

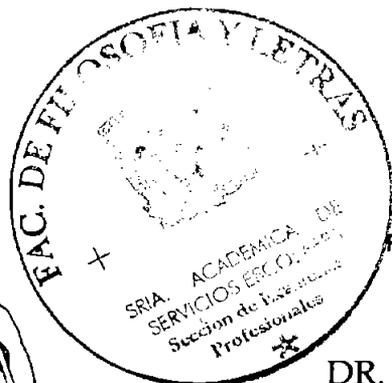


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

MAPEO MORFOGENÉTICO Y MORFODINÁMICO
DEL ÁREA DE TEPELMEME, OAXACA.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA
P R E S E N T A :
P E D R O M O N T E S C R U Z



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

Director de Tesis:
DR. JORGE LÓPEZ BLANCO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F

2005

m339888



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

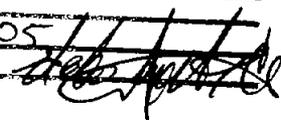
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Pedro Montes Cruz

FECHA: 11-1-05

FIRMA: 

AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, de la que soy parte desde 1992 y en la que he pasado la mitad de mi vida hasta el momento, gracias por darme el privilegio de ser universitario, gracias por tus bibliotecas y por darme la oportunidad de conocer a mis amigos en la UNAM.

Al Dr. Jorge López Blanco, por su generosidad, por su paciencia. Gracias por alentarme a participar en congresos, por invitarme a varios proyectos de investigación, con lo que he aumentado mi experiencia y ampliado mi criterio, gracias por creer y confiar en mi, por todo tu apoyo una vez más, gracias.

Al Dr. José Lugo Hubp, quien despertó en mí el interés por la geomorfología y de quien recibí las bases teóricas y académicas de esta ciencia de la Tierra, dentro y fuera de las aulas de la facultad.

Agradezco al Dr. Lorenzo Vázquez Selem, por su disposición a revisar mi trabajo, por su apertura, sus comentarios y recomendaciones que indudablemente me aportaron elementos valiosos para el mejoramiento del escrito y de mi concepción de la geomorfología.

Al Dr. José Ramón Hernández Santana, quien se mostró, desde que me presenté con él, abierto, interesado y dispuesto a ayudarme en lo que se me ofreciera, gracias por brindarme su ayuda y sus comentarios tan atinados, así como por su sencillez.

Al M. en C. Sergio Yussim Guarneros, de quien aprendí un poco de geología en campo, por su apoyo, por los cursos de tectónica y de geología estructural, a los que me invitó y en general por compartir sus conocimientos conmigo provocando en mí un mayor interés por la geología, gracias.

Al Dr. Carlos Martorell Delgado, por su apoyo en campo y por compartir sus conocimientos sobre ecología.

A la Dra. Lourdes Villers Ruíz, por los proyectos en los que me involucró con cuya participación mejoré mis conocimientos sobre el medio físico.

A la SEMARNAT y CONACYT, por el apoyo brindado para la realización de esta tesis como becario del proyecto SEMARNAT-2002-C01-0591 "Degradación Ambiental, Desarrollo Comunitario y Conservación Ecológica en la Mixteca Alta".

Al Instituto de Geografía de la UNAM, por las facilidades brindadas en la elaboración de este y otros trabajos geomorfológicos, al personal de la biblioteca, al Laboratorio de SIG y Percepción Remota.

A la gente del municipio de Concepción Buena Vista, Oaxaca por su apoyo en el trabajo de campo.

Ahora agradezco a todas las personas que me han apoyado en este tiempo durante el cual elaboré mi tesis.

A mis amigos y compañeros de la generación: a Ricardo Garnica Peña, Nancy Silva Díaz, Daniel Aguirre y Karen, Carlos Arzola, José Manuel Canto Vergara, Maria Luisa Cuevas Fernández, Sarai Morales Reygadas, Nancy Yazmín Toribio Ruíz, Julio Cesar Preciado López.

Rodolfo Ruíz, gracias por compartir tus conocimientos de SIG, por tu amistad en estos años, por tus consejos, por apoyarme siempre que recurrí a ti.

A Sergio Salinas Sánchez, con quien compartí buen tiempo en el cubículo, agradezco tus observaciones y consejos para mi trabajo, tu amistad y apoyo en campo. Alejandro Pérez García, por su amistad, a Rafael Aragón González, Osvaldo Franco Ramos, a Eliseo Cerecedo, Miguel Castillo Rodríguez, Germán Gómez Rocha, Enrique Saucedo, René Ramos, del Laboratorio de SIG y Percepción Remota, gracias.

A Cristina Colín Almazán, Lourdes Rodríguez Gamiño.

A Ana Elisa Peña del Valle Isla, futura doctora gracias por tu amistad te deseo lo mejor ahora que estas en Inglaterra, por allá nos veremos algún día.

A Libertad Noemí Salazar Ramírez, mi maestra del fotoclub de ingenieros de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

A mis amigos del CCH, a Juan Carlos, Martha, Bárbara, Federico Jordán, a Dulce, Juan Neri, Xiomara, Edgar (hueso), Charly, Cesar, Toño *black*, y a toda la fauna *ccachera* que conocí en esos buenos tiempos.

DEDICATORIA.

En primer lugar dedico este trabajo a mi madre que además de traerme al mundo ha sido la persona que más me ha apoyado en toda mi vida. Te agradezco todo lo que has hecho por mi, cuando era niño siempre me decías que lo que empezaba debía terminarlo, tu me enseñaste a ser perseverante, a ser fuerte y a ser cada vez mejor. Este trabajo fue posible gracias a tu apoyo, así que tu también eres la autora de esto.

Sonia, tu has sido también muy importante en mi vida y lo sabes, así que solo te digo gracias por estar conmigo en los mejores y en los no tan buenos tiempos, por tu madurez y por tus palabras, infinitas gracias.

Miguel González Malvaez, que te puedo decir, gracias por tu ayuda en todo momento y ahora que formas parte de la familia te digo a ti también que estas presente en este trabajo.

A mi sobrino Uzziel Havivi, eres mi fuente de inspiración, me hace muy feliz que hayas venido al mundo y a mi vida.

A mi familia de Tehuacan, agradezco que nos recibieran hace 21 años.

*Run, rabbit run
Dig that hole, forget the sun,
And when the last work is done,
Don't sit down it's time to dig another one*

Pink Floyd. 1973

INDICE*Página***CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

1. MARCO GENERAL	1
1.1 CONTEXTO AMBIENTAL Y MORFODINÁMICO	2
1.2 ÁREA DE ESTUDIO	3
1.3 OBJETIVOS GENERALES	5
1.4 OBJETIVOS PARTICULARES	5
1.5 HIPÓTESIS	6
1.6 JUSTIFICACIÓN	6
1.7 ANTECEDENTES	7
1.8 ESTRUCTURA DE LA TESIS	10

CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL

2. ¿QUÉ SON LAS FORMAS DEL RELIEVE?	12
2.1 ALGUNOS ENFOQUES GEOMORFOLÓGICOS	12
2.1.1 Geomorfología estática	12
2.1.2 Geomorfología dinámica	13
2.1.3 Geomorfología genética	13
2.1.4 Geomorfología ambiental	14
2.1.5 Geomorfología sistemática	15
2.1.6 Geomorfología regional	15
2.1.7 Morfografía	15
2.1.8 Geomorfología funcional	16
2.1.9 Relaciones causales y funcionales	16
2.2 ALGUNOS CASOS DE RELACIONES FUNCIONALES Y CAUSALES	16
2.3 TIEMPO FÍSICO Y TIEMPO HISTÓRICO EN GEOMORFOLOGÍA	17
2.4 CONCEPTOS DE CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA	19

2.5 REVISIÓN DE ENFOQUES SOBRE MORFODINÁMICA SUPERFICIAL	27
2.6 DEFINICIÓN DE EROSIÓN	28
2.6.1 Kirkby y Morgan	28
2.6.2 Lugo	28
2.6.3 Goudie	28
2.6.4 Hernández Corzo y Morgan	29
2.7 TIPOS DE FLUJO HÍDRICO	29
2.7.1 Flujo superficial	29
2.7.2 Flujo subsuperficial	30
2.7.3 Flujo laminar	30
2.7.4 Flujo Concentrado	30
2.7.5 Rasgos característicos de la erosión hídrica	31
2.8 PROBLEMAS Y MÉTODOS EN LA INVESTIGACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA	31
2.9 CONSIDERACIONES AL IMPACTO GENERADO POR LA EROSIÓN HÍDRICA	35
2.10 REVISIÓN DE MÉTODOS Y ENFOQUES APLICADOS AL ESTUDIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA ACELERADA DE SUELOS	37
2.10.1 Métodos topográficos detallados	37
2.10.2 Métodos volumétricos	37
2.10.3 Métodos pedológicos	38
2.10.4 Métodos comparativos	38
2.10.5 Métodos monolíticos	39
2.10.6 Métodos con base en las características de la vegetación	39
2.10.7 Métodos morfométricos	39
2.10.8 Métodos fotogramétricos	40
2.10.9 Cartografía de la erosión	40

CAPÍTULO 3. CONTEXTO GEOGRÁFICO FÍSICO

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES	41
3.1 RESEÑA TECTONO-ESTRATIGRÁFICA REGIONAL	43
3.2 ESTRATIGRAFÍA	48
3.2.1 Mesozoico	48
3.2.1.1 Caliza Teposcolula	48
3.2.2 Cenozoico	51
3.2.2.1 Conglomerado Tepelmeme	51
3.2.2.2 Formación Yanhuitlán	51
3.2.2.3 Toba Llano de Lobos	52
3.2.2.4 Andesita Yucudaac	54
3.2.2.5 Intrusivo Suchixtlahuaca	55
3.2.2.6 Depósitos recientes	55
3.3 SUELOS	57
3.4 CLIMA	60
3.5 VEGETACIÓN	61

CAPÍTULO 4. MÉTODO

4. BASES TEÓRICAS	65
4.1 RECOPIACIÓN, CONSULTA, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CARTOGRÁFICA	69
4.1.1 Información bibliográfica	69
4.1.2 Información cartográfica	69
4.2 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	70
4.3 FOTOINTERPRETACIÓN MORFOGENÉTICA	70
4.4 DELIMITACIÓN DE LAS UNIDADES MORFOGENÉTICAS (UM)	73
4.5 DELIMITACIÓN DE LAS UNIDADES MORFODINÁMICAS (UMd)	76
4.6 PROCESAMIENTO Y USO DE LA IMAGEN DE SATÉLITE LANDSAT ETM+	78
4.7 INTERPRETACIÓN DEL ESPACIOMAPA	79

4.8 USO DE SIG	79
4.9 ELABORACIÓN Y USO DEL MAPA DE RELIEVE SOMBREADO	80
4.10 GEOMETRÍA DEL RELIEVE	81
4.10.1 Mapa altimétrico	82
4.11.2 Mapa de pendientes	83
4.10.3 Mapa de orientación de laderas	84
4.10.4 Mapa de forma de ladera	87
 CAPÍTULO 5. RESULTADOS 	
5. PREÁMBULO	90
5.1 TIPOS DE RELIEVE	92
5.1.1 Laderas de montaña.	93
5.1.2 Lomeríos.	93
5.1.3 Piedemontes.	94
5.1.4 Planicies.	96
5.2 SUBTIPOS	96
5.2.1 Laderas de Montaña Altas (Lma).	96
5.2.2 Laderas de Montaña Media (Lmm).	98
5.2.3 Laderas de Montaña Baja c (Lmb c).	98
5.2.4 Laderas de Montaña Baja v (Lmb v).	98
5.2.5 Lomeríos Altos c (Loa c).	99
5.2.6 Lomeríos Altos v (Loa v).	99
5.2.7 Lomeríos Medios c (Lom c).	101
5.2.8 Lomeríos Medios v (Lom v).	101
5.2.9 Lomeríos Bajos c (Lob c).	101
5.2.10 Lomeríos Bajos v (Lob v).	101
5.2.11 Piedemontes complejos (Pmc).	103
5.2.12 Planicies aluviales (Pal).	103
5.3 SISTEMAS MORFOGENÉTICOS	103
5.3.1 Sistema morfogénético Concepción Buena Vista.	107

5.3.1.1 Relieve endógeno.	107
5.3.1.2 Relieve exógeno.	108
5.3.2 Sistema morfogénico Yanhuitlan.	110
5.3.2.1 Relieve endógeno.	110
5.3.2.2 Relieve exógeno.	111
5.3.3 Sistema morfogénico Loma Grande.	111
5.3.3.1 Relieve endógeno.	112
5.3.3.2 Relieve exógeno.	112
5.3.4 Sistema morfogénico Teposcolula.	114
5.3.4.1 Relieve endógeno.	116
5.3.4.2 Relieve exógeno.	118
5.4 MAPA DE UNIDADES MORFODINÁMICAS	119
5.4.1 Flujo concentrado.	121
5.4.2 Flujo concentrado y disolución.	121
5.4.3 Flujo laminar.	123
5.4.4 Flujo laminar y disolución.	123
5.4.5 Disolución.	124
5.4.6 Remoción en masa.	124
5.4.7 Remoción en masa y disolución.	124
5.4.8 Procesos complejos.	125
CONCLUSIONES	127
BIBLIOGRAFÍA	132

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1. MARCO GENERAL

Dentro del ámbito de las ciencias de la Tierra, la geomorfología plantea el estudio de las formas del relieve y lo hace abordando temas que tienen como meta explicar: la morfogénesis, la morfodinámica, las paleoformas, los vínculos entre el relieve y el medio ambiente, asimismo la influencia de la geodinámica interna (Tapia Varela, 1999). Tapia Varela y López Blanco (2002) mencionan que la geomorfología es una ciencia esencialmente morfogenética, aunque también morfodinámica, cuyos objetivos son la explicación de los orígenes y evolución de los distintos rasgos y elementos del relieve.

Una manera de explicar las formas y los rasgos de la superficie terrestre ha sido mediante la construcción de mapas. La cartografía brinda las herramientas conceptuales y los argumentos necesarios para la elaboración de documentos científicos como los mapas geomorfológicos (Joly, 1979; Lugo, 1991). Estos mapas, al igual que otros, cumplen con el objetivo de sintetizar información de una parte del planeta o de todo, con ellos se da a conocer cada aspecto relativo al relieve.

La elaboración de mapas geomorfológicos conlleva a otros procesos analíticos y posteriormente sintéticos, que plantean la necesidad de clasificar la información a representar. La taxonomía del relieve ayuda a la elaboración de mapas con información ordenada en jerarquías que pueden ir desde aquellas de grandes dimensiones hasta las de orden menor cuya extensión sea de cientos de kilómetros, de tal manera que se logre un mejor entendimiento acerca del relieve a cualquier escala cartográfica (Lugo, 1990 y 1991; Lugo y Córdova, 1992).

Los mapas geomorfológicos son documentos científicos que contienen información útil para otros estudios (Tapia Varela y López Blanco, 2002). Es entonces a partir del estudio del relieve que se desprenden otras investigaciones más detalladas sobre temas como: el impacto de los sismos y la actividad volcánica sobre la humanidad, los efectos de la pérdida de tierras por desertificación, degradación y por la erosión acelerada de los suelos, la actividad antrópica y su relación con las estructuras urbanas, el efecto de los fenómenos de remoción en masa, entre otros (Lugo, 1991; Goudie, 1993, Morgan,

1994). En este sentido, se tiene en los mapas una manera de aplicación del conocimiento geomorfológico.

Por otro lado, la importancia de la geomorfología en estudios de carácter ambiental radica en que se han aplicado los fundamentos del estudio del relieve, las escalas cartográficas, así como, información de otros estudios a una porción específica de la superficie terrestre (Verstappen, 1983, Tapia Varela, 1999). La elaboración de cartografía morfodinámica, en el presente trabajo, fue precedida de la delimitación de unidades morfogenéticas (UM), con este antecedente inmediato de cartografía geomorfológica se delimitó el terreno en estudio asumiendo un enfoque geomorfodinámico. La información que se generó del mapa de unidades morfodinámicas (Umd) está inmersa en la temática de alteración ambiental regional y de deterioro del entorno por procesos de erosión hídrica acelerada, por procesos gravitacionales y de disolución en áreas de rocas calcáreas en donde los suelos son incipientes.

En un principio se fragmentó y clasificó morfogenéticamente al relieve, lo que aportó datos e información fundamental y valiosa para el entendimiento de su origen. Posteriormente, con la información del primer mapa (de UM) fue posible realizar el segundo mapa de este trabajo, el mapa de unidades morfodinámicas. El mapa morfogenético (UM) brinda elementos valiosos, no solo para el entendimiento del origen del relieve sino, también de otros procesos que inciden en la actividad directamente sobre el mismo, de esta manera, al iniciar la cartografía sobre la morfogénesis se observaron las condiciones actuales que imperan sobre el territorio estudiado (Lugo, 1990 y 1991; López Blanco y Villers Ruíz, 1995).

1.1 CONTEXTO AMBIENTAL Y MORFODINÁMICO

A nivel mundial se están generando cambios ambientales y hoy se perciben los efectos de esas alteraciones al entorno natural (Turner, 1992 y 1995, citado en Vanacker et al., 2003). En la actualidad son claros y evidentes esos cambios, puesto que los efectos son de gran repercusión sobre el mismo planeta. Se está en presencia de un escenario complejo de causa-efecto. El impacto ambiental influido por la expansión de

los fenómenos erosivos acelerados están, en gran medida, relacionados con el crecimiento desmedido de la población, las actividades humanas y con la erradicación de la cubierta vegetal, por citar algunos ejemplos (Goudie, 1993 y 2000; McAuliffe et al., 2001; Rincón, 1999 y 2001; Vanacker et al., 2003). La pérdida de tierras por erosión acelerada es otro efecto de la actividad antrópica sobre el ambiente; sus consecuencias entre muchas otras son: la pérdida de tierras de cultivo, nula recarga de acuíferos y el avance de la desertificación, fenómenos complejos de ser evaluados y analizados.

México, dentro de la gran biodiversidad que posee, alberga problemas que son el resultado de la alteración del entorno natural, de tal manera, que no escapa a la atención de las distintas disciplinas científicas que se avocan al estudio de la degradación ambiental. Un problema severo que presenta el país es la erosión acelerada de suelos. Es un fenómeno con importante presencia en el territorio nacional, algunos reportes informan que desde un 71% hasta un 98% del área total del país presenta evidencia de diversos grados de erosión (Maass y García Oliva, 1990). Existen regiones como la Mixteca Alta de Oaxaca, en donde se pueden ver los más extremos efectos de la erosión, sobre todo por la acción hídrica; son sitios desprovistos de vegetación y suelo, en donde sólo aflora la roca, dicha área es un ejemplo claro de los efectos de la degradación ambiental por los procesos de erosión acelerada de suelos. Los procesos geomorfológicos degradativos enmarcados en el término erosión están ampliamente extendidos en México, con mayor o menor intensidad, la Mixteca Alta no es la excepción (López Blanco, 1994; Rincón, 1999; Montes Cruz y López Blanco, 2003 y 2004).

1.2 *ÁREA DE ESTUDIO*

Se localiza en la porción norte de la Mixteca Alta, dentro de la cuenca de Coixtlahuaca, entre las coordenadas: 17°45' y 18°00' N, y 97°15' y 97°35' W y cubre 430 km², aproximadamente (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Rincón, 1999, Montes Cruz y López Blanco, 2003 y 2004). En ella, como en otros lugares de la Mixteca Alta, los procesos de perturbación ambiental se remontan a tiempos prehispánicos, entre éstos la erosión acelerada de los suelos ha actuado intensamente desde antes de la llegada de los españoles a tierras americanas (Goudie, 1993; Rincón, 1999; McAuliffe et

al., 2001). Siete municipios conforman al área de estudio: Tepelmeme Villa de Morelos, Concepción Buena Vista, Tlacotepec Plumas, San Mateo Tlapiltepec, Magdalena Jicotlán, La Trinidad Vista Hermosa y San Francisco Teopan, de ellos el más poblado es Tepelmeme de Morelos. El acceso al área cartografiada es por la autopista México-Oaxaca, que pasa a menos de un kilómetro al oeste de Tepelmeme (Figura 1.1).

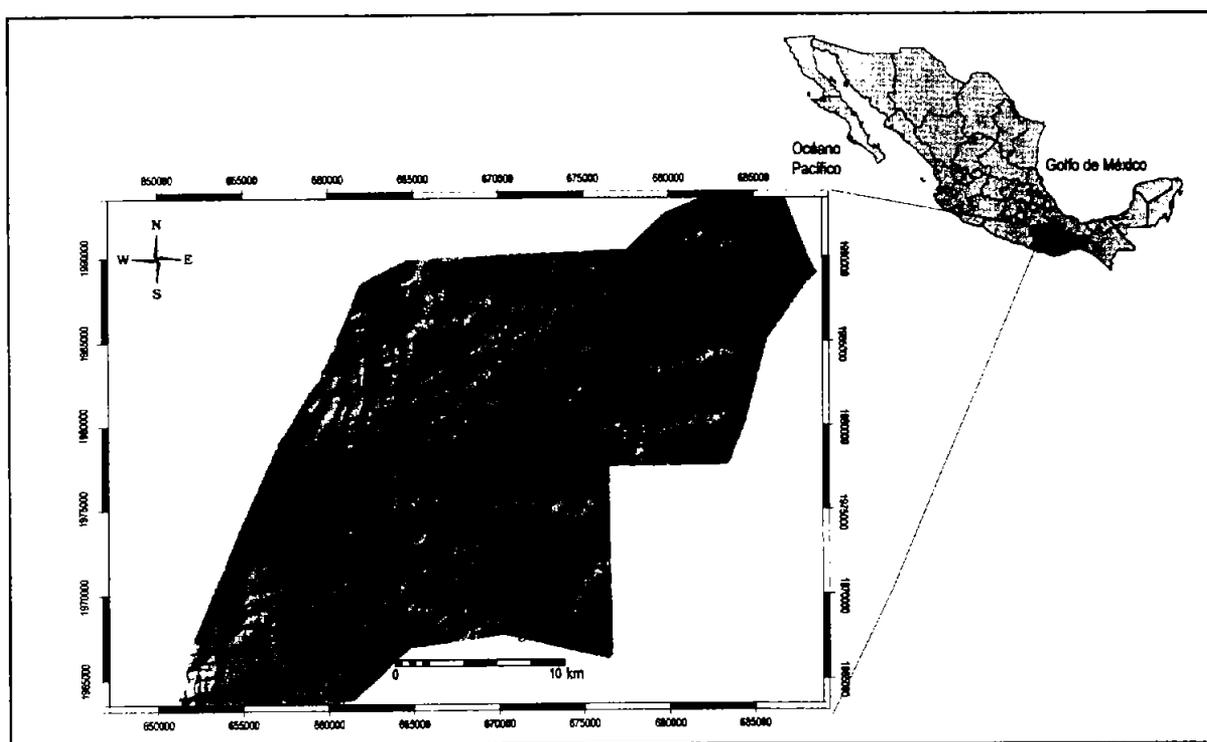


Figura 1.1 Localización del área de estudio situada en el norte de la Mixteca Alta, Oaxaca.

Los límites naturales son: al oeste el río Grande, al este el río Xiquila, al sur la cabecera del río Grande de Tepelmeme, próxima al poblado de La Trinidad Vista Hermosa; al norte la vertiente de los ríos Barranca Honda y Cañada San Miguel.

El clima es semiárido (BS) y está enmarcado en un escenario severo de disturbio ecológico. Localmente el área de estudio está influenciada por múltiples factores geográficos como son: el efecto de sombra orogénica, causada por la Sierra de Juárez, localizada a 90 km en línea recta al este de Tepelmeme, la actividad antrópica, el cambio climático, y el histórico deterioro ecológico (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Rincón, 1999).

Existe evidencia de que la región fue densamente poblada desde por lo menos hace

1,200 años y las prácticas agrícolas típicas de la Mixteca, llevadas a cabo sobre un relieve completamente desfavorable para la agricultura, resultaron en una serie de procesos degradativos que continúan hasta hoy (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Goudie, 1993; Rincón, 1999). Sus efectos son notorios e incluso extremos, cerca del 60% del área de estudio carece de una cubierta de suelo capaz de sostener vegetación como la preexistente (Martorell, 2004 comunicación personal). Aunque son varios factores los que han intervenido para que se tenga en la actualidad tal escenario de desertificación, es sin duda la actividad humana la que más ha influido para que la erosión ocurra con mayor rapidez (McAuliffe et al., 2001).

1.3 OBJETIVOS GENERALES

- Realizar un mapa geomorfológico morfogénico del área de estudio a escala 1:75,000 con el fin de tener conocimiento acerca del origen de las formas del relieve y de los procesos y mecanismos que han intervenido para su modelado y el estado actual en que se encuentran.
- Realizar un mapa de unidades morfodinámicas a escala 1:75,000. En el que se mostrarán los procesos erosivos principalmente de tipo hídrico, por flujo laminar y por flujo concentrado, por actividad en cárcavas; además de registrar los procesos gravitacionales.

1.4 OBJETIVOS PARTICULARES

- Por medio de la fotointerpretación morfogénica determinar las jerarquías en que se agrupará a los distintos tipos del relieve.
- Cuantificar la superficie de los distintos tipos de relieve, en cada una de las jerarquías en que se agrupe.
- Cruzar la información del mapa de unidades morfogénicas y el de unidades morfodinámicas para establecer la extensión de los procesos erosivos acelerados por tipo de relieve.
- Detectar las áreas con presencia de algún tipo de procesos erosivos y establecer su relación con la pendiente del terreno, tipo de relieve y

configuración geométrica de las laderas, así como con la litología.

- Generar una base de datos para cada mapa (morfo-genético y morfodinámico), en donde se encuentren los datos más representativos de las unidades cartográficas que ayuden al entendimiento de la dinámica geomorfológica y ambiental del área.
- Cuantificar las superficies que ocupa cada tipo de erosión hídrica acelerada y cada tipo de relieve, para establecer las relaciones espaciales correspondientes.

1.5 HIPÓTESIS

- La configuración espacial y morfológica, así como, la homogeneidad de los tipos de relieve determinarán la extensión y tipo de los procesos morfodinámicos superficiales.
- Con el cruce de información de los mapas morfo-genético, morfodinámico y de pendientes se podrá establecer el tipo de relación entre el de relieve y los distintos fenómenos erosivos acelerados que estén presentes.

1.6 JUSTIFICACIÓN

La elección del área y temática de estudio fue a partir de la detección de la problemática de desertificación, enmarcada en un ambiente degradado y del que poco se sabe, lo que además lleva a plantearse lo siguiente; ¿qué papel desempeña la geomorfología en la investigación de fenómenos relacionados con la degradación ambiental por procesos erosivos acelerados que han actuado siempre, pero con mayor intensidad desde tiempos prehispánicos? Ya sea como respuesta al cambio climático histórico o por la influencia directa de la actividad humana o la combinación de ambas, la presente problemática es compleja y dinámica, por lo tanto necesita ser evaluada, analizada y monitoreada (Perles Roselló, 2003).

Es necesario contar con datos que muestren bajo qué condiciones se están desarrollando los múltiples procesos biofísicos y socioeconómicos, que inciden sobre el área de estudio (Montes Cruz y López Blanco, 2003). Sin duda, la importancia del área

de estudio radica en la presencia de un escenario de degradación ambiental en el que el ser humano ha sido un factor importante, que ha intervenido con el medio propicio para generar resultados como los que pueden ser observados hoy sobre el paisaje del norte de la Mixteca Alta oaxaqueña.

1.7 ANTECEDENTES

Existen varios estudios de distintas disciplinas científicas que coinciden en la intervención de múltiples factores, algunos de escala global y regional, otros de índole local que han influido directamente en la degradación ambiental que ha presentado la región desde tiempos prehispánicos (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Goudie, 1993; Rincón, 1999, 2001).

La diversidad de los tipos de vegetación y las características de los suelos de la cuenca del río Tepelmeme aun existentes, fueron presentados en un mapa por Cruz Cisneros y Rzedowski (1980), e identificaron los siguientes grupos; bosque, matorral y pastizal. Para los suelos hicieron una descripción general de sus características físicas dentro del área, y aunque estas comunidades padecen un intenso disturbio, se han podido caracterizar y cartografiar. Fue característico de la Mixteca Alta, el cultivo en terrazas en tiempos prehispánicos, eran ocupadas y cuando el rendimiento disminuía las abandonaban (Rincón, 1999). En las planicies aluviales y fluviales es en donde la agricultura se practica con mayor intensidad, los materiales son propicios para la concentración de humedad, y la pendiente es aún más favorable para la conservación de estas tierras de cultivo (Figura 1.2). La actividad pecuaria se restringe al pastoreo de ganado caprino, lo que influye directamente en el disturbio presente en el lugar (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Rincón, 1999).

En casi toda el área de estudio el impacto sobre la vegetación y el suelo han desencadenado los procesos degradativo-ambientales que son tan evidentes y emiten resultados dramáticos. Existen montañas en donde sólo la superficie cumbral posee un relicto de los otrora amplios bosques de encino (Figura 1.3).



Figura 1.2 Agricultura sobre planicie aluvial, en el poblado de San Pedro Nopala, al sur del área de estudio.



Figura 1.3 Superficie cumbre de un lomerío alto cubierta por bosque de encino, porción centro- sur del área de estudio.

Los efectos de la degradación ambiental son a escala regional, y en esta área de estudio existen condiciones ambientales y sociales comunes a otras porciones de la Mixteca Alta.

Hay antecedentes de estudios realizados en el área como la investigación de Martorell y Peters (2000). Aunque el estudio de estos autores se concentra en el municipio de Concepción Buena Vista, han estudiado durante cinco años el comportamiento de poblaciones de cactáceas, del género *Mammillaria*, que están en peligro de extinción y han reportado distintos procesos de degradación ambiental. Rincón (1999), ha estudiado los eventos históricos que han desencadenado el disturbio ambiental que padece, en particular, la cuenca de Coixtlahuaca. El autor encontró una relación directa entre las actividades humanas llevadas a cabo desde hace 2,000 años hasta la fecha y consideró los distintos documentos preservados desde tiempos prehispánicos. Asimismo realizó una exhaustiva investigación documental y el fechamiento de fragmentos de carbón vegetal encontrados en depósitos aluviales que resultaron de la erosión y de la depositación de suelos pertenecientes a las tierras de cultivo abandonadas. Con la información recabada elaboró una reconstrucción paleoambiental del posible escenario que presentaba el paisaje de la cuenca. O'Hara y Metcalfe (1997), mencionan la importancia de la información climática y del fechamiento de diatomeas depositadas en sedimentos de cuencas lacustres cerradas, para encontrar evidencias del cambio climático histórico en México y sus repercusiones en otros sitios del país. Desde luego que algunas ideas pueden coincidir con otros trabajos aunque no necesariamente pueden ser considerados como determinantes, para eso se necesitan estudios más detallados o concretos. Goudie (1993) menciona un caso registrado en Nochixtlán, Oaxaca, en donde desde tiempos precortesianos los agricultores convivían con los más severos procesos erosivos, los mixtecos buscaban los sitios donde se acumulaban los materiales acarreados de otras partes y ahí sembraban, lo que hace suponer un uso agrícola de las terrazas fluviales. Los estudios de Mitre (1973), Cruz Cisneros y Rzedowski (1980), junto con Rincón (1999, 2001) y Martorell y Peters (2000), son los antecedentes más cercanos para el área, quienes reportan información valiosa para la formulación de varias hipótesis a las problemáticas ahí encontradas

desde la perspectiva geomorfológica.

Aunque en otro sentido, es importante señalar que los efectos de la degradación ambiental que padecen los municipios que están dentro del área de estudio se reflejan en las actividades socioeconómicas ahí desempeñadas. Se trata de una región con altos índices de pobreza, que además enfrenta el deterioro ecológico de su entorno (Rincón, 1999). Lo que agrava su situación social. Es conocida la relación entre las actividades humanas y el medio ambiente mixteco (Goudie, 1993; Rincón, 1999). Se menciona que en algunas secuencias estratigráficas del río Culebra la actividad humana fue responsable directa de la remoción de enormes cantidades de suelo en tierras de cultivo por las lluvias torrenciales. En este sentido, la información y evidencia arqueológica de los hechos antes citados están registrados en documentos históricos; códices, documentos coloniales e investigaciones de reconstrucción paleoambiental y paleoclimática (Goudie, 1993; O'Hara y Metcalfe, 1997; Rincón, 1999).

1.8 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis contiene cinco capítulos en los que se mencionan los antecedentes ambientales del área de estudio, posteriormente se abordan los conceptos teóricos sobre cartografía geomorfológica, también se revisan algunos conceptos generales sobre morfodinámica hídrica superficial. Se dedica un capítulo a la explicación de la metodología seguida para la elaboración de los mapas que constituyen los objetivos centrales de este trabajo. En el último capítulo se describen los resultados que se obtuvieron y se hace mención de los aspectos más relevantes en cuanto a la morfogénesis del relieve y a los procesos morfodinámicos hídricos superficiales y gravitacionales.

Capítulo 1 En este capítulo la introducción del trabajo de tesis comienza con una breve descripción sobre conceptos geomorfológicos. Se presentan los antecedentes del área de estudio, se plantean los objetivos, la hipótesis y la justificación de esta investigación.

Capítulo 2. Se mencionan los conceptos revisados sobre distintos enfoques de la geomorfología, sobre morfodinámica, cartografía geomorfológica, erosión hídrica, tipos de flujo hídrico. Se describen algunas líneas sobre el estudio de la erosión acelerada desde una perspectiva geomorfológica.

Capítulo 3. Este capítulo trata sobre los aspectos geográficos generales del área de estudio, se parte de una descripción de la influencia regional del clima, de la litoestratigrafía, de la tectónica y de la actividad antrópica sobre el relieve clasificado, se mencionan las principales comunidades vegetales y de suelos. Se describen las condiciones físico-geográficas a las que se sujeta el área de estudio.

Capítulo 4. El método mediante el cual se obtendrán los resultados deseados es descrito en este capítulo, se expresan, en principio, las bases teórico conceptuales que se adoptan y la estructura del trabajo se plantea para la consecución de metas a corto y mediano plazo. En el diagrama metodológico se muestra como se procedió en cada etapa de la investigación, planteando vínculos y conexiones entre una y más etapas que se desarrollaron, algunas de ellas de manera simultánea.

Capítulo 5. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, se describen las unidades del relieve conforme a las jerarquías establecidas, de tal modo que se parte de lo general a lo particular: sistemas, unidades y subunidades. Se hace la descripción de los procesos y unidades morfodinámicos. Finalmente, se expresan las conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO 2 MARCO CONCEPTUAL

2. ¿QUÉ SON LAS FORMAS DEL RELIEVE?

Las geoformas son los hechos que juntos forman a la superficie de la Tierra. Pueden variar en dimensiones espaciales, desde las grandes, como las planicies, plataformas o cadenas montañosas, hasta las de menor tamaño, como los lomeríos, laderas y los valles. Muchas de las geoformas son el resultado de la depositación de los sedimentos, por actividad volcánica o por movimientos de la corteza (Ruhe, 1975).

El origen de las geoformas y los cambios que experimentan son el resultado de (Ahnert, 1998) :

- Los movimientos de la corteza terrestre: ascensos y subsidencia, plegamientos y movimientos horizontales de la corteza.
- El volcanismo, el cual se encarga de construir las estructuras y las geoformas.
- La denudación y la destrucción de las rocas y el suelo que forman y cubren al relieve.
- La depositación de los materiales.

Es necesario conocer las características de los fenómenos que se desencadenan a partir de la intervención de los procesos endógenos y exógenos en la creación y modificación de la superficie de la Tierra (Lugo, 1991). El resultado de tal interacción, como es sabido, son las formas del relieve que se pueden observar en el presente, de tal manera que sea posible identificar prácticamente dos orígenes principales del relieve, por los procesos internos de la Tierra o endógenos y por los procesos exógenos o relacionados con la actividad de los agentes atmosféricos (op. cit.).

2.1 ALGUNOS ENFOQUES GEOMORFOLÓGICOS

Verstappen (1983) define cuatro divisiones principales de la geomorfología:

2.1.1 Geomorfología estática.

Es el estudio de las formas actuales del relieve. Son estudios que se concretan a la

descripción de las formas del relieve, sin considerar los procesos ni el tiempo en que se formaron, tampoco se considera su posible evolución en el futuro. Los mapas morfométricos caen en esta clasificación, puesto que solo están dando información del estado actual de las geoformas.

2.1.2 Geomorfología dinámica.

Se refiere al estudio de los procesos que ocurren sobre la superficie de la Tierra y que repercuten en cambios sustanciales en un periodo de tiempo corto. Al respecto se ha avanzado en cuanto al carácter de los estudios de los fenómenos que originan cambios en la superficie terrestre, ya que son fenómenos que responden a las leyes físicas. Es ésta, la física, la ciencia más ligada a la geomorfología dinámica, la evaluación y cuantificación de los procesos erosivos y acumulativos son el referente inmediato en estos estudios que se iniciaron de manera muy simple, pero con un objetivo claro de conocer el comportamiento en términos numéricos y con análisis estadísticos simples, de los ríos y su papel en la formación de valles y bancos de material, así como sus repercusiones en el asolvamiento de los embalses, por ejemplo. Hay otros procesos que se pueden estudiar bajo esta perspectiva geomorfológica, como los efectos de la erosión marina en las costas, el desplazamiento de los glaciares, los procesos gravitacionales, por citar algunos casos.

2.1.3 Geomorfología genética.

Estudia el desarrollo del relieve a lo largo de grandes períodos de tiempo, es decir la génesis del relieve, aunque deben considerarse los relieves volcánicos y tectónicos que rompen un esquema genético gradual. El origen del relieve se debe a la conjugación de los procesos endógenos y exógenos de la Tierra, y en buena medida el factor determinante o clave para la definición del origen, de las geoformas, es el tiempo. En periodos de tiempo geológico pueden ocurrir de manera simple dos cosas, una que el relieve sea origen de distintos procesos pero que de manera gradual le confieran cierta estructura y forma, y por otro lado, que sean de origen súbito y generalmente catastrófico, en escala de tiempo humano (Verstappen, 1983). En ambos casos se habla

de lo mismo pero el tiempo es el que está caracterizando específicamente a uno u otro origen general.

El manejo de las escalas de tiempo debe ser adecuado para dejar claro que se trata de un relieve de origen definido, ya sea gradual o súbito. En el análisis del relieve para determinar su origen se parte de la fotointerpretación y del empleo de las cartas, topográfica y geológica; de la observación que del relieve se haga en las fotografías aéreas mediante estereoscopia, se obtendrán las pistas de los procesos pasados que intervinieron en su génesis, en este sentido, se hace una reconstrucción del pasado geomorfológico del lugar de interés. Entre los factores endógenos que intervienen en el origen del relieve están: la actividad tectónica y magmática extrusiva e intrusiva, principalmente, así como los factores exógenos, el intemperismo, la erosión y la acumulación (Lugo, 1991).

