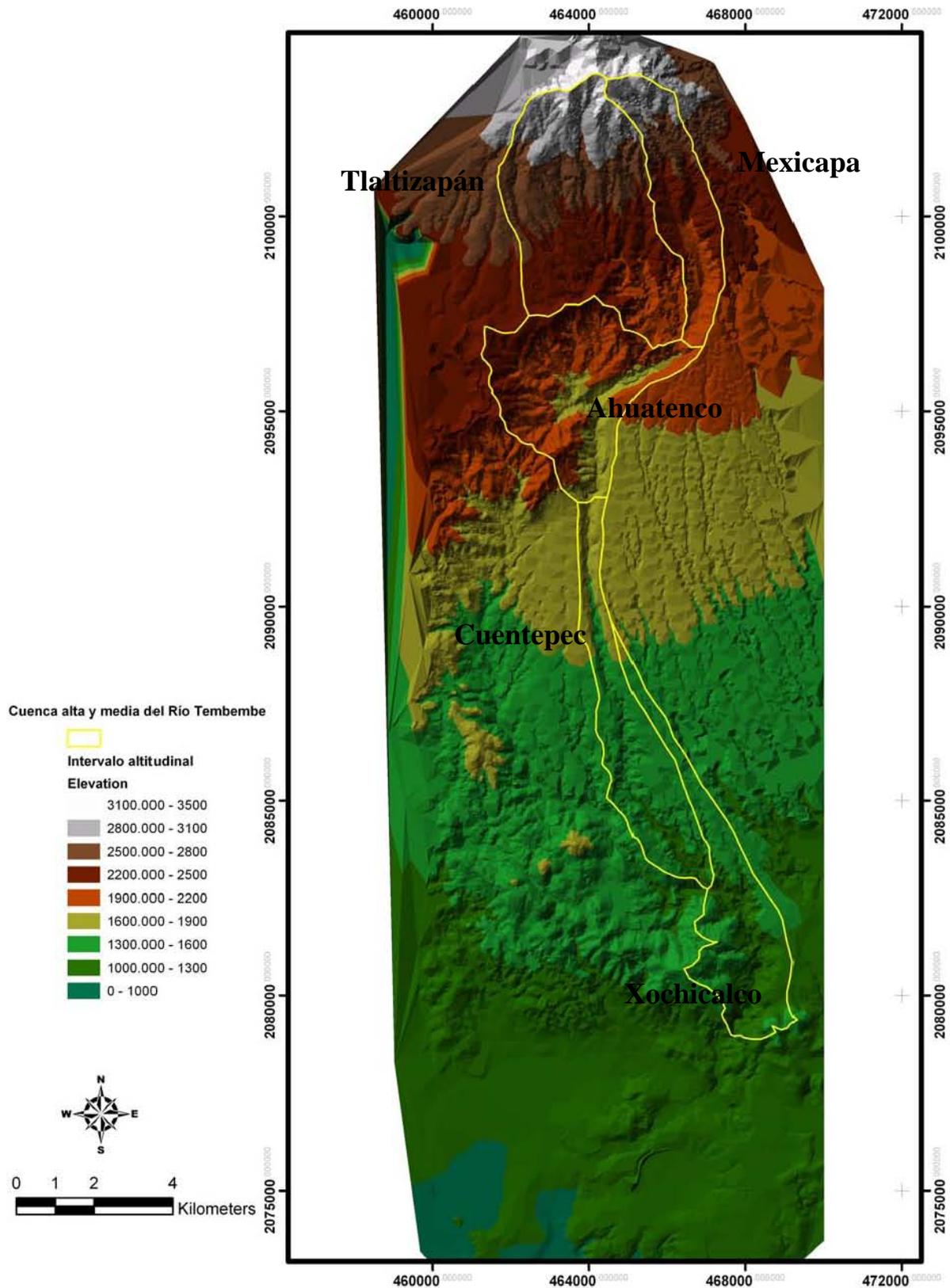


Figura 3.1 Mapa altimétrico.

Mapa de pendientes Cuenca Alta y Media del Río Tembembe

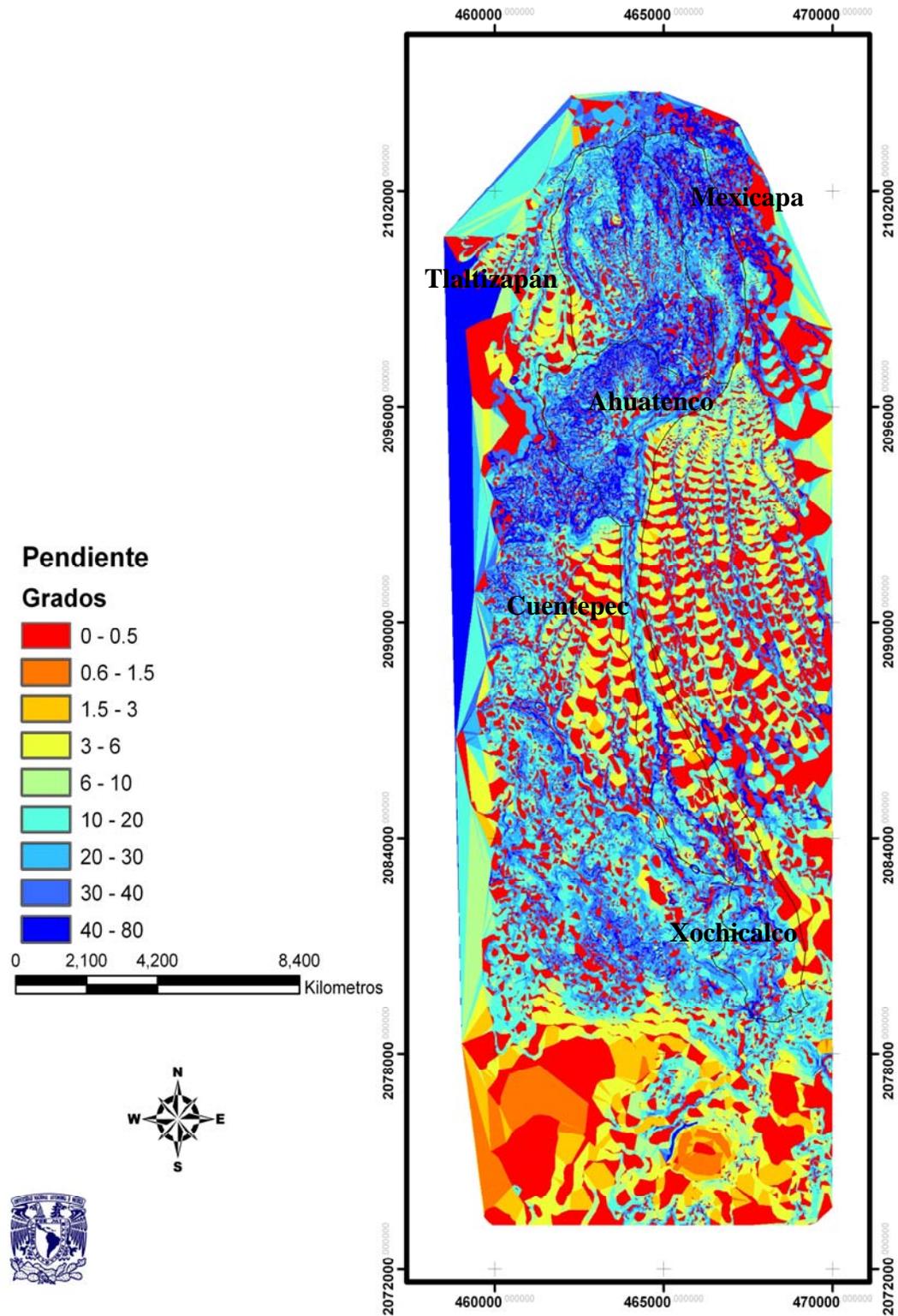


Figura 3.2. Mapa de pendientes.

Mapa de exposición Cuenca Alta y Media del Río Tembembe

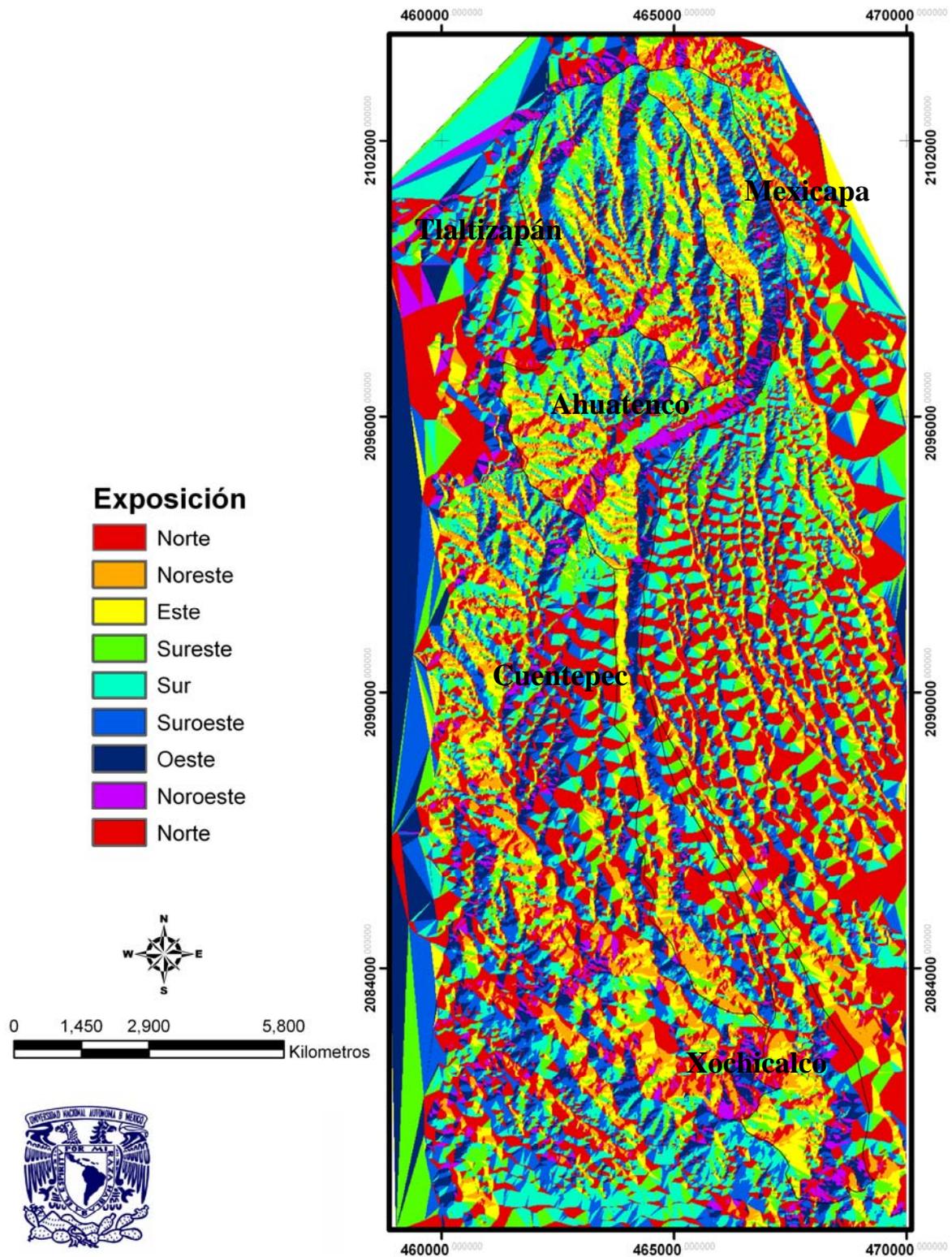


Figura 3.3. Mapa de exposición de laderas.

3.2 Geomorfología

El relieve en la cuenca alta del Río Tembembe es el resultado de la conjunción de materiales de diferente origen, denominados de la siguiente forma: endógeno volcánico acumulativo (EVA), endógeno volcánico acumulativo-exógeno acumulativo aluvial (EVA-EAA) y endógeno estructural plegado (EEP). Dos son de tipo volcánico, pero a diferencia del EVA, en el EVA-EAA se presentaron procesos secundarios de acumulación de materiales que tienen origen en la Formación Zempoala y son depositados por procesos aluviales. Se delimitaron un total de 1,253 geoformas, agrupadas en 101 morfoestructuras (Figura 3.4). Para delimitar cada relieve se utilizó la siguiente clasificación jerárquica:

- Origen de relieve. Diferenciado a partir de las cartas geológicas de INEGI (1980), por el tipo de geología y la edad de los materiales. Se observaron visualmente en la imagen de satélite diferencias espectrales en cuanto a los materiales y sus elementos se diferenciaron desde escalas por arriba de 1:50,000.
 - Sistema morfogenético. Delimitado a partir de las fallas y fracturas dominantes y de mayor tamaño, complementado por el tipo de geología y los materiales que las forman.
 - Morfoestructura. Delimitadas por fallas y fracturas específicas, de menor escala, además de los cambios de relieve, elevación y geología, altura relativa
 - Tipo de relieve. Son las unidades más pequeñas diferenciadas con base a cambios de pendiente, elevación, altura relativa, forma y procesos geomorfológicos observados.

Relieves y Sistemas Morfogenéticos de la Cuenca Alta y Media Alta del Río Tembembe

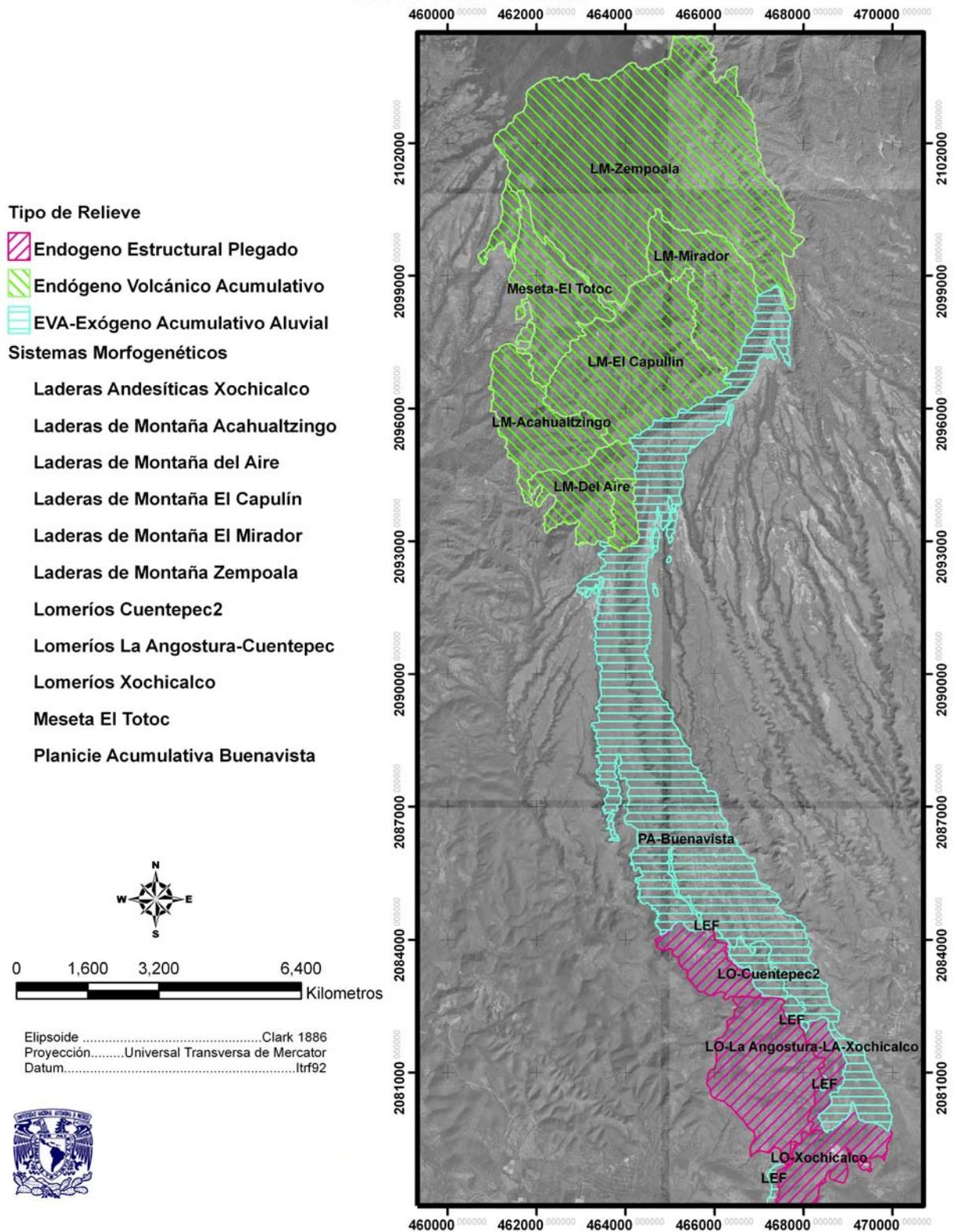


Figura 3.4. Tipos de relieve y sistemas morfogenéticos.

3.2.1 Endógeno volcánico acumulativo

Es el relieve de mayor extensión se localiza en la cabecera de la cuenca y representa dos terceras partes del total del área de estudio. Fue formado a partir de flujos de lava (lahares) que datan del Terciario superior y que se desplazaron en frío originando un relieve muy heterogéneo en cuanto al tamaño de las estructuras y de grano; las estructuras que lo componen presentan pendientes angulosas y mezcla de materiales finos y angulosos (López-Blanco, com. pers.). La litología predominante son las andesitas y tobas, en menor proporción brecha volcánica. Debido a su origen litológico predominan los suelos volcánicos como el andosol y cambisol.

Se delimitaron siete sistemas morfogenéticos (SM) conformados en total por 48 morfoestructuras. De los seis SM que lo integran, en cinco de ellos predominan las laderas de montaña, de pendientes pronunciadas y angulosas con superficies cumbrales estrechas, separadas por una alta disección de norte a sur que forma barrancos y cauces paralelos. Estos son: “Acahualtzingo”, “Del Aire”, “El Capulín”, “El Mirador” y “Zempoala”, en último sistema predominan las formas de piedemonte y planicies con diferentes alturas relativas, es denominado “El Totoc”.

A continuación se describen las características de los sistemas morfogenéticos, el orden se efectúa con base a su localización.

3.2.1.1 Sistema morfogenético “Zempoala”

Es el SM de mayor extensión, su litología se compone en un 90% de rocas extrusivas intermedias, principalmente andesita de la formación Zempoala que data del Terciario Superior (INEGI, 1980). Se delimitaron 25 morfoestructuras separadas por fracturas, enfatizadas en dirección Norte-Sur que favorecen la delimitación de estructuras alargadas, a su vez separadas por otras fracturas, cambios de altitud y pendiente. Dentro de éstas morfoestructuras se delimitaron 481 geoformas (Figura 3.4.1), más del 90% de geoformas delimitadas corresponden a laderas de montaña con pendientes pronunciadas (de hasta 60°) y diferentes cambios de pendiente, por lo que fueron separadas en laderas superiores,

medias e inferiores; en conjunto representan el 80% de la superficie del sistema morfogénico y son el rasgo predominante, su altura relativa varía entre 400-200 m; la longitud de las laderas es variable, en algunos casos son muy cortas por el cambio radical en la pendiente y en otros, se presentan laderas muy largas por la homogeneidad de la pendiente.

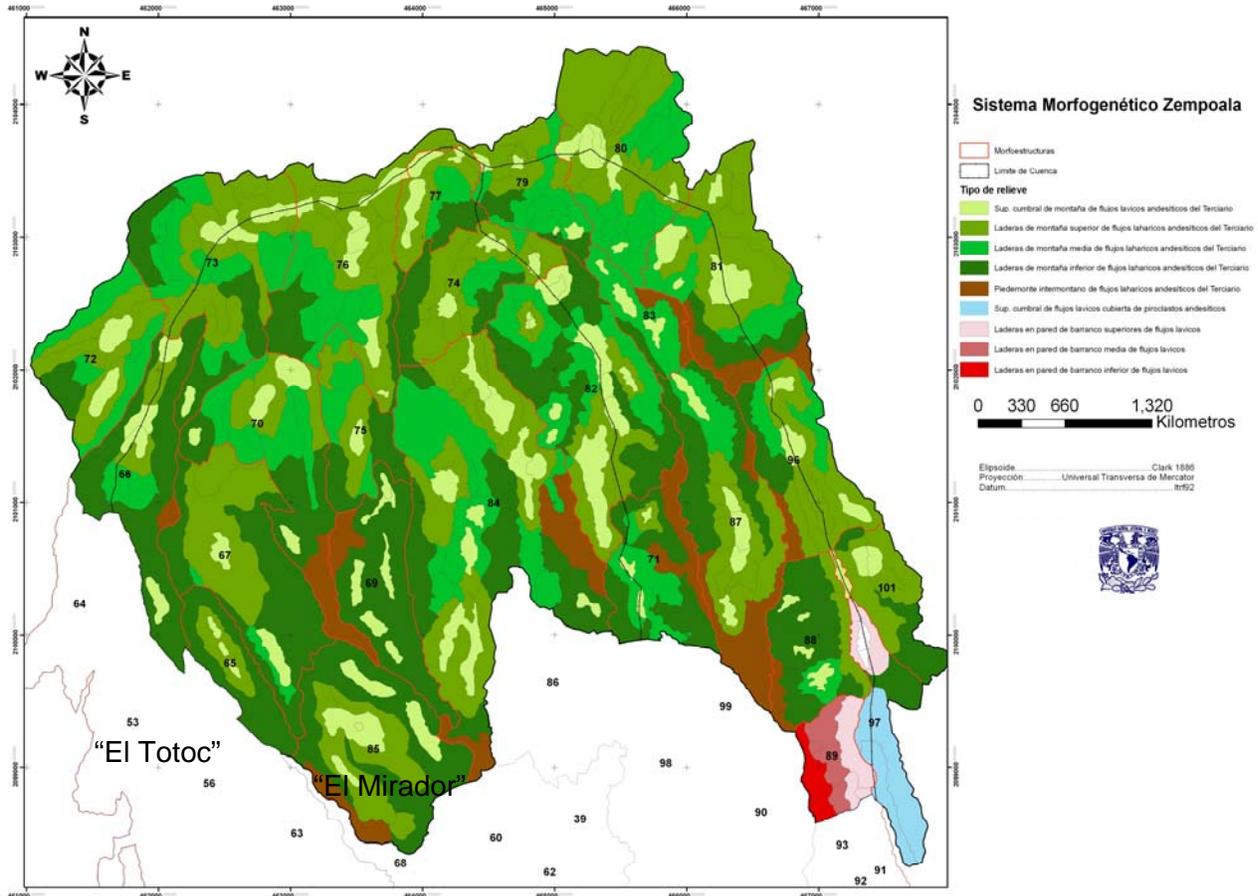


Figura 3.4.1. Morfoestructuras y unidades morfogénicas del sistema Zempoala.

Las superficies cumbrales sobre éstas laderas son pequeñas, principalmente estrechas, alargadas ó irregulares; las de mayor altitud se localizan al norte, en el límite de la cuenca entre los 3100 a 3400 msnm. Son unidades estrechas y de menor extensión, además de presentar las pendientes más fuertes; por el contrario, las superficies cumbrales de menor altitud se localizan al sur y suroeste, al límite con los SM “Totoc” y “El Mirador” entre los 2600 a 2400 msnm; aunque en número son abundantes, representan sólo el 11% de la superficie.

