

01026  
9



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFIA**



**"ANALISIS DE SUSCEPTIBILIDAD Y RIESGOS  
ASOCIADOS A PROCESOS DE REMOCION EN  
MASA EN ZACAPOAXTLA, PUEBLA".**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**LICENCIADO EN GEOGRAFIA**  
**P R E S E N T A :**  
**ROBERTO CARLOS BORJA BAEZA**

ASESOR: DRA. IRASEMA ALCANTARA AYALA



FACULTAD DE FILOSOFIA  
Y LETRAS



MEXICO, D. F. CIUDAD UNIVERSITARIA

FEBRERO DEL 2003

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFIA

A



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.

## **DEDICATORIA**

**A ti Madre**, por tus años de esfuerzo, disciplina, tenacidad y por depositar en mi todos tus sueños. Por estos años en que has mantenido la fe en este esfuerzo, cada día, afrontando con claridad aún los momentos de mayor dificultad. Por tu confianza y respeto y, por encima de todo, por ser mi amiga. Te amo. Gracias.

**A mi Padre (†)**, porque los años que estuviste conmigo fueron suficientes para establecer las bases morales y éticas para facilitar los momentos de adversidad y por sembrar un sueño en mi hogar. Nunca has dejado de estar a mi lado, y nunca lo estarás. Gracias Padre.

**A ti**, que mañana formarás el centro de mi vida y darás el motivo más grande para realizar un esfuerzo cada momento, para que en el tiempo puedas escribir estas mismas líneas.

## AGRADECIMIENTOS

A mi asesora, **Dra. Irasema Alcántara**, porque más allá de orientar el camino y depositar tu confianza en mi, estableciste una relación de comunicación excelente, el mejor ambiente de trabajo y todas las facilidades y apoyos para poder realizar la presente tesis. Por la seguridad que generaste en mi y porque no es posible encontrar mejor asesor. **Gracias.**

Al **Dr. José Juan Zamorano**, por los comentarios acertados y por el ejemplo de realizar siempre el mejor trabajo. Gracias. A mis sinodales **Mtra. Oralia Oropeza**, **Dr. Mario Arturo Ortiz**, y **Dr. José Lugo Hubp** por su tiempo y observaciones para enriquecer la presente tesis.

Al **CONACyT**, por el apoyo económico para la elaboración del presente trabajo a través del proyecto J33428-T “Estrategias de prevención de desastres para la región Puebla-Veracruz”. Al **Instituto de Geografía**, por facilitar el uso de sus instalaciones. Al **CENAPRED** por su apoyo en mecánica de suelos. A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por la oportunidad que me brindo de poder realizar la licenciatura en su campus universitario y por el espíritu humanista y la responsabilidad de llevar a bien los valores universitarios.

A la **Secretaría de Protección Civil de Puebla**, por sus apoyo en trabajo en Zacapoaxtla, muy en especial al **Profesor Guillermo Melgarejo**. A la **Presidencia Municipal de Zacapoaxtla**, al Presidente municipal **Ing. Castañeda** y al **Arq. Arturo Sosa** por las facilidades prestadas.

A mis compañeros de proyecto, **Lic. Pablo Flores** por su tiempo y apoyo en los primeros meses de trabajo y a **José Marcos**, por su colaboración en el manejo de SIGs y por su compañerismo (suerte muchachos). A **Leobardo** y **Paula** por su apoyo en mecánica de suelos. (ahorita!).

A **Abigail**, por los meses juntos, por compartir la última parte del camino y apoyarme siempre. Por soportar mi forma y soñar conmigo. Te quiero. Suerte. *(Lo más cercano a ese rumor).*

A **Marina**, por tu apoyo, por aguantarme en todo momento y por estos años; a **Silvia**, por tantos momentos, tu confianza y tanto tiempo de amistad; a **Jovanna**, por todo lo que hemos vivido juntos, por las risas, los viajes, las tareas y por ser mi confidente. A **Marlene**, por tu sinceridad y honestidad como compañera. *Nada mejor que un amigo para caminar en la noche.*

A mi familia, por mantener la unión que favorece el camino y compromete a intentar siempre más. A mi tía **Manuela**, porque el ejemplo es el mejor consejo. A mis tíos **Ángel**, **Hermenegildo**, **Ana**, **Pedro**, **Graciela**, **Jesús**, **Francisco** y **Marcos**, porque el orgullo es mío. A mis primos, **Marco Antonio Ramírez**, **Salvador Pérez** y **Marco Antonio Borja**.

A **Etna** porque el camino inició contigo *(Puedes saberlo)*. A **Laura** por haberme dejado ser parte de su vida *(Alguna vez te lo dije)*. A **Cesar** y **Carlos**, por los años maravillosos.

A mis compañeros de carrera, **Nadia** y **Abraham** *(Primero la familia)*, **Cecilia** *(La luna nunca muere)*, **Yoani** e **Ileri** *(Más vale tarde)*, a **Guillermo**, **Miguel Ángel** y todos en la **COGEPU** *(Salud!)*, a **Lilia**, **Beatriz** y **David** *(El pasado no muere)*.

“...And in the end, the love you take, it's equal to the love you make”.

*Gracias, Roberto.*

# ÍNDICE

Índice.....	I
Índice de figuras y cuadros.....	III
Resumen.....	VI
Introducción.....	VII
<b>Capítulo 1 Marco físico y teórico.....</b>	<b>1</b>
1.1 Marco físico.....	1
1.2 Marco teórico.....	6
<b>Capítulo 2 Procesos de remoción en masa y riesgos asociados.....</b>	<b>12</b>
2.1 Conceptualización.....	12
2.2 Clasificaciones.....	13
2.3 Tipos y características.....	15
2.4 Factores de inestabilidad.....	20
2.5 Características morfológicas.....	25
2.6 Grados de actividad.....	23
2.7 Velocidad del movimiento.....	24
2.8 Indicadores empleados para la identificación de procesos de remoción en masa.....	24
2.9 Efectos.....	26
2.10 Importancia del estudio de los procesos de remoción en masa.....	27
2.11 Riesgos asociados.....	30
<b>Capítulo 3 Geología y geomorfología.....</b>	<b>35</b>
3.1 Estratigrafía.....	35
3.1.1 Paleozoico.....	35
3.1.2 Mesozoico.....	37
3.1.3 Cenozoico.....	41
3.2 Tectónica.....	44
3.3 Vulcanismo.....	46
3.4 Evolución geológica.....	46
3.5 Morfometría.....	48
3.6 Morfogénesis.....	57
3.6.1 Relieve endógeno.....	58
3.6.2 Relieve denudativo estructural.....	62
3.6.3 Relieve exógeno erosivo.....	65
<b>Capítulo 4 Procesos de remoción en masa de 1999.....</b>	<b>68</b>
4.1 Precipitaciones en la Sierra Norte de Puebla.....	68
4.2 Situación en Zacapoaxtla.....	69
4.3 Caracterización de laderas.....	76

4.3.1 Metodología.....	76
4.3.2 Mecánica de suelos.....	77
4.3.3 Pruebas para la determinación del esfuerzo cortante.....	78
4.4 Análisis de la estabilidad de laderas utilizando el modelo infinito de pendiente.....	82
4.5 Análisis de sensibilidad.....	83
4.6 Conclusiones.....	85
<b>Capítulo 5 Índices de estabilidad.....</b>	<b>87</b>
5.1 Conceptualización.....	87
5.2 MDE (Modelo Digital de Elevación).....	90
5.3 Fundamentos de SINMAP.....	95
5.4 Índices de estabilidad.....	101
5.4.1 Dirección del flujo.....	101
5.4.2 Área específica de la cuenca.....	102
5.4.3 Índice de humedad.....	107
5.5 Índice de estabilidad.....	109
<b>Capítulo 6 Vulnerabilidad y riesgos asociados.....</b>	<b>115</b>
6.1 Aspectos socioeconómicos.....	115
6.1.1 Población y vivienda.....	115
6.2 Equipamiento urbano.....	117
6.2.1 Educación, infraestructura y salud.....	117
6.3 Vulnerabilidad.....	118
6.3.1 Vulnerabilidad municipal.....	120
6.3.2 Vulnerabilidad de la localidad de Zacapoaxtla.....	126
6.4 Mapas de riesgo.....	128
6.4.1 Mapa de riesgo municipal.....	129
6.4.2 Mapa de riesgo de la localidad de Zacapoaxtla.....	133
6.5 Mitigación del riesgo.....	139
<b>Anexo capítulo 6.....</b>	<b>141</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>144</b>
<b>Bibliografía básica.....</b>	<b>147</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>148</b>
<b>Mesografía.....</b>	<b>153</b>

# **PAGINACIÓN DISCONTINUA**

## INDICE DE FIGURAS Y CUADROS

### FIGURAS

1.1 Localización del municipio de Zacapoaxtla.....	2
1.2 Orografía e hidrografía de Zacapoaxtla.....	4
1.3 Mapa topográfico simplificado de Zacapoaxtla.....	5
1.4 Mosaico aéreo del municipio de Zacapoaxtla.....	7
1.5 Perfiles topográficos del municipio de Zacapoaxtla.....	8
1.6 Imagen satelital del municipio de Zacapoaxtla.....	9
2.1 Caídas o desprendimientos.....	16
2.2 Vuelco o desplome.....	17
2.3 Deslizamientos.....	18
2.4 Flujos.....	19
2.5 y 2.5a Expansión lateral o desplazamiento.....	19 y 20
2.6 Movimiento complejo.....	21
2.7 Diagrama idealizado de los atributos morfológicos de un movimiento de ladera.....	23
2.8 Algunas consecuencias sobre casas-habitación y carreteras que se ubican en la masa en movimiento o en su recorrido.....	26
2.9 Aproximación conceptual del peligro y riesgo por deslizamientos.....	32
3.1 Mapa Geológico de Zacapoaxtla.....	45
3.2 Mapa Altimétrico de Zacapoaxtla.....	50
3.3 Densidad de la disección de Zacapoaxtla.....	52
3.4 Profundidad de la disección de Zacapoaxtla.....	54
3.5 Energía del relieve de Zacapoaxtla.....	56
3.6 Mapa morfogenético de Zacapoaxtla.....	59
3.7 Laderas constituidas por depósitos de flujos piroclásticos.....	61
3.8 Zona de contacto entre montañas de bloque plegadas y escalonadas y la rampa piroclástica.....	64
3.9 Cauce del río Apulco.....	66
4.1 Gráfica de mayores precipitaciones en Zacapoaxtla.....	70
4.2 Gráfica de precipitaciones del 30 de septiembre al 13 de octubre de 1999.....	71
4.3 Gráfica de precipitación anual acumulada, de 1946 a 1980, en Zacapoaxtla.....	71
4.4 Gráfica de precipitación media mensual en el municipio de Zacapoaxtla.....	72
4.5 Daños en las carreteras del municipio de Zacapoaxtla.....	73
4.6 Imágenes de la Unidad Habitacional La Concordia.....	74
4.7 Estación Total Trimble 5600 empleada en el levantamiento topográfico en la cabecera municipal de Zacapoaxtla.....	77
4.8 Imágenes y principio del Penetrómetro Dinámico <i>PANDA</i> .....	80
Figura 4.9 Extracción de muestras de suelo y utilización del penetrómetro dinámico <i>PANDA</i> , en Zacapoaxtla.....	81
4.10 Ladera poniente.....	82
4.11 Pantalla inicial del programa <i>SLOPES</i> .....	83

Figura 4.12 Valores del factor de seguridad y valor utilizado en el análisis de sensibilidad.....	84
Figura 4.13 Análisis de sensibilidad derivado de la aplicación del modelo infinito de pendiente.....	85
5.1 Modelo Digital de Elevación de Zacapoaxtla.....	91
5.2 Calculo de pendientes en el programa.....	93
5.3 Mapa de pendientes de Zacapoaxtla.....	94
5.4 Mapa de orientación de la pendiente de Zacapoaxtla.....	96
5.5 Modelo infinito de estabilidad de laderas.....	98
5.6 Dirección del flujo o escorrentía.....	103
5.7 Explicación gráfica del calculo de la dirección del flujo múltiple $D_{\infty}$ .....	104
5.8 Dirección del flujo múltiple $D_{\infty}$ , derivado de la matriz en un MDE.....	105
5.9 Mapa del área específica de la cuenca.....	106
5.10 Esquema del área específica de la cuenca.....	107
5.11 Áreas de escorrentía concentrada y difusa dentro de una cuenca específica.....	108
5.12 Mapa de índice de humedad.....	109
5.13 Índice de estabilidad a partir de la humedad y la pendiente.....	111
5.14 Mapa de índice de estabilidad.....	112
6.1 Gráfica de población por grupos de edad.....	116
6.2 Gráfica comparativa de algunos servicios y bienes entre el municipio y la localidad de Zacapoaxtla.....	117
6.3 Mapa de vulnerabilidad municipal.....	122
6.4 Mapa de vulnerabilidad de la localidad de Zacapoaxtla.....	127
6.5 Mapa de riesgo por deslizamientos del municipio de Zacapoaxtla.....	130
6.6 Mapa de riesgo por deslizamientos de la localidad de Zacapoaxtla.....	134
6.7, 6.11 Imágenes de zonas de riesgo alto.....	136, 138
6.8, 6.9, 6.10 Imágenes de zonas de riesgo medio.....	136, 137
6.12 Imagen de zonas de riesgo bajo.....	139
<b>CUADROS</b>	
2.1 Clasificación de procesos de ladera, según Varnes.....	14
2.2 Clasificación de movimientos gravitacionales, según Sharpe.....	14
2.3 Clasificación de los procesos de remoción en masa de acuerdo con EPOCH.....	15
2.4 Causas de los movimientos del terreno, según Cruden y Varnes.....	22
2.5 Características empleadas en el reconocimiento de movimientos del terreno de acuerdo con Brunsden y Crozier.....	25
2.6 Ejemplos indicativos para la identificación de fenómenos gravitacionales basado en Pedraza, 1996 y Oropeza-Orozco, 1998.....	25
2.7 Escala de intensidad de daños por procesos de remoción en masa.....	27
2.8 Principales fenómenos naturales que originan desastres en México.....	29
3.1 Columna Estratigráfica de la región Los Húmeros-Las Derrumbadas.....	36
4.1 Daños totales en Puebla.....	69
4.2 Reacciones sociales frente a los desastres.....	75

4.3 Variación de los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad.....	84
5.1 Algunos programas para calcular la inestabilidad en laderas.....	92
5.2 Ejemplo de definición de clases de estabilidad.....	100
6.1 Localidades analizadas para determinar la vulnerabilidad del municipio de Zacapoaxtla.....	121
6.2 Variables utilizadas para la determinación de la vulnerabilidad del municipio de Zacapoaxtla.....	123

*En el centro de cada dificultad,  
está descansando una oportunidad.*

*Albert Einstein*

## **RESUMEN**

El relieve de la República Mexicana, montañoso en alrededor de un 75%, favorece la ocurrencia de procesos de remoción en masa, condición que se manifestó en octubre de 1999 con cientos de movimientos del terreno en la Sierra Norte de Puebla, detonados por las intensas lluvias ocasionadas por la tormenta tropical numero 11. Zacapoaxtla, zona de estudio del presente trabajo, junto con otros municipios de la zona como Teziutlán, Totomoxtla, Zapotitlán de Méndez, etc, se vio afectado en un alto grado por estos fenómenos. La incidencia de tales procesos fue resultado en gran medida de la interacción entre las características geológicas y geomorfológicas existentes y de las actividades humanas que han alterado el medio. Las unidades litológicas predominantes están representadas por materiales débiles no consolidados de origen volcánico (ignimbritas) que sobreyacen a rocas sedimentarias de origen marino (principalmente calizas), las cuales determinan el grado de resistencia de los materiales que constituyen las laderas. La morfología está representada en gran medida por una extensa rampa de piroclastos y por montañas en bloque, con pendientes inclinadas y disectadas, unidades morfológicas donde se concentraron la mayor parte de movimientos del terreno.

Este trabajo presenta un análisis de inestabilidad de laderas a partir de la modelación de la interacción del relieve, la concentración de humedad y las propiedades de los materiales utilizando un Modelo Digital del Terreno (MDT) a través del índice de estabilidad SINMAP (*Stability Index Mapping*) en el SIG *ArcView*. Los resultados de dicho análisis fueron combinados con un índice de vulnerabilidad elaborado con base en datos de población y vivienda para obtener el mapa de riesgos por procesos de remoción en masa tanto para el municipio, como a la localidad de Zacapoaxtla.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra un acercamiento hacia los procesos de remoción en masa, sus características y formas, y la relación inseparable entre éstos y la vulnerabilidad de la población. El objetivo principal es determinar el riesgo al que está expuesto el municipio como consecuencia de la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.

La metodología desarrollada consta de la conceptualización de los procesos de ladera, y los conceptos de riesgo y vulnerabilidad, la determinación de las regiones morfogenéticas, empleadas en la aplicación del índice de estabilidad, mismo que se complementa con un índice de vulnerabilidad, lo que permite obtener el mapa de riesgo por deslizamientos.

A lo largo de los capítulos que integran el trabajo, se desarrollan los objetivos particulares para determinar las zonas de riesgo, particularmente el capítulo cuatro expone la necesidad de elaborar dicho elemento cartográfico y justifica la utilización de sistemas de información geográfica para determinar las áreas susceptibles a procesos de ladera.

De ésta forma, el capítulo uno resume las características del medio físico del municipio de Zacapoaxtla, así como la conceptualización teórica del estudio de los riesgos por procesos de remoción en masa.

En el capítulo dos se presenta una tipología de los procesos de remoción en masa propuesta por la Comunidad Europea, a partir de la morfología, el material involucrado y el tipo de movimiento dominante. A la par, se describen algunas de las características propias de cada proceso de forma particular, así como las propiedades generales de los movimientos, tales como velocidad, morfología, indicadores de identificación, etc; por último, se describen en forma sintetizada los efectos de su actividad. Como complemento del capítulo dos, se describen algunos conceptos de riesgo, vulnerabilidad, peligro o amenaza, así como la metodología empleada en el manejo de la planeación y la prevención de desastres.

El tercer capítulo expone la geología de la zona de estudio; se describe la evolución geológica y las diferentes formaciones que conforman el basamento regional. En el mismo

apartado, se incluye el vulcanismo y la tectónica de la zona. En una segunda parte del capítulo, se muestra la geomorfología, a partir de un análisis morfométrico, constituido por la densidad y profundidad de la disección, la energía del relieve, la altimetría del municipio, complementado con fotointerpretación. Dichos mapas en combinación con la geología y la topografía fueron utilizados para la elaboración del mapa morfogenético de Zacapoaxtla. Ambos apartados del capítulo apoyan el entendimiento de la zona y en particular de los procesos geomorfológicos imperantes.

Dentro del capítulo cuatro se hace una revisión del evento de precipitación extraordinaria de octubre de 1999 que afectó a Zacapoaxtla, y en general a la Sierra Norte de Puebla; en ella se incluyen causas y consecuencias. Posteriormente, se presenta una caracterización de laderas en donde se utilizan distintos elementos o parámetros para determinar cuantitativamente su inestabilidad, así como un análisis de sensibilidad; cálculo que sirve de preámbulo y como base para el desarrollo del capítulo cinco.

Con la finalidad de enfatizar la importancia del relieve y de evaluar espacialmente la susceptibilidad a procesos de remoción en masa se aplicó un índice de estabilidad a partir de un modelo digital del terreno utilizando el sistema de información geográfica *ArcView* y el programa *SINMAP* (Stability Index Mapping, Pack *et al*, 1999). La metodología empleada en la elaboración de dicho índice y los resultados del mismo se presentan en el capítulo cinco.

Finalmente, en el capítulo seis, se analizan las condiciones sociales del municipio de Zacapoaxtla para determinar el grado de vulnerabilidad de la población frente a los peligros por procesos de remoción, y así poder establecer las zonas de riesgo ante estos fenómenos, a través de un mapa local y uno municipal.

# CAPÍTULO 1 MARCO FÍSICO Y TEÓRICO

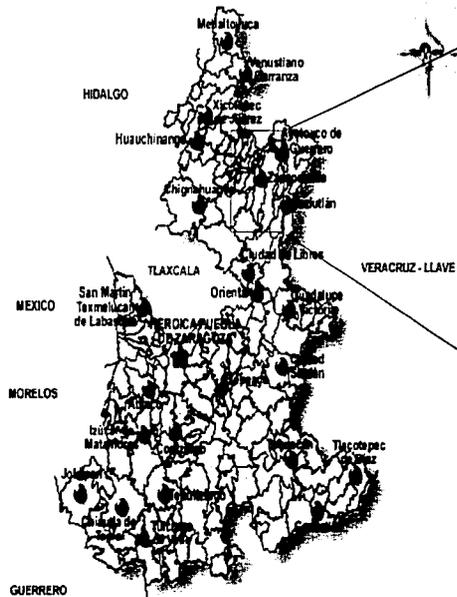
## 1.1 MARCO FÍSICO

El municipio de Zacapoaxtla (“Lugar donde se cuenta con grana”), célebre por la batalla del cinco de mayo de 1862, se localiza a 156 km de la ciudad de Puebla, dentro de la región morfológica de la Sierra Norte, la cual tiene una anchura aproximada de 50 km. Se extiende desde Tulancingo hasta el norte de Perote y forma la barrera saliente del Eje Neovolcánico, dando comienzo en su vertiente norte y en su extremidad oriental al descenso de las llanuras de la costa del Golfo de México (Commons, 1971). Asimismo, se ubica en la vertiente septentrional del estado, que está constituida por cuencas que desembocan en el Golfo de México.

Las coordenadas geográficas extremas del municipio son los paralelos 19° 44'18" y 19° 59'18" de latitud Norte, y los meridianos 97° 31'42" y 97° 37'54" de longitud oeste (Figura 1.1), resultando una extensión de 188.81 Km<sup>2</sup>. Colinda con Cuetzalan del Progreso y Nauzontla al norte, Tlatlauquitepec y Zaragoza al este, al sur con Zautla, y con Xochiapulco al oeste (Secretaría de Gobernación, 1988).

Sus principales localidades son Ahuacatlán, ubicada a una distancia aproximada de 25 kilómetros de la cabecera municipal, y con una población aproximada de 1,824 habitantes; Atacpan, localizada a 12 kilómetros de la cabecera municipal; y Xalacapan de Luque, a 5 kilómetros de la cabecera municipal.

En cuanto al clima, se ubica entre la transición de los climas templados de la Sierra Norte con lluvias todo el año, y los cálidos que se presentan en el declive del Golfo (INEGI, 1995). La orografía del municipio está conformada por sierras individuales, paralelas, comprimidas, suelen formar altiplanicies intermontañas que aparecen frecuentemente escalonadas hacia la costa y montañas masivas.



MUNICIPIO DE ZACAPOAXTLA



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Borja Baeza Roberto Carlos  
Tesis de Licenciatura, 2003  
Colegio de Geografía, UNAM

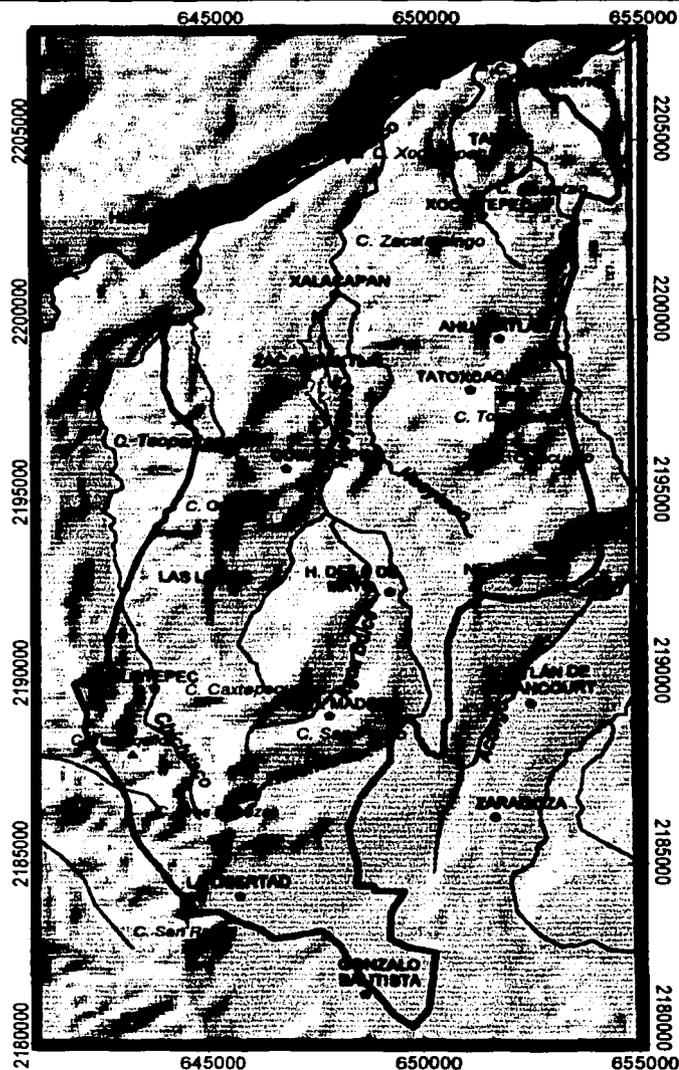
Figura 1.1 Localización del municipio de Zacapoaxtla (Fuente INEGI, 1999)

El relieve del municipio es de diferencias notables en sus elevaciones, presenta numerosas y largas sierras, aunque no siempre bien definidas, que le confieren una topografía muy irregular, destacando las siguientes: la sierra de más de 15 kilómetros de largo que se inicia en el cerro Tomaquilo y termina en el cerro Infiernillo, recorriendo el oriente de Sur a Norte; destacan en ella otros cerros como el Cuacuilco, Tomaquilo, Aguatepec, Zacatamingo, Xochiltepec. Otra Sierra que se levanta al poniente, sobre la cual se asienta Zacapoaxtla, presenta numerosos cerros: La Loma, San Pedro, Tonancingo, Caxtepecuaco, Aguatépetl, Chismoso, Teopantepeich, entre otros. La única zona que presenta una topografía plana, es la localizada al sur. El municipio presenta un declive general sur-norte, que va de 2400 metros a 1,200 metros sobre el nivel del mar.

La hidrografía del municipio se ubica dentro de la cuenca del río Tecolutla, que pertenece a la vertiente septentrional del estado de Puebla, en ella numerosos ríos recorren las sierras de sur a norte el territorio para finalmente unirse al río Apulco, afluente del Tecolutla (Centro Estatal de Desarrollo Municipal, 1991).

El río Chichilaco, afluente del río Apulco, presenta un cuerpo muy irregular y se une al escurrimiento principal por el poniente. El río Huichautla, también proveniente del suroeste, recorre el sureste por más de 12 kilómetros y se une al Hueyateno. El Hueyateno o Tepetitlán, es el principal río del municipio, recorre desde el sureste hasta el extremo norte del territorio, para unirse al Apulco. El río Hueytecó nace al centro-este en las estribaciones del cerro Tomaquilo, recorre la parte central del sureste a noroeste y se une con el nombre de Xalacapan al Tepetitlán. Los ríos Ahuacatlán y Ayohuacateno se originan al centro-este y se unen formando el Ochiateno, afluente del Apulco.

Por último el río Apulco, corriente caudalosa que tiene un largo recorrido por la sierra norte, baña la parte septentrional de oeste a este, y sirve de límite por más de 10 kilómetros con Xochitlán, Nauzontla y Cuetzalán. También presenta gran cantidad de arroyos intermitentes que se unen a los ríos mencionados, así como numerosos manantiales y acueductos (Figuras 1.2 y 1.3).

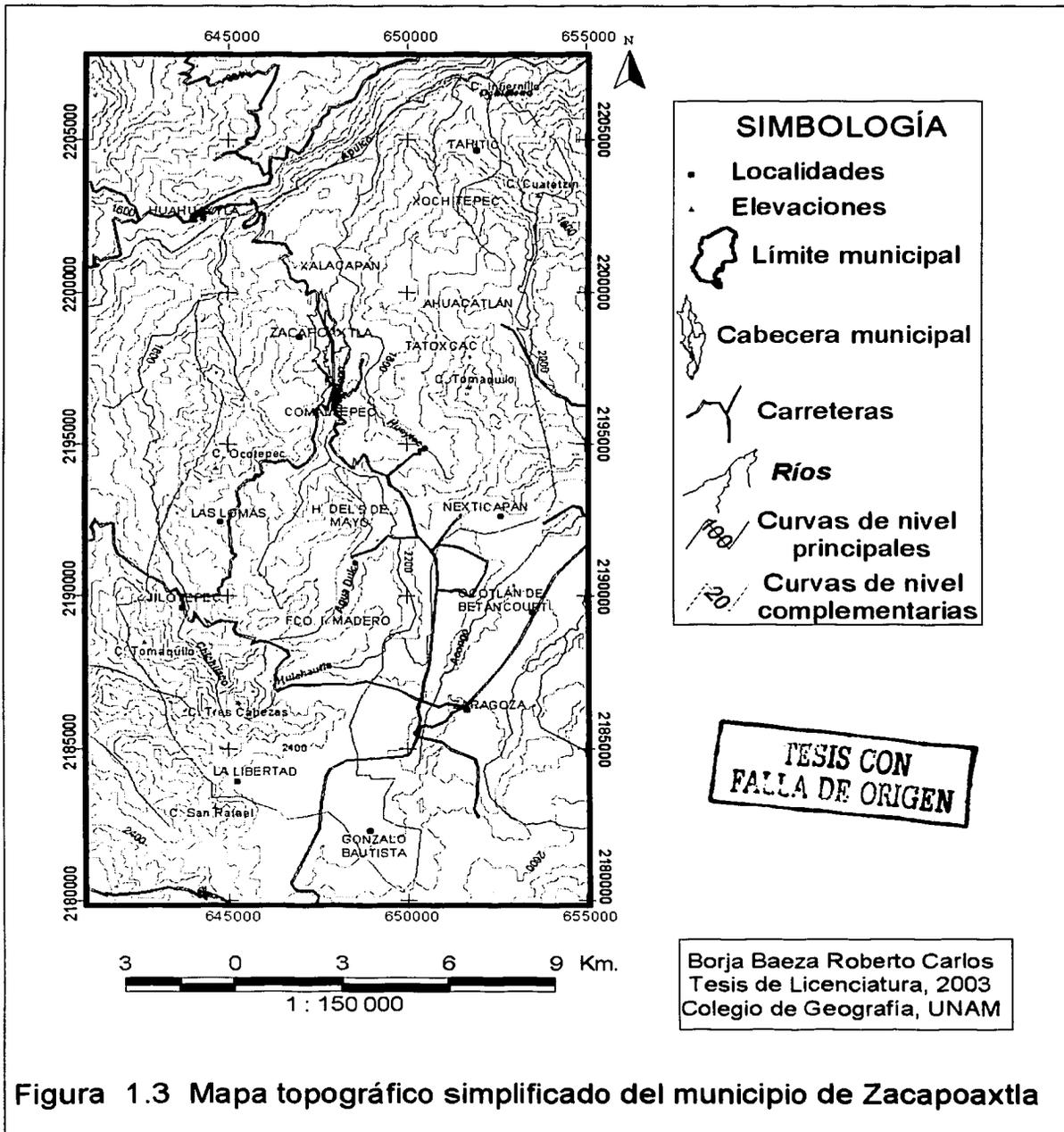


**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Borja Baeza Roberto Carlos  
Tesis de Licenciatura, 2003  
Colegio de Geografía, UNAM

**Figura 1.2 Orografía e hidrografía del municipio de Zacapoaxtla**



De lo descrito en párrafos anteriores, se intuye que el municipio se conforma por condiciones que favorecen la presencia de peligros naturales como inundaciones, principalmente en la zona sureste, y de manera particular, peligros derivados de los procesos de remoción de masa, en sus diferentes expresiones. Lo anterior se evidenció con las lluvias de octubre de 1999.

## 1.2 MARCO TEORICO

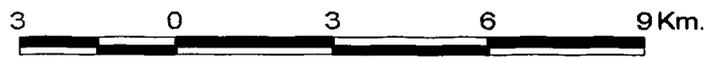
El estudio de los riesgos frente a los procesos naturales no es sólo de carácter físico, o su contraparte, sólo social, sino que debe ser resultado de la simbiosis de ambas ramas. Esta labor requiere de la aplicación de conceptos, métodos y análisis de diversas disciplinas, tales como la geología, la hidrología, la geofísica y la geomorfología, entre otras; asimismo el análisis de mapas y cartas temáticas, fotografía aérea, (figuras 1.4 y 1.5), imágenes de satélite (figura 1.6) y la consulta de archivos históricos de la zona, son de ayuda en el desarrollo del trabajo.

La prevención o mitigación del riesgo tiene la finalidad de evitar un desastre, éste a su vez debe ser visto como resultado de un fenómeno social-natural, entendiendo por desastres a *...ciertos daños graves en un sistema los cuales le impiden llevar a cabo el propósito para el cual fue diseñado o recobrar el orden regular en el que funciona* (Flores, en Garza, 1997). De lo anterior se deriva que los desastres son resultado de diversos factores globales.

Las actividades del hombre, independientemente de su origen, siempre interactúan con la naturaleza, obteniendo un beneficio de ella. Dentro de la misma, existen diversos fenómenos, también llamados peligros naturales, como sismos, erupciones volcánicas, huracanes, etc. que por sus características de intensidad y frecuencia causan daños a la estructura social de la zona en la que se presentan. El hombre debe aceptar que está en contacto intrínseco con una naturaleza viva, que posee sus propias leyes de funcionamiento, mismas que el hombre no siempre puede adaptar a sus necesidades y, por lo tanto, queda expuesto a sus efectos.