2.1.4 Geomorfología ambiental.

Esta disciplina se encarga del estudio del relieve y de sus interacciones con los elementos del paisaje con una gran influencia de ciencias afines a la ecología. Un importante avance se ha tenido en el campo multidisciplinario entre la geomorfología y los estudios relacionados con el medio biofísico (Verstappen, 1983). Entre las ciencias con que se ha creado y descubierto una gran cantidad de vínculos están: la ecología, la biología, la oceanografía, la oceanología, la geología, la geofísica, la edafología, la pedología, la agronomía y la hidrología, principalmente. Los puentes académicos que entre estas ciencias se han creado se fortalecen cada vez más con la aplicación del conocimiento integral de las mismas, básicamente para la resolución de problemas que afectan a las actividades humanas y al entorno biofísico particularmente. A este tipo de relaciones estrechas entre las ramas del conocimiento, ahora afines a la geomorfología se unen otras que ofrecen las herramientas y las técnicas automatizadas para alcanzar resultados, optimizando tiempo y, en algunos casos, recursos económicos. Estas disciplinas científicas están avanzando a la par de las nuevas técnicas y de la misma tecnología de vanguardia (op. cit.).

Ahnert (1998) habla de los principales aspectos, con base en su concepción de la geomorfología.

2.1.5 Geomorfología Sistemática.

Se encarga de estudiar las relaciones existentes entre la superficie de la geoforma, el tipo de roca y el suelo que la constituyen, además de los procesos que actúan sobre esos componentes del relieve (Ahnert, 1998). De esta manera se contemplan otras relaciones entre la pendiente, la precipitación y la erosión acelerada de los suelos por la acción hídrica. Esta disciplina propone que los procesos desarrollados en el relieve así como el mismo, forman parte de un sistema que se rige por leyes físicas, donde el intercambio de energía es el motor de los sistemas abiertos y los cerrados (Ahnert, 1998).

2.1.6 Geomorfología regional.

Investiga a las formas del relieve de un lugar en especial, siendo este lugar de las dimensiones de una sierra o una cuenca, un sistema de valles, etc, (op. cit.). Por medio de esta perspectiva de estudio geomorfológico se propone una síntesis de las geoformas, los procesos y los componentes que existen en la región para explicar la dinámica actual, de manera general se dice que las variaciones en la combinación de los factores afectan el desarrollo del relieve (Ahnert, 1998).

2.1.7 Morfografía.

Básicamente se trata de una descripción de las geoformas, considerando tipos de procesos dominantes, actuales o pasados en el relieve. Esta información obtenida mediante la aplicación de técnicas de fotointerpretación y teledetección, interpretación de cartografía topográfica, geológica y de suelos, está destinada a complementar la descripción de las formas del relieve, así como, hacer una descripción más detallada de las características de los materiales que integran al relieve (op. cit.).

2.1.8 Geomorfología funcional.

Se refiere a la descripción de los vínculos, expresados a menudo en términos cuantitativos, entre una o más variables geomorfológicas, trata de la explicación de los componentes de las geoformas, así como, la influencia del entorno inmediato y a nivel regional, sobre el relieve, dentro de un enfoque de sistemas (Ahnert, 1998).

Los datos obtenidos para hacer un análisis empírico, básicamente una descripción de los procesos que ocurren en la superficie del relieve, son recogidos en campo mediante observación simple y colecta de muestras para su análisis en laboratorio. De la descripción de las relaciones entre procesos, materiales y formas es posible desarrollar modelos reconstructivos de escenarios pasados, pero también elaborar pronósticos sobre el posible futuro de las formas del relieve (Ahnert, 1998).

2.1.9 Relaciones causales y funcionales.

Cuando la asociación funcional de todo un conjunto de variables o factores geomorfológicos ha sido localizada y descrita, pueden iniciarse una serie de análisis más complejos, pero básicos para generar información geomorfológica relevante en términos de procesos morfodinámicos con relación al comportamiento de la geoforma como un componente de un sistema o como un sistema en sí mismo. Las relaciones que hay entre varios aspectos dentro de una forma del relieve, hasta los que existen dentro de un sistema más complejo, son fuente de vasta información.

Como se mencionó en párrafos anteriores, lo que ocurre dentro de un sistema de geoformas, en cuanto a dinámica superficial, repercute a nivel regional. Se ha establecido que en función de un proceso, forma o características particulares de litología y de suelo, está la magnitud del efecto o resultado (Ahnert, 1998).

2.2 ALGUNOS CASOS DE RELACIONES FUNCIONALES Y CAUSALES

- Entre propiedades de diferentes geoformas (valles y abanico aluvial, por ejemplo).
- Entre diferentes propiedades de la misma geoforma (pendiente, altura relativa y geometría de ladera).

- Entre propiedades de distintos materiales (composición química de la roca y de la cubierta del suelo).
- Entre diferentes propiedades de un mismo material (granulometría, tipos de sedimentos, op. cit.).

Las relaciones causales simples que tienen efectos en una sola dirección, de causa a efecto, son raros en geomorfología (Ahnert, 1998). Esto es porque generalmente son detectadas relaciones mucho más complejas y no es tan sencillo determinar la causa o efecto de un proceso o conjunto de procesos; ya que se debe contemplar además la dinámica e intensidad de los procesos. Por otra parte, los cambios que ocurren en una o más de las variables del relieve repercuten sobre otros aspectos del mismo (op. cit.).

Determinar la génesis del relieve comprende aspectos temporales tanto geológicos como humanos, sobre todo en términos de la evolución de las geformas y los procesos operantes en alguna escala de tiempo; ya sea humana o geológica. Las modificaciones que ha experimentado el clima en los últimos 20,000 años han dejado huella sobre la superficie de la Tierra, muchos de los rasgos en el relieve surgidos de las variaciones climáticas y de los eventos tectónicos pueden ser identificados e inferida su dinámica mediante la reconstrucción de tales hechos, observando las evidencias presentes; como las terrazas de abrasión marinas, los fiordos, los depósitos lacustres. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que muchas de las observaciones que hechas sobre la dinámica del relieve se restringen a eventos ocurridos en el Cuaternario. En este contexto geológico-temporal puede recurrirse a la geología estructural y a la datación de muestras de roca, para averiguar, de manera general, la geodinámica del área en cuestión (Ahnert, 1998).

Estas consideraciones referentes a las relaciones entre varios aspectos del análisis geomorfológico entre los que se encuentran: el tiempo, los procesos formadores del relieve, los aspectos ambientales y antrópicos, han planteado la necesidad de establecer líneas de investigación concretas, aunque no dejan de ser generales.

2.3 TIEMPO FÍSICO Y TIEMPO HISTÓRICO EN GEOMORFOLOGÍA

El tiempo físico está relacionado con los procesos ocurridos en el relieve, tiene

implicaciones directas con la velocidad de los procesos, así como, éstos con la cantidad de materia removida y depositada en otros sitios; de igual manera la duración de cada evento (Ahnert, 1998). La geodinámica superficial se rige por leyes físicas, por lo que además de las observaciones y descripciones hechas de forma tradicional, deben ser asumidos los hechos o fenómenos a investigar como una serie de actividades que pueden ser medidas, analizadas por leyes y teorías desarrolladas en el campo de la física. Aunque se oponen a esta perspectiva inconvenientes que no pueden ser resueltos, sobre todo los que están sujetos a un factor sumamente importante y condicionante, el tiempo (op. cit.).

En las investigaciones y en la aplicación de la geomorfología, muchas de las especulaciones y explicaciones que sobre el relieve se hacen, a los procesos y a la actividad interna y externa de la Tierra no pueden ser reproducidos en laboratorio, por tal motivo no pueden ser estudiados todos los temas en geomorfología con una estructura metodológica rígida como lo hacen quienes se desempeñan en las ciencias duras; como la física, química, biología o las matemáticas. Estas situaciones impone ciertas restricciones al carácter científico de la misma geomorfología, no obstante, los grandes aportes que en el campo de la geomorfología aplicada se han hecho (Lugo, 1991).

Uno de los campos más desarrollados de la geomorfología ha sido la cartografía, los estudios de riesgos y peligros por procesos de remoción en masa, por actividad volcánica, sísmica, por fenómenos meteorológicos y los estudios relacionados con el ordenamiento territorial. En general, la aplicación del conocimiento ha sido fundamental para un buen posicionamiento de la geomorfología en las ciencias de la Tierra (Verstappen, 1983; Ahnert, 1998).

El tiempo histórico se refiere a eventos y períodos de significado geomorfológico en la historia de la Tierra. Los eventos tectónicos y climáticos que afectaron al relieve y lo transformaron, así como a sus materiales; tanto litológicos como edáficos (Ahnert, 1998).

El tiempo físico es aquel que está presente en procesos y mecanismos locales, mientras que el tiempo histórico define formas del relieve como resultado de la acción

de los agentes externos en un largo plazo, se entiende como una analogía de la escala de tiempo geológico (op. cit.).

2.4 CONCEPTOS DE CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA

La geomorfología ha concentrado una cantidad impresionante de conocimientos y una parte de ellos han sido aplicados para resolver ciertas problemáticas relacionadas con las actividades humanas (Verstappen, 1983). En lo referente a cartografía se ha avanzado en la realización de estudios de peligros y riesgos por efecto de fenómenos meteorológicos, sísmicos y volcánicos; y en donde se tiene un gran campo de desarrollo es en la planeación y ordenamiento territorial, entre otros. En este sentido, muchos de los problemas desencadenados de la influencia de los fenómenos naturales que repercuten de manera negativa sobre la población, son analizados y, en la medida de lo posible, se plantean algunas soluciones o alternativas que aminoren los futuros daños (Ahnert, 1998).

A grandes rasgos, la geomorfología aplicada cuenta con métodos propios de investigación, generalmente se pretende obtener mapas, pero no siempre. Actualmente muchos de los resultados de las investigaciones en esta ciencia de la Tierra, son presentados en tablas y gráficas, aunque nunca está de más presentar un mapa que muestre las dimensiones del fenómeno estudiado.

De manera general, la elaboración los mapas geomorfológicos tiene tres principales etapas:

- La fragmentación del terreno en unidades (análisis del relieve),
- El registro o inventario de los tipos de relieve, procesos, rasgos de interés y condiciones ambientales;
- La propuesta de una acción concreta con base en el análisis realizado.

Dentro de estos campos de acción de la geomorfología se tiene en cuenta la aplicación del conocimiento, en distintos niveles, de acuerdo con la situación que se aborde y de las distintas posibilidades de acercamiento hacia el conocimiento del relieve y las actividades y fenómenos naturales que sobre él ocurren (Verstappen, 1983).

En el ámbito nacional, se ha tenido cierto desarrollo en la aplicación de métodos y

de técnicas para estudiar al relieve, también para analizarlo en su conjunto y con relación a los aspectos ambientales, geotécnicos, ingenieriles y de riesgos a la población, por fenómenos geomorfológicos, concretamente para cartografiarlo, normalmente se han aplicado enfoques desarrollados en otros países, adaptados a las condiciones del relieve mexicano (López Blanco, 1994; Tapia Varela y López Blanco, 2002; Montes Cruz y López Blanco, 2003 y 2004). En México, se han establecido varios conceptos básicos sobre aspectos cartográficos importantes y geomorfología aplicada, por lo que en la elaboración de mapas geomorfológicos así como de su leyenda deben considerarse las recomendaciones que al respecto Lugo (1991) hizo.

Al principio de cualquier trabajo de investigación geomorfológica, donde se tenga contemplado realizar uno o varios mapas geomorfológicos y morfométricos, lo que debe tenerse en cuenta es la magnitud de la información que se manejará, para que en ese sentido se estructure una leyenda que permita realizar una fácil lectura del mapa sin que esto demerite en la calidad de la información del mismo (Lugo, 1991). De igual manera la representación de rasgos, estructuras, formas y procesos geomorfológicos debe contemplar la conformación de jerarquías coherentes que agrupen elementos del relieve con cierta homogeneidad para su representación visual de acuerdo con las dimensiones del área a cartografiar y a la escala del mapa (op. cit.).

Se ha tenido un rápido desarrollo en el campo de la cartografía geomorfológica en los últimos 30 años y, en este mismo contexto, la gran cantidad de métodos y enfoques existentes para el estudio del relieve a partir del análisis cartográfico (op. cit.). Al respecto, los grandes aportes que se han hecho para el análisis del relieve coinciden en el sentido de lograr criterios de coherencia y consistencia en el proceso de cartografiar y analizar al relieve. Es sumamente importante, durante la elaboración de los mapas geomorfológicos, realizar o analizar otros mapas que con su información agilicen o faciliten el entendimiento de los procesos operantes sobre el relieve.

Esta situación ha hecho necesario contemplar un factor importante en la elaboración de todos los mapas que se requieren y se refiere al empleo de un *software* y equipo de cómputo para la realización de mapas que se vinculen entre sí de forma rápida, lo que reduce el tiempo del proceso cartográfico geomorfológico y optimiza así el

de todo el trabajo de investigación, además permite que se logre obtener más información sobre el contexto ambiental que sirva para estructurar bases de datos por tema; es decir sobre la geomorfología y sobre las variables ambientales del paisaje. Claro está, que el proceso se agilizará tanto como lo permita la experiencia y base teórica geomorfológica y cartográfica del operador del programa de cartografía automatizada (López Blanco, 1994; Tapia Varela y López Blanco, 2002; Montes Cruz y López Blanco, 2004).

Actualmente existen numerosos enfoques sobre la aplicación de los métodos cartográficos y de la investigación geomorfológica, considerando la diversificación de los estudios especializados en alguna rama de la geomorfología que han logrado estructurarse como firmes disciplinas de investigación (Lugo, 1991). Debido a esto, la geomorfología ha recibido la atención de muchas ciencias y de sus especialistas, no sólo porque sea una ciencia relativamente joven, sino por las aplicaciones que se han hecho en casi todos los campos de acción de esta ciencia de la Tierra (Verstappen, 1983).

Debido a la naturaleza híbrida de la geomorfología, de tener un innegable carácter geográfico y a la vez fundamentos geológicos, se ha forjado un lugar en las ciencias de la Tierra con investigación y personalidad propia. Ahora se emplean con mayor intensidad las herramientas y las técnicas de la percepción remota en las ciencias como la física, la geología, la geofísica, la geografía y por supuesto en geomorfología, en este contexto de correlación y retroalimentación entre las distintas ciencias, que además no es nuevo pero sí el gran auge y avance que al respecto ocurre desde hace unos treinta años, no puede dejarse de lado la visión integral que requiere esta situación, especialmente en el momento de expresar la personalidad y el carácter geomorfológico del trabajo a realizar (Verstappen, 1983).

En todo trabajo de cartografía geomorfológica es necesario el empleo de aeroimágenes; la fotointerpretación, al igual que el empleo de las imágenes de satélite es esencial para el registro de la información que se necesita saber del relieve (Verstappen, 1983; Verstappen y van Zuidam, 1991).

En la utilización de los pares estereoscópicos, en donde se visualiza el arreglo espacial del relieve, radica gran parte del peso del mapa a concretar. A través de la

estereoscopia y la fotointerpretación (Figura 2.1), se posibilita la determinación del origen del relieve, los procesos actuales que lo están modificando y se infieren los distintos efectos de la actividad endógena y exógena que tuvieron y tienen algún efecto sobre el relieve, tales como; la actividad tectónica, la presencia de pliegues, fallas y fracturas, estas estructuras geológicas ayudan a la reconstrucción de los escenarios del pasado, mismos que brindan información importante para el geomorfólogo, de tal manera que puede definirse con bastante exactitud el origen del relieve y su dinámica superficial (van Zuidam, 1985/1986; Verstappen y van Zuidam, 1991; López Blanco y Palacio Prieto, 1995; Tapia Varela y López Blanco, 2002; Montes Cruz y López Blanco, 2004).

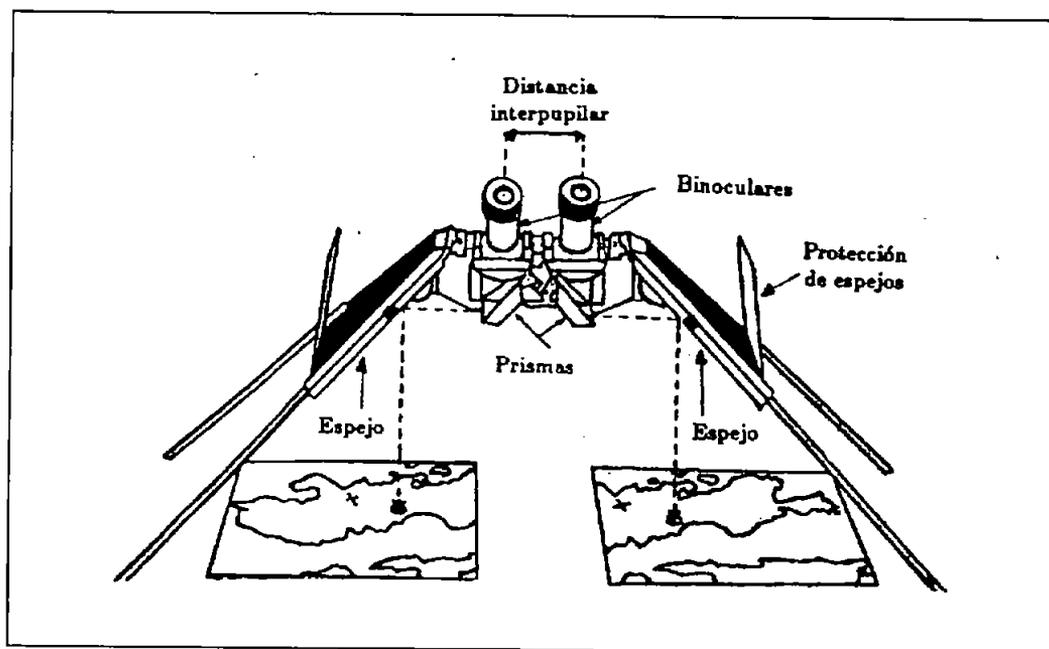


Figura 2.1 Esquema del principio de estereoscopia empleando un estereoscopio de espejos (Luján, 1991).

Las imágenes son fundamentales para el levantamiento geomorfológico y en cualquier tipo de mapa de esta índole, así que en la etapa inicial de este trabajo, se comenzó con la adquisición o recopilación de las imágenes aéreas necesarias, contemplando, en primer lugar, a las fotografías aéreas, imágenes de satélite, imágenes de radar y aquellas obtenidas por medios alternativos.

Las fotografías aéreas estereoscópicas formaron la columna vertebral de la primera etapa de análisis morfogenético del relieve, junto con el primer diagnóstico general formulado para el área de interés. En las fotografías aéreas se pudo observar, mediante el empleo de un estereoscópio de espejos, una perspectiva tridimensional del terreno, de tal manera que fue posible distinguir, entre otros rasgos, el origen y tipo de relieve, así como su configuración geométrica y su posición topográfica. El análisis del terreno, con imágenes aéreas, ya sean fotografías estereoscópicas o imágenes de satélite; aportaron gran parte de la información necesaria para la investigación, su empleo optimizó el tiempo del trabajo. Mediante su uso se resolvieron problemas de acceso al terreno, ya que en algunos casos se trató de montañas poco accesible. Vestappen (1983) y Verstappen y van Zuidam (1985/1986) mencionan la ventaja en este sentido del empleo de las aeroimágenes en los levantamientos geomorfológicos del terreno, en varios casos, por ejemplo, facilitan el estudio del relieve en áreas de conflictos políticos o muy abruptos.

Las observaciones sucesivas del relieve terrestre, con base en pares estereoscópicos, dan al geomorfólogo experiencia y argumentos para un análisis más completo sobre las geoformas; además del contexto ambiental y geodinámico, interno y externo en que se encuentran (Meijerink, 1988; Verstappen y van Zuidam, 1991). Es precisamente en esta etapa del análisis aerovisual y cartográfico del relieve que se complementan las observaciones hechas, con otras, que se llevan a cabo en mapas; básicamente en el topográfico y en el geológico, ya que en esencia el análisis del relieve por observación directa en mapas y fotografías aéreas se basa en la topografía y litología, dos aspectos muy necesarios para la definición del origen y tipo del relieve, ya que éste se compone de forma (topografía) y consistencia (litología) (Lugo, 1991).

Las herramientas para la fotointerpretación geomorfológica, así como las técnicas para este proceso son estándares y sólo se requiere poner énfasis en el objetivo que se desea alcanzar, en este caso mapas geomorfológicos, para tal motivo existen varios enfoques, de acuerdo con la visión de cada grupo de científicos, escuelas o países en donde se hallan creado y desarrollado (Montes Cruz y López Blanco, 2004). Para la cartografía geomorfológica, morfogenética y morfodinámica de esta investigación se

recurrió a los conceptos que para la fotointerpretación geomorfológica propone van Zuidam (1985/1986), el autor hace referencia a los principios de la fotointerpretación general para sacar el mejor provecho de las fotografías aéreas, pensando en obtener buenos resultados en la cartografía geomorfológica, en cualquiera de sus variantes.

El texto de *Aerial Photo-interpretation in Terrain analysis and Geomorphological Mapping* (op. cit.) se desarrolló dentro de la corriente de investigación seguida en Holanda, específicamente en el ITC (*International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences*), se creó este enfoque con la idea de apoyar mediante conceptos y criterios geomorfológicos los estudios y análisis del terreno, con el objetivo de proponer soluciones a problemáticas de distinta índole en donde el geomorfólogo tiene un vasto campo de acción; sobre todo en la planeación del ordenamiento territorial y en la conservación de los recursos naturales. Ante esta situación, el geomorfólogo ha actuado con mejores argumentos, ya sea como especialista o como parte de un grupo de varios científicos que actúen en la resolución de problemas o en la propuesta de alternativas de solución a situaciones que requieren de la puesta en marcha de programas de reordenamiento del territorio, aunque esto no sea la única meta de la geomorfología aplicada.

La adquisición de datos para la presente investigación estuvo ordenada en tres grupos principales, la información bibliográfica, cartográfica y aerovisual. Fue necesario jerarquizarla, de modo que los datos más importantes para la investigación sean los que tengan un tratamiento especial para fortalecer la estructura del trabajo, así se logran definir con precisión los objetivos a corto, mediano y largo plazo dentro del plan establecido de actividades.

En Meijerink (1988), se proponen tanto un método de clasificación del terreno, como un método de adquisición de datos que vinculados entre sí logren dar forma a una base de datos en la que una vez fragmentado el terreno en una serie de unidades cartográficas, se le asignen a cada una sus atributos biofísicos y de infraestructura urbana, en algunos casos.

La información colateral recabada, tanto en campo como por medio de la bibliografía y el análisis cartográfico, es vinculada a la información puramente geomorfológica

obtenida por fotointerpretación, de tal modo, que al final se tendrán unidades de mapeo del terreno con datos que caractericen geomorfológicamente al relieve y, en un segundo plano, la información que ubica y define las características propias del terreno que ha sido cartografiado (Meijerink, 1988). Estos datos están relacionados con aspectos importantes para el geomorfólogo, como son: suelo, litología, estructuras geológicas y procesos dinámicos superficiales. Toda esta información es introducida a un SIG (Sistema de Información Geográfica), con el objetivo de facilitar el manejo de grandes cantidades de información y datos numéricos, que a su vez, constituyan bases de datos destinadas a otros análisis colaterales o complementarios.

Se puede estudiar al relieve con muchos propósitos, con el fin de obtener información que satisfaga interrogantes e inquietudes acerca de los procesos y otros fenómenos que influyen en la actividad biofísica y humana desarrollada en el terreno. Una forma de obtener datos específicos y sistemáticos es mediante los levantamientos geomorfológicos. Verstappen y van Zuidam (1991), proponen una manera sistemática de obtención de datos, tanto del terreno en su constitución física, como también se colectan muestras de suelo para la obtención de datos necesarios en la caracterización del ambiente en que se encuentran localizados los distintos tipos de relieve, así como del estado que guardan. Si bien la información colateral no ocupa una primer jerarquía en los propósitos morfogenéticos, es importante en la descripción del terreno, de esta manera, se deducen algunos aspectos morfodinámicos que se desarrollan dentro de un sistema geomorfológico complejo.

El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos (Verstappen y van Zuidam, 1991) contempla tres tipos de mapas, todos con una razón de ser. Los mapas cumplen con una metodología establecida para la generación de información y los resultados prácticos que se esperan. La expresión del relieve, en el más extenso sentido de la palabra, contempla aspectos puramente físicos por un lado, biológicos, faunísticos y socioeconómicos, sin embargo son los biofísicos y geológicos quienes aportan la información necesaria para los levantamientos. Los aspectos socio-económicos se relacionan, en otro orden, con los objetivos de esta cartografía geomorfológica.

Los tres tipos de mapas, de acuerdo con Verstappen y van Zuidam (1991), son:

A) Los mapas geomorfológicos analíticos, son el resultado de los estudios monodisciplinarios a fondo, sobre las formas del relieve y los procesos que en ellos ocurren, además proporcionan información detallada por unidades de mapeo; son la base cartográfica para estudios futuros, geomorfológicos, ambientales, de ordenamiento territorial, de riesgos, etc. (Tapia Varela y López Blanco, 2002).

B) Los mapas geomorfológicos sintéticos, son el resultado de la síntesis del paisaje y actúan como base para levantamientos multidisciplinarios, además pueden proporcionar información geomorfológica detallada. Contienen básicamente información ambiental de las unidades del terreno.

C) Los mapas geomorfológicos pragmáticos, son aquellos que están elaborados con un fin específico, tal es el caso de un mapa de peligros volcánicos (Díaz, 2001). Se emplean para plantear alternativas de solución a problemas específicos.

Antes de iniciar el levantamiento debe ser reunida la información necesaria para hacer un primer diagnóstico y así proponer estrategias para la realización de la cartografía, asimismo la elaboración de la leyenda tentativa para el mapa o mapas, de esta forma se inicia la investigación con criterios concretos para alcanzar las metas propuestas a corto y mediano plazo.

Los mapas son un importante medio de expresión de síntesis y organización de los datos e información; en geomorfología se destaca la importancia del mapa topográfico y geológico; pero además debería recalcarse la importancia de la consulta de otros mapas con el fin de robustecer el primer diagnóstico que del terreno se haga (Lugo, 1991). La percepción remota, así como las técnicas de análisis y manejo de imágenes digitales obtenidas por sensores remotos montados en plataformas como, barcos, aviones y satélites, principalmente, están acompañando a la geomorfología desde hace 30 años aproximadamente (Lira, 1995; Lillesand y Kiefer, 2000).

La información bibliográfica forma parte del primer cuerpo de conocimientos que deben ser reunidos, posteriormente se selecciona clasificándola conforme a los objetivos centrales para que complementen a la información cartográfica y aerovisual.

El tipo y la cantidad de la información que se manejó desde el inicio del trabajo cartográfico requirió de un medio de almacenamiento y, en este sentido, en el ITC se

diseñó el programa ILWIS, que se creó con el objetivo de agilizar el proceso de elaboración de la cartografía automatizada. Además de sus capacidades cartográficas, se puede utilizar para el almacenamiento de la información colectada en campo de manera sistemática o la que se ha obtenido por investigación documental, lo que conlleva a la creación de bancos de datos que pueden vincularse con otros dentro de ILWIS, para análisis complementarios (Verstappen y van Zuidam, 1991; Meijerink, 1988). Con esta herramienta cartográfica en la investigación se logran varios aciertos en la geomorfología aplicada, se alcanza un objetivo central en la geomorfología actual, la posible integración de datos ambientales a la información concreta del relieve, de su génesis y los procesos operantes.

2.5 REVISIÓN DE ENFOQUES SOBRE MORFODINÁMICA EROSIVA HÍDRICA SUPERFICIAL

Existe amplia variedad de métodos disponibles para su aplicación en estudios sobre erosión hídrica, algunos son planteamientos generales y universales que con el paso del tiempo han tenido modificaciones para su empleo en áreas específicas. Es cierto que es una ventaja contar con varios métodos para la evaluación y cuantificación de los fenómenos asociados a la erosión hídrica de suelos. Zachar (1982), menciona que en algunos casos la deficiencia de los resultados se debe a la utilización de métodos que descartan la influencia de variables que son significativas.

No obstante las dificultades que se presentan cuando debe decidirse o establecerse una metodología a seguir para el estudio de los fenómenos erosivos hídricos acelerados es necesario el análisis de los distintos tipos y mecanismos, así como su intensidad, frecuencia y distribución en un espacio y tiempo determinado. En este sentido y a nivel nacional, si se logra trabajar de manera sistemática sobre uno o varios procesos y efectos erosivos se logrará conformar una base de datos que contenga información referente al estado que guarda el país en cuestiones sobre erosión acelerada en general.

En la presente investigación se utilizaron procedimientos que son empleados en distintos métodos, buscando conformar uno que se adaptara a las condiciones

particulares del área de estudio, pero sobre todo partiendo de la aplicación de un método cartográfico geomorfológico analítico (Verstappen y van Zuidam, 1991).

En este tema el objetivo principal fué obtener un mapa de unidades morfodinámicas, así que con estas bases se procedió a la delimitación de dichas unidades, además se consideraron otros métodos y enfoques de investigación de la erosión hídrica, asimismo se atendieron los temas referentes a procesos gravitacionales y de disolución.

La acción indirecta del hombre muchas veces involucra destrucción de la vegetación natural, las áreas cultivadas, en algunos casos, funcionan como pequeñas áreas protegidas de la erosión, también las áreas reforestadas o protegidas ante la tala indiscriminada (Zachar, 1982). Aunque dentro de estas áreas aparentemente protegidas puede estarse llevando a cabo una dinámica erosiva acelerada, sólo que en distinta intensidad, un aspecto que debe ser considerado en estos temas de estudio es la influencia indirecta del hombre sobre los ecosistemas (Renschler y Harbor, 2002; Vanacker et al., 2003).

2.6 DEFINICIÓN DE EROSIÓN

La erosión acelerada ha merecido la atención de varias disciplinas científicas. En geomorfología se ha analizado conforme a su dinámica expresada en la superficie terrestre (Montes Cruz y López Blanco, 2003 y 2004).

2.6.1 La erosión del suelo es la remoción del material superficial por acción del viento o del agua (Kirkby y Morgan, 1984).

2.6.2 Conjunto de procesos por medio de los cuales se produce la separación de los productos del intemperismo del sustrato original (Lugo, 1989).

2.6.3 El grupo de procesos mediante los cuales son removidos los derrubios o disueltos y removidos desde alguna parte de la superficie de la Tierra. Incluye intemperismo, disolución, corrosión y transportación (Goudie, 1994).

2.6.4 El término erosión acelerada de suelos es el proceso mediante el cual es transportado el suelo o derrubios: por agua, viento o procesos de remoción en masa, la depositación de los materiales está ligada a alguno de estos procesos, así como las formas resultantes (Hernández Corzo, 1985; Morgan, 1994).

2.7 TIPOS DE FLUJO HÍDRICO

2.7.1 Flujo superficial.

El flujo superficial ocurre en las laderas durante una lluvia, principalmente porque la carga de agua excede la capacidad de infiltración del suelo, éste se satura y el agua excedente comienza a fluir ladera abajo sobre la superficie, de manera difusa. Morgan (1994) menciona que rara vez se da el flujo a manera de una lámina uniforme, se comporta más bien como una masa de agua que fluye anastomósica en amplios cauces sin efectuar incisión significativa o percibible. Sin embargo, debe señalarse que la dinámica superficial del agua causa efectos de incisión vertical y llega a ocasionar la aparición y desarrollo de microcauces, cauces y barrancos. Cuando esta dinámica hídrica se combina con la acción gravitacional y la concentración del flujo, pueden desarrollarse las cárcavas, en donde la componente gravitacional adquiere importancia significativa, además de la pendiente y el tipo de suelo (Imeson, 1980).

2.7.2 Flujo subsuperficial.

Ocurre debajo de la superficie del suelo, se le conoce como flujo hipodérmico. El agua fluye ladera abajo por microtúneles aprovechando la textura del suelo, constituye una de las razones por las que el flujo hídrico aumenta su potencial erosivo; ya que transporta partículas de suelo dejando un espacio en el suelo más grande del que había antes del escurrimiento hipodérmico (Zachar, 1982; Morgan, 1994).

2.7.3 Flujo laminar.

La efectividad del flujo superficial laminar como un agente erosivo depende de su extensión y de su distribución sobre una ladera. Las características hidráulicas del flujo varían en distancias muy cortas debido a la irregularidad de la superficie donde se

desplaza; entre los elementos con que se encuentra el agua a su paso y que le confieren cierta rugosidad a la superficie están, principalmente, la cubierta vegetal, rocas de distintos tamaños u ondulaciones en el terreno. Los objetos que están en la superficie de una ladera como son los *manchones* de vegetación, rocas y, en general, la microtopografía, rompen el patrón de desplazamiento de un típico flujo laminar, en este sentido, el agua fluye en grandes masas anastomosadas pero sin incidir o crear surcos (*rill erosion*, Morgan, 1994).

2.7.4 Flujo Concentrado.

Los surcos o *rills*, son resultado de la acumulación del agua en cauces que varían en anchura y profundidad, sin embargo, conservan una forma típica alargada, y constituyen una etapa distinta de erosión hídrica que inicia cuando el flujo laminar termina. En etapas posteriores de desarrollo de los *rills*, se pueden generar cauces más profundos e incluso barrancos, si los materiales que son erosionados lo permiten como ocurre en el sur del área de estudio, por ejemplo (Figura 2.2).

En un perfil ideal o transecto geomorfológico pueden distinguirse varias porciones de una ladera hipotética, lo que ayuda a entender los procesos ocurridos desde el inicio de la precipitación y hasta que el suelo alcanza el nivel de saturación y comienza a fluir el agua superficialmente y subsuperficialmente ladera abajo, es decir que el entendimiento de la geometría de laderas permite una mejor comprensión de los fenómenos erosivos (Hernández Corzo, 1985; Morgan, 1994) (Figura 2.3).

2.7.5 Rasgos característicos de la erosión hídrica

En la mayoría de las investigaciones sobre erosión acelerada de suelo, y sobre todo hídrica, la utilización de imágenes aéreas estereoscópicas, monoscópicas, oblicuas, imágenes de satélite, etc., proveen de información respecto a la dimensión de los efectos de los procesos erosivos sobre la superficie terrestre (Bocco, 1989). Es mediante la fotointerpretación que se detectan rasgos característicos de algún proceso erosivo, los cambios de tono en las fotografías aéreas indican la extensión e intensidad de tal dinámica (Bocco, 1989; Montes Cruz y López Blanco, 2004) (Figura 2.4).

2.8 PROBLEMAS Y MÉTODOS EN LA INVESTIGACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA

La investigación en este campo de las ciencias de la Tierra es compleja y se dificulta por varias razones, pero particularmente porque la erosión acelerada es un conjunto de procesos continuos, sumamente dinámicos, en que se involucran varios mecanismos. De tal manera, que la elección de un método depende principalmente del propósito de la investigación y de las características particulares del sitio, área o región a estudiar.

En términos espaciales la escala desempeña un papel fundamental en los alcances de un estudio y método por aplicar, el cual puede ser concebido en varios sentidos de acuerdo con la materia y área de interés. En la temporada de estiaje ocurren varios fenómenos que preparan tanto al suelo como a los materiales que serán erosionados durante la temporada de lluvias (Morgan, 1994).

El intemperismo tiene un papel importante en la alteración de las rocas y sus minerales, lo que destruye a la roca ya que aporta la materia que será removida por acción del agua, en este caso como agente erosivo (Maass y García Oliva, 1990; Morgan, 1994; de Pedraza, 1996).



Figura 2.2 Detalle de una fotografía aérea a escala 1: 75, 000 que muestra el desarrollo de sistemas de drenaje arborescente, la actividad principal en ellos es de incisión vertical y en los interfluvios y superficie cumbrial se presenta erosión por escorrentía laminar. (L= erosión por flujo hídrico laminar, C = erosión por flujo hídrico concentrado).

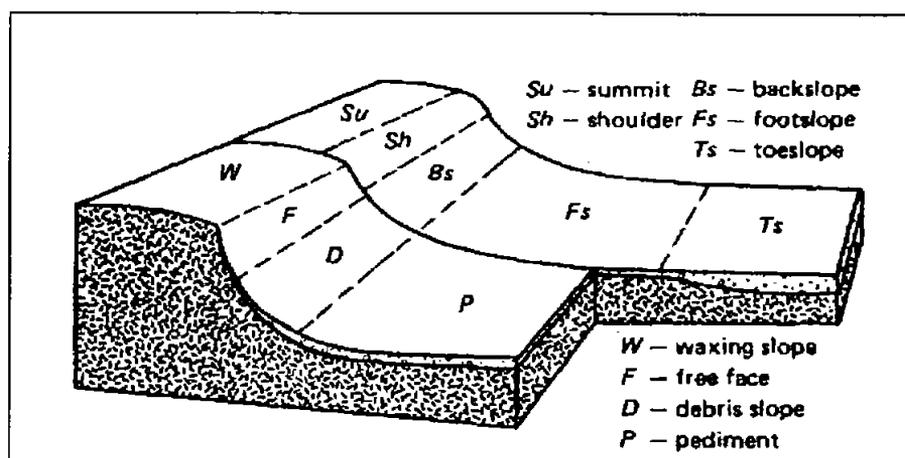


Figura 2.3 Principales elementos de una ladera; en el fondo la interpretación de Ruhe (1960), Su = superficie cumbral; Sh = hombro; Bs = dorso de ladera; Fs = pie de ladera; Ts = extremo inferior de ladera. En primer plano la de Wood (1942) y L.C. King (1957), W = superficie de lavado; F = cara libre; D = talud detrítico; P = pedimento (Tomado de Ruhe, 1975).

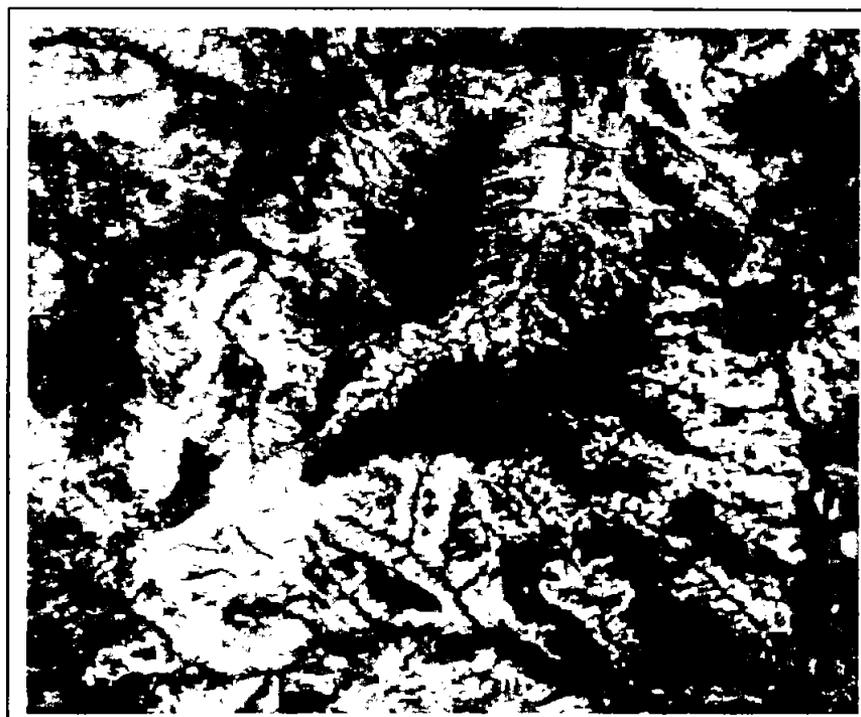


Figura 2.4 Fragmento del compuesto 4, 3, 1 de la imagen de satélite Landsat ETM+ de 1999, los rasgos de erosión están en tonos blancos, corresponde a la misma área de la figura 2.2.