Se delimitaron 30 piedemontes intermontanos localizados principalmente al suroeste del SM, en la cercanía con el sistema el “Mirador”, abundan los de forma alargada o localizados en el contorno de las montañas, también se delimitaron pequeños piedemontes locales de extensiones reducidas que representan sólo el 6% del total de éste SM. (Cuadro 3.1). Las planicies aluviales corresponden a los segmentos donde los cauces de los tributarios del río Tembembe son de tamaño cartografiable, lo que concuerda con la unión de dos tributarios, y representan menos del 1% de la superficie. Las morfoestructuras que se localizan en contacto con el Glacís de Buenavista (Este) y forman el parteaguas de la sección Mexicapa, presentan como litología dominante a las tobas, a diferencia de la parte norte que presenta andesitas; se observa en éstas una alta irregularidad en las laderas, tanto vertical como horizontal que genera una diferenciación de geoformas; en la parte baja de éstas estructuras se encuentra el cauce del Río Tembembe, por lo que se denominaron laderas en pared de barranco además, debido a los cambios de pendiente observados (35-40°) se diferenciaron en superiores, medias e inferiores. La superficie cumbral de éstas se caracterizó como superficies cumbrales de laderas de montaña de flujos lávicos cubiertas por clastos andesíticos y representan el 2% de la extensión total.

El SM “Zempoala” presenta un intervalo altitudinal de 2,100 a 3,400 msnm, en el que se establece vegetación templada, principalmente bosques de *Pinus* asociados con *Quercus* y porciones reducidas de bosques de *Abies* en la cabecera norte de la cuenca, en la porción central y hasta la parte oeste del SM se registran asociaciones de *Quercus-Pinus*. Los valores más altos (en la escala utilizada) del Índice de vegetación normalizada se localizaron en esta unidad y se asociaron a la vegetación denominada por INEGI (1980) como Bosque Mesófilo de Montaña y con bosque de *Pinus*. La cobertura vegetal en la mayoría de las morfoestructuras es mayor al 80% y sólo tres estructuras tienen una cobertura menor de vegetación, que se relaciona con las pendientes pronunciadas características de la zona. Los suelos dominantes de acuerdo con INEGI (1980) son Andosoles y Cambisoles con variaciones en las texturas y las fases. En el límite con la unidad “El Totoc” (suroeste), las laderas presentan pendientes ligeras y menor altitud lo que favorece el cambio de uso de suelo de forestal a agrícola.

Cuadro 3.1. Síntesis de variables biofísicas para el sistema morfogenético “Zempoala”.

TIPO RELIEVE	NUMG	% SUP	ALTITUD	ORIGEN	EDAD	LIT	CR	EDAF	VEG	T ° C	PP (mm)
SC_LM	107	10.8	2950	EVA	Ts	FLA	17-25°	T h, B d	BMM, Bpa	19.5	1290
LD_MO_S	122	28.6	2900	EVA	Ts	FLA	33-60°	T h, B d	BMM, Bpq	19.7°	1273
LD_MO_M	90	20.1	2817	EVA	Ts	FLA	29-36°	T h, B d	Bpq, Bpa	19.8°	1260
LD_MO_I	122	31.2	2480	EVA	Ts	FLA	18-25°	T h, B d	Bpq	20°	1252
PI_M	30	5.8	2273	EVA	Ts	FLA	22-27°	T h, B d	Bpq	20.4°	1192
LD_PB_S	2	0.9	2400	EVA	Ts	FLA	16-21°	T h, B d	Bpq	20.3°	1180
LD_PB_M	2	0.6	2190	EVA	Ts	FLA	32-38°	T h, B d	Bpq	20.8°	1156
LD_PB_I	2	0.4	2100	EVA	Ts	FLA	23-40°	T h, B d	Bpq	20.9°	1148
SC_FL+P	2	1.4	2426	EVA	Ts	FLA	23-27°	T h, B d	Bpq	20.9°	1152
SC_PLA	2	0.1	2475	EVA	Ts	FLA	11-16°	T h, B d	Bpq	20.9°	1187

NUMG= Número de morfoestructura, SC_LM= Superficie cumbral de ladera de montaña, LD_MO_S= Ladera de montaña Superior, LD_MO_M= Ladera de montaña media, LD_MO_I= Ladera de montaña inferior, PI_M= Piedemonte intermontano, LD_PB_S= Ladera de pared de barranco superior, LD_PB_M= Ladera de pared de barranco media, LD_PB_I= Ladera de pared de barranco inferior, SC_FL+P= Superficie cumbral de flujos lávicos cubierta por piroclastos, SC_PLA= Superficie cumbral de planicie; % SUP= Porcentaje de superficie de cada tipo de relieve con respecto al sistema; EVA= Endógeno volcánico acumulativo, Ts= Terciario superior, LIT= Litología, FLA= Flujos lávicos andesíticos, CR= Clases de relieve, EDAF= Edafología predominante, Th= Andosol húmico, Bd= Cambisol districo; VEG= Vegetación, BMM= Bosque Mesófilo de montaña, Bpa= Bosque pino-abies, Bpq= Bosque de pino-encino; T ° C= Temperatura media anual, PP= Precipitación media anual.

3.2.1.2 Sistema morfogenético “El Mirador”

Se delimitaron cuatro morfoestructuras principales, donde se diferenciaron superficies cumbrales irregulares y muy estrechas que representan sólo el 6.9% de la extensión del sistema (Cuadro 3.2), rodeadas de laderas de montaña que se diferenciaron como superiores (46%) con pendientes entre 28 y 35 °, laderas medias muy inclinadas con pendientes de 32 a 36° (5.8% superficie) e inferiores (29%) con intervalos de 18 a 32 ° de pendiente; además de un piedemonte localizado en los límites con el sistema Zempoala. Se diferenciaron en total 84 geoformas en un intervalo altitudinal de 2,000 a 2,500 msnm (Figura 3.4.2.). La asociación de las morfoestructuras está basada en los materiales geológicos, donde predominan las tobas y los flujos lávicos de andesitas que datan del Terciario Superior; en términos de altura relativa pertenecen a la categoría “laderas de montaña baja”.

Destaca la presencia de dos estructuras de pendientes pronunciadas al sur de la unidad, que favorecen el cambio de uso de suelo, así como la presencia de zonas desprovistas de vegetación que concuerdan con las superficies cumbreles delimitadas y las laderas superiores e inferiores son las más extensas.



Figura 3.4.2. Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema El Mirador.

La vegetación corresponde a Bosque Mesófilo de Montaña, localizado al norte y asociaciones de *Quercus* y *Pinus* que dominan al sur, este último está relacionado con valores bajos de NVDI, que se asocia también con la presencia de matorrales inducidos entremezclados con éste tipo de vegetación. Predominan los suelos de tipo Andosol y Feozem (Cuadro 3.2); las zonas de mayor altitud corresponden al una fracción del parteaguas que separa las subcuencas Mexicapa y Tlaltizapán. La precipitación oscila entre los 1166 y 1113 mm y temperaturas promedio de 20.9 ° en las partes más elevadas y 21.4° en los piedemontes.

Cuadro 3.2. Síntesis de variables biofísicas para el sistema morfogenético “El Mirador”.

TIPO RELIEVE	NUMG	% SUP	ALTITUD	ORIGEN	EDAD	LIT	CR	EDAF	VEG	T ° C	PP (mm)
SC_LM	15	6.9	2393	EVA	Ts	FLA-TO	25-33°	T h, B d	Bmm, Bpq	20.8	1166
LD_MO_S	15	46.9	2360	EVA	Ts	FLA-TO	28-35°	T h, B d	Bmm, Bpq	20.9	1160
LD_MO_M	9	5.8	2235	EVA	Ts	FLA-TO	32-36°	T h, B d	Bpq	21.4	1146
LD_MO_I	30	29.3	2148	EVA	Ts	FLA-TO	18-32°	T h, B d	Bpq, Bmm	21.5	1128
PI_M	15	11.1	2043	EVA	Ts	FLA-TO	25-30°	T h, B d	Bpq	21.4	1113

NUMG= Número de morfoestructura, SC_LM= Superficie cumbral de ladera de montaña, LD_MO_S= Ladera de montaña Superior, LD_MO_M= Ladera de montaña media, LD_MO_I= Ladera de montaña inferior, PI_M= Piedemonte intermontano; % SUP= Porcentaje de superficie de cada tipo de relieve con respecto al sistema; EVA= Endógeno volcánico acumulativo, Ts= Terciario superior, LIT= Litología, FLA= Flujos lávicos andesíticos, TO= Tobas, CR= Clases de relieve, EDAF= Edafología predominante, Th= Andosol húmico, Bd= Cambisol districo; VEG= Vegetación, Bmm= Bosque mesófilo de montaña, Bpq= Bosque de pino-encino; T ° C= Temperatura media anual, PP= Precipitación media anual.

3.2.1.3 Sistema morfogenético “El Totoc”

Sólo se diferenciaron tres estructuras principales donde y se delimitaron 73 geoformas, treinta por ciento de ellas son denominadas terrazas con poca inclinación y fueron separadas por su altura relativa y pendiente (Figura 3.4.3.). La unidad presenta un intervalo altitudinal de 2,400 a 2,600 msnm donde las geoformas delimitadas, aunque a grandes rasgos son planas pueden diferenciarse por el ligero cambio de pendiente que se presenta entre ellas, delimitándose laderas superiores (28% superficie total) e inferiores (25%), con distinta orientación. Al límite con el SM El Capulín, la inclinación da origen a un piedemonte pequeño, ligeramente diferenciado que representa sólo el 17% de la superficie. Tiene origen en los mismos materiales de la formación Zempoala, pero su geomorfología se compone principalmente de planicies elevadas, con mínimas variaciones en la altitud; en conjunto sólo se presentan variaciones suaves en la pendiente, entre 4 y 7%. Los suelos predominantes son andosoles y en las terrazas superiores los suelos son denominados como materiales residuales.

El uso de suelo predominante es agricultura de temporal en la mayor parte de las unidades, debido a que las características del relieve lo favorecen. En el piedemonte al límite con la unidad Zempoala, se localizan bosques de *Quercus*, con abundantes pastizales y matorrales inducidos. En el NDVI, se observan los valores correspondientes para agricultura de temporal y pastizales inducidos en los piedemontes, asociados a vegetación de *Quercus*. Al sur, el paisaje se hace más heterogéneo, en cuanto al NDVI, relacionando cambio de uso de suelo y disminución de la cobertura vegetal. El denominado piedemonte “El Totoc”, se relaciona totalmente con las características de relieve y suelo anteriores. Sin embargo, la presencia de una mayor cobertura vegetal, así como una pendiente pronunciada la relacionan más con procesos geomorfológicos de laderas.

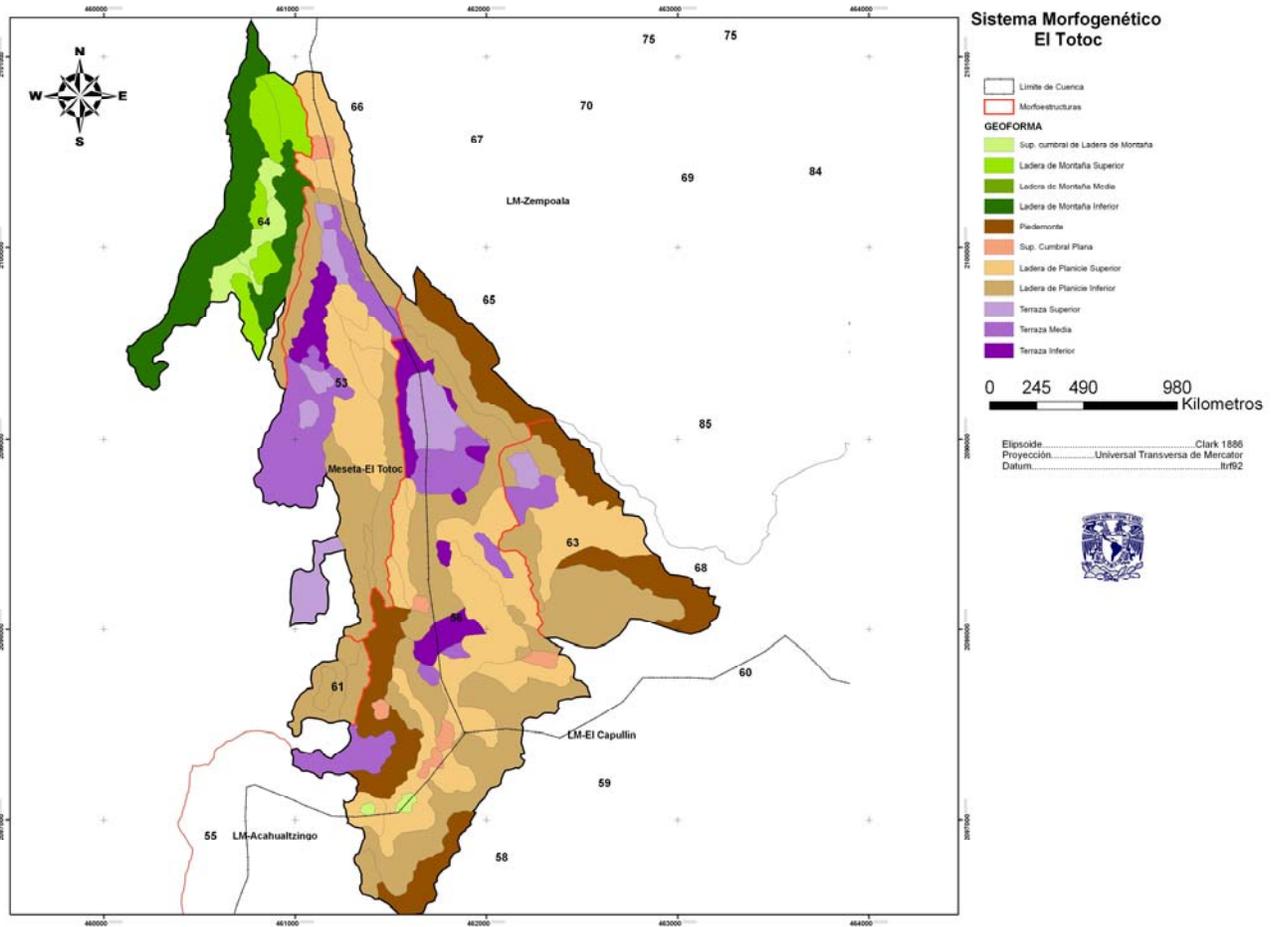


Figura 3.4.3. Morfoestructuras y unidades morfogenéticas sistema El Totoc.

3.2.1.4 Sistema morfogénico “El Capulín”

Este SM comparte un límite litológico con la andesita Zempoala, en la parte norte donde se delimitaron las laderas superiores. (Figura 3.4.4). Se divide en nueve morfoestructuras y 170 unidades geomorfológicas, que forman un mosaico de estructuras de montaña alta, baja, unidas por piedemonte delgados, al este se delimitó un conjunto de lomeríos altos y bajos con cambios de pendiente que diferenciaron laderas de lomerío altas, medias y bajas; las laderas en pared de barranco del río Tembembe se agregaron a esta unidad por el origen y material parental que presentan.

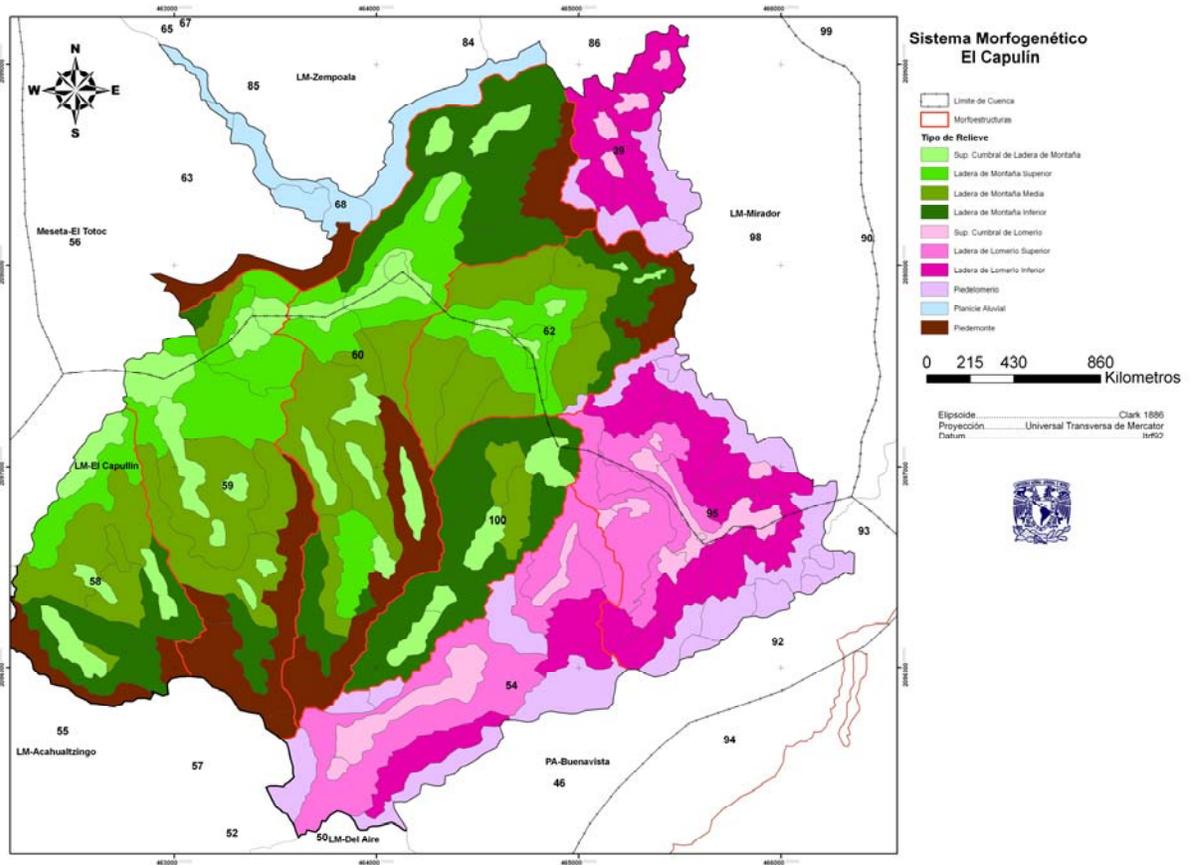


Figura 3.4.4. Morfoestructuras y unidades morfogénicas del sistema El Capulín.

Las mayores elevaciones corresponden al parteaguas de la sección Ahuatenco, aunque las estructuras diferenciadas son alargadas tienen características diferentes, presentándose en la parte norte pendientes más estables y alargadas; por el contrario en la parte sur se

observa la diferenciación de geoformas a partir de los cambios de pendiente, así como la formación de un piedemonte intermontano y piedelomerío en el límite de las estructuras de montaña y lomerío. Las laderas de montaña representan casi el 50% del sistema, y aunque las superficies cumbrales son muy estrechas, se diferenciaron en todas las estructuras y representan el 15% de la extensión (Cuadro 3.3).

El 30% de la extensión corresponde a las estructuras de lomeríos (Cuadro 3.3), de laderas diferenciadas en superiores e inferiores, así como la diferenciación del piedelomerío. La zona de lomeríos a diferencia de las laderas de montaña tiene mayor cobertura vegetal, y se observa un marcado efecto en la exposición, ya que las laderas orientadas al sur, carecen de cobertura vegetal y están casi desprovistas de vegetación.

Cuadro 3.3. Síntesis de variables biofísicas para el SM laderas de montaña “El Capulín”.

TIPO RELIEVE	NUMG	% SUP	ALTITUD	ORIGEN	EDAD	LIT	CR	EDAF	VEG	T ° C	PP (mm)
SC_LM	8	17.5	2230	EVA	Ts	To	15-30°	T h, H h	Bpq	22.1	1138
LD_MO_S	6	9.3	2300	EVA	Ts	To	35-71°	T h, H h	BMM, Bpq	21.9°	1111
LD_MO_M	8	14	2160	EVA	Ts	To	36-76°	T h, H h	Bpq, Bpa	22.3°	1092
LD_MO_I	10	8.8	2240	EVA	Ts	To-Bv	35-78°	T h, H h	Bpq	22°	1077
PI_M	8	14.6	2110	EVA	Ts	To-Bv	24-56°	T h, H h	Bpq	22.9°	1079
PA	4	2.6	2311	EVA	Ts	To	25°	T h, H h	Bpq	21.6°	1140
SC_LO	6	8	2200	EVA	Ts	To	36-65°	B c, T h	Bpqj-cul	22.4	1090
LD_LO_S	4	3	2119	EVA	Ts	To	24-60°	B c, T h	Bpqj	22.7°	1070
LD_LO_I	9	9.5	2012	EVA	Ts	To	35-65°	B c, T h	Bpqj	22°	1068
PI_LO	5	13	1931	EVA	Ts	To	26-33°	B c, T h	Bpqj	22.6	1054

NUMG= Número de morfoestructura, SC_LM= Superficie cumbrales de ladera de montaña, LD_MO_S= Ladera de montaña superior, LD_MO_M= Ladera de montaña media, LD_MO_I= Ladera de montaña inferior, PI_M= Piedemonte intermontano, PA= Planicie aluvial, SC_LO= Superficie cumbrales de lomerío, LD_LO_S= Ladera de lomerío superior, LD_LO_I= Ladera de lomerío inferior, PI_LO= Piedelomerío; % SUP= Porcentaje de superficie de cada tipo de relieve con respecto al sistema; EVA= Endógeno volcánico acumulativo, Ts= Terciario superior, LIT= Litología, To= Toba, BV = Brecha volcánica, CR= Clases de relieve, EDAF= Edafología predominante, Th= Andosol húmico, Bc= Cambisol crómico Hh= Feozem haplico; VEG= Vegetación, BMM= Bosque mesófilo de montaña, Bpa= Bosque pino-abies, Bpq= Bosque de pino-encino; Bpq-cul= Bosque de pino-encino con cultivos T ° C= Temperatura media anual, PP= Precipitación media anual.

Los materiales andesíticos, favorecen el establecimiento de vegetación templada al norte, (bosques de *Quercus* y *Pinus*). En la parte sur, la presencia de tepetates está asociada a una baja cobertura vegetal; en ésta unidad se observa la transición de vegetación templada a selva baja caducifolia, presente en asociaciones en los lomeríos y en las laderas de pared de barranco con *Juniperus*. A pesar de las pendientes fuertes (35-41°) al norte de la unidad, la cobertura vegetal es densa, a diferencia de las laderas con en la parte sur, que son muy similares en los valores de pendiente pero al contrario, muestran vegetación con baja cobertura y amplias zonas sin vegetación.

3.2.1.5 Sistema morfo-genético “Acahualtzingo”

La mayor parte de éste SM contiene litología de rocas andesíticas y brecha volcánica en las laderas de montaña superiores; sin embargo, en las subunidades al sur del piedemonte se presenta Toba (Figura 3.4.5). Se conforma de tres morfoestructuras y 54 geoformas, predominan las estructuras de montaña que representan la mayor extensión, las laderas de montaña superiores, con pendientes pronunciadas que las separan en inferiores y superiores y en conjunto son más del 50% de la extensión del sistema. Las superficies cumbrales son más estrechas e irregulares que en otros sistemas y representa sólo el 7% de la extensión. Se delimitó un piedemonte en las partes limitantes con el sistema El Capulín. La temperatura y la precipitación son muy similares en todas las unidades (Cuadro 3.4) así como la litología y los suelos dominantes.