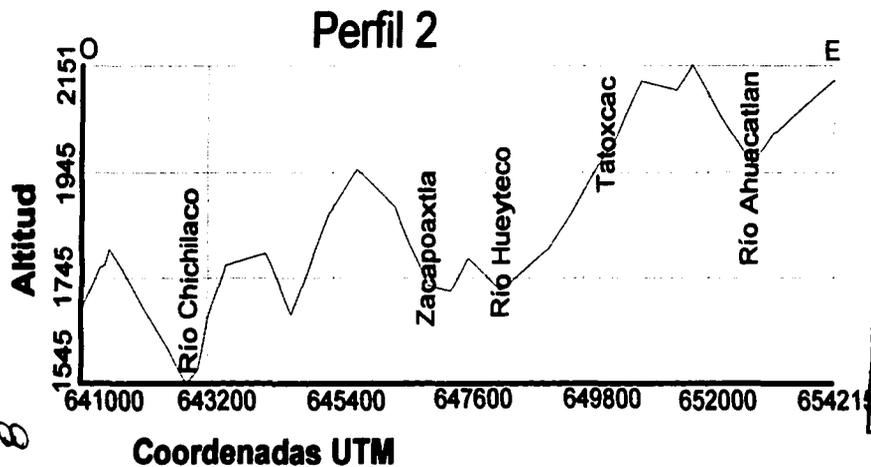
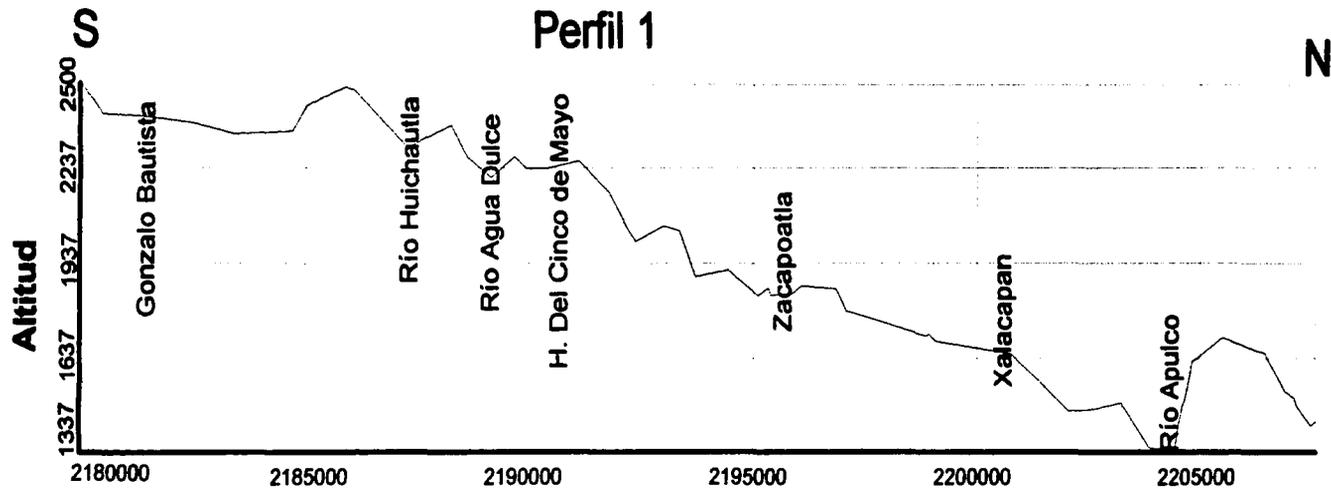


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

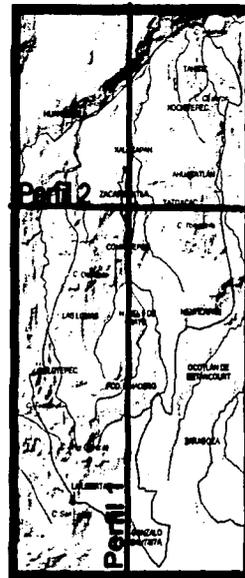


Borja Baeza Roberto Carlos  
Tesis de Licenciatura, 2003  
Colegio de Geografía, UNAM

Figura 1.4 Mosaico aéreo del municipio de Zacapoaxtla 7



**FALLA DE ORIGEN**  
 TUBOS CON  
 TUBOS CON



**Figura 1.5 Perfiles topográficos del municipio de Zacapoaxtla**

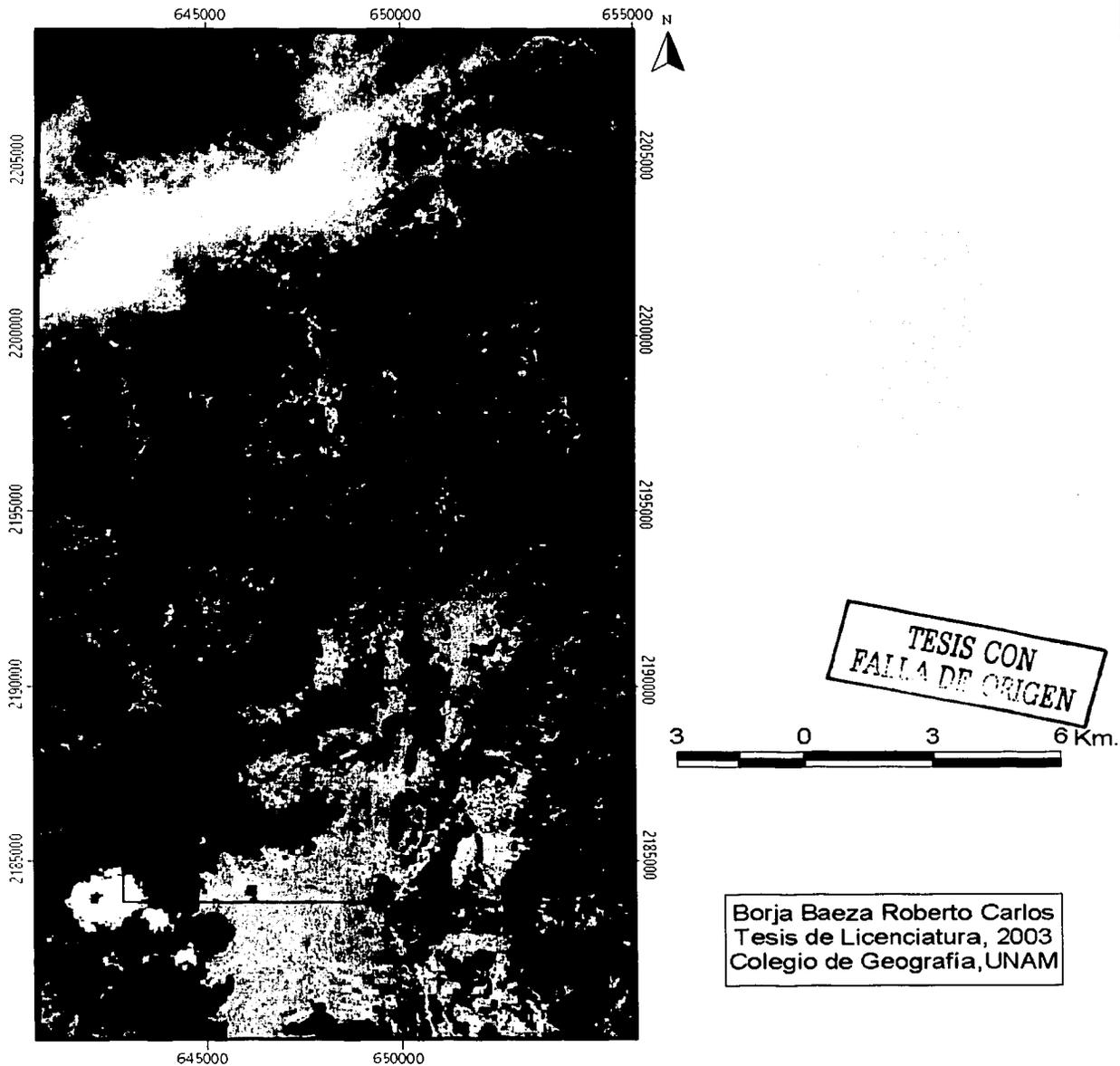


Figura 1.6 Imagen satelital del municipio de Zacapoaxtla

Cuando los elementos de la naturaleza actúan de manera conjunta, forman un ilimitado número de paisajes, formas, fenómenos y procesos con características particulares. Un fenómeno natural es toda aquella manifestación de la naturaleza, y los de extraordinaria ocurrencia, pueden ser previsibles o no, acorde con el grado de conocimiento que el hombre tenga acerca del funcionamiento de un fenómeno.

Los procesos de remoción en masa de ladera son fenómenos que involucran el movimiento de material formador de laderas por influencia de la gravedad, sin la asistencia de algún agente de transporte fluido (Brunsden, 1979). Éstos, según su velocidad, volumen y extensión se manifiestan, al igual que otros, como un peligro natural, por la alteración que ocasionan en la superficie donde se desarrollan.

Cuando la extensión potencial del impacto de un peligro natural ocupa una superficie compartida con la actividad humana, en sus diferentes expresiones, se establece el concepto de riesgo, el cual representa la afectación que dicho peligro puede causar sobre la estabilidad y equilibrio de la actividad humana.

El riesgo se puede calificar con diferentes criterios considerando de forma general la ubicación, magnitud, frecuencia y tipo de fenómeno, en relación con la ubicación, extensión y características sociales de la actividad humana. Dicho enfoque es relativo, ya que al intervenir la variable social en el conjunto de criterios a considerar, es difícil establecer la línea exacta que delimite los valores otorgados al riesgo.

A partir de la década de los años 70, se comenzó a dar una mayor importancia al estudio de los riesgos por fenómenos naturales, y a la prevención y reducción de dicho riesgo. Su análisis sistemático se empezó a llevar a cabo a través de los especialistas en ciencias naturales. Como resultado, la Organización de las Naciones Unidas declaró la década de los años 80 como "El Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales" (INDRD), con la finalidad de introducir a la comunidad científica, y a la población mundial, los principios de la prevención ante estos riesgos.

El crecimiento poblacional en México, ha ocasionado que la población extienda su área de vivienda y de trabajo, hasta zonas que no hace mucho tiempo se encontraban deshabitadas. El entorno social, por su parte, determina las condiciones bajo las cuales se van desarrollando los asentamientos humanos. Este determinismo lleva implícito el que aquellos sectores con limitantes sociales establezcan asentamientos en zonas en donde los peligros naturales son de gran magnitud. Asimismo, tales limitaciones reducen la capacidad de la población de reestablecer las condiciones de vida después del impacto de los peligros naturales. Cuando un peligro natural incide negativamente de manera directa y generalmente rápida en la población expuesta, se presenta un desastre natural.

Los factores que favorecen la presencia de los procesos de remoción en masa se pueden resumir en la geología (con la presencia de materiales débiles y estructura con fracturas); los procesos físicos (principalmente la precipitación, sismicidad y erupciones volcánicas); la morfología (en especial las pendientes resultado de la tectónica y la erosión), y la actividad antrópica (como consecuencia de los cambios en el relieve y sus elementos), todos ellos ocasionan el rompimiento del equilibrio entre las fuerzas internas y externas que determinan la estabilidad de las laderas.

Dada la diversidad de formas de relieve que existen en México, la combinación de distintos factores de inestabilidad de laderas es muy frecuente, principalmente en las zonas montañosas. Tal es el caso de la Sierra Norte de Puebla. En esta zona, durante octubre de 1999, se presentaron lluvias extraordinarias en los estados de Oaxaca, Hidalgo y Puebla que favorecieron la ocurrencia de fenómenos gravitacionales, ocasionando daños en diferentes municipios de los estados, siendo uno de éstos Zacapoaxtla, Puebla.

## **CAPITULO 2. PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA Y RIESGOS ASOCIADOS**

### **2.1 CONCEPTUALIZACIÓN**

La definición de procesos de remoción en masa, también llamados procesos de ladera o procesos gravitacionales, presenta diferentes enfoques de acuerdo con los principios manejados por el autor y por la escuela a la que éste pertenezca. De los diferentes conceptos se han considerado tres de ellos. Los dos primeros guardan similitudes entre sí, mientras que el tercero hace énfasis en la acción de la gravedad como el factor principal causal de los procesos, en tanto que los demás factores son considerados como detonadores de inestabilidad.

En 1938, Sharpe expresaba una definición sencilla, pero suficiente para el estudio de los procesos, la cual afirmaba que un movimiento de remoción en masa es “la perceptible caída deslizándose o cayendo de una masa relativamente seca de roca, suelo o de una mezcla de las dos”. Uno de los conceptos más utilizados es el descrito por Brunsden (1979), quien define a los procesos, como aquellos que involucran al movimiento de material formador de laderas por influencia de la gravedad, sin la asistencia de algún agente de transporte fluido. Por su parte, Pedraza (1996), describe a los procesos como “el desplazamiento de materiales en las vertientes, sin intervenir ningún soporte activo o medio para movilizarlos, es decir, impulsados por su propio peso, corresponde por tanto a una “autotraslación” bajo la acción directa de la gravedad que, en estas circunstancias deberá considerarse un agente específico más”.

Las definiciones utilizadas por otros autores pueden tener algunas variaciones en la descripción de los procesos de remoción y en sus causas, pero en general, la idea de movimiento de material hacia abajo sobre la pendiente, en un relieve montañoso principalmente, ya sea en seco o en húmedo, por la influencia de la gravedad, es la característica principal.

## 2.2 CLASIFICACIONES

Las clasificaciones de los procesos de remoción en masa, al igual que su definición, presentan diversas posturas y planteamientos que generan problemas de analogía en los tipos de procesos existentes. La combinación de los factores a considerar para elaborar la clasificación, y la cualidad que a cada uno se les otorga, da como resultado la clasificación.

Existen dos clasificaciones de los procesos de remoción en masa que han sido frecuentemente utilizadas. En la primera, Varnes (1975) fundamenta su estudio en el tipo de material involucrado, considerando la roca y el suelo como los principales (cuadro 2.1). Por otro lado, Sharpe (1938) considera la velocidad del movimiento, en la escala de imperceptible a simple vista, solo evidenciada por algunos elementos del relieve y la vegetación, así como por mediciones en el terreno; en tanto que un movimiento rápido puede ser observado. También señala que el incremento en la cantidad de agua o hielo en la masa de roca o suelo, determina la velocidad del material transportado (cuadro 2.2). Pedraza (1996) presenta una clasificación que incluye cuatro procesos principales: caída libre, deslizamiento, flujo y reptación o *creep*, que es el movimiento lento de arrastre del suelo a favor de la pendiente, mismo que se considera como indicador del inicio de los procesos de ladera.

En el presente trabajo se utilizará la clasificación de los procesos de remoción en masa propuesto por EPOCH, que forma parte del programa "la Ocurrencia Temporal y Pronóstico de Deslizamientos en la Comunidad Europea" (European Community Programme, 1993) basada en las clasificaciones de Varnes (1978) y Hutchinson (1988) y adaptada recientemente por Alcántara-Ayala (2000) para la literatura en español. Esta clasificación incluye seis tipos de procesos: caídas o desprendimientos, vuelco o desplome, deslizamiento (rotacional, simple, translacional y planar), flujo, expansión lateral o desplazamiento y movimientos complejos. En ella se considera una diferenciación entre el material involucrado y el tipo de movimiento. El cuadro 2.3 muestra los procesos en su término original en inglés, así como la propuesta de Alcántara Ayala. Los materiales involucrados en los diversos tipos de procesos de remoción en masa son: rocas, derrubios y suelos. Éstos se pueden presentar por separado, principalmente en rocas, o bien, en combinación, lo cual es más común.

Cuadro 2.1 Clasificación de procesos de ladera, según Varnes (Pedraza, 1996).

TIPO DE MOVIMIENTO			TIPO DE MATERIAL		
Caída			Roca (sustrato)	Suelo (formación superficial) Grueso      Fino	
Vuelco			En roca	En derrubios	En tierras
Deslizamiento	Rotacional	Unidades pequeñas			
	Translacional	Unidades grandes			
Expansión Lateral					
Flujo					
Reptación					
Complejo			Combinación de dos o más tipos		

Cuadro 2.2 Clasificación de movimientos gravitacionales, según Sharpe (Oropeza *et. al.* en Garza, 1998).

Movimiento		Hielo	Tierra o roca	Agua			
Tipo	Velocidad						
		Principalmente hielo	Tierra o roca mas hielo	Tierra o roca, seca o con cantidades menores de hielo o de agua	Tierra o roca mas agua	Principalmente agua	
Con lado libre	Flujo	Generalmente imperceptible	Reptación de rocas		Reptación de rocas		
			Reptación de rocas de glaciar		Reptación de escombros del talud		
			De lento a rápido	Solifluxión	Reptación del suelo	Solifluxión	
				Derrumbe de detritos		Corriente terrosa	Corriente de barro
						Derrumbe de detritos	
	Deslizamiento (de tierra)	Rápido	Acarreo Glaciarico	Desmoronamiento		Acarreo fluvial	
				Deslizamiento de detritos			
				Caída de detritos			
				Deslizamiento de roca			
	Muy rápido	Rápido a lento		Alud de rocas			
Hundimiento							
Confinado	Deslizamiento o flujo						

Cuadro 2.3 Clasificación de los procesos de remoción en masa, EPOCH, 1993 (Alcántara-Ayala, 2000).

MECANISMO DE MOVIMIENTO	TIPO DE MATERIAL INVOLUCRADO		
	ROCA ( <i>rock</i> )	DERRUBIOS ( <i>debris</i> )	SUELO ( <i>soil</i> )
Desprendimientos ( <i>falls</i> )	Caída o desprendimiento de rocas ( <i>rockfall</i> )	Caída o desprendimiento de derrubios ( <i>debris fall</i> )	Caída o desprendimiento de suelos ( <i>soil fall</i> )
Vuelco o desplome ( <i>topple</i> )	Vuelco o desplome de rocas ( <i>rock topple</i> )	Vuelco o desplome de derrubios ( <i>debris topple</i> )	Vuelco o desplome de suelos ( <i>soil topple</i> )
Deslizamiento rotacional simple ( <i>rotational slide</i> )	Individual ( <i>simple</i> ) Múltiple ( <i>multiple</i> ) Sucesivo ( <i>successive</i> )	Individual ( <i>simple</i> ) Múltiple ( <i>multiple</i> ) Sucesivo ( <i>successive</i> )	Individual ( <i>simple</i> ) Múltiple ( <i>multiple</i> ) Sucesivo ( <i>successive</i> )
Deslizamiento translacional o de bloques no-rotacional ( <i>translational slide, non-rotational</i> )	Deslizamiento de roca en bloque ( <i>block slide</i> )	Deslizamiento de derrubios en bloque ( <i>block slide</i> )	Deslizamiento translacional de suelos ( <i>slab slide</i> )
Deslizamiento Planar	Deslizamiento de rocas ( <i>rock slide</i> )	Deslizamiento de derrubios ( <i>debris slide</i> )	Coladas de barro ( <i>mudslide</i> )
Flujos ( <i>flow</i> )	Flujo de rocas ( <i>rock flow</i> )	Corrientes de derrubios ( <i>debris flow</i> )	Flujos de tierra, arena o suelo ( <i>soil flow</i> )
Expansión lateral ( <i>lateral spreading</i> )	Expansiones laterales en rocas ( <i>rock spreading</i> )	Expansiones laterales en derrubios ( <i>debris spread</i> )	Expansiones laterales en suelos ( <i>soil spreading</i> )
Complejo ( <i>complex</i> )	Ejemplo: Alud de rocas ( <i>rock avalanche</i> )	Ejemplo: Flujo deslizante ( <i>flow slide</i> )	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras ( <i>slump-earthflow</i> )

### 2.3 TIPOS Y CARACTERISTICAS

A continuación se describe cada uno de los movimientos de ladera, y su caracterización particular.

### 2.3.1 CAIDAS O DESPRENDIMIENTOS

Las caídas o desprendimientos involucran la caída libre de material en laderas, por lo general con pendiente mayor a  $30^\circ$ , o bien en el borde de alguna pared rocosa, por ejemplo un acantilado afectado por erosión fluvial (Lugo-Hubp, 1989). El primer paso para la caída libre es la cuarteadura del material, el cual es separado por agentes externos a través de intemperismo físico. El material que puede originar desprendimientos es todo aquel que sea deleznable, ya sea en fragmentos grandes o bloques, o bien en detritos. El material puede rebotar, rodar, deslizarse o caer libremente (Figura 2.1). Dependiendo de esta acción puede sufrir una transformación en su forma, en términos generales, ésta será mínima en el rodamiento ladera abajo, y mayor en la caída libre. El volumen de la masa en movimiento resulta de la ubicación de la cicatriz de separación en el lugar de origen, y de otras características propias del material, tales como la separación laminar, por disgregación o en bloques, pudiendo ser mínimo en el caso de los suelos y mayor en la roca. Los cambios en el relieve o la morfología del lugar de depósito, dependen a su vez de las características del material desplazado, del volumen de la masa removida y del relieve preexistente en la zona de acumulación (Brunsden, 1984; Alcántara-Ayala, 2000).

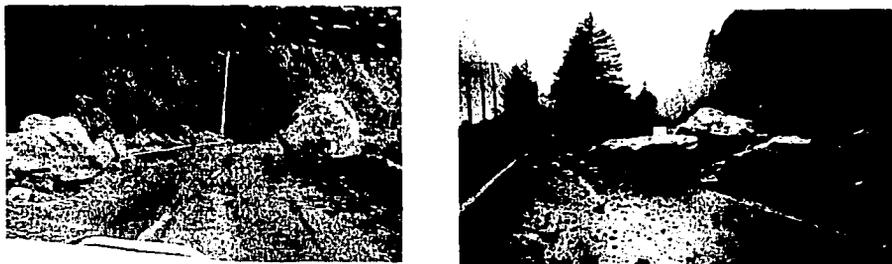


Figura 2.1 Caídas o desprendimientos (USGS)

### 2.3.2 VUELCO O DESPLOME

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El vuelco basa su movimiento en la rotación del material removido (suelo o roca) en torno a un eje determinado por su gravedad. El movimiento se presenta hacia fuera,

generalmente perpendicular a las grietas o discontinuidades que generan su separación del bloque principal. Este tipo de proceso se presenta preferencialmente en rocas o materiales que sugieren ruptura por la presencia de diaclasas, grietas y superficies columnares (Alcántara-Ayala, 2000). El vuelco en las primeras clasificaciones era interpretado como caída y en caso de que la masa o volumen desplazado fuese considerable, se podía intuir el paso a un deslizamiento (Figura 2.2).



Figura 2.2 Vuelco o desplome (USGS)

### 2.3.3 DESLIZAMIENTO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Se denomina deslizamiento al movimiento ladera abajo de material, bien sea suelo, detritos o rocas, sobre una superficie reconocible de fractura. Los deslizamientos son favorecidos por contactos de rocas inclinados en la misma dirección que la pendiente, la cual presenta una inclinación mayor a los  $15^\circ$  en la mayoría de los casos (Lugo-Hubp, 1989). Similar a lo que ocurre en un inicio con el vuelco, la presencia de grietas es la primera señal de la posibilidad de que se genere un proceso de este tipo. Los deslizamientos se subdividen en tres tipos: rotacional, translacional y planar, y es la superficie de ruptura quien define al tipo. El rotacional se caracteriza por superficies de ruptura cóncavas o curvas; las superficies semiplanas u onduladas evidencian movimientos translacionales, y las superficies planas, por supuesto, nos indican deslizamientos planares (Alcántara-Ayala, 2000).

La velocidad de un deslizamiento suele ser menor a la de una caída o desprendimiento, aunque el volumen de material desplazado generalmente es mayor. Asimismo, la deformación de la masa de material removido, llega a ser menor que en los otros tipos

de procesos. Por la velocidad del evento no es fácil observar el momento mismo de su ocurrencia. Este proceso deja marcas perceptibles tanto en la ladera de origen, como en el lugar de depósito. Por ejemplo, se observa la cicatriz dejada por la superficie de ruptura, acompañada del escarpe, la corona y otros puntos que reflejan la separación del material; en el lugar de depósito se crean formas acumulativas tales como lenguas, conos o bloques caóticos, que se identifican con cierta facilidad como pertenecientes a la vertiente de origen (Figura 2.3).



Figura 2.3 Deslizamientos (USGS)

#### 2.3.4 FLUJOS

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El flujo es un movimiento de material en la ladera, con un comportamiento muy parecido a un fluido viscoso, determinado por el movimiento individual de las partículas que viajan separadas dentro de la masa removida, lo que origina velocidades diferenciales. En un flujo, las superficies de cizalla son muy próximas. El proceso es de poca duración, lo que dificulta la observación en el momento en el que sucede el proceso (Alcántara-Ayala, 2000).

En éstos movimientos, la deformación del material es muy alta, creando en el lugar de depósito lenguas o lóbulos bien definidos con el material de origen y el de arrastre. El volumen de masa en flujo es, generalmente, muy grande con relación a los demás

procesos descritos previamente. La cicatriz que forma la separación del material de la ladera, presenta una forma subhemisférica (Figura 2.4).



Figura 2.4 Flujos (USGS)

### 2.3.5 EXPANSION LATERAL

La expansión lateral, también conocida como desplazamiento lateral, es de reciente incorporación a los movimientos de ladera, puesto que su reconocimiento y estudio se inicia en la década de los años 70. El término es usualmente utilizado para describir la extensión o distribución del movimiento lateralmente de una roca cohesiva o una masa de suelo, alrededor de una masa deforme no bien definida en su cementación, es decir, corta la superficie o zona de flujo plástico. En este caso en particular, la causa principal es la deformación plástica de una masa de roca a lo largo de la extensión del proceso en la superficie. De acuerdo con Alcántara-Ayala (2000) la expansión lateral se puede definir como *...resultado de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactas, que ocurren cuando materiales gruesos están inmersos en una matriz de material fino* (Figura 2.5, 2.5a).

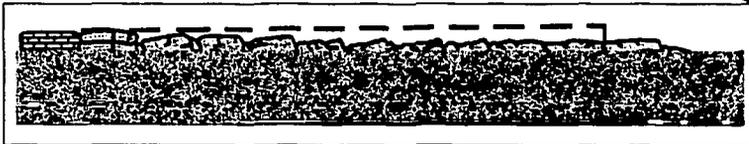


Figura 2.5 Expansión lateral (Tomado de Alcántara-Ayala, 2000.)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

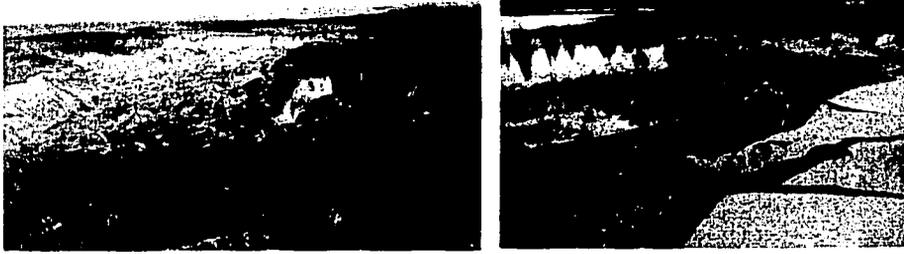


Figura 2.5a Expansión o desplazamiento lateral (USGS).

### 2.3.6 MOVIMIENTO COMPLEJO

Los movimientos complejos presentan la combinación de dos o más de los procesos de remoción descritos. Esto puede darse al iniciar un proceso, y en su avance ladera abajo, de tal forma que se da una transformación de sus características, convirtiéndose o combinándose con otro proceso. Este tipo de movimiento es muy frecuente debido a la variedad de factores que generan los movimientos.

Entre los procesos complejos se distinguen dos principales: los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes (Figura 2.6). En el primer caso, de acuerdo con su nombre, se presenta el movimiento de rocas a gran velocidad y recorriendo una distancia considerable; por otro lado, los flujos deslizantes resultan del colapso o caída repentina de material granular, cuyas magnitudes de velocidad y distancia recorrida son similares a las avalanchas de roca. Generalmente, el depósito de este tipo de procesos es una forma alargada y estrecha, resultado de la velocidad de desplazamiento sobre el terreno (Brunsdén, 1988; Selby, 1993; Alcántara-Ayala, 2000).

### 2.4 FACTORES DE INESTABILIDAD

Los procesos de remoción se presentan en laderas con una variedad de materiales y se desarrollan a través de diversos mecanismos y causas. En esencia, los procesos gravitacionales ocurren cuando la ladera se vuelve inestable como consecuencia de los cambios en el relieve que afectan a los materiales formadores de la misma, ya sean

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

suelos, rocas o detritos. Las causas son principalmente de dos tipos: internas y externas. Las causas internas son aquellas que aumentan el esfuerzo o la tensión, sin que al mismo tiempo crezca la resistencia de los materiales, mientras que las causas externas disminuyen la resistencia en los materiales, sin que atenúen las fuerzas impulsoras externas (Terzaghi, 1950; Selby, 1993).



Figura 2.6 Movimiento complejo (USGS)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los cambios externos principales están relacionados con alteración de la geometría y morfología de las laderas, a partir de las variaciones en la pendiente, taludes y cortes (naturales y artificiales), resultado de la erosión, socavamiento, incisión, etc. Otros factores externos que favorecen los procesos de remoción en masa son las removilizaciones del terreno, sismos u otro tipo de vibraciones artificiales (licuefacción, fluidización, lubricación por aire, etc.), cambios en el régimen climático, principalmente en el régimen hidrológico, la actividad biológica e intemperismo (Terzaghi, 1950).

En cuanto a los factores internos, se puede mencionar la meteorización de la roca, fisuras, la desecación, reducción de cohesión y remoción de cementantes en el suelo e incluso la descarga de material (la que algunos autores consideran como un factor externo).

Para que un proceso pueda presentarse en el terreno es necesaria la presencia de diversos factores, el grado en que cada uno de estos favorece el movimiento es variable acorde a las particularidades de la zona y a la combinación de estos agentes causales. Sin embargo, existen factores que por sí solos pueden ocasionar la detonación de los

procesos, tal es el caso de la variación del régimen pluvial, que puede manifestarse a través de lluvias intensas durante un período corto de tiempo, o bien lluvias extraordinarias. En el cuadro 2.4 se presenta la clasificación de las causas de los movimientos de ladera en función de los factores internos y externos (Varnes y Cruden, 1996).

La geología incluye los materiales que pueden ser afectados debido a sus propiedades; los procesos físicos, que pueden influir sobre los materiales dependiendo de las condiciones climáticas del lugar; la erosión en el relieve y los cambios tectónicos modifican la morfología favoreciendo los procesos, y finalmente la acción del hombre, que en su adaptación al medio natural, modifica las condiciones originales alterando el equilibrio preexistente.

Cuadro 2.4 Causas de los movimientos del terreno, según Cruden y Varnes (1996). (Alcántara-Ayala, 2000).

<b>Geológicas</b>	<b>Físicas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Materiales débiles</li> <li>⇒ Materiales sensibles</li> <li>⇒ Materiales intemperizados</li> <li>⇒ Materiales sujetos a cizallamiento</li> <li>⇒ Materiales con fisuras y diaclasas</li> <li>⇒ Discontinuidades orientadas adversamente (esquistosidad, planos de inclinación)</li> <li>⇒ Discontinuidades estructurales (fallas, discordancias, contactos)</li> <li>⇒ Permeabilidad contrastante</li> <li>⇒ Contraste de materiales con diferente plasticidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Precipitación intensa</li> <li>⇒ Derretimiento rápido de nieve o hielo</li> <li>⇒ Precipitación extraordinaria</li> <li>⇒ Sismos</li> <li>⇒ Erupciones volcánicas</li> <li>⇒ Gelifracción</li> <li>⇒ Expansión e hidratación de arcillas</li> </ul>
<b>Morfológicas</b>	<b>Antrópicas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Levantamientos tectónicos o volcánicos</li> <li>⇒ Erosión glacial</li> <li>⇒ Erosión fluvial al pie de las laderas</li> <li>⇒ Erosión marina al pie de los acantilados</li> <li>⇒ Erosión glacial al pie de las laderas</li> <li>⇒ Erosión en márgenes laterales</li> <li>⇒ Erosión subterránea</li> <li>⇒ Remoción de la vegetación (por incendios y sequías)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Excavación de laderas o del pie de las laderas</li> <li>⇒ Incremento de peso en las laderas</li> <li>⇒ Deseccación de cuerpos de agua (presas)</li> <li>⇒ Deforestación</li> <li>⇒ Irrigación</li> <li>⇒ Actividad minera</li> <li>⇒ Vibraciones artificiales</li> </ul>

## 2.5 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

La figura 2.7 es una imagen idealizada en la cual se pueden distinguir con claridad algunas de las características morfológicas de un movimiento de ladera. En ella se

observan algunos detalles de la morfología resultante, a través de los cuales se puede apreciar un comportamiento de deslizamiento en la parte superior, y de flujo en la zona inferior del terreno. Asimismo, al observar estos elementos es posible determinar ciertos comportamientos del proceso, tales como velocidad, magnitud, tipo de movimiento, grado de actividad, etc., lo cual permite conocer el estado actual del movimiento, y de esta manera entender su posible comportamiento futuro.

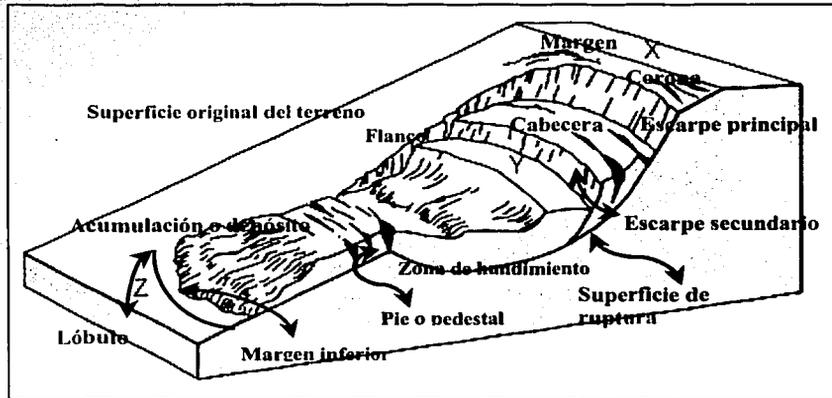


Figura 2.7 Atributos morfológicos idealizados de un movimiento de ladera.