Es en este sentido que Zachar (1982), establece que la erosión acelerada del suelo es un proceso extremadamente difícil de observar en sí mismo y en muchos casos sólo las consecuencias y las evidencias de la erosión son investigadas. Es necesario contar

con buenas observaciones del fenómeno, que como ya se ha mencionado generalmente se parte de las evidencias del mismo, de las formas que ha dejado sobre el relieve, del cambio de ellas, de los depósitos formados para así comenzar con una interpretación acerca de cómo era el estado original de la superficie y de los materiales erosionados (Morgan, 1994). En otras palabras puede decirse que en general los estudios que sobre la erosión acelerada de suelos y sedimentos o detritos conllevan a una reconstrucción de acciones ocurridas, a veces en largos periodos de tiempo y otros ocurridos de manera súbita.

En algunos casos los procesos erosivos acelerados pueden ser evaluados a partir de los depósitos formados, aunque no sólo estas evidencias deben ser analizadas. En una investigación geomorfológica sobre procesos erosivos deben considerarse las evidencias geomorfodinámicas en superficie que son prueba de la magnitud de los distintos mecanismos en que ha actuado la erosión acelerada de suelos. Los barrancos y cárcavas, así como sus dimensiones espaciales, su distribución sobre un superficie determinada y actividad en un periodo de tiempo definido son elementos útiles en la reconstrucción de la actividad erosiva acelerada, en la que necesariamente deben investigarse las paleocondiciones ambientales y si es posible de su influencia sobre los suelos.

Es relativamente fácil identificar cambios estacionales o momentáneos, especialmente los que ocurren al inicio y durante la temporada de lluvias (Zachar, 1982; Perles Roselló, 2003). Lo anterior es posible si se tiene un registro visual sistemático, así como la evaluación volumétrica de los cambios ocurridos, siempre y cuando el proceso, el suelo y el tiempo lo permitan. El reconocimiento de cambios a largo plazo o anuales se dificulta particularmente porque en un lapso de tiempo las magnitudes de las dinámicas cambian en intensidad o dan paso al funcionamiento del flujo hídrico en una forma distinta de como se observó en un principio (Morgan, 1994). Esta situación ocurre con frecuencia durante eventos de precipitación, el agua comienza una etapa de infiltración, posteriormente de acuerdo con las características de los suelos, de su posición topográfica y la pendiente, el agua comienza a fluir superficialmente en manto y subsuperficialmente ladera abajo por medio de microtuneles (op. cit.).

Durante el avance del flujo hídrico, ladera abajo, la presencia de bloques o de irregularidades sensibles en la topografía conllevan al flujo a concentrarse y comenzar a formar surcos que inciden sobre el suelo, posteriormente se combinan procesos de caída de materiales en las paredes de estos surcos o pequeños cauces que pueden tener desde unos tres o cinco cm de profundidad y desarrollarse hasta varios metros (Hall, 1983; Gerrard, 1992; Morgan, 1994).

La aplicación de una metodología adecuada en la que se contemplen evaluaciones periódicas, así como mediciones y registros sistemáticos, auxiliados del uso de técnicas alternativas de teledetección, de fotointerpretación de aeroimágenes tomadas en distintas fechas dentro de un ambiente de SIG mejora notablemente el estudio realizado (López Blanco y Palacio Prieto, 1995). De esta manera, la investigación aporta datos precisos sobre los cambios ocurridos en una superficie dada dentro del área de interés. Aunque se sabe que los fenómenos naturales rara vez ocurren de manera individual se habla de un proceso simple, para designar un proceso dominante, no obstante la ocurrencia de otros fenómenos pero con bajo impacto o expresión a la escala de las fotografías interpretadas, 1:75,000, asimismo el término complejo alude a los procesos que se desarrollan y tienen dimensiones espaciales similares.

2.9 CONSIDERACIONES AL IMPACTO GENERADO POR LA EROSIÓN HÍDRICA

Quizá si se observan cambios significativos en el paisaje correspondan al resultado de la concatenación de varios procesos y distintas dinámicas, donde también intervienen un gran número de variables en distintos intervalos de tiempo, con distinta intensidad y frecuencia (Morgan, 1994; López Blanco y Palacio Prieto, 1995). Los cambios ocurridos en áreas erosionadas también están sujetos a las condiciones ambientales locales, al tipo de suelo y de sus características físicas y químicas, rangos de pendiente, condiciones características de la cubierta vegetal, tipos la precipitación (intensidad, distribución espacial y frecuencia), además de la influencia antrópica; directa e indirecta.

La intensidad de la erosión es expresada por la magnitud de los depósitos o materiales removidos de la superficie terrestre; por la atenuación de la cubierta de suelo, tamaño y densidad areal de las formas derivadas de la erosión en cierto periodo

de tiempo.

Los efectos cualitativos de la erosión, se refieren a los cambios en las propiedades de los suelos removidos por flujos hídricos, especialmente con respecto a su fertilidad; en este sentido, debe considerarse una evaluación del evento erosivo antes y después sobre el depósito generado y en el área de remoción. Los efectos cualitativos y cuantitativos constituyen en conjunto la erosionabilidad del suelo (Zachar, 1982).

Los factores que influyen en las tasas de erosión acelerada son: la precipitación, el escurrimiento, el viento, el suelo, la pendiente, la cubierta vegetal o la ausencia de medidas de conservación (Morgan, 1994).

Se ha considerado a la erosión acelerada del suelo como un problema asociado a las tierras de cultivo, a su extensión y distribución y en general a la presión antrópica ejercida sobre varias superficies de terreno para satisfacer los requerimientos alimenticios humanos. El crecimiento descontrolado de la población afecta, de manera directa e indirecta, la condición natural del suelo. Al requerir mayor cantidad de tierras para cultivo se desencadenan varios efectos degradativos del ambiente natural en donde se consideran también las afectaciones de carácter socioeconómico (Maass y García Oliva, 1990; McAuliffe et al., 2001; Rincón, 1999; Montes Cruz y López Blanco, 2004).

Algunos eventos causan cambios temporales sobre el comportamiento de la erosión. Sobre la frecuencia se ha detectado que pocos eventos de gran magnitud pueden arrojar resultados significativos, asimismo sus efectos lo son, con respecto a la mayor frecuencia de otros eventos de lluvia considerados comunes. Las tormentas que exceden la cantidad media y que son hasta cierto punto extraordinarias son las que ocasionan pérdidas importantes de suelo (Morgan, 1994). En este sentido debe considerarse como una variable necesaria a la variación temporal de las lluvias. Hudson (1981; citado en Morgan, 1994) menciona que en su investigación en Zimbabwe, 50% de la pérdida anual de suelo ocurrió en dos tormentas y que en un año 75% de la erosión tomó lugar en tan sólo 10 minutos.

Los eventos más extremos de pérdida de suelo se vuelven sumamente importantes donde la erosión no está en función directa del clima, en estos lugares y en tales

condiciones indudablemente depende de la frecuencia y de qué tan potencialmente erosivo sea el evento para observar efectos severos de erosión (Morgan, 1994).

En la erosión acelerada de suelos interviene el intemperismo en sus distintas manifestaciones que se encarga de la separación de partículas de una masa rocosa, posteriormente el fenómeno erosivo en sí comienza con el transporte de las partículas intemperizadas, o en su defecto del suelo bien desarrollado, con varios horizontes bien definidos. El transporte del suelo y de los materiales no consolidados ocurre con la intervención de agentes erosivos como el agua, el viento y la gravedad. Con respecto a la acumulación de materiales, ésta se vincula directamente con la capacidad de carga de los agentes que transportan en suspensión al suelo o a los materiales litológicos fragmentarios, una vez que esa carga excede la capacidad de transporte del agua o viento comienza la depositación de los materiales dando lugar a otro proceso transformador del relieve (Morgan, 1994; Montes Cruz y López Blanco, 2004). Se trata del intercambio de energía entre los factores y los materiales, que intervienen (Hernández Corzo, 1985; Morgan, 1994; de Pedraza, 1996).

2.10 REVISIÓN DE MÉTODOS Y ENFOQUES APLICADOS AL ESTUDIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA ACELERADA DE SUELOS

Los rasgos morfodinámicos son de suma importancia en esta investigación, por lo que se procede a la revisión de algunos métodos y enfoques destinados a levantamientos geomorfológicos que contengan información sobre procesos exógenos, en este caso, por erosión acelerada de suelos.

2.10.1 Métodos topográficos detallados.

Son utilizados a escalas muy grandes, ya que se trabaja a detalle, por lo que cubre áreas de algunos metros, básicamente está enfocado a detectar cambios a nivel de microrrelieve (Zachar, 1982).

2.10.2 Métodos volumétricos.

Mediciones de volumen efectuadas en *rills* (surcos o microcauces). Se logra

mediante el empleo de un método simple para la determinación de procesos erosivos por flujo superficial en surcos en el que se necesita usar una cinta métrica. El volumen de los surcos es medido tomando sectores de 20 a 100 m de longitud, también se mide la anchura del surco, así como su profundidad. El promedio de suelo perdido por erosión de este tipo es calculado mediante perfiles transversales; en estos casos puede inferirse el volumen del material erosionado con relación a una cierta área. Presenta la desventaja de que los resultados están subestimados de un 10 a un 30% (Zachar, 1982).

La medición del volumen en cárcavas se puede realizar mediante perfiles transversales y longitudinales. Se complementa con mediciones futuras, de esta manera es posible obtener una serie de ideas sobre el curso y desarrollo de la erosión en cárcavas (Bocco et al., 1990).

2.10.3 Métodos pedológicos.

Estos métodos involucran aspectos cualitativos y cuantitativos del suelo. Por un lado, la determinación de las propiedades específicas del suelo relacionadas con la susceptibilidad o resistencia del mismo a ser erosionado; en otro sentido, se consideran las mediciones de los cambios cuantitativos causados por los procesos y mecanismos de la erosión, en este caso hídrica. Si se conoce el estado inicial del suelo, particularmente la profundidad del perfil y/o de varios de los horizontes y si posteriormente son comparados con el perfil erosionado, puede establecerse la magnitud del suelo perdido (Zachar, 1982; Buol et al., 1981; Buckman y Brady, 1983).

2.10.4 Métodos comparativos.

Involucran comparaciones del suelo *in situ* en términos de la cubierta y del grosor del suelo, contenido de partículas, color, nivel de erosión, etc. Por comparación de los diferentes suelos erosionados, los efectos del relieve, vegetación, tipología de cultivos, tipo de sustrato geológico, etc. Mediante el análisis de estas variables se hace necesario el establecimiento de la inclinación crítica de la ladera; es decir, la pendiente en la cual la erosión hídrica extrema (pérdida completa del suelo o de gran parte del mismo)

comienza en bosques, pastizales, campos y caminos, se logra mediante el mapeo de áreas con distintos tipos de inclinación del terreno. Los métodos comparativos se obtienen con cierta rapidez y son útiles para el trabajo de campo, la más grande desventaja es que no permiten la determinación directa de la erosión (Zachar, 1982).

Mizerov (1952, citado en Zachar, 1982) usó el método comparativo exitosamente para estudiar la erosión del suelo en la antigua URSS, observó que los métodos comparativos se restringen a la determinación de pérdidas drásticas que usualmente son evaluadas de manera visual, con poco o nulo sustento en mediciones sistemáticas o análisis de laboratorio.

2.10.5 Métodos monolíticos.

La aplicación de experimentos sobre una porción de suelo manejado en laboratorio suele llevar consigo una serie de inconvenientes propios de la observación de varios fenómenos en laboratorio. Un monolito conserva intactas varias de sus condiciones originales, sin embargo, al simularse un evento de precipitación lo que no puede recrearse de manera adecuada es la cubierta vegetal, que en condiciones naturales provee de una capa protectora al impacto de las gotas de lluvia (Zachar, 1982; Morgan, 1994; Perles Roselló, 2003). Sin demeritar su empleo, la obtención de datos confiables es posible simulando condiciones de inclinación de una ladera, intensidad de la precipitación, tamaño de gotas aunque la cubierta vegetal y uso de suelo son complicados de representar. La desventaja de este método surge por el empleo necesario de microscopios que permitan visualizar la estructura del suelo y métodos fotogramétricos que permitan observar la desagregación de la estructura del suelo por el impacto de las gotas de lluvia (Zachar, 1982).

2.10.6 Métodos con base en las características de la vegetación.

La intensidad de la erosión o de la acumulación de materiales puede investigarse a partir de un método que evalúe la relación entre la vegetación y el suelo (*vegetation methods*. Zachar, 1982). En algunos casos, la vegetación ha sido utilizada para monitorear cambios tanto estacionales como a largo plazo, particularmente son de

interés las relaciones entre la erosión y el crecimiento de la vegetación, además de cómo influye la perturbación inducida por actividades antrópicas (op. cit.).

2.10.7 Métodos morfométricos.

Los métodos geomorfométricos involucran las investigaciones del fenómeno de erosión mediante factores morfométricos significativos como: la pendiente, longitud y orientación de la ladera, morfografía convexa, cóncava y recta, así como las posibles combinaciones de la geometría de laderas, profundidad del nivel base, forma, longitud, actividad y densidad de la erosión en cárcavas, principalmente. Por medio de estos métodos, la naturaleza del relieve como un factor sumamente importante que gobierna la actividad de los factores exógenos de erosión, puede ser estudiado (Zachar, 1982). La utilización de los mapas morfométricos a escala mediana y grande (1:50,000 y mayores) brindan información útil para el análisis del comportamiento y posible desarrollo de los tipos de erosión (Bocco et al., 1990).

2.10.8 Métodos fotogramétricos.

El estudio de fenómenos erosivos hídricos a partir de fotografías aéreas, convencionales y alternativas, tienen consigo considerables ventajas. Las fotografías aéreas pueden ser utilizadas durante el tiempo que dure la investigación. Pueden aplicarse algunas técnicas fotogramétricas y obtener así algunas mediciones que aporten ideas generales sobre las condiciones en que se desarrollan los distintos procesos erosivos sobre algún tipo específico del relieve. Algo muy importante sobre el empleo de aeroimágenes, en particular de fotografías aéreas, es que pueden detectarse cambios significativos en la dinámica, forma, extensión y distribución, así como la intensidad y frecuencia de los procesos erosivos presentes, esto facilita la planeación del trabajo de campo, ya que se pueden establecer puntos de control, en los que se verifique y monitoreen áreas de interés (Zachar, 1982; Bocco, 1989; Palacio Prieto y López Blanco, 1994).

2.10.9 Cartografía de la erosión.

La distribución de los factores de erosión y sus condiciones, la distribución de la erodabilidad y tierras erosionadas, la distribución de la erosión en cárcavas, el uso de ciertas medidas de conservación del suelo pueden ser representadas. Un mapa que muestra áreas erosionadas o con distintos grados de erosión puede ser cruzado con uno de pendientes y obtener así un mapa y/o una base de datos donde cada unidad del terreno con distintos niveles de erosión tenga a su vez información sobre los intervalos de pendiente en que se están desarrollando tales tipos de erosión hídrica (Renschler y Harbor, 2002; Montes Cruz y López Blanco, 2004).

CAPÍTULO 3 CONTEXTO GEOGRÁFICO FÍSICO

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Para estructurar la información de la geología y actividad tectónica del área de estudio es necesario considerar que la información es mayoritariamente regional, como el mapa geológico Oaxaca E14-9 a escala 1:250,000 (INEGI, 1994), una escala que no permite hacer evaluaciones muy precisas, sin embargo, la consulta del trabajo de Mitre (1973) a escala 1:40,000 y Ferrusquía (1970) en donde se sitúan puntualmente la mayoría de las unidades litológicas localizadas en el área de interés resuelve gran parte de los inconvenientes de tener información aislada o muy generalizada. Mitre (1973) cartografió nueve unidades litológicas y resuelve, en gran medida, la carencia de información geológica detallada. Ferrusquía (1970), aportó elementos significativos sobre gran parte de la Mixteca Alta, en la descripción de algunos afloramientos ubicados en el recorrido de la excursión a Oaxaca (Ferrusquía et al., 1970).

En Martiny et al. (2000), se describen algunas características generales de la geología, estratigrafía y tectónica, del oeste de Oaxaca y reafirman algunos datos, que ya habían sido revisados para esta investigación geomorfológica.

Oaxaca, junto con Sonora y Chiapas, son los estados donde se han levantado las columnas litoestratigráficas más completas del país (Maldonado, 1970, en Ferrusquía et al., 1970). La Mixteca Alta contiene columnas geológicas desde el Pre-Cámbrico hasta el Reciente. Es una región compleja, sistemáticamente poco estudiada lo que complica, cierta medida el análisis de las estructuras geológicas aún para los geólogos. Sin embargo mediante interpretaciones del relieve pueden deducirse algunos rasgos tectónicos y geológicos (op. cit.).

La vegetación y clima del área de estudio han sido factores geográficos importantes para que culturas tan interesantes como la de los pueblos mixteco y chocho, se hayan asentado en esta porción del Estado de Oaxaca. Aproximadamente hace mil doscientos años se tuvo el máximo esplendor de dichas culturas (Rincón, 1999; McAuliffe et al., 2001). No fue fácil para estas dos poblaciones predominantes convivir y compartir un ambiente tan diverso como lo era entonces la Mixteca Alta. Eran pueblos de importancia

natural, política, social y religiosa, en donde se hacían tratos con culturas del centro del país, de la costa del Golfo y del Pacífico, así como con otros pueblos del sur de México (Rincón, 1999). La población antes de la llegada de los españoles alcanzó niveles altos para aquellos tiempos, lo que hizo necesario ocupar más intensamente las áreas de cultivo de maíz y abrir otras entre los bosques de encino, principalmente, estas prácticas de cultivo se realizaban en terrazas que eran construidas a semejanza de las curvas de nivel de un mapa topográfico (Rincón, 1999; McAuliffe et al., 2001). Cuando las terrazas ya habían agotado las posibilidades de sostener algún tipo de cultivo, otras eran construidas sobre terreno nuevo, dejando atrás extensas áreas desprotegidas ante los efectos de la evapotranspiración y de los agentes erosivos, principalmente hídricos. Esto trajo como consecuencia una acelerada alteración del entorno natural (Rincón, 1999).

Sin duda, las condiciones sociales y la situación geográfica de la Mixteca Alta no fueron propicias para que la recuperación natural del entorno se diera (Rincón, 1999, 2001). Posterior a la llegada de los españoles y ya propiamente en la época colonial la situación de aislamiento geográfico y, por lo tanto, social se acentuó hasta nuestros días y no ha sido posible, por un lado atender el gran rezago social de las comunidades y, por el otro, implantar medidas de conservación o atenuación de la degradación ambiental que padece esta región del sur de México.

Oaxaca tiene un especial interés de parte de varias disciplinas científicas como la biología, ecología, biogeografía, geografía física y humana, antropología, arqueología, por ejemplo. No solo es uno de los Estados con mayor diversidad biológica, es un mosaico complejo desde el punto de vista étnico, florístico y geológico (Ferrusquía et al., 1970; Rincón, 1999). En cuanto a la evolución geodinámica que ha experimentado esta región del sur del país ha habido al respecto varias interpretaciones de tipo regional y también en este tema se manifiesta una gran inquietud por saber más a detalle la composición litológica del Estado y sus alrededores. Aunque falta información a escala detallada sobre litología y otros temas, se recabó la información suficiente para contar con una caracterización básica del área de estudio, así como, del contexto en que se localiza.

3.1 RESEÑA TECTONO-ESTRATIGRÁFICA REGIONAL

En términos tectono-estratigráficos los límites entre terrenos son las principales discontinuidades en la estratigrafía. Un terreno se define como una serie de formaciones de rocas relacionadas entre sí, o un área que tiene preponderancia de un tipo de roca o de un grupo de rocas. Esto implica que son conjuntos tectónicos que tienen un basamento semejante y una evolución geológica similar (American Heritage, 2004). Campa y Coney (1983), mencionan que estas discontinuidades se marcan como límites abruptos o tenues en edad y litología, lo que no siempre es fácil de identificar debido al cambio de facies. El basamento de los terrenos de México ha sido agrupado dentro de áreas que dividen al país en tres principales zonas tectono-estratigráficas (Campa y Coney, 1983). La zona I es la noroeste y está integrada por parte del cratón que forma a Norteamérica y al terreno Caborca en el Estado de Sonora. La zona II se localiza al este del país y se conforma de los siguientes terrenos: Coahuila, Maya y Sierra Madre, finalmente la zona III se compone de los terrenos: Juárez, Mixteco, Oaxaca, Xolapa, Guerrero, Alisitos, Vizcaino y otros terrenos de menor dimensión. El área de estudio se localiza dentro de la provincia morfotectónica de la Sierra Madre del Sur (Figura 3.1), dentro de esta se encuentra emplazado el terreno Mixteco que es el basamento tectonoestratigráfico de la Mixteca Alta (Sedlock et al., 1993) (Figura 3.2).

El terreno Mixteco consiste de la composición de dos unidades tectono-estratigráficas independientes, yuxtapuestas tectónicamente, una de ellas es un basamento metamórfico, y la otra es un cuerpo ultramáfico (Campa y Coney, 1983). Las rocas metamórficas son paleozoicas, subyacen a sedimentos terrígenos pennsilvánicos y rocas jurásicas. Otras secuencias sobreyacen a estas rocas, como los depósitos arcillo-calcáreos del Neocomiano y calcáreos del Aptiano-Cenomaniano, sobre estas estructuras yace una secuencia flysch del Cretácico Superior (Campa y Coney, 1983; Alaníz Álvarez et al., 2004).

La tectónica del Cenozoico dispuso un marco de estructuras contrastantes que sugieren cambios en las condiciones dinámicas en espacio y tiempo. Los principales rasgos tectónicos del cenozoico indican diferentes escenarios con respecto al centro y al norte del país, dominado, este último, por fallas normales con orientación NNW-SSE

para el Oligoceno-Mioceno. La falla de Oaxaca es un sistema que delimita al valle homónimo en sentido NNW. Esta falla, al igual que otras del sur de México, ha sido reactivada en varias ocasiones (Uribe Luna, 1999).

En la porción continental del oeste de Oaxaca, las rocas volcánicas del Cenozoico se ven controladas por un conjunto de fallas en dirección NNW-SSE, que limitan con una serie de bloques hundidos que intercalan con secuencias volcánicas y lacustres (Uribe Luna, 1999).

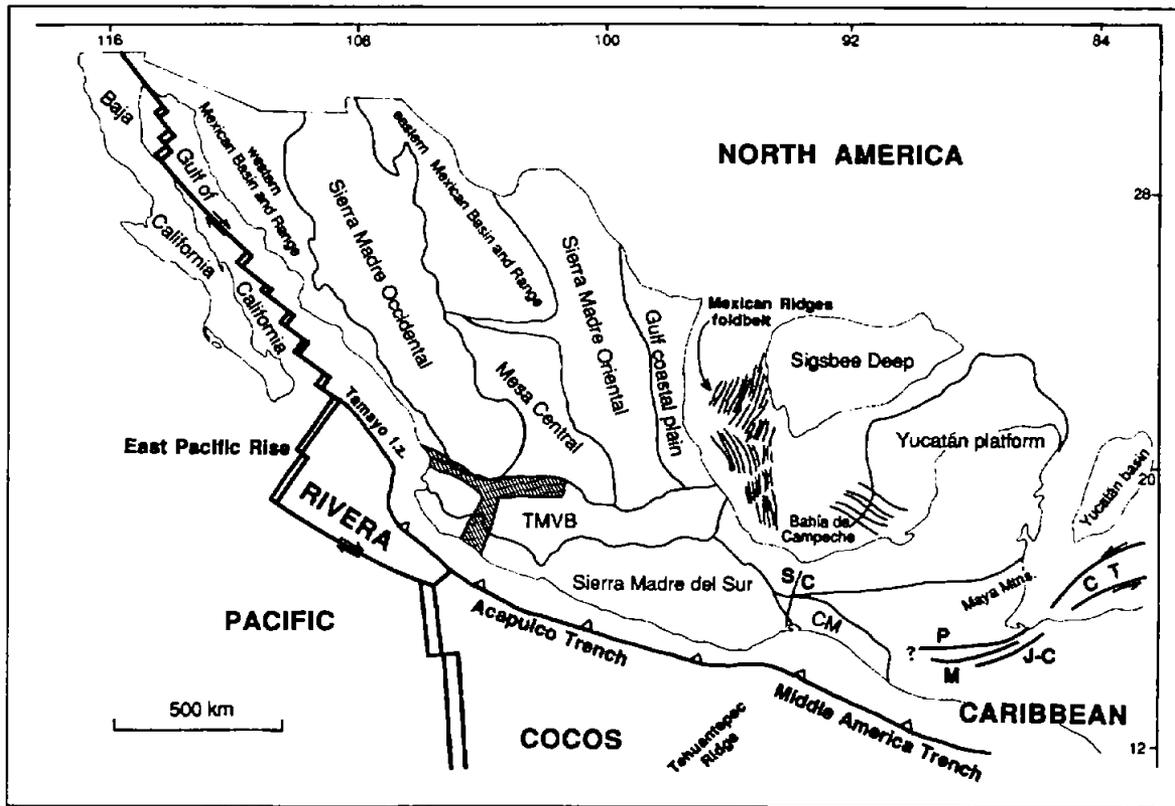


Figura 3.1 Principales rasgos morfoestructurales y su relación con las placas tectónicas que comparte México y zonas vecinas. El límite de las placas y los rasgos de las mismas se resaltan con línea gruesa, con línea normal se delimitan las provincias morfoestructurales. El nombre de las placas está en mayúsculas, en mayúsculas y minúsculas el nombre de las provincias. El área sombreada delimita el punto triple de Zacoalco al oeste, Colima al sur y el graben de Chapala al este. CM, Macizo de Chiapas; J-C, falla de Jocotan-Chamalecon; C-T, ruptura Caimán; MF, falla de Motagua; P, falla de Polochic; SC, falla de Salina Cruz; TMVB, Cinturón Volcánico Transversal (Tomado de Sedlock et al., 1993).

Dentro de esta área, las secuencias volcánicas se extienden por aproximadamente 4,000 km², las características estratigráficas de esta porción de la Mixteca Alta agrupan lavas de composición intermedia y una secuencia compuesta por intercalaciones de

brechas y tobas (Martiny et al.,2000) (Figura 3.3).

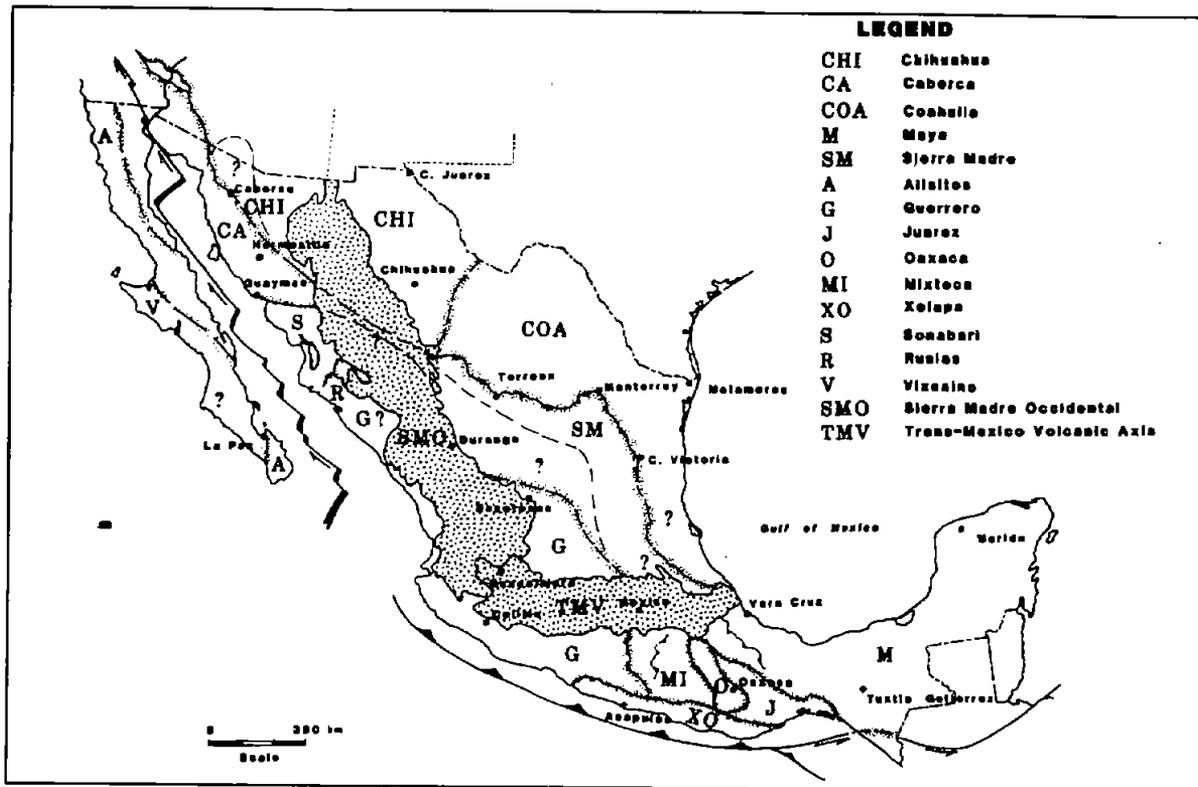


Figura 3.2 Terrenos tectonostratigráficos de México. Los límites del basamento de los terrenos se muestran con línea gruesa, los terrenos sobreyacentes se indican con la letra V (Tomado de Campa y Coney, 1983).

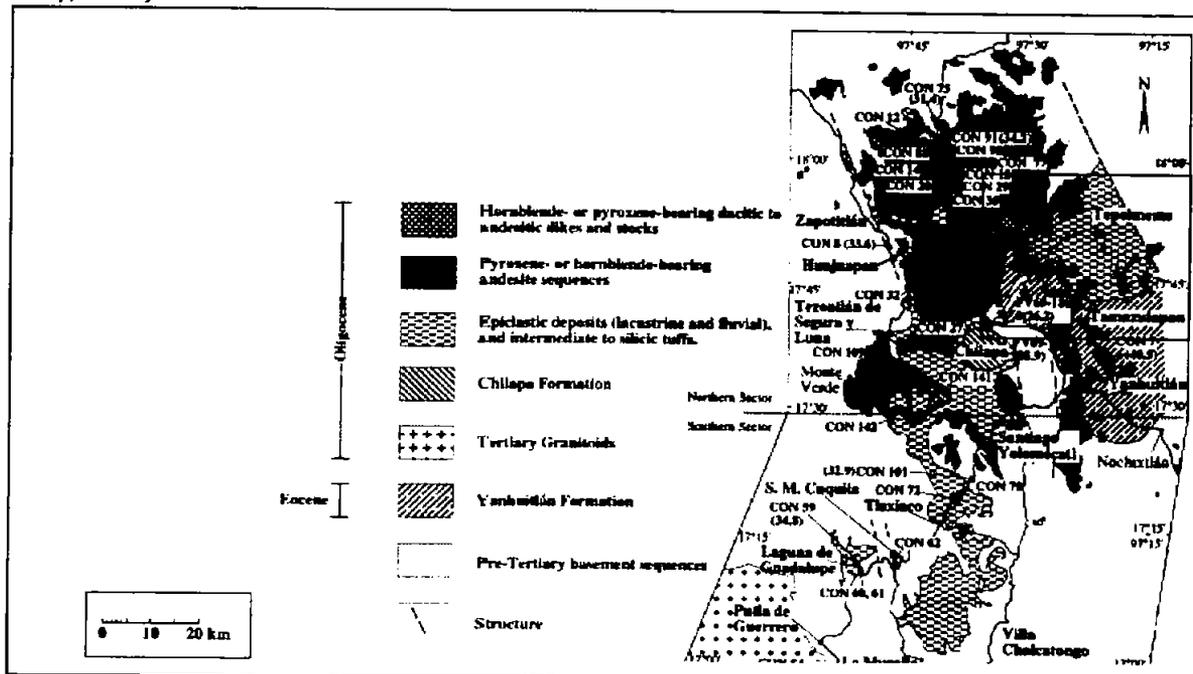


Figura 3.3 Distribución de las principales rocas volcánicas en el norte de Oaxaca, dentro del recuadro se encuentra el área de estudio (Tomado de Martiny et al., 2000).

Las secuencias volcánicas en esta porción de Oaxaca, son del Oligoceno y yacen sobre conglomerados del Paleogeno o directamente sobre las secuencias marinas y continentales del Mesozoico, e incluso sobre rocas metamórficas paleozoicas del Complejo Acatlán (op. cit.) (Figura 3.4).

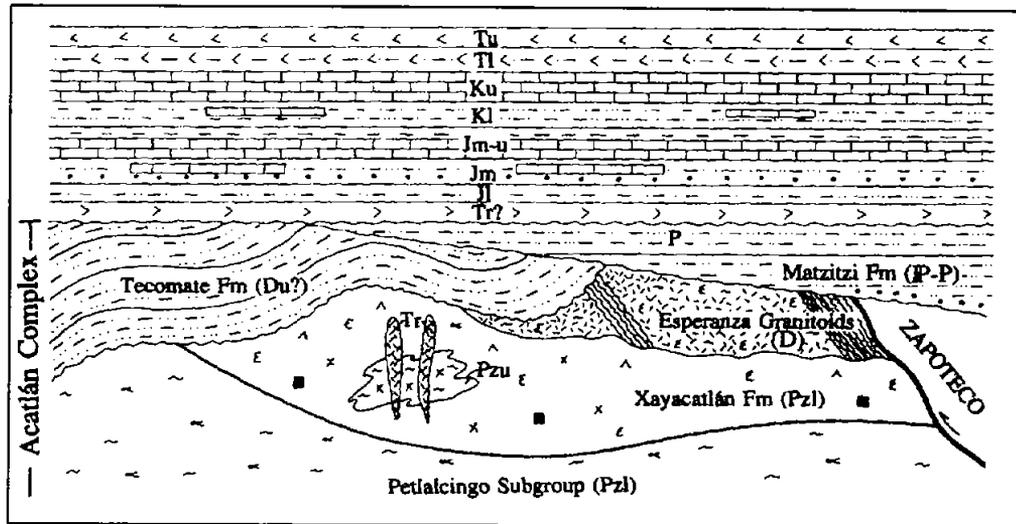


Figura 3.4 Sección esquemática tectonostratigráfica del Terreno Mixteco (Tomado de Sedlock et al., 1993).

De acuerdo con Martiny et al., (2000) se ha identificado una intrusión andesítica hipabisal, emplazada en lodolitas rojas, areniscas y capas de toba de la Formación Yanhuitlán, estas últimas con una edad absoluta obtenida por medio del método potasio-argón de 40.5 ± 1.7 Ma, siendo la edad más antigua reportada para las rocas volcánicas de esta área (op. cit.). Se supone que esta edad de la Formación Yanhuitlán corresponde con las primeras manifestaciones de la actividad magmática en la región (op. cit.).

Se han dividido en dos grandes grupos las rocas volcánicas del Oligoceno. Una unidad inferior consiste de tobas (depósitos piroclásticos de silícicos a intermedios y cenizas) y otra superior que está compuesta por depósitos epiclásticos, aparentemente depositados en ambientes lacustres (Martiny et al., 2000).

Ferrusquía (1970) reconoció varias intrusiones de cuerpos hipabisales de hornblenda, diques y *stocks* de composición intermedia en diferentes niveles de las secuencias del Cenozoico, ampliamente distribuidas en el oeste de Oaxaca y en el sur de

Puebla. Asimismo, Ferrusquía y McDowell (1991, citados en Martiny et al., 2000) reportan una edad mediante el método potasio-argón, de 28.9 ± 0.6 Ma, para las lavas de la Andesita Yucudaac y 26.2 ± 0.5 Ma, para la Toba Llano de Lobos, una secuencia volcanoclástica compuesta de depósitos piroclásticos, ignimbritas soldadas y depósitos epiclásticos (Martiny et al., 2000).

El relieve actual es el resultado de la interacción de varios factores que influyen de manera decisiva en su configuración: la litología, la estructura geológica, la actividad tectónica y las condiciones climáticas (Lugo, 1990; Arellano, 2001). Este principio es aplicado en la geomorfología general y para el caso del área de estudio, es indispensable llevarlo a cabo como parte de la metodología del presente estudio.

La actividad tectónica ha dejado evidencia en el relieve cartografiado; la presencia de fallas, fracturas y pliegues son rasgos estructurales que así lo manifiestan. El curso del río Xiquila, que drena hacia el N del área de estudio expresa un lineamiento de grandes dimensiones, puesto que las paredes de su valle tienen pendientes mayores a 40° y a lo largo de cinco kilómetros, aproximadamente, tiene una profundidad promedio de mil metros; hacia el sur del área en la cabecera del río Tepelmeme, confluyen tres estructuras, esto fue determinado por las trayectorias que siguen los ejes de las sierras. Para llegar a esta determinación se hizo un análisis, no sólo con la carta topográfica, sino con otros documentos mediante interpretación visual, como la imagen de satélite, fotografías aéreas y la bibliografía consultada se puede establecer lo anterior.

La historia tectónica de Oaxaca ha sido ampliamente descrita en estudios que tratan de la conformación de esta parte del país. A pesar de que han sido varios los trabajos realizados sobre el tema, es realmente poco lo que se sabe a nivel detallado, probablemente por la complejidad de su conformación y evolución geológica (Centeno García y Keppie, 1999; Morán Zenteno et al., 1999; Martiny et al., 2000). Mitre (1973) describe que en el área de Tepelmeme hay varias discordancias que son difíciles de ubicar estratigráficamente, ya sea porque presentan metamorfismo, porque son de difícil fechamiento con métodos radioactivos o por la ausencia de fósiles en algunas unidades litológicas, como en los conglomerados, lo cual pone de manifiesto que regionalmente ha habido distintos episodios de actividad tectónica que no se han

identificado claramente en el área.

3.2 ESTRATIGRAFÍA

En el área de estudio está expuesta una secuencia Mesozoica constituida por rocas cretácicas marinas que fueron plegadas y fracturadas, posiblemente en eventos tectónicos posteriores a su primer plegamiento, los ejes de los anticlinales tienen orientación N-S, se sitúan al NE del área de estudio. El Cenozoico está representado por varias unidades como: el Conglomerado Tepelmeme, nombrado así por Mitre (1973) que tiene relación litológica y estratigráfica con el Conglomerado Tamazulapan, sobreyaciendo a esta unidad están varias secuencias volcánicas como la Toba Llano de Lobos, Formación Yanhuitlán, Andesita Yucudaac y el intrusivo Suchixtlahuaca, formado este último por diques emplazados en fallas normales y laterales (Ferrusquía, 1970; Mitre, 1973; Uribe Luna, 1999) (Figura 3.5 y 3.6).