Las pendientes fuertes se intensifican al centro-sur de la unidad, favoreciendo procesos geomorfológicos de erosión y remoción en masa. El mosaico de la vegetación presente es amplio, con bosque de *Pinus-Quercus* en las laderas de montaña superior y media, de condiciones saludables al norte y semidegradadas al sur, en el contacto con el piedemonte.

Por el contrario, en los piedemontes al este, la asociación vegetal cambia de proporción y *Quercus* es el género dominante. Se observa abundancia de matorrales inducidos (al sur) y asociaciones de *Quercus* con matorral. De acuerdo con los valores de NDVI, la zona sur de la unidad tiene una condición semidegradada, por la presencia de matorrales y las superficies cumbrales desprovistas de vegetación.

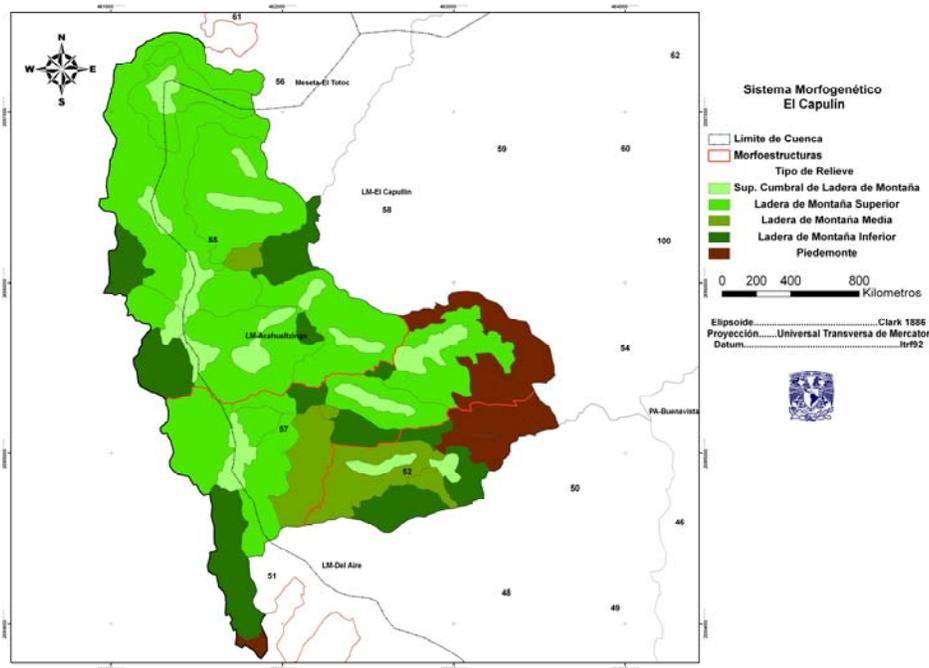


Figura 3.4.5. Morfoestructuras y unidades morfogenéticas del sistema Acahualtzingo.

Cuadro 3.4. Síntesis de variables biofísicas para el SM “Acahualtzingo”.

TIPO RELIEVE	NUMG	% SUP	ALTITUD	ORIGEN	EDAD	LIT	CR	EDA F	VEG	T ° C	PP (mm)
SC_LM	7	11.3	2380	EVA	Ts	FLA-Bv	26-50°	T h, H h	Bpq	23°	1100
LD_MO_S	8	53.3	2309	EVA	Ts	FLA-Bv	29-70°	T h, H h	Bpq	23°	1083
LD_MO_M	4	7.8	2125	EVA	Ts	FLA-Bv	35-70°	T h, H h	Bpq	23°	1048
LD_MO_I	11	17.4	1929	EVA	Ts	FLA-Bv	32-58°	T h, H h	Bpq	23°	1037
PI_M	7	10.1	1982	EVA	Ts	FLA-Bv	28-60°	T h, H h	Bpq	23°	1051

NUMG= Número de morfoestructura, SC_LM= Superficie cumbre de ladera de montaña, LD_MO_S= Ladera de montaña superior, LD_MO_M= Ladera de montaña media, LD_MO_I= Ladera de montaña inferior, PI_M= Piedemonte intermontano % SUP= Porcentaje de superficie de cada tipo de relieve con respecto al sistema; EVA= Endógeno volcánico acumulativo, Ts= Terciario superior, LIT= Litología, FLA= Flujos lávicos andesíticos, Bv= Brecha volcánica, CR= Clases de relieve, EDAF= Edafología predominante, Th= Andosol húmico, Hh= Feozem haplico; VEG= Vegetación, BMM= Bosque mesófilo de montaña, Bpa= Bosque pino-abies, Bpq= Bosque de pino-encino; T ° C= Temperatura media anual, PP= Precipitación media anual.

3.2.1.6 Sistema morfogénico “Del Aire”

Cuatro morfoestructuras principales forman éste Sistema Morfogénico (SM) tres de ellas muy homogéneas en composición, dentro de ellas se delimitaron 69 unidades morfogénicas, representativas de laderas de montaña, con superficies cumbrales (SC) que a diferencia de las SC de otros SM son más regulares, es decir, no tan estrechas y presentan pendientes más estables (Cuadro 3.5), además de cubrir mayor proporción de extensión (20%); éstas SC están rodeadas de laderas de montaña superiores, medias e inferiores, éstas últimas son la de mayor extensión (30%). Se diferenciaron piedemontes junto a las laderas inferiores en el límite con otros SM.

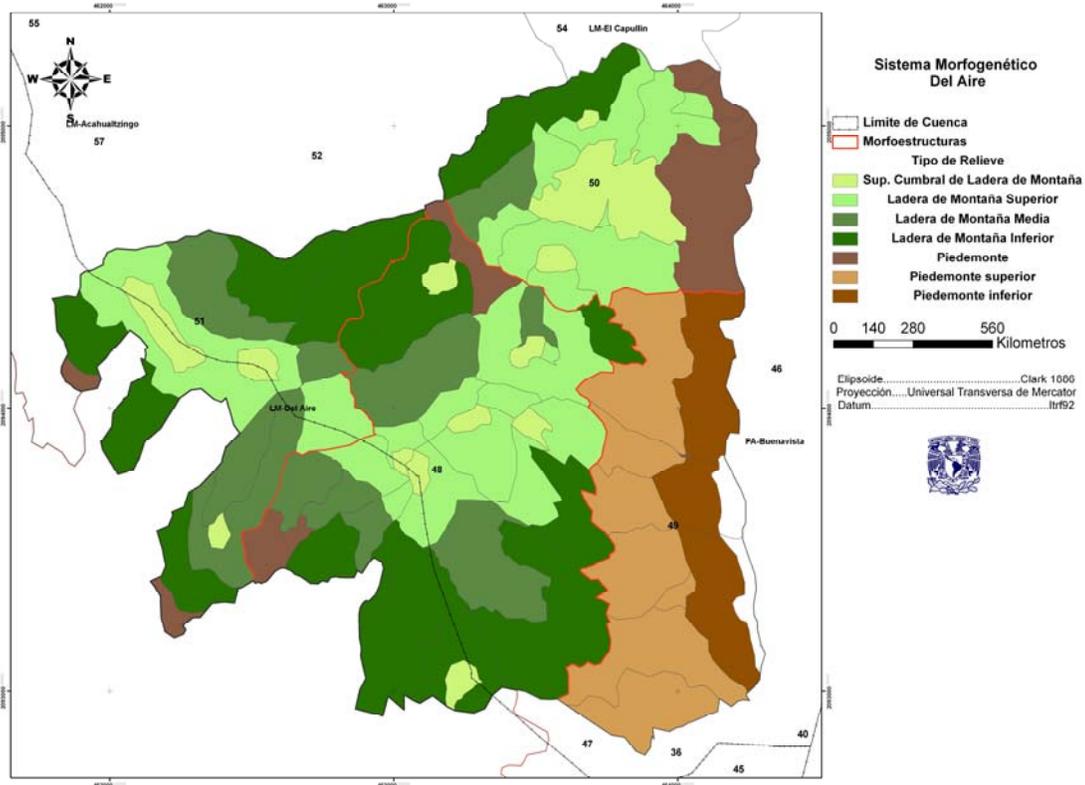


Figura 3.4.6. Morfoestructuras y unidades morfogénicas del sistema Del Aire.

Además de un piedemonte delimitado por su tamaño, cambio de pendiente y por la diferencia de la altitud en las unidades delimitadas en superior e inferior, mismo que corresponde a la barranca del río Tembembe, lo que genera condiciones diferentes en ésta pared en comparación con la parte Este; aunque es una sola estructura se delimitaron 30

unidades morfogénicas; formadas principalmente por brecha volcánica en las laderas, y toba en los piedemonte, ambas del Terciario Superior.

La vegetación que se presenta es de bosques de *Quercus* con *Pinus* en la zona de laderas de montaña, que se enriquece de elementos de selva baja caducifolia principalmente en la zona de piedemonte y en las laderas más pronunciadas al Este de la unidad. Al centro de la unidad, las pendientes son muy fuertes (38-50%) en un gradiente altitudinal de 1,600 a 2,200 msnm. El piedemonte presenta diversas fracturas de Oeste a Este y se establecen combinaciones de selva baja caducifolia con matorrales inducidos. Se observa el efecto de la orientación, que favorece en las laderas con exposición norte se encuentran dominadas por encinos, mientras las orientadas al sur, por selva baja caducifolia. De acuerdo a los valores del NDVI, los bosques de encino en las laderas altas presentan valores semidegradados, mientras que los piedemonte, aunque presentan valores bajos, corresponden a los elementos de selva y pastizales.

Cuadro 3.5. Síntesis de variables biofísicas para el SM laderas de montaña “Del Aire”.

TIPO RELIEVE	NUMG	% SUP	ALTITUD	ORIGEN	EDAD	LIT	CR	EDAF	VEG	T ° C	PP (mm)
SC_LM	5	4.7	2139	EVA	Ts	Bv-FLA	47-64°	H h, I	Bpq-SBC	23.3°	1036
LD_MO_S	7	24.0	2094	EVA	Ts	Bv-FLA	39-70°	H h, I	Bpq-SBC	23.1°	1032
LD_MO_M	6	15.2	2050	EVA	Ts	Bv-FLA	35-70°	H h, I	Bpq-SBC	23.7°	1018
LD_MO_I	11	28.3	1990	EVA	Ts	Bv-FLA	37-75°	H h, I	Bpq-SBC	24.1°	997
PI_M_S	3	15.2	1807	EVA	Ts	To	31-49°	H h, I	SBC-Bpq	23.9°	992
PI_M_I	2	12.2	1793	EVA	Ts	To	31-37°	H h, I	SBC-Bpq	24°	1014
PA_FB	2	0.4	1705	EVA	Ts	To	28°	H h, I	SBC-Bpq	23.8°	982

NUMG= Número de morfoestructura, SC_LM= Superficie cumbre de ladera de montaña, LD_MO_S= Ladera de montaña superior, LD_MO_M= Ladera de montaña media, LD_MO_I= Ladera de montaña inferior, PI_M_S= Piedemonte superior, PI_M_I = Piedemonte inferior, PA_FB = Pared aluvial en fondo de barranco; % SUP= Porcentaje de superficie de cada tipo de relieve con respecto al sistema; EVA= Endógeno volcánico acumulativo, Ts= Terciario superior, LIT= Litología, Bv= Brecha volcánica, FLA= Flujos lávicos andesíticos, CR= Clases de relieve, EDAF= Edafología predominante, Hh= Feozem haplico, I= Rendzina; VEG= Vegetación, Bpq= Bosque de pino-encino, SBC= Selva baja caducifolia; T ° C= Temperatura media anual, PP= Precipitación media anual.

3.2.2 Endógeno volcánico acumulativo - exógeno acumulativo aluvial

Este relieve es muy abundante en la zona conocido como “Glacís de Buenavista”, (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2003), pero debido a la delimitación de la cuenca sólo se considera una parte, que corresponde a un tercio del área de interés. Es el resultado de dos procesos diferentes, el primero de tipo volcánico de flujos lávicos andesíticos, modificado por procesos de depósito y erosión originados por antiguos abanicos aluviales, generando barrancos angostos en dirección norte-sur y superficies cumbrales con pendientes ligeras cubiertas de materiales piroclásticos. La forma alargada de la subcuenca favorece un gradiente altitudinal que inicia a los 2,020 al norte hasta los 1,320 msnm en el sur, al límite con Xochicalco. Se delimitaron sólo dos SM, definidos por los cambios de elevación que se presentan y las formas del relieve; contribuyen a la transición de vegetación templada a selva baja caducifolia. La vegetación más densa se restringe a las laderas pronunciadas y al cauce del río Tembembe. El uso de suelo es principalmente agrícola, extendido incluso a las laderas de barrancas con pérdida de cobertura vegetal (Olvera *et al.*, 2000).

3.2.2.1 Sistema morfogénético Planicie acumulativa “Buenavista”

Ésta planicie es parte del Glacís de Buenavista que fue formado a partir de depósitos volcano-sedimentarios durante el Pleistoceno. Constituye un complejo de flujos lávicos cubiertos por piroclastos, los conglomerados así como los materiales detríticos, derivan de las rocas volcánicas andesíticas de la formación Zempoala (del Terciario Superior), aunque los conglomerados y materiales detríticos intercalados con los flujos de lava y lahares provienen de la formación Cuernavaca (Pleistoceno Tardío a edad reciente) e incluso de la formación Chichinautzin (Escamilla *et al.*, 2002; Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2003).

Se delimitaron 25 estructuras y 158 unidades morfogénéticas, que forman un conjunto de laderas y terrazas algunas ubicadas en las paredes del barranco. Las superficies cumbrales son numerosas, alargadas y representan el 52% del área total (Cuadro 3.6). más abundantes son las laderas y terrazas (Figura 3.6). Las laderas presentan geología distinta, aún en la misma unidad, al norte, cercanas a la población de Ahuatenco la litología predominante es la Toba, son muy fracturadas, extendidas y escalonadas; hacia la parte

Sistemas Morfogenéticos del Relieve Endógeno Volcánico Acumulativo-Exógeno Acumulativo Aluvial

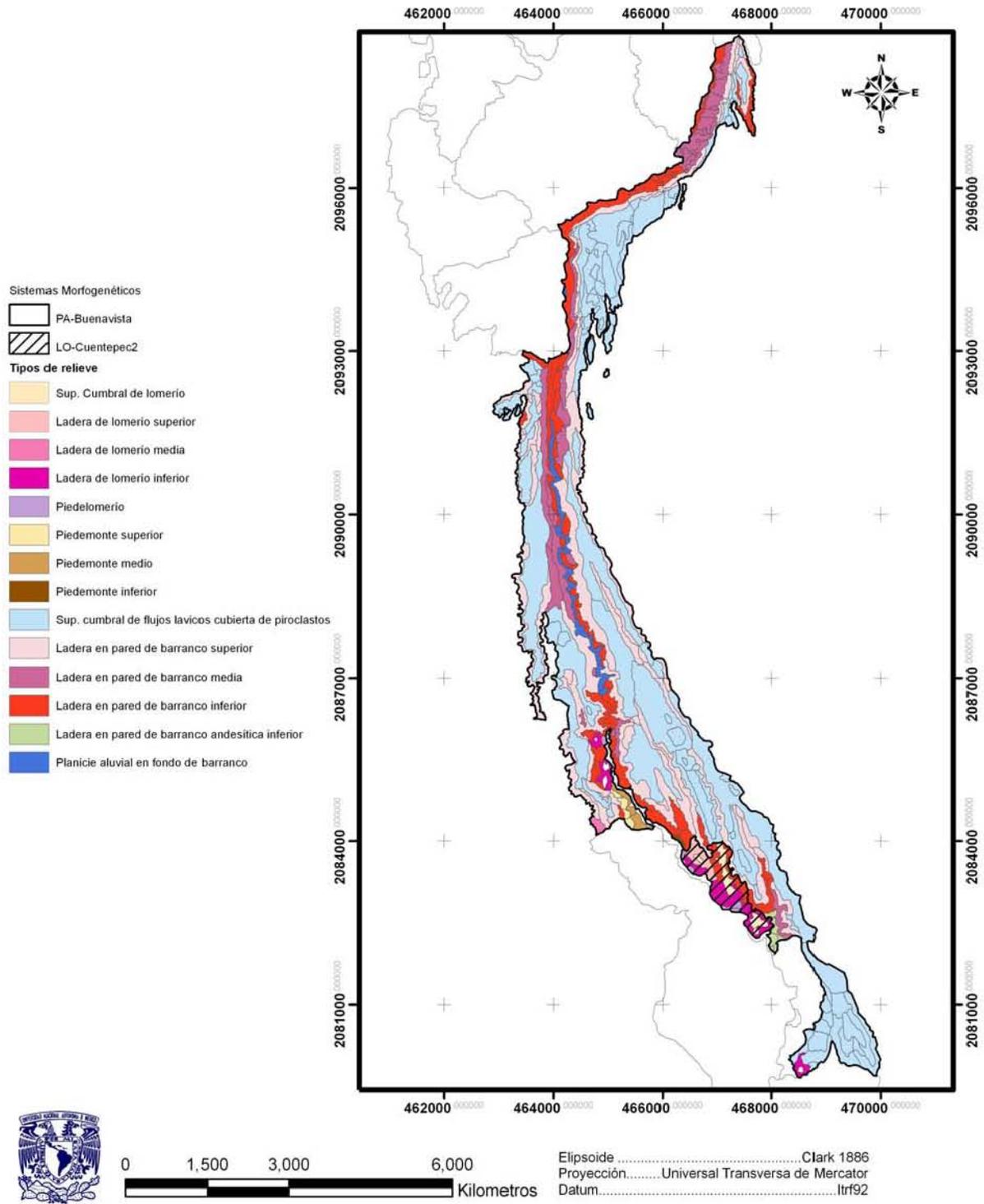


Figura 3.5.1 Mapa de los sistemas morfogenéticos del relieve endógeno volcánico acumulativo-exógeno acumulativo aluvial. Planicie acumulativa Buenavista

sur, cerca de Cuentepec y Xochicalco están formadas por areniscas y conglomerados, son más estrechas y de pendientes más fuertes, además presentan diversas evidencias de desprendimientos de materiales en las paredes de barranco.

El uso de suelo en las superficies cumbreles, laderas altas, laderas medias e interfluvios es agrícola de temporal. Debido a la naturaleza del suelo, así como a la pérdida de horizontes superficiales (por sobreexplotación) es fácil encontrar zonas desprovistas de vegetación sobre todo en las partes centrales. Las laderas de pared de barranco al norte presentan vegetación de selva baja combinada con *Juniperus* y en las partes más bajas vegetación ribereña (Camacho, 2004).

Cuadro 3.6. Síntesis de variables biofísicas para el SM “Planicie Aluvial Buenavista”

TIPO RELIEVE	NUMG	% SUP	ALTITUD	ORIGEN	EDAD	LIT	CR	EDAF	VEG	T ° C	PP (mm)
SC_FL+P	40	51.8	1421	EVA-EAA	Tp	FLA+CA	8-10°	A o	Ma-AT	23.5	900
LD_PB_S	47	25.7	1508	EVA-EAA	Tp	DL+CA	13-20°	A o	Ma-SBC-Bpq	26.4°	860
LD_PB_M	17	7.8	1560	EVA-EAA	Tp	DL	22-30°	A o	Ma-SBC-Bpq	25.5	930
LD_PB_I	27	10.5	1490-1680	EVA-EAA	Tp	DL	33-50°	A o	Ma-SBC-Bpq	27.8°	909
PI_M_I	2	0.5	1302	EVA-EAA	Tp	DL	18-22°	H h	Ma-pas	27.7	879
SC_LO	3	0.1	1343	EVA-EAA	Tp	FLA+CA	16-20°	H h	Ma-SBC	27.4	886
LD_LO_M	4	0.2	1447	EVA-EAA	Tp	FLA+CA	16-32°	H h	Ma-SBC	27.7°	881
LD_LO_I	7	0.9	1251	EVA-EAA	Tp	FLA+CA	17°	H h	Ma-SBC	27.5°	833
PI_LO	4	0.2	1281	EVA-EAA	Tp	FLA+CA	15-28°	H h	Ma-SBC	27.7°	877
PA_FB	8	1.9	1550	EVA-EAA	Tp	DL+CA	18-25°	H h	Ma-SBC	25.9°	924

NUMG= Número de morfoestructura, LD_PB_S= Ladera de pared de barranco superior, LD_PB_M= Ladera de pared de barranco media, LD_PB_I= Ladera de pared de barranco inferior, SC_FL+P= Superficie cumbreles de flujos lávicos cubierta por piroclastos, PI_M_I= Piedemonte inferior, SC_LO= Superficie cumbreles de lomerío, LD_LO_M= Ladera de lomerío media, LD_LO_I= Ladera de lomerío inferior, PI_LO= Piedelomerio, PA_FB= Planicie aluvial en fondo de barranco; EVA-EAA= Endógeno volcánico acumulativo-Exógeno acumulativo aluvial, Tp= Terciario Plioceno, LIT= Litología, FLA+CA= Flujos lávicos andesíticos cubiertos por Clastos antesíticos, DL= Derrames de lava; CR= Clases de relieve, EDAF= Edafología predominante, Ao= Acrisol ocrico, Hh= Feozem haplico; VEG= Vegetación, Ma-SBC= Matorral- Selva baja caducifolia; Bpq= Bosque de pino-encino, pas= pastizal, T ° C= Temperatura media anual, PP= Precipitación media anual.

El cauce del Río Tembembe divide a esta unidad en dos partes, con diferentes geformas, en las laderas al este se observaron en mayor medida fenómenos de desplazamiento,

escalonamientos de barranco y acumulativos con vegetación de selva baja, y sólo en la parte norte de Ahuatenco, se combina con especies de los géneros *Quercus* y *Juniperus*. Por el contrario, en las laderas al oeste del cauce, los cambios repentinos de pendiente no favorecen fenómenos de acumulación, sino de desplazamiento de masa. Cercano a Cuentepec se presentan geoformas de lomeríos bajos y piedelomeríos, donde abunda la SBC combinada con matorrales y elementos de mayor humedad. La planicie aluvial al fondo del barranco presenta vegetación ribereña. Dominan las laderas orientadas al Este.

3.2.2.2 Sistema morfo genético “Cuentepec 2”

Está integrado por tres estructuras, que forman un conjunto de lomeríos, de laderas regulares, algunas laderas fueron diferenciadas en superiores, medias e inferiores éstas últimas representan el 38% de la superficie (Cuadro 3.7) por los cambios de pendiente que presentan. Se observó piedelomerío en la parte más baja, donde se une con otros sistemas. Las superficies cumbreles son muy regulares. La litología está compuesta de depósitos laháricos, areniscas y conglomerados volcánicos del mismo origen que el SM “Planicie Acumulativa Buenavista” y datan del Plioceno.