## 2.6 GRADOS DE ACTIVIDAD

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los procesos de remoción en masa presentan distintos grados de actividad, de acuerdo con la presencia o ausencia de movimiento. Si el movimiento del terreno está presente al momento de clasificarlo, se le denomina movimiento activo; si el movimiento cesa y en los últimos doce meses presentó actividad, se le llama movimiento suspendido o en suspenso; si el movimiento reinicia su actividad después de un período de estabilidad, se le conoce como movimiento reactivado; si en los últimos doce meses no presentó actividad, se le nombra como un movimiento apagado, abandonado, reliquia o estabilizado (Alcántara-Ayala, 2000). Esta clasificación toma valor cuando se observa que los movimientos del terreno son propensos a reactivarse, es decir, a ocurrir en puntos que previamente presentaron movimiento, por lo que una identificación correcta auxilia en la localización de puntos de peligro.

## **2.7 VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO**

Para consideraciones de los efectos en la población y en los bienes inmuebles la velocidad a la cual un movimiento se puede presentar, es una característica que de ser conocida puede facilitar el manejo de la amenaza. La velocidad de los movimientos es un claro indicador de la evolución que se presenta en la superficie, y que se refleja en posibles daños en las construcciones. Esta velocidad va desde la presentada por la reptación del suelo, la cual puede describirse como extremadamente lenta, al otro extremo de la escala, en la que se representan los movimientos más rápidos, como pueden ser una avalancha o la caída libre (Alexander, 1993). La velocidad de los movimientos de ladera está dada por los factores que desencadenan el proceso y también por los materiales involucrados en el movimiento.

A pesar de la dificultad de elaborar una descripción de la velocidad intermedia entre los valores máximo y mínimo de desplazamiento, Varnes (1996) elaboró una escala del movimiento utilizando 7 rangos. El más lento, corresponde a 0.016 metros/año, representado por la reptación, y el más rápido de 3m/segundo que presentan los flujos o avalanchas de escombros. Generalmente, el daño que provocan estos procesos es proporcional a su velocidad (Alcántara-Ayala, 2000).

## **2.8 INDICADORES EMPLEADOS PARA LA IDENTIFICACION DE PROCESOS DE REMOCION EN MASA**

Existen distintos indicadores que pueden auxiliar en el reconocimiento de los procesos de remoción en masa y pueden ser observados de manera precisa directamente en campo o bien, de manera indirecta, mediante trabajo de gabinete a través de mediciones de cartas topográficas, fotografías aéreas o imágenes de satélite de distintos períodos. En el cuadro 2.5 se enlistan las principales características para reconocer la actividad de los procesos de manera general (Brunsden, 1984; Crozier, 1986) mientras que en el cuadro 2.6 se presentan algunas características de reconocimiento propias de los procesos (Pedraza, 1996; Oropeza *et al*, 1998).

Cuadro 2.5 Características empleadas en el reconocimiento de movimientos del terreno de acuerdo con Brunsdén y Crozier, (Alcántara-Ayala, 2000).

Depósitos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Crestas transversales en la corona. Crestas longitudinales en el cuerpo. Crestas concéntricas en el pie, las cuales son transversales a la morfología.</li> <li>2. Fracturas transversales y radiales en el pie.</li> <li>3. Valles parcial o totalmente bloqueados. Divergencia de patrones de drenaje.</li> <li>4. Desplazamiento de materiales.</li> </ol>
Movimientos activos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Los escarpes y fracturas tienen ejes abruptos y filosos. No hay presencia de rellenos secundarios.</li> <li>2. Las unidades principales muestran fracturas secundarias y crestas de presión.</li> <li>3. Las superficies muestran pulimento y estriaciones de apariencia fresca.</li> <li>4. Cambios en el drenaje.</li> <li>5. No hay desarrollo de suelo, solamente crecimiento de vegetación.</li> <li>6. Diferencias considerables entre la forma, rugosidad, textura y vegetación de las áreas con y sin deslizamientos.</li> <li>7. Vegetación inclinada.</li> </ol>
Movimientos inactivos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Escarpes y fracturas intemperizadas, grietas rellenas.</li> <li>2. Inexistencia de movimientos secundarios de crestas de presión.</li> <li>3. Superficies intemperizadas y cubiertas de vegetación.</li> <li>4. Drenaje integrado, el cual puede tener un patrón irregular y depresiones sin relleno.</li> <li>5. Buen desarrollo de la cubierta del suelo, ya sea por vegetación natural o cultivada.</li> <li>6. Nuevo crecimiento de árboles y crecimiento vertical de árboles.</li> </ol>

Cuadro 2.6 Ejemplos indicativos para la identificación de fenómenos gravitacionales. Basado en Pedraza, 1996 y Oropeza-Orozco, *et al* 1998.

Proceso	Observaciones
Caída	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Proceso reconocible por sus resultados: derrubios a pie de escarpe sin apenas vegetación.</li> <li>2. Cortados rocosos con tonalidad original de la roca fresca, poco meteorizados y sin colonizar.</li> <li>3. Paredes en extraplomo muy agrietadas e inestables.</li> <li>4. Rocas inestables en la parte más alta de la ladera.</li> </ol>
Vuelco	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bloques desprendidos de la roca original conservando sus características litológicas.</li> <li>2. Cortados rocosos en forma de acuñada.</li> </ol>
Deslizamiento	<p>En la cabecera aparece una coronación con cicatrices de arranque.</p> <p>En la masa deslizada se reconocen grietas, bloques individualizados y girados, pequeños replanos, concentraciones de humedad y vegetación hidrófila.</p> <p>Acumulación de rocas o suelos al pie de superficies casi planas.</p> <p>Planos o superficies rocosas rectas o semirectas casi paralelas a la pendiente.</p> <p>Inclinación de vegetación.</p>
Flujo	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. En la cabecera hay pequeñas cicatrices de despegue y microdepresiones.</li> <li>2. La lengua tiene un perfil ligeramente ondulado.</li> <li>3. Presencia de suelos y vegetación hidrófila en su contorno.</li> <li>4. Áreas saturadas permanentemente aún en la estación seca.</li> <li>5. Vegetación densa en la época seca.</li> </ol>

## 2.9 EFECTOS

Distintas actividades de tipo antrópico tienen una influencia directa en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, y como consecuencia, la alta incidencia de éstos movimientos también genera un impacto en la sociedad, el cual se traduce desafortunadamente en pérdidas de vida y costosos daños. Por ejemplo, un probable deslizamiento de magnitud media representa un riesgo mucho más alto en una zona urbana que otro deslizamiento de mayor volumen en un sitio despoblado.

Como se enfatiza en el apartado de causas, la actividad antrópica se ha convertido en uno más de los factores generadores de los procesos de ladera. Del mismo modo, la cercanía de la actividad humana, convierte al fenómeno su calidad de peligro natural, a un riesgo natural. Tales daños se originan en gran medida cuando se desarrollan asentamientos humanos en los depósitos de antiguos movimientos (Figura 2.8).

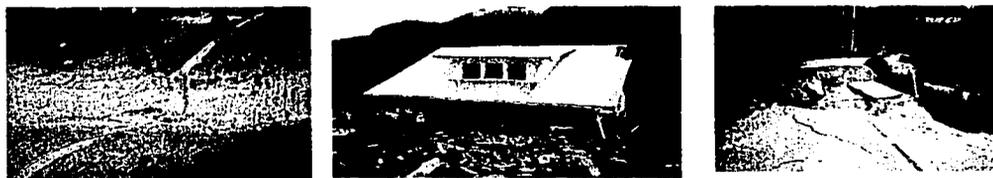


Figura 2.8 Algunas consecuencias sobre casas-habitación y carreteras que se ubican en la masa en movimiento o en su recorrido.

TESIS CON  
FALLA DE QUEJEN

El cuadro 2.7 muestra una escala de la intensidad del daño ocasionado por los procesos de ladera en las construcciones utilizadas como casa habitación, el cual fue elaborado por Alexander (1993). Esta clasificación se basa en los daños reflejados en las estructuras de las construcciones, y en las señales que se distinguen en los componentes de las mismas, con un margen que va desde la construcción sin daños, hasta aquella que necesita ser reemplazada o cambiar de terreno en el cual construir.

Cuadro 2.7 Escala de intensidad de daños por procesos de remoción en masa, (Alexander, 1993).

Grado	Tipo	Descripción del daño
0	Ninguno	Delgadas líneas de rupturas en paredes o miembros estructurales; sin distorsión de estructuras o separación de detalles arquitectónicos externos.
1	Insignificante	Las construcciones aun son habitables; reparaciones no urgentes; distorsión de estructuras e inclinación de paredes insuficientes para comprometer la estabilidad total.
2	Ligero	Las construcciones aun son habitables; reparaciones no urgentes; distorsión de estructuras e inclinación de paredes insuficientes para comprometer la estabilidad total.
3	Moderado	Paredes fuera de la perpendicular por 1 o 2 grados; ruptura sustancial ha ocurrido en los miembros de las estructuras; las estructuras requieren rápida atención para asegurar su vida útil.
4	Serio	Paredes fuera de la perpendicular por varios grados; rupturas abiertas en paredes; fracturas en los miembros de las estructuras; fragmentación de la mampostería; los suelos pueden inclinarse en 1 o 2 grados o ser dañados por suelos removidos; partición interna de las paredes que necesitan ser reemplazadas; puertas y ventanas demasiado distorsionadas para usarse; los habitantes deben ser evacuados y deben llevarse a cabo reparaciones mayores.
5	Muy serio	Paredes con inclinaciones de 5 o 6 grados; enormes distorsiones en las estructuras; paredes partidas y ladrillos con algunas partes colapsadas; los techos pueden colapsarse parcialmente; patios, pórticos y salidas de casas con daños más serios que la estructura principal; los ocupantes necesitan reconstruir sus casas en la base a lo largo de un tiempo y la rehabilitación de la construcción probablemente no sea factible.
6	Colapso parcial	Se requiere de la evacuación inmediata de los ocupantes y acordonamiento del sitio para prevenir accidentes con caída de mampostería.
7	Colapso total	Se requiere despejar el sitio.

## 2.10 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

De acuerdo con Lugo e Inbar (2002) un desastre presenta ciertas características; es de gran magnitud, repentino, por lo general impredecible y de corta duración, además de causar víctimas y daños económicos severos en la zona afectada. De lo anterior tenemos que la presencia de desastres originados por fenómenos naturales representan un gran retraso en el desarrollo de las poblaciones afectadas y una carga económica importante para los gobiernos que respalden a estas comunidades. Esta condición se ve acrecentada por la vulnerabilidad de países o regiones con un nivel económico limitado, el cual dificulta la rápida recuperación, e incluso la preparación adecuada para afrontar el

desastre mismo. Los procesos de ladera llegan a representar el mismo costo económico y social que otros fenómenos considerados más peligrosos al sistema, como sismos y huracanes. Sin embargo, en muchas ocasiones los daños asociados a éstos procesos se minimizan, ya que se presentan de manera paralela o como consecuencia de los eventos antes mencionados. Un claro ejemplo es la estadística publicada por la International Association of Engineering Geology (IAEG) que muestra que el 14% de las víctimas de desastres naturales son resultado de procesos de remoción (Hernández-Madrigal, 2001). Dado lo anterior es también conveniente puntualizar que éste tipo de procesos requiere de mayor investigación, ya que el 80% de la superficie está constituido por laderas de más de 2° y el resto son planicies, lo que muestra un factor que favorece los movimientos gravitacionales (Leontiev y Richagov, en Lugo, 1998).

Por otro lado, de acuerdo con diversos autores, el cambio climático global ha tenido gran influencia en la mayor ocurrencia de movimientos de ladera. Delmonaco y Margottini (2000) muestran que el régimen pluviométrico alterado por dicho cambio concentra las lluvias en un período de tiempo más corto al presentado con anterioridad, lo cual es factor determinante en el incremento de deslizamientos y otros procesos gravitacionales. De acuerdo con estos autores, más del 50% de los movimientos de ladera son directamente provocados por fenómenos meteorológicos, en especial por lluvias torrenciales en Italia. El conocimiento de los cambios climáticos es necesario para poder analizar su repercusión en la inestabilidad de laderas y de manera particular para poder prevenir desastres.

Los fenómenos de origen geológico (sismos, vulcanismo) son el segundo lugar en muertes por desastres naturales en México (sólo superados por fenómenos hidrometeorológicos), lo cual nos dice que los procesos de ladera desafortunadamente están presentes en éstas estadísticas, y las cifras de las últimas dos décadas (1980-1999) así lo demuestran, por lo que la importancia de su estudio es imperante (CENAPRED, 2002).

Actualmente, se cuentan con avances tecnológicos y teóricos en el estudio de los fenómenos naturales, basados en su comportamiento, desde su génesis hasta las secuelas que se producen en el crecimiento y desarrollo de los mismos. Día a día estos conocimientos aumentan en la exactitud y en número, no sólo en México, sino alrededor

del mundo, lo cual resulta en mayor calidad de pronósticos y predicciones de posibles escenarios.

Cuadro 2.8 Principales fenómenos naturales que originan desastres, en México (CENAPRED 2002).

Tipo de fenómeno	Muertes	Daños directos (Mill. de pesos)	Daños indirectos (Mill. de pesos)	Total
Hidrometeorológicos	2767	4402.3	144.9	\$ 4547.2
Geológicos	6097	4043.7	516.4	\$4560.1
Químicos y ambientales	1250	1149.7	133.6	\$ 1283.3
Total	10114	9595.7	794.9	\$10390.6

La disminución de los efectos causados en el sistema social por los desastres puede tomar dos direcciones (Flores, en Garza, 1998):

- a) El intervenir en los procesos de producción de las causas o calamidades evitando su ocurrencia, o bien
- b) Cambiando el estado y funcionamiento del sistema afectable, mitigando las consecuencias del impacto desastroso.

La importancia del estudio de los procesos de remoción en masa radica en el interés de evitar la afectación de tales fenómenos en la sociedad, desde cualquier punto de vista en que se le observe. Para ello, el primer paso que se ha pretendido, es el entendimiento del proceso en forma general, y particularmente de cada uno de los diferentes tipos. Su estudio ha llevado a la comprensión del fenómeno y de las causas que lo generan. De aquí se deriva el siguiente paso que es la prevención, ésta pretende, en su forma más ambiciosa, evitar todo daño posible a la estructura social y, principalmente, a la vida humana. Esta finalidad tiene en consideración la inevitable interacción que actualmente se presenta entre la actividad humana y la presencia de fenómenos gravitacionales.

El estudio de los procesos de remoción en masa, y su enfoque a la prevención de desastres causados por tales fenómenos es de reciente incursión al medio de investigación en México. Esto ha traído como resultado que no se cuente con una cultura de prevención de los procesos gravitacionales, lo cual es notorio en el uso de suelo habitacional en una gran parte del país, en donde las laderas son utilizadas como terreno de construcción de viviendas por la población, por lo general, de bajos recursos,

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

así como la falta de un registro exacto de la ocurrencia de los procesos en el territorio nacional. Lo anterior nos resulta en la lógica ausencia de mapas de riesgo a procesos gravitacionales.

El entendimiento más cercano a la realidad de la génesis de los procesos de remoción en masa, es el primer paso para estructurar y aplicar medidas y técnicas que eviten en lo posible el deterioro en la estructura social por la acción de estos procesos.

## 2.11 RIESGOS ASOCIADOS

Los movimientos del terreno son un fenómeno global asociado directamente con el riesgo sobre el área de influencia. Como resultado, los estudios que se han llevado a cabo en torno al tema son múltiples y bajo diferentes perspectivas y metodologías, pero coinciden en un fin, el mitigar los daños y reducir el riesgo (Clerici, 2000).

Existen un sinnúmero de definiciones e interpretaciones alrededor del concepto riesgo. En este despliegue de ideas se ubican desde las de concepto social y físico, hasta aquellas que se refieren al riesgo económico u otros temas específicos. Cada uno de éstos cuenta con ramales especializados, en donde se aplica el concepto a cada actividad integrada. Por ejemplo, para Tillin (1989), el riesgo desde el punto de vista de los desastres naturales, se define como “la posibilidad de pérdida de vidas humanas, propiedades, capacidad productiva, etc. dentro de un área determinada sujeta a peligro”. El concepto enfocado al riesgo por fenómenos naturales de acuerdo con Hewitt (1997), menciona que el riesgo frente a un desastre natural es la probabilidad de que éste ocurra. En 1974, White insertaba el concepto de la vulnerabilidad, al postular que el riesgo a sufrir un desastre dependía además de la magnitud y duración del fenómeno natural *per se*, de la vulnerabilidad que la población expuesta presente (Lavell, *et. al.*). Dicho de otra manera, es el impacto de un peligro natural sobre un sistema socioeconómico con un nivel de vulnerabilidad alto. Cuando las variables no toman un único valor, sino varios, y la probabilidad de ocurrencia de esos valores es exactamente conocida, nos encontramos en un contexto de riesgo. Finalmente, se puede introducir la idea de algunos autores, tales como Blaikie *et. al.* (1994), quienes rechazan el manejar el

concepto de desastre natural, debido a que el término implica la ausencia del ser humano.

El riesgo es considerado por algunos autores como un elemento más del peligro, mientras que otra interpretación le otorga un valor aislado de otros conceptos, sólo relacionándolo en el momento de existir la posible presencia de un peligro que pueda causar daño (Alexander, 1993), lo cual parece lo más acertado. La relación entre el peligro de un fenómeno natural y las condiciones vulnerables creadas por el ser humano en su espacio físico, económico, social, político y ambiental es lo que determina el grado de riesgo. En tanto el riesgo es concreto, es también relativo y depende del como las poblaciones lo ven. Lo que en apariencia constituye un riesgo eminente y de alto grado, desde un punto de vista interno, se puede magnificar como un suceso más en la cotidianidad de una comunidad o población. De lo anterior se deduce que la calificación del riesgo es dependiente de una cantidad de variables propias de cada situación espacio-temporal, lo cual dificulta, y en ocasiones imposibilita, la realización de una adecuada y generalizada aplicación del grado de riesgo. A pesar de esto, se considera que existen cuatro factores de los cuales depende el riesgo: el peligro (en este caso natural), la vulnerabilidad y adaptabilidad, la intervención de las condiciones de peligro y la modificación humana (Figura 2.9).

El riesgo depende de la interacción entre los mecanismos causales (peligro natural o antropogénico) y los valores bajo peligro (población, estructuras, bienes, etc.). Existen diversos métodos para el análisis del riesgo, pero en un plano general coinciden en la inclusión de tres componentes básicos; el primer paso para la valorización es determinar la fuente de peligro que lo genera, seguido de la delimitación del área que se encuentra bajo el peligro natural, y la cuantificación de la población y las propiedades integradas en dicha área y, finalmente, la introducción de la vulnerabilidad de la superficie en riesgo. De lo expuesto, se deduce que la incertidumbre es la base del riesgo, puesto que de los tres valores anteriores, únicamente podemos cuantificar con exactitud uno de ellos, mientras que la vulnerabilidad presenta valores diversos, de acuerdo a quien la determine y sobre la base de los criterios que utilice, y la magnitud del evento sólo se puede estimar en valores aproximados.

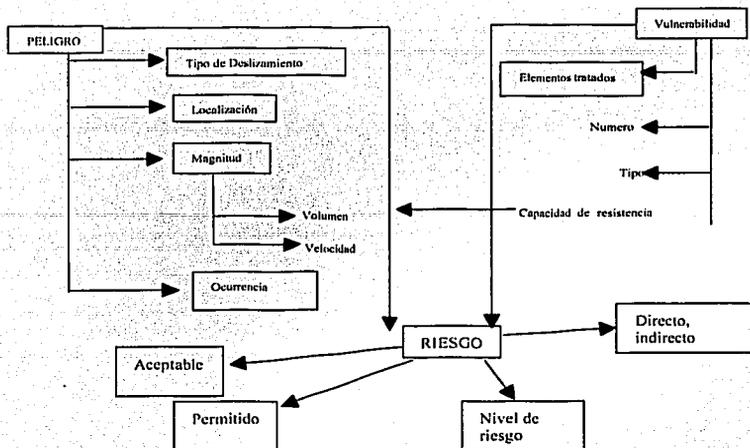


Figura 2.9 Aproximación conceptual del peligro y riesgo por deslizamientos (Flageollet en Casale, 1999).

El riesgo se puede dividir en dos tipos: riesgo particular y riesgo fundamental (Burby, 1991). El primero de éstos se refiere a los eventos que afectan de forma aislada e individual a una persona o a un número reducido de la población (por ejemplo muerte de un individuo, fuego en una casa, etc.), mientras que el riesgo fundamental considera la exposición a un evento de magnitud catastrófica o con un potencial destructivo masivo (huracanes, sismos, etc.). Otra división propuesta es el llamado riesgo relativo, donde se compara la amenaza de dos puntos y la relación entre estos, y el riesgo probabilístico que se define como el período de retorno de las condiciones propicias para que se presente un evento que genere peligro (Bolt, 1975).

Para Harris (1978) el riesgo puede manejarse bajo una formula teórica, no exacta, en la cual se consideran tres elementos:

- a) Los elementos del riesgo (E) en donde se comprende la población, propiedades, actividades económicas, servicios públicos, etc. todos comprendidos en la zona de peligro.
- b) El riesgo específico ( $R_s$ ) que es el grado de pérdida causada por un fenómeno natural particular. Este puede ser expresado como el producto del peligro natural (H) y los tiempos de vulnerabilidad (V).

- c) El riesgo total (Rt) consistente en el número de vidas que pueden perderse, las personas que pueden ser afectadas físicamente, el daño en propiedades y la afectación de las actividades causadas por un fenómeno natural particular. Esto es resultado del producto del riesgo específico (Rs) y los elementos del riesgo (E).

De lo anterior tenemos:

$$(Rt) = (E) (Rs) = (E) (H*V)$$

Como respuesta a las condiciones naturales y sociales del entorno, el riesgo puede ser reducido o sustituido en algunos casos por la prevención o bien por la mitigación del peligro, esto se logra al aplicar acciones que prevengan los daños posibles por la presencia del fenómeno natural. Una vez que el riesgo ha sido evaluado, y considerando que no puede eliminarse por completo, se puede llegar a lo que se denomina riesgo aceptable, es decir, un nivel de probabilidad admisible de consecuencias sociales, económicas y físicas que sea lo suficientemente bajo para permitir su presencia en la aplicación de sistemas o planes de mitigación. No existe un estándar en la estimación del riesgo aceptable, puesto que las condiciones del peligro y las características de cada zona en riesgo son distintas, lo que concede estimaciones propias de cada análisis.

En México, el Centro Nacional de Prevención de Desastres tiene su clasificación de los riesgos a los que la población del país está expuesta, de acuerdo con la fuente de origen (CENAPRED, 2002). Estos son:

- Hidrometeorológicos
- Químicos
- Sanitarios
- Geológicos
- Socio-organizativos

Los primeros se refieren a la presencia de fenómenos atmosféricos principalmente, tales como huracanes, tormentas, inundaciones; los químicos son de carácter social en el incorrecto manejo de productos que puedan resultar tóxicos y escapar a la atmósfera y en menor grado a intoxicaciones por materiales radioactivos libres; en el aspecto sanitario, el riesgo es epidemiológico básicamente; los riesgos geológicos son más

amplios y peligrosos, ya que aquí se incluyen sismos y erupciones volcánicas como principales amenazas y, por último, los riesgos socio-organizativos son aquellos representados por la incapacidad de organización de la sociedad en el manejo de situaciones críticas. En el caso de los procesos de ladera, son resultado de los riesgos hidrometeorológicos y geológicos.

Con cierta frecuencia el concepto de riesgo es manejado como sinónimo de amenaza, lo cual es incorrecto. La amenaza, o factor de riesgo externo como también se le conoce, representada por un peligro latente relacionado con fenómenos naturales, e incluso tecnológicos, puede presentarse en un sitio específico y en un tiempo determinado produciendo efectos negativos a las personas y al medio en general, y es expresada como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento; el riesgo se diferencia esencialmente en esto último, ya que el riesgo es la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas y sociales en un cierto período de tiempo (Maskrey, 1993).

En resumen se puede tomar la fórmula expresada en 1984 por Varnes, similar a la descrita por Tillin, y su explicación, la cual se presenta para el caso de los deslizamientos:

*“Peligro es la probabilidad de ocurrencia (frecuencia) de una magnitud dada de ruptura; la magnitud se refiere a las características del impacto de los procesos; los elementos del riesgo son la población, las propiedades, el sustento y otros valores; la vulnerabilidad es el grado de expectación de pérdidas de una magnitud dada y, finalmente, el riesgo total es la pérdida esperada para el periodo de tiempo y lugar bajo consideración”* (Crozier, 1993).

## CAPITULO 3 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

### GEOLOGÍA

#### 3.1 ESTRATIGRAFÍA

La Sierra Norte de Puebla es un sector de la Sierra Norte Oriental de 70 km de largo por 40 km de ancho, y está constituida principalmente por rocas sedimentarias mesozoicas plegadas en parte cubiertas por rocas volcánicas pliocénicas y cuaternarias, entre las más jóvenes las de la caldera de los Humeros. Las rocas plegadas por esto es expresión de la vecindad entre dos grandes provincias geológicas, la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico.

En la región de estudio existen los tres tipos de rocas: ígneas, sedimentarias y, en menor porcentaje, metamórficas. Las rocas que afloran, de manera particular en Zacapoaxtla, son ígneas y metamórficas, de edad Pérmico Tardío-Jurásico Superior. Algunas de estas rocas se encuentran cubiertas por rocas sedimentarias continentales del periodo Triásico Superior y del Jurásico Inferior y Medio, mientras que otras subyacen rocas sedimentarias marinas del Jurásico Superior y del Cretácico (Yáñez, 1982) (Tabla 3.1).

##### 3.1.1 PALEOZOICO

###### Pérmico Tardío

###### *Complejo Basal*

Los sedimentos del Mesozoico descansan sobre un complejo basal formado por rocas ígneas y metamórficas de composición granítica, granodiorítica y esquistos (Quezada Flores, 1961). Las rocas metamórficas se ven representadas por esquistos verdes de cuarzo y moscovita verde oscuro.

Éra	Sist.	SERIE	Edad m.a.	LOS HUMEROS-LAS DERRUMBADAS			
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO		Aluvión			
				FORMACIÓN TENASTEBEC	Miembro Arenas (andesitas y dacitas)	Materiales de las Calderas de explosión	
					Miembro el Limón (andesitas, andesitas basálticas, basaltos)		
					Lahares de Las Derrumbadas		
					Bómez, paleosuelos y tobas		
				FORMACIÓN SAN ANTONIO	Miembro La-Viola (andesitas basálticas vítreas)	Escoria y basaltos	
					Miembro Orilla del Monte (andesitas basálticas)		
					Riolita Cyamulos (riolita, riolita esterulítica, tobas riolíticas y riolitas)		
					Bracha de la Caldera de explosión Buenavista		
					Ignimbrita		
	Xáltipan						
	TERCIARIO		Plioceno	10	Formación Tezuitlán (andesitas, andesitas basálticas y basaltos)		
			MIOCENO	Sup.	25	Andesitas Aseeca	
				Med.		Formación Cruz Blanca (Conglomerado, arenas y arcillas)	
				Inf.		Rocas ígneas intrusivas (microgranito, sienita, aplita y granodiorita)	
Oligoceno			40				
Eoceno			60				
Palaoceno			70				
MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	82	Formación Méndez 250-300			
				Formación Mexcala ± 250			
				Formación San Felipe	Formación Maltrata ± 400		
				Formación Agua Nueva ± 300		Formación Guzmantla 250-300	
				INFERIOR	110	Formación Tamaulipas Superior 600-800	Formación Orizaba ±1200
	135	Formación Tamaulipas Inferior					
	JURASICO	SUPERIOR			Formación Pimienta 20-80		
					Formación Tamán 25-300		
					Formación Cahuasas 200-1200		
	TRIASICO	INFERIOR			Formación Huayacocotla ±400		
Formación Huizachal							
Rocas ígneas intrusivas y metamórficas (granito, granodiorita y esquistos)							
220							
		330					

Tabla 3.1 Columna Estratigráfica de la región Los Humeros-Las Derrumbadas (Yánez, 1982) complementada por la columna estratigráfica de Huayacocotla-Sierra Madre Oriental (Aguilar R., 1977, Modificado por López-Ramos, 1982)

### 3.1.2 MESOZOICO

#### Triásico

##### *Formación Huizachal*

Nombre dado por D. R. Semmes en 1921, la *Formación Huizachal* corresponde a materiales de origen continental, constituídos por conglomerados de guijas de cuarzo, limolitas y areniscas de color rojizo que se encuentran asentados sobre el complejo basal, y están cubiertos por la *Formación Huayacocotla*. En algunos lugares el espesor alcanza hasta 370 m (Olivas, 1953, en Flores 2001). Las rocas de la formación representan sedimentos no marinos en forma de depósitos de cuencas intracontinentales de origen epirogenético con un clima árido y precipitaciones torrenciales (Congreso Geológico Internacional, 1956). Dado que no se han encontrado fósiles que confirmen la edad, ésta no es aceptada de forma general, algunos la refieren al Jurásico Medio y los más la sitúan en el Triásico (López-Ramos, 1982).

#### Jurásico

##### *Formación Huayacocotla*

Consiste en una secuencia de lutitas, lutitas bandeadas, limolitas finas bandeadas, arcillas y areniscas estratificadas. Observa un espesor de  $\pm 400$  metros. Está conformada por 9 unidades diferenciadas por la fauna y litología (Congreso Geológico Internacional, 1956). Se le encuentra bien desarrollada desde las inmediaciones de Huauchinango y aún más al sur. La cima de la formación puede estar constituida por una discordancia angular, por formaciones rojas (Cahuasas y Tamán) (López-Ramos, 1982).

##### *Formación Cahuasas*

La *Formación Cahuasas* se constituye de estratos de arenisca, alternando con arcillas y argilitas, así como algunos conglomerados con fragmentos de cuarzo y arenisca, cuyo espesor varía de 2 a 3 metros, con intrusiones de lechos de lutitas rojas que llega a

separarlos. La formación está dada por sedimentación continental. Su espesor es mayor a los 40 m (López-Ramos, 1982).

### *Formación Tamán*

El municipio de Zacapoaxtla se asienta en la *Formación Tamán*, la cual según López-Ramos (1979), está representada por dos facies, una calcárea y otra arcillosa. La primera de éstas, alcanza 250 a 300 metros de espesor y aflora en Zapotitlán de Méndez, Tlatlauquitepec y en el mismo Zacapoaxtla, al tiempo que cubre discordantemente al granito de las sierras Tezompan y Chignautla; la facie arcillosa denota espesores variables en las áreas de Cuetzalán y Plan de Arroyos, los cuales van de 25 a 50 metros.

Las rocas que conforman la facies calcárea crean una faja continua desde Jonotla a la colonia Mazatepec, para perderse en el río Apulco y reaparecer en Hueytamalco (Tarango-Ontiveros, 1967 en Yáñez). Hacia el oeste, y sin duda como consecuencia de que la trasgresión ha sido más tardía, la facies ha desaparecido (López-Ramos, 1982). De acuerdo con Menes-López (1979), la parte inferior está constituida por lutitas negras y lutitas carbonosas, con una estratigrafía entrelazada con capas gruesas de caliza negra y calizas gris-azul con amonitas. En cuanto a la parte superior, ésta se representa por calizas grises con textura uniforme calcarenítica con nódulos de pedernal negro ahumado, amonites y fauna arrecifal colocadas en capas delgadas en relación con la parte inferior. La cima es concordante con la formación Pimienta. El espesor total es sumamente variable. Al tratarse de la primera gran formación generalizada de una transgresión, los depósitos se efectuaron sobre fondos que seguramente no eran planos (López-Ramos, 1982). Un rasgo excepcional dentro de la formación consiste en un horizonte basal con una fauna mixta marina-limnica cerca de río Vinasco. El nombre fue propuesto por A. Heim en 1940.

### *Formación Pimienta*

La *Formación Pimienta* consiste en calizas y dolomías grisáceas a negras, con pedernal negro en bandas y calizas arcillosas negras, depósitos de mares transgresivos de ambiente franerítico de aguas templadas (López-Ramos, 1982). Presenta una cima de bentonitas amarillas a verdes en alternancia con calizas arcillosas y areniscas grises. Los

sedimentos de la formación yacen sobre las facies de la Formación Tamán en la región de Tamazunchale (C.G.I., 1956). Estos sedimentos afloran en el homoclinal de Teziutlán, y en la zona de Xochiapulco-Zacapoaxtla-Teziutlán (Tarango-Ontiveros, 1967). Su espesor se calcula en 250 metros.

## **Cretácico**

### *Formación Tamaulipas Inferior*

La *Formación Tamaulipas Inferior*, dividida en tres miembros constituidos de microfósiles, granos de cuarzo, caliza criptocristalina, bentonita, calcilutita y capas delgadas de lutita bituminosa y caliza arcillosa, está expuesta en las cañadas labradas por el río Apulco (Salazar-Mandujano 1969, en Yáñez 1982). Contiene lentes y nódulos irregulares de pedernal gris y líneas estilolíticas bien desarrolladas, paralelas a los planos de estratificación (López-Ramos, 1982). El espesor aproximado de la formación es de 250 metros (CGI, 1956).

### *Formación Tamaulipas Superior*

La *Formación Tamaulipas Superior*, está formada por calizas ligeramente arcillosas y bandas irregulares y nódulos de pedernal de colores negro, blanco y humo (CGI, 1956). La estratificación es generalmente delgada a mediana, con espesor en los estratos de 0.5 a 1 m. La fauna y las características litológicas de la formación, claramente establecen el origen marino de los sedimentos de mar abierto.