3.2.1 Mesozoico.

3.2.1.1 Caliza Teposcolula.

Salas (1949, citado en Ferrusquía, 1970) nombra Caliza Teposcolula, a una secuencia calcárea plegada que aflora en las cercanías de los poblados de San Pedro y San Juan Teposcolula, al sur del área de estudio, esta formación se caracteriza por tener capas masivamente estratificadas, con un espesor de aproximadamente 400 m, en donde el contacto inferior no aflora y el contacto superior es plenamente identificable por su exposición en el extremo NE del área de estudio (Mitre, 1973; Uribe luna, 1999). Inicialmente Salas (op. cit.) le asignó una edad jurásica, posteriormente por asociación faunística Ferrusquía la ubica entre el período Albiano-Cenomaniano, Cretácico Inferior-Tardío y Cretácico Superior-Medio, es decir entre 113 a 88.5 Ma, aproximadamente. Campa y Coney (1983) mencionan para las rocas mesozoicas de esta porción de Oaxaca una edad Aptiano-Cenomaniano (INEGI, 1984; Mitre, 1973). Ferrusquía (1970), establece dos facies de depósito para esta unidad, una cercana a la costa (plataforma interna) y otra *off-shore* o plataforma externa. Por su origen en plataforma externa (*off-shore*) tiene una textura *mudstone-wackestone* (Dunham, 1962). De acuerdo con las

facies de depósito ya mencionadas, puede inferirse que el ambiente de depósito cercano a la costa está influenciado por aporte de terrígenos con contenido de silicatos como el cuarzo, evidencia encontrada en algunas muestras por Ferrusquía (1970) y (Mitre, 1973).

Eon	Epoca	Edad	Unidad Litoestratigráfica	Características litológicas	Espesor m
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	***** *****	Aluvión	0-10 m
		Pleistoceno	?		
	Terciario	Neogeno	X X	Andesita Yucudaac: flujos lávicos de textura afanítica	0-300 m
		Paleogeno	+	Toba Llano de Lobos: tobas ácidas y depósitos epiclásticos.	0-200 m
				Formación Yanhuítlan: arcillas, limolitas y tobas estratificadas poco consolidadas.	0-150 m
Mesozoico	Cretácico	Aptiano-Cenomaniano		Conglomerado Tepelmeme: cantos sub-redondeados-angulosos	0-50 m
			Formación Teposcolula: caliza bio-micrita masivamente estratificada.	0-400 m	

Figura 3.5 Columna estratigráfica generalizada del área de estudio (Tomada de Mitre, 1973).

El color de la roca fresca es beige y al intemperizar adquiere un tono gris claro. En Mitre (1973), se menciona que para las rocas sedimentarias (calizas), de esta unidad corresponden a las biomicritas, principalmente; debido a la importante presencia de fósiles en la roca (Mitre, 1973; Uribe Luna, 1999).

La morfología que presenta esta unidad en el área de estudio está íntimamente ligada a su litología (control litológico), al clima y a la presencia de estructuras geológicas (fallas, fracturamientos y asentamientos) que afectan esta porción de la

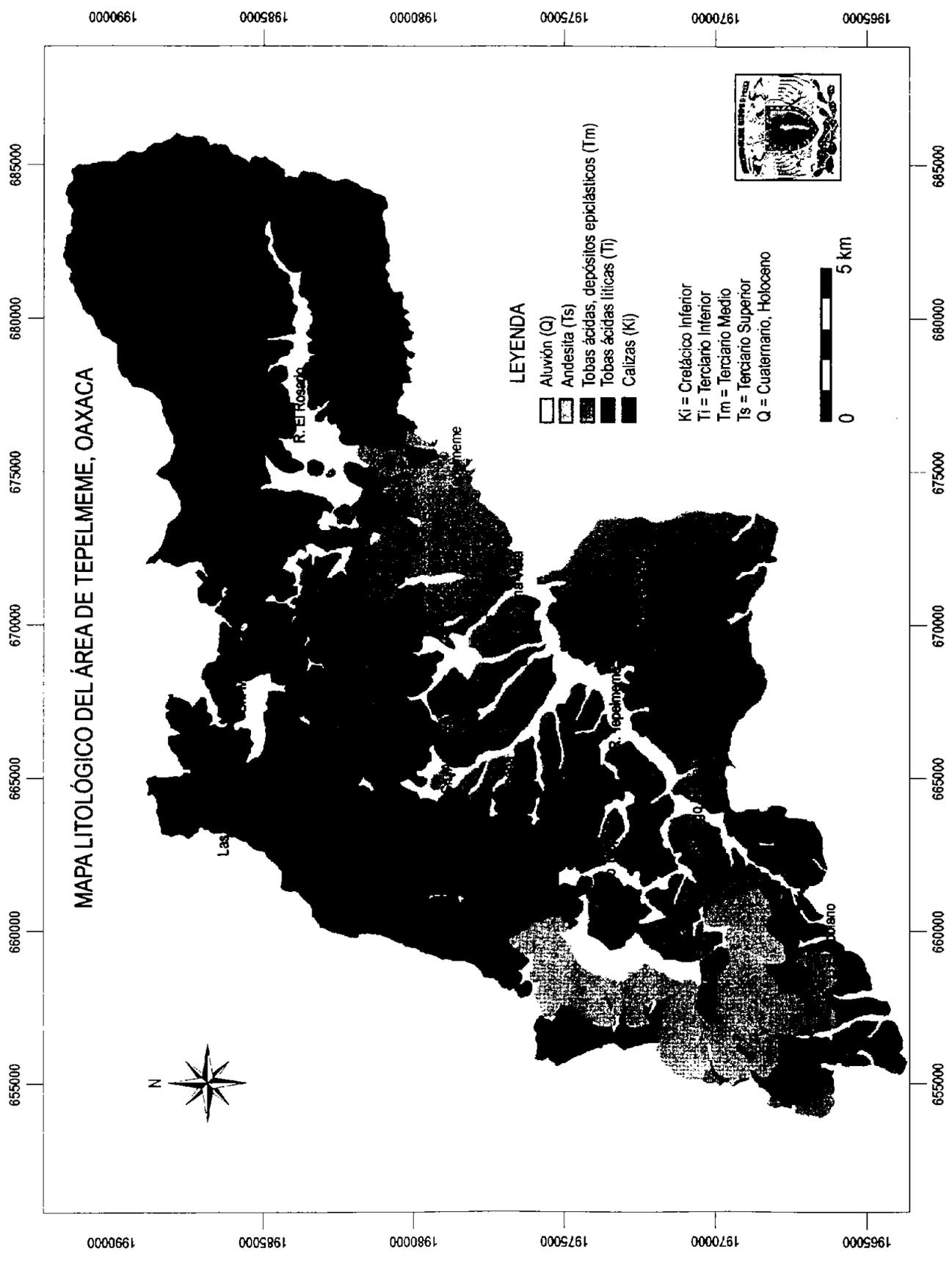


Figura 3.6 Mapa Litológico del área de estudio con base en Mitre (1973).

unidad cretácica, por su prominencia forman una alineación de sierras con altura relativa de entre 400 y 700 m. Estas rocas están formando a los sistemas de laderas de montaña altas y medias, donde la altitud alcanza los 2,960 msnmm (Figura 3.7). Estratigráficamente se encuentran en discordancia angular y erosional, en la parte superior, con el conglomerado Tepelmeme y con la toba Llano de Lobos subyace en discordancia angular.

3.2.2 Cenozoico.

3.2.2.1 Conglomerado Tepelmeme.

Se encuentra constituido por clastos de caliza con litología muy similar a la Formación Teposcolula, petrográficamente es un conglomerado inmaduro, de fragmentos angulosos a subredondeados empotrados en una matriz de calcita y lodo calcáreo. La granulometría de los clastos varía entre 5 y 20 cm, se encuentran mal clasificados y generalmente la matriz es de color rojizo y textura arenosa. Para esta unidad, Mitre (1973) dedujo que la fuente de aporte de este conglomerado es la Caliza Teposcolula.

Es probable que por su asociación con las rocas calizas y las características de este depósito conglomerático, se originara por corrientes torrenciales lo que en parte explica la angulosidad de los bloques y su mala clasificación; por su espesor la fuente de estos materiales debió tener alturas superiores a los 2,900 msnmm, para generar estos depósitos masivos. La disposición de este cuerpo es horizontal, lo que se concluyó a partir de la observación de algunos afloramientos, aunque no hay completa seguridad de sea así en toda la unidad, Ferrusquía (1970) le asigna una edad pos-Formación Teposcolula.

3.2.2.2 Formación Yanhuitlán.

Hizasumi (1932, citado en Ferrusquía et. al., 1970) empleó por primera vez este nombre para designar a una secuencia de depósitos cenozoicos de varias litologías, pero predominantemente depósitos piroclásticos y areniscas. Salas (1949, citado en Ferrusquía, 1970) restringió este término a la unidad que se localiza en los alrededores

del poblado de Yanhuitlán.

Esta formación se encuentra distribuida en la porción meridional del área de estudio. En los poblados de Magdalena Jicotlán y en algunas partes del camino entre este pueblo y el de Santiago Teotongo afloran estos depósitos formando *badlands*. Litológicamente se ha descrito como un cuerpo de varios componentes; desde arcillas débilmente consolidadas de color rosa a rojiza, interestratificadas con areniscas a cenizas volcánicas consolidadas. La fuente de estas arcillas y limolitas se deduce de rocas metamórficas, principalmente por la presencia de cuarzo y granate (Ferrusquía et. al., 1970). Los estratos tobáceos son resultado de la actividad volcánica explosiva cenozoica y los lechos rojos, que son parte de esta formación, son resultado de aportes terrígenos. Esta unidad está presente en las cercanías de Huajuapán de León (Uribe Luna, 1999), de tal manera que por su extensión se logran ver afloramientos en varios poblados localizados dentro del área de estudio como: Trinidad Vista Hermosa y Magdalena Jicotlán. Los depósitos piroclásticos de esta formación se estratificaron en ambientes lacustres, los estratos de esta unidad son generalmente horizontales, aunque en ocasiones, se observan inclinaciones de alrededor de 6 o 7° hacia el oeste (Figura 3.8). Su contacto con otras formaciones y unidades es complicada en algunos sitios por su carácter transicional con la Toba Llano de Lobos. Esta última tiene relación litológica con la formación Huajuapán, en este sentido se le considera de edad Paleoceno Tardío-Eoceno Medio, entre 60 y 43 Ma (Ferrusquía, 1970; Mitre, 1973; Martiny et al., 2000; Uribe Luna, 1999).

3.2.2.3 Toba Llano de Lobos.

La litología de esta unidad es heterogénea y se compone principalmente de tobas, areniscas tobáceas, depósitos piroclásticos, depósitos epiclásticos, limolitas e ignimbritas de color predominantemente rosa, aunque se les encuentra en tonalidades grises y verde pálido, sobreyacen concordantemente a la formación Yanhuitlán. Son de composición riolítica por lo que su origen se debe a volcanismo explosivo, tienen una composición mineralógica similar a las ignimbritas pero con menor consolidación (Ferrusquía et. al., 1970).



Figura 3.7 En primer plano aparecen lomeríos bajos conformados por- la Toba Llano de Lobos, en segundo plano se ven las laderas de montaña alta de la formación Teposcolula.



Figura 3.8 Cerro El Poblano cerca de El Progreso, su litología es de la Formación Yanhuatlán, se localiza al sur del área de estudio.

Se ha determinado para esta unidad una edad que corresponde al Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (30 a 23 Ma) (Mitre, 1973). Su composición va de andesítica a riodacítica, con textura vítrea predominante. Sobreyace concordantemente y transicionalmente a la formación Yanhuitlán. Por el contrario, subyace discordantemente a la andesita Yucudaac. Al interior de esta unidad se localiza un cuerpo litológicamente distinto denominado Miembro Tierra Blanca, se trata de una secuencia lacustre calcárea parcialmente silicificada (Ferrusquía, 1970; Mitre, 1973). Tienen una coloración crema y ocre, al intemperizar se tornan a gris claro, con estratificación de delgada a masiva. Se encuentra interestratificada con tobas poco consolidadas y areniscas tobáceas.

Las areniscas tobáceas son principalmente volcarenitas (Mitre, 1973), dentro de estos materiales se pueden localizar fragmentos de caliza subangulares. Se ha considerado que el ambiente formativo de este depósito fue un volcanismo explosivo dentro y fuera de las márgenes de la cuenca lacustre, lo que interviene decisivamente en la conformación de depósitos epiclásticos. El relieve expresado por estas rocas es de mesas y lomeríos con pendientes suaves (op. cit.). Esta unidad se encuentra afectada por un cuerpo intrusivo, el intrusivo Suchixtlahuaca. Algunos afloramientos de esta unidad, se localizan en la porción centro-norte del área de estudio.

3.2.2.4 Andesita Yucudaac.

Ferrusquía (1970) describe las características de esta unidad a la que le otorga el nombre del cerro Yucudaac y que consta de flujos lávicos andesíticos de color gris oscuro a negro. Se caracteriza por formar alineamientos de montañas abruptas o montañas aisladas. Sobreyace discordantemente al complejo piroepiclástico Toba Llano de Lobos y a la Formación Yanhuitlán, el espesor aproximado de esta unidad es de 500 m. Esta secuencia lávica es cortada por diques de textura porfídica, estos últimos de color verde oscuro a gris oscuro, presenta intemperismo esferoidal en algunos sitios como en el cerro El Poblano (Figura 3.9) (Ferrusquía, 1970; Mitre, 1973). Por su posición estratigráfica protege en algunos sectores a los depósitos subyacentes, menos resistentes y por lo mismo más susceptibles al los fracturamientos y a la erosión geológica.

Dentro de esta unidad existen varias litologías, encontrándose algunos cuerpos basálticos de menor dimensión pero presentes en el área de estudio. Su litología es uniforme y petrográficamente corresponde a una traquiandesita o a un basalto rico en plagioclasa (Mitre, 1973; Streckheisen, 1979).

No hay certeza para asignarle una edad a esta unidad, no obstante Mitre (op. cit.), reporta una edad cercana a la de la Toba Llano de Lobos y al igual que Uribe Luna (1999), se le asignó una edad pos- Mioceno Temprano. Estas rocas coronan algunos de los lomeríos altos y montañas que se localizan en la porción centro-poniente del área de estudio.

3.2.2.5 Intrusivo Suchixtlahuaca.

Estas rocas presentan una textura holocristalina y porfirítica, por contener fenocristales de plagioclasa. Presenta pequeñas cantidades de vidrio, lo que indica su carácter hipabisal. Estratigráficamente está en contacto con la formación Yanhuitlán, la Toba Llano de Lobos, La Andesita Yucudaac y los depósitos cuaternarios, porque corta a todas estas unidades. Cerca del poblado San Antonio Abad está en contacto con la Andesita Yucudaac, al NE del poblado de Concepción Buena Vista se encuentra un cuerpo intrusivo con múltiples fracturas rellenas de sílice y en el área de estudio es común la presencia de diques, algunos de hasta dieciséis metros de ancho por tres kilómetros de longitud (Figura 3.10). Se estima que esta unidad fue emplazada pos-Andesita Yucudaac, infiriéndose una edad dentro del Neógeno, entre el Villafranquiano y el Piacenziano, 3.4 Ma (Ferrusquía, 1970; Mitre, 1973; Uribe Luna, 1999; UNESCO, 2002).

3.2.2.6 Depósitos recientes.

Están constituidos por varios cuerpos generalmente asociados a las litologías antes descritas (Ferrusquía, 1970, Mitre, 1973; Uribe Luna, 1999; INEGI, 1994). Dentro de estos materiales básicamente se encuentran los depósitos que forman la mayoría de las planicies aluviales, algunos depósitos de talud y también forman algunos depósitos coluviales de piedemontes locales.



Figura 3.9 Intemperismo esferoidal en un afloramiento de la Andesita Yucudaac, en el cerro El Poblano, sur del área de estudio.

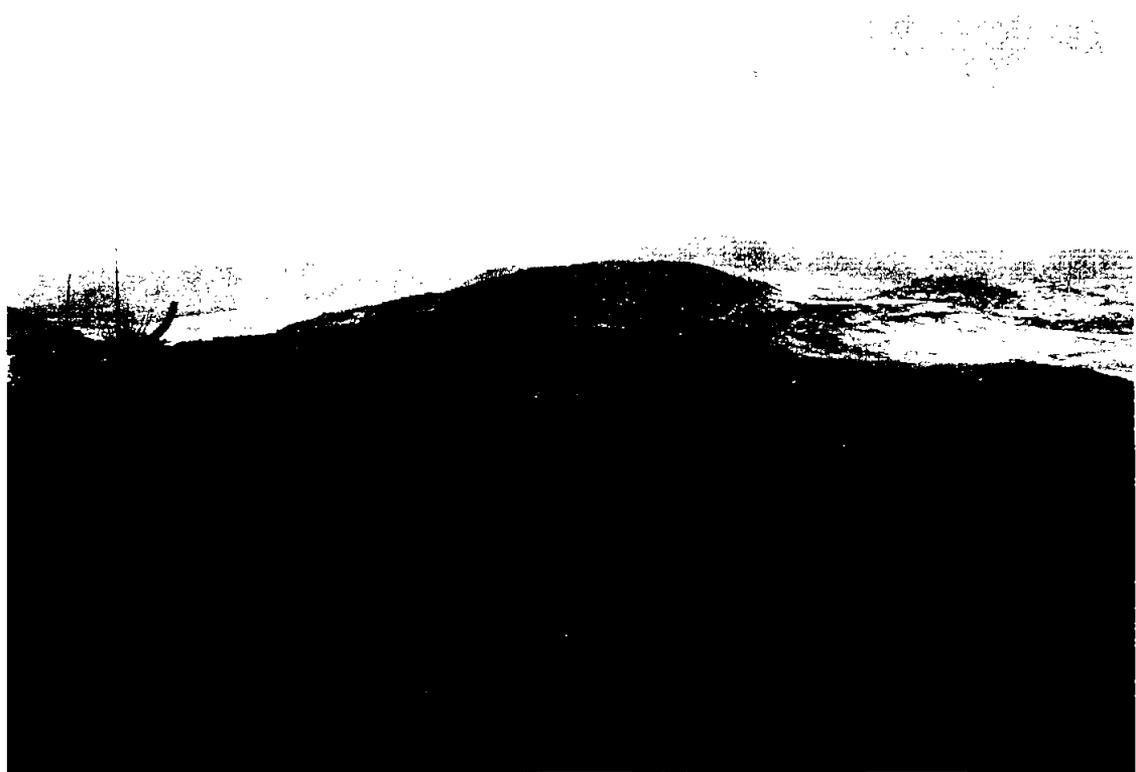


Figura 3.10 Dique perteneciente al intrusivo Suchixtlahuaca, el cual rompe la formación Toba Llano de Lobos, cerca del poblado de Concepción Buena Vista.

Se constituyen distintos depósitos formados principalmente por gravas, arenas gruesas a finas. Dos principales depósitos caracterizan a estos materiales, son los de tipo fluvial y los de tipo coluvial, acumulación por acción hídrica-gravitacional, de esta manera es que las formas del relieve resultantes se vinculan directamente a la granulometría de los materiales y al proceso de depositación, por lo que forman algunas planicies que son poco inclinadas y disecadas por los cauces actuales, que son intermitentes. De igual manera los depósitos de talud y piedemontes locales son afectados por la concentración del escurrimiento del flujo hídrico en cauces (Figura 3.11).



Figura 3.11 Planicie aluvial formada por depósitos holocénicos, en el poblado de Las Palmas, localizada al noroeste del área de estudio.

3.3 SUELOS

Oaxaca presenta dos condiciones antagónicas referentes a la cartografía temática y a los estudios básicos sobre sus recursos naturales, por un lado, es uno de los estados que mayor biodiversidad posee, sin embargo, no existen estudios a nivel estatal o semidetallado sobre edafología. No se ha hecho la clasificación de suelos por parte de

instituciones responsables a nivel nacional, por ejemplo. Esta situación acarrea ciertas complicaciones cuando se inicia una investigación en donde se requiera de este tipo de datos, de tal manera que en la presente se hizo una inspección visual y una descripción general de las condiciones de los distintos tipos de suelos, considerando los análisis que hicieron en el área de estudio los autores Cruz Cisneros y Rzedowski (1980).

En el área de estudio, se observaron las características generales que forman el mosaico edafológico de esta parte de la Mixteca Alta. Desde un punto de vista pedológico, la litología, el clima, el tipo de relieve y las actividades antrópicas están propiciando la presencia principalmente de suelos poco desarrollados, pedregosos (regosoles) y someros (litosoles) que se distribuyen de manera dispersa en lugares en donde la estabilidad del relieve, así como, la presencia de vegetación arbustiva o bosque los proteja de ser erosionados por procesos erosivos hídricos; tanto en forma de flujo laminar, flujo concentrado o en cárcavas.

Algunas porciones del relieve poseen remanentes de suelo y en la mayor parte del área de estudio son resultado de la acumulación de materiales litológicos acarreados y depositados por el agua o por la acción gravitacional (Figura 3.12). En las terrazas prehispánicas de cultivo se desarrolla en la actualidad la actividad erosiva y acumulativa acelerada, misma que proporciona algunas pistas acerca de cómo funcionaron los procesos erosivos en estas terrazas después de ser abandonadas, algunas de las cuales siguen siendo utilizadas no obstante su baja producción (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Rincón, 1999).

Cruz Cisneros y Rzedowski (1980) observaron las condiciones de los suelos de gran parte del área de estudio, colectaron muestras de suelo y las analizaron para obtener sus características físicas (color, estructura y textura) y químicas (pH, % de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico) y así contar con datos de primera mano de los tipos de suelo y su relación con las comunidades vegetales que estudiaron.

Durante el trabajo de campo de la presente investigación, se observó que los suelos y las condiciones de los mismos están sujetos a un alto nivel de disturbio que

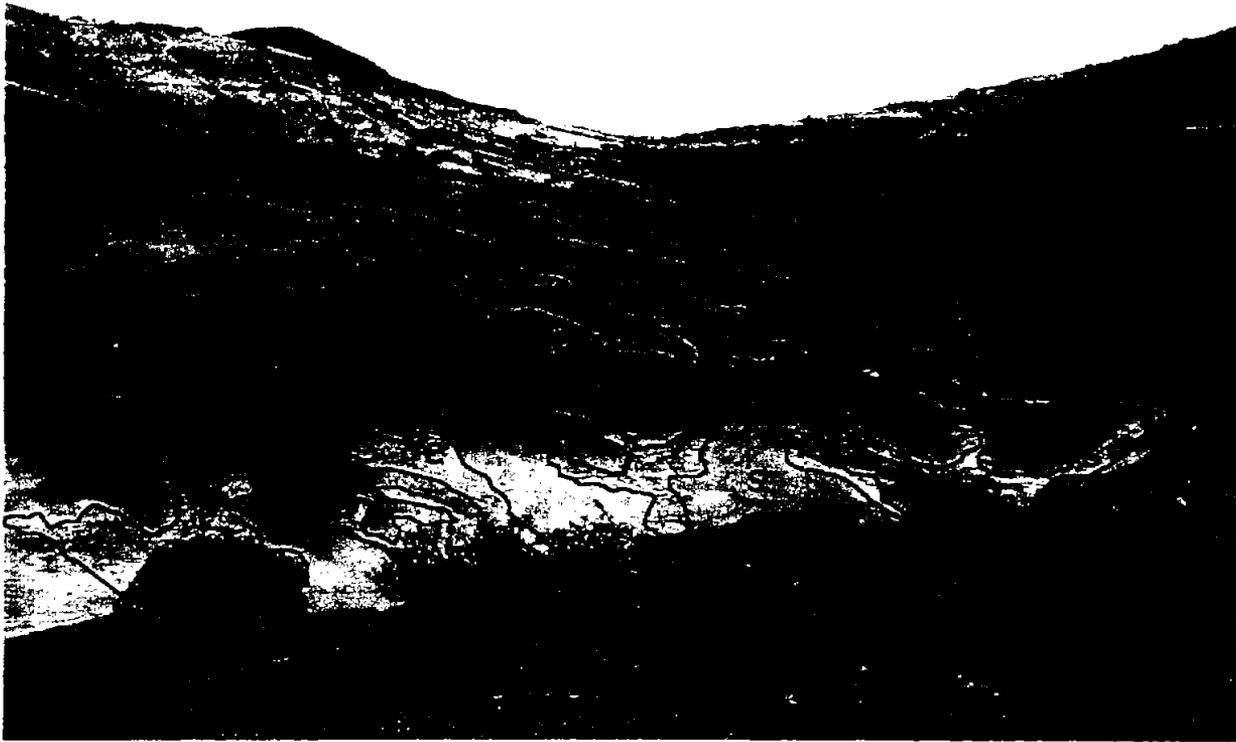


Figura 3.12 Se observan algunos *manchones* de suelo y las condiciones de los mismos con respecto a las áreas erosionadas, cerca del poblado de Concepción Buena Vista; e = erosión, s = suelo.

seguramente viene operando desde por lo menos los últimos 2,000 años. A su vez están esparcidos a manera de islas o *manchones* y son el sustento de pastizales y arbustos (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Rincón, 1999; McAuliffe et al., 2001, Montes Cruz y López Blanco, 2004).

La litología aporta la materia prima para la formación de los suelos, aunque en su mayoría sean regosoles. Durante la fotointerpretación y posteriormente en el trabajo de campo, se identificaron las áreas donde los suelos estaban "mejor conservados", coincidiendo con las superficies cumbrales planas o ligeramente onduladas y convexas. El relieve es un factor que ha influido en el desarrollo, en la estabilidad y también en el grado del deterioro de los suelos. Muchos de los suelos aún existentes no están siendo ocupados por actividad agrícola, son los suelos aluviales que se encuentran en planicies y áreas acumulativas en donde se practica dicha actividad, puesto que son cultivos de temporal, donde hay cierta estabilidad que da el gradiente de inclinación del terreno (Figura 3.13).



Figura 3.13 Saprolita desarrollada sobre andesita de la formación Yucudaac, dentro del sistema morfo genético Yanhuatlán, cerca de Magdalena Jicotlán.

3.4 CLIMA

El clima está determinado por la situación geográfica del lugar. A nivel regional está actuando la Sierra de Juárez como barrera para los vientos que provienen del Golfo de México con una gran carga de humedad, el efecto de sombra orogénica determina las condiciones del régimen hídrico y las condiciones de los climas del área de estudio (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Montes Cruz y López Blanco, 2003 y 2004). En toda el área se localizan tres tipos climáticos, en las partes bajas del cauce del río Xiquila, donde la altitud llega a ser de 1,200 msnmm, el clima es del tipo Bs (cálido seco), y en la porción centro-norte las condiciones son de clima templado seco, hacia el sur es más húmedo. La oscilación térmica diaria es de casi 20°C, siendo el mediodía cuando se alcanzan las temperaturas más altas (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980). Esto tiene como consecuencia que la evapotranspiración sea casi del triple de la precipitación (op. cit.) (Figura 3.14).

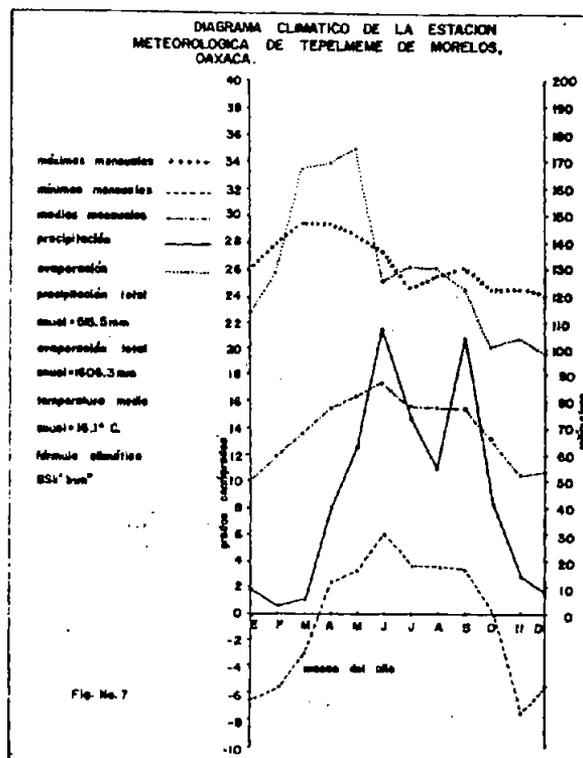


Figura 3.14 Climograma que caracteriza el tipo climático para Tepelmeme y en general para la porción central del área de estudio (Tomado de Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980).

3.5 VEGETACIÓN

La diversidad vegetal de esta porción de la Mixteca Alta tiene estrecha relación con el suelo, clima y litología, juntos forman parte de un sistema natural (Ahnert, 1998). Las comunidades vegetales conviven con un alto grado de disturbio inducido por el ser humano desde hace por lo menos 2,000 años. En este sentido, son varias las hipótesis que se refieren al estado original del entorno natural del área de estudio (Rincón, 1999; McAuliffe et al., 2001), aunque son otros los especialistas quienes deban dilucidar sobre los tipos de vegetación que existieron antes del escenario actual.

Cruz Cisneros y Rzedowski (1980) agruparon la vegetación del área de estudio en tres principales tipos: bosque y matorral de *Quercus* spp. y matorral *Arctostaphylos* spp.

En las comunidades del bosque de encino la mayoría forman grupos aislados, más o menos dispersos y su localización se restringe a las superficies cumbreles de algunos lomeríos altos y laderas de montaña, probablemente sean remanentes de bosques más

extensos, hace por lo menos dos mil años. Son la comunidad vegetal que posee un vínculo cercano con suelos más profundos, aunque algunos individuos llegan a desarrollar su sistema radicular en grietas sobre la roca, estos bosques generan microclimas más confortables y húmedos, atenúan hasta cierto punto los efectos erosivos de las lluvias, aunque están en una etapa de gran amenaza de desaparecer, no obstante, el interés de la comunidad en conservarlos (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980) (Figura 3.15).



Figura 3.15 Características de la cobertura vegetal, cerca del poblado de San Antonio Abad, las condiciones en las que se presenta son similares los cuatro sistemas morfogenéticos,.

Se tiene la idea de que probablemente la condición de los otrora abundantes encinos era más bien de un bosque o comunidades abiertas que compartían espacio con matorrales y nopaleras (Martorell, comunicación personal 2004). Rzedowski (1988) menciona que los encinares o bosques de *Quercus* son característicos de las áreas montañosas del país y no sólo se restringen a climas templados y semihúmedos, los hay

también en climas cálidos y secos, se encuentran en un rango altitudinal desde los 1,200 hasta los 2,800 m y con excepción de Yucatán y Quintana Roo, se les localiza en casi todo el país (Rzedowski, 1988). Se les observa prácticamente en cualquier tipo de roca, y las condiciones de los suelos en que se desarrollan son moderadamente ácidas (pH 5.5 a 6.5).

La comunidad de matorral puede ser vista en gran parte del área de estudio, sobre todo en sitios donde las *islas* de suelo son suficientes para el crecimiento de los mismos y donde los procesos de erosión están actuando, de tal manera que han creado islas de suelo y matorral. Entre las especies que conforman los distintos tipos de matorrales están los de: *Quercus microfila*, *Arctostafilos* y *Dodonaea*. En la porción SE del área de estudio, se observaron en campo comunidades de matorral perennifolio con encino arbustivo predominante.

Los pastos están presentes en suelos muy delgados y en todo tipo de relieves, en planicies, en dorsos de laderas y en superficies cumbrales. Esta comunidad vegetal ha sido introducida para atenuar los efectos de la erosión y la ganadería caprina, sin embargo, poco pueden hacer en esta fase de degradación ambiental donde los efectos de la erosión acelerada de suelos está reduciendo estos suelos someros generados por acumulación gradual de materiales litológicos.

Una cuarta comunidad vegetal está siendo estudiada por Martorell y Peters (1999), quienes desde hace cinco años investiga las condiciones en las que se desarrollan algunas de las cactáceas del área, para tal motivo se ha implementado un plan de monitoreo del comportamiento de las plantas en condiciones de alteración ecológica, creando un sistema de encierros a manera de reservas para estudiar los cambios que ocurren, tanto dentro como fuera de los encierros (Figura 3.16).

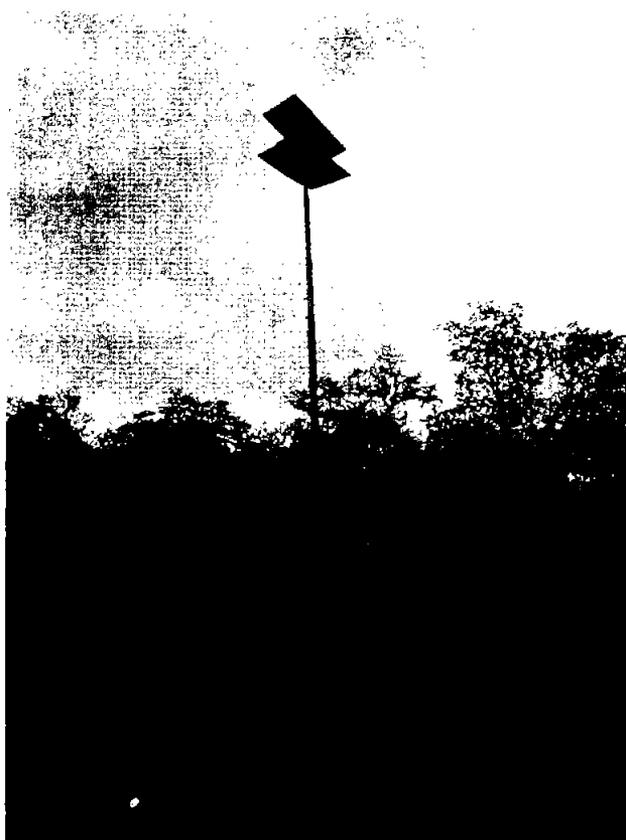


Figura 3.16 Encierro en donde se monitorean las condiciones de la vegetación compuesta por bosque de encino, el poste blanco soporta un panel solar que alimenta el sistema de electrificación de la reserva cerca del poblado de Concepción Buena Vista.

CAPÍTULO 4 MÉTODO

4. BASES TEÓRICAS

En esta investigación uno de los aspectos a los que se le ha dado la mayor importancia es al enfoque metodológico aplicado, ya que en geomorfología existen varios enfoques para estudiar y cartografiar al relieve (Meijerink, 1988; Lugo, 1991; Verstappen y van Zuidam, 1991). De entre las diferentes posibilidades con que se cuenta para la elaboración de la cartografía geomorfológica, para el área de estudio localizada al norte de la Mixteca Alta de Oaxaca, se adoptó el sistema para Levantamientos Geomorfológicos, propuesto por el ITC (Instituto Internacional para Levantamientos Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra; Verstappen y van Zuidam, 1991, adaptado por Tapia Varela y López-Blanco, 2002). Utilizando este método se ha demostrado que puede ser aplicado a casi cualquier escala espacial (op. cit.). Tiene la ventaja de auxiliar en la generación de documentos cartográficos y bases de datos conjuntas a partir del empleo de un SIG (Sistema de Información Geográfica) también desarrollado en el ITC, al que se le denomina con el acrónimo ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*, ITC, 2000).

Dentro del enfoque propuesto por el ITC, se pueden realizar distintos tipos de levantamientos geomorfológicos. En este sentido se han clasificado tres tipos principales de mapas: 1) Analíticos, 2) Sintéticos y 3) Pragmáticos (Verstappen y van Zuidam, 1991; Tapia-Varela y López-Blanco, 2002).

En el presente trabajo, se elaboraron dos mapas de tipo analítico el morfogenético, y el morfodinámico.

Con base en lo anterior, se retoma la siguiente descripción hecha en el capítulo 2; los mapas geomorfológicos analíticos, son el resultado de los estudios monodisciplinarios a fondo, sobre las formas del relieve y los procesos que en ellos ocurren, además proporcionan información detallada por unidades de mapeo; son la base cartográfica para estudios futuros, geomorfológicos, ambientales, de ordenamiento territorial, de riesgos, etc.

Se han aportado conceptos cartográficos geomorfológicos que ahora forman parte de la estructura del método aplicado y que tienen referente en la secuencia de formas

del relieve, en su configuración espacial y geométrica, también sus vínculos con las formas del relieve adyacentes, con la altura relativa de las formas, morfografía, con los rangos de la pendiente del terreno y con la jerarquización de las unidades de relieve principalmente.

Las adaptaciones hechas al método cartográfico geomorfológico que se empleó en la presente investigación, obedecen a las características específicas que presentan las formas del relieve donde ha sido aplicado este enfoque y sobre todo se ajusta a las condiciones que ofrece la escala del mapa (1:75,000). La clasificación y la jerarquización del terreno involucra el arreglo y agrupamiento de las diferentes áreas de la superficie de la Tierra, dentro de una variedad de categorías (componentes del terreno, unidades, sistemas y provincias) sobre las bases de similitud del tipo de superficie y atributos superficiales cercanos (van Zuidam, 1985/1986).

La estructura básica del trabajo consistió en tres etapas fundamentales para el desarrollo de la investigación. La primera etapa fue de recopilación, adquisición, selección, depuración y análisis de la bibliografía, además de la interpretación de cartografía e imágenes aéreas y espaciales, digitales y análogas. La segunda etapa consistió en la selección, depuración y análisis de la información fundamental y paralelamente comenzó el procesamiento de las fotografías aéreas escaneadas y de la información cartográfica digital en el SIG *ILWIS*, finalmente en la tercer etapa fueron analizados los resultados obtenidos en la investigación.

En principio, se partió del manejo de tres importantes herramientas necesarias para el levantamiento geomorfológico; la interpretación de las fotografías aéreas, en este caso pancromáticas, producidas por el INEGI (1985) a escala 1:75,000; la base topográfica, en formatos digital e impreso; finalmente la imagen de satélite Landsat ETM+, de Diciembre de 1999, *Path 25, Row 47 y 48*. De acuerdo con un sistema de georeferencia mundial (WRS), se catalogaron las imágenes Landsat, con lo que se definió que para la localización de una imagen en particular, debe considerarse un sistema análogo a la cuadrícula UTM. El *Path* es la órbita que describe el satélite que lleva a bordo el sensor que registrará la escena que corresponde a una determinada porción de la superficie de la Tierra, tiene una inclinación con respecto al ecuador de

98°. El *row* se refiere a un sistema de filas paralelas al ecuador que cubren al planeta de norte a sur y que determina bloques de imágenes. (*Enhanced Thematic Mapper Plus*, Lillesand y Kiefer, 2000). Esta fue la primera etapa del levantamiento geomorfológico en donde se interpretaron tanto las fotografías aéreas, mapas e imagen de satélite, con base en criterios geomorfológicos morfogénicos y morfodinámicos. Al finalizar la fotointerpretación morfogénica comenzó el trazo de las unidades morfodinámicas, en donde se delimitaron áreas con distintos tipos e intensidades de los procesos erosivos hídricos dominantes, así como de los procesos gravitacionales y las áreas de disolución en rocas carbonatadas. En esta misma etapa, se elaboró una primera leyenda para cada mapa y comenzó la alimentación de las bases de datos que posteriormente conformarían parte de los resultados alcanzados, mismos que se fortalecieron, al igual que los mapas, conforme se hacía el trabajo de campo.