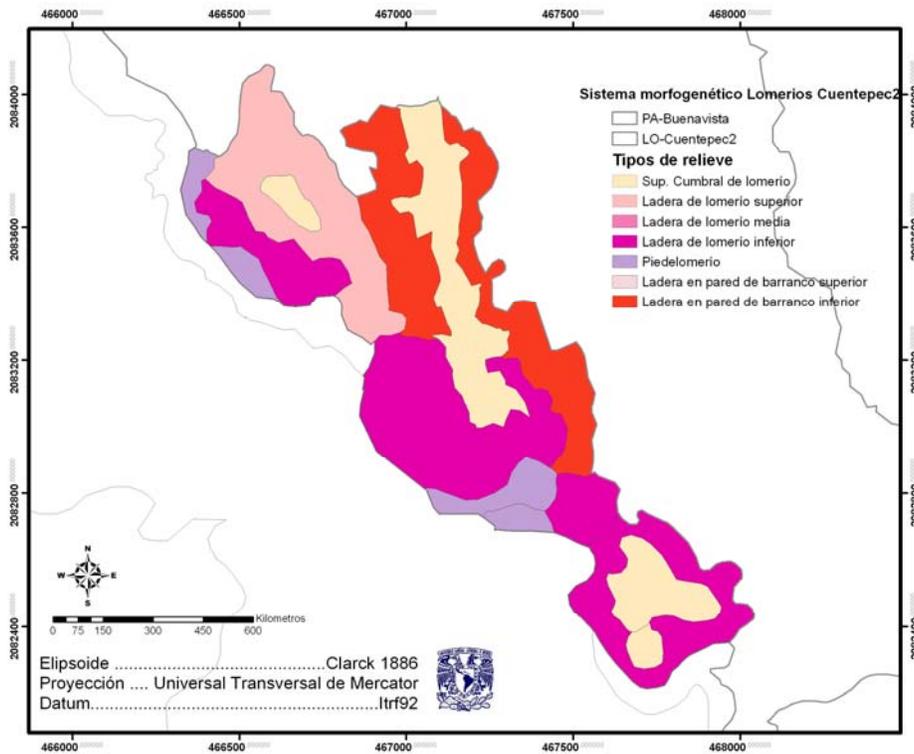


Figura 3.5.2 Morfoestructuras y unidades morfo genéticas del sistema Cuentepec2.

Son lomeríos separados distribuidos en dirección noroeste-sureste, de altura relativa media predominan las pendientes ligeras, aunque se presentan pendientes fuertes en los límites estructurales de 45° y hasta 52° (Cuadro 3.7). Se forman en la parte final de este tipo de relieve (EVA-EAA) en la parte este del cauce del río Tembembe. Los suelos que se desarrollan son rendzinas.

La estructura de menor extensión está en contacto con el SM “Lomeríos la Angostura y Cuentepec” y presenta una litología combinada con materiales andesíticos además de los conglomerados volcánicos, posiblemente el plegamiento de la zona afecto dejando al descubierto estos materiales en la parte sur de la estructura, donde se observan pendientes más pronunciadas. De acuerdo con el NDVI, las superficies cumbrales y laderas de estos lomeríos están cubiertas por SBC combinada con matorral, mientras que las laderas más bajas presentan SBC con mejor estado de conservación y combinada con elementos de vegetación riparia. La cobertura vegetal en esta estructura es homogénea y densa.

Cuadro 3.7. Síntesis de variables biofísicas para el SM “Lomeríos Cuentepec2”

TIPO RELIEVE	NUMG	% SUP	ALTITUD	ORIGEN	EDAD	LIT	CR	EDAF	VEG	T ° C	PP (mm)
SC_LO	5	12	1335	EVA-EAA	Tp	FLA+CA	28-40°	E	SBC-Ma	28°	860
LD_LO_S	4	22	1310	EVA-EAA	Tp	FLA+CA	22-50°	E	SBC-Ma	28.1°	865
LD_LO_I	9	38	1262	EVA-EAA	Tp	FLA+CA	19-25°	E	SBC-Ma	28.6°	849
LD_PB_I	12	20	1308	EVA-EAA	Tp	FLA+CA	35-50°	E	SBC-Ma	28.3°	855
PI_LO	4	8	1230	EVA-EAA	Tp	FLA+CA	20-22°	E	SBC-Ma	28°	864

NUMG= Número de morfoestructura SC_LO= Superficie cumbrales de lomerío, LD_LO_S= Ladera de lomerío superior, LD_LO_I= Ladera de lomerío inferior, PI_LO= Piedelomerío LD_PB_I= Ladera en pared de barranco inferior; % SUP= Porcentaje de superficie de cada tipo de relieve con respecto al sistema; EVA= Endógeno volcánico acumulativo, EAA= Exógeno volcánico acumulativo aluvial; Tp= Terciario pleistoceno, LIT= Litología, FLA+CA= Flujos lávicos andesíticos cubiertos por clastos andesíticos, CR= Clases de relieve, EDAF= Edafología predominante E= Rendzina; SBC= Selva Baja Caducifolia-Matorral; T ° C= Temperatura media anual, PP= Precipitación media anual.

3.2.3 Endógeno estructural plegado

Este relieve a diferencia de los dos anteriores, es derivado de rocas calizas del cretácico inferior que sufren fenómenos de plegamiento durante el Plioceno u Oligoceno, dando origen a las estructuras actuales. La distribución de éste relieve tiene una orientación noroeste-sureste. Se manifiesta como una agrupación de lomeríos altos, medios y bajos que representan sólo el 13% del área. Los lomeríos son cóncavos y de pendientes fuertes a ligeras, separados incluso por el cauce del Río Tembembe (Xochicalco). La agrupación de los lomeríos está en función de la disección causada por el plegamiento, la altura relativa y su ubicación con respecto al cauce. A diferencia de los dos grupos anteriores de relieve la altitud y distribución varía de noroeste a sureste debido a la distribución de las calizas, con elevaciones entre los 1,580 y 1,070 msnm. Se delimitaron tres SM, principalmente de lomeríos. Los lomeríos más altos están al suroeste en el SM “Lomeríos La Angostura y Cuentepec” y se rodean de lomeríos medios y bajos.

3.2.3.1 Sistema morfogenético “La Angostura y Cuentepec”

Es el grupo más grande de lomeríos, formados por roca caliza del Cretácico inferior que fue modificada por plegamientos durante el Plioceno u Oligoceno. Son un conjunto de lomeríos altos, medios y bajos, en su mayoría cóncavos de pendientes ligeras y superficies cumbres regulares; las laderas de lomerío inferior son las más numerosas y extensas (31% de la superficie, Cuadro 3.8), seguida por las laderas superiores y las superficies cumbres, rodeadas de piedelomerío, el de mayor proporción localizado al límite con la unidad “Planicie acumulativa Buenavista”.

Las partes norte y noreste están en contacto con los materiales que forman el Glacis de Buenavista. Las subcuencas Cuentepec y Xochicalco convergen en la parte norte de éste conjunto de lomeríos además una sección del parteaguas de ambas cuencas se localiza justo a la mitad. Aunque la presencia de fallas y fracturas separan con claridad ambos SM se consideran en el mismo SM porque el conjunto Cuentepec tiene solo una estructura.

Este SM es un conjunto de lomeríos altos, medios y bajos, organizado en ocho estructuras delimitadas por fracturas y el plegamiento. El conjunto de estructuras llamado “Cuentepec” forma lomeríos alargados, de pendientes suaves con dirección noroeste-sureste y altura relativa menor de 150 m pero mayor de 100 m. Las superficies cumbreales están cubiertas de agricultura de temporal, mientras que en las laderas y los piedelomeríos abunda la SBC. El piedelomerío cercano a la planicie aluvial presenta diversas fracturas. Las laderas al oeste presentan pendientes fuertes y un cambio en los valores del NDVI que se relaciona con la SBC.

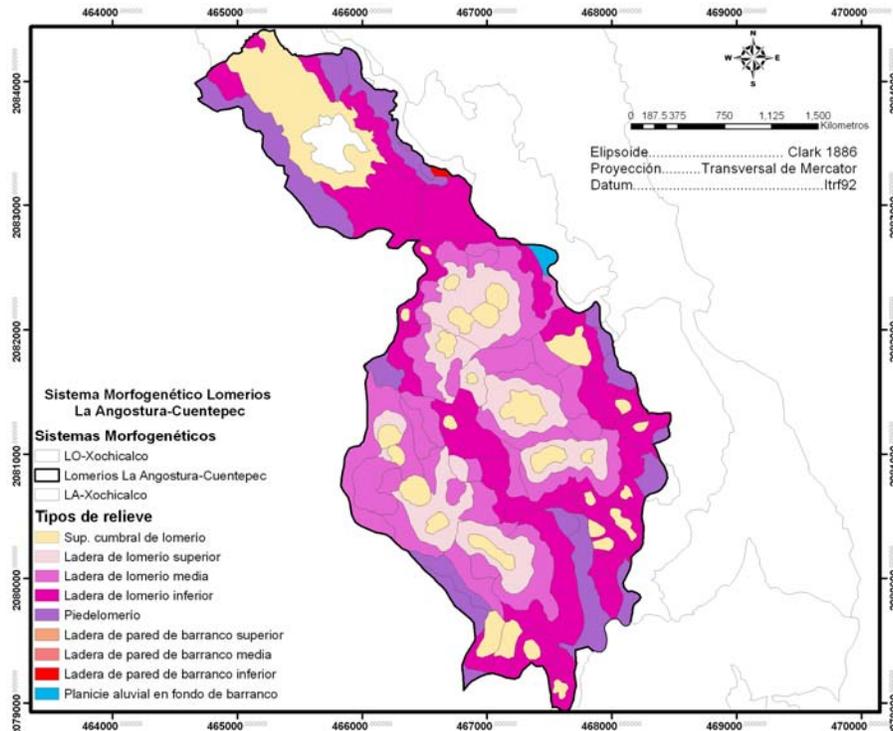


Figura 3.6.1 Morfoestructuras y unidades morfogénicas del sistema La Angostura y Cuentepec

Mientras que el conjunto “La Angostura” es una agrupación de lomeríos cóncavos y plegados de diversas alturas; los más altos se encuentran al centro y cercano al cauce, los lomeríos bajos. En ambos casos, predominan las pendientes suaves, aunque la ausencia de pendientes fuertes es menor tiene afinidad a la exposición norte y este. Predomina la exposición noreste, este y sureste. Tanto las laderas como los piedelomerío presentan vegetación de SBC y en algunos casos se combina con pastizales inducidos. Se observo

cierta relación entre las laderas con exposición este y SBC combinada con pastizales de acuerdo con la imagen satelital. Los piedelomerío cercanos al cauce del Río Tembembe, con respecto a la vegetación, presentan valores relacionados con mayor humedad, por lo que se relaciona con vegetación riparia.

Los suelos que se desarrollan sobre esta litología son principalmente rendzinas, tanto en las unidades de Cuentepec como en la Angostura, solo se presentan ligeras variaciones edafológicas con respecto a la fase textural, y pequeñas zonas con suelos combinados con clastos andesíticos en las partes de contacto con el SM “Glacís de Buenavista”.

Cuadro 3.8. Síntesis de variables biofísicas para el SM “Lomeríos La Angostura y Cuentepec”

TIPO RELIEVE	NUMG	% SUP	ALTITUD	ORIGEN	EDAD	LIT	CR	EDAF	VEG	T ° C	PP (mm)
SC_LO	27	15.8	1510	EEP	Ki	Caliza	28-65°	E	SBC	28.5°	860
LD_LO_S	12	13.8	1484	EEP	Ki	Caliza	30-50°	E	SBC	28.6°	856
LD_LO_M	27	24.5	1338	EEP	Ki	Caliza	30-45°	E	SBC	28.7°	852
LD_LO_I	36	31.4	1290	EEP	Ki	Caliza	25-29°	E	SBC	28.5°	845
PI_LO	12	14.2	1420	EEP	Ki	Caliza	23-35°	E	SBC	28°	840
PA_FB	5	0.4	1200	EEP	Ki	Caliza	26°	E	SBC	28.5°	853

NUMG= Número de morfoestructura SC_LO= Superficie cumbre de lomerío, LD_LO_S= Ladera de lomerío superior, LD_LO_M= Ladera de lomerío media, LD_LO_I= Ladera de lomerío inferior, PI_LO= Piedelomerío, PA_FB= Planicie aluvial en fondo de barranco; % SUP= Porcentaje de superficie de cada tipo de relieve con respecto al sistema; EEP= Endógeno estructural plegado, Ki= Cretácico inferior LIT= Litología, CR= Clases de relieve, EDAF= Edafología predominante, E= Rendzina, SBC= Selva Baja Caducifolia; T ° C= Temperatura media anual, PP= Precipitación media anual.

3.2.3.2 Sistema morfogenético “Xochicalco”

Son un conjunto de lomeríos de diferentes alturas, se distinguen tres lomeríos altos y extensos, en uno de los cuales se ubica la zona arqueológica de Xochicalco, con pendientes regulares y superficies cumbrales extensas (Cuadro 3.9), junto a éstos lomeríos en la parte sur-oeste se ubican un conjunto de lomeríos bajos, regulares con laderas de pendientes ligeras, rodeado de piedelomerio. Las laderas bajas constituyen el 27% y las laderas superiores el 23%, aunque éstas tienen un menor número son muy extensas, como puede observarse en el cuadro 3.9. Este SM tiene una composición variante, producto del contacto con el relieve EVA-EAA y los movimientos de plegamiento que modificaron a las

calizas e hicieron aflorar los materiales andesíticos. Se compone por cinco estructuras y 39 geoformas. La mayor proporción corresponde a las calizas del Cretácico, que forman los tres lomeríos más altos pero están separados del SM “Lomeríos la Angostura” por el río Tembembe, forman lomeríos cóncavos y presentan pendientes ligeras a moderadas. El plegamiento que modifica éstas calizas, también pone al descubierto parte de los materiales de flujos lávicos que originaron el relieve aledaño donde se forman lomeríos bajos.

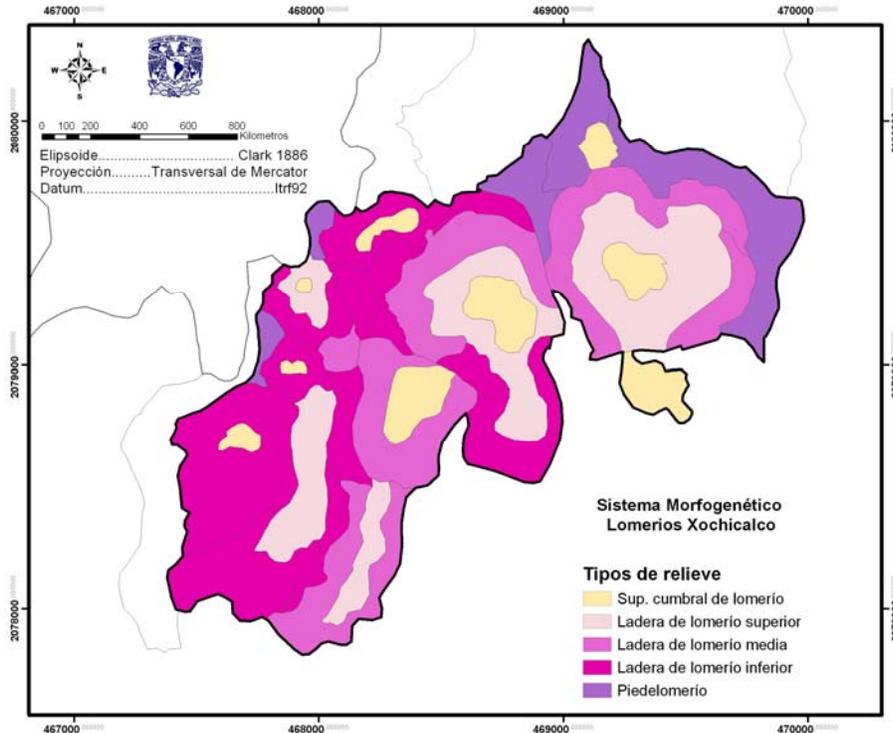


Figura 3.6.2 Morfoestructuras y unidades morfogénicas del sistema La Angostura y Cuentepec

Las pendientes de los lomeríos son ligeras y el espaciamiento que existe entre los diversos lomeríos favorece la formación de pequeños piedelomeríos. En los lomeríos bajos localizados al norte y oeste predomina la SBC de acuerdo con el análisis de vegetación, en estado semiconservado, mientras en los lomeríos altos se observó SBC en estado conservado, posiblemente relacionado con la protección del área arqueológica, sin embargo en los alrededores de ésta también se presentan asociaciones con pastizales y palmares.

Los piedelomeríos en los lomeríos altos, presentan también valores similares a las asociaciones con pastizal. Los lomeríos formados a partir de materiales andesíticos,

presentan vegetación de SBC en combinación con pastizales y en algunos casos pendientes fuertes. Los suelos dominantes son las rendzinas.

Cuadro 3.9. Síntesis de variables biofísicas para el SM “Lomeríos Xochicalco”.

TIPO RELIEVE	NUMG	% SUP	ALTITUD	ORIGEN	EDAD	LIT	CR	EDAF	VEG	T ° C	PP (mm)
SC_LO	9	10.6	1341	EEP	Ki	Caliza	27-50°	E	SBC	29.5°	838
LD_LO_S	6	22.7	1315	EEP	Ki	Caliza	38°	E	SBC	29.5°	840
LD_LO_M	6	23.2	1243	EEP	Ki	Caliza	23-30°	E	SBC	29.7°	835
LD_LO_I	12	27.9	1260	EEP	Ki	Caliza	19-21°	E	SBC	29.6°	831
PI_LO	6	15.6	1248	EEP	Ki	Caliza	15-38°	E	SBC	29.6°	832

NUMG= Número de morfoestructura SC_LO= Superficie cumbre de lomerío, LD_LO_S= Ladera de lomerío superior, LD_LO_M= Ladera de lomerío media, LD_LO_I= Ladera de lomerío inferior, PI_LO= Piedelomerío; % SUP= Porcentaje de superficie de cada tipo de relieve con respecto al sistema; EEP= Endógeno estructural plegado, Ki= Cretácico inferior LIT= Litología, FLA= Flujos lávicos andesíticos, CR= Clases de relieve, EDAF= Edafología predominante, E= Rendzina, SBC= Selva baja caducifolia; T ° C= Temperatura media anual, PP= Precipitación media anual.

3.2.3.3 Sistema morfoestructivo “Laderas andesíticas Xochicalco”

Este SM incluye un grupo de laderas ubicadas en la pared de barranco al este del río Tembembe en la parte sur, cercana a Xochicalco.

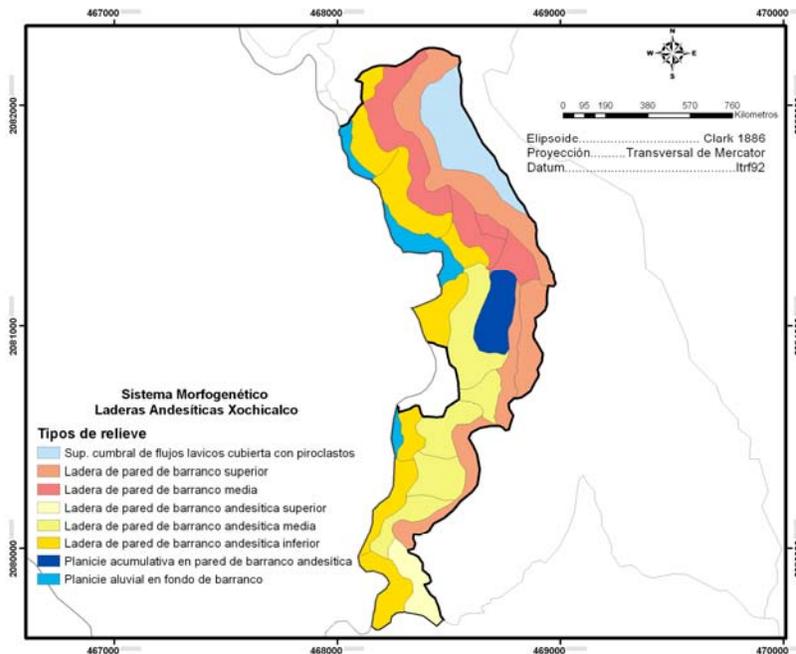


Figura 3.7 Morfoestructuras y unidades morfoestructivas del sistema La Angostura y Cuentepec.

Presentan deslizamientos que forman laderas con diferentes cambios de pendiente y terrazas; posiblemente los movimientos que plegaron las rocas calizas, originaron el desplazamiento de los materiales piroclásticos y conglomerados que se depositaron durante la formación del Glacís de Buenavista, dejando al descubierto la andesita en las paredes de barranco, corresponde a la parte más amplia del cauce del río Tembembe. La mayor extensión esta representada por las laderas de pared de barranco superiores e inferiores es decir más del 40% de la superficie (Cuadro 3.10) como puede observarse en dicho cuadro, solo se presenta una superficie cumbral, pero representa el 9% de la extensión del sistema.

Las superficies cumbrales de estas laderas e incluso el hombro de ladera, presentan materiales asociados al SM “Planicie Acumulativa Buenavista” con pendientes ligeras. En la parte sur del SM se observaron pendientes pronunciadas, que corresponden a las laderas cercanas al SM Lomeríos Xochicalco. Este SM se localiza donde el cauce del río es más abierto, con mayor distancia entre ambas paredes de barranco y la longitud de estas laderas es mayor que las que se encuentran en la cabecera de la cuenca.

Cuadro 3.10. Síntesis de variables biofísicas para el SM “Laderas andesíticas Xochicalco”.

TIPO RELIEVE	NUM G	% SUP	ALTITU D	ORIGE N	EDA D	LIT	CR	EDAF	VEG	T ° C	PP (mm)
SC_FL+P	1	9.2	1317	EEP	Tp	An	26-33°	E	SBC	28.8°	847
LD_PB_S	1	22.9	1275	EEP	Tp	An	20°	E	SBC	29°	834
LD_PB_M	1	14.1	1271	EEP	Tp	An	22°	E	SBC	29°	839
LD_PB_I	4	22.4	1231	EEP	Tp	An	19-24°	E	SBC	28.9°	841
LD_PB_AS	1	3.5	1203	EEP	Tp	An	34-48°	E	SBC	29.4°	834
LD_PB_AM	1	18.5	1194	EEP	Tp	An	25-50°	E	SBC	29.2°	835
PA_FB	4	9.5	1136	EEP	Tp	An	12°	E	SBC	28.5	848

NUMG= Número de morfoestructura, , LD_PB_S= Ladera de pared de barranco superior, LD_PB_M= Ladera de pared de barranco media, LD_PB_I= Ladera de pared de barranco inferior, SC_FL+P= Superficie cumbral de flujos lávicos cubierta por piroclastos; EVA-EAA= Endógeno volcánico acumulativo-Endógeno acumulativo aluvial, Tp= Terciario Plioceno, LIT= Litología, FLA+CA= Flujos lávicos andesíticos cubiertos por Clastos antesíticos, CR= Clases de relieve, EDAF= Edafología predominante, Th= Andosol húmico, Bd= Cambisol districo; VEG= Vegetación, BMM= Bosque Mesófilo de montaña, Ma-SBC= Matorral- Selva Baja Caducifolia; T ° C= Temperatura media anual, PP= Precipitación media anual.

La cobertura vegetal en estas laderas es diversa, en la parte norte en la superficie cumbral y hombro de ladera presenta una importante cantidad de pastizales y en la parte media de las laderas de barranco se combina con elementos de SBC; mientras en la parte sur donde las pendientes son más pronunciadas tiene mayor densidad la SBC, en las zonas más bajas se observa vegetación ribereña, más húmeda que el resto. Las laderas media y superior están cubiertas por SBC, mientras que las superficies cumbrales tienen algunos rasgos de pastizal inducido con SBC.