### *Formación Orizaba*

La *Formación Orizaba* se representa principalmente por calizas de tipo arrecifal. Se muestra en su mayor parte en forma masiva.

### *Formación La Guzmanilla*

Una formación más del cretácico es *La Guzmanilla*, representada por una calcarenita biógena parda clara en capas cubiertas por otras de caliche. Las capas de calcarenita

varían su espesor entre 0.40 a 2.20 m. En ciertos puntos presenta capas de caliza clásica y conglomerática, junto a estratos con nódulos de pedernal.

#### *Formación Maltrata*

La *Formación Maltrata* se ve representada por calizas arcillosas de color gris oscuro y pardo claro, que se observan en capas delgadas, con espesores de 15 a 40 cm, intercaladas por capas de lutitas y margas muy delgadas, con abundantes ramales de calcita y películas de arcillas rojas.

#### *Formación Agua Nueva*

Calizas arcillosas grisáceas y pardas claras, con texturas entre *mudstone* y *packstone*, dispuestas en capas de 1 a 40 metros llegando hasta 180 metros en su parte más occidental (CGI, 1956), entre las cuales se intercalan arcilla bentonítica gris verdosa y pardo-crema oscuro, conforman la *Formación Agua Nueva*. A través de toda la secuencia se observan lentes y nódulos de pedernal negro y escasas concreciones ferruginosas (López-Ramos, 1982). Esta es concordante con las formaciones Tamaulipas Superior, por debajo, y San Felipe, que la cubre. Corresponde al Cretácico Superior (Stephenson, 1921, en López-Ramos, 1979).

#### *Formación San Felipe*

La *Formación San Felipe* está constituida por calizas arcillosas verdes y gris verdoso, que muestran un color pardo claro y crema por intemperismo. Presentan textura fina de *mudstone*, *wackstone* con estratos muy locales de *packstone* y *grainstone*. Esta formación está en cambio de facies con las formaciones Maltrata y Guzmantla. (Jeffreys, 1910, en López-Ramos, 1979). Su espesor varía de 30 a 100 metros, aumentando de este a oeste (CGI, 1956). Por el tipo de sedimentos que integran a esta unidad litológica, se puede decir que fueron depósitos de mareas abiertos. El alto contenido de bentonita evidencia la gran actividad volcánica que existió durante el tiempo de depósito.

### *Formación Méndez*

Con capas de 1 a 5 cm de lutitas y margas, la *Formación Méndez*, que corresponde a la parte más alta del Cretácico Superior, presenta características arenosas y calcáreas. (Dumble, 1911, en López-Ramos, 1979) cuya coloración varía de gris verdoso a café rojizo, y denota intercalaciones delgadas de bentonita gris verdoso. Hacia la cima de la parte media se encuentran capas rojas. Su espesor se calcula en 500 metros. Por las características litológicas se infiere que sus depósitos fueron originados en un ambiente marino nerítico (López-Ramos, 1982).

### *Formación Mexcala*

Capas interestratificadas de areniscas, limolitas y lutitas representan la *Formación Mexcala*. Las capas de arenisca varían su espesor entre laminares y 30 cm; por su parte, las capas de lutitas van de 20 a 50 cm, con algunas capas de 1 m (Fries, 1960, en López-Ramos, 1979). La formación es poco resistente a la erosión, y ocupa depresiones sinclinales. Su espesor es del orden de 1 000 m (López-Ramos, 1982).

## **3.1.3 CENOZOICO**

### **Terciario**

#### *Formación Cruz Blanca*

La *Formación Cruz Blanca* está constituida por arcillas, conglomerados y arenas producto de la erosión y el intemperismo sobre las rocas sedimentarias mesozoicas. En las partes altas se encuentran arenas volcánicas y arcillas, interdigitadas con los sedimentos lacustres recientes, pómez y cenizas, los cuales corresponden al Mioceno Superior (Yáñez-García y García-Durán, 1982).

### *Andesita Alseseca*

La *Andesita Alseseca* muestra el inicio de emanaciones de lavas que tuvo lugar en el Terciario Tardío y el Cuaternario. Las rocas son de color gris oscuro con fenocristales claros tabulares, que corresponden al Mioceno Tardío (Ruiz-Sainz, 1965 en Yáñez-García, 1982).

### *Formación Teziullán*

La *Formación Teziullán* está constituida por andesitas y, en menor proporción, basaltos. El color predominante de las rocas es gris oscuro a negro, con textura porfídica con una matriz microlítica, la composición es entre andesítica y andesítica basáltica. En las primeras predominan fenocristales de plagioclasa intermedia, mientras las siguientes se distinguen por sus fenocristales de plagioclasa que son labradorita. Los basaltos presentan fenocristales casi en su totalidad de olivino (Ruiz-Sainz, 1965, en Yáñez-García, 1982).

## **Cuaternario**

### *Riolita Oyameles*

La *Riolita Oyameles* es una serie de rocas de composición riolítica, que forma domos constituidos por riolita porfídica, derrames esferulíticos, vitrificados riolíticos, traquíticos y riódacíticos, junto con tobas riolíticas. La formación corresponde al Plioceno Tardío.

### *Ignimbrita Xaltipan*

La *Ignimbrita Xaltipan* está formada por una serie de derrames ignimbríticos, en los tres estados de la ignimbrita de piroconsolidación: densa, mediana y sin piroconsolidación. La segunda de estas se extiende por Zacapoaxtla, así como por Jalacingo y Zaragoza. La roca sin piroconsolidación también se encuentra en estos poblados, al igual que en Altotonga. La ignimbrita Xaltipan se depositó sobre la Andesita Alseseca, la Riolita Oyameles y andesitas de la formación Teziutlán, y aflora en cortes de la carretera cerca

de la ciudad de Teziutlán. La formación pertenece al Plioceno Superior-Plioceno Inferior (Yáñez-García, 1982).

#### *Formación San Antonio*

La *Formación San Antonio* es una serie de derrames de composición andesítica y basáltica posteriores a la aparición de la caldera de los Humeros. Debido al cambio que se presenta entre los derrames fluidos de la parte basal y los vítreos de la parte superior, la unidad ha sido dividida en dos miembros: *Orilla del Monte* y *La Viola*. El primero, constituido por derrames fluidos que siguen la pendiente de la caldera. Su composición varía entre andesítica y basáltica. El miembro complementario, *La Viola*, presenta la misma composición, pero con una textura vítrea (Yáñez-García, *op. cit.*).

#### *Sedimentos Lacustres*

Los sedimentos lacustres se ubican principalmente en la cuenca de Libres-Oriental, en donde se observan fragmentos de rocas de diversos tamaños, resultado de la erosión sobre las calizas y rocas ígneas intrusivas y extrusivas. Al tiempo que se realizaba la depositación, había actividad piroclástica, lo que origina interestratificación del material con los sedimentos lacustres.

#### *Pómez, paleosuelos y tobas*

Las rocas piroclásticas predominan en el área, principalmente tobas y pómez. Las tobas se localizan en el norte. En cuanto a la pómez, se distribuye uniforme en la región, con capas que van de 2 a 15 m, al tiempo que forma grandes bancos con espesores de hasta 50 m. Ambas cubren todo tipo de rocas, dado el tiempo considerable de desarrollo, a la vez que llegan a ser cubiertos por otras unidades. Los paleosuelos, que se presentan en las dos unidades descritas son evidencia de estos periodos de depósito de diferentes emisiones pumíticas.

### *Lahares de las derrumbadas*

Los lahares presentes en la base de los domos volcánicos se constituyen de bloques y fragmentos de tamaño diverso de calizas, andesitas y dacitas, envueltas en una matriz areno-arcillosa, con espesor de 50 a 150 m (Yáñez-García *op. cit.*).

### *Formación Temastepec*

Se constituye de una serie de basaltos escoriácicos de olivino, andesitas y dacitas, junto con cenizas basálticas. La formación representa la última actividad ígnea volcánica. Se distinguen dos miembros: *El Limón*, con rocas cuya composición varía de andesítica a basáltica, presenta una amplia extensión. El miembro *Arenas* cubre los centros de emisión de los derrames del miembro anterior, con rocas menos máficas.

## **3.2 TECTONICA**

En el Jurásico Tardío y el Cretácico, el área permaneció sumergida. Durante el Jurásico Tardío, la región se ubicaba entre la entonces Península de Oaxaca y la Plataforma de Tamaulipas, mientras que en el Cretácico mostró las mismas condiciones por la invasión de las aguas oceánicas. Posteriormente, y como resultado de fuerzas con origen en el suroeste, se inició el levantamiento (Yáñez-García, 1982). Los bloques elevados formaron una unidad arqueada y plegada (Menes-López, *op. cit.*). A este acontecimiento orogénico se le ha asignado el nombre de Revolución Laramide, que se originó a fines del Mesozoico y principios del Cenozoico. Los pliegues desarrollados por la orogenia mencionada dieron lugar a que se formaran una serie de anticlinales sencillos, ligeramente asimétricos y de ejes sinuosos (López-Ramos, *op. cit.*).

Las rocas cenozoicas volcánicas y continentales se acumularon sobre sedimentos marinos mesozoicos, que sobreyacen, a su vez, a rocas pre-mesozoicas que constituyen el antipais de la Sierra Madrea Oriental (López-Ramos, 1982).

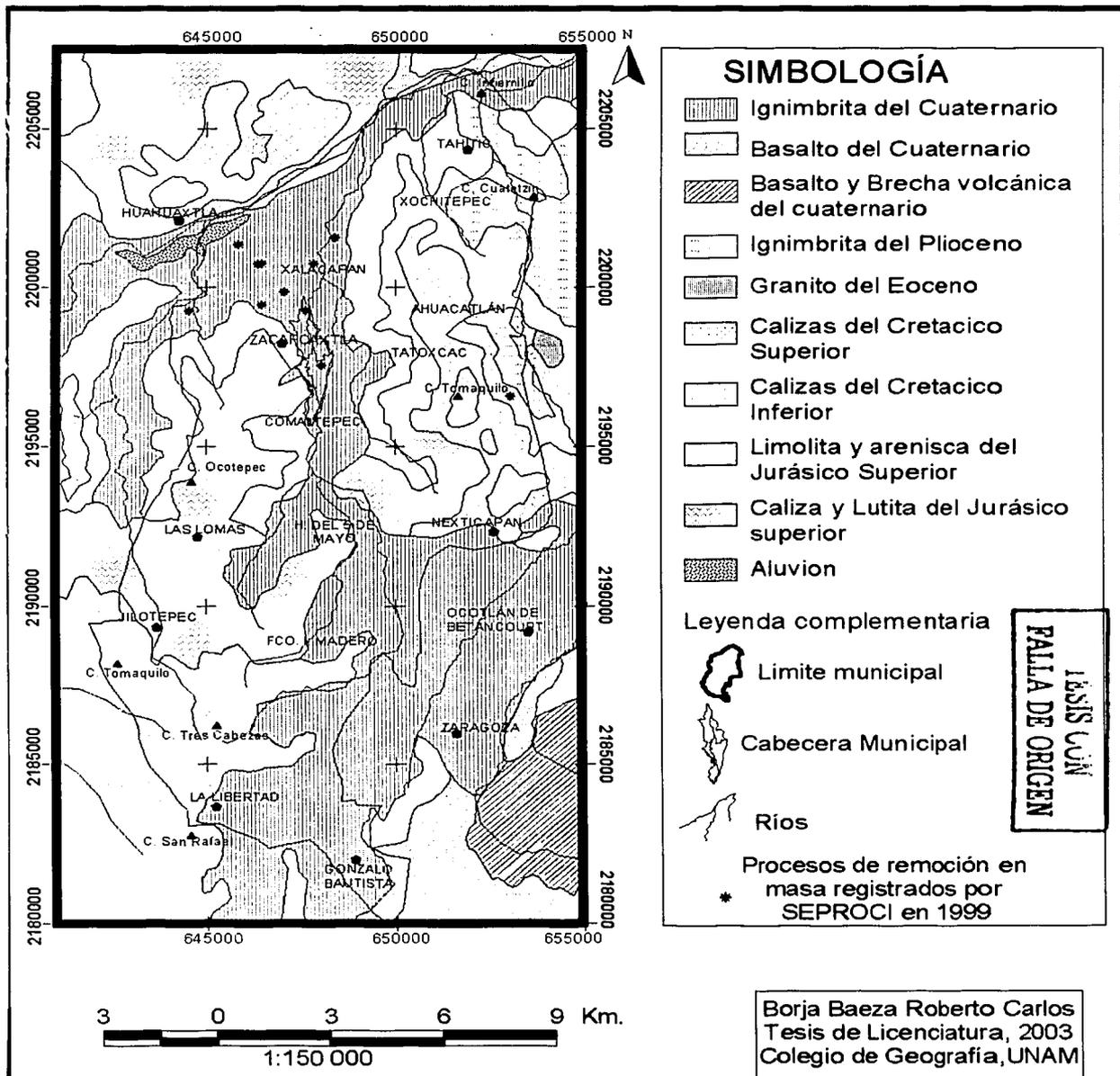


Figura 3.1 Mapa geológico del municipio de Zacapoaxtla (Fuente INEGI, 1984)

### 3.3 VULCANISMO

La actividad volcánica del área de estudio presenta una influencia determinante de la Caldera de los Humeros y, en menor proporción, del sistema volcánico de Las Derrumbadas, los cuales originaron fosas y pequeñas cuencas que se encuentran rellenas con sedimentos lacustres, aluviales y rocas piroclásticas. Durante el levantamiento orogénico se desarrollaron fracturas y fallas, mismas que sirvieron a la actividad volcánica del Terciario para formar macizos andesíticos. Según Ortega-Gutiérrez (1992), la caldera presenta una composición bimodal basáltico-félsica.

### 3.4 EVOLUCION GEOLÓGICA

Durante la Era Paleozoica se originaron las rocas más antiguas del área, resultado de depósitos de sedimentos clásticos que posteriormente sufrieron, en bajo grado, metamorfismo, ahora representado por esquistos de cuarzo y muscovita, que junto a un batolito granodiorítico forman parte esencial de basamento de Teziutlán.

Conglomerados, areniscas, limolitas y lutitas negras se encuentran en el área representando sedimentos continentales, que son resultado de la acción del viento en el periodo de movimientos de estabilización al que fueron sometidas las rocas de las formaciones Cahuwasas y Huizachal.

Los sedimentos continentales, o lechos rojos, se encuentran en discordancia angular con las rocas graníticas, lo que hace más evidente al cambio en la litología con los sedimentos calcáreos del Jurásico Superior. Las rocas marinas depositadas son resultado de la inmersión general del batolito, que dió lugar a la sedimentación en un medio nerítico y en aguas tranquilas, de lo que derivan los amontes y fauna arrecifal presentes en las capas de calizas de color gris de la parte superior de la formación (López-Ramos, 1982).

En la formación Tamán, son evidentes los cambios de espesor de los sedimentos en los que hubo transgresiones y regresiones marinas, ya que en la cima del levantamiento, éstos se presentan gruesos y van aumentando gradualmente hacia los flancos. Estas condiciones de sedimentación cambiaron en el Jurásico, de materiales calcáreos a

sedimentos arcilloso-arenosos, que en la actualidad se pueden observar en sedimentos bituminosos.

Previo al inicio del Cretácico, se inició un cambio gradual en la depositación de los sedimentos, que pasaron de arcillo-arenosos a calcáreos y calcáreo-arcillosos (Formación Pimienta) hasta que iniciado el período se desarrolló un depósito sedimentario calcáreo, resultado del avance del mar. En la etapa final del periodo se depositaron calizas arcillosas. La acumulación continuó con calizas cada vez más arcillosas, en estratificaciones aun más delgadas, que junto con lutitas originaron la formación Mexcala.

Según Olivas (*op. cit.*), al finalizar el Paleoceno, se presentó un plegamiento con dirección NE-SE que dio origen a la Sierra Madre Oriental, mismo que se extendió hasta el Mioceno Medio, lapso en que rocas intrusivas se emplazaron a pocos metros de la superficie, cuya manifestación actual es la roca denominada sienita, que junto con granitos y granodioritas posteriores originaron *hornfels* y mármoles, resultado de la metamorfosis de las rocas sedimentarias.

Los fenómenos orogénicos iniciados en el Cretácico Tardío, y terminados en el Eoceno medio denominados Orogenia Laramide dieron a México, en términos generales, su configuración actual, aumentando en 100% más la extensión emergida de su territorio. Por ello, durante todo el Cenozoico, las formaciones sedimentarias de origen continental abundan al igual que los depósitos marinos (Ortega- Gutiérrez, 1992). Posterior a la actividad orogénica, la erosión disminuyó la diferencia del corte vertical, hecho que resultó en un relieve más suave y homogéneo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La actividad ígnea efusiva dio inicio en el Mioceno Tardío, con derrames andesíticos que formaron el basamento sobre el cual se asentarían rocas volcánicas, como andesitas, basaltos y en menor proporción dacitas, en el Plioceno Medio. Entre los emisores principales están el Cerro de León y Los Humeros (Yáñez-García, *op. cit.*).

La emisión de ignimbrita en grandes cantidades proveniente de Los Humeros, se distribuyó en un área extensa, lo que provocó el colapso del techo de la estructura al vaciarse la cámara magmática, formando la Caldera de Los Humeros. Grandes derrames

de basaltos andesíticos surgieron de centros emisores del interior durante el Plioceno Tardío-Pleistoceno Temprano, dando paso a derrames de dacitas vítreas y viscosas en el mismo período. Las depresiones de la región fueron rellenadas por la fase piroclástica ácida que prosiguió en La Caldera.

Finalmente, emisiones de lava provenientes de la formación Tenamastepec, cuya composición va de intermedia a básica, representan el último acontecimiento eruptivo de la región en derrames andesíticos y basálticos. Cenizas básicas y los conos de explosión, y de escoria que se observan en el área están asociados a estos derrames (Ordóñez, 1906 en Yánez, 1982).

## **GEOMORFOLOGÍA**

La geomorfología, de acuerdo con Lugo-Hubp, (1991) es la ciencia que estudia el relieve terrestre, al cual a su vez es el conjunto de deformaciones de la superficie del planeta. Complementando, Gutiérrez-Valdez (1989) menciona que la geomorfología es una ciencia morfogenética puesto que su objetivo es el comprender cómo se han originado y evolucionado las formas del relieve hasta el presente.

### **3.5 MORFOMETRÍA**

La morfometría es un método de análisis cuantitativo de las características de las formas del relieve, utilizado con el fin de entender y describir con un grado de precisión que permita la comparación entre la cartografía resultante. Desde el siglo XIX se tenían las primeras ideas sobre este método, con Emmanuel de Martonne en Francia, pero hasta la década de los años 50, con la tendencia ascendente a la geografía cuantitativa, es que inicia su real desarrollo. El análisis morfométrico es elemental para elaborar la clasificación del relieve.

Los elementos a cuantificar son superficies, alturas (absolutas y relativas), volúmenes, pendientes (grado y orientación), entre los principales. El método morfométrico se puede realizar directamente en campo, en gabinete con el manejo de mapas topográficos y, con mejores resultados, ambas actividades en complemento.

El estudio de la morfología del relieve, por medio del análisis morfométrico, se simplifica y permite inferir otras características de las formas del relieve, tales como la edad relativa, génesis, su dinámica actual, e incluso la relación existente entre los procesos neotectónicos y las formas del relieve (Lugo-Hubp, 1989). La utilidad práctica de la morfometría se refleja en la búsqueda de yacimientos minerales, de petróleo y gas natural, así como de aguas subterráneas y en la ingeniería en general (Spiridonov, 1981). Dada la capacidad de mostrar los cambios en la morfología del relieve, y por lógica la vulnerabilidad de éste a los procesos exógenos, la morfometría se vuelve necesaria para el estudio de la inestabilidad de laderas.

Como todo método cuantitativo, la morfometría está expuesta a errores en su aplicación, derivados del manejo incorrecto de los datos obtenidos, o de cálculos inexactos en las mediciones. Lo anterior muestra la vital importancia de proceder con un número de mediciones suficiente para obtener valores representativos, y reducir el margen de error estadístico al mínimo posible para así poder realizar una interpretación adecuada de los mapas obtenidos, y elaborar el mapa morfogenético del área en estudio.

Los mapas que se obtienen con la morfometría son altimétrico, densidad de disección, profundidad de disección y energía del relieve. El estudio de la morfometría del municipio se presenta de forma elemental. Un análisis más completo sobre el tema fue desarrollado por Flores-Lorenzo (2002) para la carta topográfica de Teziutlán.

### **3.5.1 MAPA ALTIMÉTRICO**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

El mapa altimétrico o hipsométrico es el punto de partida en el análisis geomorfológico. Su elaboración se basa en definir, a partir de las curvas de nivel, intervalos de valores establecidos, con el propósito de reconocer la configuración del relieve en general. Para el mapa altimétrico de Zacapoaxtla se tomaron los colores utilizados en el sistema internacional descrito por Salitchev (Vázquez, 2001), en donde los tonos fríos muestran las zonas bajas, y los cálidos la contraparte altitudinal. Los rangos de elevación utilizados son de 200 metros, y van desde 1300 a más de 2500 msnm.

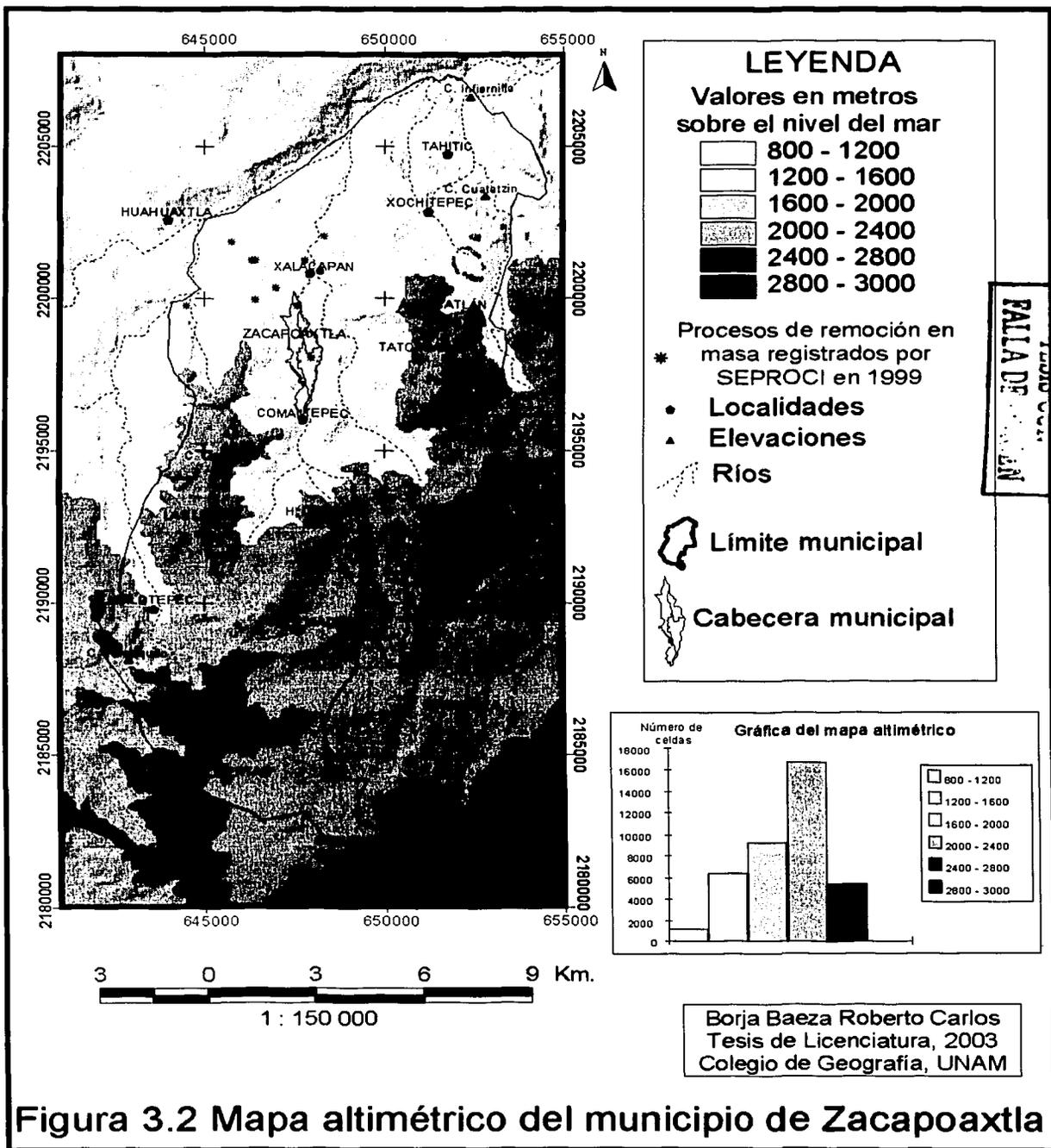


Figura 3.2 Mapa altimétrico del municipio de Zacapoaxtla

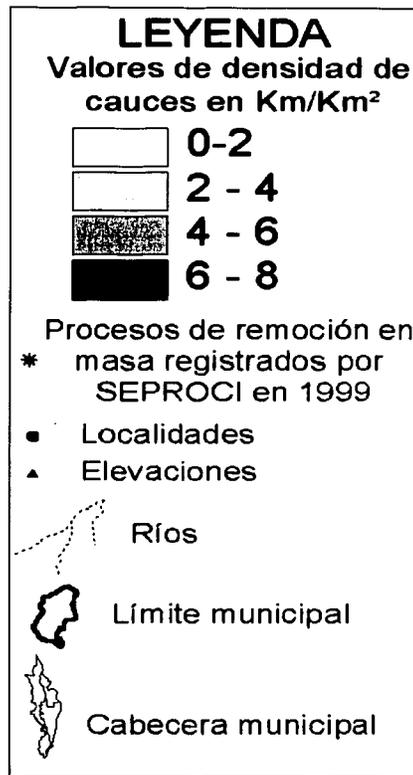
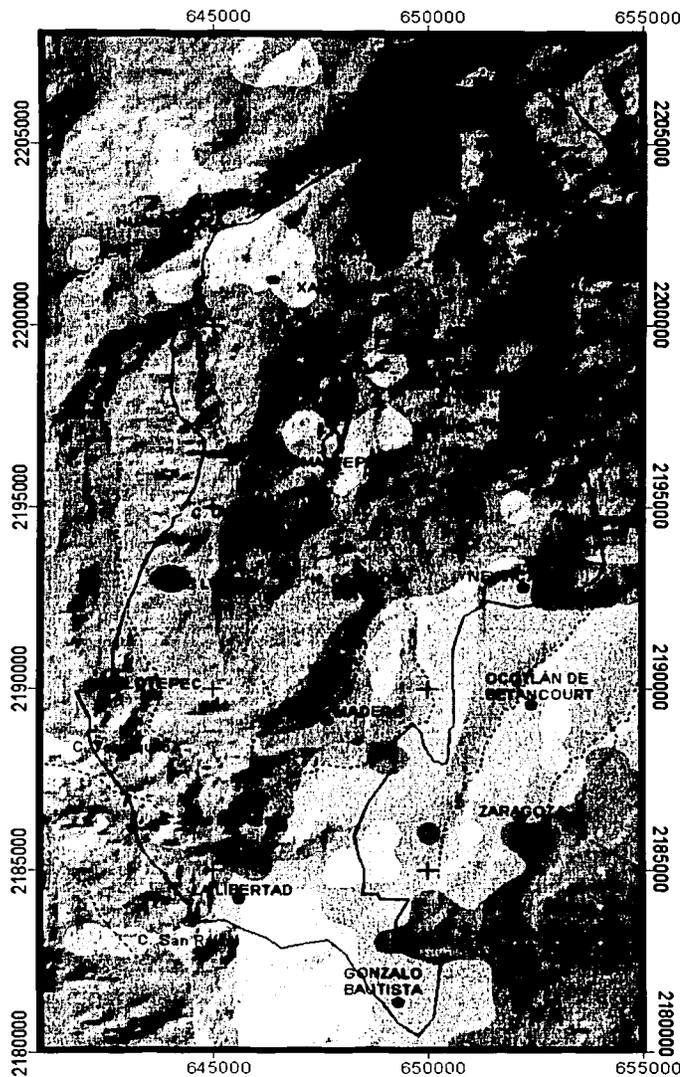
En la imagen 3.2 se puede observar que la altitud disminuye con una orientación suroeste-norte. La ciudad de Zacapoaxtla se localiza entre 1600 y 1800 msnm, abarcando en gran parte la cota de 1700m, lo que nos indica que buena parte de los escurrimientos y los procesos de acumulación se dirigen hacia esta zona (Figura 3.2). El mayor contraste altitudinal se muestra en el sur, en donde las mayores alturas, representadas por los cerros Toxtepec, San Rafael y Tres Cabezas, se ubican adjuntas a una extensa planicie que se extiende hasta la localidad de Zaragoza.

### 3.5.2 DENSIDAD DE DISECCIÓN

La densidad de la disección representa cuantitativamente, en planta, la intensidad de la acción erosiva de las corrientes fluviales sobre el relieve en un área específica. La densidad es una respuesta a la influencia de factores meteorológicos, como la intensidad y tipo de precipitación, y a factores externos, tales como la pendiente, la geometría del terreno, la presencia de la capa vegetal, el suelo compactado y el aluvión; por contraparte, la litología, la estructura geológica y la densidad de fallas y diaclasas son factores internos condicionantes.

La densidad del drenaje, como también se le nombra, se obtiene de la relación entre la suma de las longitudes de todos los *talweg* (corrientes fluviales) y el área de la porción de la superficie en que se ubican. De esto se deduce que en niveles bajos de densidad, la erosión de las corrientes de agua no determina la dinámica del relieve, caso contrario, en zonas de alta densidad la influencia fluvial es proporcional al incremento del índice resultante (Figura 3.3).

De acuerdo con Lugo-Hubp (1991), la metodología para determinar los valores de la densidad de la red fluvial, a partir de cartas topográficas, en este caso las cartas Teziutlán E14B15 y Xonacatlán E14B25 escala 1:50 000 de INEGI, involucra la división en figuras geométricas idénticas, la obtención de la suma de las corrientes y, por último, la interpolación de estos valores. Por utilidad práctica, las figuras empleadas fueron cuadrados, parte de la cuadrícula UTM, con un área de 1 km<sup>2</sup>. A las corrientes fluviales representadas en la carta se sumaron los *talweg* inferidos, dando una base de datos, que fue interpolada mediante la utilidad de *ArcView*. Los valores resultantes de densidad de la disección del municipio de Zacapoaxtla se muestran en la figura 3. 3.



Borja Baeza Roberto Carlos  
Tesis de Licenciatura, 2003  
Colegio de Geografía, UNAM

Figura 3.3 Mapa de la densidad de la disección del municipio de Zacapoaxtla

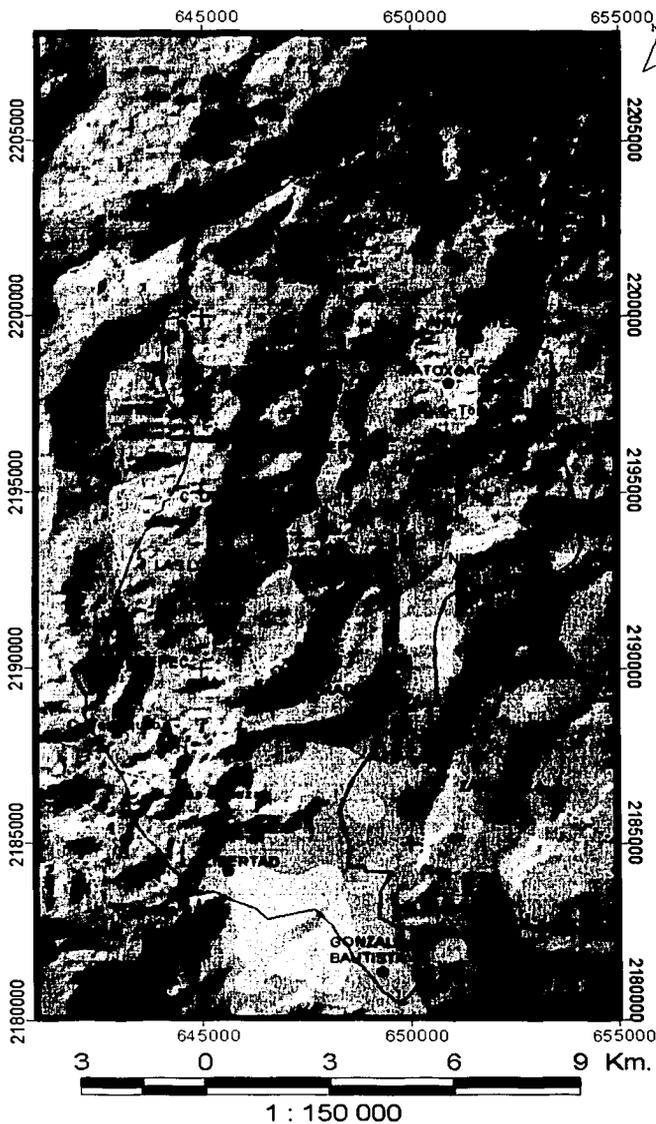
La densidad de disección fluvial en la zona de estudio presenta zonas con valores altos en el poniente, en la zona de montañas, en Jilotepec y Las Lomas, mientras que al sur y sureste se encuentran los valores más bajos, por la escasez de corrientes en la planicie, entre las poblaciones de La Libertad y Gonzalo Bautista. En la localidad de Zacapoaxtla, y de acuerdo con la escala obtenida para el municipio, la densidad es de media a baja, en la escala obtenida para el mapa, con valores de 2.5 a 4 km. Las elevaciones presentan los valores más altos, y por ello mayor erosión vertical, sobresaliendo los cerros de Xochitepec, Cuatetzin e Infiernillo al noreste del municipio; la zona donde se localizan los valores más altos, entre 7 y 8 km de longitud de *talwegs* por Km<sup>2</sup>. Los afluentes de los ríos Apulco y Acongo marcan las zonas con densidades media-alta repartidas en el municipio, en las zonas montañosas.