Se obtuvieron los primeros mapas, preliminares, en los que se delimitaron las unidades morfogénicas que serían corroboradas en campo, tomando algunos puntos de control definidos durante el trazo de las unidades cartográficas.

El trabajo de campo estuvo presente desde el inicio de esta investigación y comenzó con la corroboración de los primeros resultados de la fotointerpretación de las unidades morfogénicas y morfodinámicas. Al finalizar esta primera etapa, dentro de la cual se obtuvo la versión preliminar del mapa de unidades morfogénicas (UM), que fue cotejada y posteriormente corregida, además se plantearon varias salidas al campo con el objetivo de recopilar información suficiente sobre el estado actual de las condiciones ambientales que son el contexto de las unidades morfogénicas y morfodinámicas del área de estudio (Figura 4.1).

En esta investigación se ha realizado el mapeo geomorfológico morfogénico y morfodinámico, denominado analítico y sintético correspondientemente. Lo que indica que los mapas contienen información detallada de cada unidad morfogénica y morfodinámica, de acuerdo con la escala 1:75,000.

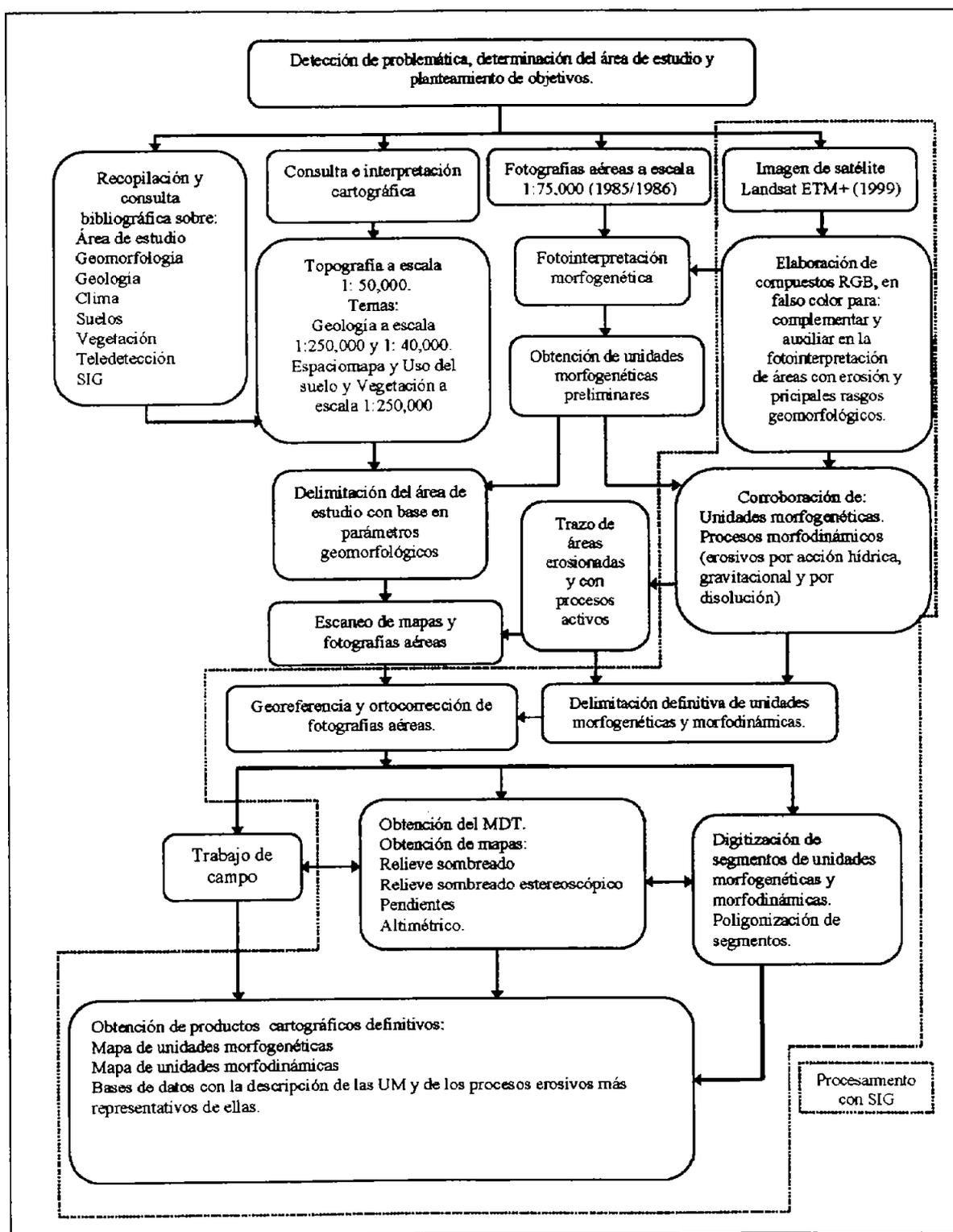


Figura 4.1 Diagrama metodológico que muestra el procedimiento llevado a cabo en la presente investigación.

4.1 *RECOPIACIÓN, CONSULTA, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CARTOGRÁFICA*

4.1.1 Información bibliográfica.

La revisión bibliográfica fue el primer paso en el que se inició una amplia investigación documental del área y temas a estudiar. Se consultó principalmente la información sobre: geomorfología, clima, geología, suelos, vegetación, tectónica, estratigrafía, erosión, percepción remota, degradación ambiental y SIG. Se tuvo especial empeño en la recopilación y la revisión de los temas referentes a la geología y suelos, puesto que la cartografía geológica de Oaxaca es poco detallada e imprecisa y la edafológica no existe (Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Rincón, 1999). Al carecer Oaxaca de cartografía edafológica, se complementó esta carencia con información cartográfica general, que se obtuvo fundamentalmente por interpretación de la carta topográfica y geológica; además se recurrió a la elaboración de compuestos en falso color de imágenes de satélite Landsat ETM+, para una delimitación de las grandes unidades de suelo, de esta forma se cubrió la carencia de información no editada sobre este tema en particular.

En el tema de la erosión, se puso especial cuidado en la revisión bibliográfica para la comprensión de los procesos geomorfológicos que sobre las formas del relieve ocurren, se abordó con mayor énfasis en la parte de la investigación dedicada a la morfodinámica. Como ya se expuso en el capítulo anterior la revisión de trabajos referentes a: degradación ambiental, cambio climático, erosión hídrica por flujo laminar y flujo concentrado, procesos gravitacionales, asimismo características de los suelos fué útil para entender las implicaciones geomorfológicas de tantos procesos concatenados y activos en un entorno con niveles extremos de disturbio ambiental, esencialmente por erosión acelerada de suelos (Rincón, 1999).

4.1.2 Información cartográfica.

La consulta e interpretación de la cartografía fue continua en todo el trabajo y paralela a otros procesos, sin embargo, fue esencial en esta primera fase. Se consultaron permanentemente las cartas topográfica y geológica, en la primera, se

consultó la de escala 1:50,000, en la geológica hay dos fuentes importantes, la hoja E14-9 a escala 1:250,000 (INEGI, 1994), y la segunda, un mapa a escala 1:40,000 (Mitre, 1973). Aunque son distintas escalas, fue este último mapa el indispensable para la caracterización litológica de las unidades morfogénéticas, porque cubre parcialmente el área de este estudio. La base topográfica se consultó en formato digital y fue necesario tener la información cartográfica de geología en el mismo formato, sin descartar su uso en formato impreso, para efectos de trabajo en campo, principalmente.

4.2 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Con base en la interpretación de las cartas topográficas a escala 1:50,000 (INEGI, 1984), fotografías aéreas a escala 1:75,000 (INEGI, 1985 y 1999), un mapa geológico a escala 1:40,000, aproximadamente (Mitre, 1973) y en el compuesto (4, 3, 1) de la imagen Landsat ETM+, se definieron los límites geomorfológico-estructurales del área de estudio. Los principales rasgos que se eligieron como límites fueron los cauces de los ríos desarrollados sobre disyunciones en el relieve, fallas y fracturas, en donde los ríos han profundizado considerablemente y han incidido formando valles profundos en forma de V sobre rocas volcánicas del Cenozoico y otros sobre rocas calcáreas masivamente estratificadas, como la caliza Teposcolula de edad Aptiano-Cenomaniano (95 Ma) que aflora al noreste del área (Mitre, 1973) en donde el cauce del río Xiquila ha profundizado sobre un sistema de fallas (NE) por lo menos mil metros (INEGI, 1985; Rincón, 1999). Otro criterio contemplado para la definición del área de estudio fue el límite de las unidades morfogénéticas, de tal manera, que se trató de que los límites del área de estudio fueran geomorfológicos, en los sentidos morfoestructural y morfogénético. Una vez determinados y observados, los límites, en los mapas topográficos y sobre el modelo de relieve sombreado se definieron con mayor exactitud en las fotografías aéreas, mediante estereoscopía. En esta fase, se inició la delimitación de los tipos generales del relieve.

4.3 FOTOINTERPRETACIÓN MORFOGENÉTICA

Para la delimitación de las unidades morfogénéticas (UM) y la posterior elaboración

del mapa, se utilizó una estructura organizada con base en dos grandes criterios cartográficos geomorfológicos para la jerarquización del relieve:

- Jerárquicos: a) sistemas, b) subsistemas, c) unidades y d) subunidades.
- De homogeneidad relativa y su posterior caracterización, a partir de considerar los cuatro aspectos fundamentales del relieve:

1) Origen general y específico; 2) Tipos generales y tipos específicos del relieve (planicies, lomeríos, piedemontes y laderas de montaña); 3) Temporalidad (edad de roca, estructura y forma); y 4) geometría del relieve por clases, asimismo los principales parámetros morfométricos por unidad (Meijerink, 1988; Tapia-Varela y López-Blanco, 2002).

Antes de la fotointerpretación se estructuró el mosaico de las fotografías aéreas que cubren el área de estudio, después se procedió a la interpretación (Díaz, 2001). El trazo de unidades geomorfológicas se hizo a través de técnicas estándar de fotointerpretación, por lo que se consideró tomar en cuenta el tono, textura y patrón o arreglo de los elementos registrados en la fotografía aérea, principalmente para la deducción y detección de los procesos formadores y modificadores del relieve, así como, otros rasgos distintivos de los lugares que cubre el fotomosaico (van Zuidam, 1985/1986).

El tono es la variación de grises en una fotografía aérea. A partir del tono se pueden distinguir varios fenómenos, un bosque, una planicie aluvial, tipos de roca, cultivos, etc (op. cit).

La textura es la repetición de los cambios de tono, puede ser fina, media o gruesa, puede observarse que en un bosque de encino es gruesa y en una planicie aluvial es fina, es por la forma y la disposición de sus elementos individuales (op. cit.).

El moteado es la agrupación de conjuntos con cierta textura, su expresión visual se debe a elementos de dimensiones mayores; mientras que la textura es la expresión gráfica de un tipo de elemento registrado en la imagen (op. cit.).

La morfografía es una propiedad más que aporta datos sobre la génesis del relieve, se refiere a la forma que tiene el relieve.

Al arreglo espacial de los elementos del paisaje se le conoce como patrón, se refiere a la distribución de los elementos sobre la superficie terrestre, como los cultivos o las formas del relieve o las diferentes litologías, si estos elementos se repiten conservando cierta secuencia entonces conservan un patrón (van Zuidam, 1985/1986). Al respecto, se pueden inferir algunos rasgos del relieve observando en las fotografías el cambio de uso del suelo; tal es el caso de los procesos erosivos de los que pueden deducirse tanto los mecanismos y las dinámicas más frecuentes en el área observada.

Las fases en el proceso de fotointerpretación geomorfológica pueden ser simultáneas, es decir, se puede partir del primer paso que es la fotoidentificación, pero al mismo tiempo si ya se consultó la información sobre el área de estudio en mapas temáticos o en bibliografía, la interpretación y la delimitación de las unidades será más sencilla. Además de estas previsiones, se debe contar con una leyenda preliminar de los mapas y de las unidades que se delimitarán, en este caso morfogenéticas y morfodinámicas (van Zuidam, 1985/1986).

Para comenzar con la delimitación de las unidades morfogenéticas en las fotografías aéreas, se consideró pertinente una primera delimitación de subunidades, esto es que inicialmente se identificaron las sub-unidades por su origen, forma y temporalidad, esta última se definió a partir de la consulta de las cartas geológicas mencionadas. La unidad morfogenética puede ser considerada como un área o superficie de terreno (un polígono) en donde al interior hay varios elementos que se relacionan con un conjunto de atributos semejantes; criterios mediante los cuales se ha procedido a la fotointerpretación morfogenética y morfodinámica y a los futuros mapas correspondientes (Meijerink, 1988).

Inicialmente, se reconocieron las subunidades morfogenéticas (UM) por su origen, tipo y temporalidad, con lo que posteriormente se agruparon en unidades, después en subsistema y finalmente en sistemas. Simultáneamente se consultó la carta geológica, E14-9, a escala 1:250,000 (INEGI, 1994) y el mapa a escala 1:40,000 (Mitre, 1973). Los límites geomorfológicos están claramente expresados, en algunos sitios son alineamientos del relieve o cauces, fallas o fracturamientos en el área de estudio que

suponen actividad tectónica relativamente reciente, asimismo la configuración y el arreglo espacial de las mismas unidades morfogenéticas.

Los alineamientos mencionados son, en la mayoría del área de estudio, ríos que se han desarrollado en las fallas y en lugares donde la roca presenta planos de debilidad (fracturas y diaclasas). El siguiente paso fue la identificación del origen de las formas del relieve, el trazo de las subunidades fue el que permitió la delimitación de las UM, y su posterior agrupamiento en subsistemas y sistemas morfogenéticos (SM). Posteriormente se identificaron áreas o conjuntos morfológicos homogéneos; un ejemplo son los lomeríos, éstos a su vez tienen cierta homogeneidad dada por su altura relativa, litología, procesos que les dieron origen, temporalidad y geometría (pendiente, altitud media, altura relativa), pueden ser uno o varios de los elementos los que le atribuyan su homogeneidad.

Desde el inicio se fotointerpretó con base en aspectos generales del relieve, donde se ha considerado principalmente a la estructura y litología. Estos dos grandes elementos se contemplaron como punto de partida para jerarquizar las formas del relieve que más adelante se detallaron. Se hizo una inspección de bloques tectónicos delimitados por alineamientos bien definidos como son los cauces presentes y algunas fallas y fracturas. De esta manera, la geoforma y la litología dan una visión del tipo de estructura geológica a la que se vincula directamente. Esta consideración da pauta para que una vez que se identificaron las estructuras generales del relieve se proceda a la particularización de las mismas. Un tema básico e importante en el análisis del relieve, es la morfometría, se refiere a la información geométrica del relieve, en base a la cual se obtuvo la pendiente del terreno, la forma de las laderas, su orientación, la altura relativa y la altimetría.

4.4 DELIMITACIÓN DE LAS UNIDADES MORFOGENÉTICAS (UM)

El trazo de las unidades morfogenéticas (UM) se llevó a cabo con estereopares de fotografías aéreas a escala 1:75,000, en blanco y negro (INEGI, 1985) utilizando un estereoscópio de espejos (Ver Figura 2.1)

Los criterios aplicados para la delimitación de las UM en las fotografías aéreas a escala 1:75,000 (INEGI, 1985) están de acuerdo con el Sistema ITC (Verstappen y van Zuidam, 1991) con base en cuatro aspectos fundamentales del relieve: 1) Origen (general y específico), 2) Tipo de relieve (general y específico), 3) Temporalidad (de las rocas, estructuras y formas) y 4) geometría del relieve por clases (Tapia Varela y López Blanco, 2002). La pendiente del terreno, forma, homogeneidad de la forma, procesos geomorfológicos que se presentan, rasgos del relieve, rasgos estructurales como fallas, fracturas, la orientación de las mismas, exposición de ladera, el patrón de drenaje y algunos cambios litológicos; son elementos fundamentales, tanto en la primera delimitación de las unidades geomorfológicas preliminares como en la delimitación definitiva, y no puede dejárseles de lado durante el mapeo geomorfológico.

Las laderas de montaña fueron delimitadas, principalmente, con base en el criterio de altura relativa, la cual debe ser mayor a 200 m, con base en esta premisa se obtuvieron tres intervalos, a partir de la que se hizo la fragmentación de estas unidades con base en tres categorías de laderas de montaña; laderas de montaña bajas (Lmb) entre 200 y menos de 600 m, laderas de montaña medias (Lmm) entre 600 y menos de 1,000 m, laderas de montaña altas (Lma) entre 1,000 y menos de 1,500 m. Simultáneamente se consideró su origen, litología, posición topográfica, forma, rupturas de pendiente, la cubierta vegetal y el uso del suelo, para su registro en la base de datos del mapa morfogenético.

En los lomeríos se partió de una clasificación ya establecida en cuanto a alturas relativas; para los lomeríos bajos (Lob) se consideró un intervalo de entre 50 y menos de 100 m, para los lomeríos medios (Lom) entre 100 y menos de 150 m, para lomeríos altos (Loa) entre 150 y menores de 200 m, en este caso se consultó constantemente la base topográfica, tanto digital (MDT) como en formato impreso, para cerciorarse del tipo de lomerío delimitado. Cada lomerío fue distinguido de otras formas del relieve por su configuración espacial, geométrica y por la morfografía que describen, contrastando así con las unidades circundantes. El patrón de drenaje es clave para su separación del resto de las unidades, ya que los cauces son, en muchos sitios, el límite natural para la estructura. Los lomeríos son generalmente formas suaves con gran homogeneidad

topográfica y aún así con características peculiares, como el uso de suelo, los procesos erosivos dominantes y la litología. Su ubicación dentro del área de estudio está ligada litológicamente a la toba Llano de Lobos (Mitre, 1973; Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Rincón, 1999).

Para delimitar los piedemontes, en este caso locales, se consideró su localización topográfica, ésta debía estar al pie de las prominencias del relieve y en este caso fueron tomadas en cuenta, tanto las unidades de lomeríos, como las de laderas de montaña. Su configuración es característica de depósitos coluviales con una alternancia de materiales aluviales y coluviales en su base. Se consideraron aquellas formas del relieve que por posición topográfica entran en la categoría de piedemonte. Dentro de este tipo de relieves se encuentran agrupadas unidades morfo genéticas que tienen su origen en la erosión geológica de depósitos masivos de tobas andesíticas del Mioceno, dando como resultado superficies convexas de inclinación promedio de 5 a 7°. En este contexto las formas del relieve cartografiadas se asemejan a los *pediments*, aunque se sabe que tales formas del relieve se originan en ambientes desérticos como resultado de una sucesión de eventos erosivos, de nivelación y alternancia de períodos tectónicos activos, donde hay ascenso de la corteza, además de retrocesos paralelos de vertientes (Lugo, 1989).

Las planicies se destacaron por ser los elementos del relieve más contrastantes, cuya presencia fue fácilmente detectable. El criterio fundamental para su delimitación fue la pendiente, aunque el tono y textura que presentan las hace reconocibles a primera vista en las fotografías aéreas. Por correlación con otras formas del relieve y a los cauces existentes y la deducción de los procesos formativos del relieve, son quizás las que no presentan dificultad para ser delimitadas. Se agrupan en una categoría que es la de las planicies aluviales (Pal), en las cuales no fue posible detallar en su interior procesos particulares, por la escala de las fotografías aéreas.

Dentro de las unidades delimitadas hubo casos que no pudieron ser asignadas dentro de las categorías mencionadas, de tal manera, que cuando intervinieron varios procesos para su génesis, se les denominó como unidades complejas.

4.5 DELIMITACIÓN DE LAS UNIDADES MORFODINÁMICAS (UMd)

La identificación de las áreas erosionadas y con actuales procesos erosivos hídricos acelerados, fue mediante técnicas estándar de fotointerpretación y con la utilización del mapa de unidades morfogenéticas. Posteriormente, se revisaron los trazos en las fotografías aéreas, pero en esta ocasión con una base cartográfica morfogenética. De esta forma, se localizaron las áreas con distintos tipos de erosión, frecuencia y extensión, principalmente. La imagen de satélite contiene información de reflectancia en siete bandas que abarcan el espectro visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio con resolución de 30m el píxel y una banda que registra el infrarrojo térmico con una resolución de 60m el píxel. Para generar una imagen en falso color se requiere la combinación de tres bandas que son representadas cada una en filtros de color que se denominan RGB por las siglas en inglés de los colores rojo, verde y azul; es decir *Red, Green, Blue*, (Lillesand y Kiefer, 2000) (Figura 4.3).

La utilización del mapa de unidades morfogenéticas (UM) como base cartográfica para el registro de las áreas con distintos tipos de procesos erosivos hídricos acelerados, procesos gravitacionales y de disolución trajo una gran ventaja consigo, ya que se logró localizar con gran exactitud la presencia de las áreas con distintos tipos y procesos de erosión acelerada sobre unidades de relieve, ya clasificados por su morfogénesis. Con la imagen de satélite fue posible identificar con certeza la distribución de las áreas erosionadas, aunque debe aclararse que la resolución espacial del píxel es de 30 x 30 m. En este sentido, se localizaron los sitios de monitoreo de procesos erosivos hídricos acelerados y los puntos de control para la corroboración de los trazos de las unidades morfodinámicas (UMd) se determinaron en las fotografías aéreas.

Durante el recorrido en campo se visitaron lugares específicos que fueron seleccionados como puntos de control; mismos que sirvieron para complementar la información obtenida en el trabajo de gabinete.

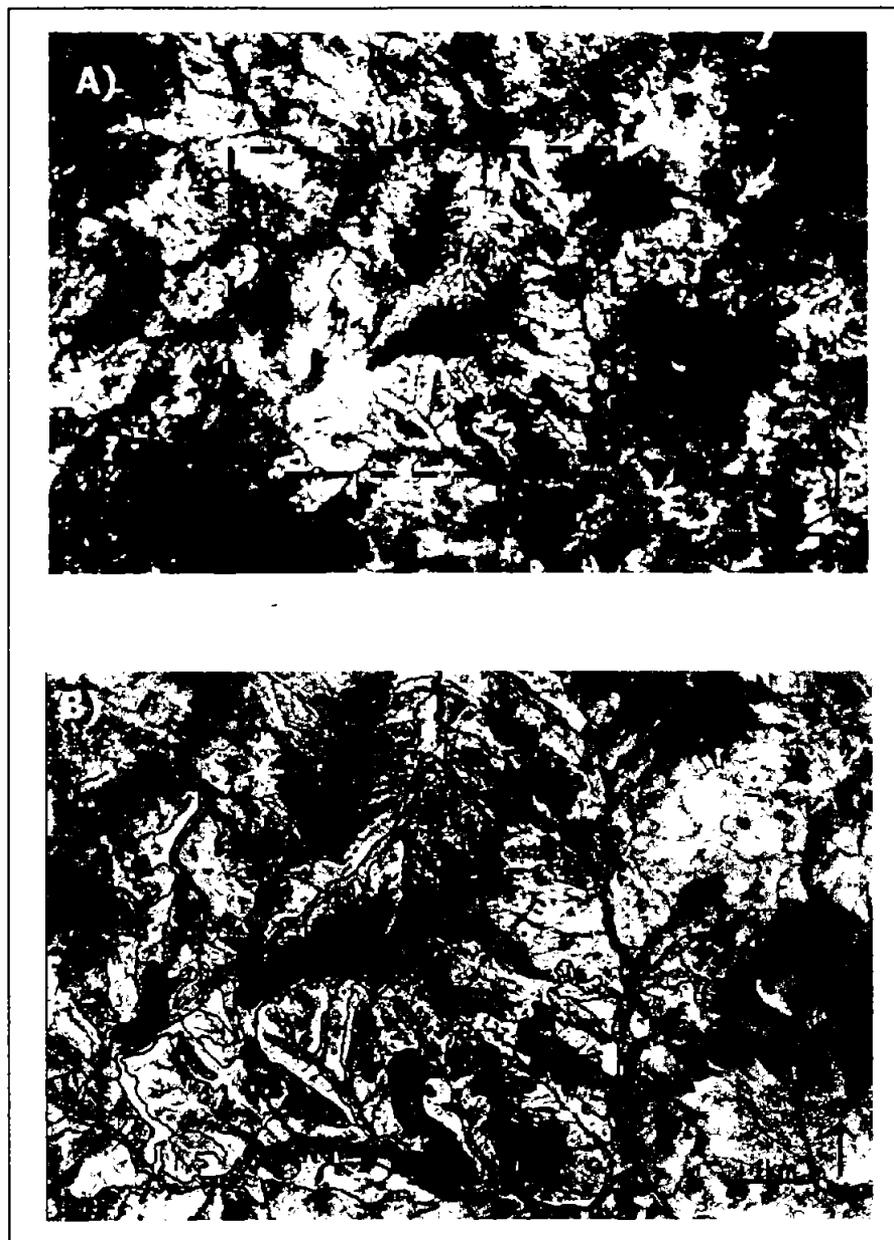


Figura 4.3. A) Fragmento del compuesto en color 431 de la imagen Landsat ETM+. Los rasgos de erosión están en tonos blancos, con la línea punteada se señala el área delimitada correspondiente en la figura inferior; B) Fragmento de una fotografía aérea a escala 1:75, 000 en donde se muestra la delimitación hecha con base en la fotointerpretación de rasgos morfodinámicos.

De esta forma, se generó un mapa que registró los procesos erosivos hídricos acelerados más frecuentes, los procesos gravitacionales y la actividad kárstica, así como su extensión dentro de las unidades morfogenéticas y por consiguiente en toda el área de estudio, lo que proporcionó información suficiente para conformar una base de datos sobre la actividad morfodinámica superficial cartografiada a escala 1:75,000. Su

localización, como procesos geomorfológicos degradativos del ambiente, dentro de la porción norte de la Mixteca Alta, es importante debido a que son fenómenos ampliamente difundidos en toda la región y su estudio puede ser útil como antecedente cartográfico para investigaciones que se desarrollen dentro de la amplia temática de la degradación ambiental por erosión acelerada de suelos, además de resolver la carencia de cartografía sobre estos procesos tan activos y presentes en todo el país.

4.6 PROCESAMIENTO Y USO DE LA IMAGEN DE SATÉLITE LANDSAT ETM+

El uso de la imagen de satélite está enfocado en lo fundamental a complementar las observaciones realizadas en las fotografías aéreas y los mapas topográficos. Es básica su interpretación para observar, desde esta perspectiva, la configuración del relieve; de las estructuras mayores y unidades principales. La imagen es una herramienta adicional que permite observar cambios en el tipo y cobertura de las vegetación, erradicación de la misma, litología, áreas erosionadas, cambios en el uso de suelo, por mencionar algunas aplicaciones. Una de las ventajas que tiene el uso de las imágenes de satélite es la posibilidad de elaborar compuestos en color RGB, en los que puedan observarse rasgos e información colateral registrada en la escena. El manejo de la escala en la imagen Landsat ETM+, así como en toda imagen digital proveniente de un satélite, depende de la resolución espacial de la misma.

En la imagen cruda están presentes las distorsiones y alteraciones inherentes a los instrumentos de registro de la imagen; los sensores y a la plataforma en que están montados (op. cit.). Las distorsiones y las alteraciones en la imagen deben ser erradicadas mediante procesamiento digital, lo que es indispensable para que a corto plazo puedan obtenerse datos útiles que necesitan ser interpretados y analizados, es decir nuevas imágenes (Lillesand y Kiefer, 2000).

El procesamiento digital de la imagen comenzó con la corrección geométrica. De esta manera se eliminan algunas distorsiones en la información original captada por el satélite. Las deformaciones geométricas en la imagen son ocasionadas principalmente por la curvatura de la tierra, la altitud, la disposición de los elementos de la escena, la velocidad de la plataforma del sensor y la refracción atmosférica, entre otras (Lillesand y

Kiefer, 2000). Existen soluciones matemáticas para eliminar tales alteraciones en la escena captada, mediante la aplicación de algoritmos y otras fórmulas se corrigen las distorsiones para que en un futuro puedan generarse imágenes en color RGB con información efectiva y rectificadas para su análisis.

A pesar de aplicar fórmulas matemáticas para la corrección geométrica de la imagen hay distorsiones que permanecen y deben ser rectificadas mediante la asignación de puntos de control terrestre, de esta manera, los puntos asignados a la imagen permiten contar con un documento geoméricamente correcto.

Se estableció que los productos emanados de la interpretación de la imagen fueran un mapa de las principales estructuras del relieve, así como, de los sistemas morfogénicos y el mapa de las unidades morfodinámicas y de los sistemas o áreas con procesos erosivos hídricos más frecuentes, gravitacionales y de disolución, así como los procesos gravitacionales y de disolución localizados dentro del área. Se ha usado para complementar el empleo de las fotografías aéreas, por medio de la elaboración de los compuestos RGB.

4.7 INTERPRETACIÓN DEL ESPACIOMAPA

El espaciomapa (INEGI, 1999) es otro documento cartográfico que complementa el uso de los mapas de geología y topográfico, aunque por la escala 1:250,000 sólo se utilizó para delimitar y situar regionalmente al área de estudio y observar las formas del relieve adyacentes, lo que de cierta manera permite el análisis de las geoformas en el entorno regional y su influencia sobre el área de interés. En este sentido, los fenómenos que ocurren sobre el relieve en escala regional tienen efectos en el contexto local y viceversa, de tal manera, que observar lo que pasa alrededor del área de estudio es básico y permite tener una visión amplia de la situación geomorfológica que se ha estudiado.

4.8 USO DEL SIG

Lo que antecede al manejo en el SIG ILWIS (ITC, 2000) y en Arc View 3.2 (ESRI, 2000) de las fotografías aéreas, es el escaneo de las mismas para procesarlas y

comenzar a trazar en pantalla los límites de cada unidad geomorfológica, morfogenética y morfodinámica.

En esta fase del trabajo es importante mencionar que la imagen de satélite y los formatos digitales de las fotografías aéreas deben ser corregidas geométricamente mediante el empleo del SIG (Arellano et al., 2001), asimismo para la transferencia de los segmentos de las unidades morfogenéticas y morfodinámicas deberán hacerse correcciones geométricas a las imágenes. Se resuelve esta situación creando en el SIG ILWIS (ITC, 2000), una georreferencia de ortofoto para las fotografías aéreas escaneadas. Posteriormente se les asignaron 20 puntos de control, en promedio, a cada imagen fotográfica escaneada e importada al SIG.

De esta manera, se le asignan propiedades cartográficas a la imagen digital, lo que permite hacer el trazo en pantalla de los segmentos delimitados en las fotografías aéreas (Arellano, 2001; Montes Cruz y López Blanco, 2003 y 2004). Una vez que concluyó la digitización en pantalla de las unidades geomorfológicas se obtiene un mapa de segmentos de toda el área de estudio. A continuación, se realiza la corroboración de los segmentos y la poligonización de los mismos para que se etiqueten con la identificación o nombre de cada unidad geomorfológica.

En este trabajo el uso del SIG en el procesamiento de la información estuvo presente siempre, ya que es una forma de agilizar el análisis, además la obtención de los resultados es mucho más práctica y expedita que de la manera tradicional. El manejo de un SIG para el análisis e integración de la información geográfica y geomorfológica con miras a obtener resultados no sólo cartográficos sino en tablas y bases de datos, es decir, información colateral complementaria y organizada, es en parte la razón de su empleo, la interpretación y el análisis que de dichos resultados se hagan, son responsabilidad del investigador o de quien esté alimentando al sistema de información geográfica.

4.9 ELABORACIÓN Y USO DEL MAPA DE RELIEVE SOMBREADO

Se obtuvo a partir de la aplicación de un filtro al MDT que dio como resultado una imagen en donde da la impresión de tener una fuente de iluminación desde el noroeste,

de esta manera el relieve se aprecia con los elementos característicos de su topografía. Tuvo como objetivo la representación del relieve en forma sombreada que da una sensación de vista tridimensional. Es posible determinar los alineamientos que siguen las montañas, los sistemas de fracturas y fallas, así como la configuración de los cauces. Se utilizó también para la corroboración y corrección de los trazos de las UM. Fue empleado como base cartográfica sobre la cual quedaron plasmadas las UM y las UMd. Para su elaboración se aplicaron técnicas ya empleadas en trabajos anteriores (Rodríguez, 1999; Tapia Varela 1999; Arellano, 2001). Además de la elaboración de este mapa se realizó uno de relieve sombreado en color, en este mapa se muestra el relieve sombreado, al igual que el mapa de relieve sombreado en grises, se observa una perspectiva tridimensional del terreno con una coloración semejante a la de los mapas altimétricos. Se creó utilizando el programa *River Tools* y posteriormente se editó en ILWIS versión 3.0.

El empleo de uno u otro no se contraponen, al contrario son imágenes de una gran riqueza didáctica en la comprensión de los rasgos del relieve en su conjunto, dentro del área de estudio y en los alrededores de la misma.

4.10 GEOMETRÍA DEL RELIEVE

Es un tema sumamente importante en la elaboración de cualquier estudio geomorfológico y su relevancia es aún mayor en la morfogénesis, ya que se obtienen datos sobre la geometría del relieve que es necesario cuantificar, organizar y jerarquizar, para integrarlos al análisis del mismo, además de su respectiva representación en los mapas morfométricos.

Las formas del relieve fueron clasificadas por su semejanza con formas geométricas básicas como los: conos, pirámides, rectángulos, rombos, círculos, elipses, óvalos, etc., en mapas morfológicos y morfométricos (Lugo, 1991). Cuando los mapas sólo expresan en forma cualitativa la forma del relieve se les llama mapas morfográficos. Los mapas que por otro lado concentran información numérica sobre las formas del relieve, entre los que se encuentran los mapas altimétricos, de pendientes, de alturas relativas, entre otros, se les llama mapas morfométricos, ya que presentan datos numéricos en metros

u otras unidades, sobre algunas de las características más importantes de la superficie de la Tierra (Lugo, 1991; Meijerink, 1988). Tanto la geometría como las características dimensionales del terreno, son atributos esenciales en el análisis geomorfológico (Lugo, 1991). De igual manera se presentan como parte fundamental y complementario de la fotointerpretación en la definición del origen del relieve (Meijerink, 1988).

En la morfogénesis no puede hacerse a un lado el empleo de los mapas morfométricos, son quienes aportan datos numéricos importantes sobre la intensidad de los procesos que han modelado al relieve. En la actualidad, los procesos dinámicos superficiales son principalmente del interés del geomorfológico 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).

No es correcto pensar que los mapas morfométricos, en sí mismos, resolverán problemas geomorfológicos específicos, es en cambio, el análisis de ellos y otros mapas además de información obtenida por interpretación de imágenes, tanto estereoscópicas (fotografías aéreas e imágenes de satélite) como monoscópicas (imágenes de satélite), como se puede llegar a una propuesta de solución para una problemática determinada. (Lugo, 1991).

En la etapa de fotointerpretación y análisis topográfico del terreno, se identificaron los tipos de relieve por su morfología que está directamente asociada con formas geométricas y a rasgos geomorfológicos lineales (fallas o fracturas), criterios básicos para la comprensión tanto de la morfología como de la morfografía (Díaz, 2001; Tapia Varela y López Blanco, 2002). Todos los anteriores elementos y características del relieve se cartografían para que juntos complementen a los mapas de unidades morfogenéticas (UM) y de unidades morfodinámicas (UMd), dentro de un proceso analítico y descriptivo, en donde son manejados datos cuantitativos e información cualitativa. Para este estudio se elaboraron los mapas que se describen en los siguientes párrafos:

4.10.1 El mapa altimétrico.

Proporciona información sobre los distintos intervalos altitudinales que tiene el

relieve (altitud del relieve con respecto al nivel del mar). Muestra de manera organizada la información de un mapa topográfico (Lugo, 1991). Se definen clases o intervalos de altitud de acuerdo con los valores mínimo y máximo dentro del área de estudio. Con base en la distribución de todos los valores de altitud del área a cartografiar, se analiza el histograma de frecuencia y es a partir del mismo, que se concluye en cuántos intervalos se presentará el mapa hipsométrico (Díaz, 2001; Arellano, 2001). De acuerdo con normas internacionales de cartografía a cada intervalo le corresponde un color ya establecido; para los valores bajos de altitud se designaron los azules y conforme la altitud aumenta los colores cambian en una relación de tonos fríos con valores bajos de altitud y los colores pasan por el verde, amarillo, naranja, hasta finalmente llegar al rojo que representa los valores máximos de altitud.

Cabe la posibilidad de que los colores asignados lleguen al rojo y aún falten intervalos por colorear, en este caso para hacer notar la prominencia de las sierras, sobre todo, se eligen colores como el púrpura, carmín, violeta o café. En caso de que el mapa no pueda ser reproducido en color, existe la posibilidad de que sean remplazados por hachures, en donde los menos densos corresponden a los tonos fríos, hasta llegar al negro (hachure más denso) que equivale al rojo o violeta. Todos estos ajustes que se hacen tanto al mapa como a su leyenda simplifican la información del mismo y facilitan la lectura, ya sea en un contexto geomorfológico o geográfico, en general (Lugo, 1991) (Figura 4.4).

4.10.2 El mapa de pendientes.

Permite observar los cambios en la inclinación del terreno, pueden distinguirse con este tipo de mapa, las áreas planas, semiplanas, inclinadas, además de las abruptas, así como, los escarpes. Las distintas inclinaciones que se presentan en las geoformas se miden y se jerarquizan para, al igual que en el mapa hipsométrico, contar con intervalos de inclinación del terreno en grados para lo que se recurrió al planteamiento de Verstappen y van Zuidam (1985/1986). De esta forma se organiza la información del mapa de pendientes, de tal manera que pueda ser leída con facilidad y se comprendan otros procesos dinámicos superficiales, que es básicamente para lo que se elabora. La

obtención de este mapa se concretó con la aplicación de algoritmos al modelo digital del terreno. Usando el SIG ILWIS se aplicaron las funciones DFDX y DFDY que son filtros de convolución lineal y la operación que hacen es calcular el valor del píxel central considerando a los pixeles vecinos, los filtros mas comunes usan tres o cinco pixeles vecinos tanto en el eje de las x como en el eje de las y, con base en este proceso se transforman los valores de distancia de las curvas de nivel que fueron interpolados y que resultaron en un MDT. De este proceso resultan dos mapas que muestran cada uno el resultado de la aplicación de cada filtro, posteriormente se cruzan los mapas para generar uno resultante que contenga los valores de pendiente de cada pixel (ITC, 2001) (Figura 4.5).

La formula general para la obtención de 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.

De tal manera que en el mapa resultante se perciben los valores de pendiente, en grados. En esta investigación al manejar un MDT hecho en el *software* ILWIS (ITC, 2001), los valores de inclinación son asignados a cada pixel y de acuerdo con la escala de la información vectorial del mapa topográfico, que ha sido *rasterizado*, es decir se convirtió un mapa de líneas a uno de pixeles en donde cada pixel tiene dimensiones espaciales determinadas por la escala de la información vectorial (curvas de nivel digitales) y coordenadas en los ejes X, Y y Z.