3.3 Vegetación y uso del suelo

Se obtuvieron 130 polígonos de vegetación en la interpretación visual, que se relacionaron con comunidades vegetales de Bosque Mesófilo de Montaña, bosque de *Abies* (sólo en la parte norte de la cuenca), bosques de *Pinus* y bosque de *Quercus* en la parte central de la subcuenca alta (Mexicapa y Tlaltizapán) y la SBC en la parte media de la cuenca (Ahuatenco) con mayor proporción en la parte sur, cercano a Xochicalco. Se delimitaron de igual forma las asociaciones de éstas comunidades, principalmente la asociación *Pinus-Quercus* y las asociaciones con porciones de pastizal inducido o matorrales inducidos con SBC.

De acuerdo con lo observado en la imagen satelital la vegetación templada tiene las coberturas más extensas en la parte norte en las subcuencas Mexicapa y Tlaltizapán, mientras en las subcuencas de Ahuatenco predominan los bosques mixtos de *Pinus - Quercus*, así como la selva baja caducifolia en las subcuencas de Cuentepec y Xochicalco. Cabe destacar que la mayor proporción de pastizal y de agricultura de temporal se localizan al Este y Oeste de la subcuenca de Cuentepec, donde se ve favorecido por el relieve de planicies. La transición de la vegetación se observa inicialmente en Ahuatenco donde se observan los elementos de bosque templado combinados con elementos más cálidos de selva baja caducifolia, y esta transición continúa a lo largo de la barranca del río Tembembe.

Las coberturas más boscosas y extensas se localizan en la parte norte, en las subcuencas Tlaltzapán y Mexicapa, con ligeras variaciones en cuanto a tono y brillo. En las secciones Cuentepec y Xochicalco estas son más reducidas y se ven afectadas por la geomorfología del área.

3.3.1 Índice de la vegetación normalizada

Se obtuvieron siete categorías espectrales a partir del análisis del índice de la vegetación la imagen SPOT, cada una representa un rango espectral, como se observa en las figuras 3.8, 3.9 y 3.10. En el mapa final se agrupan todas las categorías.

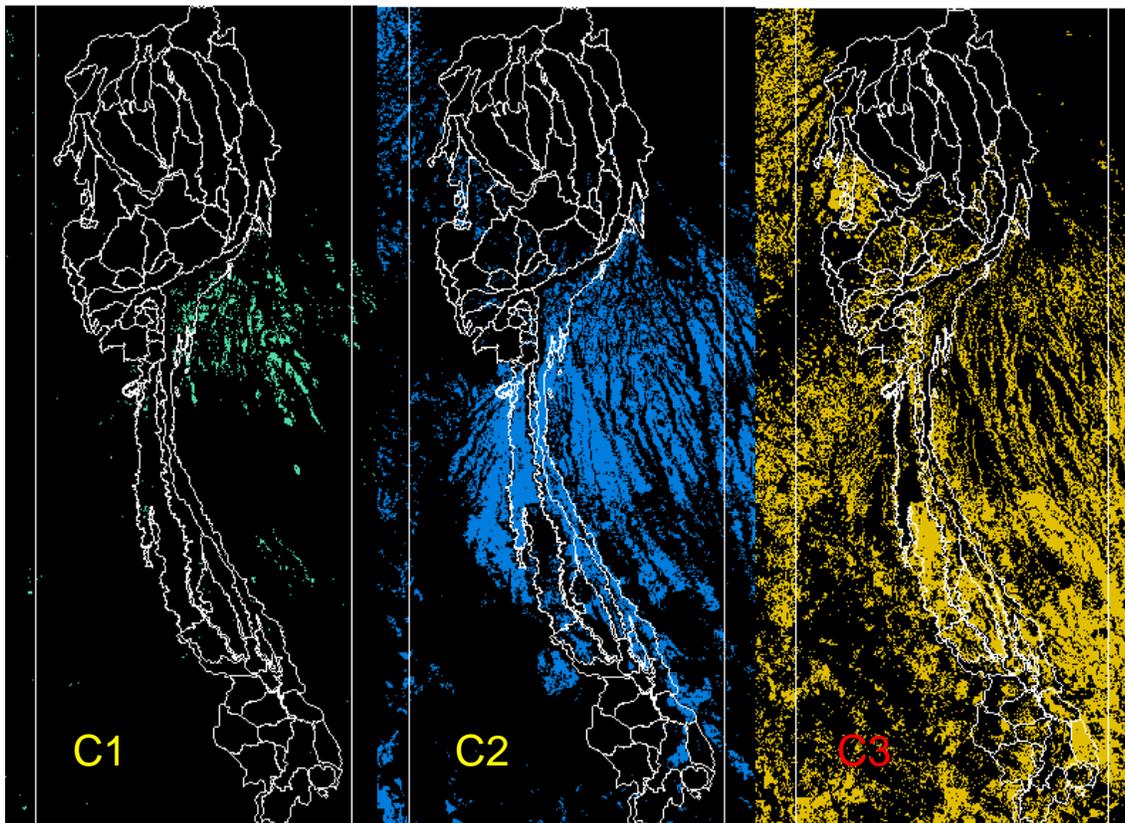


Figura 3.8. Ubicación geográfica de las categorías 1, 2 y 3 del NDVI. Las líneas blancas representan las estructuras geomorfológicas.

Categorías

C1) Agricultura de temporal, bien definida. Se observa particularmente al este de la cuenca de Ahuatenco, y en menor medida en las partes planas al sur, cercano a

Cuentepepec, favorecida por el sustrato de flujos piroclásticos de origen volcánico, así como materiales aluviales del Glacís de Buenavista.

- C2) Pastizales inducidos. Predominan en la zona del Glacís de Buenavista, particularmente en la parte oeste de la zona de estudio, aunque también se presentan al este y al sur, hasta Xochicalco. Se encuentran vinculados con la geología de la región y a las zonas desprovistas de vegetación. También se integran elementos del estrato arbustivo.
- C3) Elementos de selva baja perturbada y matorrales inducidos, distribuidos casi en la totalidad de la zona, excepto al norte. También se incluyen en este intervalo las zonas pobladas, urbanas y semiurbanas (Cuentepepec), así como algunos elementos de bosques perturbados de encino y pino en la parte Noroeste de la cuenca alta y al Noroeste de Cuentepepec. En la parte sur, representa también palmares asociados con remanentes perturbados de selva baja.
- C4) Los principales elementos de la Selva Baja Caducifolia se agruparon en esta categoría, que predomina en la zona Suroeste, asociada a los materiales geológicos. En la subcuenca de Ahuatenco, representa también algunos elementos del bosque de *Quercus* y *Pinus*. En la cuenca de Xochicalco y al Oeste de Cuentepepec esta categoría representa a la vegetación más conservada de esta comunidad vegetal.
- C5) Representa elementos de casi todo el gradiente de vegetación. En la parte norte a los Bosques de *Abies*, así como elementos del bosque de *Pinus* y *Quercus*; en la parte sur representa elementos del suelo con escasa cubierta vegetal, en la zona denominada “El Trapiche”.
- C6) La distribución de ésta categoría se restringe en mayor proporción en la parte norte, corresponde a comunidades de pino, con buen estado de conservación y alta densidad; mientras en la parte Oeste de Ahuatenco representa a los bosques mixtos de *Pinus-Quercus*.
- C7) Es una de las categorías más reducidas y sólo se distribuye en la parte Noreste de la cuenca. Representa algunos elementos del Bosque Mesófilo de Montaña, y Bosques de pino en zonas con mayor humedad.

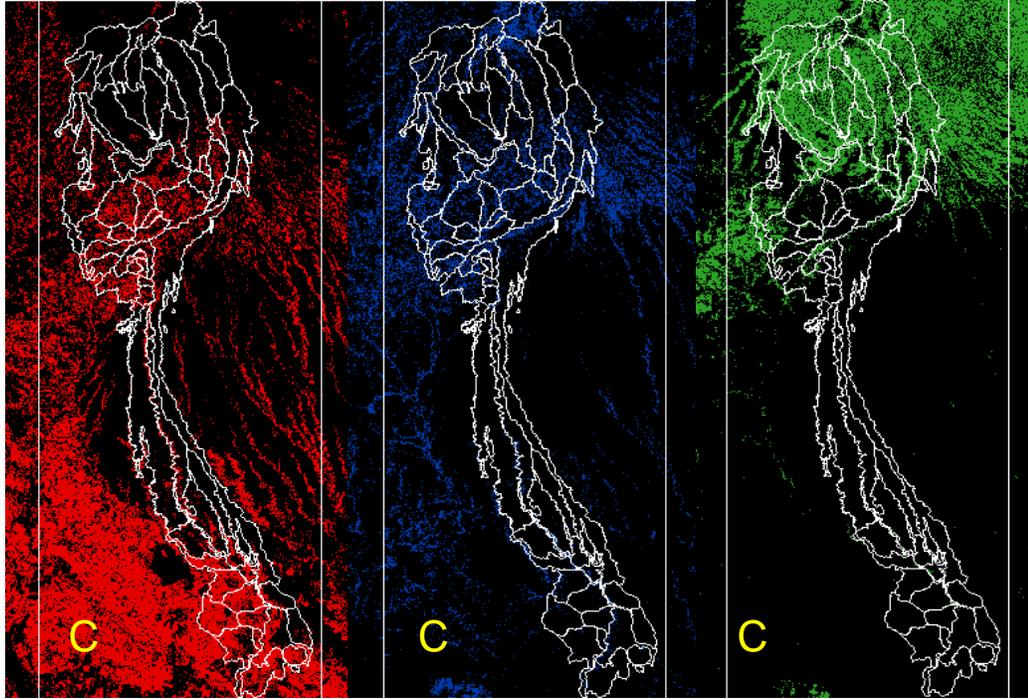


Figura 3.9. Categorías 4, 5 y 6 del NDVI.

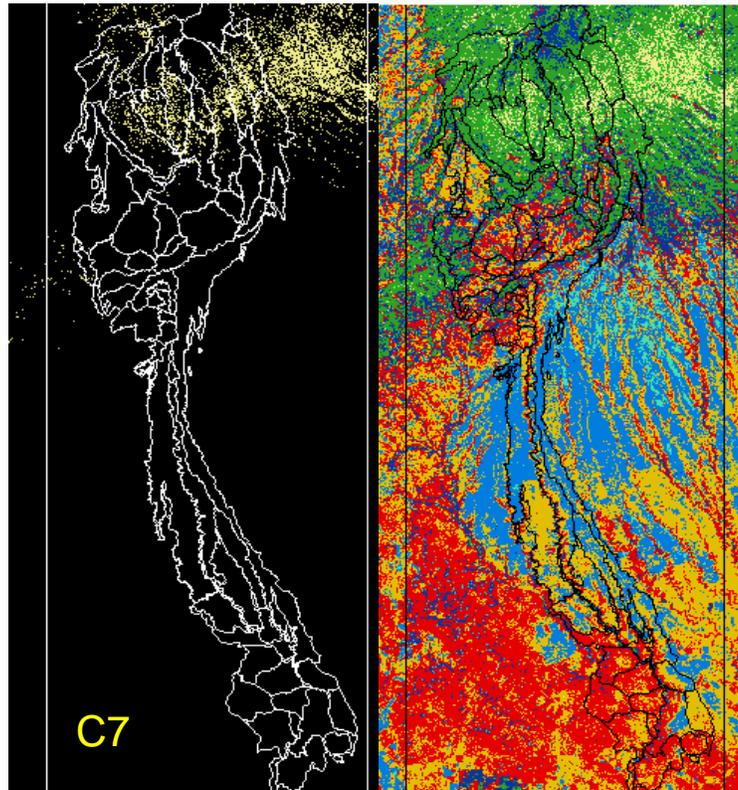


Figura 3.10. Categoría 7 y agregación de todas las categorías del NDVI.

Finalmente en la figura 3.10 se observa la agregación de las categorías del NDVI donde es muy visible la división existente entre la vegetación húmeda, representada principalmente por los tonos verdes y azul marino; y la vegetación de selva baja constituida por los tonos rojizos, además de los amarillos, mientras el azul corresponde a las zonas de uso agrícola o bien con alta densidad de pastizales. Esta imagen se traslapo con la división visual antes mencionada, así como con la delimitación geomorfológica obteniendo el mapa final de vegetación, la zonificación por cuenca y subcuencas.

Cuadro 3.11. Leyenda del mapa de uso de suelo y vegetación

ABREVIATURA	COMUNIDAD	AREA (ha)
A-asoc	Abies, Abies-Cupressus	130.2
AT	Agricultura de temporal	652
Bc	Bosques conservados (BMM, P, P-Q, Q, P-A)	37,482
MiyPi	Matorrales y pastizales	660
Bt	Bosque de transición (Q-J-P, Q-J-SBC, Q-P-SBC)	2,127
R	Ribereña	863
SBCc	SBC conservada	6,982
SBCp	SBC perturbada (con Pi, Mi y Palmar)	4,605
U	Urbano	1,241

A= *Abies sp.*, Asoc= asociadas, AT= Agricultura de Temporal, Bc= Bosque conservado, BMM= Bosque mesófilo de montaña, P= *Pinus*, P-Q= *Pinus-Quercus*, Q=*Quercus*, P-A= *Pinus-Abies*, Mi= Matorral inducido, Pi= Pastizal, Bt= Bosque en transición, R= Ribereña, SBCc= Selva baja caducifolia conservada, SBCp= Selva baja caducifolia perturbada, U= Urbano.

Considerando la información de la imagen de satélite y de los mapas de uso de suelo y vegetación, se clasificaron las asociaciones de vegetación delimitadas, y posteriormente se agruparon de acuerdo con criterios de densidad y respuesta del NDVI, como se observa en el cuadro 3.11 y obtener una clasificación por condición de la vegetación. En el mapa se delimitaron utilizando una combinación de color específico para cada tipo de vegetación dominante y combinaciones de achurados para las diferentes asociaciones.

Mapa de vegetación y uso de suelo de la Cuenca Alta y Media Alta del Río Tembembe

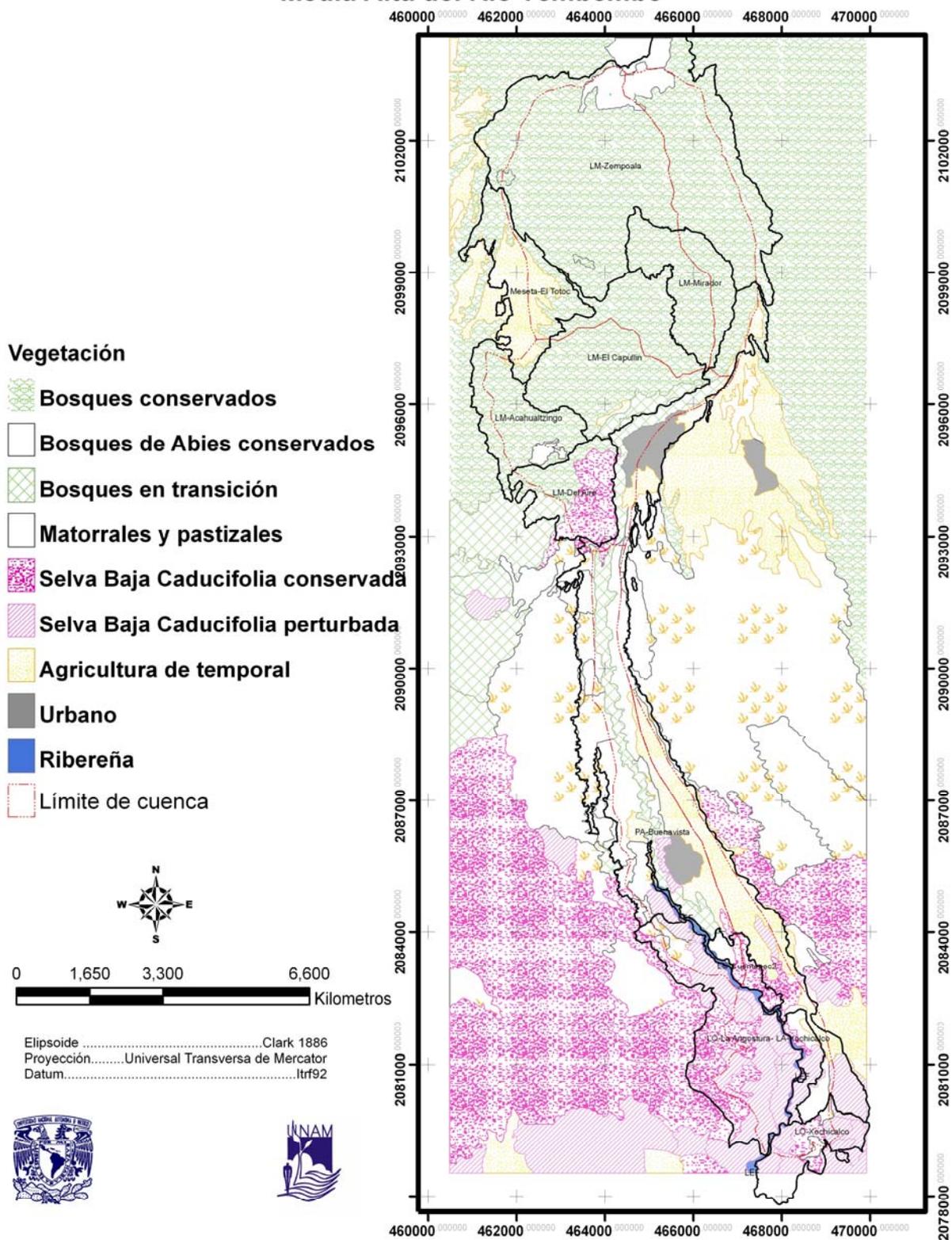


Figura 3.11. Mapa de vegetación y uso de suelo.

3.3.2 Vegetación por subcuencas

En cada subcuenca se evaluó la superficie cubierta por vegetación y la de otros usos de suelo presentes. Las subcuencas Mexicapa y Tlaltizapán presentaron menor número de comunidades diferentes, mientras que la subcuencas Xochicalco y Cuentepec fueron las más fragmentadas.

En la subcuenca Tlaltizapán la mayor cobertura corresponde al Bosque Mesófilo de Montaña, seguido por los bosques de *Pinus – Abies* y *Abies - Cupressus*; además de sus asociaciones con *Pinus* y *Quercus*. Otros usos de suelo, como agricultura de temporal y pastizal inducido representan tan solo 5% del área total.

Cuadro 3.12. Vegetación y uso de suelo en Tlaltizapán y Mexicapa.

Comunidad	Tlaltizapán (ha)	Mxicapa (ha)
A	188.9	58.2
AT	72.1	12.9
BMM	76.8	108.4
P	856.6	0
P-A	121.5	71.5
Pi	469	0
P-Q	13.5	553.2
Q-J-P	0	0.76
Q-P	0	58.4

A= Agricultura, AT= Agricultura de Temporal, BMM= Bosque Mesófilo de Montaña, P= Bosque de Pino, P-A= Bosque de Pino-Abies, Pi= Pastizal inducido, P-Q= Bosque de Pino-Encino, Q-J-P= Bosque Mixto de Encino, Tascate y Pino, Q-P= Bosque de Encino-Pino.

Los bosques mixtos de *Pinus* y *Quercus* predominan en la subcuenca Mexicapa. También se presentan bosques de *Abies* y la agricultura de temporal ocupa menos del 1% del área total.

El gradiente de vegetación que se presenta en la zona, asociado al gradiente climático, propicia la mezcla de elementos de Bosque templado y Selva Baja Caducifolia en lo que podría llamar una área de transición. Dicha mezcla se observa en la subcuenca de Ahuatenco, aunque predominan los bosques mixtos, de *Pinus* y *Quercus* y sus asociaciones y sólo el 13% del área total corresponde con la SBC. Cabe destacar que hay presencia de asentamientos urbanos en la subcuenca, pero es sólo del 4% de la subcuenca.

Comunidad	Ahuatenco (ha)
AT	52.5
Mi	26
P	38.2
Pi	9.8
P-Q	689.2
Q-J-P	141.5
Q-J-SB	67
Q-P	229
Q-P-SB	3.4
SBC	189.4
SBC-J-Q	0.86
U	56.3

Cuadro 3.13. Vegetación y uso de suelo en Ahuatenco.

A= Agricultura, AT= Agricultura de Temporal, BMM= Bosque Mesófilo de Montaña, P= Bosque de Pino, P-A= Bosque de Pino-Abies, Pi= Pastizal inducido, P-Q= Bosque de Pino-Encino, Q-J-P= Bosque Mixto de Encino, Tascate y Pino, Q-P= Bosque de Encino-Pino. SBC= Selva baja caducifolia, U= Urbano.

La subcuenca de Cuentepec es una de las más fragmentadas, y se presentan diferentes asociaciones vegetales, en las cuales los matorrales inducidos tienen una ligera abundancia. Aunque el mayor porcentaje de su superficie corresponde con la asociación de Selva Baja Caducifolia con *Juniperus* y *Quercus*, la agricultura de temporal y los pastizales inducidos tienen una fuerte presencia, al igual que las diferentes asociaciones de matorral inducido.

Comunidad	Cuatepec (ha)	Xochicalco (ha)
AT	188.9	320.6
Mi	312.1	7.2
Pi	191.9	93.4
R	42.4	0
SBC	34.7	43.8
SBC-J-Q	250	223.2
SBC-Pi	38.7	421.7
U	67.8	320.6

Cuadro 3.14. Vegetación y uso de suelo en Cuentepec y Xochicalco.

A= Agricultura, AT= Agricultura de Temporal, BMM= Bosque Mesófilo de Montaña, P= Bosque de Pino, P-A= Bosque de Pino-Abies, Pi= Pastizal inducido, P-Q= Bosque de Pino-Encino, Q-J-P= Bosque Mixto de Encino, Tascate y Pino, Q-P= Bosque de Encino-Pino.

Los datos muestran una predominancia de vegetación secundaria en la zona, ya que a la SBC, poco perturbada y no asociada con *Juniperus* y *Quercus* le corresponde sólo el 3% del área total en Cuentepec y 4%, en Xochicalco.