### 3.5.3. PROFUNDIDAD DE DISECCIÓN

La profundidad de la disección se refiere al valor del corte vertical, como resultado, principalmente, de la acción de las corrientes fluviales, y del grado de erosión alcanzado en el relieve. Cabe mencionar que el caudal de un río y la carga del mismo condicionan esta profundidad.

La litología (material deleznable), la estructura (contactos litológicos), la tectónica (fallas, fracturas), el clima (precipitación), y la capa vegetal son elementos que determinan la profundidad de la erosión. Los valores bajos se manifiestan por lo general donde la roca es más resistente a la erosión, por el contrario, los valores altos muestran una susceptibilidad de la roca a mayor erosión.

La metodología empleada es similar a la realizada en la densidad de disección. Los valores manejados en la tabla de datos resultan de la relación entre el *talweg* y la cota más alta de la figura geométrica utilizada (cuadrícula UTM). Los rangos obtenidos para la zona de estudio son de 20 metros, hasta un corte vertical máximo de 100 m. En forma general, y acorde con la interpretación del mapa, se infiere que la erosión vertical en la zona es alta, lo cual favorece la ocurrencia de procesos de ladera, por la alteración del material que se ubica en las zonas de pendiente de más de 15°, que son las mismas con los valores de mayor disección de 60 a 100 metros.



Borja Baeza Roberto Carlos  
 Tesis de Licenciatura, 2003  
 Colegio de Geografía, UNAM

### LEYENDA

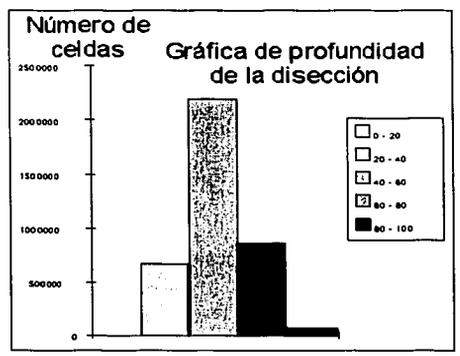
Valores máximos de profundidad de barrancos y valles fluviales en superficies de 1km<sup>2</sup>

	0 - 20
	20-40
	40-60
	60-80
	80-100

Procesos de remoción en masa registrados por SEPROCI en 1999

- \* Procesos de remoción en masa
- Localidades
- ▲ Elevaciones
- Ríos
- Limite municipal
- Cabecera municipal

TESIS CON FALLA DE QUEJEN



**Figura 3.4 Mapa de profundidad de la disección**

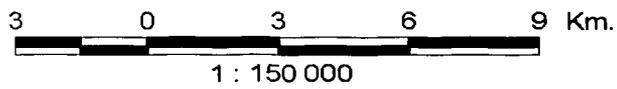
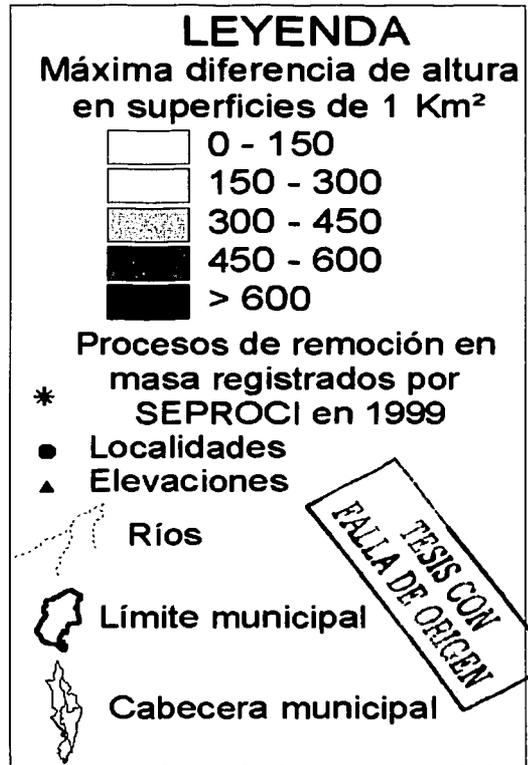
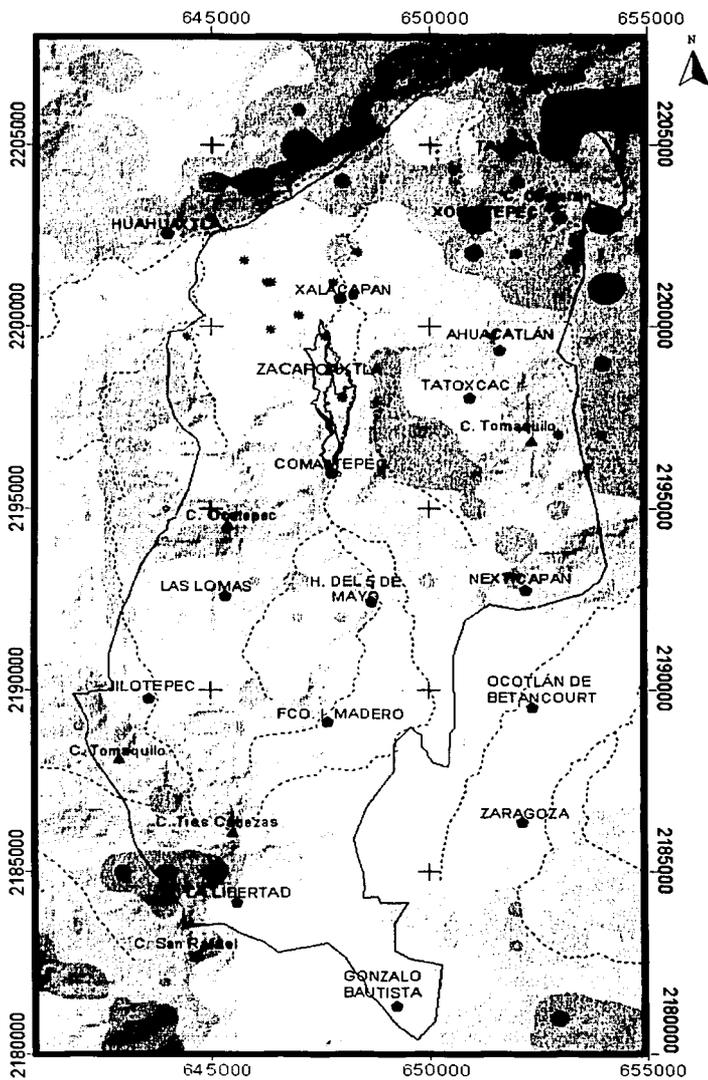
Hacia el sur de la zona, en una extensa área de bajos valores de pendiente, se observan los valores mínimos entre 0 y 20 metros de disección vertical, cerca del poblado de Gonzalo Bautista, mientras que los valores máximos, se encuentran muy cerca de ésta planicie hacia el oeste, en un complejo de montañas de gran altura, como el cerro San Rafael. En el centro y norte del municipio, se delimitan zonas de profundidad media-alta, principalmente a lo largo del río Apulco, y de media-baja en la localidad de Zacapoaxtla.

### **3.5.4 ENERGIA DEL RELIEVE**

Un cuarto mapa morfométrico es el de energía o amplitud del relieve, el cual muestra la intensidad relativa entre la actividad endógena y la exógena (Lugo-Hubp, 1991). Este mapa demuestra que la amplitud del relieve va en estrecha relación con la topografía, ya que los valores altos se localizan en los lugares con cotas de mayor altura, mientras la amplitud mínima, se ubica en la planicie (Vázquez, 2001). Uno de los aportes de éste mapa es localizar las zonas en que la erosión se puede ver favorecida por las condiciones del relieve, debido a que las zonas de mayor energía del relieve presentan tales condiciones.

La energía del relieve es compatible con la inclinación y la geometría del terreno. Los factores condicionantes de esta amplitud son el tipo de roca, la presencia de fracturas o fallas y la estructura geológica. La energía del relieve pone de manifiesto los factores que se requieren para generar procesos enérgicos, y en particular los gravitacionales (Gómez, 1998) (Figura 3.5).

Las regiones en que se distinguen los valores más altos de diferencia entre el cauce y el punto más elevado, y por lo tanto la tendencia a una mayor erosión, son cuatro. Una de ellas, con valores medio-altos, al sureste de Zacapoaxtla, en San Juan Quimixcuanco junto al río Hueyteco; otra región es al suroeste, entre Jilotepec en los cerros Tepecuaco y Taxcanuaco, en la cuenca del río Chichilaco hacia el sur, pasando por el Cerro Tres Cabezas y cerca de la población La Libertad, hasta el cerro San Rafael. Al Noreste se aprecia otra diferencia notable de alturas, por la presencia de los cerros Infiernillo y Cuatetzin en la localidad de Tahitic



Borja Baeza Roberto Carlos  
Tesis de Licenciatura, 2003  
Colegio de Geografía, UNAM

Figura 3.5 Mapa de energía del relieve del municipio de Zacapoaxtla

Por último, junto al cauce del río Apulco, se muestran diferencias notables de alturas, principalmente por la erosión horizontal de la corriente, desde Nauzontla hasta Huahuaxtla. Puntos de energía del relieve media cubren una gran parte del área de estudio, con rangos de 150 a 300 metros. La población de Zacapoaxtla se encuentra en este margen, al nivel de 150 metros de diferencia. En la región sureste se halla un extenso terreno con las diferencias menores de 150 metros, coincidiendo con una pendiente suave, que es recorrida por el río Huichautla.

### **3.6 MORFOGÉNESIS**

La morfogénesis se refiere al origen de las formas del relieve terrestre como resultado de la interacción de los procesos exógenos y endógenos. Los exógenos se manifiestan por la erosión, el intemperismo y la acumulación del material afectado; en tanto que los endógenos se ven representados por el tectonismo y el volcanismo, quienes se encargan de crear y modelar el relieve superficial. El análisis de éstos procesos se puede plasmar en un mapa morfogenético. En este tipo de mapas, se representan de manera sintética, las formas del relieve en forma bidimensional.

Los mapas geomorfológicos son considerados por Derrau (1983) como un objetivo de la geomorfología para representar de manera gráfica la interpretación del terreno realizada por el especialista. De acuerdo con Lugo-Hubp (1991), la regionalización geomorfológica consiste en delimitar porciones del relieve que se caracterizan por una homogeneidad en cuanto a la morfología y geología, con diferencias respecto a regiones adyacentes, con base en criterios locales de las propiedades del relieve, resultado del clima, la vegetación, la estructura, el basamento y la cubierta sedimentaria, la actividad antrópica, entre otros. Por su parte, Córdova (1988) menciona una sencilla clasificación de los mapas geomorfológicos en generales y especiales. Los primeros muestran las características del relieve (génesis, edad, etc.) y los especiales ofrecen información del relieve (pendiente, procesos fluviales, etc.).

En cuanto a los mapas morfogenéticos, de acuerdo con Spiridonov (1981), un mapa geomorfológico general debe ser morfogenético; puede dividirse en analíticos especializados que muestran elementos genéticos similares comunes, y mapas sintéticos, que ofrecen una imagen donde resaltan formas semejantes. Por su parte,

Palacio (1991) considera que los mapas morfogenéticos son una herramienta importante de análisis del relieve y hace énfasis en aquellos estudios que requieren el conocimiento de las formas y de los procesos geomorfológicos asociados (Guillén-Guerrero, 1996).

Tomando como base las cartas topográficas de Teziutlán E14B15 y Xonacatlán E14B25, escala 1: 50 000 (INEGI), y la interpretación de las curvas de nivel, así como de los mapas morfométricos y la información geológica del área, se elaboró el mapa morfogenético. Dicho mapa está constituido por tres regiones: relieve endógeno, relieve denudativo-estructural y relieve exógeno erosivo.

El relieve endógeno se originó de eventos volcánicos por erupciones en el Neógeno-Cuaternario, principalmente el colapso de la caldera de los Humeros, ubicada al sur del municipio de Zacapoaxtla, evento que determinó la litología exterior de la zona al cubrir la superficie con materiales piroclásticos.

El relieve denudativo-estructural se localiza en los complejos montañosos de rocas calizas y sedimentarias, con fuerte presencia de la actividad erosiva en materiales deleznable en condiciones de alta humedad (calizas) y de procesos gravitacionales.

Finalmente, el relieve exógeno erosivo está representado por valles fluviales recorridos por los principales ríos del lugar, que se caracterizan por su actividad erosiva sobre las laderas de las montañas adyacentes incrementando su anchura.

### **3.6.1 RELIEVE ENDOGENO**

#### **I. Volcánico Acumulativo Cuaternario**

Este tipo de relieve tiene su origen en la emisión de material volcánico en sus diferentes expresiones (efusivo y explosivo). Cuando se presenta actividad efusiva, el material se desliza sobre el relieve en forma de lava, modificándolo y creando nuevas formas al momento de enfriarse. Por su parte, la actividad explosiva se manifiesta con la emisión a la atmósfera de material piroclástico en los tres estados de la materia.

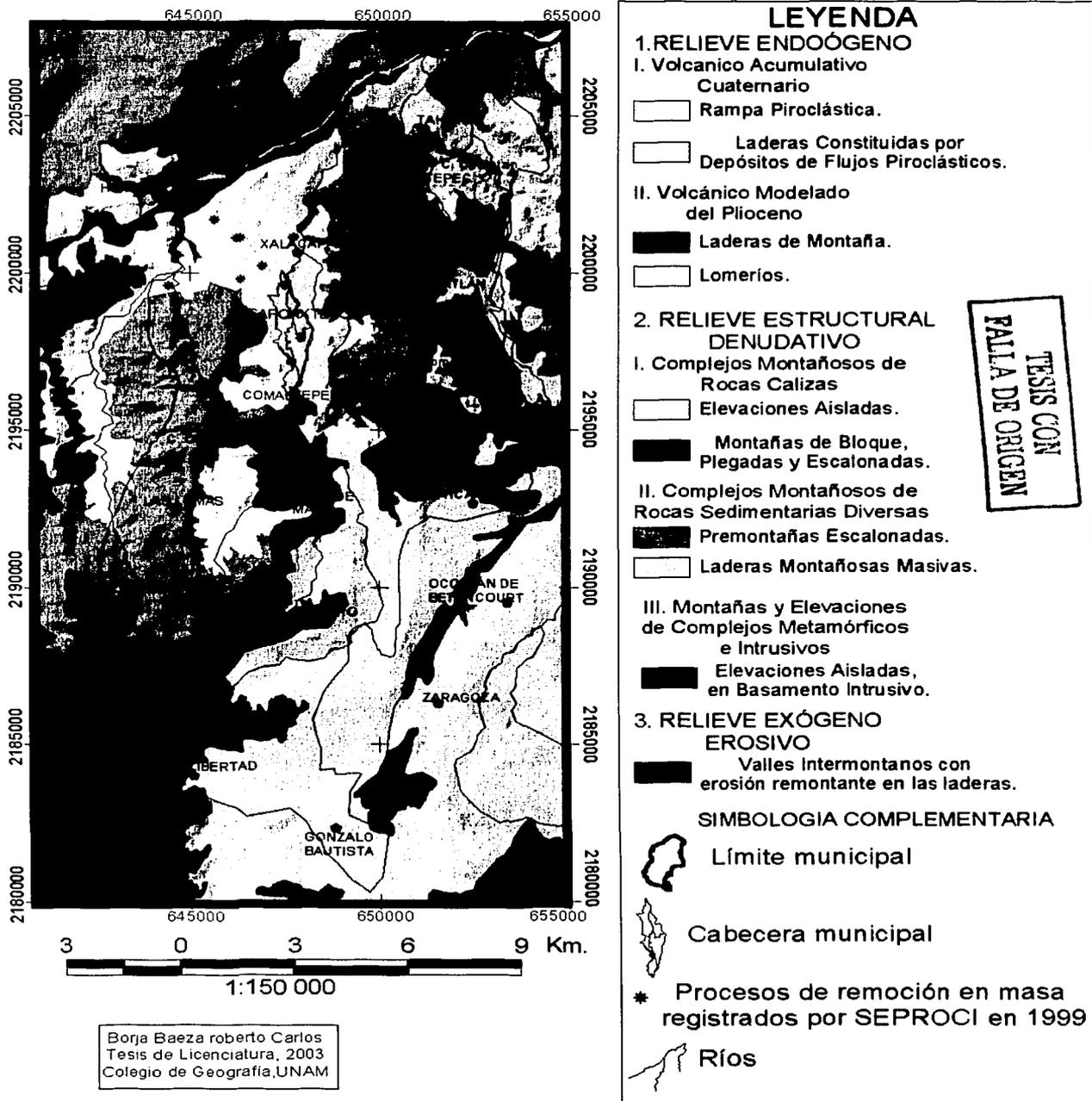


Figura 3.6 Mapa Morfogenético del municipio de Zacapoaxtla

La morfología que resulta está condicionada por la composición química y la cantidad de material arrojado a la superficie.

### **Rampas Piroclásticas**

La unidad se originó por el colapso y emisión de piroclastos de la caldera de los Humeros. Los piroclastos cubrieron grandes extensiones del sureste del área en estudio, y se acumularon en las zonas con menor pendiente y en las preexistentes de composición sedimentaria, a lo largo del río Hueyateno y con un declive de 800 metros de sur a norte en 6 kilómetros aproximadamente.

El declive de la unidad varía de 2° a 15° y en algunos puntos muestra pendientes de más de 20°, representados por barrancos con alta erosión fluvial cerca de San Juan Quimixcuanco donde la densidad de los cauces aumenta.

La mayor parte del material está constituido por tobas y, en menor proporción, cenizas volcánicas, materiales poco consolidados y débiles frente a procesos denudativos, en especial los fluviales. La pendiente de la unidad no favorece la presencia de procesos gravitacionales a pesar de la litología, salvo el hecho de ser materiales permeables y permitir la saturación interna del material.

### **Laderas de depósitos de flujos piroclásticos**

Con un origen similar a la unidad previamente descrita, ésta se asienta en las partes bajas de las montañas, en donde la pendiente favoreció el asentamiento de materiales piroclásticos, pero sin llegar a cubrir las partes altas de las elevaciones. Los procesos erosivos son favorecidos por los materiales poco consolidados y por el escurrimiento superficial presente en ríos como el Chichilaco en el oeste y el Agua Dulce en el sureste.

La unidad es alargada y estrecha, rodea las montañas más altas en la periferia de Zacapoaxtla (cerros Coatepec, Caxtepecuaco entre otros), y las elevaciones al norte,

como el cerro Caxtépétl. La densidad de la disección es alta, por lo que son numerosos los barrancos que se ubican en ésta unidad que junto con el área recorrida por el río Papaloateno, son los puntos más susceptibles a procesos de ladera.

Las dos unidades pertenecientes al relieve volcánico-acumulativo cubren el área ocupada por la localidad de Zacapoaxtla, principalmente la primeras de éstas y al oeste la segunda, por lo que se infiere que los materiales presentes que son poco consolidados en los barrancos de la zona son puntos de alto riesgo a procesos de ladera, lo cual se evidenció en 1999 por los numerosos casos registrados por SEPROCI (Secretaría de Protección Civil de Puebla).



Figura 3.7 Laderas de constituidas por depósitos de flujos piroclásticos

## **II. Volcánico modelado del Plioceno**

### **Laderas de montaña**

Una ladera de montaña es una porción del relieve inclinada de origen endógeno, que en frecuentes casos delimita formas negativas y positivas del relieve. Está es una unidad interna alargada dentro de las altas montañas, con pendiente media de más de 15° y una litología de ignimbrita y cenizas más consolidadas como resultado de su edad (Plioceno) Presenta afloramientos de lutitas y calizas en su parte oriental, donde el corte vertical es intenso.

La pendiente y el acomodo de los materiales superficiales sobre calizas que son solubles en estos ambientes húmedos puede favorecer la presencia de movimientos de grandes extensiones sin ser de gran riesgo por la ausencia de población.

### **Lomeríos**

Los lomeríos se forman por la nivelación de las montañas, ó bien por la disección de una planicie a través del proceso de erosión (Lugo-Hubp, 1989). Esta unidad está representada por una elevación aislada de baja altura en el norte del área de estudio, misma que por sus características de volumen fue cubierta por material piroclástico de la caldera de los Humeros, con algunos afloramientos menores de rocas sedimentarias. Su morfología es en forma de domo, con pendientes muy suaves. Material piroclástico cubre la estructura, compuesta bajo superficie por rocas sedimentarias, muy probablemente calizas.

## **3.6.2 RELIEVE DENUDATIVO ESTRUCTURAL**

### **I. Complejos montañosos de rocas calizas**

Esta unidad está representada por zonas montañosas que se ven modificadas por los agentes erosivos, modelando sus laderas y provocando una densidad de drenaje alta. Su

origen se remonta al Cretácico Tardío, y la acumulación de sedimentos carbonatados marinos. Posterior a la trasgresión, la tectónica originó su configuración actual, primero con una acción de distensión y después con una secuencia de pliegues.

### **Elevaciones aisladas**

La unidad de elevaciones aisladas presenta una litología de calizas del Cretácico Superior. Estas se ubican al norte, en el cerro Ixtaczayo, cerca del río Apulco, al este, el cerro Cuacuilco y el cerro Tomaquilo, éste último con una altura relativa de 500 m. Dadas sus características de gran declive, la erosión en las calizas no es muy acentuada ya que el número de cauces es limitado, lo que provoca que la delgada capa de piroclastos que le cubre mantenga su presencia.

### **Montañas plegadas y escalonadas**

Localizada en la parte suroeste de la zona de estudio, abarca una extensa área recorrida por el río Chichilaco y por las elevaciones más reconocidas, como el cerro Tres Cabezas y Peña Blanca. La pendiente media de 15° es constante desde las partes bajas de las altas montañas, en la carretera Zaragoza-Xochiapulco, en la localidad de Jilotepec, hacia sus puntos más altos, a los 2700 msnm, lo que resulta en una altura relativa de 1000 metros. En su ladera sur, la presencia de grandes cañadas manifiesta una erosión más intensa.

Su composición de sedimentos acumulados en capas en el Jurásico Superior (calizas) y la pendiente alargada, condicionan la red hidrográfica extensa y la erosión en las partes bajas de la unidad, representadas por cauces intermitentes afluentes del Chichilaco, que se han adaptado a la morfología escalonada resultado de los pliegues que se presentaron durante el Cretácico Tardío (Orogenia Laramide).



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.8 Zona de contacto entre montañas de bloque plegadas y escalonadas y la rampa piroclástica

## II. Complejos montañosos de rocas sedimentarias diversas

Las estructuras que representan la unidad son resultado de la actividad tectónica acontecida en el Cretácico Tardío, hecho que formó plegamientos en las rocas sedimentarias existentes. Posteriormente, los procesos denudatorios le han dado la configuración actual con una densidad de disección alta y una diferencia de alturas de más de 500 m en áreas de 1 km<sup>2</sup>

### Premontañas escalonadas y disecadas

La unidad se compone de elevaciones cercanas a conjuntos de altas montañas, pero de menor altura y en constante contacto con cuestras. Su imagen escalonada se debe a los pliegues cretácicos que le dieron su configuración estructural, suavizada por la actividad erosiva, principalmente fluvial, favorecida por la inclinación, de lo que resulta una alta densidad de barrancos y cauces intermitentes.

La litología es de calizas y lutitas del Jurásico Inferior y Superior, discordantes en algunos puntos con tobas de la actividad volcánica cuaternaria. Su altura relativa es de alrededor de los 900 m y observa una orientación N-S con ramificaciones en el SE y SO. También se manifiesta en el norte de la zona en Huahuaxtla, donde su altura relativa disminuye así como la pendiente.

### **Laderas de montañas disecadas**

La unidad se encuentra repartida en diferentes zonas cubriendo un área extensa de la región delimitada a estudiar. Se manifiesta por elevaciones montañosas con litología sedimentaria del Jurásico (calizas y lutitas), lo que favorece la disección por los cauces fluviales, que se reparten en toda la unidad de forma equitativa.

### **III Montañas y elevaciones de complejos metamórficos e intrusivos**

#### **Elevaciones aisladas en basamento intrusivo.**

El relieve de tipo intrusivo tiene su origen en magma que no alcanza la superficie, se consolida en el subsuelo, y posteriormente aflora a la superficie como resultado de la erosión de las capas o materiales que le cubrían. La unidad se ve representada por una elevación al este del municipio, cerca de Ahuacatlán, con una altura relativa de 350 metros. El material que representa a la cima es granito del Terciario.

### **3.6.3 RELIEVE EXÓGENO EROSIVO**

#### **Valles intermontanos**

La unidad de valles intermontanos es resultado de la actividad erosiva en su máxima expresión en el área, siendo los principales actores los ríos, en particular el Acongo y el Apulco. Sus efectos se manifiestan en el ensanchamiento de sus cauces y el transporte de sedimentos arrastrados de las altas montañas, lo que forma depósitos de aluvión a lo

largo de los valles. La erosión vertical no es intensa, por lo contrario a la erosión remontante sobre las laderas. Los cauces se encuentran principalmente en las rampas y laderas piroclásticas, por lo que el material es fácilmente desprendido, situación que favorece la erosión en la base de las laderas, que al ser debilitadas pueden generar procesos de ladera de gran magnitud. Asimismo, ésta unidad se caracteriza por ser susceptible a inundaciones.

La erosión que realizan los ríos permite que afloren los estratos sedimentarios jurásicos. La unidad es muy estrecha y alargada, sin variaciones en su dirección S-N y con una pendiente continua y constante.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.9 Cauce del río Apulco (Tomada de Sierramagica.com)

Con el mapa morfogenético y la información geológica de la zona se pueden obtener algunas conclusiones iniciales importantes. La litología y la historia geológica del área de Zacapoaxtla expuesta en la presente tesis, muestran un arreglo estructural de materiales que pueden ser erosionados con cierta facilidad, como consecuencia de las condiciones climáticas de la región y el relieve montañoso dominante.

Los estratos sedimentarios son solubles, puesto que la mayor parte de éstos están representados por calizas, donde la permeabilidad de los materiales de origen volcánico sobreyacentes origina mayor infiltración y por ende, puede funcionar como superficie de deslizamiento entre capas de distintos materiales.

En cuanto a los materiales ignimbríticos, por su edad reciente son materiales no consolidados, fácilmente desprendibles y erosionables que combinados con lluvias

intensas que saturan la superficie, y junto con la pendiente, favorecen la inestabilidad del terreno.

En zonas donde la densidad de la disección y la profundidad del corte tienen valores altos, es decir, donde la erosión es intensa, y la pendiente es muy abrupta, la ocurrencia de procesos gravitacionales asociados a precipitación es frecuente.

Por último, en la unidad de valles intermontanos se observan las características propicias de inestabilidad de laderas ya que distintos ríos erosionan el pie de las laderas y en materiales no consolidados. Aunado a lo anterior, el desarrollo de asentamientos humanos, cerca de los cauces, debido a la importancia que representan para satisfacer necesidades básicas, es evidente que los cambios antrópicos se ven reflejados con mayor intensidad, no sólo en la unidad sino a lo largo de las distintas corrientes.

Con la finalidad de contrastar y refinar las conclusiones emitidas hasta el momento, en los siguientes capítulos se hace una modelación que permite identificar zonas susceptibles a procesos de remoción en masa. Dicha modelación ha sido enriquecida con el análisis presentado en los primeros capítulos, y con los registros de localidades elaborados por SEPROCI (Secretaría de Protección Civil de Puebla).

## **CAPITULO 4 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA DE 1999**

### **4.1 PRECIPITACIONES EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA**

La República Mexicana está constituida por un relieve montañoso que ocupa alrededor del 75% del territorio, factor de gran influencia en la ocurrencia de procesos de ladera, detonados frecuentemente por las lluvias intensas ocasionadas por huracanes y tormentas tropicales, así como por sismos. A lo anterior se suma la presencia cada vez mayor de los asentamientos humanos en laderas inestables, lo cual está condicionado por la nula planeación del crecimiento, y por las características socio-económicas de la población.

En los primeros días de octubre de 1999 se presentaron en el este del país precipitaciones de extraordinaria magnitud, solo comparables a las acontecidas en los años 50 (huracán Hilda). Fueron resultado de la conjunción de la onda tropical 35 (la cual creó un sistema de baja presión de la cual resultó la depresión tropical 11, asentada en el Golfo de México, frente a las costas de Veracruz) y del frente frío 5 (Bitrán-Bitrán, 2000).

Los estados más afectados por el fenómeno fueron Veracruz, Hidalgo, Oaxaca y Puebla, éste último el que tuvo más daños, por procesos de remoción en masa. En particular, en la Sierra Norte de Puebla, donde las condiciones del relieve montañoso y la litología favorecieron dichos fenómenos, así como inundaciones, azolvamiento de presas, canales y arroyos. La morfología (montañosa), la geología (piroclastos cubriendo materiales sedimentarios), los insuficientes o nulos planes de prevención y obras de protección, el desconocimiento de las zonas y condiciones de riesgo de la población y la alta vulnerabilidad de las comunidades fueron factores determinantes para que la situación se tornara en desastre.

En el estado de Puebla fueron 87 los municipios afectados, y en mayor grado 49 de ellos; entre estos últimos está Zacapoaxtla. De acuerdo con datos oficiales, más de 400 personas perdieron la vida y resultaron aproximadamente 35 mil damnificados del llamado "Desastre de la década". Las pérdidas económicas se estimaron, en todo el estado, en más de 2,300

millones de pesos. La tercera parte de la población de los municipios y el área total de Puebla se vió perjudicada por el fenómeno. La inversión de apoyo a la población ascendió a 38.6 millones de pesos en el estado.

Cuadro 4.1 Daños totales en Puebla (Bitrán, 2000)

<b>RESUMEN DE DAÑOS TOTALES EN MILLONES DE PESOS</b>				
SECTOR	Daños directos	Daños indirectos	Total	% del total
Social	505.0	15.0	520.0	22.4
Infraestructura y servicios	1540.0	1.0	1541.0	66.3
Sectores productivos	190.7	35.0	225.7	9.7
Atención a la emergencia	-----	38.6	38.6	1.6
<b>TOTAL DE EFECTOS</b>	<b>2235.7</b>	<b>89.6</b>	<b>2325.3</b>	<b>100</b>

#### 4.2 SITUACION EN ZACAPOAXTLA

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

El municipio de Zacapoaxtla se asienta sobre materiales piroclásticos poco consolidados, cuyo origen está asociado con la explosión de la Caldera de los Humeros. Dicho material cubrió las rocas sedimentarias del Mesozoico, principalmente calizas y arenisca, litología que favorece la inestabilidad del terreno. De acuerdo con Capra *et. al.* (2002) los movimientos en las laderas del municipio de Teziutlán fueron resultado de la diferencia textural y sedimentológica, que se presentó dentro de la alternancia de materiales ignimbríticos con contenidos muy altos de arenas y de paleosuelos compuestos de arcillas principalmente. Debido a la similitud de litología con Zacapoaxtla, es posible suponer que lo mismo sucedió en el municipio

Los daños en el municipio fueron notables. Fueron 11 los decesos, aunque también se maneja extraoficialmente la cifra de 16. Los daños a la infraestructura se manifestaron principalmente en el transporte, el sector eléctrico, la distribución de agua potable, vivienda y agricultura. Como respuesta, El FONDEN (Fondo Nacional de Desastres Naturales) aportó 6 mil millones de pesos para su distribución en los municipios más afectados, de los cuales 71.2 % fue por parte del Gobierno federal y 28.8 del gobierno estatal, asignando 47% a carreteras y puentes, por ser éste el sector más disminuido. Los fondos de ayuda se distribuyeron primero a instituciones como SEDESOL, SAGAR, SCT entre otras, por lo que se agotaron casi de inmediato y tuvieron que utilizar sus propios recursos, los cuales posteriormente les serían restituidos. De lo anterior se puede concluir que las pérdidas económicas para el país son muy superiores a lo que se destina para frenar los impactos negativos que origina este tipo de fenómenos.

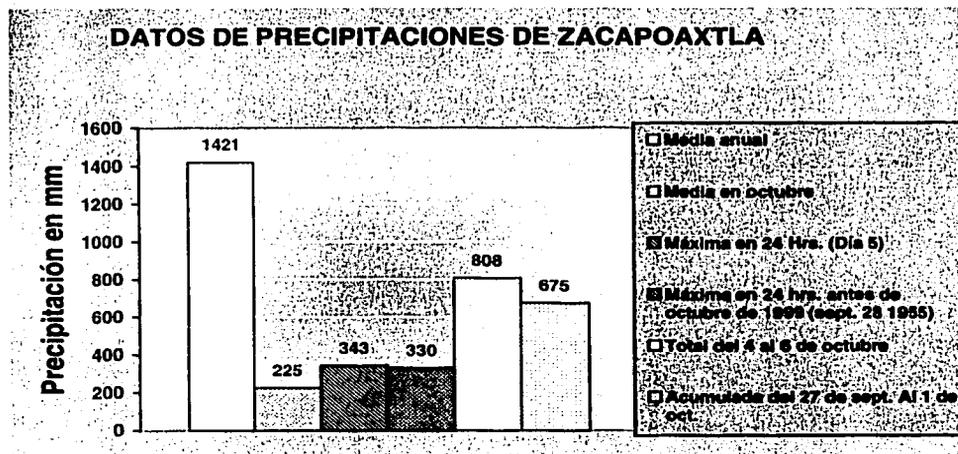


Figura 4.1 Gráfica de mayores precipitaciones en Zacapoaxtla (INEGI, 1999)

Como se observa en la figura 4.2, los días 4 (340) y 5 (343) de octubre de 1999 las lluvias alcanzaron su nivel más alto con una precipitación acumulada de 683mm en 48 horas, dato

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

muy superior a la media de octubre de 225 mm y que representa casi una tercera parte de la media anual.