4.10.3 El Mapa de orientación de laderas.

Se obtiene, al igual que el mapa de pendientes, con los filtros aplicados al MDT, en este caso, se obtuvieron las orientaciones de ladera con el programa Arc View 3.2 (ESRI, 2000), que consistió en aplicar la función *Derive Aspect*.

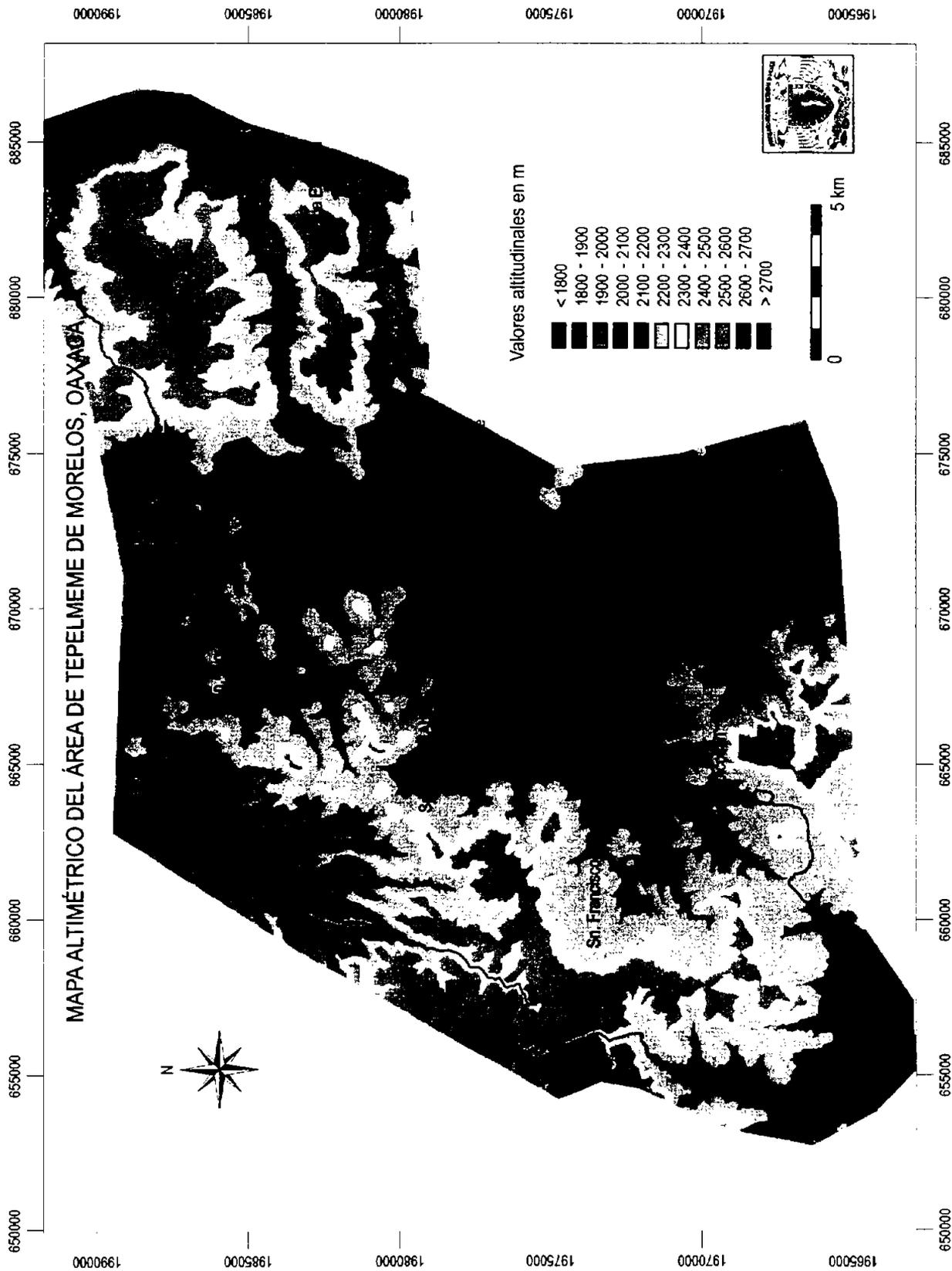


Figura 4.4 Mapa altimétrico del área de estudio.

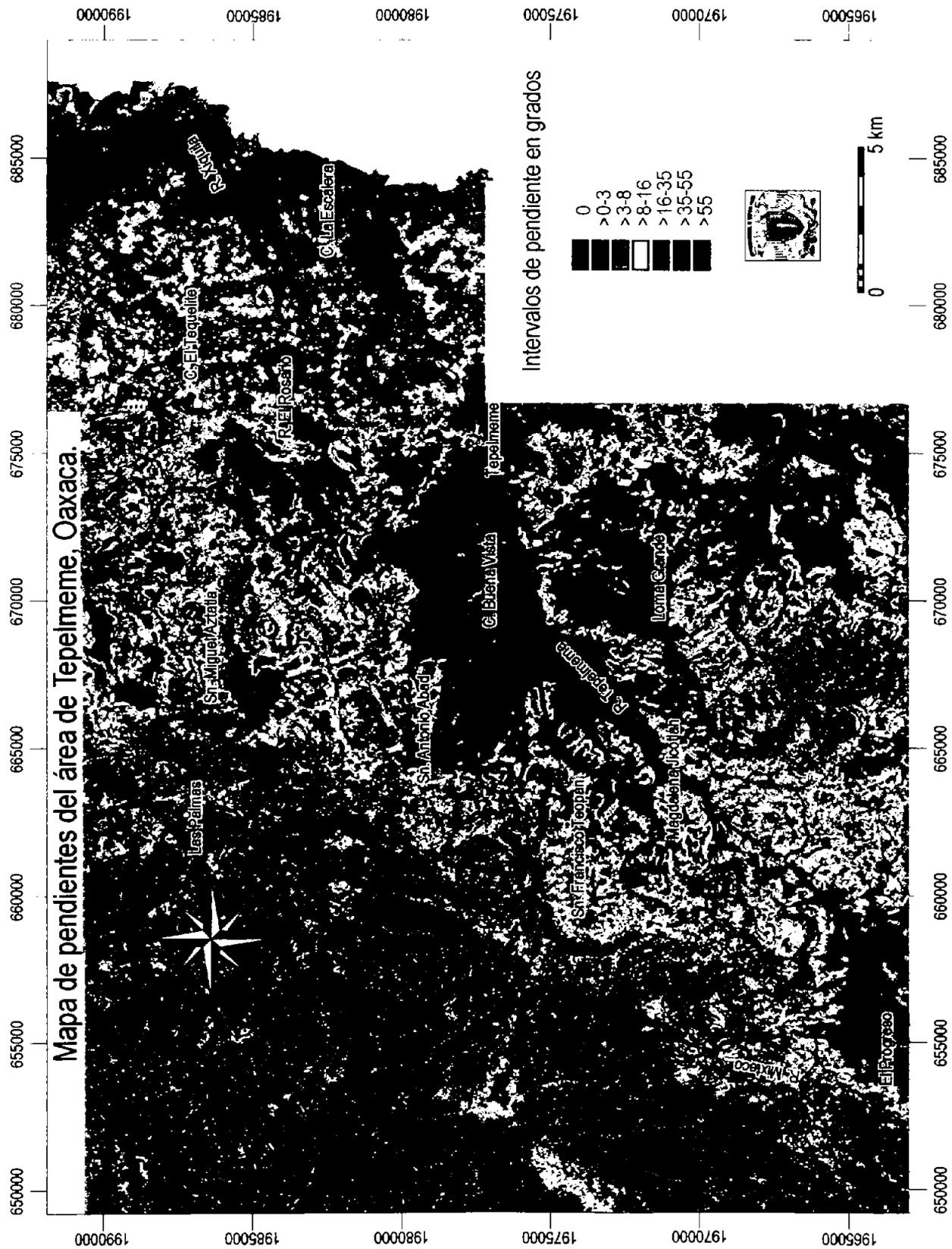


Figura 4.5 Mapa de pendientes del área de estudio.

Esta función identifica la dirección de la pendiente en cada píxel del MDT y posteriormente le asigna valores de azimut en grados a los píxeles, considerando el cero como norte y 90° para el este, 180° para el sur, 270° para el oeste (op. cit.). Como resultado de los procesos hechos al modelo digital del terreno, se presentan una serie de valores discretos de una realidad continua. Los valores numéricos asignados a cada píxel son en grados de azimut, de tal modo que se tiene un mapa donde los valores que representa cada celda indican la exposición de la ladera en ese lugar. Se organizan los valores de azimut en clases de acuerdo con su frecuencia, ya que los intervalos deben reflejar la exposición que tienen las laderas, en clases que permitan realizar una observación ágil sobre este mapa, así como buscar las relaciones existentes con otros mapas y, en general, con la dinámica de los procesos superficiales sobre los distintos tipos de relieve. La utilidad de este mapa no se restringe a aportar datos morfométricos del relieve, también tiene aplicaciones en la detección de alineamientos producidos por fallas o fracturas de origen tectónico o si se pretende hacer una clasificación de laderas por morfología, para realizar estudios específicos sobre laderas (López Blanco et al., 1996) (Figura 4.6).

4.10.4 Mapa de forma de ladera.

Existe una manera de saber las tres formas básicas de la ladera empleando el MDT, se aplicó el filtro $D2fdxdy$, un filtro de convolución lineal, que detecta las diferencias en la forma de la ladera en el eje de las x , así como, en el eje de las y , funciona como los filtros que se le aplican a los MDT para calcular pendiente y orientación de ladera. El filtraje consiste en el cálculo del valor del píxel central tomando en cuenta el de los píxeles vecinos, es común usar filtros de 3×3 y 5×5 píxeles para emitir resultados de píxeles centrales (ITC, 2000). El resultado de aplicar esta función al MDT es un mapa y una base de datos que contiene las características de la ladera en tres clases: convexa, cóncava y recta, en este estudio sólo se ha utilizado la tabla con los datos y no la imagen; ya que los datos son los que se emplean para la caracterización de las laderas.

Los resultados de los estudios geomorfológicos requieren del análisis y de observaciones a distintas escalas espaciales, de esta manera, se obtiene más

información sobre las particularidades del relieve, así como de los procesos y su dinámica superficial específica. Naturalmente esta información es extraída empleando, si es posible, varias escalas de fotografías aéreas o en su defecto otras imágenes, como las de satélite, mapas y las mismas observaciones y descripciones hechas en campo, así como, varias fuentes de información que permitan un enriquecimiento del trabajo de investigación. En general, esta información, se ha organizado en tablas sintéticas descriptivas que permiten resumirla para su consulta e interpretación (Meijerink, 1988; López Blanco et al., 1996).

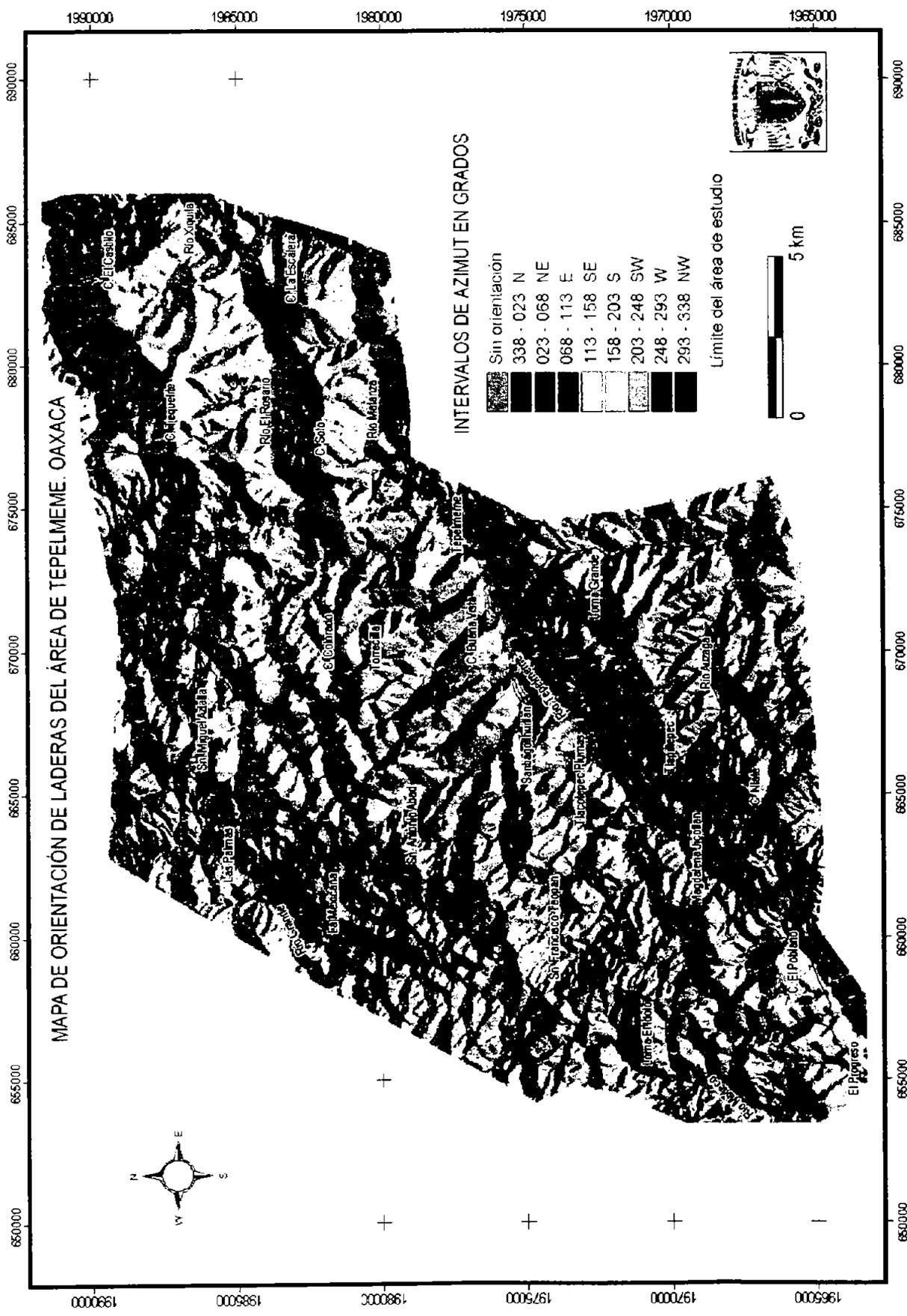


Figura 4.6 Mapa de orientación de laderas del área de estudio.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

5. PREÁMBULO

El comienzo del trabajo eminentemente cartográfico fue con la fragmentación del relieve en subunidades morfogénicas, posteriormente se conformaron conjuntos de unidades, de esta manera comenzó una discriminación de los aspectos morfogénicos más relevantes, topográficos y litológicos. Una vez fragmentado el relieve se procedió a la clasificación, del mismo, en jerarquías que lo agrupan en: Sistemas, Tipos de relieve, Subtipos y unidades Morfogénicas.

La clasificación del terreno contribuyó fundamentalmente al análisis del relieve mediante el empleo de jerarquías que llevan una secuencia lógica, la organización de la información obtenida sobre el relieve permite tener una visión general de los elementos de mayores dimensiones y de las unidades y en este caso subunidades que componen cada clase (van Zuidam, 1985/1986; Lugo y Córdova, 1992). Como en la primer etapa de este análisis se generó un volumen importante de información fue necesario implementar un método para su organización y agrupación de acuerdo con la naturaleza de los datos. De igual manera se jerarquizó la información morfodinámica. Se formaron dos grupos de información que derivó en dos tipos de mapas, por un lado el mapa de sistemas morfogénicos y por el otro el mapa de unidades morfodinámicas. En el primero se expresa tanto en la leyenda como en la explicación del mapa, la morfogénesis del relieve. En el segundo la leyenda del mapa muestra a los procesos morfodinámicos por tipología general y en la explicación del mismo se abordan los aspectos más importantes del mapeo.

En este capítulo se describen los resultados que se lograron con la fragmentación del terreno que compone al área de estudio. En la primera parte de los resultados se mencionan los aspectos morfogénicos del relieve y finalmente en la segunda parte se describen las características morfodinámicas del área de estudio, finalmente en la tercer parte se hacen las conclusiones generales del trabajo. En este sentido no se pretendió una descripción exhaustiva de las 1,268 subunidades o de las 640 unidades morfogénicas existentes, ya que sería poco práctico para los fines de este trabajo, así

que sólo se resaltan las características más relevantes del relieve agrupándolo en sistemas morfogenéticos.

Durante la fotointerpretación se delimitó cada sub-unidad con base en su tipo de relieve, origen, litología y altura relativa. En ese proceso se distinguió entre el origen general y específico.

Para los propósitos de este capítulo la descripción de los resultados comienza con aspectos generales, de tal manera que se mencionan, en primer lugar, las características de los tipos de relieve y posteriormente se mencionan las de los subtipos de relieve. Una vez expuestas cada una de las jerarquías morfogenéticas relativas al tipo y subtipo de relieve, se procede a la explicación de los sistemas morfogenéticos, en donde se resaltan los aspectos más importantes que los identifican.

La información de los tipos y subtipos de relieve dan lugar para centrar la descripción precisa de los sistemas morfogenéticos, porque se abordan las generalidades existentes en el relieve y la explicación de los sistemas resalta lo más relevante.

Los sistemas morfogenéticos fueron definidos con base en criterios litológicos, morfoestructurales y morfogenéticos. Se dividió al área de estudio en cuatro sistemas que para la escala de la información es un número adecuado, una de las razones para que fueran cuatro sistemas se fundamenta en la idea de evitar dificultades en el manejo de las jerarquías y en la congruencia espacial de cada sistema (Lugo, 1992).

Las unidades y sub-unidades que fueron identificadas poseen su carácter individual, que a su vez definen en conjunto las características de cada sistema morfogenético a que pertenecen. De esta forma, se destacan las características de los cuatro principales tipos del relieve, con base en esto se describen los resultados obtenidos a partir de los tipos de relieve, posteriormente la descripción de los subtipos de relieve, con este preámbulo se parte a la explicación de los mapas morfogenéticos obtenidos. Cada mapa muestra las unidades morfogenéticas anidadas en un sistema morfogenético dentro del que existen varios subsistemas que fueron establecidos considerando la homogeneidad de las unidades morfogenéticas y también en los lineamientos existentes por presencia de fracturas o fallas, en este sentido un tercer criterio fueron los cambios litológicos

observados durante la fotointerpretación.

Los resultados de la cartografía morfogenética se presentan con la siguiente secuencia:

- Descripción de los tipos de relieve.
- Subtipos.
- Sistemas morfogenéticos.

5.1 TIPOS DE RELIEVE

5.1.1 Laderas de montaña.

Las laderas de montaña se definen como el tipo de relieve que por su prominencia sobresalen del resto de las formas circundantes dentro de un área determinada. El criterio principal que las define es la altura relativa, a partir de 200 m y más, se considera al relieve como montañoso, en este sentido, el relieve se constituye de laderas de montaña pero también de otros elementos de menores dimensiones y de dimensión local como: superficies cumbrales, porciones inferiores, medias y superiores de la misma ladera que ha sido fragmentada. La altura absoluta de estas laderas se encuentra entre los 2,500 y 2,800 msnmm (Figura 5.2). La pendiente media es de aproximadamente 25° y en algunos casos llega a ser mayor a 45°. Se constituyen de rocas volcánicas terciarias, tobas silicificadas y en el sector NW del área de estudio se componen de rocas calizas cretácicas plegadas.

Son generalmente abruptas y propensas a los fenómenos de remoción en masa e incisión vertical, ocupan el 43% del total del área de estudio, que es de 430 km² aproximadamente (Figura 5.3).

5.1.2 Lomeríos.

Los lomeríos se distribuyen en gran número sobre la parte central del área de estudio, aunque están presentes en toda ella, abarcan una superficie de 149 km² y ocupan el 35% del total del área (Figura 5.4 y Tabla 5.1), se orientan en sentido SW-NE. La altura relativa para determinar las distintas clases de los lomeríos partió de una clasificación ya establecida (Tapia-Varela y López-Blanco, 2002); para los lomeríos bajos

(Lob) se considera un rango de entre 50 y menos de 100 m, para los lomeríos medios (Lom) entre 100 y menos de 150 m, para lomeríos altos (Loa) entre 150 y menores de 200 m.



Figura 5.2 Laderas de montaña, al noroeste del área de estudio compuestas de depósitos piroclásticos.

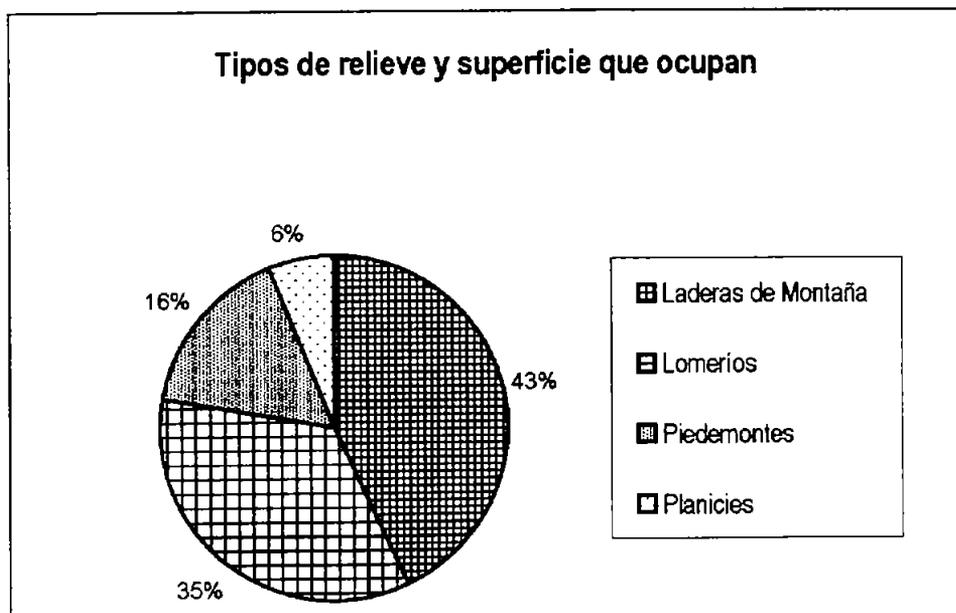


Figura 5.3 Grafica que muestra la superficie que ocupan del área de estudio los tipos de relieve.

Son generalmente formas suaves de poco contraste topográfico, pero con características peculiares, como los procesos erosivos dominantes y la litología. La localización de estas formas del relieve está ligada a la toba Llano de Lobos (Mitre, 1973; Cruz Cisneros y Rzedowski, 1980; Rincón, 1999). De tal manera que su presencia se vincula directamente a estas rocas de origen volcánico. Para los lomeríos altos, la altitud es en promedio de 2,300 msnmm.



Figura 5.4 Lomeríos bajos en primer plano, al fondo se observan laderas de montaña, en el centro se sitúa el pueblo de Concepción Buena Vista.

5.1.3 Piedemontes.

Cabe señalar que los piedemontes, en el área de estudio son locales y no constituyen las formas de gran extensión como las hay en ambientes de grandes aportes de materiales para su formación. Para efectos prácticos se les nombró de esa manera, aún cuando en muchos de los casos no son formas acumulativas. (Figura 5.5).

Tipos de relieve	km ²
Laderas de Montaña	185
Lomeríos	149
Piedemontes	70
Planicies	26
Total	430

Tabla 5.1 Tipos de relieve y el área que ocupan.



Figura 5.5 Piedemonte local, en la porción inferior que delimita la línea punteada, formado por la acumulación de derrubios, en estos suelos generalmente crecen pastizales. Los depósitos de este tipo están sujetos a una dinámica erosiva hídrica por escorrentía laminar y la formación de algunos cauces que cortan al piedemonte (e = erosión, s = suelo, g = procesos gravitacionales).

5.1.4 Planicies.

Son básicamente planicies aluviales que se originaron por la acumulación de arenas cuarcíferas, arenas finas limos y arcillas, están distribuidas en toda el área de estudio, siendo la mayoría de ellas de dimensiones menores en comparación con el resto de las (UM). Varias planicies aluviales son de dimensiones locales, intermontanas e interlomeríos.

5.2 SUBTIPOS

5.2.1 Laderas de Montaña Altas (Lma).

Son tipos de relieve que se localizan en la porción NE del área de estudio, están formadas de rocas carbonatadas plegadas de la formación Caliza Teposcolula, y se localizan en el sistema morfogénético que lleva el mismo nombre (Ferrusquía, 1970; Mitre, 1973). Son las formas con mayor prominencia, llegan a tener altitudes máximas de 2,800 msnmm. Se identificaron cuatro elementos de esta categoría que en conjunto abarcan una superficie de 36 km² y son el 8% del total del área de estudio como tipo de relieve (Tabla 5.2), tienen pendientes medias de 30°, el intervalo de altura relativa en donde se ubican es de entre 1,000 y menor a 1,500 m. Se caracterizan por presentar grandes fracturas y dislocamientos que son evidencia de actividad tectónica. Son generalmente laderas convexas fracturadas o afalladas en sentido N-S, en la fotointerpretación se identificó un anticlinal que tiene esta orientación. Tienen las superficies cumbrales más extensas; son suaves, convexas y conservan cierta homogeneidad en cuanto a geometría.

En ellas los procesos kársticos están presentes en el desarrollo del lapiaz, seguramente existen formas endocársicas aunque no fueron observadas directamente, se menciona la presencia de cuevas y de manantiales subterráneos que primero se pierden en un sumidero y aparecen a manera de salto en la vertiente occidental del río Xiquila, que drena hacia el norte para después unirse al río Grande y posteriormente al Sto. Domingo que forman la cuenca alta del Papaloapan (Rincón, 1999) (Figura 5.6).

Tabla 5.2 Se muestran los distintos subtipos de relieve, asimismo se indica la superficie que ocupan.

Subtipo de relieve	km ²
Lma c	36
Lmm c	15
Lmb c	29
Lmb v	105
Loa c	1
Loa v	7
Lom c	4
Lom v	55
Lob c	0.6
Lob v	81
Pm	70
Pal	26
Total	429.6
c = Calizas	
v = rocas volcánicas	

Lma c = Laderas de montaña altas; Lmm c = Laderas de montaña medias; Lmb c = Laderas de montaña bajas; Lmb v = Laderas de montaña bajas; Loa c = Lomeríos altos; Loa v = Lomeríos altos; Lom c = lomeríos medios; Lom v = Lomeríos medios; Lob c = Lomeríos bajos; Lob v = Lomeríos bajos; Pm = Piedemonte; Pal = Planicie aluvial; c = caliza; v = rocas volcánicas.



Figura 5.6 Laderas de montaña alta, constituidas por calizas del cretácico, son las montañas más altas del área de estudio y se localizan en el sistema morfogenético Teposcolula.

5.2.2 Laderas de Montaña Media (Lmm).

Son el conjunto de formas del relieve con altura relativa de entre 600 y menos de 1,000 m, se componen de rocas calizas plegadas del Cretácico, pertenecen a la misma estructura de rocas carbonatadas de la Caliza Teposcolula. Su forma es predominantemente cóncava y en menor medida convexa, son muy similares a las laderas de montaña alta (Lma), sin embargo, por altura relativa están situadas una categoría por debajo de las primeras. La pendiente media es de 30°, su altitud va desde 2,100 a 2,700 msnmm. Ocupan una superficie de 15 km² y cubren como tipo de relieve el 3% del total del área de estudio. No se encuentran en otra parte del área de estudio debido a la altura relativa que tienen y a su asociación directa con las calizas de estratificación masiva y plegadas, que se encuentran, en su mayoría, con las capas verticales (Figura 5.7).

5.2.3 Laderas de Montaña Baja c (Lmb c).

Están constituidas de roca caliza (c) de la misma formación a la que pertenecen los dos anteriores subtipos de relieve. Son elementos geomorfológicos con rasgos suavizados aunque no dejan de ser abruptos, son laderas casi rectas con tendencia a la convexidad. Ocupan el 7% del área de estudio, así como una extensión de 29 km², su pendiente media es de 25°, las altitudes dominantes que presentan estas laderas es de 2,300 (Figura 5.6).

5.2.4 Laderas de Montaña Baja v (Lmb v).

Abarcan en su mayoría la porción occidental del área de estudio, bordean al resto de las formas del relieve. Están compuestas por depósitos piroclásticos (v) del Neógeno y tobas ácidas a intermedias, interestratificadas con areniscas y depósitos lacustres en el centro del área de estudio. La actividad tectónica que ha desarrollado fallas y fracturas en esta secuencia piroclástica ha influido en la configuración geométrica del propio relieve. Por erosión geológica se han generado formas similares a conos, se localizan algunos de éstos elementos hacia el norte del área de estudio dentro del municipio de Concepción Buena Vista; algunos ejemplos son los cerros Colorado, Zotolin, el Púlpito,

entre otros. Abarcan 105 km² y son el 25% del total del área cartografiada, tienen una pendiente media de 25° y su altitud va desde 2,300 m hasta los 2,600 en algunos casos (Figura 5.8).

En la porción occidental del área de estudio se aprecia un notable cambio en la litología, lo que confiere otra morfología a las laderas de montaña, se trata de tobas altamente silicificadas de pseudoestratificación masiva, más aún que las tobas del centro del área, e intercaladas con una capa resistente y otra deleznable (Ferrusquía et al., 1970). Son laderas escarpadas y alargadas en sentido SW-NE, son rectas y convexas, con gran actividad en cuanto a procesos de remoción en masa. Su altura relativa es de entre 200 y menos de 600 m y la altitud está entre los 2,600 y 2,700 msnmm.

5.2.5 Lomeríos Altos c (Loa c).

Son pocos los lomeríos que componen a esta clase, sin embargo los criterios para determinar los tres distintos subtipos de lomeríos con base en la altura relativa y topografía ha sido respetada.

Esta categoría forma parte del sistema morfogénico Teposcolula, del cual se hablará más adelante. Están formados de caliza y comparten el entorno inmediato con las laderas de montaña alta, media y baja c, por lo que su ambiente morfogénico es similar al de los tipos de relieve antes citados. La superficie que ocupan es de 1 km² y cubren un porcentaje menor al 1% del área de estudio, tienen pendiente media de 13° y altitud de entre 2,200 y 2,400 msnmm, el intervalo de altura relativa en donde se encuentran es de entre 150 y menos de 200 m, lo mismo que para los lomeríos altos de rocas volcanoclásticas.

5.2.6 Lomeríos Altos v (Loa v).

Generalmente son los que sobresalen del resto de los lomeríos porque se presentan como cerros aislados, se componen de rocas volcánicas del mioceno, específicamente de tobas ácidas. Tienen pendientes de 15 a 20°, y su altitud está entre los 2,300 a 2,400 msnmm, sus laderas son en general convexas con tendencia a rectas. Ocupan una superficie de 7 km² que equivale al 2% del área de estudio (Figura 5.9).

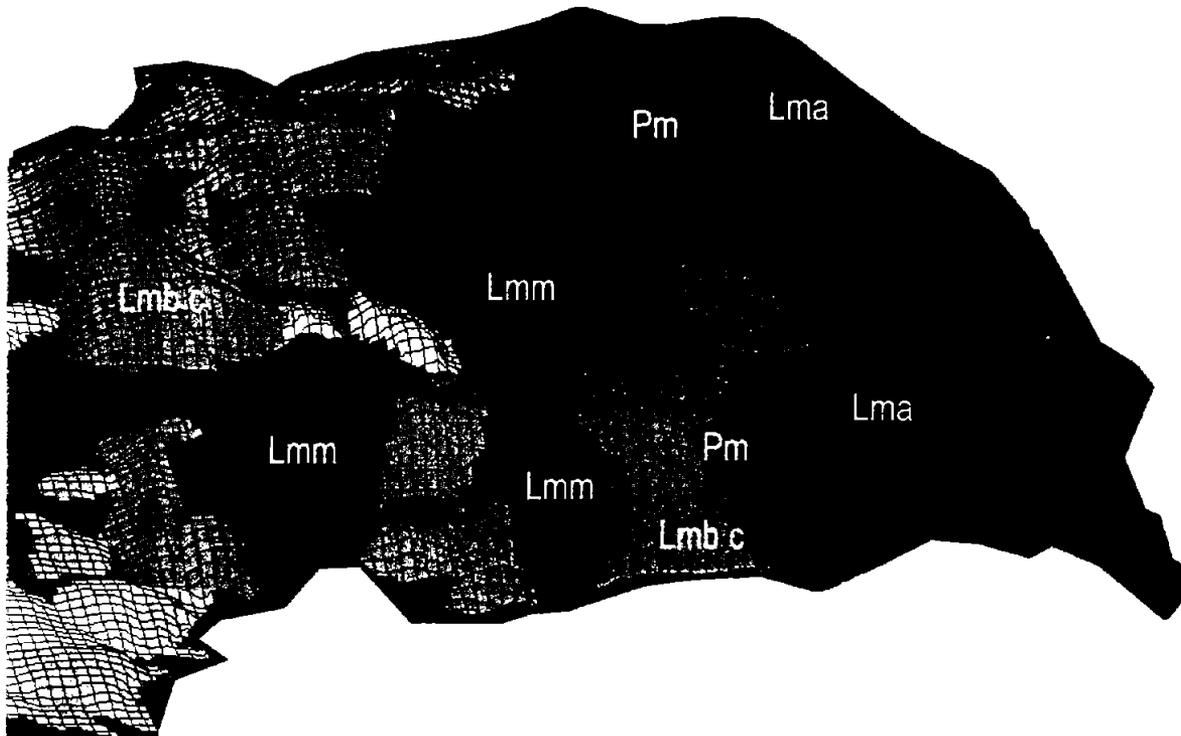


Figura 5.7 Se muestra un esquema en perspectiva tridimensional del sistema Teposcolula constituido de calizas del cretácico, en el que se localizan: Lma = Laderas de montaña alta; Lmm = Laderas de montaña media; Lmb c = Laderas de montaña baja de calizas; Pm = Piedemonte.



Figura 5.8 Laderas de montaña baja de rocas volcánicas de la formación Yanhuitlán, perteneciente al sistema morfogénético del mismo nombre se localiza en el sur del área de estudio.

5.2.7 Lomeríos Medios c (Lom c).

Se distribuyen en el área de las rocas carbonatadas del NE del área de la presente investigación, abarcan 4 km² y ocupan el 4% del área total. La pendiente media de estos elementos del relieve es de 12° y su altitud media es de 2,200 msnmm, se les ubica dentro del intervalo de altura relativa que va de entre 100 y menos de 150 m, lo mismo que para los lomeríos de rocas volcanoclásticas se trata de elementos con laderas generalmente convexas tendientes a ser rectas, su distribución se restringe a la Caliza Teposcolula, aunque hay un elemento aislado en el extremo sur del área de estudio.

5.2.8 Lomeríos Medios v (Lom v).

Están distribuidos en casi toda el área de estudio con excepción del área de laderas de montaña de rocas calizas plegadas del cretácico. Los lomeríos que forman este orden jerárquico del tipo de relieve, en total se localizan en una superficie de 55 km² y como subtipo de relieve ocupan el 13% de la superficie total, además se componen de tobas ácidas silicificadas pseudoestratificadas en alternancia con capas de arenisca y depósitos epiclásticos. Su altura relativa es de entre 100 y menos de 150 m, la altitud es de 2300 a 2400 msnmm, la pendiente media es de 10° en algunos elementos llega a ser de 25°, por su geometría en las laderas se clasificaron como laderas rectas (Figura 5.10).

5.2.9 Lomeríos Bajos c (Lob c).

Se localizan solo dentro del sistema morfogenético Teposcolula, es decir en el área de calizas, así que comparten varias similitudes morfogenéticas con las laderas de montaña alta. Ocupan menos del 1% de área y cubren 600 m², la altitud que poseen es desde 2,100 y otros elementos llegan a los 2,400 m, tienen pendiente media de 7°, generalmente sus laderas son rectas aunque con tendencia a la convexidad.

5.2.10 Lomeríos Bajos v (Lob v).

Son los más numerosos de esta categoría del relieve, se localizan en el centro del área de estudio, en su mayoría están en contacto con planicies aluviales, en conjunto

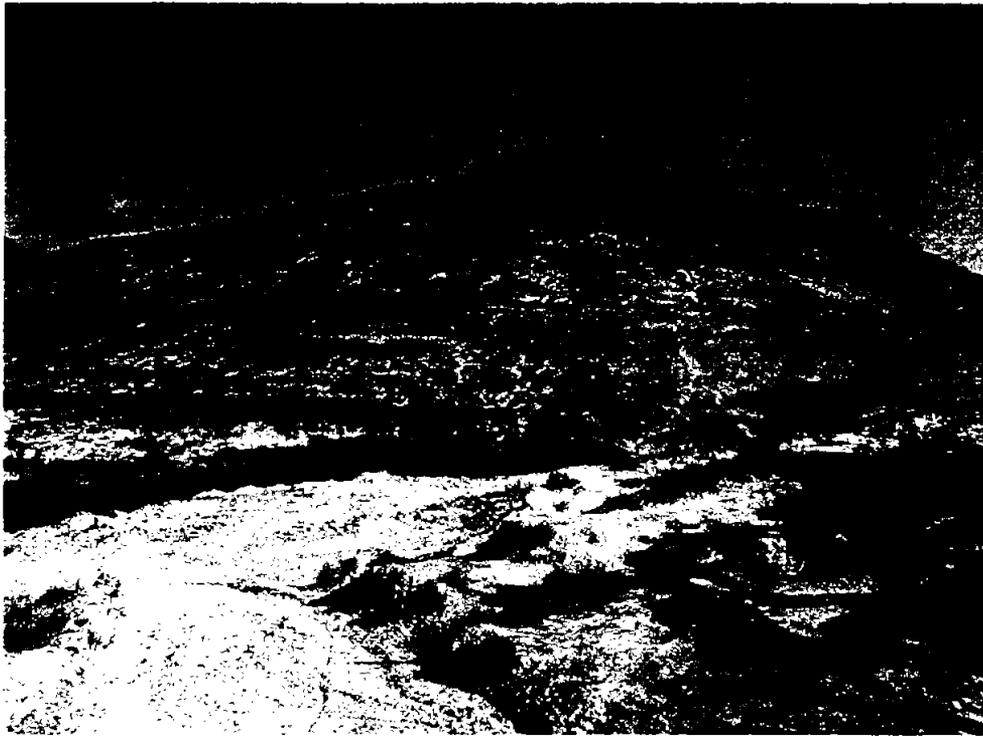


Figura 5.9. Lomerío alto constituido por rocas de la Toba Llano de Lobos, localizado en la porción central del sistema morfogénico Concepción Buena Vista, muestra uno de los mas severos procesos de erosión hídrica con desarrollo de *rills*.



Figura 5.10. Lomeríos medios de rocas volcánicas, localizado en el sistema morfogénico Concepción Buena Vista, generalmente estos lomeríos presentan vegetación arbórea de encino formando comunidades de individuos dispersos.

forman pendientes suaves y constituyen un relieve de poco contraste topográfico, por su localización en el centro del área cartografiada dan el aspecto de una depresión, puesto que hacia los extremos NW y SE, se localizan laderas de montaña que bordean a este conjunto de lomeríos. Ocupan una superficie de 81 km² que es un 19% del total de la superficie cartografiada, tienen pendiente media de 7° y están dentro del intervalo de altitudes que van de los 2, 200 a 2,300 msnmm (Figura 5.11).