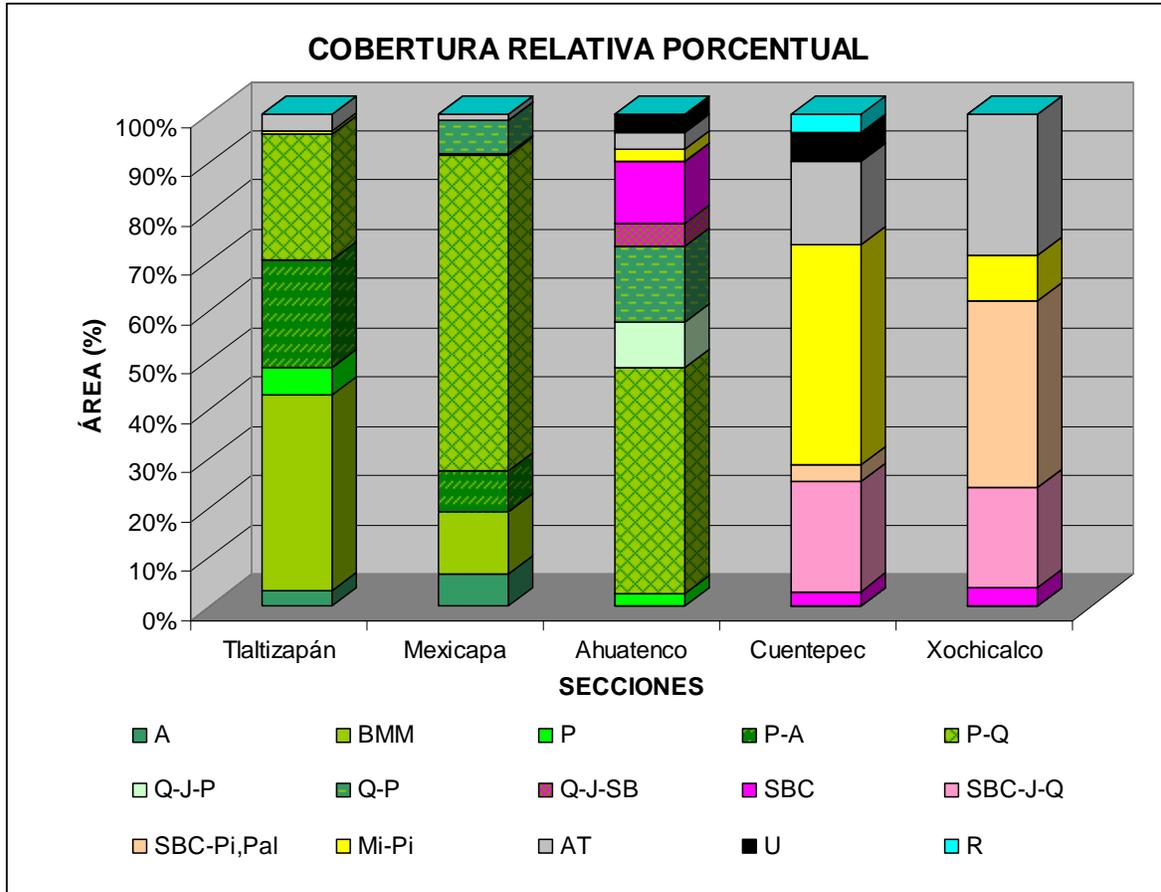


Figura 3.12. Cobertura relativa porcentual de los tipos de vegetación y uso de suelo en cada subcuenca.

A= Agricultura, AT= Agricultura de Temporal, BMM= Bosque Mesófilo de Montaña, P= Bosque de Pino, P-A= Bosque de Pino-Abies, Pi= Pastizal inducido, P-Q= Bosque de Pino-Encino, Q-J-P= Bosque Mixto de Encino, Tascate y Pino, Q-P= Bosque de Encino-Pino.

La Selva baja caducifolia es la vegetación más abundante en la subcuenca Xochicalco, con diferentes asociaciones como palmar, siendo la más común la asociación de SBC con pastizales. La ampliación del caudal del río Tembembe en esta subcuenca, favorece la distribución de la vegetación ribereña. La agricultura de temporal es también abundante.

Para observar la distribución de la vegetación se obtuvo el porcentaje de cada asociación con relación con el área de cada subcuenca, los resultados se graficaron obteniendo la figura 3.12.

3.3.3 Estado de la vegetación por cuencas

Se relacionó el resultado de la interpretación y clasificación de la imagen SPOT, con los valores observados del NDVI considerando estos últimos como una respuesta de la densidad de la vegetación, además de la relación con otros elementos como la agricultura y los pastizales. Así se clasificó a la vegetación en un rango de conservación-degradación que incluyó cinco categorías. Los criterios considerados para establecer esta clasificación son: 1) la textura observada directamente en la imagen de satélite, 2) la agrupación que presentan los píxeles, 3) valores obtenidos de NDVI; de esta forma se plantearon las categorías que se presentan en la Cuadro 3.15

Abreviatura	Condición	Criterios	Área (ha)
C	Conservada	Vegetación densa. Coberturas extensas. Valores NDVI muy bajos (-1). Áreas uniformes.	2960.1
SC	Semiconservada	Vegetación con mediana densidad. Valores NDVI bajos cercanos a cero. Áreas uniformes.	850.3
SD	Semidegradada	Vegetación con mediana densidad Valores NDVI ligeramente mayores a cero. Áreas irregulares.	850.3
D	Degradada	Baja densidad de vegetación. Alta dispersión de píxeles Valores NDVI cercanos a 1(+). Áreas irregulares.	1969.6
NE	No diferenciado	Vegetación ribereña. Cauce del río.	86.2

Cuadro 3.15. Condición de la vegetación.

Por último, se observó la presencia de vegetación ribereña distribuida en la parte baja de las laderas cercanas al cauce del río Tembembe. Como lo menciona Camacho (2004) la composición de éste tipo de vegetación es muy variable y los trabajos realizados son limitados por lo tanto, los polígonos de éste tipo de vegetación no fueron considerados en la clasificación y fue definida como “no diferenciado”. Además, éste tipo de vegetación no fue

delimitado a lo largo de todo el cauce, sólo en la parte sur donde es más amplio. En el mapa de la condición de la vegetación (Fig. 3.15) se observa que las subcuencas Tlaltizapán y Mexicapa tienen más del 50% de su cobertura vegetal conservada, con alta densidad y coberturas homogéneas; y sólo un 5% en Tlaltizapán presenta características de degradación. La subcuenca Mexicapa es muy parecida a Tlaltizapán, con abundantes coberturas conservadas y mínima extensión degradada.

	Conservado (ha)	Semi conservado (ha)	Semi degradado (ha)	Degradado (ha)	No establecido (ha)	Total (ha)
Tlaltizapán	1629.2094	296.9556	138.9008	97.4962	0	2162.562
Mexicapa	471.6205	375.1549	0	16.376	0	863.1513
Ahuatenco	213.3875	26.9904	578.5751	684.5813	0	1503.5343
Cuatepec	350.043	0	4.698	729.4282	42.3808	1126.5501
Xochicalco	295.9049	151.2007	183.3985	441.7987	43.8316	1116.1344

Cuadro 3.16. Porcentaje de la vegetación por sección (subcuencas).

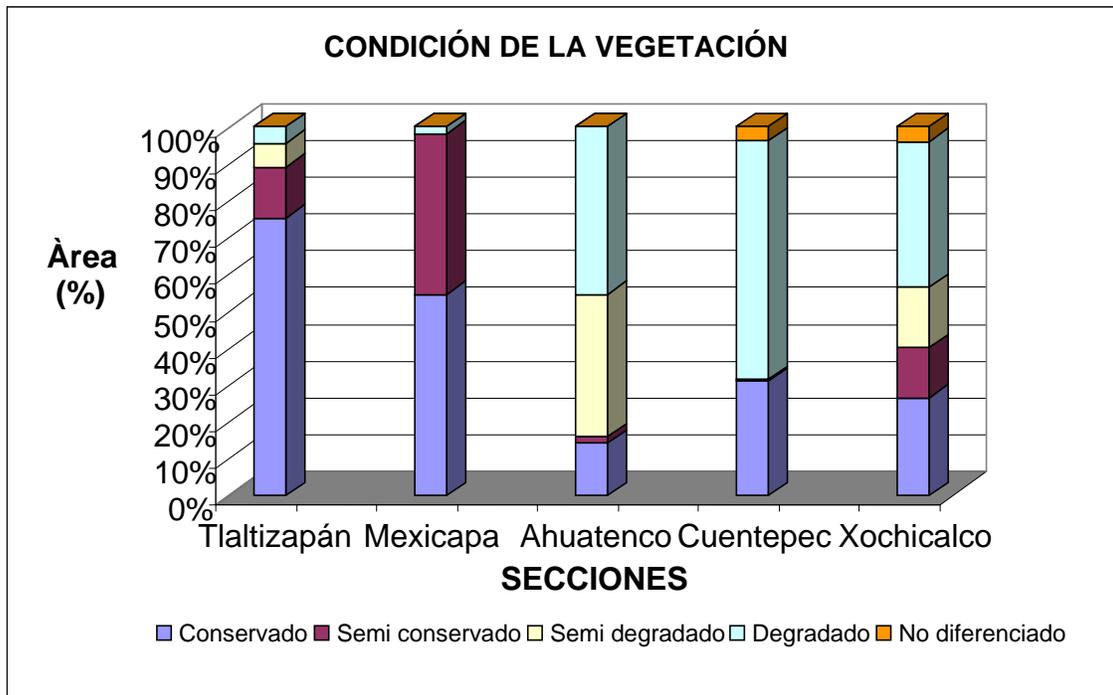


Figura 3.13. Condición de la vegetación por secciones.

La agricultura de temporal y las condiciones de fragmentación en la vegetación generan que las subcuencas Ahuatenco, Cuentepec y Xochicalco tengan una alta proporción de superficie que corresponde a vegetación de condición semidegradada y degradada, con partes mínimas de vegetación conservada. Las características de la vegetación tan

dispersa, y la presencia de zonas deforestadas, aumentan los porcentajes de la cuenca Ahuatenco hasta un 46% del área con características de degradación. En Cuentepec, la fragmentación en la vegetación se interpreta como altos valores de degradación, principalmente por zonas erosionadas y desprovistas de vegetación; la vegetación considerada conservada, se manifiesta en los manchones de las laderas de barranco. La SBC, con coberturas densas fueron consideradas de estado conservado y semi conservado se distribuyen principalmente en la subcuenca de Xochicalco. Su extensión representa sólo el 41% del área y junto con la condición semidegradada corresponden al 57%. Sin embargo el 40% de la vegetación de SBC está mezclada con otro tipo de elementos como palmares y/o pastizales y se registra como vegetación degradada.



Figura 3.14. Diferentes estados de conservación de la vegetación y el suelo en las secciones. A. Ahuatenco, B. Bosque de Pino en la cabecera de la cuenca; C. zonas erosionadas en Cuentepec. D. Laderas de barranco en Cuentepec.

Mapa de condición de la vegetación de la Cuenca Alta y Media Alta del Río Tembembe

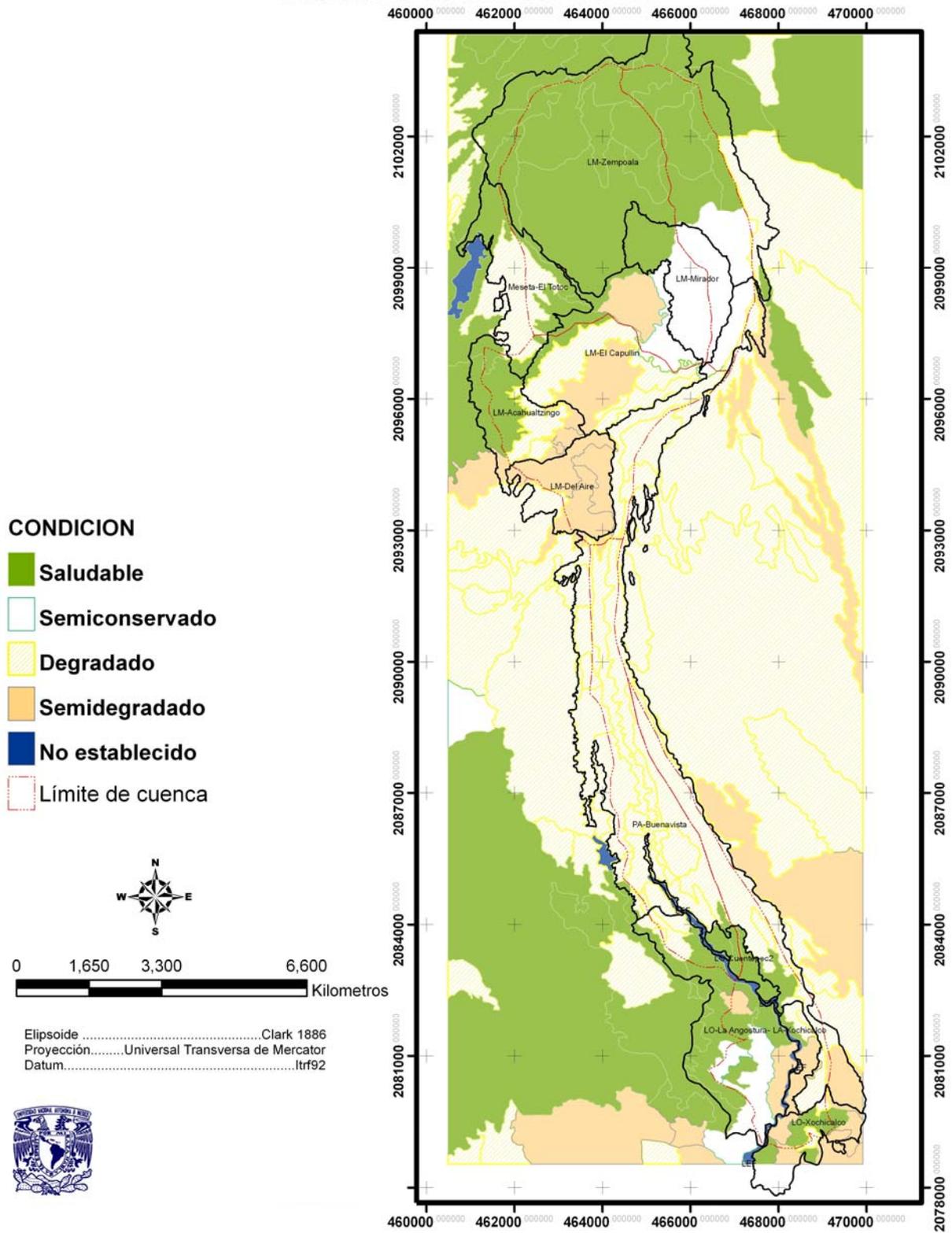


Figura 3.15. Mapa de la condición de la vegetación

3.4. Análisis de fragilidad

El análisis de fragilidad contempló las variables del tipo de vegetación, tipo de suelo, fase textural, pendiente, tipo y forma del relieve; cada variable fue ponderada de acuerdo al método del Ordenamiento General del Territorio. Se generaron cinco categorías: fragilidad extrema, muy alta, alta, media y baja. Se considera que en el país no existen los ecosistemas de nula fragilidad. El análisis fue realizado con base a la delimitación de las geoformas para obtener un valor estimado individual.

De acuerdo con el mapa de la Figura 3.16, las geoformas que presentan mayor riesgo se localizan mayoritariamente en la parte norte de la cuenca y corresponden a los SM “Laderas de Montaña Zempoala y Mirador”. El tipo de vegetación (templada) y las pendientes pronunciadas, muy comunes en estas geoformas aumentaron los valores de fragilidad. Las coberturas vegetales que se observaron son abundantes, pero se observa pérdida gradual de ésta.

La SBC en la perspectiva del OGT también es un tipo de vegetación con alta fragilidad, sin embargo los valores de pendiente asociados a las geoformas, ponderaron los valores de fragilidad en muy alta. En esta categoría se agruparon las geoformas del SM Laderas de Montaña del Aire y el Totoc, donde se observaron también características de pérdida de la cobertura vegetal.

En el SM de Laderas de montaña el Capulín, un alto porcentaje de geoformas presentaron valores altos y medios de fragilidad, aunque los resultados de la vegetación la clasifican como vegetación degradada. Otras unidades que se encuentran en esta categoría corresponden al SM Planicie Acumulativa Buenavista, principalmente las laderas de pared de barranco y las laderas medias. Las geoformas que presentaron los valores más bajos de fragilidad corresponden principalmente a las superficies cumbresales del SM “Planicie Acumulativa Buenavista”, relacionado a sus pendientes suaves y al uso de suelo que se registra en las geoformas.

Mapa de fragilidad para las geoformas de la Cuenca Alta y Media Alta del Río Tembembe

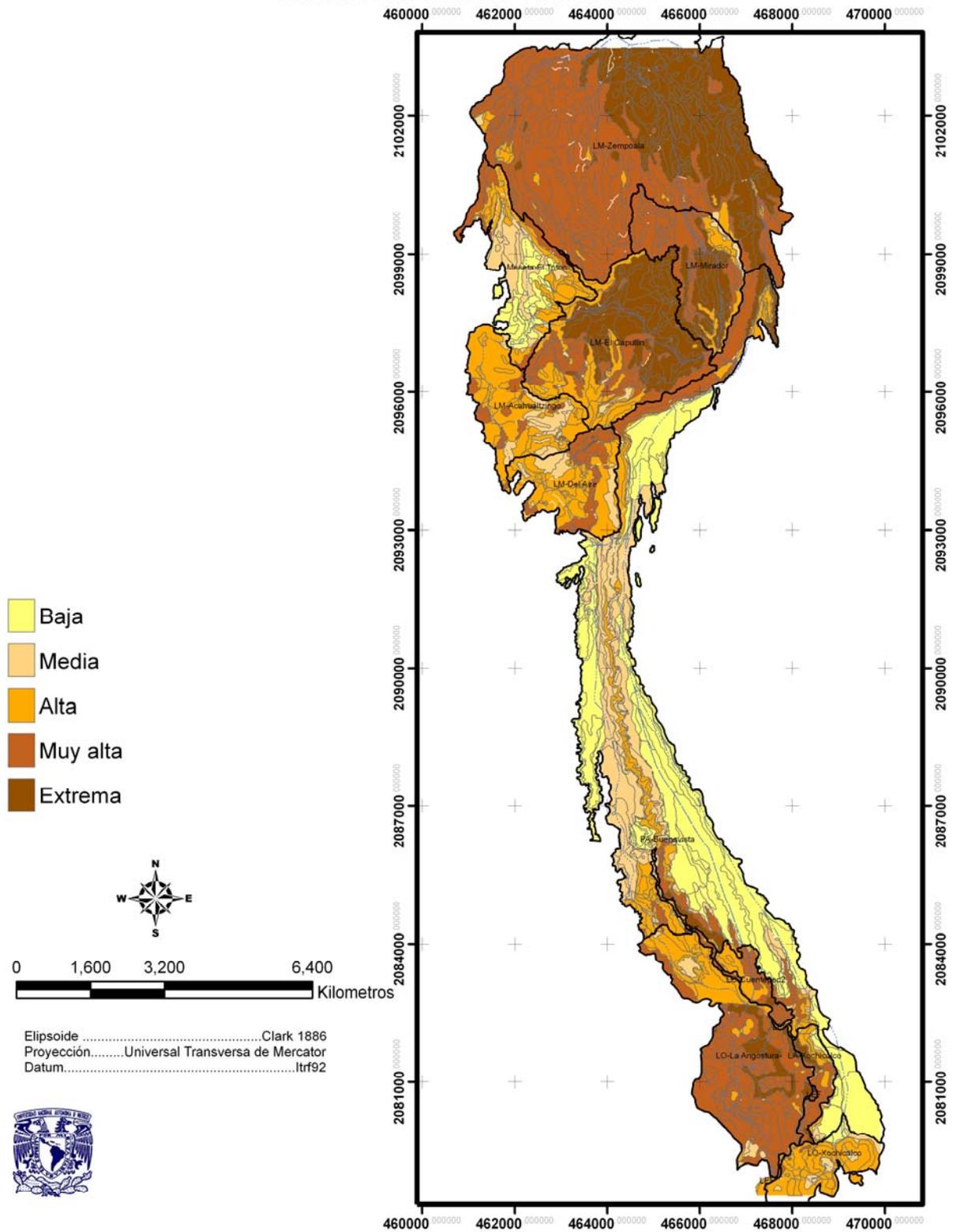


Figura 3.16. Mapa fragilidad para las geoformas.

3.5. Análisis estadístico.

El análisis de cluster (técnica de vecinos lejanos y distancia euclidiana) generó tres grupos principales. Al analizar los resultados se estipuló que el factor determinante para la separación principal de los grupos es el tipo de relieve, asociado posteriormente a los materiales geológicos.

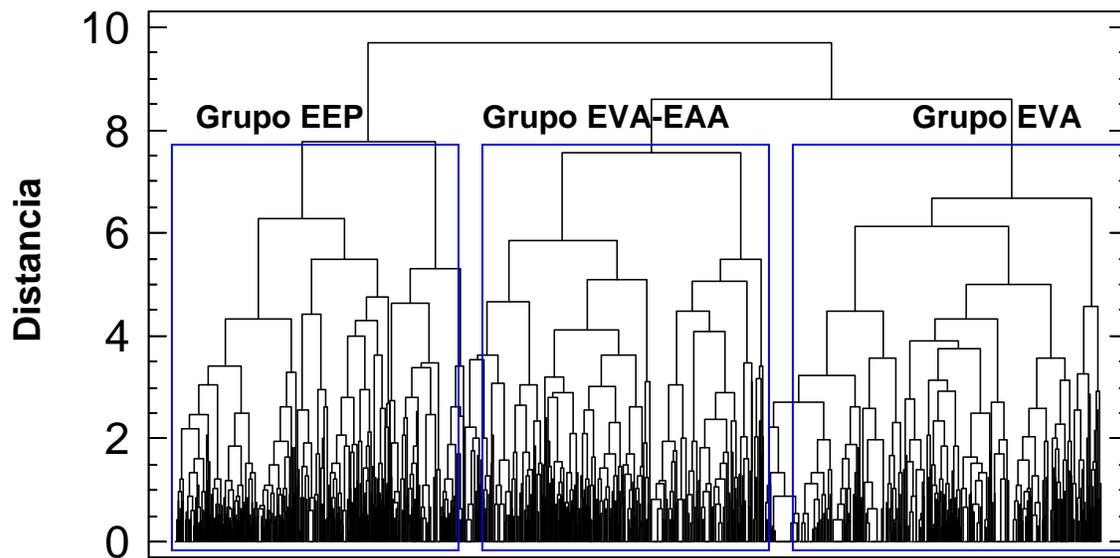


Figura 3.17. Análisis cluster para las geformas de la cuenca del Río Tembembe.

El análisis integró a las más de mil geformas definidas, el primero de los grupos fue definido como el relieve EVA, el segundo como el EVA-EAA y el tercer grupo corresponde al relieve EEP. Al parecer las laderas con pendientes pronunciadas unen al grupo EVA con el EVA-EAA. En el grupo EVA, el SM “Laderas de Montaña Acahualtzingo” comparte mayores similitudes con el SM “Laderas de Montaña el Mirador”, un último componente que se adhiere a este grupo son el SM “Laderas Andesíticas Xochicalco”. Por su parte el grupo EVA-EAA, forma dos subgrupos, uno de mayor cantidad de unidades corresponde al SM “Planicie Acumulativa Buenavista” y la sección menor corresponde al SM “Lomeríos Cuentepec2”. Finalmente en el grupo EEP, se observan la asociación de los SM, “Lomeríos la Angostura” y “Lomeríos Xochicalco”

El análisis de componentes principales se aplicó para conocer las variables con mayor importancia que agruparon a las unidades; se ingresaron 18 variables (pendiente, orientación, altitud, altura relativa, tipo de suelo, textura, asociación vegetal, condición de la vegetación, NDVI, relieve, sistema morfogénico, geología, litología y geoforma; temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación máxima y precipitación mínima) tanto de suelo, como vegetación y geomorfología. Los resultados señalan que los primeros tres componentes explican el 82.1% de la variación y las variables con mayor influencia son la precipitación máxima, la temperatura máxima, la pendiente y por último el relieve y la litología.