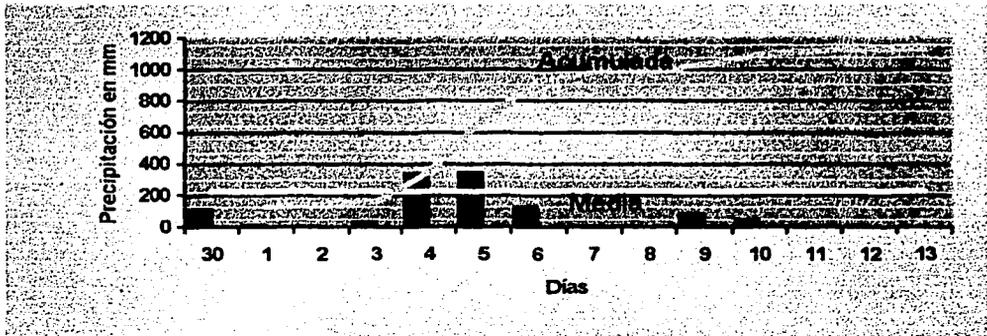


Figura 4.2 Gráfica de precipitaciones del 30 de septiembre al 13 de octubre de 1999 (Fuente: Servicio Meteorológico Nacional).

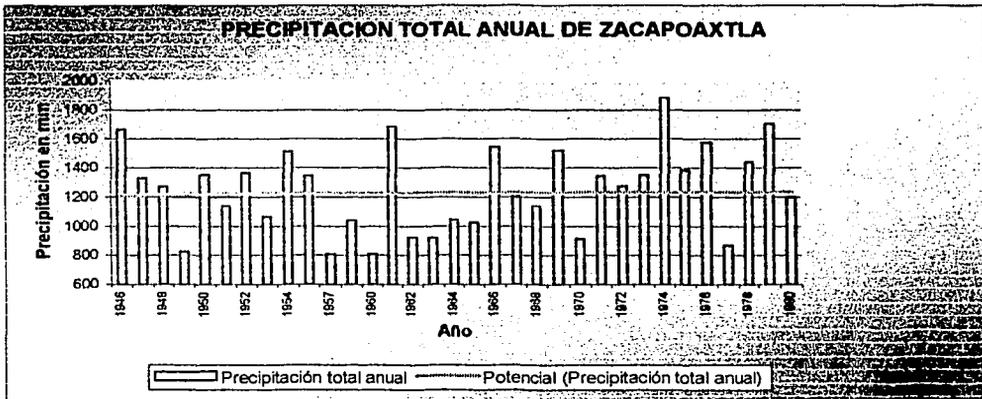


Figura 4.3 Gráfica de precipitación anual acumulada de 1946 a 1980 en Zacapoaxtla (Fuente: Instituto de Geografía, UNAM).

La figura 4.3 muestra los valores de precipitación anual acumulada en el municipio de Zacapoaxtla, donde se puede percibir que se presentaron años en que el total se acercaba al doble de la media anual, como ocurrió en 1961, 1979 y, principalmente en 1974, año en que

la precipitación total se acercó a 1900mm. En 1999, se presentó uno de estos años atípicos, puesto que al menos en los años registrados en la gráfica, no es posible determinar un comportamiento cíclico de la precipitación, por lo que sólo es posible predecir con algunos días precipitaciones extraordinarias.

En la siguiente gráfica de precipitación media mensual (Figura 4.4) es notorio que a lo largo del año se presenta, generalmente, dos temporadas de intensas lluvias; en junio, con descenso en los dos meses subsecuentes, y en septiembre y octubre, los meses con los niveles más altos de precipitación. En los tres meses descritos se acumula el 50% de la precipitación total anual, por lo que en estos dos últimos meses, la probabilidad de ocurrencia de procesos de ladera e inundaciones se incrementa sustancialmente.

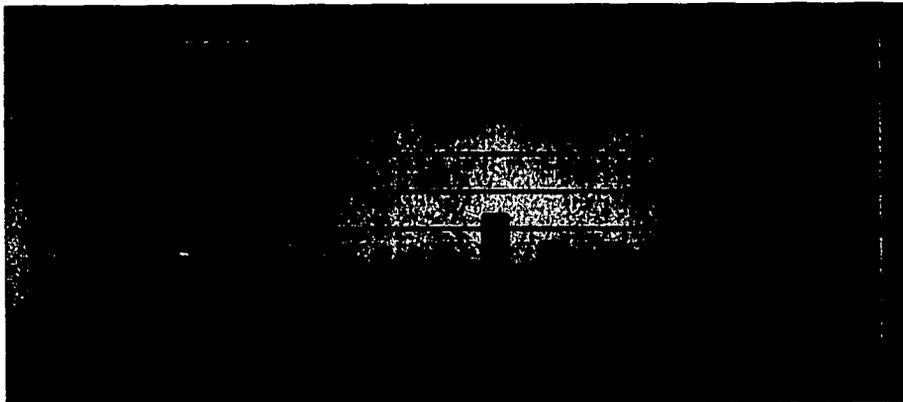


Figura 4.4 Gráfica de precipitación media mensual en el municipio de Zacapoaxtla (Fuente: Instituto de Geografía, UNAM).

Además de los daños personales, la infraestructura también se vio dañada, principalmente la carretera interserrana en sus 56 kilómetros de extensión, que cruza la región de Zacapoaxtla-Zacatlán, con daños en más de 50 puntos. Asimismo, la carretera que une la provincia con Cuetzalán quedó destruida en alrededor de un 80%. Esta situación repercutió en la incomunicación de varios poblados como Huitzilán, Tuzamapan, Ixtepec y otros. Para lograr establecer contacto terrestre y enviar la ayuda necesaria se instalaron puentes

desmontables, como los utilizados en Chiapas por las lluvias de unos años atrás (Figura 4.5). En el municipio, las escuelas fueron de las estructuras mas dañadas con un total de 150 planteles afectados, 8 de los cuales presentaron estragos mayores. Bitrán (2000) estimó en 160 mil pesos la inversión para restaurar cada una de las escuelas más debilitadas.

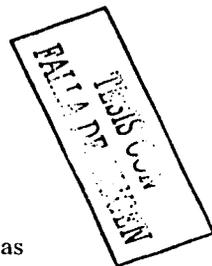
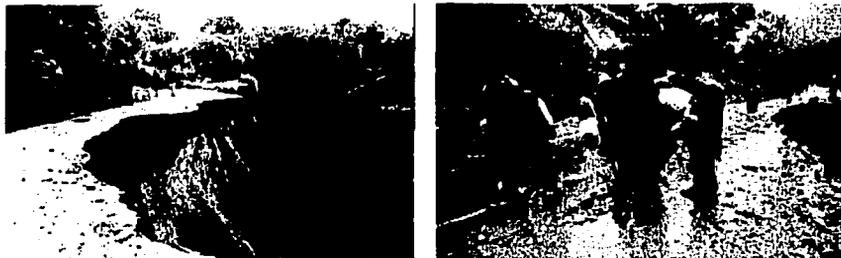


Figura 4.5 Daños en las carreteras del Municipio de Zacapoaxtla (imágenes tomadas del Diario El Universal)

El gobernador del Estado, Melquiades Morales Flores, designó a la localidad como punto central de coordinación de trabajos y de distribución de ayuda a los municipios más cercanos. De esta manera, Zacapoaxtla se convirtió en un de los centros de reparto de alimentos y en un albergue para los damnificados de alrededor de 20 poblados vecinos. Con el apoyo de la Cruz Roja, el Ejercito, el DIF estatal, el gobierno estatal y federal, así como instituciones sociales, como el Fondo Regional Kachimin, llegaban diariamente a los albergues entre 700 y 900 habitantes, en particular a la iglesia del Santuario de Guadalupe.

Dentro de las pérdidas más notables al sistema económico regional en 12 municipios (incluido Zacapoaxtla) estuvieron los campos de café en casi un 30 %, equivalente a alrededor de 18 millones de pesos, a lo que se suma la pérdida de 100 hectáreas de maíz y de otros cultivos, así como la disminución de terrenos de cultivo, situación que se calculó tardaría 8 años en recuperar sus niveles previos al siniestro. Para visualizar estas estadísticas, y de acuerdo con la Secretaría de Hacienda, la de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, los daños por éstos fenómenos naturales de 1999 rebasaron por más de seis veces los impactos que trajo en 1997 el huracán *Pauline* que en aquel momento

requirió de una inversión de poco mas de mil 100 millones de pesos, esto únicamente para ayudar a los damnificados.

Una de las zonas con mayores problemas fue la unidad habitacional "La Concordia" ya que se presentó un deslizamiento en una ladera ubicada a 25 metros del multifamiliar, por lo que el gobierno del estado movilizó hasta el lugar a técnicos especializados en mecánica de suelos con la tarea de detener el movimiento; las construcciones cercanas y la unidad misma estaban en evidente riesgo. Como respuesta preventiva se construyó un muro con el objetivo de impedir que el circo de erosión del barranco continuara su avance a la carretera contigua y debilitara las laderas laterales, sin embargo, dicha construcción presenta fracturas en sus cimientos resultado de la inminente inestabilidad (Figura 4.6)



Figura 4.6 Imágenes de la unidad habitacional La Concordia, cuya ubicación cercana a un barranco, con un circo de erosión activo, constituido de tobas no consolidadas y pendientes de más de 50°, le confiere un riesgo a primera vista evidente, que se corrobora con el movimiento de la ladera oeste del barranco la mañana del 5 de octubre de 1999.

Considerando lo descrito en párrafos anteriores, lo acontecido en Zacapoaxtla, y en general en La Sierra Norte de Puebla, puede designarse como un desastre de origen natural. Un desastre precede a situaciones de crisis tanto emocionales y sociales, en el individuo y en toda la comunidad. De la magnitud del evento derivan las reacciones. El trastorno a nivel

personal puede ser desapercibido entre el contexto y aun después de muchos años, según las características propias de cada persona. A nivel de masa, la mayor dificultad que se puede presentar es una reacción en cadena negativa, circunstancia que no es fácil detener (Mendizábal, 1998). El cuadro 4.2 expone algunas de las reacciones más comunes frente a un desastre y la temporalidad de tales respuestas.

Cuadro 4.2 Reacciones sociales frente a los desastres (Solway, 1995).

Escenario	Tiempo Relativo al Evento	Reacción Positiva	Reacción Negativa
1	Antes del evento	Advertencias de comprensión, preparación	Pánico, miedo.
2	Durante el evento	¿Qué debo hacer?	Fatalismo: "acto de Dios"
3	De 1 minuto a un día después del evento	Respuesta de los sobrevivientes: primeras búsquedas y rescates	"Pillajes; excursionismo calculado al tráfico del caos"
4	De 1 DIA a 1 semana después del evento	Comunidad en esfuerzo, búsqueda y rescate por servicios de emergencia	Incremento del precio de la comida básica y mercancías.
5	De una semana a un mes después del evento	Provisión de campamentos temporales, entierro de muertos, análisis del problema.	Provisión de mala comida y medicina, traspaso a la muerte.
6	De 1 mes a 1 año después del evento	Se limpian los escombros, compromisos para mayores proyectos de rehabilitación por fundaciones internacionales.	Provisión de inapropiados e inaceptables zonas de reacomodo, distribución de culpas, corrupción y mal uso de las fundaciones de emergencia.
7	De 1 a 5 años	Algunos trabajos de mitigación, algunos progresos en la rehabilitación.	No hay evidencias visibles de daños, la contabilidad de la burocracia y las fundaciones de ayuda retrasan la reconstrucción y la rehabilitación.
8	De 5 a 30 años	Incremento en los trabajos de mitigación	Objetivos contrarios llevan a la relajación de las regulaciones de construcción para reducir el costo del levantamiento de hogares, pequeños eventos producen algunos efectos en las grandes ciudades.
9	Antes del próximo gran evento desastroso	Constante aplicación de programas de mitigación	"No sucedió en mi tiempo", no hay apoyo a la mitigación.
10	Siguiente gran evento desastroso	Mismos reacciones (1-9)	Las áreas son más grandes y los efectos peores.

A manera de conclusión, se entiende la necesidad de generar estudios tanto del ámbito físico, como social, con la finalidad de contar con las bases necesarias que apoyen la creación de planes de prevención ante los procesos de remoción en masa, y demás fenómenos que originen o detonen un desastre, en particular en la Sierra Norte de Puebla. El presente trabajo tiene como un objetivo generar el mapa de riesgo por deslizamientos del municipio, parte importante en la prevención de desastres.

### **4.3 CARACTERIZACION DE LADERAS**

En el capítulo tres se describieron las características geológicas y se realizó la cartografía geomorfológica de la entidad, además de localizar zonas que *a priori* se infieren como zonas de susceptibilidad o potencialmente inestables. En la primera parte de éste capítulo se describió de manera general los hechos de 1999. En el presente apartado se realizará el análisis de inestabilidad de una ladera de la localidad de Zacapoaxtla. Lo anterior utilizando el modelo infinito de estabilidad de laderas y complementado con un análisis de sensibilidad.

#### **4.3.1 METODOLOGÍA**

Como resultado de un recorrido de campo, se seleccionó una ladera inestable con riesgo potencial para la población aledaña. Con el apoyo de una Estación Total *Trimble 5600* (Figura 4.7), se realizó el levantamiento topográfico de la ladera en estudio.

El procedimiento para el levantamiento consistió en el establecimiento de la estación en dos puntos georeferenciados, a partir de los cuales se pudieron levantar puntos que cubrieron toda la ladera. Con tal información fue posible generar un modelo digital y obtener los datos necesarios para determinar la estabilidad de dicha ladera, tales como pendiente, distancia, localización, etc.

Por otra parte, en base al mapa morfogenético, se eligieron distintos puntos representativos en el campo, para muestrear la resistencia de los materiales e incorporar los resultados en un análisis de inestabilidad utilizando el programa *SLOPE*, desarrollado por E. N. Bromhead (1988).

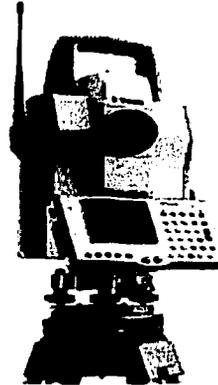


Figura 4.7 Estación Total Trimble 5600 empleada en el levantamiento topográfico en la cabecera municipal de Zacapoaxtla.

#### 4.3.2 MECANICA DE SUELOS

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La resistencia al esfuerzo cortante de un suelo se define como la oposición máxima que presentan sus partículas a un desplazamiento relativo que se presenta bajo ciertas condiciones dadas, particularmente de drenaje (Flamand-Rodríguez, 1995). La evaluación de ésta resistencia es importante en problemas de estabilidad de masas de suelo y diseño de estructuras, entre otras tareas. La determinación de la resistencia del esfuerzo cortante de los suelos es un paso sumamente necesario para lograr la aplicación de la mecánica de suelos al análisis de la estabilidad de laderas. Esta metodología de análisis de la resistencia del esfuerzo se encuentra en un momento de transición, debido a la generación de nuevas teorías en dicho campo, las cuales aún no están totalmente difundida y aceptadas, por lo que los supuestos planteados por Coulumb en el siglo XVIII se siguen aplicando.

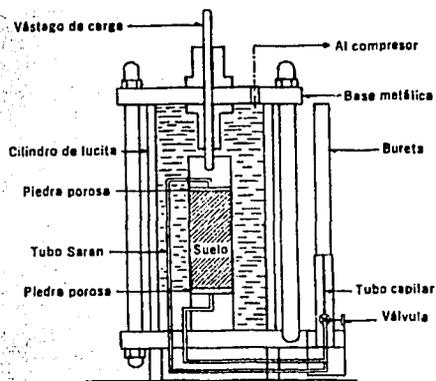
Entre las ideas de Coulumb, es importante rescatar que los suelos presentan características de cohesión y de fricción interna, lo cual quedo plasmado en la ley que lleva su nombre. Para el fisico francés, la cohesión se refiere a la resistencia al esfuerzo cortante de los materiales, aún cuando el esfuerzo normal exterior es nulo. Por otro lado, el ángulo de fricción interna lo define como una constante de los materiales, resultado de la proporcionalidad entre el valor resultante de un esfuerzo cortante, condicionado por la fuerza necesaria para deslizar un cuerpo sobre una superficie rugosa, y el esfuerzo cortante de dicho material por unidad de área en el plano en que se presente (Juárez-Badillo, 1996).

### **4.3.3 PRUEBAS PARA LA DETERMINACION DEL ESFUERZO CORTANTE**

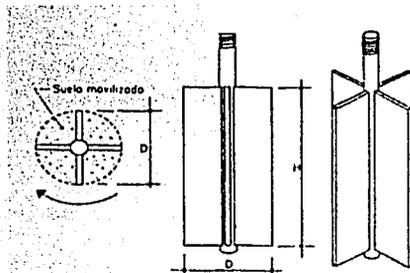
En la prueba directa de resistencia al esfuerzo cortante se emplea un aparato que consiste de dos marcos (uno fijo y uno móvil) en donde se colocan las muestras del suelo. Asimismo, el equipo contiene un par de piedras porosas (una superior y una inferior) que proporcionan drenaje libre a las muestras saturadas, o bien un par de placas de confinamiento para muestras secas. Sobre la muestra se ejerce una fuerza rasante, que ocasiona la falla en la muestra sobre un plano definido. En la cara superior de dicha muestra se aplican cargas con una presión normal en un plano de falla dado, que se puede controlar a voluntad, lo que genera una deformación, que es registrada en la horizontal y en la vertical.

En la actualidad, la prueba de resistencia al esfuerzo cortante se ha visto sustituida en algunos casos por las pruebas de compresión triaxial. En las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante se emplean dos métodos: el de esfuerzo controlado y el de deformación controlada. En el primero de éstos, se aplica en el equipo de medición valores fijos de la fuerza tangencial, por lo que mantiene un valor estándar para el esfuerzo aplicado, mientras que el segundo método, la velocidad de deformación es constante y se puede leer la fuerza que actúa sobre el suelo en el equipo de medición (Juárez-Badillo, 1996).

La prueba de compresión triaxial se emplea en laboratorio y actualmente es la más difundida y empleada. En ésta prueba, se emplean muestras cilíndricas, las cuales son sujetas a presión lateral de un líquido, por lo general agua. La muestra se introduce en una cámara cilíndrica, hermética, con bases metálicas. La presión que se ejerce con el agua es hidrostática, por lo que la presión es igual en todas las direcciones, es decir, tanto lateral como axialmente. Las pruebas de compresión triaxial se clasifican en dos grupos: de compresión y de extensión, cuya diferencia radica en la dimensión axial original de la muestra.



Otra prueba que se puede realizar, cuya ventaja es la de aplicarse *in situ*, es la llamada prueba de Veleta, la cual consiste en insertar una veleta, generalmente de cuatro aspas, a la profundidad deseada y que permita el equipo, en donde al ir penetrando dicha veleta, ésta tiende a girar, registrándose la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. La desventaja de dicho método es que la veleta necesita de hincarse en el estrato en el cual se van a realizar las mediciones (Juárez-Badillo, 1996).



La prueba de compresión triaxial se utilizó en el presente trabajo para determinar las propiedades de resistencia del suelo de Zacapoxtla, junto con el Penetrómetro Dinámico, que se emplea para el reconocimiento de suelos y el control de compactación, llamado *PANDA*, que permite una penetración a capas de suelos con resistencia de hasta 20-30 MPa, y de 4-6 metros de profundidad. Para realizar la prueba con este equipo se entierran un juego de barras por medio de golpes de martillo. Cada golpe activa un grupo de captadores que miden la velocidad del martillo en el momento del impacto, lo cual permite determinar

TESIS CON  
 FALLA DE ORDEN

la energía transmitida al equipo. Paralelamente, otros captosres miden el hundimiento de la punta. El microcomputador recibe estos valores y calcula instantáneamente la resistencia de punta, guardando en la memoria los valores de profundidad - resistencia, por cada golpe de martillo (Figura 4.8)

Posteriormente, en el *software* se introducen las características de la zanja o abertura en donde se realizó la muestra (clasificación de los distintos materiales de relleno y calidad de compactación deseada), lo que permite al programa establecer la recta de referencia y la recta de rechazo. La calidad de compactación efectiva del relleno se muestra en la posición relativa de la señal obtenida con el instrumento (*PANDA*) con respecto a las rectas de rechazo y referencia.

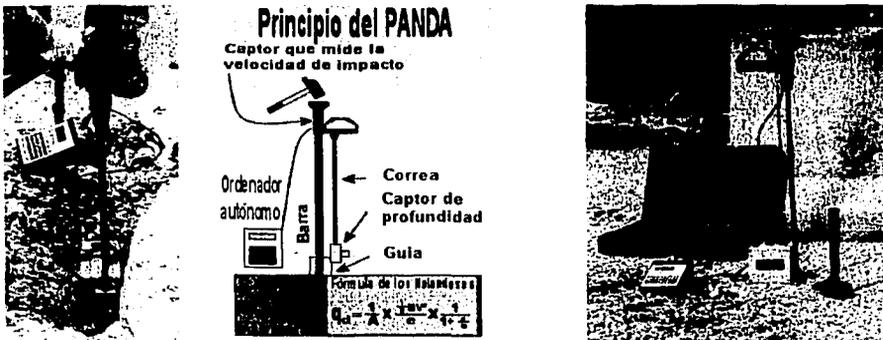


Figura 4.8 Imágenes y principio del Penetrómetro Dinámico *PANDA* (www.Sol-solutions)

Es importante mencionar que los análisis de mecánica de suelos realizados permitieron obtener los valores de cohesión y ángulo de fricción interna, mismos que fueron empleados en la obtención de zonas susceptibles a movimientos del terreno (ver capítulo cinco).

Para obtener las muestras necesarias a analizar en la prueba triaxial se cavó un pozo de una profundidad de 2.5m; y se extrajo material suficiente para realizar varias pruebas de resistencia (el mínimo recomendado es de tres). El material debe conservar las condiciones

originales, por lo que fue cubierto con una capa especial que lo mantuvo unido y aislado de las condiciones externas que puedan modificar las propiedades del material.



Figura 4.9 Extracción de muestras de suelo y utilización del penetrómetro dinámico *PANDA*, en Zacapoaxtla

#### 4.3.4 Ladera Los Arcos

En esta ladera ocurrió un deslizamiento en materiales piroclásticos previo al levantamiento topográfico, además de que en ella existe evidencia de movimientos antiguos, manifestados por pequeños escarpes y zonas de acumulación de material, junto a deformación en el terreno e inclinación de la vegetación (árboles) resultado de la reptación del suelo.

La ladera se encuentra entre la calle Bachilleres y un pequeño valle junto al libramiento poniente, donde el asentamiento de población es mínimo y es probable que el riesgo sea de medio a alto. La pendiente media es de  $38^\circ$ , y de acuerdo a los análisis de laboratorio, la cohesión es de  $1.2 \text{ Kg/cm}^2$  y el ángulo de fricción de  $20.5^\circ$ .

TRABAJOS CON  
FALSA DE... EN



Figura 4.10 Ladera poniente (Los Arcos)

#### 4.4 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE LADERAS UTILIZANDO EL MODELO INFINITO DE LADERA

Para determinar la estabilidad de las laderas se utilizó el programa *SLOPE* (figura 4.10) desarrollado por Bromhead (1988), el cual requiere datos de mecánica de suelos y del relieve (pendiente de la ladera, cohesión del material, ángulo de fricción, nivel freático, etc.). El programa considera el método infinito de ladera, el cual utiliza una ecuación lineal y se toman fallas paralelas a la superficie y una pendiente con una extensión infinita (Alcántara-Ayala, 1999).

Los valores manejados en el programa para el caso de la ladera de Los Arcos fueron los siguientes:

- Angulo de la pendiente **38°**
- Profundidad de la superficie de deslizamiento **3.0 metros**
- Profundidad de la tabla de agua (Nivel de saturación) **0** (Suponiendo que el nivel máximo de saturación es a nivel de superficie)
- Cohesión **11.7 Kpa** (Kilo-pascales)
- Angulo de fricción interna **20.5°**
- Peso específico del suelo **10.79 KN/m<sup>2</sup>**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

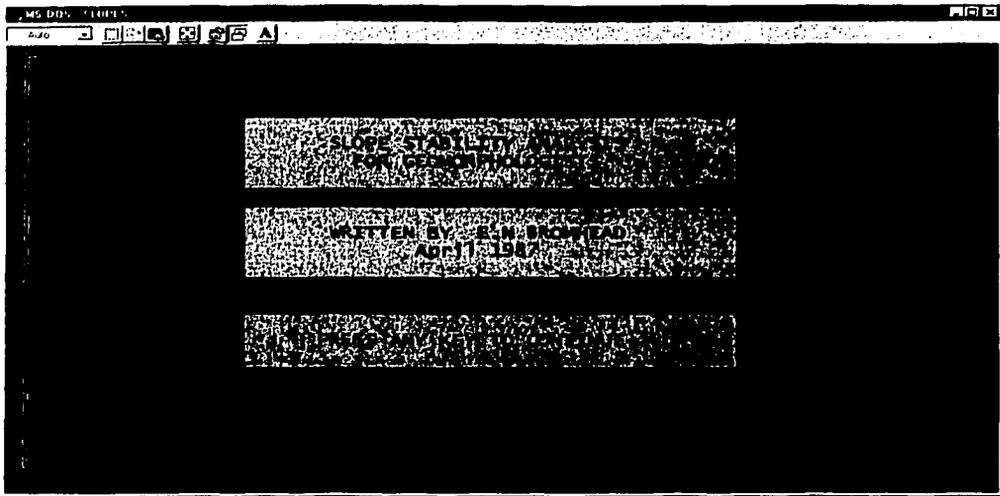


Figura 4.11 Pantalla inicial del programa *SLOPE*S

#### 4.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LADERAS

Alcántara-Ayala (1999) desarrolló un análisis de sensibilidad para la región de Torvizcón, en España, utilizando el programa *SLOPE*; en éste se toma en cuenta la dirección que sigue el cambio del factor de seguridad al modificar los parámetros que controlan la inestabilidad. La finalidad de este análisis es identificar el o los parámetros de mayor influencia en la estabilidad de las laderas. El procedimiento de acuerdo con Pearce y O'Loughlin (Alcántara-Ayala, 1999) es introducir valores reales en cada parámetro, calcular el factor de seguridad empleando el valor promedio de cada variable y, por último, modificar los valores introducidos en cada parámetro, sin alterar los demás valores.

Mediante los valores originales de la ladera se calculó un factor de seguridad de **.789**, lo cual indica que la ladera es inestable. Posteriormente los valores fueron modificados en base a los siguientes rangos:

Parámetro	Valor original	Valor FS=1	Rango empleado
Cohesión (Kpa)	11.7	14	0-30
Ángulo de fricción (Grados)	20.5	20.5	1.5-50.5
Pendiente (Grados)	38	38	8-76
Peso específico del suelo (N/m <sup>3</sup> )	10.79	10.79	5.4-39.4
Superficie de deslizamiento (m)	3	2.8	.5-7.4
Nivel freático (m)	0	0	0 a -2

Cuadro 4.3 Variación de los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad

Las figuras 4.12 y 4.13 muestran las gráficas generadas a partir de los datos obtenidos en la variación de parámetros en el programa *SLOPE*. Para efectuar dicha operación fue necesario determinar los valores que, cercanos a la unidad, teóricamente son los mínimos requeridos para conservar la estabilidad en la ladera.

En la primer gráfica (figura 4.12) se introducen los valores del factor de seguridad y los valores de las variables empleadas. Los resultados indican que el factor de seguridad es más sensible a la cohesión, la superficie de deslizamiento y la pendiente del terreno.

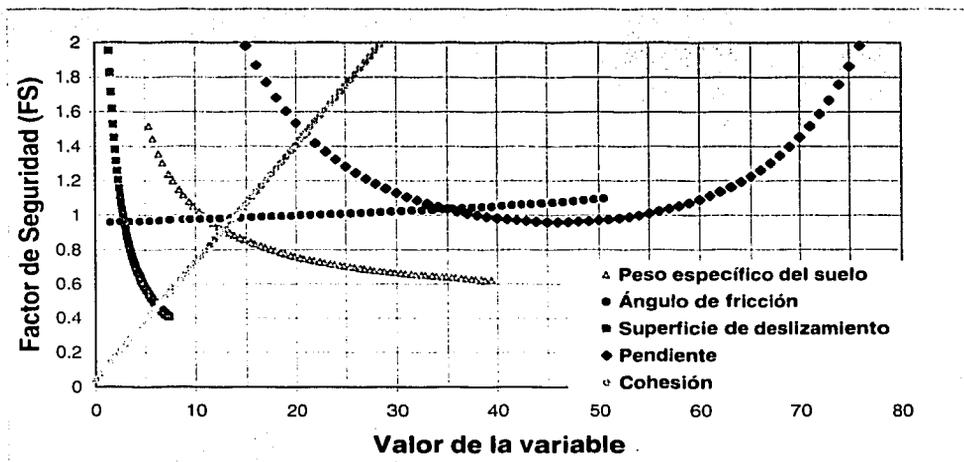


Figura 4.12 Valores del factor de seguridad y valor utilizado en el análisis de sensibilidad

La siguiente gráfica (figura 4.13) muestra los cambios en el FS y en los valores de cada variable en porcentaje. Esta permite deducir que la cohesión es el factor que mayor influencia tiene en la estabilidad de la ladera, lo que se evidencia en la oscilación de los valores mínimos y máximos de este parámetro. Esto significa que el factor de seguridad varía notablemente con el cambio en el valor de la cohesión. Lo anterior puede resultar evidente, pero la elaboración de este análisis de sensibilidad permite corroborar la tesis respecto a la actuación de la cohesión en la estabilidad del terreno.

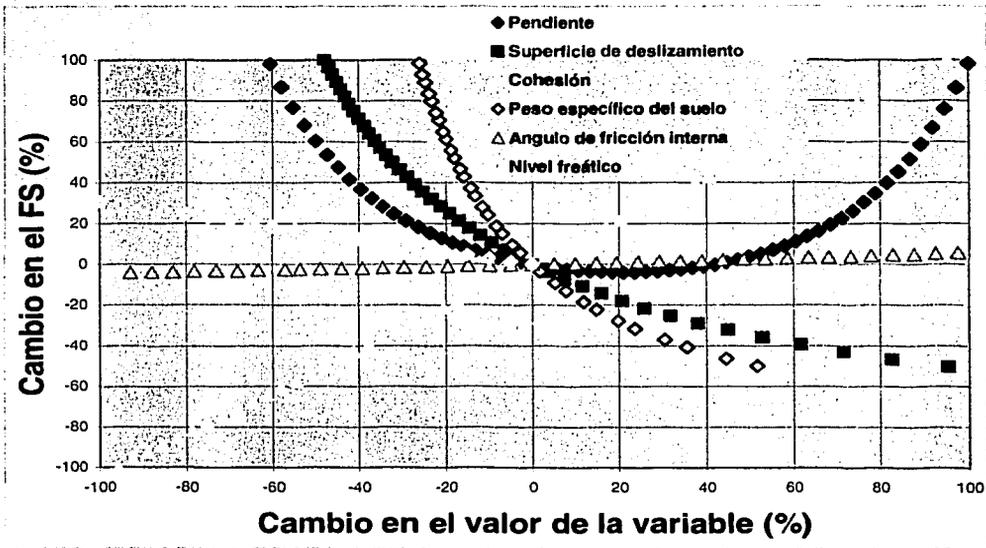


Figura 4.13 Análisis de sensibilidad derivado de la aplicación del modelo infinito de pendiente

#### 4.6 CONCLUSIONES

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los acontecimientos de octubre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla, particularmente en el municipio de Zacapoaxtla, tanto de procesos de remoción en masa como de inundaciones, revelaron la alta vulnerabilidad de la población y que las condiciones del medio físico son favorables para la inestabilidad de laderas. Lo anterior demuestra la importancia de realizar estudios de inestabilidad y, principalmente, elaborar mapas de riesgo por movimientos del

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

~~Handwritten text, mostly illegible due to blurring and heavy noise.~~

~~Handwritten text, mostly illegible due to blurring and heavy noise.~~

## CAPITULO 5 INDICES DE ESTABILIDAD

### 5.1 CONCEPTUALIZACIÓN

En los últimos años los sistemas de cómputo se han desarrollado a gran velocidad en todas las áreas de la ciencia y la técnica, incluyendo la geografía. De acuerdo con Aronoff, un sistema de información geográfica es cualquier conjunto de procedimientos, tanto manuales como con base en un cálculo de cómputo, utilizados para guardar y manejar datos referenciados geográficamente (López-Blanco, 1994). Los sistemas de información geográfica o SIGs son la base de datos en computadoras, cuyo propósito es apoyar la toma de decisiones al manejar datos georreferenciados a través de coordenadas espaciales, mismos que se pueden descomponer en capas para facilitar su manejo, análisis y modificación. En el caso de la predicción de los peligros físicos, se manejan estos programas para realizar los cálculos y plasmar en impresiones los resultados de las investigaciones. La simulación de escenarios y la recreación de eventos previos son otras de las funciones de estos sistemas.

El manejo de los SIGs facilita algunas cuestiones básicas para el desarrollo de las investigaciones geográficas, como la localización, condición, tendencias, rutas, pautas y modelos (Gutiérrez, 1994). Para desarrollar el presente capítulo se hace énfasis en el manejo de modelos, tanto reales (modelos digitales de elevación), cuyos niveles de aproximación son ciertos en alto grado, como probabilísticos, en donde el margen de error se debe manejar adecuadamente para acercarse a un nivel óptimo de certidumbre, como es el caso del mapa de vulnerabilidad.

De acuerdo con López-Blanco (Tapia-Varela, 1999), las funciones que realiza un sistema de información geográfica se dividen en 5 grupos principales:

1. *Introducción, transformación y verificación de los datos.* Se refiere a la transformación en formato digital de la información obtenida de las diferentes fuentes consultadas (mapas, imágenes, datos de campo, etc.).