5.2.11 Piedemontes complejos (Pmc).

Se localizan al pie de las laderas de montaña, de los lomeríos y otros de menor dimensión espacial entre los lomeríos y las laderas de montaña, algunos se caracterizan por situarse sobre estructuras que han sido erosionadas durante miles o millones de años y que dan el aspecto de un piedemonte, pero sólo por forma, de esta manera se les considera formas complejas aunque su origen es claro. Se podría considerar como piedemontes a aquellas formas resultantes de la erosión geológica y que por posición topográfica y forma geométrica sean análogas del piedemonte típico, sólo aclarando que son de origen erosivo geológico. Cubren en conjunto una superficie de 70 km² que equivale al 16% del área total, la geometría que presentan es recta y su altitud media está entre los 2, 200 m, la pendiente media es de 6°.

5.2.12 Planicies aluviales (Pal).

Por su distribución, estas planicies se localizan en toda el área de estudio, aunque una sobresale de entre todas por su extensión, de 16 km de longitud, ésta se dispone espacialmente de tal manera, que divide en dos sectores al área cartografiada. En conjunto todas las planicies delimitadas tienen una superficie de 26 km² equivalentes al 6% del total cartografiado, la pendiente media es de 2°, la altitud relativa va de los 2,150 a los 2,250 msnmm (Figura 5.12).

5.3 *SISTEMAS MORFOGENÉTICOS*

El área de estudio fue dividida en cuatro sistemas morfogénicos, que integran varios elementos entre los que se encuentran distintos tipos de relieve, subtipos,



Figura 5.11 Rasgos de erosión hídrica sobre lomeríos bajos de rocas volcanoclásticas, cerca del poblado de Concepción Buena Vista.



Figura 5.12 Planicie aluvial cerca del poblado de San Antonio Abad, la mayoría de ellas son utilizadas como tierras de cultivo de temporal.

unidades y sub-unidades morfogénicas. En este contexto se cumple con las características de un sistema, conforme a la teoría general de sistemas en geomorfología (Ahnert, 1998). Como ya se mencionó al inicio de este capítulo, los sistemas fueron delimitados a partir de los principales rasgos del relieve y litológicos que marcan de alguna manera límites geomorfológicos. (Figura 5.13). En tres de los cuatro sistemas fue posible definir con facilidad las fronteras entre uno y otro sistema, sólo se dificultó en el caso de la planicie aluvial, que se denominará *principal* por sus dimensiones espaciales y por su expresión en el relieve del área, la dificultad radicó en el sentido de integración a uno u otro sistema morfogénico. Finalmente, se decidió por fines prácticos integrarla al sistema morfogénico Concepción Buena Vista, tomando como criterio principal la superficie que abarca en las inmediaciones de este sistema.

Antes se mencionó que no se pretende una explicación exhaustiva de las 1,268 sub-unidades delimitadas, así como de las 640 unidades morfogénicas resultantes, sí en cambio se partió de la descripción de tipos y subtipos de relieve que fueron caracterizados precisamente por el detalle alcanzado en la delimitación de las sub-unidades. Con fines prácticos se ha concebido a la unidad, en este caso, como una primera forma de estandarizar la información sin que se pierda el detalle con el que se trabajó, pero aun así es demasiada, por lo que se optó por el sistema morfogénico como una manera de sintetizar la gran cantidad de información obtenida. Después se les agrupó en sistemas a las unidades, así se explican las características más relevantes de cada uno de ellos.

El nombre de los sistemas se propone como una forma de identificarlos con una nomenclatura que se refiera a topónimos o a la unidad litológica con la que guardan estrechos vínculos morfogénicos. De esta manera quedan propuestos los siguientes nombres de los sistemas:

- Sistema morfogénico Concepción Buena Vista
- Sistema morfogénico Yanhuitlán
- Sistema morfogénico Loma Grande
- Sistema morfogénico Teposcolula

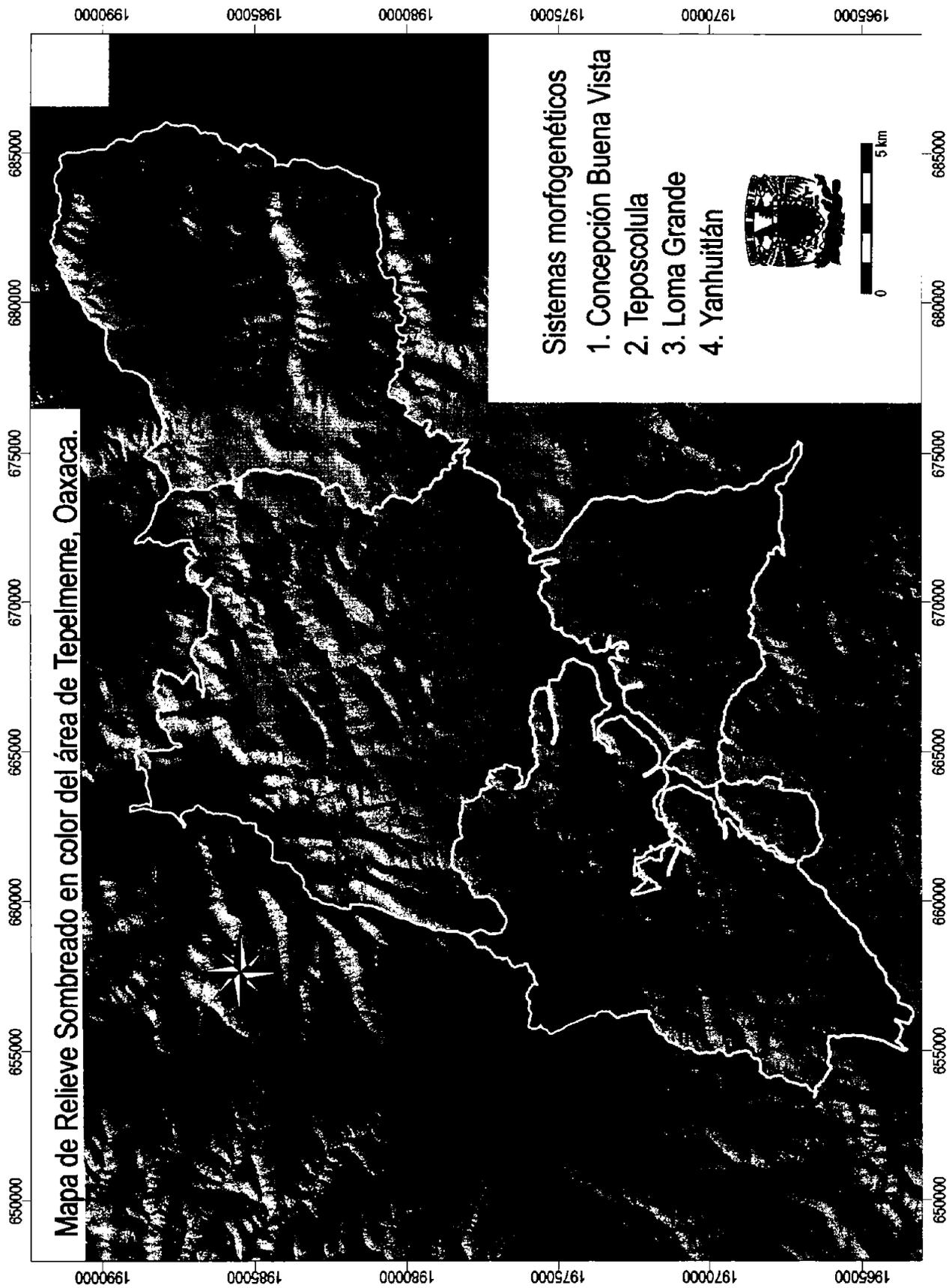


Figura 5.13 Límites de los cuatro sistemas morfogénéticos en los que se dividió el área de estudio.

5.3.1 Sistema morfogénico Concepción Buena Vista.

Se le asignó el nombre del pueblo y municipio sobre el que se distribuye gran parte de este sistema. Al interior se encuentran anidados varios elementos con características específicas; son las sub-unidades, aunque en términos jerárquicos se ciñen a la unidad morfogénica como clase que las integra y homogeneiza (Figura 5.14, Tabla 5.3).

Localizado en el centro del área de estudio, este sistema tiene 157 km² equivalentes al 37% del total de área, es el sistema más grande de los cuatro (Tabla 5.4).

5.3.1.1 Relieve endógeno.

Laderas de montaña baja (Lmb). El origen general del relieve es endógeno, y el específico es volcánico acumulativo de depósitos piroclásticos del Cenozoico. Dentro de los depósitos piroclásticos se diferencian dos litologías principales, una conformada por las tobas ácidas y otra con la presencia de depósitos epiclásticos de la Toba Llano de Lobos.

Constituyen una serie de montañas alineadas en dirección SW-NE, hacia el NW del área de estudio. Ferrusquía et al., (1970) mencionan la presencia de ignimbrita en esta porción montañosa, sin embargo para efectos cartográficos litológicos se adopta el mapa hecho por Mitre (1973), en el que no delimita unidad alguna de estas características. Tienen pendientes que en algunos casos superan los 30°, lo que influye de manera importante en la presencia de procesos gravitacionales; este conjunto de laderas montañosas son predominantemente cóncavas con tendencia a ser rectas y en menor medida convexas, cubren el 35% del total del sistema. Por su inaccesibilidad, son una de las áreas mejor conservadas, en lo que se refiere a suelos y vegetación.

Los lomeríos, en este sistema comparten el mismo origen general y para determinar el origen específico uno de los criterios que se empleó para la diferenciación entre ellos, aparte de la altura relativa, fue el nivel de afectación por actividad tectónica. Estos lomeríos están dispuestos a manera de microbloques y en los límites de ellos se desarrolla un patrón de drenaje encajonado en donde las confluencias de los cauces forman en la mayoría ángulos rectos. Los lomeríos altos están dispersos; es decir no forman grupos homogéneos de formas, y sobresalen del resto por su altura relativa, en

su superficie cumbral poseen relictos de bosque de encino, en la fotointerpretación se les identifica por las manchas oscuras que describen los pequeños bosques. Los lomeríos medios y bajos constituyen conjuntos con mayor continuidad. Fue interesante durante la interpretación de las fotografías aéreas el desplazamiento de algunas de estas estructuras por la presencia de fallas de desplazamiento horizontal y por diques del intrusivo Suchixtlahuaca, por su litología y por la erosión geológica que han experimentado son lomeríos cónicos. Por otro lado el uso del suelo que han tenido desde los últimos dos mil años se les encuentra desprovistos de cualquier vegetación arbórea y arbustiva, a manera de islas presentan algunos manchones de pastizal. La pendiente en estos lomeríos favoreció en otros tiempos su uso agrícola, ahora son básicamente utilizados para el pastoreo de cabras. Son el tipo de relieve predominante. En los lomeríos bajos están constituidos por una litología distinta del resto, sin embargo agrupada dentro de la Toba Llano de Lobos, esto es una asociación de depósitos epiclásticos y toba limo-arcillosa poco consolidada, que se expresan en el relieve como un área topográfica poco contrastante.

5.3.1.2 Relieve exógeno.

De origen específico exógeno acumulativo de depósitos coluviales, los piedemontes, están vinculados litológicamente a las laderas de montaña y a los lomeríos. Se disponen como mantos coluviales inclinados sobre estructuras erosionadas geológicamente, que asemejan por pendiente, forma y posición topográfica a un *pediment*, aunque cabe aclarar que los *pediment* se originan en ambientes desérticos. Ocupan el tercer lugar en extensión dentro del sistema y los depósitos que forman estos piedemontes están siendo removidos por erosión hídrica acelerada. Las planicies se originaron principalmente por actividad aluvial y fluvial, estas planicies al igual que en el anterior caso la mayoría son de expresión local excepto una, la de mayor extensión, 16 km de longitud, se le integró dentro de este sistema por fines prácticos, aunque comparte los aportes de materiales de los sistemas Yanhuitlán y Loma grande, de esta manera se entiende que es una estructura que por sus dimensiones y localización podría fungir como un sistema que funciona por los aportes de otros.

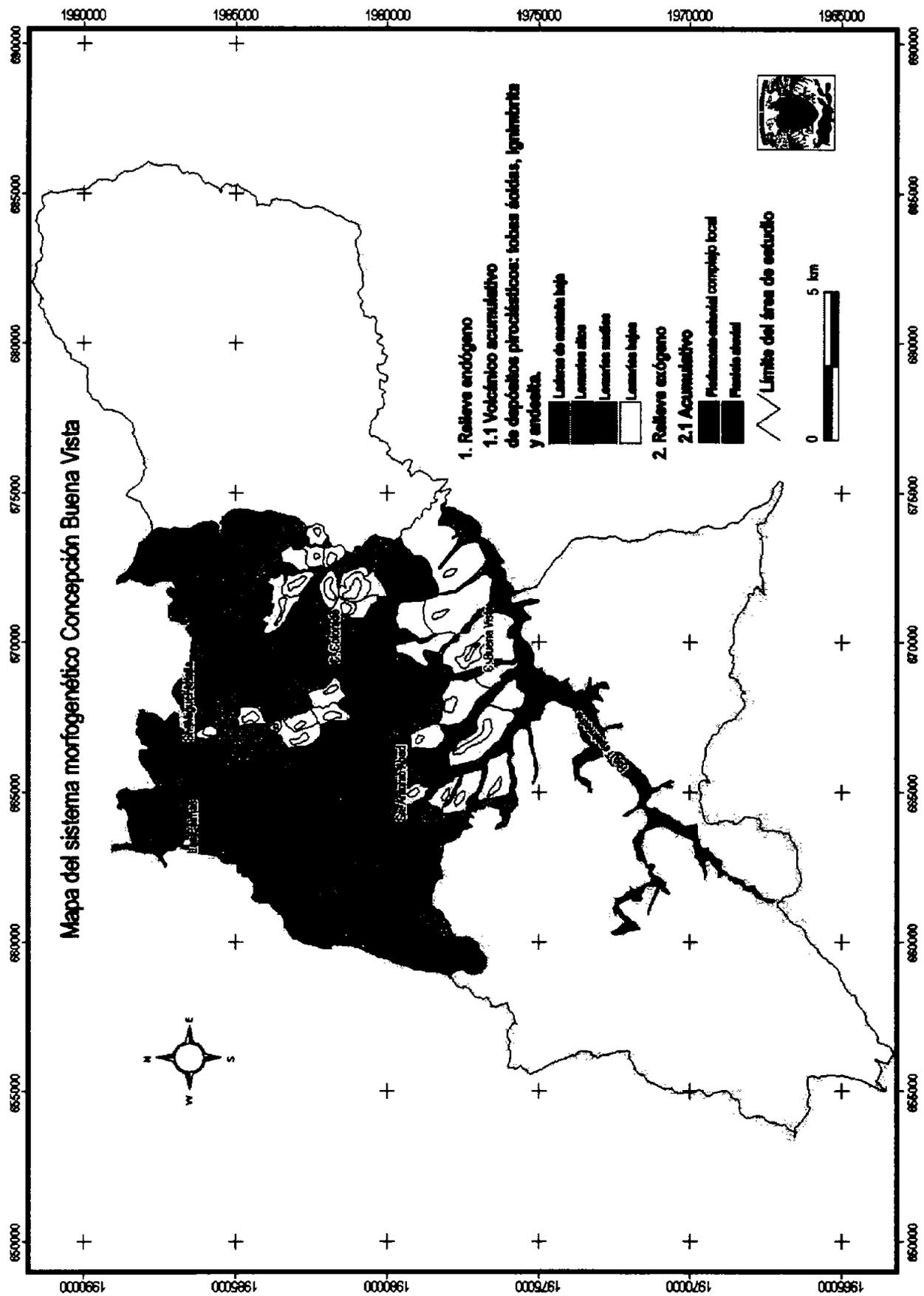


Figura 5.14 Sistema morfogeomorfológico Concepción Buena Vista.

Tabla 5.3 Superficie que ocupa cada uno de los sistemas morfofenéticos.

Sistemas morfofenéticos y superficie que ocupan (valores en km²)	
CBV	157
YAN	112
LMG	49
TEP	111
Total	429

CBV = Concepción Buena Vista; YAN = Yanhuitlán; LMG = Loma Grande; TEP = Teposcolula.

Tabla 5.4 Síntesis de las características del sistema morfofenético Concepción Buena Vista.

Origen del relieve	Tipo de relieve	Sub-Tipo	Edad	Litología	Clases de relieve ^a			Sup. km ²	
Endógeno volcánico acumulativo	Laderas de Montaña	Laderas de Montaña Baja v	Pos-Mioceno Temprano (r,e)	Andesita/Tobas andesíticas	2160	380	21	cóncava	54
		Lomeríos	Lomeríos Altos v	Oligoceno-Tardío-Mioceno Temprano (r,e)	Tobas andesíticas	2191	170	14	recta
	Lomeríos Medios v		Tobas andesíticas		2169	130	11	recta	27
	Lomeríos Bajos v		Tobas andesíticas, epidésicas, lm-ar		2117	60	5	recta	30
Exógeno acumulativo	Piedemonte	Piedemonte	Holoceno (r,e,f)	Cdación	2110	60	10	recta	24
Exógeno acumulativo	Planicie	Planicie Aluvial	Holoceno (r,e,f)	Aluvión	2085	60	2	recta	17

Claves de edad: e = estructura, r = roca, f = forma.

^a Las clases de relieve están señaladas de la siguiente manera: altitud media en m, altura relativa en m, pendiente media en grados y geometría de ladera.

5.3.2 Sistema morfofenético Yanhuitlán.

Es nombrado así porque en la mayoría de las geoformas de este sistema se encuentra la litología característica de la formación Yanhuitlán (Ferrusquía et al., 1970). Figura 5.15, Tabla 5.5). Las dimensiones de este sistema son: 112 km² y 26% del área total por sistemas.

5.3.2.1 Relieve endógeno.

Las laderas de montaña baja, lomeríos altos, medios y bajos, de este sistema son de origen específico endógeno volcánico acumulativo de depósitos piroclásticos e ignimbríticos, son unidades morfofenéticas, que en mayor o menor medida están afectadas por la tectónica regional, al igual que toda la Mixteca Alta, y juntos forman relieves abruptos que caracterizan al sistema porque ocupan cerca de un 80% de la superficie del mismo, presentan las pendientes más altas, por lo que tienen un gran potencial de presentar procesos erosivos hídricos por flujo concentrado y procesos de

remoción en masa. En algunos casos el fracturamiento de estas formas es mayor, influenciado por la litología, de esta manera se comportan dentro de toda el área de estudio las distintas unidades morfogenéticas. Las laderas de montaña bajas se localizan en el borde occidental del sistema, son montañas fracturadas que según Ferrusquía et al. (1970) en la superficie cumbral de estas montañas hay rastros de la andesita Yucudaac.

Los lomeríos se localizan en el centro del sistema y se constituyen de la parte tobácea y de arenisca de la Formación Yanhuítlán, por lo que en ellos se presentan áreas con *badlands*. Contrastan topográficamente con las laderas de montaña porque son significativamente menos prominentes y con superficies cumbrales suaves y amplias. En este sistema los lomeríos empiezan a presentarse menos aislados que en el sistema Concepción Buena Vista. Sólo resalta una estructura sumamente particular, un lomerío medio de composición litológica distinta y de configuración geométrica diferente al resto de lomeríos por sus atributos litológicos, se trata de un afloramiento de la Caliza Teposcolula. En este sentido, es de origen endógeno estructural plegado de rocas sedimentarias marinas del Mesozoico, en el se desarrolla lapiaz como la principal actividad cárstica vista en campo (Figura 5. 16).

5.3.2.2 Relieve exógeno.

En general todos los relieves exógenos de los cuatro sistemas son acumulativos complejos, los piedemontes se componen de coluvión principalmente y en las planicies locales, algunas intermontanas, los materiales son aluvión, pero la característica que los sitúa como formas complejas es precisamente la actividad erosiva que diseca por un lado a las planicies y por otro reduce la extensión de los mantos coluviales que forman estos exiguos piedemontes.

5.3.3 Sistema morfogenético Loma Grande.

Se delimitó como sistema por su configuración geométrica, es una estructura triangular que es el resultado de la actividad tectónica. Esta estructura es reconocible tanto en los mapas topográficos y de relieve sombreado, así como en las fotografías

aéreas (Figura 5.17, Tabla 5.6). Por sus dimensiones espaciales es el más pequeño de los cuatro sistemas, con una superficie de 49 km² ocupa el 11% de área total por sistema.

5.3.3.1 Relieve endógeno.

En este sistema sólo se presentan lomeríos medios y bajos, cuyo origen específico es endógeno volcánico acumulativo de depósitos piroclásticos y epiclásticos. En este sistema, las superficies cumbrales superan el kilómetro cuadrado de extensión, son planas y han sido utilizadas desde tiempos prehispánicos como áreas de cultivo, en la actualidad se llevan a cabo prácticas de reforestación en algunos sectores, de estas superficies cumbrales, y la agricultura es esporádica. Sobre las laderas y superficies cumbrales de este conjunto de lomas los procesos de erosión hídrica son predominantemente de flujo laminar, aunque en donde las pendientes aumentan se generan procesos de escorrentía en cauces y avance de cabeceras. Los procesos gravitacionales son comunes en este sistema, en sus límites fueron observados algunos asentamientos que parecen ser deslizamientos rotacionales (Figura 5. 18).

5.3.3.2 Relieve exógeno.

Dentro de las unidades que forman parte del relieve exógeno están algunos piedemontes y planicies aluviales, cuyo origen específico es exógeno acumulativo de depósitos coluviales y deluviales, para los piedemontes y de acumulación de depósitos aluviales y fluviales en el caso de las planicies que integran al sistema. Las planicies intermontanas, de dimensiones locales, actualmente son disecadas por corrientes intermitentes y al igual que en los sistemas anteriores los cauces han profundizado hasta cinco metros en promedio los materiales de tales planicies, lo que provoca un avance lateral de las paredes del cauce.

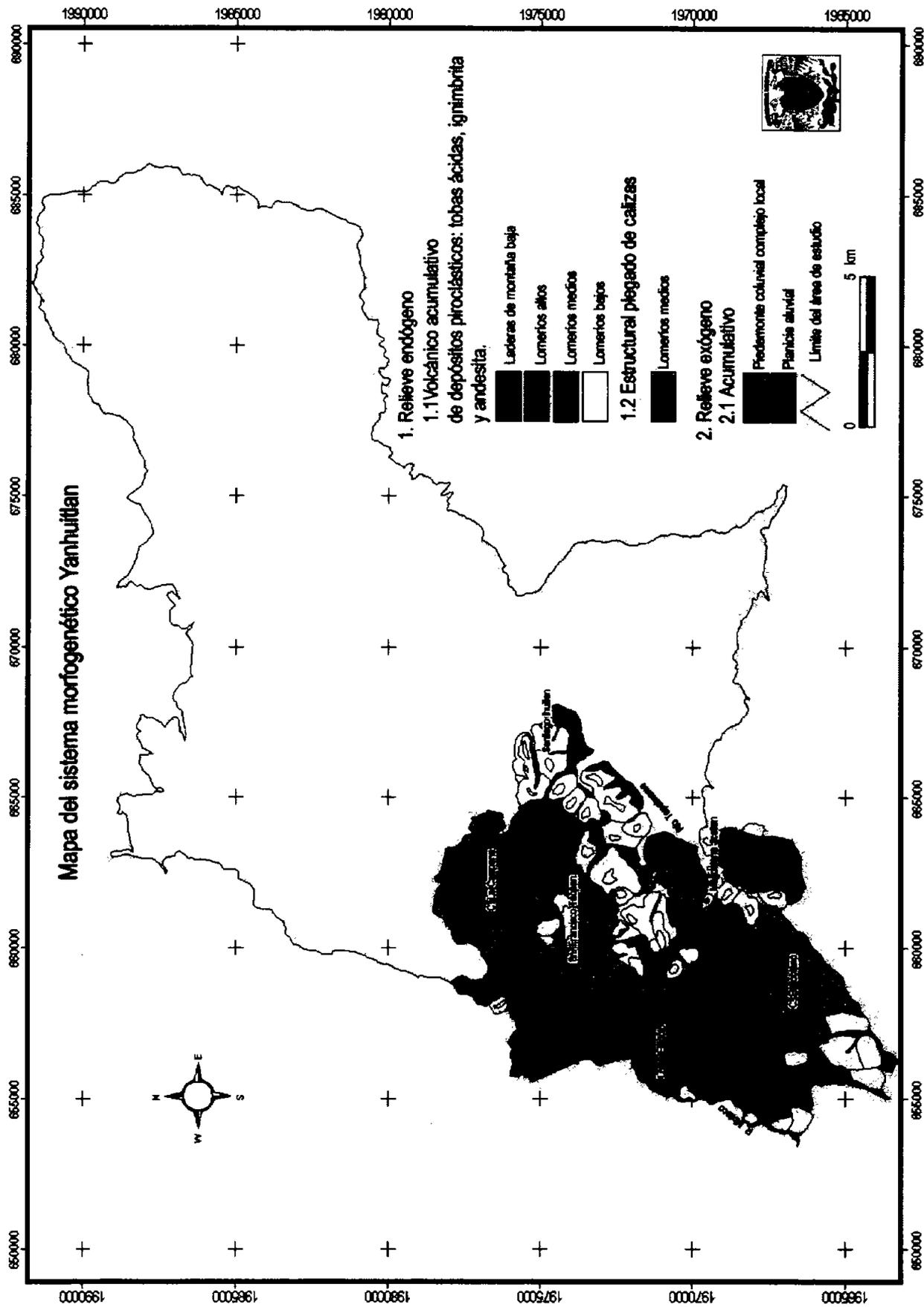


Figura 5.15 Sistema morfogénico Yanhuítlan.

Tabla 5.5 Síntesis de las características morfogénicas del sistema Yanhuitlan.

Origen del relieve	Tipo de relieve	Sub-Tipo	Edad	Litología	Clases de relieve				Sup. km²
Endógeno volcánico acumulativo	Laderas de Montaña	Laderas de Montaña Baja	Pos-Mioceno Temprano (r, e)	Andesitas/Tobas andesíticas	2371	250	20	convexa	50
	Lomerios	Lomerios Altos v	Oligoceno-Tardío-Mioceno Temprano (r, e)	Tobas andesíticas	2304	140	16	recta	2
		Lomerios Medios v	Paloceno Tardío-Eoceno Medio (r, e)	Tobas andesíticas epclásicas, lm-ar	2266	120	12	recta	12
		Lomerios Medios c	Aptiano-Cenomaniano (r, e)	Calizas	2228	140	7	recta	2
Endógeno estructural plegado	Lomerios Bajos	Lomerios Bajos	Paloceno Tardío-Eoceno Medio (r, e)	Tobas andesíticas epclásicas, lm-ar	2171	60	7	recta	21
Endógeno volcánico acumulado vivo		Planicie	Planicie Aluvial	Holoceno (r, e, f)	Coluvion	2225	60	10	recta
Exógeno acumulativo-denudativo	Planicie	Planicie Aluvial	Holoceno (r, e, f)	Aluvion	2142	30	4	concava	4

Claves de edad: e = estructura, r = roca, f = forma.

* Las clases de relieve están señaladas de la siguiente manera: altitud media en m, altura relativa en m, pendiente media en grados y geometría de ladera.



Figura 5.16 Lapiaz desarrollado en un lomerío medio del sistema morfogénico Yanhuitlán.

5.3.4 Sistema morfogénico Teposcolula.

Se le denominó así a este sistema porque esta constituido casi en su totalidad de rocas sedimentarias de la formación Caliza Teposcolula (Figura 5. 19, Tabla 5.7). En su interior se encuentran las montañas más altas del área de estudio, mantiene cierto aislamiento en el sentido de que los pueblos situados en la planicie del río El Rosario son muy pequeños y de escasos pobladores, considerando que la media de población en los pueblos vecinos es de 350 personas (INEGI, 2003). Forma parte de la reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán.

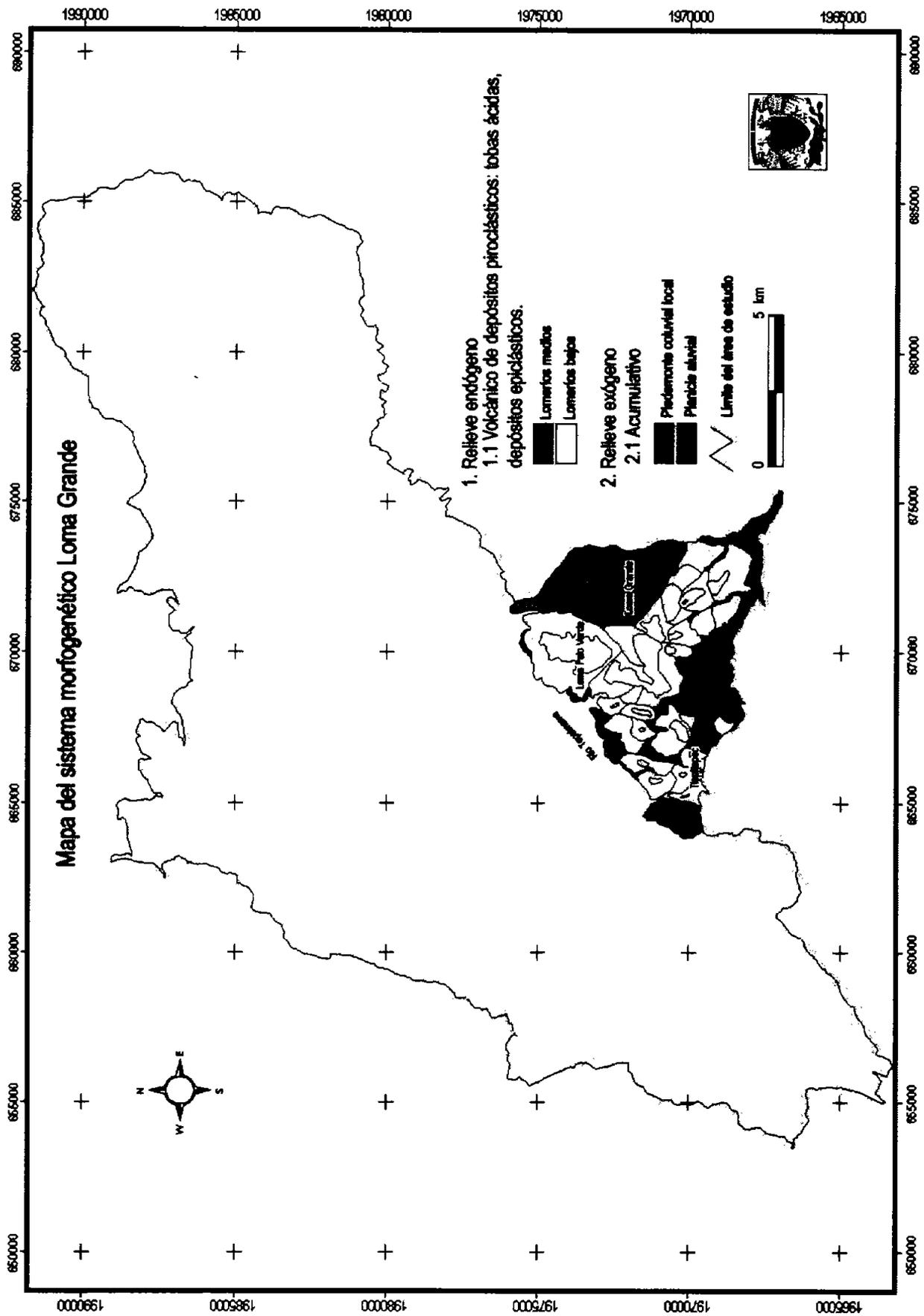


Figura 5.17 Sistema morfogénico Loma Grande.

Tabla 5.6 Síntesis de las características morfogenéticas del sistema Loma Grande.

Origen del relieve	Tipo de relieve	Sub-Tipo	Edad	Litología	Clases de relieve				Sup. km ²
Endógeno volcánico acumulativo	Lomeríos	Lomeríos Medios v	Paleoceno Tardío-Eoceno Medio (r, ei)	Tobas ácidas, epidiascicos, lm-ar	2142	130	6	recta	14
		Lomeríos Bajos v		Tobas ácidas, epidiascicos, lm-ar	2142	73	5	recta	27
Exógeno acumulativo	Piedemonte	Piedemonte	Holoceno (r, e, f)	Coluvión	2119	40	6	recta	5
Exógeno acumulativo	Planicie	Planicie Aluvial	Holoceno (r, e, f)	Aluvión	2037	30	3	recta	3

Claves de edad: e = estructura, r = roca, f = forma

* Las clases de relieve están señaladas de la siguiente manera: altitud media en m, altura relativa en m, pendiente media en grados y geometría de ladera.



Figura 5.18 Deslizamiento, aparentemente rotacional, al sur del sistema morfogenético Loma Grande cerca del poblado Tlapiltepec, se señalan algunos de los principales rasgos morfológicos, la línea continua con líneas cortas perpendiculares indican el escarpe, la dirección del movimiento de la masa se indica con las flechas.

5.3.4.1 Relieve endógeno.

Este sistema es morfogenética y morfodinámicamente distinto de los otros tres sistemas, en él la actividad tectónica ha actuado con mayor intensidad que la actividad climática. Desde este punto de vista, es un relieve que tiene su origen específico en la geodinámica interna, es endógeno estructural-plegado de calizas del mesozoico. El karst que se desarrolla en estas rocas carbonatadas se manifiesta de acuerdo con el clima seco, en la mayor parte del sistema.

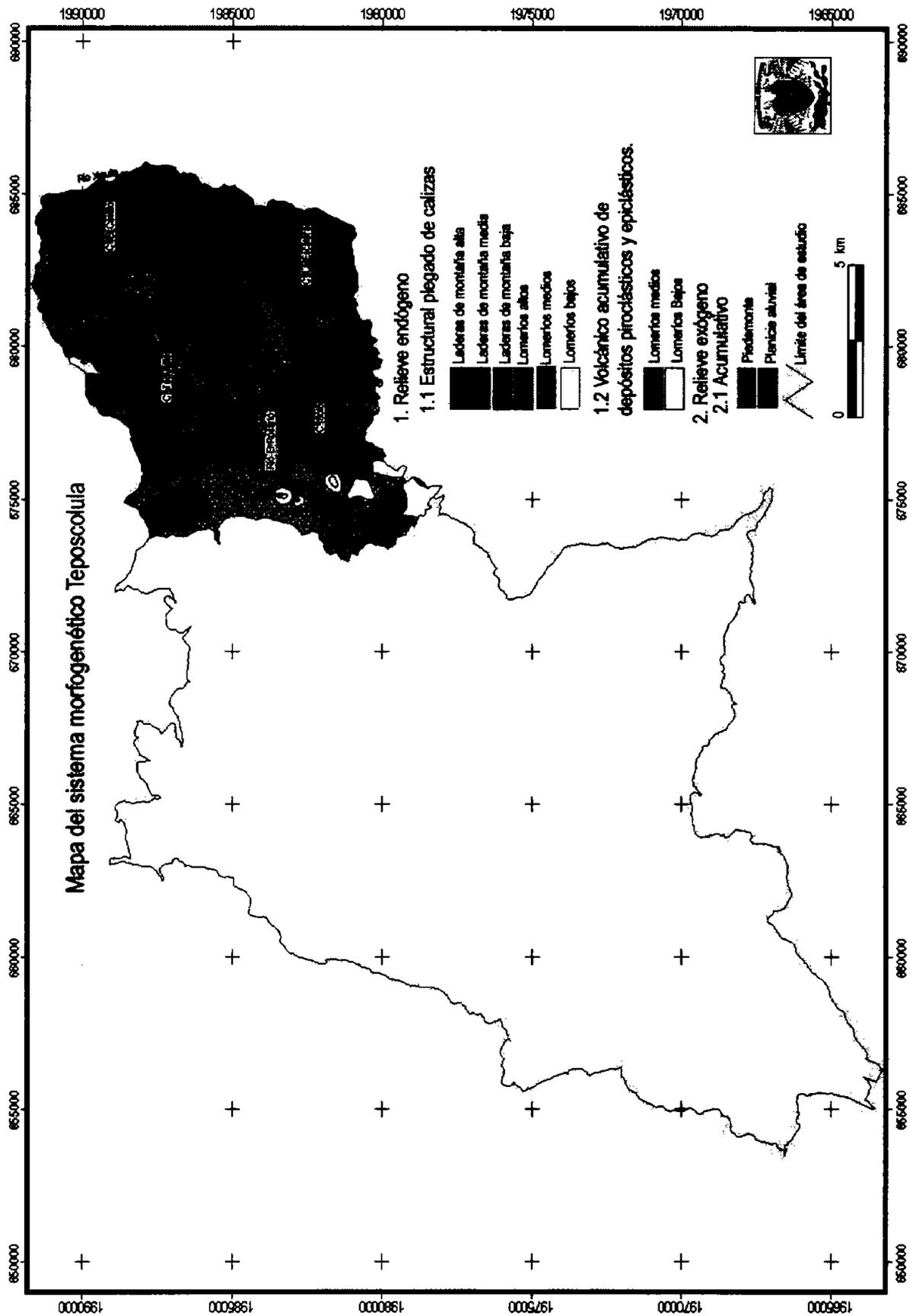


Figura 5.19 Sistema morfogenético Teposcolula.

Tabla 5.7 Síntesis de las características morfogénicas del sistema Teposcolula.

Origen del relieve	Tipo de relieve	Sub-Tipo	Edad	Litología	Clases de relieve			Sup. km ²	
Endógeno estructural de plegamiento	Laderas de Montaña	Laderas de Montaña Alta c	Aplano-Cenozoico (r)	Calizas	2198	970	28	cóncava	36
		Laderas de Montaña Media c			2337	606	22	cóncava	15
		Laderas de Montaña Baja c			2310	280	18	cóncava	30
Endógeno estructural de plegamiento	Lomeríos	Lomeríos Altos c	Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (r, e)	Tobas andesíticas, epidióticas, lm-ar	2224	160	21	convexa	1
Endógeno volcánico acumulativo		Lomeríos Medios v			2101	120	8	recta	2
Endógeno estructural de plegamiento		Lomeríos Bajos c			2166	120	13	recta	3
Endógeno volcánico acumulativo		Lomeríos Bajos v			2067	70	7	recta	1
Endógeno estructural de plegamiento		Lomeríos Bajos c			2158	60	10	recta	2
Exógeno acumulativo	Piedemonte	Piedemonte complejo	Holoceno (r, e, f)	Calizas	2198	140	14	recta	20
Exógeno acumulativo	Planos	Planicie Aluvial	Holoceno (r, e, f)	Aluvión	2106	40	3	recta	1

Claves de edad: e = estructura, r = roca, f = forma.

* Las clases de relieve están señaladas de la siguiente manera: a) altura media en m, b) altura relativa en m, c) pendiente media en grados y geometría de ladera.