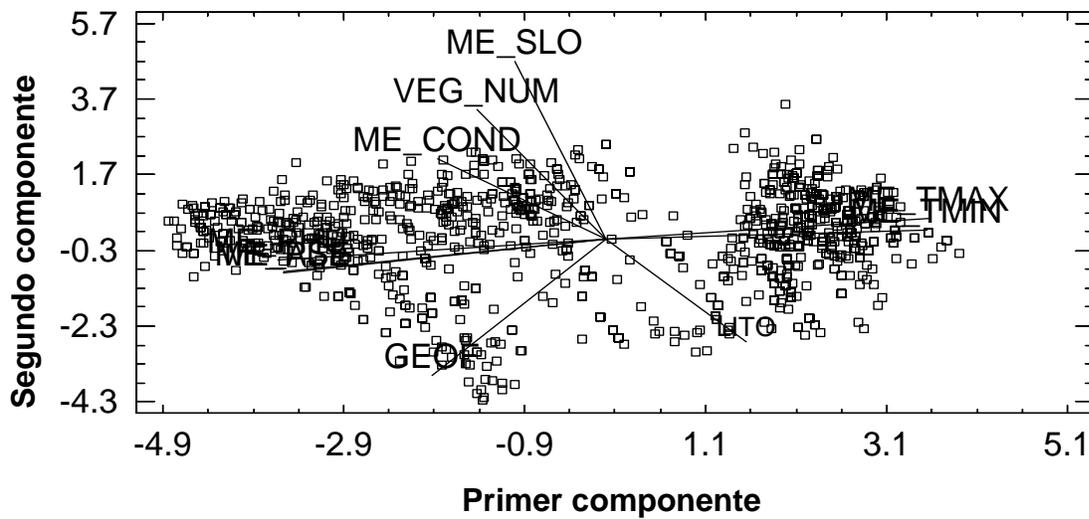


Figura 3.18. Gráfica de los dos primeros componentes principales.

En la grafica de la Figura 3.18, se observa la concentración en dos grupos opuestos, uno determinado por la influencia de las variables climáticas principalmente por las temperaturas máxima y mínima; el segundo por la precipitación máxima, precipitación mínima, NDVI y la condición de la vegetación. La grafica de la Figura 3.19, se presenta en tercera dimensión para observar el comportamiento de las variables de acuerdo a los tres componentes, de esta forma la nube de puntos se concentra en los valores del primer y segundo componente.

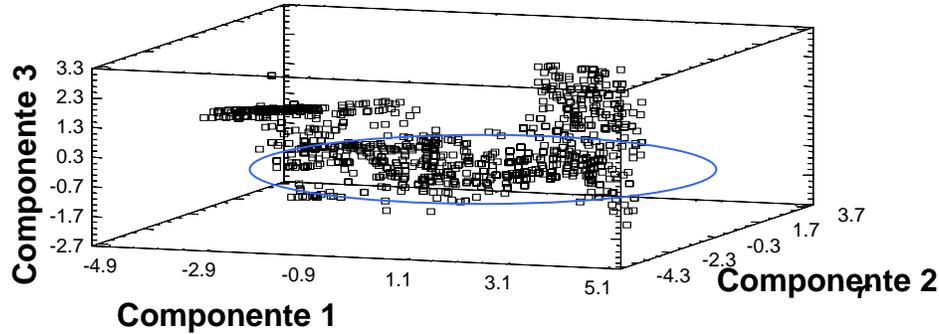


Figura 3.19. Componentes principales, los tres primeros componentes explican el 82% de la variación.

Para facilitar el análisis de datos se abreviaron los nombres de cada sistema morfogénico de la siguiente manera:

Sistema Morfogénico	Abreviatura	Grupo
<i>Laderas de Montaña Zempoala</i>	<i>LMZ</i>	<i>EVA</i>
<i>Laderas de Montaña El Mirador</i>	<i>LMM</i>	<i>EVA</i>
<i>Mesa el Totoc</i>	<i>MTO</i>	<i>EVA</i>
<i>Laderas de Montaña El Capulín</i>	<i>LMC</i>	<i>EVA</i>
<i>Laderas de Montaña Acahualtzingo</i>	<i>LMA</i>	<i>EVA</i>
<i>Laderas de Montaña Del Aire</i>	<i>LMDA</i>	<i>EVA</i>
<i>Planicie Acumulativa Buenavista</i>	<i>PAB</i>	<i>EVA-EAA</i>
<i>Lomeríos Cuentepec2</i>	<i>LOC2</i>	<i>EVA-EAA</i>
<i>Lomeríos La Angostura y Cuentepec</i>	<i>LOAC</i>	<i>EEP</i>
<i>Lomeríos Xochicalco</i>	<i>LOX</i>	<i>EEP</i>
<i>Laderas Andesíticas Xochicalco</i>	<i>LAX</i>	<i>EVA</i>

Cuadro 3.17. Abreviaturas de los sistemas morfogénicos.

El primer grupo, que concentra a la mayoría de las geoformas agrupadas en el relieve EVA, concentra un total de siete SM. En el SM “LMZ” sólo el 1% de las laderas inferiores presentan vegetación de pastizales y matorrales, y el 9% de las geoformas con vegetación de bosque conservado presenta condiciones de bosque abierto. Las temperaturas máximas (Tmax) oscilan entre los 19.1° y 21.6° y las mínimas (Tmin) de los 7.6° a 11°. Precipitación mínima de 112 a 153 mm y las máximas de 1,143 a 1,295 mm.

La vegetación del SM "LMM" corresponde a bosque conservado, sin embargo el 65% de éste presenta condiciones de vegetación abierta. El intervalo de temperatura máxima es de 20.6° a 21.9° mientras las temperaturas mínimas oscilan entre 9.5° a 10.7°. La precipitación mínima (Ppmin) es de 106 a 126 mm, precipitación máxima (Ppmax) de 1,081 a 1,183mm Cabe destacar que las laderas de montaña y piedemontes al SE de esta unidad presentan las fluctuaciones más severas entre las temporada de lluvias y secas, además de las pendientes más fuertes y condiciones de vegetación abierta.

Para el SM "MTO" predomina en 72% la agricultura de temporal, relacionada con las terrazas y planicies de pendientes ligeras a moderadas 6 a 9°. La vegetación de bosque se encuentra restringida a las laderas con pendientes pronunciadas 30-60° (bosque conservado 8%) así como a las terrazas inferiores con pendientes entre 10 y 12° (bosque en transición). El rango de T_{máx.} es de 21.4° a 22.7°, la T_{min}, oscila entre 10.9° a 12.2°; mientras la Ppmin 117 a 140, y Ppmax de 1097 a 1202. En la parte definida como piedemonte presenta pendientes fuertes (32-37°) y vegetación de bosque conservado.

La vegetación de transición se hace presente en el SM "LMC", en los lomeríos al SE, en el límite con la "PAB", las pendientes pronunciadas de esta unidad favorecen los procesos de erosión, y la mínima presencia de agricultura de temporal (3%), localizada en los piedemonte inferiores, con pendientes ligeras a moderadas (13-19°). Aunque la vegetación corresponde en su mayoría con bosque (97%), la condición del 83% de estos es deteriorada, principalmente en las laderas de montaña y de lomerío al sur de la unidad, con zonas desprovistas de vegetación. Sólo las laderas de montaña al norte de la unidad y algunos lomeríos presentan condiciones de bosque cerrado. El gradiente de temperaturas máximas en la unidad se encuentra entre 21.1° a 23°, sin embargo, los lomeríos que limitan al norte con "LMM", presentan variaciones en las temperaturas mínimas, presentándose condiciones más frías. El mismo comportamiento presenta la precipitación, que presenta un ligero incremento (90mm en lluvias y 18 mm en estiaje) con respecto al resto de la unidad, tanto en temporada de sequía (96 a 115 mm) como de lluvia (1,003 a 1,102 mm).

El SM "LMA", presenta el 62% de vegetación conservada, en las laderas de montaña media y superior, principalmente en las superficies cumbreles. La vegetación más deteriorada

(36%) y transformada (2%) corresponde con las laderas de montaña inferior, que limitan con “LMC” y “LMDA”; en estas unidades (números 354, 360, 358) se observa una reducción (999 a 1,104 mm) en la precipitación de la temporada de lluvias con respecto a toda la unidad (1,105-1,206 mm). Las variaciones de temperatura para estas unidades en la temporada de estiaje no son significativas, pero sí lo son en la temporada de lluvias.

De acuerdo con el análisis de vegetación, en “LMDA” se presentan condiciones semi degradadas; son unidades de transición que comparten características de bosque (43%) al norte, en las superficies cumbreles, laderas de montaña superior e inferior; en los piedemonte, las características de bosque de transición (21%) son más evidentes. Finalmente, las unidades que presentan vegetación de selva baja caducifolia son las laderas de montaña que limitan al este con el piedemonte con pendientes muy fuertes (30 a 50°). En cuanto a los parámetros climáticos, las temperaturas máximas y mínimas, así como la precipitación (máxima y mínima) durante el estiaje, tienen el mismo comportamiento para todas las unidades, sólo la precipitación mínima en la temporada de lluvias presenta diferente rango en las unidades donde se determina la presencia de selva baja caducifolia.

A diferencia del resto de las unidades, la “PAB” es la unidad con mayor número de geoformas, se encuentra unificada principalmente por su origen; se extiende a lo largo de la cuenca desde Ahuatenco hasta las cercanías de Xochicalco y como consecuencia, presenta grandes diferencias en los parámetros climáticos pero pendientes muy similares.

El análisis de cluster para la unidad genera tres subconjuntos, el primero, integrado por las superficies cumbreles y laderas de pared de barranco al norte de la unidad, en colindancia con las unidades “LMA” y “LMDA”, donde se ubica la población de Ahuatenco; las precipitaciones muestran una diferencia de entre 70 a 200 mm en temporada de lluvias con respecto al resto de las geoformas, lo que favorece el establecimiento de vegetación de bosque de diferentes condiciones: conservado (1.2%) en las laderas de pared de barranco al extremo norte con pendientes muy fuertes; y bosque de transición (20%) en las laderas en la mayoría de las paredes de barranco. La agricultura de temporal se observa en la

mayoría de las superficies cumbrales y en algunas paredes de barranco con pendientes ligeras (8°).

El segundo grupo, integrado por los sistemas “PAB” y “LOC2” separados en tres grupos. Dos subconjuntos corresponden a las geoformas de laderas de barranco, agrupadas de acuerdo con su ubicación en las paredes de barranco, las geoformas al Este del cauce (“PAB”-E) presentan condiciones más calidas con mayores temperaturas máximas y mínimas (3° a 6° de diferencia) que aquellas que se localizan al Oeste (“PAB”-O). Además, se observan variaciones en la precipitación durante todo el año, generando condiciones más secas en las unidades “PAB”-E (10 a 25mm en temporada de secas y 50 a 75 mm en temporada de lluvia). Cabe destacar que ambos grupo se presentan en el mismo intervalo altitudinal y latitudinal.

Con respecto de la vegetación, en las unidades “PAB”-E predomina la agricultura de temporal (65%) en las superficies cumbrales; las laderas de pared de barranco superiores presentan vegetación de selva baja caducifolia perturbada y finalmente las laderas de pared de barranco inferiores muestran características de mayor humedad. Estas unidades presentan variaciones en la pendiente que generan un escalonamiento y favorecen a su vez procesos de acumulación. A diferencia, en las superficies cumbrales de las “PAB”-O predominan los matorrales y pastizales, pero las laderas de pared de barranco presentan pendientes más fuertes.

La presencia de los lomeríos de la LOC2, puede asociarse con los “LOAC”, sin embargo, el origen de ambos es distinto. Forman dos grupos de lomeríos más pequeños en área y medianos (altura relativa) con pendientes más fuertes y vegetación de selva baja caducifolia. Sin embargo, uno de ellos presenta laderas cóncavas y el otro grupo laderas escalonadas, donde son predominantes (83%) los matorrales y pastizales. Se observan condiciones muy homogéneas con respecto a las variables climáticas, esto vinculado con el tamaño y cercanía de las unidades.

El tercer grupo, integrado a las unidades de relieve EEP, el SM "LOAC" es una agrupación de lomeríos medianos, con vegetación de selva baja caducifolia en los piedelomerío y en las laderas de lomerío inferiores, sin embargo las laderas al suroeste presentan una condición saludable, son el grupo más extenso de lomeríos; por el contrario las laderas al Este aunque se establece selva baja, ésta presenta condiciones de transición y perturbación. Las superficies cumbreales de lomerío así como las laderas superiores de estos están ocupadas por matorrales y pastizales.

Los SM "LOAC" y "LOX", forman un grupo en el cual no se presentan variaciones significativas de clima. Las temperaturas máximas son de 800 a 900 mm en temporada de secas y de 850 a 910 en temporada de lluvias. Las condiciones de menor humedad, en este extenso grupo de lomeríos, altos, medios y bajos y su ubicación favorecen que la vegetación predominante (92%) sea la selva baja caducifolia. El 8% de la vegetación mantiene características de vegetación ribereña.

Los lomeríos altos del SM "LOX" presentan condiciones más conservadas de vegetación (34%), mientras los lomeríos bajos y los piedelomerío se observan condiciones relacionadas con la perturbación de la selva baja.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN.

4.1 Geomorfología.

México cuenta con una gran diversidad biológica que se ve amenazada por factores naturales y socioeconómicos (Figuroa, 2008; Pérez, 2005). Ante la necesidad de evaluar los cambios en el uso de suelo, aumenta el interés en el desarrollo de estrategias que permitan obtener información actualizada; en este contexto, el levantamiento geomorfológico es una herramienta que por su definición jerárquica delimita unidades que describen las formas del relieve, su génesis y dinámica. (Pérez, 2005). La delimitación geomorfológica incluye la dinámica de las unidades, describe la influencia de las variables físicas en el relieve y al emplearla como marco para la delimitación integra información sobre los procesos erosivos, acumulativos, de movimientos de masas (p. ej.), que influyen en las propiedades del suelo, distribución y recuperación de la vegetación; sin embargo, también puede emplearse considerando la vulnerabilidad de la geoforma a la erosión por la pérdida de cobertura vegetal. A diferencia de otros métodos, su información dinámica es factible y básica para identificar los puntos más vulnerables del ecosistema, los prioritarios para su restauración y aquellos donde es necesario desarrollar estrategias que reduzcan su deterioro ya que afectan directamente otras geoformas (Cotler, *et. al.*, 2005; Márquez-Huitzil, 2005, Pérez, 2005).

El relieve en la cuenca alta del río Tembembe es el resultado de la conjunción de tres relieves de diferente origen: el endógeno volcánico acumulativo (EVA), endógeno volcánico acumulativo-exógeno acumulativo aluvial (EVA-EAA) y endógeno estructural plegado (EEP). Las diferencias en el origen influyen en el modelado del relieve, los fenómenos de intemperismo y formación de suelo.

El EVA es el tipo de mayor extensión, localizado en la cabecera de cuenca, representa dos terceras partes del área y se divide en siete sistemas morfogenéticos (SM). En conjunto, más de la mitad de sus geoformas son laderas de montaña de pendientes pronunciadas y superficies cumbres estrechas, separadas por una alta disección de norte a sur con un intervalo altitudinal de 3500 a los 2060. Martínez (2002) señala que éstas son derivadas de

la formación Cuernavaca y define al tipo de relieve como “laderas de montaña alta” en el conjunto “Zempoala-Talli-Ajusco”. La litología se compone de andesitas del Terciario Superior que se extienden al sur hasta los SM “el Mirador” y “el Capulín” donde limitan con brecha sedimentaria (toba) del mismo período que se distribuye hasta los SM “Acahualtzingo” y “Del Aire”.

Las condiciones geográficas al norte (SM “Lagunas de Zempoala”), favorecen vegetación templada que se encuentra en condiciones saludables, favorecida por pendientes de 35° que limitan el acceso, así como la práctica de agricultura o ganadería; por el contrario, al sur (SM “El Mirador” y “el Capulín”) los procesos de cambio de uso forestal en agricultura o potreros, los incendios y la tala se han presentado con mayor intensidad (Olvera *et al.*, 2000). En la actualidad esta porción de la cuenca ha sido impactada por la tala ilegal y la presencia de talamontes ha restringido el acceso a dichas zonas. Del límite inicial de la cuenca a la parte más elevada de la sección Ahuatenco (“el Capulín”) hay una distancia de 6 Km y una diferencia altitudinal de 1,000 m, en este intervalo la temperatura aumenta aproximadamente 2.3 ° C de norte a sur.

El tercio restante corresponde mayoritariamente al relieve EVA-EAA, conocido como “Glacís de Buenavista”, (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2003), casi en su totalidad se expresa como superficies cumbrales con pendientes ligeras cubiertas de materiales piroclásticos, separadas por barrancos angostos en dirección norte a sur originados por antiguos abanicos aluviales.

Martínez (2002) lo considera una enorme formación de piedemonte en su escala de trabajo para el Río Colotepec “piedemonte Cuernavaca-Buenavista”, sin embargo en este trabajo por su homogeneidad se delimitó sólo un SM de forma alargada y continua con elevaciones de 2,020 a los 1,320. En las barrancas se forman laderas altas, medias y bajas donde se presenta vegetación de transición (templada-SBC); su forma alargada favorece un intervalo altitudinal que inicia a los 2,020 hasta los 1,320 msnm en su límite con Xochicalco, que contribuye a la transición de la vegetación que al norte presenta elementos de vegetación templada y al sur de selva baja caducifolia. Sin embargo, la vegetación densa se restringe a las laderas pronunciadas y al cauce del río Tembembe, en las geoformas denominadas

pared de barranco. El uso de suelo es principalmente agrícola, extendido incluso a las laderas de barrancas (Olvera, *et. al.*, 2000). Se han realizado investigaciones que relacionan la geomorfología, principalmente en las laderas debido a la presencia de la estación de restauración Barrancas del Río Tembembe (ERBRT). Galindo (2006) menciona que las diferencias en las porciones de meseta, pendiente y plano de ladera de barranco del Río Tembembe influyen en la capacidad de infiltración, captación de agua y por lo tanto establecimiento de plántulas pero no menciona los criterios de selección y ubicación de su catena. Sus conclusiones son ratificadas por Ayala-García (2008) que registra mejores condiciones para el crecimiento de plántulas en el hombro de ladera que en ladera convexa y el piedeladera. Cabe destacar que los tipos de relieve delimitados para este sistema morfogenético coinciden con las delimitaciones realizadas en la ERBRT por García-Flores (2008) quién con mayor detalle (1:20,000) obtiene las unidades biofísicas de la estación y sus unidades mayores son semejantes a los límites espaciales de las unidades planteadas por este trabajo, realizado en una escala diferente (1:37,500).

Los lomeríos más altos están al suroeste en el SM “Lomeríos La Angostura” y se rodean de lomeríos medios y bajos. La vegetación asociada es Selva Baja Caducifolia, con diversas características de conservación (Piña, 2005). Las temperaturas registradas en el intervalo altitudinal varían aprox. en 1.5°, con valores semejantes de precipitación tanto en temporada de lluvias como de estiaje. Aunque se observan pendientes fuertes, esto no ha sido limitante para la perturbación de la vegetación por las actividades ganaderas y humanas. Se consideraron las morfoestructuras como marco para delimitar la discusión y elaborar una relación de las variables biofísicas.

4.2 Condición de la vegetación.

La delimitación de comunidades vegetales comúnmente se infiere de los mapas de uso de suelo y vegetación, con limitantes para evaluar comunidades de transición, estado de conservación y cobertura actual. El desarrollo de los sensores remotos y la interpretación de imágenes satelitales son de gran importancia en la elaboración de inventarios forestales, para reconocer las coberturas de las comunidades vegetales presentes, inferir patrones estructurales y fenológicos.

Basados en el comportamiento espectral de la vegetación, se utilizó el NDVI para analizar la densidad de las comunidades (Holben, 1986; Chuvieco, 2002) considerándola como indicador de conservación en la vegetación natural porque se relaciona con la densidad o cantidad de vegetación; con base en la escala de respuesta espectral, que se refiere a zonas de cultivo, deforestadas o sin vegetación en sus valores más bajos (Gamon *et al.*, 2005; Kalacska *et al.*, 2005) y los valores máximos con actividad fotosintética alta y vegetación cerrada, como bosques, selvas, matorrales y a la actividad agrícola. Sin embargo, hay que recordar que existen comunidades vegetales con valores de densidad bajos relacionada con su estructura natural y no son comunidades deterioradas (Medrano, 2004). También ha sido utilizado para inferir, el índice de área foliar, contenido de clorofila, fitomasa, estacionalidad, (Volante 2003).

En particular, el NDVI se basa en las bandas de mayor respuesta de la vegetación y su uso en el reconocimiento de la cobertura es de fácil interpretación; así, relacionando los porcentajes de cobertura de cada comunidad contra los de suelo desnudo, agricultura o pastizal, se crearon criterios de conservación.

De las siete categorías definidas en el NDVI, las C1, C2 y C3, tienen los valores más bajos y corresponden a zonas de agricultura de temporal, pastizales o sin vegetación, la mayor parte localizadas en la porción central de la zona de estudio; de éstas la más extensa es C2, que cubre más del 80% de las ME del SM “Planicie acumulativa Buenavista”, 70% de las ME del SM “Laderas de montaña El Capulín” que se complementa con C3 (20%) que abarca hasta las partes bajas de los lomeríos de la angostura y pie de monte totoc.

Aunque las categorías intermedias del NDVI reflejan los valores relacionados para la selva baja caducifolia, ésta se representa principalmente por C4 y su mayor extensión se localiza en los lomeríos de “La Angostura” y “Xochicalco”. Debido a sus condiciones fenológicas, la SBC modifica su respuesta espectral en el transcurso del año y en este análisis la imagen utilizada corresponde a la temporada de estiaje, a consecuencia se combina o confunde con pastizales, y suelo con poca o nula vegetación. Incluso se menciona que el NDVI no es el mejor índice para las comunidades áridas y semiáridas. La vegetación templada se

agrupo en C5, C6 y C7, identificada mayoritariamente al norte de la cuenca, en los SM Laderas de Montaña Zempoala y el Mirador (norte), donde más del setenta por ciento de las geoformas reflejaron éstos valores de NDVI.

Más del ochenta por ciento de las LM están vinculadas con vegetación templada de *Pinus*, *Quercus* y *Juniperus*, favorecida por el gradiente altitudinal, la ubicación geográfica y la altura relativa, ya que son las unidades de mayor altura. En las unidades de transición entre vegetación templada y SBC, que corresponden al SM “el Mirador” y “el Capulín”. La presencia de tobas y pendientes fuertes dificulta el reestablecimiento de la cobertura vegetal además de la tala clandestina (Olvera *et al.*, 2000) principalmente en las laderas orientadas al sur. Al realizar una comparación espectral en una gradiente de diferentes comunidades vegetales, en este caso la vegetación templada y la selva baja caducifolia se encontraron algunos aspectos que interfieren en la clasificación de la condición.

Primero, las características estructurales tienen una variación muy importante con respecto a la densidad, altura y cobertura (por citar algunas) de las especies que las integran, lo que genera valores de respuesta espectral diferente para cada comunidad. Segundo, la fisonomía temporal referido al comportamiento caducifolio de las especies que componen la SBC y se refleja en la imagen utilizada, que en este caso corresponde a la temporada de estiaje. Ambos aspectos influyen en la clasificación, colocando los valores de SBC como vegetación poco conservada, sobre todo al trabajar en una escala integral; por lo tanto es de gran ayuda la información de campo.

4.3 Fragmentación de la vegetación.

La cobertura de las comunidades se ha modificado debido a las actividades económicas que se han realizado en cada subcuenca (Olvera *et al.*, 2000).