2. *Almacenamiento y manejo de la base de datos.* En donde se organiza y estructura la información de los elementos por analizar en base a sus propiedades espaciales.
3. *Procesamiento y análisis de la información.* Aquí se utilizan las funciones de los SIGs de proporcionar funciones de análisis espacial de los diferentes aspectos o elementos manejados y la combinación de ellos ante los procesos que dichas funciones pueden realizar, como manipulación de escalas y proyecciones, operaciones *booleanas*, clasificaciones, cálculo de áreas y longitudes, análisis matemáticos entre otros.
4. *Salida y representación de los resultados.* Consiste en utilizar las diferentes formas en que se pueden obtener los resultados del análisis a través de la pantalla, impresiones en papel, película o en archivos en formato digital.
5. *funciones de interacción con el usuario.* en este grupo de acciones el *software* instalado en una PC permiten el aprendizaje manipulación y la asimilación de la información de forma más eficiente.

El manejo informático de modelos o posibles escenarios es tan sólo el complemento de gabinete al trabajo de campo indispensable para verificar, complementar y modificar los datos preliminares obtenidos de las mediciones de la cartografía consultada. Al manejar condiciones generales, es permisible el realizar muestreos en puntos representativos, lo cual permite reducir y optimizar el tiempo y el manejo de la información recogida se vuelve más controlable.

De las técnicas de muestreo se pueden mencionar algunas, de acuerdo con Gutiérrez y Rodríguez (1992):

1. *Muestreo aleatorio simple*, en el cual se eligen arbitrariamente los puntos a levantar, pero se considera su distribución en toda el área de estudio así como una distancia similar entre ellos.
2. *Muestreo estratificado*, en éste caso, el número de puntos a levantar será proporcional a una subárea previamente obtenida, que conforme el espacio a recorrer. En el presente trabajo las subáreas pueden ser las regiones morfogenéticas.

3. *Muestreo sistemático*, mismo que funciona distribuyendo regularmente los puntos a partir de uno inicial.

Una vez que se cuenta con la información suficiente, tanto de los levantamientos en campo como de los datos extraídos de cartas, fotos aéreas y otros documentos, es posible iniciar una secuencia de capas temáticas que conformaran la cartografía final, la cual se utilizará para emitir las conclusiones del trabajo.

La superposición de las capas obtenidas se puede llevar a cabo bajo dos perspectivas, bien sea separadas o en simbiosis. En la primera, denominada *superposición lógica* se tienen dos vertientes, por una parte se buscan áreas en las que se conjunten dos condiciones para poder emitir una resolución, o bien se localizan áreas en las que se encuentre una u otra condición estipulada para clasificar la zona. En el mapa de riesgos se describirá a mayor detalle éste tipo de interpretación de las capas sobrepuestas.

Para describir algunos procesos o situaciones al manejar sistemas informativos, se utilizan aquellas capas que sean necesarias para estructurar la cartografía, que se plasma en un documento, mismo que se convertirá en capa para llegar a una imagen o resultado más completo. Esta secuencia se describe en la geomorfología de la zona y se ampliará en la elaboración del mapa de riesgos. A este método se le denomina *superposición aritmética*, dado que se suman, restan o multiplican los valores de cada estrato de información.

Aunado a lo expuesto, los SIGs constituyen una herramienta eficaz para la prevención de riesgos, bien sean de carácter natural o social, y para la toma de decisiones. Con el apoyo de los SIGs se pueden determinar los puntos o zonas de riesgos y la identificación de la población potencialmente afectada. Sin embargo, los modelos de predicción no muestran “cuando” puede suceder un proceso de remoción, su propósito es ubicar “donde” van a suceder y las dimensiones espaciales que pueden alcanzar. Lo más aproximado a emitir un juicio de temporalidad del suceso es enunciar las condiciones requeridas para que el fenómeno se presente, lo cual funciona como antecedente teórico para manejar modelos adaptados al momento (Paul, 2000).

## 5.2 MDE (Modelo Digital de Elevación)

Un modelo digital de elevación, o del terreno, es una representación de la geometría de la superficie (Skidmore, 1989 en López-Blanco, 1996). El modelo presenta tres tipos de coordenadas (X, Y, y Z), que son registradas en una base de datos y representan la longitud, latitud y la altitud, siendo ésta la que proporciona una imagen tridimensional. Los modelos de sombreado se basan en la aplicación de filtros direccionales al MDE, mismos que son ajustables para simular diferentes orientaciones de la fuente luminosa para obtener la imagen apta a los requerimientos del proyecto. A partir del filtrado de la imagen se produce un efecto de falso relieve (Palacio-Prieto, 1991). La metodología empleada para obtener el modelo de elevación del terreno fue la siguiente:

Se digitalizaron las curvas de nivel del área de estudio en la carta topográfica Teziutlán E14B14 de INEGI (1999) en el sistema de información geográfica Ilwis, conservando en los trazos los valores reales de elevación, mismos que a través del *software Idrisi* fueron interpolados agregándose sombreado a la operación, acción que causa un efecto visual tridimensional y deja expuestas las formas del relieve en plano (Figura 5.1). El rango de alturas absolutas va de 1365 a 2540, superficie distribuida en 61,600 celdas, cubriendo un área total de 154 Km<sup>2</sup>.

El modelo digital de elevación, obtenido por el método descrito en el párrafo anterior, necesita de algunos ajustes en su terminado, lo cual se logra aplicando el proceso denominado *pit filling* o relleno de celdas, en donde se ajustan aquellos espacios que contengan información fuera de contexto y se ajusta en aproximación a su valor real.

Existen *software* especializados en el manejo de MDE (Arc View, Ilwis, Idrisi, Terrasoft, entre otros) y de la estabilidad de laderas, que permiten su manipulación y la sobreposición de capas temáticas, con lo cual la expresión de éstas aumenta y facilita su interpretación (cuadro 5.1).

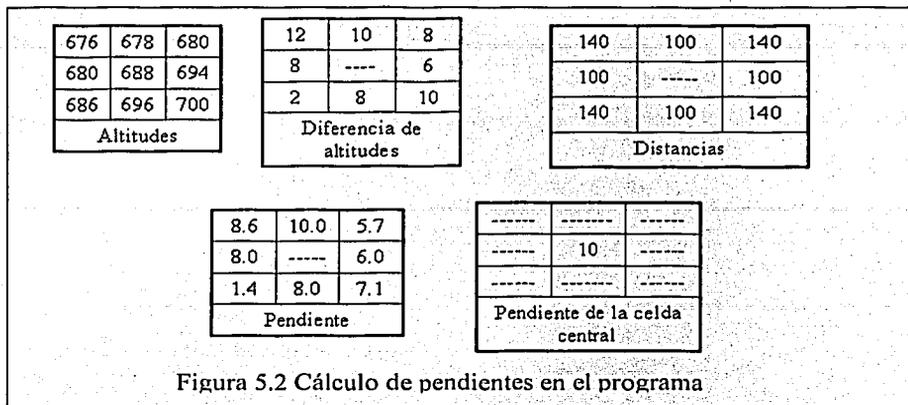


Cuadro 5.1 Algunos programas para calcular la inestabilidad en laderas (tomado de Bond,1995).

Nombre del programa	Sistema operativo	Desarrollado por:	Comercializado por:
SLIP	DOS	CADS	CADS
Slope	DOS	Borin	Geosolve
Slope	DOS	Oasys	Oasys/integer
Slope/W	Windows	Geo-slope international	Geo-slope international
STABL5	DOS	Purdue University	
STABLE	DOS	MZ Associates	MZ Associates

Tomando como punto de partida el MDE se pueden elaborar otros mapas, tal es el caso de mapas de pendientes, orientación de laderas, área específica de la cuenca y flujo de la escorrentía; Éstos últimos son necesarios para establecer el índice de estabilidad a desarrollar posteriormente en el programa *ArcView*. Es importante aclarar que los mapas presentados de pendientes y orientación de la ladera tienen una resolución de 100 x 100 metros en cada celda, que muestran zonas de tendencias homogéneas, mientras que los mapas base, al igual que el MDE para el cálculo del índice de estabilidad, se trabajaron a una resolución de 20 x 20 metros, para así establecer datos de probabilidad más certeros.

El proceso que realiza el programa para obtener el mapa de pendientes se basa en registrar la altitud de las celdas. Se trazan cuadrados de 3x3 celdas, y conocida la distancia horizontal de las celdas (resolución), se calcula la pendiente de la celda central, con los valores de las curvas de nivel en la base de datos del modelo digital del terreno, con relación a los ocho restantes y se extrae la media (Figura 5.2). El proceso se repite en cada celda, que en su momento adquiere el papel de celda central. El rango de pendientes se adapta de acuerdo con las necesidades del trabajo o investigación por realizar. Los valores se pueden expresar en m/Km o bien en porcentajes (%). La estabilidad de la pendiente depende de su capacidad de sostener el incremento de carga o los cambios físicos de su entorno, lo cual puede afectar los materiales en su mecánica y en su composición.



El análisis de la estabilidad de una pendiente se puede realizar para dos distintos escenarios: *análisis previo a la ruptura*, en donde se aplican cálculos de seguridad en un sentido global que muestre como la pendiente se puede comportar en el momento de la ruptura de la cohesión. *Análisis posterior a la ruptura*, donde se recopila suficiente información para predecir los procesos de remoción latentes en el declive y actuar conforme a las condiciones que la situación requiera (Casale, 2000). Lo anterior se entiende se aplica al decir que el primer caso es prevención y el segundo es reacción ante los fenómenos gravitacionales. Los datos que se requieren para interpretar la estabilidad de una ladera son su geología, resistencia de los materiales, las condiciones hidrológicas, la porosidad y su permeabilidad, entre las más importantes.

El mapa de pendientes permite establecer que la zona de estudio está comprendida en gran parte por pendientes de 5 a 20°, mientras que se evidencian zonas con pendientes mayores, hasta llegar a 40° localizadas en las cumbres de las elevaciones. Algunos puntos muestran pendientes de 40 a más de 45°, como en los cerros Xalticpac, Tomaquilo y Chicharosco.

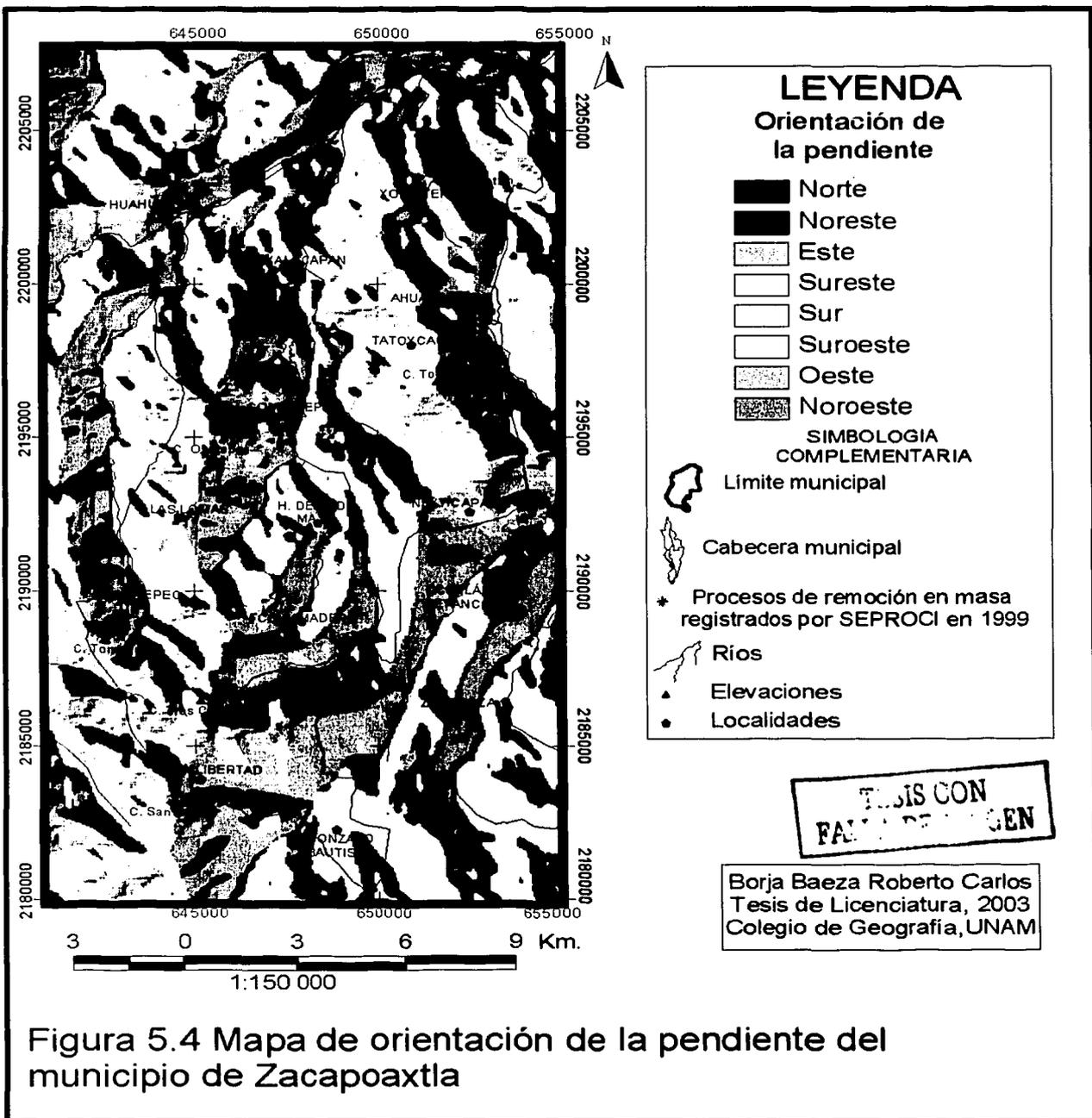


En la zona sur se extiende una amplia área con pendiente muy suave (menor a 5°), en donde no se presentaron procesos de ladera, pero sí problemas relacionados con inundaciones y desborde de ríos cercanos. La localidad de Zacapoaxtla denota pendientes muy variables, siendo la media entre 5 y 8°, y con algunos declives de más de 10°. En el mapa no se logran identificar grandes zonas homogéneas en pendiente, salvo la descrita al sureste, lo que comprueba el relieve montañoso e irregular en su morfología.

Del mapa de pendientes y al incorporar mapas temáticos, resultan otros como el de peligros kársticos, de fertilidad de suelos, mapa de posibilidades de aguas residuales, etc. (Pissart, en Casale, 2000), o bien directamente del MDE, se puede crear la orientación de la pendiente utilizando el mismo programa de cómputo (Figura 5.4). En ésta imagen se muestra el valor en grados entre el punto cardinal al que se oriente la pendiente con relación al norte. En este paso, el programa realiza cálculos trigonométricos con base en los datos de altura relativa y pendiente. Con el apoyo del modelo de elevación en el mapa de orientación de la pendiente, al incluir los ríos, es posible determinar los parteaguas o cimas de las elevaciones así como los barrancos al observar el cambio de dirección del declive.

### 5.3 FUNDAMENTOS DE SINMAP

En el análisis de los movimientos del terreno, es necesario un examen a los mecanismos por los cuales se puede presentar la ruptura del equilibrio del material, y de esta manera las propiedades del material. Por lo general, la estimación de la estabilidad de la pendiente se da en términos de un *factor de seguridad*, que lo podemos definir como el ratio de las fuerzas que actúan para resistir la ruptura y las fuerzas que intentan romper ésta (Bolt, 1975). Para la elaboración de los mapas previos y los índices de estabilidad se optó en el presente trabajo por utilizar el *software* denominado SINMAP (Stability Index Mapping), el cual es una extensión del SIG *ArcView*.



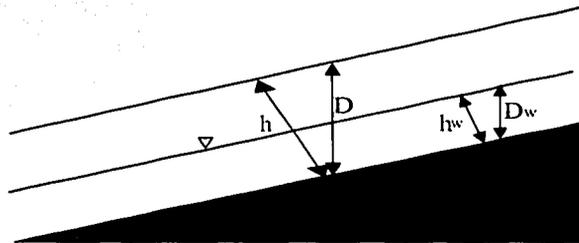
En dicho software se realiza una combinación entre un sistema de información geográfica y el análisis ingenieril basado en los datos de elevación y en datos obtenidos en campo. El propósito principal para el cual se diseñó la extensión, es realizar el mapeo de estabilidad de laderas, bien sea en lo cualitativo o cuantitativo.

El programa SINMAP es utilizado, entre otras funciones, para el manejo de bosques y desbordamientos de corrientes de agua, para determinar el volumen de producción forestal utilizable anualmente y, por supuesto, en mejores planes de desarrollo forestal con el fin de minimizar la ocurrencia de procesos de ladera, entre otros objetivos.

El acercamiento de SINMAP es similar al de Montgomery y Dietrich (1989), en cuanto a que combinan el concepto del estado constante hidrológico con el modelo infinito de estabilidad de laderas. El SINMAP se emplea como una aproximación para el entendimiento de deslizamientos traslacionales poco profundos, controlados por acumulación de agua cercana a la superficie. Cabe destacar que con el programa no es posible predecir zonas de deslizamientos asentados a profundidad, ya que se involucran otros métodos para el cálculo de éste tipo de inestabilidad. Debido a que la capa de ignimbrita que cubre la mayor parte de la zona en estudio, donde ocurren los procesos de ladera, no alcanza profundidades fuera de rango del programa, esta limitación del mismo no obstaculiza en mayor grado la certeza o precisión de los resultados buscados.

El programa requiere de datos topográficos y de materiales de la región, los cuales llegan a ser considerablemente variables. Sin embargo, no se necesita considerar en el programa datos numéricos exactos, ya que se manejan rangos de valores que representan el grado de incertidumbre de los valores reales. Como se ha mencionado, el *software* se basa en el modelo infinito de estabilidad de laderas y en un índice de humedad, el cual se obtiene a partir de una base topográfica. El modelo infinito considera los componentes de cohesión y fricción interna en un plano de ruptura paralelo a la superficie.

Con la información del relieve se crea el modelo de elevación del terreno en formato de datos *grid*, es decir, de celdas. Asimismo, en el programa SINMAP se incluyen parámetros variables a través de rangos de suelo y otros parámetros hidrológicos al modelo. Esta información se aplica, relativamente, a poca profundidad en el subsuelo. El modelo al ser probabilístico y manejar valores de incertidumbre presenta limitantes, las cuales se deben de considerar al momento de controlar los parámetros y de interpretar los resultados calculados. Entre estas condicionantes, está la dependencia de la resolución del modelo digital de elevación, ya que mientras el pixel representa una área más pequeña, mayor será la fidelidad de los resultados. Se pueden obtener zonas puntuales de inicio de los procesos, sin embargo, las zonas de riesgo del avance del material desplazado son difícilmente ubicadas. El método utilizado para el cálculo de índices de estabilidad (IE) a través de SINMAP se basa en la siguiente ecuación (figura 5.5)



$$\theta = \tan S$$

$$\text{Factor de Seguridad FS} = \frac{C + \cos \theta [1 - wr] \tan \phi}{\sin \theta}$$

Donde:

$$\text{Humedad Relativa } w = \frac{D_w}{D} = \text{Min} \left( \frac{R a}{T \sin \theta}, 1 \right)$$

$$\text{Cohesión } C = (C_1 + C_2) / (h \rho_s g)$$

$$\text{Radio de Densidad } r = \rho_w / \rho_s$$

Figura 5.5 Modelo infinito de estabilidad de laderas (Pack, *et al* 2001)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En donde:

$$h = D \cos \theta$$

D = Profundidad del suelo

$\theta$  = Angulo de la ladera

e = Cohesión adimensional relativa al espesor del suelo

r = relación de la densidad del agua y la densidad del suelo

Los cálculos del índice de estabilidad se basan en la inclinación de la ladera (%), de la humedad del suelo, de la resistencia del material y del área específica de la cuenca. Para obtener dicho índice se emplean fórmulas con los valores de las variables mencionadas. Si el resultado es inferior a 1, la probabilidad de inestabilidad es mayor; por el contrario, si el resultado es mayor a la unidad, nos muestra un modelo en donde la ladera es estable.

Cuando el valor se encuentra en rangos muy cercanos al valor de la unidad es necesario valorar hacia que extremo de la escala se inclinará para determinar la estabilidad en función de factores ajenos al cálculo, tales como vegetación, litología, actividad antrópica, etc. En el mismo contexto, la indicación de una zona inestable es una probabilidad, no una certeza y el que se enuncie como estable un área nos indica una tendencia no una certidumbre.

Una vez que se tiene definido el índice, es necesario valorar el grado de inestabilidad, con el propósito principal de realizar las acciones preventivas o correctivas oportunas, según sea el caso, y determinar áreas homogéneas (Cuadro 5.2). De ser necesario, se pueden adaptar los rangos, sin alterar el valor de separación (1) de puntos estables e inestables.

Cuadro 5.2 Ejemplo de definición de clases de estabilidad, elaborado por Pack *et al.*, 2001.

Condición	Clases	Estado de predicción	Rangos del parámetro	Rango de estabilidad	Posible influencia de Factores
$IE > 1.5$	1	Zona de ladera estable	Rango del modelo donde no hay inestabilidad	E S T A B L E	Factores desestabilizadores mayores son requeridos para crear inestabilidad
$1.5 > IE > 1.25$	2	Zona moderadamente estable	Rango del modelo donde no hay inestabilidad	E	Factores desestabilizadores moderados son necesarios para la inestabilidad
$1.25 > IE > 1.0$	3	Zona de ladera casi estable	Rango del modelo donde no hay inestabilidad	I N E S T A B L E	Factores desestabilizantes menores pueden provocar inestabilidad
$1.0 > IE > 0.5$	4	Límite inferior de inestabilidad	Rango desfavorable requerido para la inestabilidad	A B L E	No se requiere de factores desestabilizantes
$0.5 > IE > 0.0$	5	Límite superior de inestabilidad	Rango en el cual se requiere estabilidad	E	
$0.0 > IE$	6	Zona de mayor inestabilidad	Rango del modelo donde no hay estabilidad		Se requiere de factores de estabilidad

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Este método de análisis, para determinar la estabilidad del terreno fue empleada con resultados positivos por Flores-Lorenzo (2001) para el municipio de Teziutlán, el cual también observó una considerable cantidad de movimientos del terreno y como consecuencia destrozos en su estructura. Debido a la cercanía de Zacapoaxtla con el municipio mencionado, y al compartir algunas características del medio físico, con las diferencias definidas por el terreno mismo, se optó por utilizar una metodología parecida a la manejada por el autor. Sin embargo, y dado que los municipios son diferentes en sus aspectos sociales y con la intención de mejorar el análisis de la vulnerabilidad de la población, ésta se determinó de manera distinta, con un grado de aproximación que

pretende estar más cerca a la condición real del medio social y de la infraestructura de la localidad, dicha intención se plasma ampliamente en el capítulo seis.

## **5.4 INDICES DE ESTABILIDAD**

Como se ha explicado, los índices de estabilidad muestran zonas susceptibles a presentar procesos de ladera. Con el apoyo del programa SINMAP se calculan dichos índices a partir de la elaboración de otros mapas. Los datos necesarios, además del MDE, están en función de las propiedades geotécnicas de los suelos, derivados de análisis de mecánica de suelos; es decir, valores de cohesión  $C'$ , el ángulo de fricción interna  $\emptyset$ , además de la transmitividad.

La presión de poro debida a la humedad del suelo reduce la tensión normal efectiva, la cual a través del ángulo de fricción está relacionado con la fuerza de corte. La presión de la porosidad del suelo se calcula asumiendo un estado constante hidrológico, con una profundidad de saturación del suelo que sea suficiente para sostener una descarga lateral proporcional al área específica de captura de la cuenca. SINMAP deriva la estabilidad del terreno desde valores externos de la pendiente topográfica y el área específica de la cuenca y de los parámetros cuantificados de las propiedades del material.

### **5.4.1 DIRECCIÓN DEL FLUJO**

Como fase inicial del cálculo de inestabilidad es necesario elaborar un mapa de dirección del flujo. El método más utilizado en los trabajos de gabinete manuales y en otros programas se fundamenta en la misma división empleada en los mapas de pendientes, es decir, con una celda central se determina hacia cual celda adyacente o diagonal se dirige el agua precipitada sobre la base de la dirección de la pendiente, en donde acorde con el grado de orientación se elige la celda que se encuentre en ese camino, proceso que continúa en toda la ladera. Sin embargo, SINMAP realiza los cálculos con otro método llamado Doo

elaborado por Tarboton (1997, en Pack, 2001), en el cual el ángulo de la dirección del escurrimiento está definido en el sentido de las manecillas del reloj desde el este, y está representado como una cantidad continua entre 0 y  $2\pi$ . El ángulo está determinado por la dirección de la ladera más inclinada (Figuras 5.6, 5.7 y 5.8). En el mapa, los puntos o celdas en rojo muestran la concentración de los escurrimientos, y las celdas en verde representan los valores menores de escorrentía, aspecto que se puede observar claramente a lo largo del cauce del río Apulco. La concentración de la humedad favorece la saturación del suelo, lo cual es un factor inicial para la posible ocurrencia de procesos de ladera, esto pone en evidencia el interés que tiene este tipo de índices en la inestabilidad.

El mapa de dirección del flujo nos permite establecer las zonas hacia donde se dirigen los escurrimientos superficiales, y de esta manera, determinar las posibles áreas de saturación del suelo. Principalmente en las laderas donde hay escurrimiento de agua y los materiales de las pendientes concentran mayor humedad, existe inestabilidad potencial. La tendencia de la escorrentía en el área de estudio está dirigida hacia la vertiente sur de las elevaciones del municipio, con la marcada excepción del río Apulco.

#### **5.4.2 ÁREA ESPECÍFICA DE LA CUENCA**

Ésta se define como la superficie comprendida entre las laderas altas de una cuenca (o subcuenca) por unidad del largo del contorno. El área es calculada utilizando un procedimiento que es una extensión de un algoritmo para las direcciones singulares (Mark, 1988). Se toma la celda o grid de la ladera más alta y se suma con todas aquellas celdas vecinas que drenan hacia un mismo punto (Figura 5.9).

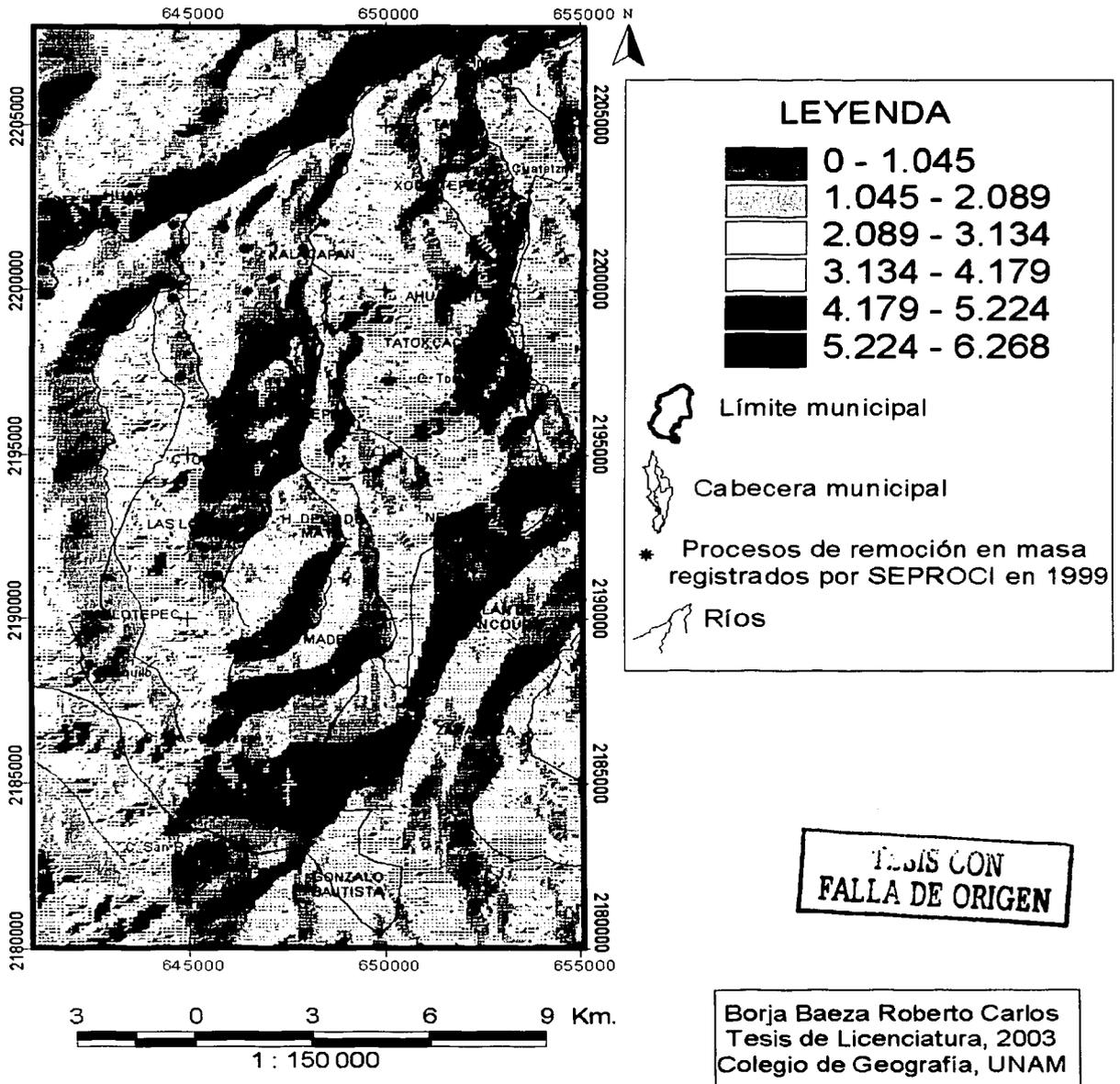


Figura 5.6 Mapa de dirección del flujo

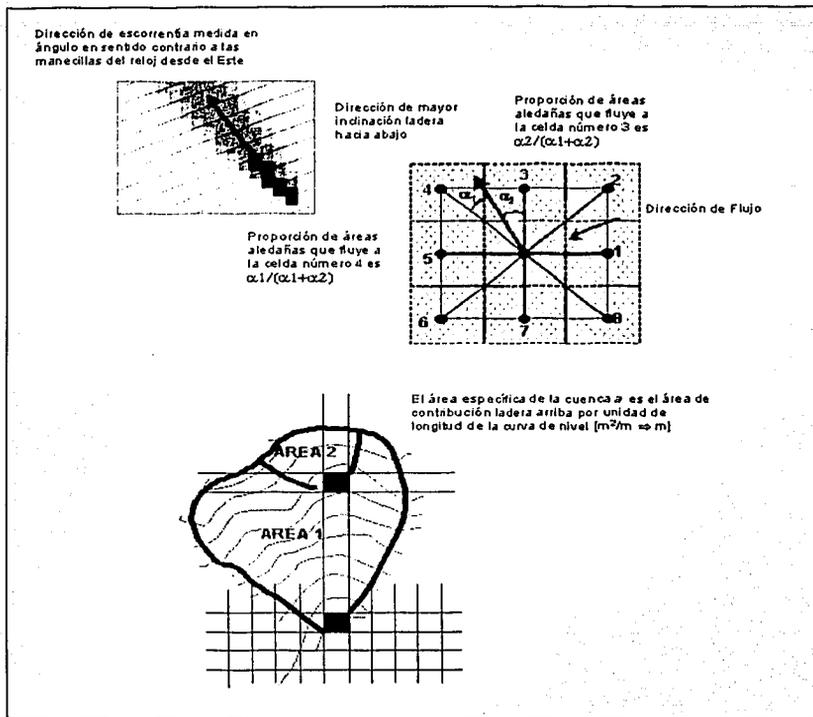


Figura 5.7 Explicación gráfica del cálculo de la dirección del flujo múltiple  $D_{\infty}$  (tomado de Pack, 2001)

La corriente de cada celda se dirige sólo hacia una de las nueve celdas vecinas. El área específica de la cuenca resulta del producto de las celdas que la integran y el tamaño de celdas de la matriz (figura 5.10).