Durante la fotointerpretación geomorfológica no se detectaron dolinas, poljés o uválas que son comunes en estas rocas, no obstante los procesos de disolución se manifiestan en la formación de lapiaz. Rincón (1999) relata la existencia de cavernas poco exploradas, como la que se encuentra en el extremo este del río El Rosario, antes de perderse en un sumidero para posteriormente surgir a manera de salto, casi 500 m hacia la vertiente del río Xiquila. Narra el autor cómo el lugar tiene aún importantes vestigios arqueológicos, aunque una razón particular que lo llevó a explorar esta porción NE del área de estudio fue la existencia de un puente natural, mismo que se detectó en la fotointerpretación. Las implicaciones políticas y sociales en tiempos prehispánicos, de esta parte de la cuenca de Coixtlahuaca, le confirieron al lugar la característica de ser un punto estratégico de poder político, porque desde las alturas de los cerros se podía tener control sobre lo que se alcanzaba a ver desde ahí. Por ejemplo como desde el cerro Tequelite y El Castillo, se logra observar hacia el norte el valle de Tehuacán y al sur el resto de la cuenca de Coixtlahuaca (Rincón, 1999). Es además impresionante el desnivel que tiene el río Xiquila con respecto al área de estudio, más de mil metros de profundidad alcanza en el extremo NE del sistema. Las montañas que componen a este sistema están escalonadas debido al fracturamiento y afallamiento en dirección N-S, que es además la dirección del anticlinal, cuyo eje se sitúa aproximadamente a cuatro km en línea recta al este de la autopista México-Oaxaca.

5.3.4.2 Relieve exógeno.

En la base de las montañas que forman a este sistema se sitúan en la desembocadura de los cauces que drenan hacia el río El Rosario se localiza un

pedemonte, de origen específico exógeno acumulativo de depósitos coluviales, deluviales y proluviales, que se forma por la coalescencia de varios abanicos, están en transición con la planicie aluvial que se dispone de manera transversal al eje del anticlinal y a la dirección de los fracturamientos, aunque por la expresión morfotectónica del lineamiento que sigue el río El Rosario, se supone la existencia de una falla de dimensiones mayores.

5.4 MAPA DE UNIDADES MORFODINÁMICAS

La información obtenida principalmente por fotointerpretación fue clasificada en categorías de información morfodinámica que ya se habían definido. Cada categoría indica el tipo de proceso que domina en amplias áreas, en algunas ocasiones de varias decenas de kilómetros cuadrados, razón por la que el mapa puede ser considerado como de carácter general. Lo primero que impedía ser más exacto en el registro de otros procesos morfodinámicos superficiales existentes fue la escala a la que se fotointerpretó. Ante ésta situación, resultaría inconveniente intentar representar gráficamente rasgos de erosión o de actividad gravitacional cuya expresión en el relieve visto en las fotografías aéreas, a escala 1:75,000 fuera de algunos milímetros. Si así se procediera al final se tendrían miles de polígonos muy pequeños que si se representaran en una escala 1:100,000 por ejemplo, perderían toda proporción cartográfica y no aportarían datos fundamentales a la información del mapa.

Cuando se hizo la fotointerpretación de las unidades morfodinámicas, primero fueron definidos los tipos dominantes de erosión hídrica, al mismo tiempo se delimitaron los rasgos característicos, así como las formas que resultan de la actividad gravitacional manifestada en algunas laderas, principalmente como deslizamientos y asentamientos del terreno. En el caso del karst, se identificó principalmente lapiaz, como la más importante actividad disolutiva superficial en rocas carbonatadas a nivel del terreno.

La escala de las fotografías aéreas, 1:75,000, permitió el trazo de áreas con procesos erosivos sin particularizar al interior de cada unidad cartografiada, sin embargo logró elaborarse el mapa de unidades morfodinámicas (UMd) en donde se registran los tipos de erosión más frecuentes, los procesos gravitacionales y de disolución, así como

algunas particularidades de cada proceso observadas durante el trabajo de campo. Las UMD se identificaron, al igual que las UM, mediante técnicas estándar de fotointerpretación. La utilización del mapa de unidades morfogénicas fue básica para el registro y delimitación de las UMD, en donde se observó la relación entre la presencia de las UMD y el tipo de relieve en que se desarrollan. De esta forma se localizaron las áreas pertenecientes a las UMD, además se obtuvo su frecuencia y extensión, principalmente. Posterior a la delimitación de las unidades morfodinámicas se hizo un cruce de información con los mapas, morfogénico y de pendientes principalmente, empleando el SIG ILWIS 3.0 Academic (ITC, 2000), y Arc View 3.2 a. (ESRI, 1999) (Figura 5.20 y Tabla 5.8).

En el área de estudio se observaron varios procesos morfodinámicos superficiales combinados, en los que el principal agente que interviene en ellos es el agua que fluye por efecto de las lluvias, su escorrentía da origen a varias formas erosivas dependiendo del tipo de flujo que se manifieste. Se detectaron varios procesos gravitacionales, en los que al igual que en los procesos de erosión hídrica de suelos se observó una estrecha relación con la geometría del relieve, con la litología y con la actividad antrópica, cuya presencia se remonta al menos desde hace 1,200 años (Rincón, 1999 y 2001; Montes Cruz y López Blanco, 2004).

La siguiente etapa fue la evaluación hecha a los resultados del cruce de mapas, morfogénico y morfodinámico, altimétrico y de pendientes, con esto quedó registrado que las áreas con relieve montañoso y de lomeríos altos presentan una dinámica erosiva hídrica por flujo concentrado, así como una fuerte propensión a deslizamientos rotacionales, caída de bloques, y remoción de materiales litológicos en combinación con la escorrentía concentrada en cauces de poca anchura y profundidad. En áreas de lomeríos bajos, en donde el relieve es radicalmente menos abrupto que en el caso anterior, la escorrentía tiende a ser en forma laminar con desarrollo de microcauces (*rills*). En cualquier tipo de escorrentía se lleva a cabo la remoción de materiales litológicos y suelo no consolidado, sólo que cuando se conjuga además del factor hídrico, la gravedad, y pendiente del terreno surgen variantes de este proceso.

La actividad gravitacional no se restringe a la presencia de los deslizamientos o a la

caída de bloques, se consideró a la remoción gradual de materiales detríticos; como el desplazamiento de los materiales rocosos y el suelo ocurridos durante una tormenta (Morgan, 1994).

En este mapa se presentan datos parciales de una investigación que continuará. No obstante, se ha organizado la información del mismo con una estructura jerárquica similar a la del mapa de unidades morfogénicas (Figura 5.20). Se agrupó a la actividad erosiva hídrica en los principales tipos detectados, asimismo los procesos gravitacionales y de disolución, de tal manera que la lectura del mapa se puede hacer, en un principio, de manera general y posteriormente se observan algunas particularidades detectadas en la fotointerpretación o en campo. Por esta razón, se comentan sólo los aspectos más relevantes (Tabla 5.8).

5.4.1 Flujo concentrado.

En esta categoría se agrupa a una serie de dinámicas enmarcadas en el concepto de erosión hídrica acelerada por flujo concentrado, lo que se refiere a todos los procesos que se detectaron en la fotointerpretación y los rasgos que resultan de una actividad de este tipo, son áreas en donde predomina esta dinámica erosiva, aunque no es la única que existe. Dentro de los límites de estas grandes unidades se presentan concatenados otros procesos, entre los que se encuentran dinámicas erosivas hídricas en escorrentía laminar que se manifiestan en algunos interfluvios, superficies cumbrales convexas, laderas desprovistas de vegetación y en laderas rectas. En las laderas de montaña localizadas al sur del sistema morfogénico Yanhuitlán, la caída de materiales y su rodamiento se combina con la actividad hídrica en los cauces desarrollados en ellas.

5.4.2 Flujo concentrado y disolución.

Estos dos procesos se presentan de manera simultánea en las montañas que se encuentran dentro del sistema morfogénico Teposcolula, constituido por calizas. Están localizados en las laderas inferiores y en el piedemonte que se forma por los aportes de materiales en las vertientes del río El Rosario (Figura 5.20).

Tabla 5.8 Tipos generales de procesos morfodinámicos y la superficie que ocupan.

Proceso morfodinámico	Sup. Km ²
Flujo Laminar	199
Procesos Complejos	71
Remoción en masa y disolución	70
Flujo Concentrado	54
Flujo Concentrado y disolución	14
Remoción en Masa	10
Flujo Laminar y disolución	6
Disolución	3
Total	427

5.4.3 Flujo laminar.

Es el tipo de erosión hídrica que se presenta como dominante en la porción central del área de estudio, abarca a todos los lomeríos, por lo que se presenta dentro de los cuatro sistemas morfogenéticos. Se caracteriza por manifestar tonos grises claros y blancos en las fotografías aéreas, con lo que se facilitó su identificación. A nivel más detallado fue posible observar que se presentan variantes de esta manifestación de la erosión por escorrentía laminar. Aunque no se cartografiaron a la escala del mapa que en este trabajo se presenta, sí se consideró que la litología y la geometría del relieve están actuando como factores importantes en la manifestación de la escorrentía laminar como principal proceso morfodinámico superficial y en los efectos causados por esta dinámica.

5.4.4 Flujo laminar y disolución.

Esta combinación de procesos ocurren en las áreas en donde se encuentran principalmente los lomeríos de laderas y superficie cumbral suave, en donde la caliza es la roca que compone al relieve. Se presenta en el sistema morfogenético Yanhuatlán y en el sistema Teposcolula (Figura 5.20), el lapiaz en forma de oquedades se desarrolla en la roca carbonatada que se ven en algunos casos cubiertos parcialmente con un incipiente suelo.

5.4.5 Disolución.

Como proceso morfodinámico superficial tiene presencia en todo el sistema Teposcolula, sin embargo se consideró como dominante en la ladera sur del cerro La Escalera (Figura 5.20), en donde no hay rasgos o evidencia importante de la presencia de otros procesos. Sin embargo se deduce que el otro proceso que está presente es de escorrentía laminar.

5.4.6 Remoción en masa.

La remoción en masa entendida como un conjunto de procesos gravitacionales, está presente en los relieves abruptos, y generalmente se asocia a deslizamientos y caída de rocas. En las laderas que forman a la vertiente oriental del río Grande que drena hacia el norte y pasa por el caserío de Las Palmas (Figura 5.21), o el río Mixteco, en su porción alta cerca del caserío de San Pedro Nopala (Figura 5.22), al sur del área de estudio fueron observados varios ejemplos de procesos gravitacionales. Dentro del sistema Loma Grande hacia el sur del mismo, se presentan una serie de deslizamientos de dimensiones considerables (Figura 5.18), y otros de menores dimensiones que también reflejan la actividad morfodinámica superficial de este tipo.

5.4.7 Remoción en masa y disolución.

El sistema morfogenético Teposcolula, presenta la combinación de remoción en masa y disolución en sus montañas compuestas de caliza, en donde se desarrollaron importantes depósitos coluviales que forman piedemontes intermontanos, de dimensiones locales, mismos que se encuentran localizados en posiciones topográficas superiores al que bordea el cauce del río El Rosario (Figura 5.20). En ellos se deduce una mayor acción disolutiva. En el cerro El Castillo (Figura 5.20), se presentan dos cambios significativos en la pendiente y en la forma, pasa de ser una estructura cónica a una ladera recta que en su porción inferior constituye a la vertiente occidental del río Xiquila, cuya pendiente es mayor a los 40° y cuenta con un desnivel en una longitud de más de mil metros. Con estas características la presencia de importantes procesos gravitacionales se ve como la dinámica dominante.

5.4.8 Procesos complejos.

En esta categoría han quedado integrados varios procesos, así como las variantes que resultan de los procesos que se desarrollan en los sistemas morfogenéticos. La razón para agrupar un conjunto de procesos en una sola categoría obedece a la magnitud espacial de su expresión en el relieve, es decir, en muchos casos son áreas en donde varios procesos como erosión por escorrentía laminar y por flujo concentrado se manifiestan de manera simultánea, o donde intervienen más de tres procesos, como en el caso de la formación de las cárcavas. En estas áreas, con presencia de cárcavas la actividad importante ocurre en las cabeceras, pero al no ser áreas cartografiables se agruparon en grandes grupos de procesos. Otra actividad que ocurre en las áreas de cárcavas es la actividad gravitacional, la caída de materiales, su rodamiento, así como, la actividad netamente fluvial en los cauces desarrollados aguas abajo. La incisión vertical es otra dinámica englobada en esta categoría, se desarrolla principalmente en los ríos que tienen en el fondo gran cantidad de material acumulado de eventos antiguos, o en aquellos que se desarrollan en fracturas o límites de bloques de origen tectónico.

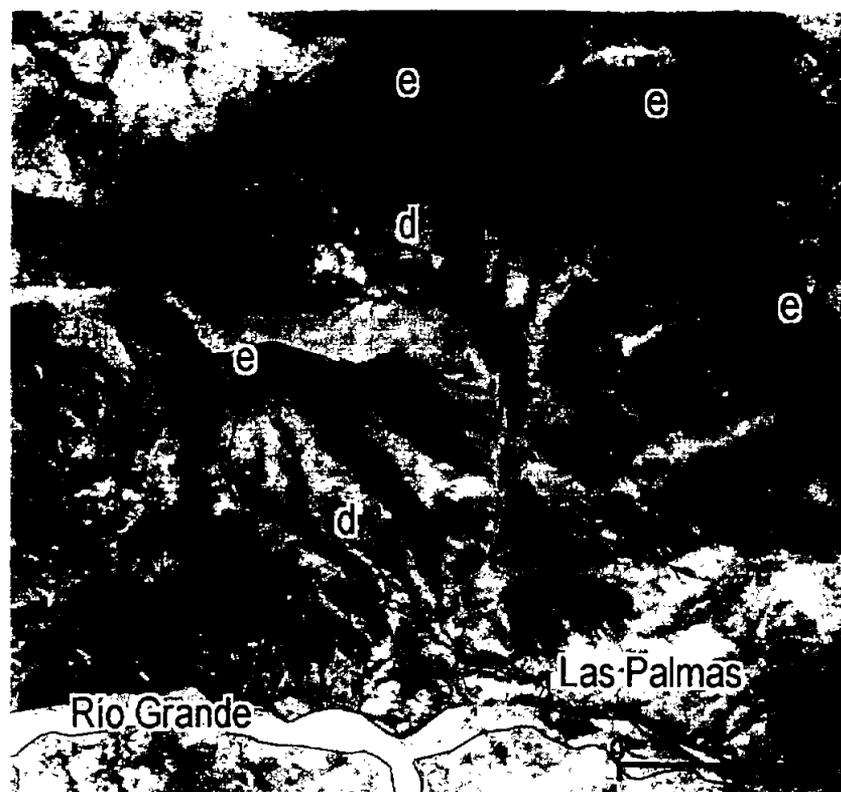


Figura 5.21 Dentro del sistema morfogénético Concepción Buena Vista se localizan al norte del mismo varios procesos gravitacionales activos en las laderas de la vertiente oriental del río Grande, cerca del caserío de Las palmas; e = escarpe y d = cuerpo del deslizamiento.



Figura 5.22 Cerca de San Pedro Nopala se observaron varios deslizamientos como el que muestra, en este caso se generó un escalonamiento del cuerpo deslizado; e = escarpe, d = masa deslizada, la línea continua con pequeñas líneas perpendiculares indican la porción superior del escarpe, las flechas indican la dirección del movimiento y la línea punteada señala una ruptura.+

CONCLUSIONES

La fragmentación del terreno, y su jerarquización en unidades geomorfológicas constituyeron, en sí, un análisis básico del relieve, como una etapa esencial en la cartografía geomorfológica, tomando como modelo el enfoque aplicado en esta investigación.

Con la metodología empleada en este trabajo fue posible obtener datos básicos sobre los principales y más importantes atributos físico-ambientales de las unidades geomorfológicas analíticas, en específico de las UM. En el caso de las Umd, la necesidad de realizar un trabajo con mayor detalle se hace evidente ya que se requiere ser más puntual en cuanto a la cartografía de los procesos morfodinámicos, que son los que están caracterizando el estado actual de la degradación ambiental, en esta parte de la Mixteca Alta de Oaxaca. Las relaciones entre el tipo de relieve y el tipo de proceso erosivo están expresadas en el sentido del comportamiento de la escorrentía y específicamente de la geometría el relieve. El comportamiento del flujo hídrico refleja la dinámica de la escorrentía en formas del relieve predominantemente desprovistas de suelo o de alguna capa de materiales detríticos. Aún así los estudios que se desarrollen en escalas mayores a 1:50,000, bajo las condiciones ambientales del área del presente estudio, debieran ser comparados con otras áreas cercanas en donde se nota una mayor intensidad de la morfodinámica, como en Yanhuitlán o San Juan Coixtlahuaca, al sur de Tepelmeme.

Además de las consideraciones que deban hacerse a la escala detallada de trabajos posteriores, la importancia de registrar la dinámica superficial de manera cuantitativa seguramente aportará datos exactos sobre la intensidad de los distintos procesos que se estudien.

En la morfogénesis, que aquí se definió para el área de estudio, el pasado geológico que originó al relieve y sus variantes, ocupa un lugar principal en el análisis geomorfológico. Así fue como se distinguieron básicamente dos grandes ambientes morfogénicos, uno compuesto por rocas calcáreas plegadas del Mesozoico, y otro por rocas volcánicas del Cenozoico. Los contrastes geológicos, estructurales y geomorfológicos de éstas dos porciones de terreno, condicionaron las diferencias

geomorfológicas entre ellos y propiciaron cierta homogeneidad al interior de cada una. A su vez la agrupación de las unidades en sistemas, obedece a una estructura jerárquica en donde se tomaron decisiones con base en criterios morfoestructurales, para diferenciar los distintos sistemas. En el sistema morfogenético Teposcolula, compuesto en su totalidad de calizas plegadas, existe un relieve predominantemente montañoso, en donde la presencia de los lomeríos y planicies es mínima. Esta característica lo diferencia del resto de los sistemas, y le confirió a su vez un carácter propio en los sentidos geomorfológicos y geológicos. El resto de los sistemas están ligados entre sí por la geología, pero existen varias litologías al interior, que hacen la diferencia en cuanto a los distintos tipos de relieve, y sobre todo en los procesos morfodinámicos que actualmente operan. Las tipologías de relieve en esta secuencia volcánica cenozoica, varían en cuanto al fracturamiento de las rocas por actividad tectónica, en ellas se han identificado algunas fallas de desplazamiento lateral y diques de composición intermedia, que forman parte de la tectónica de la Mixteca Alta. Las laderas montañosas se encuentran bordeando el sector sur y noroeste del área de estudio, en ellas es significativa la presencia de procesos de remoción en masa y de erosión hídrica en cauces de primer orden desarrollados en fracturas de la roca. Sobre todo en los sistemas morfogenéticos Concepción Buenavista, Yanhuitlán y Loma Grande.

En el sistema Teposcolula, es la actividad erosiva laminar la que mayor extensión tiene. Se determinó por fotointerpretación, que la predominancia, por extensión, de la remoción gradual de materiales por acción hídrica era la principal actividad erosiva. En este sistema no se detectaron rasgos significativos de incisión vertical, así, el segundo proceso en importancia es el de disolución, al respecto, no se identificaron dolinas u otras formas de disolución típicas de estas litologías, quizás la razón sea el tipo climático de esta porción del área cartografiada, en donde se presenta un clima Bs. Éste se caracteriza por lluvias escasas en todo el año, amplia oscilación térmica diaria, vegetación xerófila en las partes bajas y un bosque abierto de encino en las laderas superiores y en las superficies cumbrales.

En el resto del área de estudio, tanto el arreglo espacial del relieve, como de los procesos morfodinámicos, obedece a la topografía y a las diferentes litologías de los

depósitos volcánicos del Cenozoico. Es en ellos en donde las fracturas existentes definen un sistema de drenaje enrejado, lo que es una evidencia de movimientos tectónicos recientes. Estas rocas pertenecen a distintos episodios de lo que se ha llamado volcanismo terciario, en este tema debe contemplarse que se tienen como resultado varios depósitos de particular naturaleza. Por un lado las tobas y depósitos epiclásticos de la porción central, y por el otro las lavas andesíticas localizadas en el sector central, cerca del poblado de San Antonio Abad. Con base en todas éstas características geológicas, además de las estructurales y morfológicas, se delimitó al relieve de esta área, al igual que la amplia variedad de procesos activos. Actualmente el flujo laminar predomina en algunos lomeríos altos y laderas de montaña porque ya no hay suelo y el agua fluye de forma laminar sobre la roca expuesta.

Asimismo se idéntico a esta actividad erosiva hídrica, como la que domina en casi toda el área de estudio, pero particularmente en la porción central y oeste del área que comparten el sistema morfogenético Concepción Buenavista, Yanhuitlán y Loma Grande. En ellos la tipología del relieve y la litología se vincula directamente con la actividad erosiva antes descrita. En estos lugares los resultados de la dinámica de la escorrentía dan origen a contrastes morfológicos interesantes en aquellos sitios en donde se localizan aislados algunos parches de suelo, claro está que merecen atención pero a otra escala.

Los procesos erosivos por flujo concentrado, se relacionan más con el relieve montañoso, en donde la disponibilidad de materiales detríticos y de suelo es mayor. Se localizan principalmente en la porción noroeste, sobre la vertiente del río Grande, cerca del poblado de Las Palmas. En este sector los barrancos se desarrollan sobre materiales poco consolidados, asimismo los procesos de remoción en masa, como los deslizamientos, se vinculan con la litología y con la morfología del terreno. La remoción en masa, particularmente los deslizamientos, en toda el área de estudio, no se restringen a un solo tipo de relieve o litología, se les encontró en el sistema morfogenético Loma Grande, localizado al sur, el cual es poco abrupto con pendientes medias de 6°, sin embargo se caracteriza por una litología de composición arcillosa y de tobas ácidas, además influye la actividad tectónica. Existen otros procesos de remoción

en masa que no pudieron cartografiarse debido a la escala de fotointerpretación, aún así se logró establecer que en ellos la naturaleza del fenómeno es gradual y no súbita como en algunos deslizamientos que dejan cicatriz de desprendimiento y un depósito en forma de lóbulo.

Los procesos complejos fueron definidos como un conjunto de procesos de distinta naturaleza, actividad, intensidad y extensión. En ésta clasificación no fue posible determinar una clase particular para cada uno de ellos, por lo menos a esta escala de mapeo. Su localización está vinculada, muy de cerca, con áreas montañosas, de lomeríos y de planicies con actividad erosiva, principalmente de incisión vertical.

No fue pretensión establecer que para cartografiar procesos morfodinámicos sea obligatorio delimitar a las unidades morfogenéticas, sin embargo el haber hecho el mapa morfogenético permitió hacer un análisis práctico de la morfodinámica superficial de un área de aproximadamente 400 km².

La configuración topográfica del terreno cartografiado, generada por actividad endógena y exógena, crea los patrones de procesos morfodinámicos, pero además las litologías del área y el régimen climático son parte del ciclo de actividad geomorfológica, en el que los resultados son los procesos aquí tratados.

Con esto se puede expresar que en el área de estudio, la morfodinámica que se manifiesta en los procesos cartografiados, está asociada a la litología y a la configuración del relieve, sin dejar de lado al régimen y tipo de lluvia. Asimismo, la pendiente influye y determina muchos de los tipos de erosión hídrica y de los procesos de remoción en masa. A nivel detallado las microformas del relieve determinan la dinámica del flujo hídrico laminar. La observación de esta dinámica a nivel microtopográfico fue posible durante el trabajo de campo, lo que reveló fue la multiplicidad de procesos simultáneos a distintas escalas espaciales.

Es necesario formular hipótesis acerca de los fenómenos a estudiar, sobre todo si se tienen antecedentes concretos, se posibilitaría la articulación del trabajo a desempeñar en un corto plazo. Es entonces, cuando la importancia de las investigaciones sobre la erosión acelerada de suelos puede aportar valiosas herramientas metodológicas para su aplicación en otros lugares en condiciones ambientales similares. No es sencillo predecir

en qué lugares funcionará y en cuáles no un modelo preconcebido, puesto que se sabe que la erosión acelerada de suelos es un fenómeno multiprocesos y multifactorial que involucra variables cuyo mecanismo de operación no siempre se ciñen a los modelos establecidos para el cálculo de los mismos. Sin embargo, es posible el análisis de los distintos rasgos geomorfológicos de la erosión acelerada y de la actividad gravitacional, comenzando con una cartografía básica y posteriormente complementando con datos numéricos de las mediciones de la actividad erosiva o gravitacional.

En el presente trabajo quedaron asuntos pendientes, para continuar su revisión y estudio después de este trabajo, por lo que la responsabilidad y sobre todo el compromiso de solucionar estas situaciones no se eluden, sólo se posponen para su ejecución en el corto plazo. Los resultados, si bien parciales en el caso de la morfodinámica superficial, cumplen con los objetivos de la tesis y dan paso al planteamiento de otras estrategias y nuevas hipótesis, de evaluación y cuantificación de estos procesos de degradación ambiental, y de cartografía sobre este tema, por lo que se pretende en un futuro cercano realizar un estudio detallado sobre casos específicos de erosión hídrica, en los que se considere el uso de modelos de evolución del fenómeno ya establecidos para la evaluación y cuantificación exacta de la dinámica de interés, con otras herramientas y técnicas, además de una escala que permita observar a detalle las condiciones en las que están llevándose a cabo tales dinámicas erosivas.

El método aplicado demostró que contando con cartografía morfogenética y morfodinámica puede evaluarse el estado físico actual de cada unidad cartográfica. Este enfoque puede ser utilizado para estudiar otras áreas de la Mixteca Alta, puesto que es adaptable casi a cualquier escala.

BIBLIOGRAFÍA

- Alaniz Álvarez, Susana, A.; Nieto Samaniego Ángel, F. y Tolson Jones, Gustavo. (2004). *Léxico Geológico Mexicano*. Instituto de Geología, UNAM. México. 130 pp.
- Ahnert, Frank. (1998). *Introduction to Geomorphology*. Arnold. U.K. 352 pp.
- Arellano R., Agustín. (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.
- Arellano R., Agustín; López Blanco, Jorge; Villers Ruíz, Lourdes. (2001). *Mapa de cobertura vegetal del Parque Nacional La Malinche, mediante fotointerpretación y corrección fotogramétrica en línea*. Memoria del XVI Congreso Nacional de Geografía, Mérida Yucatán, México. Instituto de Geografía UNAM, CINVESTAV, CICY, UAY, Sociedad Mexicana de Geografía, INEGI. p 68.
- Bartleby. (2004). *American Heritage Dictionary*, consultado en julio de 2004 en <http://bartleby.com./61/>.
- Bocco, Gerardo. (1989). *El inventario de erosión antrópica: acaravamientos en la cuenca del río Tlalpujahua, México*. Boletín del Instituto de Geografía núm. 19, UNAM. México. pp 55-68.
- Bocco, Gerardo; López Blanco, Jorge; Morales, Luis M. (1990). *Computer-assisted mapping of gullies: a spatial database for a gully information system*. ITC Journal 1990-1, Enschede, The Netherlands, pp 45-50.
- Buckman, H. Oliver y Brady, Nyle. C. (1983). *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Montaner y Simon. Barcelona. 590 pp.
- Buol, S.W.; Hole, F.D.y McCracken, R.J. (1988). *Génesis y clasificación de suelos*. Trillas. México. pp 5-58.
- Campa M^a Fernanda and Coney, Peter. J. (1983). *Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico*. Can. J. Earth Sci. pp 1040-1051.
- Centeno García, E. and Keppie, J. D. (1999). *Latest Paleozoic-early Mesozoic structures in the central Oaxaca Terrane of southern México: deformation near a triple*

- junction. *Tectonophysics*, Elsevier Science, vol. 301, pp. 231-242.
- Cruz Cisneros, R. y Rzedowski, J. (1980). Vegetación de la cuenca del río Tepelmeme, Alta Mixteca, estado de Oaxaca, México. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas*, IPN, México., Vol. XXII, pp. 19-83.
- Díaz Pérez, Susana. (2001). Cartografía morfogenética de la Cuenca de Toluca a escala 1:100,000. Tesis de Licenciatura, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras UNAM.
- Dunham, R J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. 108-121 in *Classification of carbonate rocks*. Ham, W E (editor). *Memoir of the American Association of Petroleum Geologist*, No. 1.
- ESRI (1999/2000). *ArcView 3.2 User's Guide/ What's new in ArcView 3.1, 3.2 and 3.3*. U.S.A. 34 pp.
- Ferrusquía, V., I. (1970). Geología del área de Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca: Soc. Geol. Mexicana, Exc. México-Oaxaca. *Libro-guía*, p. 97-119.
- Gerrard, John. (1992). *Soil geomorphology: An integration of pedology and geomorphology*. Chapman and Hall. London. 269 pp.
- Goudie, Andrew. (1993). *The Human Impact on the Natural Environment*. Blackwell. U.K. pp. 160 -176.
- Goudie, Andrew. (2000). *The Earth Transformed. An Introduction to Human Impacts on the Environment*. Blackwell. U.K. pp. 165 -169.
- Hall, George. F. (1983). *Pedogenesis and soil taxonomy*. Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands. pp 117-140.
- Hernández Corzo, Gilberto. (1985). La erosión hídrica. Enfoque teórico. *Divulgación geográfica*. UNAM. México. pp 18-31.
- Imeson, A.C. y Kwaad, F.J.P.M. (1980). Gully types and gully prediction. *K.N.A.G. Geografisch Tijdschrift*. XIV. Num. 15. pp 430-441.
- INEGI (1994). OAXACA E14-9, Carta geológica. Escala 1: 250, 000.
- INEGI (1998). OAXACA E14-9, Carta Topográfica. Escala 1: 250, 000.
- INEGI (1994). OAXACA E14-9, Espaciograma. Escala 1: 250, 000.

- INEGI (1984). Tepelmeme E14D15, Carta Topográfica. Escala 1: 50, 000.
- INEGI (1984). Tecomavaca E14D16, Carta Topográfica. Escala 1: 50, 000.
- INEGI (1984). Tamazulapam E14D25, Carta Topográfica. Escala 1: 50, 000.
- ITC (2000). ILWIS 3.0 Academic. User's guide. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands. 530 pp.
- Joly, Fernand. 1979. La Cartografía. Ariel. Barcelona. 303 pp.
- Kirkby, M.J. y Morgan, R.P.C. (1984). Erosión de suelos. LIMUSA: México. pp 15-28; 165-226; 227-265.
- Lillesand, Thomas and Kiefer, Ralph. (2000). Remote sensing and image interpretation. Wiley. N.Y. pp 470-615.
- López Blanco, Jorge. (1994). Evaluaciones geomorfológicas y de recursos naturales aplicando un sistema de información geográfica (ILWIS). Tesis de Doctorado en Geografía. Fac. Filosofía y Letras. Div. Estudios de Posgrado, Depto. de Geografía. UNAM, México. 221 pp.
- López Blanco, Jorge y Palacio Prieto, José Luis. (1995). Cuantificación del crecimiento de las áreas erosionadas en cabeceras de cárcavas procesando imágenes de video. Boletín del Instituto de Geografía núm. esp. 3, UNAM. México. pp 77-100.
- López-Blanco y Villers-Ruiz.1995. Delineating Boundaries of Environmental Units for Land Magement Using a Geomorphological Approach and GIS: A study in Baja California, México. *Remote Sensing Environment*. Elsevier Science. N.Y.
- López Blanco, Jorge; Galicia Sarmiento, Leopoldo; García Oliva, Felipe. (1996). Aplicación de un SIG para la caracterización morfológica y la delimitación de unidades de ladera de una cuenca tropical estacional en Chamela, Jalisco, México. Boletín del Instituto de Geografía núm. esp. 4, UNAM. México. pp 39-61.
- Lugo Hubp, José. (1989). Diccionario geomorfológico. UNAM. México. 337 pp.
- Lugo Hubp, José. (1990). El Relieve de la República Mexicana. Revista del Instituto de Geología., vol. 9. UNAM. México. pp. 82-111.
- Lugo Hubp, José. (1991). Elementos de geomorfología aplicada: Métodos cartográficos. Instituto de Geografía. UNAM. México.109 pp.
- Lugo Hubp, José y Córdova, Carlos. (1992). Regionalización geomorfológico de la

- republica mexicana. Boletín del Instituto de Geografía núm. 25, UNAM. México. pp 25-63.
- Luján Álvarez, Concepción. (1991). Fotogrametría: Principios básicos. Colección Textos Universitarios, Universidad Autónoma de Chihuahua, México. 174 pp.
- Maass, J.M., y García-Oliva, F. (1990). La conservación de los suelos en zonas tropicales: El caso de México. Ciencia y Desarrollo, vol. XV, No.90, pp.21-36, México.
- McAuliffe, Joseph, R.; Sundt, Peter C.; Valiente Vanuet, Alfonso.; Casas, Alejandro and Viveros, Juan Luis. (2001). Pre-columbian soil erosion, persistent ecological changes, and collapse of a subsistence agricultural economy in the semi-arid Tehuacan Valley, México's, "Cradle of Maize". Journal of Arid Environments, Academic Press, Vol.47, pp. 47-75.
- Martiny, Barbara; Martínez-Serrano, Raymundo G.; Morán-Zenteno, Dante J.; Macías-Romo, Consuelo. and Ayuso, Robert A. (2000). Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of the Oligocene magmatic rocks of western Oaxaca, southern México. Tectonophysics, Elsevier Science, vol. 318, No.1, pp. 71-98.
- Martorell D. C., y Peters R, E. (2000). Plan piloto para la conservación de las suculentas de la Mixteca Alta mediante la creación de un sistemas de reservas y un vivero comunitario. Reporte para el Fondo Mexicano para la Conservación Naturaleza, México. 9 pp.
- Meijerink Allard, M. J., (1988). Data Acquisition and Data Capture Through Terrain Mapping Units. ITC Journal, Enschede, The Netherlands. No. 1, pp. 23 - 44.
- Mitre Salazar, Luis, M. (1973). Geología del área de Tepelmeme de Morelos, Oaxaca. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 90 pp.
- Mitre (1973). Tepelmeme. Carta geológica. Escala aproximada 1: 40, 000.
- Montes Cruz, Pedro y López Blanco, Jorge (2003). El enfoque geomorfológico morfogenético como base para la evaluación de la degradación ambiental en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. Memoria en CD del 1^{er} Congreso de las Américas Sobre Geofísica Ambiental, Cd. de México. IPGH, 21-22 de octubre de 2003.
- Montes Cruz, Pedro y López Blanco, Jorge. (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.
- Morán Zenteno, D.J.; Tolson, G.; Martínez-Serrano, R.G.; Martiny, B.; Schaaf, P.; Silva-Romo, G.; Macías-Romo, C.; Alba-Aldave, L.; Hernández-Bernal, M.S. and Solís Pichardo, G.N. (1999). Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, México, and its transition to the volcanic activity of the trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier Science. Vol. 12 . No. 6. pp. 513-535.
- Morgan, R.P.C. (1994). *Soil erosion & conservation*. Longman. U.K. 198 pp.
- O'Hara, Sarah and Metcalfe, Sarah E., (1997). The climate of México since the Aztec period. *Quaternary International*, INQUA/Elsevier Science. Vol. 43/44, pp. 25-31.
- Oostwoud Wijdenes, Dirk J.; Poesen, Jean; Vandekerckhove, Liesabeth; Nachtergaele, Jeroen; De Baerdemaeker, Jo. (1999). Gully-head morphology and implications for gully development on a abandoned fields in semi-arid environment, Sierra de Gata, southeast Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, Wiley Interscience., num. 24, pp 585-603.
- Palacio Prieto, José Luis. y López Blanco, Jorge. (1994). Using Video imagery for gully erosion evaluation, *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, Vol.38, No.1, Berlin-Stuttgart. pp.33-43.
- Pedraza Gilsanz, Jorge de; Carrasco González, Rosa M^a; Díez Herrero, Andrés; Martín Duque, J. Francisco; Martín Ridaura, Aurora; Sanz Santos, Miguel Ángel. (1996). *Geomorfología, principios, métodos y aplicaciones*. Rueda. Madrid. 414 pp.
- Perles Roselló, M^a de Jesús. (1996). *Problemas en torno a la erosión hídrica; Conceptos y métodos de análisis*. Universidad de Málaga. España. 109 pp.
- Renschler, Chris, S.; Harbor, Jon. (2002). Soil erosion assessment tools from point to regional scales-the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology*, vol.47, num4. pp 189-209.

- Rincón Mautner, Carlos. (1999). Man and the environment in the Coixtlahuaca basin of northwestern Oaxaca: Two thousand years of historical ecology. PhD Thesis. The University of Texas at Austin. 800 pp.
- Rincón Mautner, Carlos. (2001). Cyclic human-induced environmental degradation in the Mixtecan Highlands of the Sierra Madre del Sur, México. Proceedings of the international symposium on Land Degradation and Desertification. IGU, (COMLAND), Instituto de Geografía, Instituto de Antropología. UNAM. p. 23.
- Rzedowski, Jerzy. (1988). Vegetación de México. LIMUSA. México. pp 263-283.
- Rodríguez Hernández, Ramón. (1999). Cartografía morfogenética jerárquica a tres escalas del área del microbloque "El Colorado", Chamela, Jalisco. Tesis de *Licenciatura*, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.
- Ruhe, Robert B. (1975). Geomorphology; geomorphic Processes and surficial geology. U.S.A. Houghton Mifflin Co. pp 21-46, 99-124.
- Sedlock, Richard.L.; Ortega Gutiérrez, Fernando; Speed, Robert C. (1993). Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. Geol. Soc. Am. Special Paper 278. U.S.A. pp 1-72.
- Streckheisen, A.L. (1979). Classification and nomenclature of volcanic rocks, amphyphyres, carbonatites, and melilitic rocks: recommendations and suggestions of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geology*, 7, 331-335.
- Tapia Varela, Guadalupe. (1999) Geomorfología morfogenética de la Cuenca Tributaria Oriental del Ex-Lago de Texcoco, Tesis de *Licenciatura*, Colegio de Geografía Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.
- 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, num 1., pp. 50-65.UNAM.
- Uribe Luna, Jesús. (1999). Cartografía con sensores remotos y un Sistema de Información Geográfica: Huajuapán de León, Oaxaca. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Fac. Ciencias, UNAM. 120 pp.
- USGS. (1999). Imagen Landsat ETM+ *Path 25, Row 47 y 48*, tomada en Diciembre de

1999 y proporcionada por el Instituto de Geografía de la UNAM.

- Vanacker, Veerle.; Govers, Gerard.; Poesen, Jean.; Deckers, Jozef.; Dercon, Gerd. and Loaiza, George. (2003). The impact of environmental change on the intensity and spatial pattern of water erosion in a semi-arid mountainous Andean environment. *Catena*, Elsevier Science. Vol. 51, No 4, pp. 329-347.
- van Zuidam, Robert. (1985/1986). *Aerial photo-interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping*. Smits Publishers. The Hague, The Netherlands. 442 pp.
- Verstappen, H Th., and van Zuidam, R. (1991). *El Sistema ITC para Levantamientos Geomorfológicos*. ITC. ITC, publication number 10. Enschede, The Netherlands. 87 pp.
- Zachar, Dušan. (1982). *Soil erosion*. Elsevier. Amsterdam. The Netherlands. pp 137-203.