El SM Laderas de Montaña (LM) Zempoala y el Mirador (norte), presentó la vegetación más densa, de bosques templados de *Pinus* – *Quercus*, con más del 70% de su cobertura en buen estado, presencia de *Abies*, y Bosque mesófilo de montaña en menor proporción y

sólo 8% de su área carece de vegetación. En estos SM la vegetación se encuentra menos fragmentada y más homogénea.

Por el contrario los SM PA “Buenavista”, LM “El Mirador” y “El Totoc” presentan las condiciones más deterioradas; en el primer sistema, 90% de las geoformas, (superficies cumbrales, laderas de pared de barranco altas y medias) tienen uso de suelo agrícola o de pastizal, algunas han sido abandonadas o muestran severos problemas de pérdida de suelo. El relieve plano y de pendientes ligeras favorece el desarrollo de estas actividades; técnicas inadecuadas, sobrepastoreo y la geología aumentaron la pérdida de horizontes orgánicos y en consecuencia el abandono. En el segundo sistema, las superficies cumbrales, laderas de montaña alta y media, presentan desmonte de la vegetación original (*Pinus-Quercus*), desarrollo de pastizales inducidos y suelo desnudo. Finalmente, en el SM “El Totoc” más de la mitad de sus unidades tiene agricultura y sólo las laderas (superiores, medias e inferiores) presentan vegetación de bosque templado. Sin embargo, no presenta superficies con pérdida de suelo. Estos SM, también presentan las condiciones más fragmentadas de vegetación, en lo que corresponde a la subcuenca Cuentepec.

Con respecto a la SBC, la subcuenca Xochicalco tiene la mayor extensión de esta vegetación y las variaciones de su estado pueden describirse con los SM. Los lomeríos “La Angostura” son los más extensos y casi el 30% se delimitaron como SBC en buen estado, principalmente en las laderas de lomeríos superiores; en los lomeríos “Xochicalco”, 60% presenta vegetación más conservada, que puede relacionarse con el área de protección de la zona arqueológica. Por último, las “Laderas Andesíticas Xochicalco”, también presentan vegetación semiconservada, principalmente en las paredes de barranco medias e inferiores que tienen pendientes fuertes.

La combinación de la SBC, con otros usos de suelo y vegetación, genera un mosaico complejo y fragmentado en la subcuenca, que en conjunto tiene una extensión mayor a la SBC conservada.

4.4 Fragilidad

El uso de SIG en el análisis de fragilidad facilitó la correlación de cada variable: relieve, pendiente, suelo y vegetación con las geoformas obtenidas y definir cinco categorías de fragilidad tomando como referencia los criterios de estabilidad e inestabilidad del relieve relacionado con la pendiente; la erodabilidad del suelo y su posibilidad de cambio en sus propiedades físicas y químicas; finalmente la capacidad de autorregeneración de la vegetación y su resistencia a disturbios naturales (SEMARNAP, 2000).

Así, las geoformas más frágiles (muy alta) de acuerdo al análisis, son las laderas de montaña de los SM, “Lagunas de Zempoala”, “El Mirador”, la parte norte de “El Capulín”, con relación a la vegetación templada, aunque el riesgo para la vegetación es de categoría intermedia, es influenciado por las pendientes pronunciadas y el tipo de suelos.

Para la vegetación de SBC (que presenta altos valores de fragilidad), es reducido el número que comparte ésta condición; sólo unas cuantas geoformas de laderas de lomerío medio en el SM “Lomeríos La Angostura”, así como las laderas medias y bajas del SM “Laderas Andesíticas Xochicalco”. La gran mayoría de estas geoformas se agruparon en categorías altas de fragilidad, por la homogeneidad de la pendiente en los lomeríos. Las menos frágiles son las superficies cumbreles del SM “Planicie acumulativa Buenavista”, que al presentar pendientes suaves se agrupa en las categorías menos frágiles. En las geoformas de pared de barranco, por sus características de relieve y el tipo de vegetación (SBC) se agruparon en categorías de alta fragilidad.

Finalmente, el objetivo de delimitar áreas con diferentes características, pero homogéneas en relación al relieve, responde a la necesidad de orientar las acciones de restauración como un híbrido entre la información específica y la información de su entorno; integrando los aspectos socioespaciales, ecológicos, físicos y de percepción remota para establecer de acuerdo con la intensidad de la actividad humana y de la integridad del ecosistema criterios conservación, así como la planificación de actividades para el aprovechamiento o restauración que sean necesarias y concordantes con las actividades sociales que se realizan; por lo que es importante la participación de los actores involucrados, considerando

que los límites funcionales y los políticos o sociales son distintos en la mayoría de los casos (Cotler, *et. al.*, 2005; Pérez-Salicrup, 2005).

Existen actualmente programas de financiamiento (pro-árbol, p. ej.) que permiten obtener recursos para la restauración, reforestación y fortalecimiento de los atributos naturales de las comunidades (pago por servicios ambientales), que explotados de la manera correcta, pueden ayudar a contener la presión hacia el ecosistema. Aunque para llevarlos a cabo con mayor eficacia sería conveniente orientar su aplicación con base a una delimitación geomorfológica. Sin embargo, el acceso a este tipo de programas es aún deficiente; además el diseño presentado en este trabajo muchas veces no se considera obligatorio por los tomadores de decisiones ni necesario para la aplicación de los programas.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

La delimitación geomorfológica es una técnica que requiere la comprensión de diversos factores geológicos e implica un amplio conocimiento experto durante el proceso de la diferenciación.

En relación al tamaño de las unidades delimitadas, la formación de unidades de gran extensión, propició un mosaico de comportamiento complejo que generó dificultades principalmente con el gradiente de elevación en el que se encuentra y cambios en las variables climáticas y en la vegetación, que al final inducen a la formación de subgrupos dentro de la unidad, como ocurrió con el SM Planicie Acumulativa Buenavista.

La integración de las geoformas como marco para la delimitación de unidades ambientales, ha sido recomendada por varios autores y al emplearla para complementar el análisis de condición de vegetación, generó una alternativa para relacionar información a diferentes escalas e identificar aquellas con diferentes necesidades o problemas.

Con relación a la vegetación y en términos de las subcuencas aquellas que tienen condiciones más saludables son Tlaltzapán y Mexicapa, que presentan bosque conservado. La subcuenca Ahuatenco con características similares, presenta vegetación de transición y comparte elementos de vegetación templada que corresponde con la localización geográfica, pero presenta geoformas con pendientes fuertes sin vegetación arbustiva y en algunos casos carece de ambas (arbórea y arbustiva).

La subcuenca Cuentepec es la más heterogénea, con la mayor variación de vegetación y uso de suelo, un alto porcentaje de unidades geomorfológicas son planicies que favorecen la agricultura, pero las paredes de barranco presentan se diferencian y presentan diferentes usos de suelo, como la extensión de la agricultura o conservan rasgos de la vegetación natural con elementos de comunidades en transición o SBC.

El análisis espectral del NDVI, se relacionó como una respuesta de la densidad de la cobertura vegetal, que se interpretó como un rasgo de condición de la vegetación. Aunque los resultados son más claros para la vegetación templada lo que facilita su interpretación, en cambio para la vegetación de selva baja caducifolia se presentaron algunas complicaciones a causa de la temporalidad de la vegetación y del sustrato.

De acuerdo con el análisis de cluster, el relieve es una variable significativa en la formación de los grupos principales de las unidades; además el análisis de componentes principales determinó que las variables que aportaban una mayor explicación además del relieve son la precipitación máxima y mínima, las temperaturas máximas y mínimas y por último la pendiente. El análisis de cluster separó las geoformas del Sistema morfogénico “Planicie Acumulativa Buenavista” específicamente las laderas en pared de barranco. Los SM con mayores modificaciones, con relación a la cobertura vegetal son la “Planicie Acumulativa Buenavista” que ha perdido una alta porción de su cobertura e incluso presenta pérdida de suelo; el SM “Laderas de Montaña El Capulín” que presenta pérdida de la vegetación por efecto de la tala clandestina y “Laderas de Montaña del Aire” éstas últimas en la subcuenca Ahuatenco.

Los resultados de fragilidad pueden ser utilizados para gestionar la protección de las comunidades vegetales, así como la gestión de recursos económicos y programas dirigidos a las poblaciones vecinas para reducir los daños a la vegetación, como la extracción clandestina de madera y la ampliación de la frontera agrícola; incluso para respaldar propuestas por pago de servicios ambientales principalmente en las poblaciones de las subcuencas Mexicapa y Tlaltizapán; reforzar la protección y manejo de las partes aledañas a la zona arqueológica en Xochicalco.

CAPITULO 6. LITERATURA CITADA

Aguilar Benítez, S. 1999. Ecología del Estado de Morelos, un enfoque geográfico. Praxis. México. 469 p.

Arellano, R., A. 2001. Delimitación de unidades ambientales por medio de una regionalización geomorfológica del mesobloque "El Encantado", Oaxaca. Tesis de licenciatura, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México. 143 pp.

Arreaga, V., Cervantes V. y A. Vargas-Mena. 1994. Manual de reforestación con especies nativas. SEDESOL, INE, UNAM. México.

Arroyo-Mora, J.P., Sánchez-Azofeita, G.A., Kalacska, M. y Rivard B. 2005. Secondary forest detection in a neotropical dry forest landscape using Landsat 7 ETM+ and IKONOS imagery. *Biotropica* 37 (4), 497-507.

Ayala-García J. F. 2008. "Desempeño de plantas de tres especies arbóreas en tres unidades de ladera de la estación de restauración Barranca del río Tembembe, Morelos". Tesis de Maestría (Biología). UNAM. México.

Bocco, G. 2004. Cartografía y sistemas de información geográfica en el manejo integrado de cuencas. En: Cotler, H. (compiladora). 2004. El manejo integrado de cuencas en México. Semarnat, INE. México. 264pp.

Bolongaro-Crevenna, A., Torres-Rodríguez, V., Sorani, V., Frame, D., y Ortiz, M. 2005. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. *Geomorphology* 67, 407-422.

Brady, N. y R. Weil. The Nature and properties of soils. 12 edition. Prentice Hall. New Jersey. USA. 881pp.

Bradshaw, A. D. 1983. The reconstruction of ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 20:1-17.

Brown, S. y A. E. Lugo. 1994. Rehabilitation of tropical lands: A key to sustaining development. *Restoration Ecology* 2 (2): 97-111

Camacho, F. 2004. Estructura y composición de la vegetación del fondo de la barranca del Río Tembembe, Morelos, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México.

Camacho F., Trejo I. y Bonfil. C. 2006. Estructura y composición de la vegetación ribereña de la barranca del río Tembembe, Morelos, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. **78**: 17-31. México.

Carranza, J., Molina, C., I., Rodríguez, L., Aguilar, J., Rodríguez, D., Zamora, J., Silva, C., Cruz, R. 2003. Estimación de la tasa de transformación del hábitat en la reserva de la biosfera "Sierra de Manantlán". Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A. C. y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México.

CETENAL. 1979. Carta Geológica y Carta Edafológica. Escala 1:50,00. E14A48. México.

CETENAL. 1979. Carta Geológica y Carta Edafológica. Escala 1:50,00. E14A49. México.

CETENAL. 1979. Carta Geológica y Carta Edafológica. Escala 1:50,00. E14A58. México.

CETENAL. 1979. Carta Geológica y Carta Edafológica.. Escala 1:50,00. E14A59. México.

Cervantes, V., López, M., Salas, N. y Hernández, G. 2001. Técnicas para propagar especies nativas de selva baja caducifolia y criterios para establecer áreas de reforestación. UNAM, SEMARNAP. México.

Chuvieco, Salinero. 2002. Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio. Ariel, S.A. Barcelona España. pp: 586

Cobos Ramírez, R.E. 2006. Alternativas de modelación hidrológica mediante sistemas de información geográfica para las subcuencas de Amecameca y del Curso Alto de la cuenca Alta del Lerma, Estado de México. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM. México.

Colwell, R. N. (editor) 1990. Manual of Remote Sensing. 3ra. Edición. Vol. I. American Society of Photogrammetry. Pp. 541.

Conafor. 2004. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. 2da. Edición. SEMARNAT. México.

Conafor. 2008. Metodología del inventario nacional forestal. <http://www.conafor.gob.mx>

Cotler, H., G. Bocco y A. Velázquez. 2005. El análisis del paisaje como base para la restauración ecológica. En: Sánchez, O., E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azuara (editores). 2005. Temas sobre restauración ecológica . Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología, U.S. Fish and Wildlife Service y Unidos para la Conservación A. México.

Crawley, M. J. 1998. Plant Ecology. Blackwell. Cambridge, Reino Unido.

Dirzo, R. 1992. Diversidad florística y estado de conservación de las selvas tropicales en México. En: Sarukhán y Dirzo (compiladores). México ante los retos de la biodiversidad. CONABIO. México.

Eastman, R. 1999. Idrisi32, Guide to Gis and Image Processing. Vols. 1 y 2 . Clark University. USA. Pp: 191 y 168.

Escamilla-Sarabia, G., Solleiro-Rebolledo, E., Sedoy, S. y Gama, J. 2002. Tepetates del Glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y pedogenéticos. Investigaciones Geográficas Núm. 48. Instituto de Geografía. UNAM. México. Pp. 76-89.

ESRI, 1999. ArcView 3.2 User's Guide/ What's new in ArcView 3.1, 3.2 and 3.3. U.S.A. 34 pp.

Figuroa Díaz M. F. 2008. El contexto socioeconómico y la efectividad de las áreas naturales protegidas de México para contener procesos de cambio en el uso del suelo y la vegetación. Tesis de Doctorado en Ciencias. Instituto de Biología. UNAM. México.

Fries, C., 1960. Bosquejo geológico del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de México. Boletín del Instituto de Geología, UNAM, 60, 256pp.

Galindo, A. 2006. Problemática para el establecimiento de seis especies nativas de la selva baja caducifolia en la recuperación de un sitio perturbado en las barrancas del Río Tembembe, Morelos. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Instituto de Ecología. UNAM. México.

Gamon, J., Kitajima, K., Mulkey, S., Serrano, L. y Wright, S. 2005. Diverse optical and photosynthetic properties in a neotropical dry forest during the dry season: implications for remote estimation of photosynthesis. *Biotropica* 37(4), 547-560.

García-Aguirre, M., Ortiz, M., Zamorano, J. y Reyes Y. 2007. Vegetation and landform relationships at Ajusco volcano Mexico, using a geographic information system (GIS). *Forest Ecology and Management* 239, 1–12.

García-Barrios, R. 2002. Proyecto de establecimiento. Estación de Restauración Ecológica. "Barrancas del Río Tembembe". UNAM. CRIM. México.

García Flores Juana. 2008. Diagnóstico Ambiental de las unidades naturales de la estación de restauración ecológica "Barrancas del río Tembembe" con fines de restauración. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias UNAM. México.

Gómez, A. G. 2003. Caracterización del medio físico de la cuenca del río Tembembe empleando sistemas de información geográfica (SIG Cuencas). Publicado en: <http://selper.uabc.mx/publicacion/cong11/extenso42.doc>

Harrington, C. 1999. Forest planted for ecosystem restoration or conservation. *New Forest* 17, 175-190.

Henbo, Y., Itaya, A., Nishimura N y Yamamoto S. 2004. Long-term canopy dynamics in a large area of temperate old-growth beech (*Fagus crenata*) forest: analysis by aerial photographs and digital elevation models. *Journal of Ecology* 94, 945-953.

Hernández -Pérez, E. 2008. Distribución del género *Bursera* en el Estado de Morelos y su relación con el clima. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias. UNAM. México.

INEGI. 1990. Cartas topográficas. Escala 1:50, 000. Claves: E14A48, E14A49, E14A58 y E14A59. México

INEGI. 2000. Fotografías Aéreas. E14B, Línea 11 y 12 del Bloque 3 "Sultepec".

ITC, 2000. ILWIS 3.0 Academic. User's guide. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands. 530 pp.

Kalacska, M., Sánchez-Azofeita, A., Calvo-Alvarado, J., Rivard, B. y Quesada, M. 2005. Effects of season and successional stage on leaf area index and spectral vegetation indices in three mesoamerican tropical dry forests. *Biotropica* 37 (4), 486-496.

Kovalchik, B. y Chitwood, L. 1990. Use of geomorphology in the classification of riparian plant associations in mountainous landscapes of central Oregon, U.S.A. *Forest Ecology and Management*, 33/34, 405-418.

López-Blanco, J. 1994. Evaluaciones geomorfológicas y de recursos naturales aplicando un sistema de información geográfica (ILWIS). Tesis de Doctorado. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM.

Lugo Hubp, J. 1986. Los Métodos Geomorfológicos. Revista de Geografía Vol. 1. No. 1 México. 13- 26.

Lugo Hubp, J. 1991. Elementos de geomorfología aplicada: Métodos cartográficos. Instituto de Geografía. UNAM. México.109 pp.

Maksud, A.S.M. y S. Midorikawa. 2004. GIS-based geomorphological mapping using remote sensing data and supplementary geoinformation. A case study of the Dhaka city area, Bangladesh. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 6, 111–125 pp.

Márquez-Huitzil, R. 2005. Planificación para la restauración asociada con el aprovechamiento de los recursos naturales. En: Sánchez, O., E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azuara (editores). 2005. Temas sobre restauración ecológica . Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología, U.S. Fish and Wildlife Service y Unidos para la Conservación A. México.

Martínez García, F. 2002. Síntesis de las unidades ambientales biofísicas de la subcuenca del Río Colotepec, Edo de Morelos, Mediante la aplicación del enfoque geomorfológico y un sig. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM. México.

Maass, M. y H. Cotler. 2007. El protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas. En: Cotler. H. (compilador) 2007. El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Segunda edición. Semarnat, INE. México.

Medrano González, F. 2004. Las comunidades vegetales de México. INE-Semarnat. México. 88pp.

Meffe, G. K. y C. R. Carroll. (eds.). 1994. Principles of Conservation Biology. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, Massachusetts.

Montes Cruz, P. y López-Blanco, J. 2004. Mapeo geomorfológico morfogenético y morfodinámico para la caracterización de la degradación ambiental en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Artículo in extenso*. Memoria en CD del 3^{er} Seminario Latinoamericano de Geografía Física. Pto. Vallarta Jalisco, México. UNAM, Instituto de Geografía, Instituto Nacional de Ecología, Universidad de Guadalajara, 28 de Abril al 1 de Mayo de 2004.

Montes Cruz P. 2005. Mapeo morfogenético y morfodinámico del área de Tepelmeme. Tesis de licenciatura, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México. 138 pp.

Nilsson, Ch. y G. Grelsson. 1995. The fragility of ecosystems: a review. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 32. Pp. 677-692.

Olvera, Salgado M. D; W. Wruck, Spillecke; A. Reyes, López y H. G. Cortés Torres. 2000. Modelos Tipo y beneficios de las líneas vegetativas intermedias en los suelos de ladera. Simposio 4. Manejo de Cuencas Hidrológicas. X Congreso Nacional de Irrigación. Chihuahua, México.

Ortiz-Pérez, M.A., 1977. Estudio geomorfológico del Glacis de Buenavista, Estado de Morelos. *Boletín del Instituto de Geografía* 8, 25–40.

Peterson, G., C. Allen y C. S. Holling. 1998. Ecological resilience, biodiversity and scale. In: Dodson, S. , T. F. H. Allen, S. R. Carpenter, K. E. A. R. Ives, R. L. Jeanne, J. F. Kitchell, N. E. Langston y M. G. Turner. 1999. *Readings in ecology*. Oxford, USA.

Pérez Salicrup, D. 2005. La restauración en relación con el uso extractivo de los recursos bióticos. En: Sánchez, O., E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azuara (editores). 2005. Temas sobre restauración ecológica. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología, U.S. Fish and Wildlife Service y Unidos para la Conservación A. México.

Piña, E. 2005. Análisis de la estructura y la composición de la selva baja caducifolia con diferentes grados de conservación en la zona de Xochicalco, Morelos, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México.

Rhoads, B. 2006. The Dynamic Basis of Geomorphology Reenvisioned. *Annals of the Association of American Geographers*, 96 (1) pp. 14–30 r 2006 by Association of American Geographers.

Ruhe, R. 1975. *Geomorphology. Geomorphic Processes and Superficial Geology*. Houghton Mifflin Company. USA.

Sánchez, O., E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azúara (editores). 2005. Temas sobre restauración ecológica. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología, U.S. Fish and Wildlife Service y Unidos para la Conservación A. México.

Sánchez-Azofeita, G.A., Quesada, M., Rodríguez, J.P., Nassar, J., Stoner, K., Castillo, A., Garvin, T., Zent, E., Calvo-Alvarado, J.C., Kalacska, M.E.R., Fajardo, L., Gamon, J. y Cuevas-Reyes, P. 2005. Research priorities for neotropical dry forest. *Biotropica* 37(4), 477-485.

Schowengerdt, A. 2002. *Remote Sensing. Models and methods for image processing*. 2da. Edición. Academic Press. USA.

Selby, M. J. 1982. *Hillslope materials and processes*. Oxford, Oxford University Press.

Semarnap. 2000. Ordenamiento General del Territorio. Memoria Técnica 1995-2000. Semarnap. México. 542pp.

Semarnat. 2008. Sistema Nacional de información ambiental y recursos Naturales. En web:<http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Pages/sniarn.aspx>

Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Gama-Castro J., Flores, D., y G. Escamilla-Sarabia. 2003. Paleosol-sedimentary sequences of the Glacis de Buenavista, Central Mexico: interaction of Late Quaternary pedogenesis and volcanic sedimentation. Quaternary International 106–107, 185–201

Statgraphics. 2000. Manual en línea. <http://www.statgraphics.com>

Statistical Graphics Corp, 2000. Manual para elaborar análisis de estadística multivariada. Consultado en: Software Statgraphics Ver. 5.0.

Tapia-Varela, G., y López-Blanco, J. 2002. Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México a escala 1:100,000. Rev. Mexicana de Ciencias Geológicas, vol 19, núm 1., pp. 50-65.UNAM.

Trejo, I. y J. Hernández. 1996. Identificación de la selva baja caducifolia en el estado de Morelos, México, mediante imágenes de satélite. Investigaciones Geográficas. Número especial 5. Instituto de Geografía. UNAM. México.

Trejo, I. 1998. Distribución y diversidad de selvas bajas en México: relaciones con el clima y el suelo. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. UNAM. México.

Trejo, I. y R. Dirzo. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest a national and local análisis in México. Biological Conservation 94, 133-142.

Trejo, I. 2005. Análisis de la diversidad de la selva baja caducifolia en México. En: Halffter, G., Soberon, J. Koleff, P y Melic, A. (compiladores). Sobre diversidad Biológica: El

significado de las Diversidades Alfa, Beta y Gamma. CONABIO. Sociedad Entomológica Aragonesa. CONACYT. Zaragoza, España. Pp. 111-112.

Ulloa-Nieto, J. A. 2006. Establecimiento y crecimiento inicial de cuatro especies arbóreas potencialmente útiles para la restauración de pastizales degradados del NO de Morelos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM, México. 85 p.

Velásquez, A., J.F. Mas, J.R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P.C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J.L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. Gaceta 62. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT, México pp. 21-37

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

Verstappen, H. Th., and van Zuidam, R. 1991. El Sistema ITC para Levantamientos Geomorfológicos ITC. Publication number 10. Enschede, The Netherlands. 87 pp.