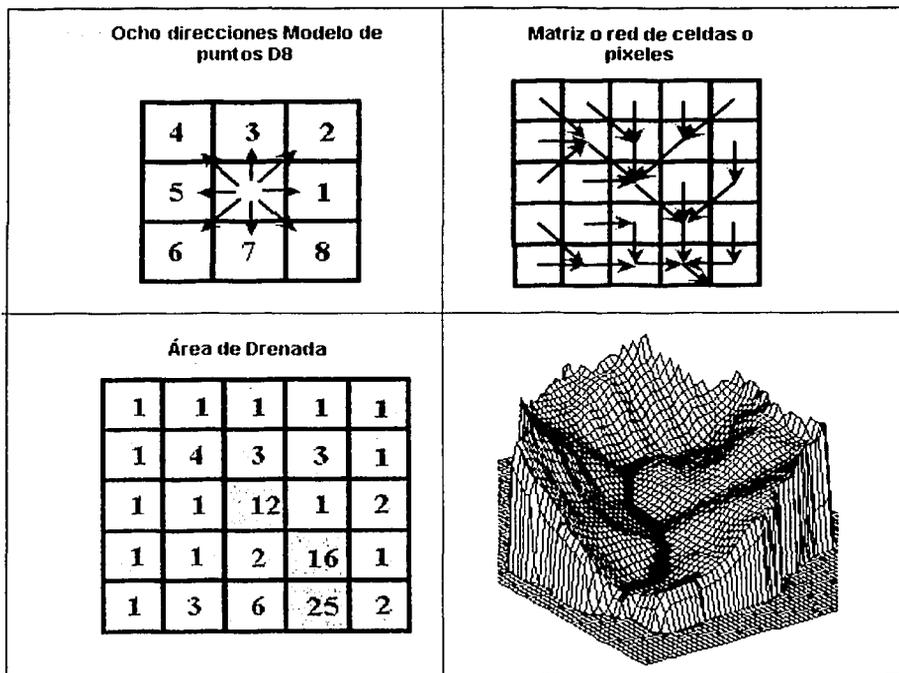


Figura 5.8 Dirección del flujo múltiple  $D_{\infty}$ , derivado de la matriz en un MDE (tomado de Pack, 2001)

En la figura 5.11 las líneas punteadas se interpretan como los cauces en donde se concentran los escurrimientos de las subcuencas del municipio, condición que se comprueba al incorporar la capa de ríos del municipio, misma que fue omitida en el mapa para permitir distinguir con claridad los resultados derivados del cálculo del programa. Estas líneas son los puntos más bajos de las laderas y por lo tanto son las líneas sobre las cuales, se depositará el material desprendido de los procesos de remoción a ocurrir en las laderas adjuntas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

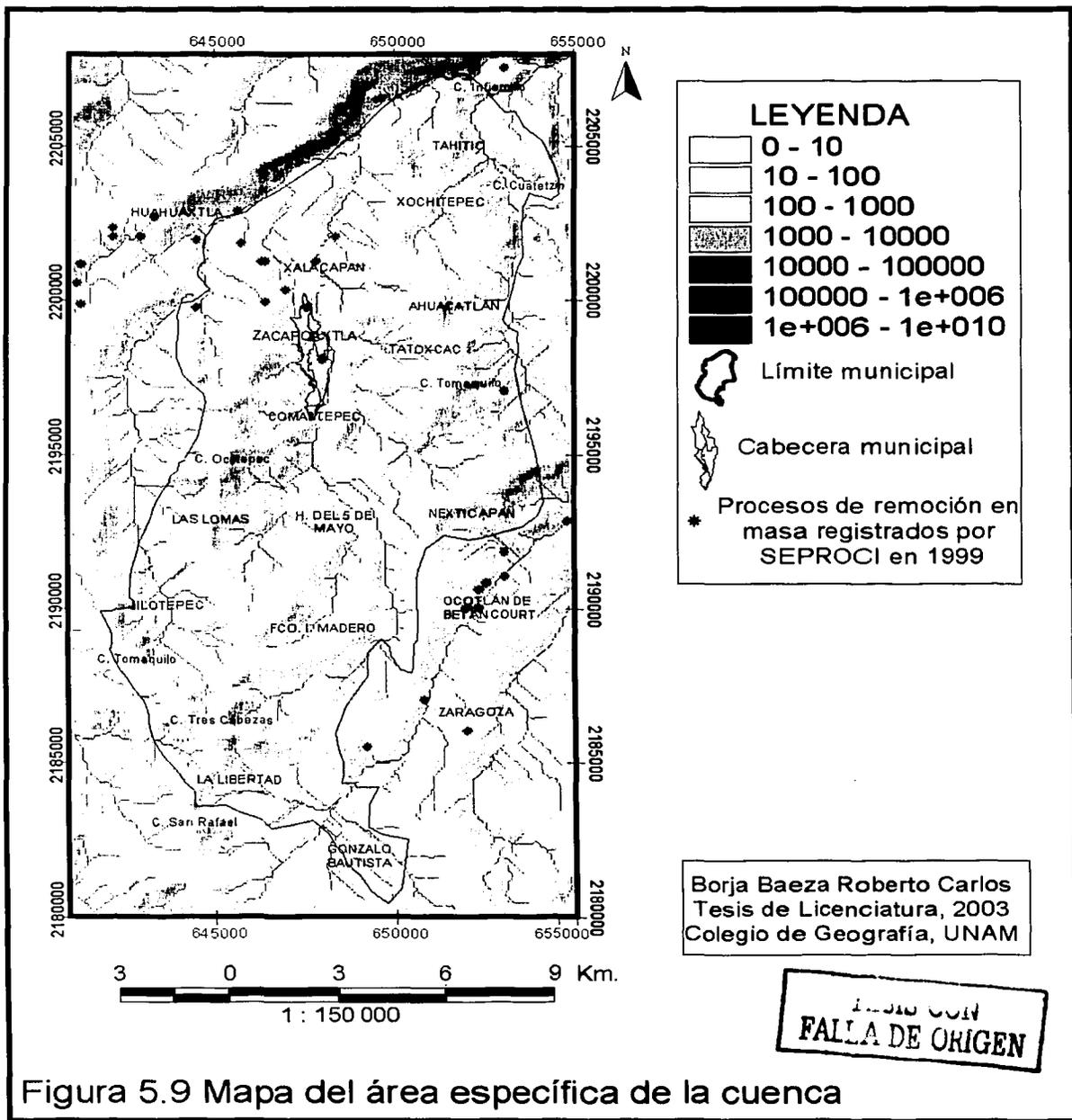


Figura 5.9 Mapa del área específica de la cuenca

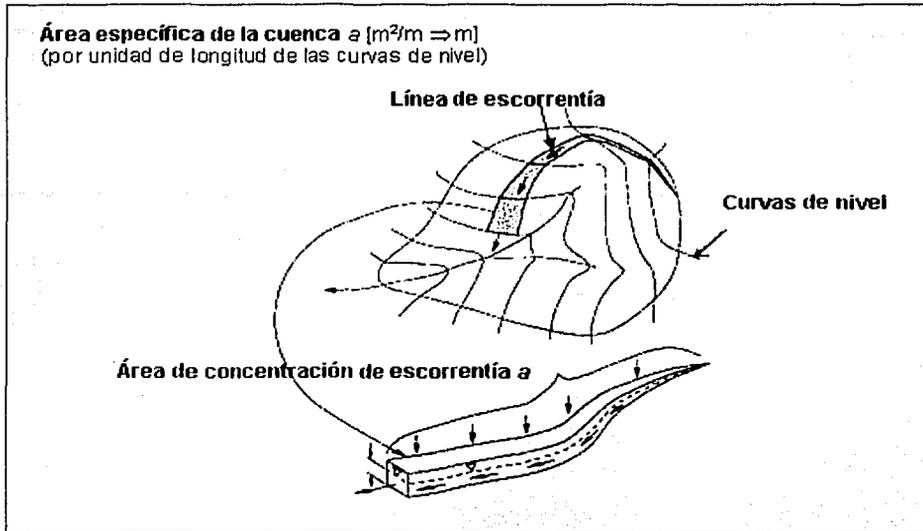


Figura 5.10 Esquema del área específica de la cuenca (tomado de Pack, 2001)

### 5.4.3 INDICE DE HUMEDAD

Como resultado del cálculo de la cuenca específica, se pueden recrear las zonas de concentración de humedad o saturadas, resultado de los escurrimientos superficiales, mismas que en el terreno, por lo general, denotan formas negativas (depresiones). Otros puntos que apoyan el mapa de índice de humedad son la pendiente y su orientación, además de la litología (Figuras 5.12 y 5.13).

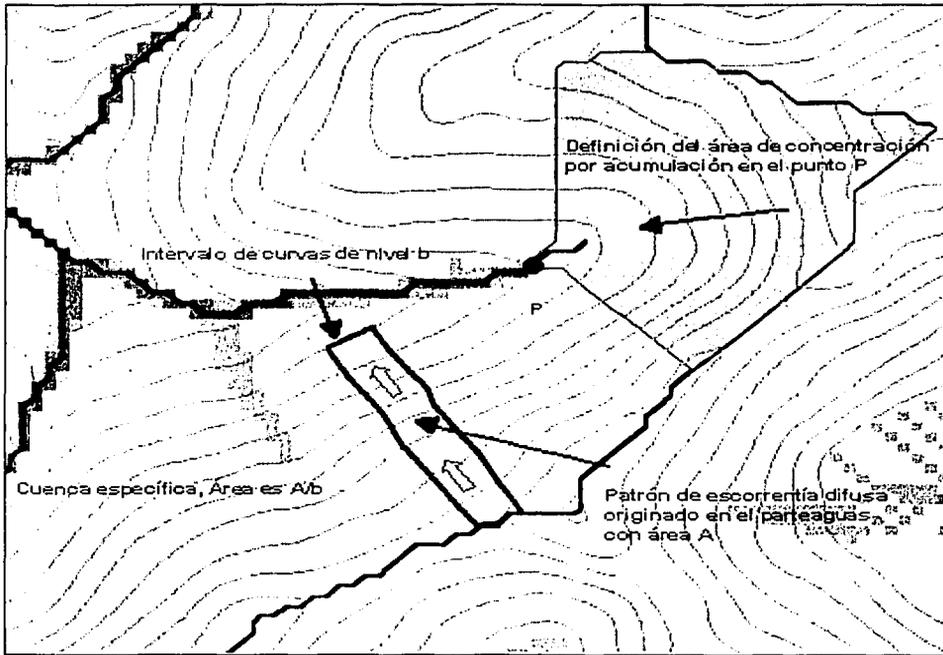


Figura 5.11 Áreas de escorrentía concentrada y difusa dentro de una cuenca específica (tomado de Pack, 2001)

Los rangos mostrados en el mapa del índice de humedad son 4:

- a) La zona de saturación, es aquella que muestra los valores más altos de concentración de la humedad, que se visualiza en los cauces de los ríos, en las partes bajas de la montañas, barrancos y una extensa área en la rampa de piroclastos, en donde la pendiente muy baja (menor a  $5^\circ$ ) favorece la acumulación del agua de escurrimiento.
- b) El umbral de saturación son aquellas porciones del relieve que se manifiestan con características cercanas a la saturación, pero debido a la pendiente, no retienen la

cantidad necesaria de agua, aunque muestran valores que permiten inferir cierta saturación profunda. Estas áreas se ven representadas por las laderas montañosas.

- c) El rango de parcialmente húmedo se aplica a las partes más altas de las montañas, y a aquellas zonas en las que la permeabilidad de los materiales permite la infiltración rápida evitando la concentración de la humedad en superficie y a poca profundidad. Estas zonas coinciden en alto grado con aquellas de disección alta.
- d) Por último, el nivel de baja humedad es aquel en el que no es factible la concentración de humedad por el escurrimiento y por materiales impermeables, se encuentra generalmente en los parteaguas. Esta zona es la menor en extensión de las cuatro, precedida de la zona con mayor distribución (parcialmente húmedo), de lo que resulta en un equilibrio entre las zonas saturadas y las áreas no saturadas.

Al combinar la localización de los procesos de laderas registrados por SEPROCI con el índice de humedad se advierte que la mayor parte de éstos se presentaron en zonas saturadas o cercanas a la saturación, factor importante en la zonificación de áreas de peligro.

## 5.5 INDICE DE ESTABILIDAD

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La finalidad principal del manejo del programa *SINMAP* es obtener el mapa de índice de estabilidad, mismo que resulta de la interpolación de los mapas previamente descritos del cálculo del factor de seguridad a partir de valores de cohesión y fricción. El índice de estabilidad se define como la probabilidad de que un punto o zona sea estable, al asumir una distribución uniforme de los parámetros de los rangos de incertidumbre.

Los rangos muestran valores entre cero (más inestable), 1 (menos inestable) y más de 1 (estable). El índice de estabilidad está representado por el factor de seguridad, es decir el radio de estabilización o de fuerzas desestabilizadoras.

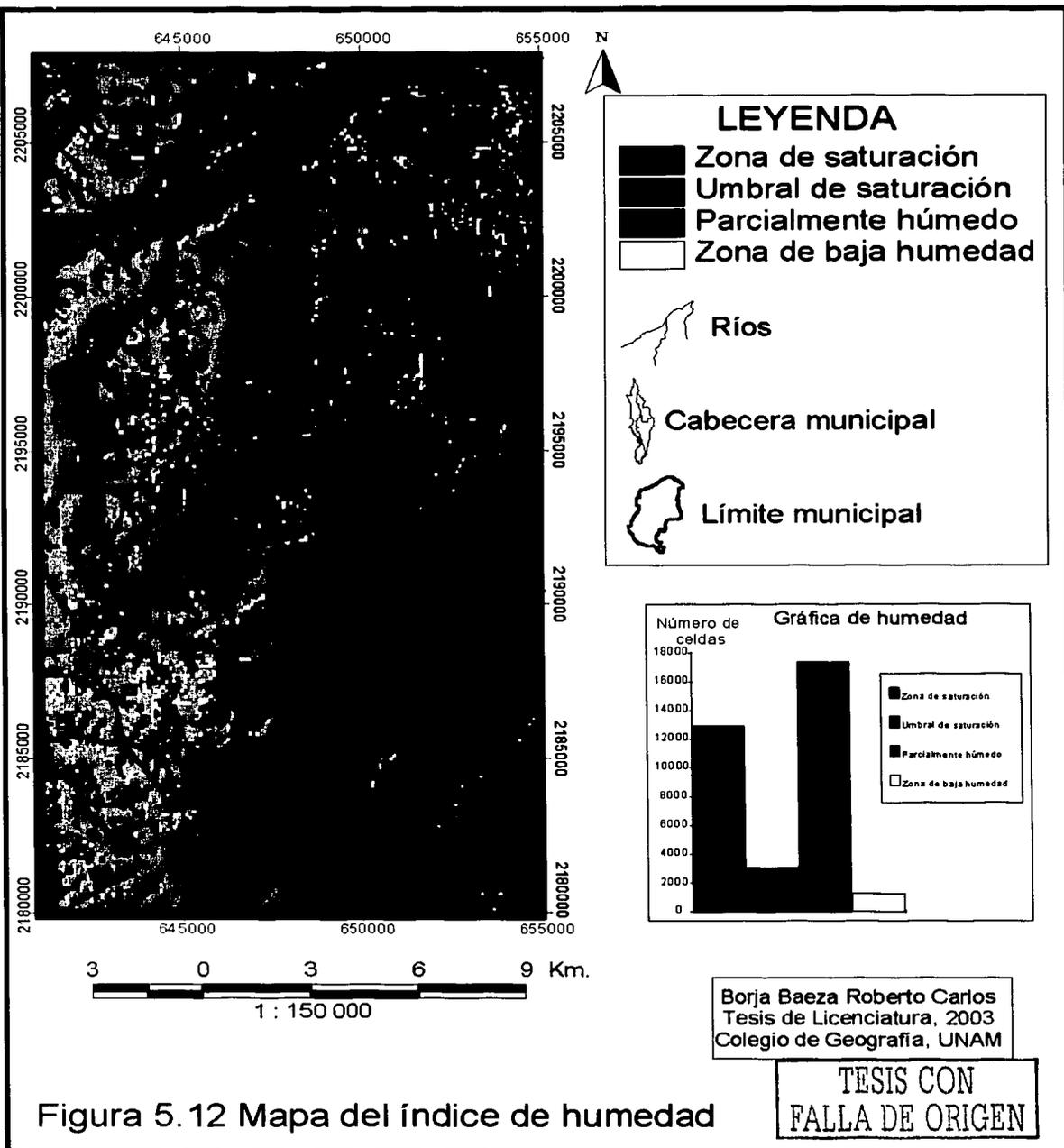
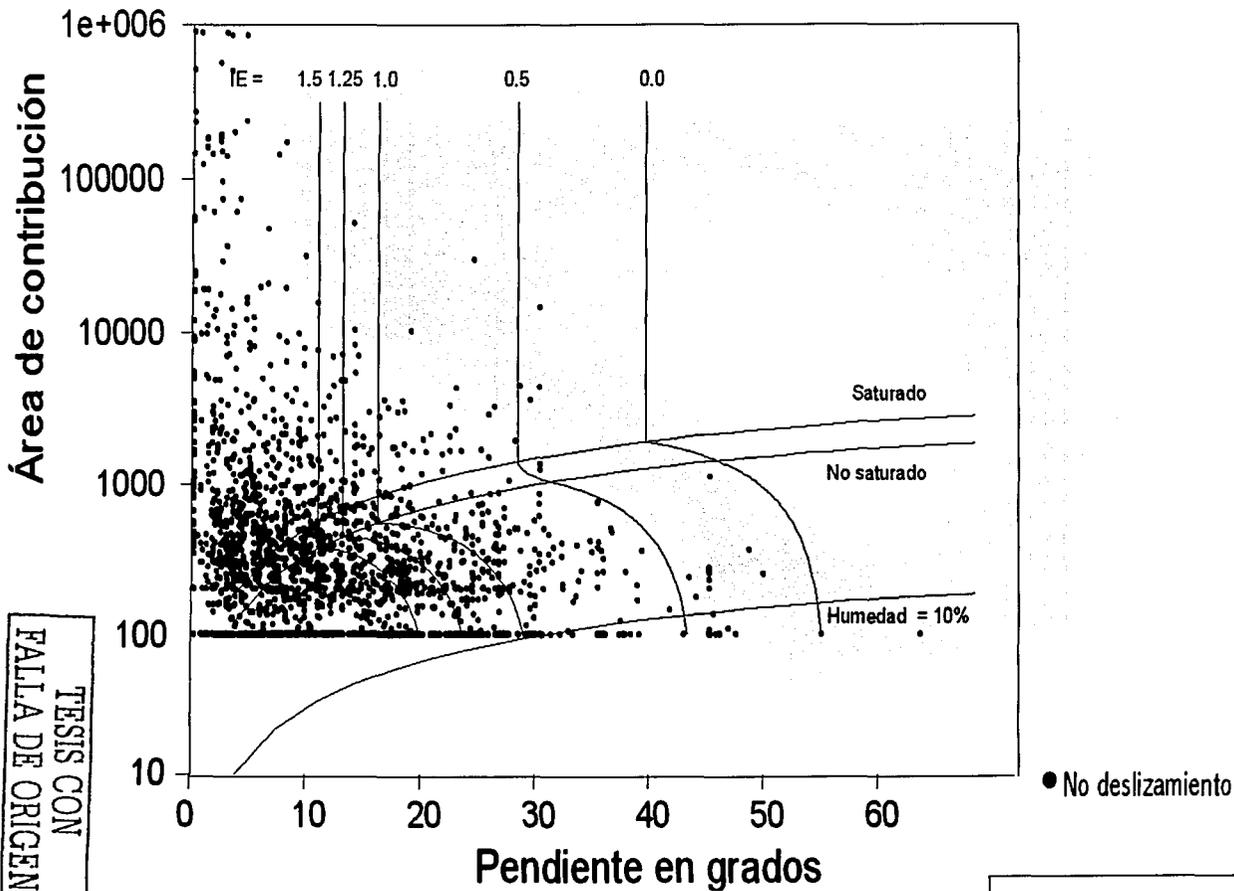


Figura 5. 12 Mapa del índice de humedad



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Borja Baeza Roberto Carlos  
 Tesis de Licenciatura, 2003  
 Colegio de Geografía, UNAM

111

Figura 5.14 Índices de estabilidad a partir de la humedad y la pendiente



El cálculo es realizado por celda, es decir, para cada celda o pixel se calcula un valor particular, lo que recrea zonas homogéneas de inestabilidad, que son aquellas en que se obtuvo un valor menor a 1. Las zonas estimadas entre 1 y 1.5 son zonas poco estables o, si se desea ver desde otra perspectiva, potencialmente inestables, mientras las zonas con valores superiores a 1.5 se consideran estables (figura 5.14).

Son cuatro los rangos de estabilidad utilizados en el mapa:

*Estable*, es la zona más extensa en el área de estudio y también se puede considerar la más segura, lo cual no implica que no se puedan presentar procesos de ladera, puesto que existen condiciones para ello. La pendiente en su mayoría es de 5° a 10° y sólo en algunos puntos llega a 15°. La litología es diversa, destacan los materiales de origen volcánico del Cuaternario (ignimbrita y basaltos), y en menor proporción calizas. La rampa piroclástica del municipio es la región menos inestable, a pesar de la baja consolidación del material. La densidad de cauces va de baja a media, por lo que el factor de cauces favorece tal estabilidad, aun cuando los procesos ocurridos en este rango de estabilidad son en su mayoría cerca de los ríos. La cabecera municipal del municipio está en éste rango, lo mismo poblaciones como Gonzalo Bautista, Xalacapan y La libertad. Es necesario comentar que en ésta zonas se registraron el mayor número de procesos de remoción en masa por SEPROCI, lo cual se explica por el hecho de que en dicha área se ubican la mayor parte de la red de carreteras, así como numerosos asentamientos de población. Los registros mencionados son un muestreo y no se enlistan la totalidad de procesos que se presentaron en la realidad, al estar en zonas no pobladas, como pueden ser las montañas de rocas calizas al suroeste del municipio.

*Cercano a estable*, es el rango menos distribuido en el municipio. Al ser un nivel de transición entre lo estable y lo inestable, genera zonas de poca extensión, más bien alargadas y que podemos considerar como fronteras de estabilidad. Se presenta generalmente a las orillas de los cauces y en los piedemonte. Si el tamaño de la celda o pixel se reduce, con un aumento en el detalle, este valor casi desaparece del mapa.

*Poco estable*, es el rango que rodea las zonas inestables, que al igual al cercano a estable, no cubre grandes superficies. El cambio de pendiente es notable en este rango, llegando a ser del orden de 15° a 30°. Estos valores se ubican en lomeríos, elevaciones aisladas y preferentemente en las partes bajas de premontaña. Algunos de los procesos registrados por SEPROCI ocurrieron en este nivel de estabilidad, con mayor influencia de la pendiente y la litología que de los cauces. Algunas poblaciones importantes como San Juan Tahitic, Las Lomas y Nexticapan se localizan en esta clasificación de estabilidad, por lo que el peligro para tales poblaciones es alto.

*Inestable*, se refiere a las zonas más inestables del municipio, donde la pendiente es en promedio mayor a 30° y la concentración de la humedad es mayor, factores determinantes en la detonación de procesos de remoción en masa. Cerca del 15% del área del municipio se encuentra en este rango de inestabilidad. Corresponde a montañas y laderas de montañas disecadas, con predominio de rocas calizas y en menor proporción lutitas. Un área particular es al norte del río Apulco, donde se presentan laderas de pendiente mayor a 35°, resultado de la erosión remontante en las laderas, con valores que resultan en una zona inestable. En dichas zonas, debido a sus características topográficas, no se asientan poblaciones mayores.

Los resultados del índice de estabilidad del municipio de Zacapoaxtla se complementaron con los registros de Protección Civil de Puebla, con observaciones de fotografías aéreas escala 1:50,000 para toda la entidad y una línea a detalle (norte del municipio) y con recorridos de campo, lo que permitió comprobar que la aproximación de dicho índice es muy cercano a la realidad.

Con los resultados obtenidos en el índice de estabilidad, a través del programa SINMAP, es posible concluir que la utilización de dicho *software* es adecuada para el manejo de la inestabilidad de laderas, además de las ventajas adicionales, como el manejo del programa, su relativa rapidez una vez que se cuenta con los datos y el manejo de la información, tanto impresa como en datos.

## CAPITULO 6 VULNERABILIDAD Y RIESGOS ASOCIADOS

### 6.1 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS

#### 6.1.1 Población y Vivienda

La vulnerabilidad de una población está en función de su situación socioeconómica, puesto que es ésta la que determina las características de la población para afrontar y asimilar un desastre, además de las herramientas estructurales, culturales y económicas para reestablecer las condiciones previas.

El municipio de Zacapoaxtla está integrado por 49,242 habitantes, constituido por 48.7% de hombres (23,985) y 51.3% de mujeres (25,257), mismos que ocupaban 9,717 viviendas, de lo que resulta en una densidad por hogar de poco más de 5 ocupantes (INEGI, 2000),

Del total de la población del municipio, 20,780 habitantes son menores de 14 años, lo que representa un 42.2%, lo que indica un crecimiento poblacional acelerado en las últimas décadas, y que sólo alrededor de la tercera parte (30.67%) es económicamente activa, por lo que la dependencia económica es de relación 1:3. Esto nos muestra que el grupo de edad de 15 a 64 años, constituye poco más de la mitad de la población, sólo la mitad mantiene ingresos fijos. El grupo de edad de más de 65 años es minoritario (4.7%), pero es quizá el más vulnerable (Figura 6.1)

De los habitantes ocupados, 6,338 (43.18%) se dedican a actividades primarias; en el área de transformación se emplean 2,809 (19.13%) y el resto (37.69%) se dedica a ramos de actividades terciarias (INEGI, 2000), datos que reflejan la autonomía relativa en las labores de trabajo de la población del municipio, representadas por la agricultura (cuyos principales cultivos son maíz, ciruela, manzana), ganadería (bovinos y aves principalmente) y el negocio pequeño propio (productos básicos y alimentos no especializados) (INEGI, 1999)

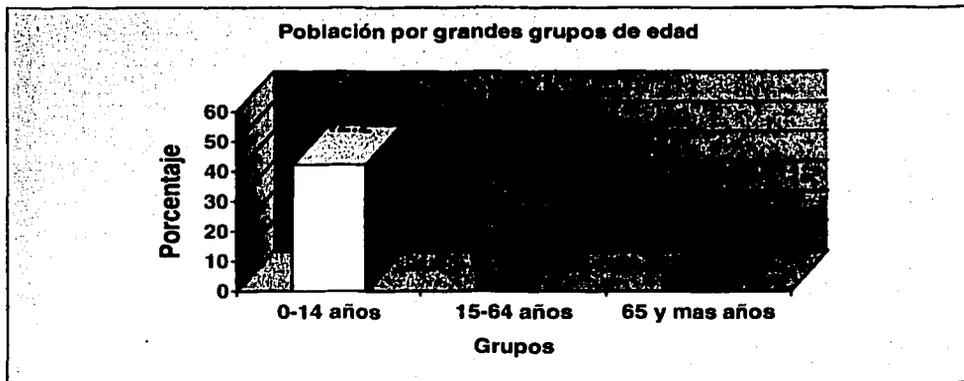


Figura 6.1 Gráfica de población por grupos de edad (Fuente: INEGI, 2000)

Aproximadamente la mitad de la PEA (58.95%) recibe menos de 2 salarios mínimos como ingreso, lo cual condiciona en gran medida las condiciones de vivienda de dicha población. Un dato relevante indica que 42,939 habitantes no tienen derecho a servicios de salud de instituciones públicas, por lo cual quedan restringidos a centros de salud locales (INEGI, 2000).

La vivienda en el municipio, en su mayoría es particular, habitada por sus propios dueños. Aproximadamente el 64.95 % cuentan con agua entubada, aunque sólo un poco más de un tercio de los inmuebles disponen de servicio de drenaje.

Cerca del 56% de las construcciones poseen piso distinto a tierra y únicamente 16 alojamientos están contruidos en su totalidad de cartón (INEGI, 2000). Las viviendas que cuentan con todos los servicios básicos (luz, agua y drenaje) son 3071, lo que representa un porcentaje del 31.6. La gráfica 6.2 confronta algunas de estas cifras con las de la cabecera municipal.

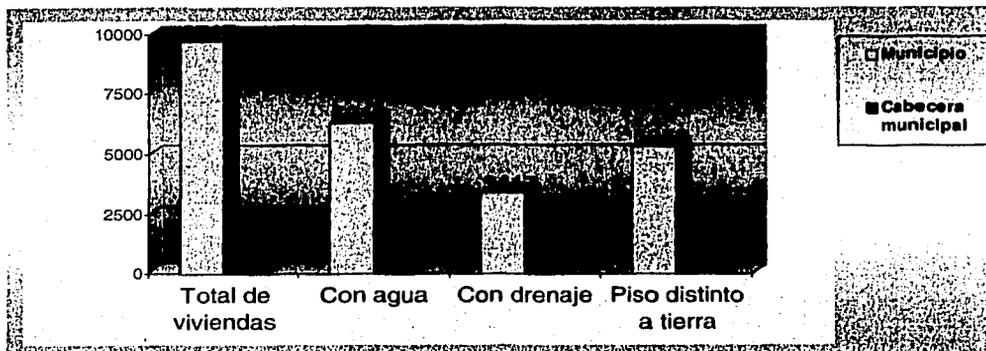


Figura 6.2 Gráfica comparativa de algunos servicios y bienes entre el municipio y la localidad de Zacapoaxtla

## 6.2 EQUIPAMIENTO URBANO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 6.2.1 Educación, infraestructura y salud.

El municipio de Zacapoaxtla cuenta con planteles que cubren todos los niveles educativos para una formación completa de los estudiantes. Desde primarias hasta el Tecnológico de Zacapoaxtla, lo que ha permitido el incremento en la media de años de educación escolar entre la población. Aun con lo anterior, el porcentaje de analfabetismo es alto (12.1%).

En cuanto a la infraestructura del municipio, cuenta con oficinas de correos (24) y de red telegráfica (1). La red de agua potable está repartida en todo el territorio, a pesar de lo cual no logra abastecer a toda la población; las fuentes del vital líquido son a través de pozos profundos (2) y, principalmente, de manantiales (39). En este rubro, las tomas de agua domiciliarias mostraron un incremento notable en los noventa, pasando de sólo 91 en el año de 1992 a 8,264 en 1998. Las sucursales bancarias suman 292, mismas que representan a 15 instituciones (INEGI, 2000). La red carretera que cruza el municipio es suficiente para enlazar con las entidades más cercanas, y sobresale la que une a Zaragoza con Cuetzalán y

recorre el municipio de sur a norte; la trama se complementa con caminos de terracería a Atalpan, El Molino, Jilotepec y Texocoyahuac entre otras localidades menores.

Los servicios de salud del municipio están representados por las instituciones del IMSS, ISSSTE e ISSSTEP, los cuales parecen insuficientes puesto que sólo el 17.4 % de la población tiene derecho a esta asistencia, número menor al de 1992 (INEGI, 2000), lo cual es resultado de contar sólo con 15 unidades médicas en operación y un número no disponible de personal en 1998 (INEGI, op. cit.). Lo anterior expone una fragilidad del sistema de salud municipal ante todo tipo de desastres.

### 6.3 VULNERABILIDAD

Tal como se mencionó en el segundo capítulo, la vulnerabilidad es la susceptibilidad o predisposición de un elemento (individuo, vivienda, población, etc.) a ser afectado por un fenómeno, proceso o calamidad, así como de sufrir una pérdida. Maskrey (1993) menciona que existen dos tipos primordiales de vulnerabilidad: la técnica y la social, cuya diferencia está marcada por la forma en que se cuantifica. Mientras la primera, que se refiere a pérdidas potenciales sobre los servicios y bienes materiales, implica una evaluación cuantitativa, la vulnerabilidad enfocada en base a los aspectos de la población, sólo puede estimarse de forma cualitativa.

Dentro de la vulnerabilidad que presenta la población, ésta se divide en dos tipos (Wilches en Maskrey): la población vulnerable *por origen*, es aquella que desde el momento en que erige sus asentamientos, observa condiciones poco favorecedoras ante peligros, y la población vulnerable *progresiva*, se caracteriza por aumentar o asumir condiciones no aptas para afrontar una calamidad negativa a la estructura social con el paso del tiempo, debido a diversas causas.

Para determinar la vulnerabilidad de una población frente a un acontecimiento natural es necesario reconocer ciertas características socioeconómicas, las cuales proporcionan las

herramientas para determinar el grado de vulnerabilidad que se requiere para establecer el nivel de riesgo.

Un punto importante en el análisis de la vulnerabilidad es entender a la población como un ente social que no puede estar regido por reglas, sino se deben adaptar cada caso las medidas apropiadas para reducir al máximo el impacto de los desastres. La Asociación Sociológica Internacional (Solway, 2000) emite una opinión que aclara éste punto:

*Todos los desastres son fallas en la parte de los sistemas humanos. En cada desastre, la infraestructura física y social falla al proteger a la población frente a condiciones que amenazan su buena aparición. En este momento, la infraestructura por si misma crea condiciones que resultan en un extenso trastorno social. Para reducir la vulnerabilidad de la población ante los desastres, los sistemas sociales y técnicos deben adaptarse a los cambios físicos y sociales del entorno.*

Para complementar la idea, la ONU define a un desastre como "un evento cuantificable en el tiempo y el espacio, en el cual una comunidad ve afectado su funcionamiento normal, con pérdidas de vidas y daños de magnitud en sus propiedades y servicios, que impiden el cumplimiento de las actividades esenciales y normales de la sociedad" (Romero, en Maskrey, 1993).

La determinación de la fuente del peligro al que está expuesta una población, en este caso procesos de remoción en masa, es sólo una parte de la recreación del escenario posible en caso de desastre. Para realizar una evaluación acertada de la vulnerabilidad de la población, misma que servirá como elemento ineludible a considerar para identificar las zonas de riesgo, es indispensable utilizar diversos componentes de la vulnerabilidad y establecer el peso de cada uno de ellos en la determinación final, dado que cada elemento influye de diferente manera en la forma en que responde la población.

La vulnerabilidad de los soportes físicos urbanos, esto es, sus posibilidades y límites para manejar y resistir fenómenos naturales, aparece como resultado de la conjunción de tres procesos simultáneos (Pérez-Guevara, 1996):

1. De las características de las fuerzas naturales: su magnitud y sus cualidades
2. Del estado de los soportes físicos (construcciones)
3. La naturaleza de las interrelaciones sociales que facilite u obstaculice la organización para la prevención.

La relación existente entre la vulnerabilidad y el riesgo estriba en que la primera es un concepto eminentemente social, por lo que al momento en que un fenómeno natural obtendrá la calificación de riesgo en el tiempo en que su ocurrencia se prevea o se presente sobre un espacio ocupado por una comunidad, y su magnitud en conjunto con el nivel de vulnerabilidad determinará el grado de riesgo de la población ante dicho fenómeno (Carmona, 1993).

### **6.3.1 Vulnerabilidad municipal**

Para determinar la vulnerabilidad del municipio de Zacapoaxtla se elaboró un índice en el que se incluyeron 12 variables de población y vivienda que reflejan el grado de susceptibilidad de las comunidades. Dichos datos fueron obtenidos de la información censal proporcionada por INEGI (2000).

Los índices se desarrollaron a partir de áreas geoestadísticas básicas, conocidas como AGEB's, elaborados por INEGI. Dichas áreas se caracterizan por estar delimitadas por rasgos naturales y culturales, permanentes e identificables, con una superficie al interior de los municipios del país.

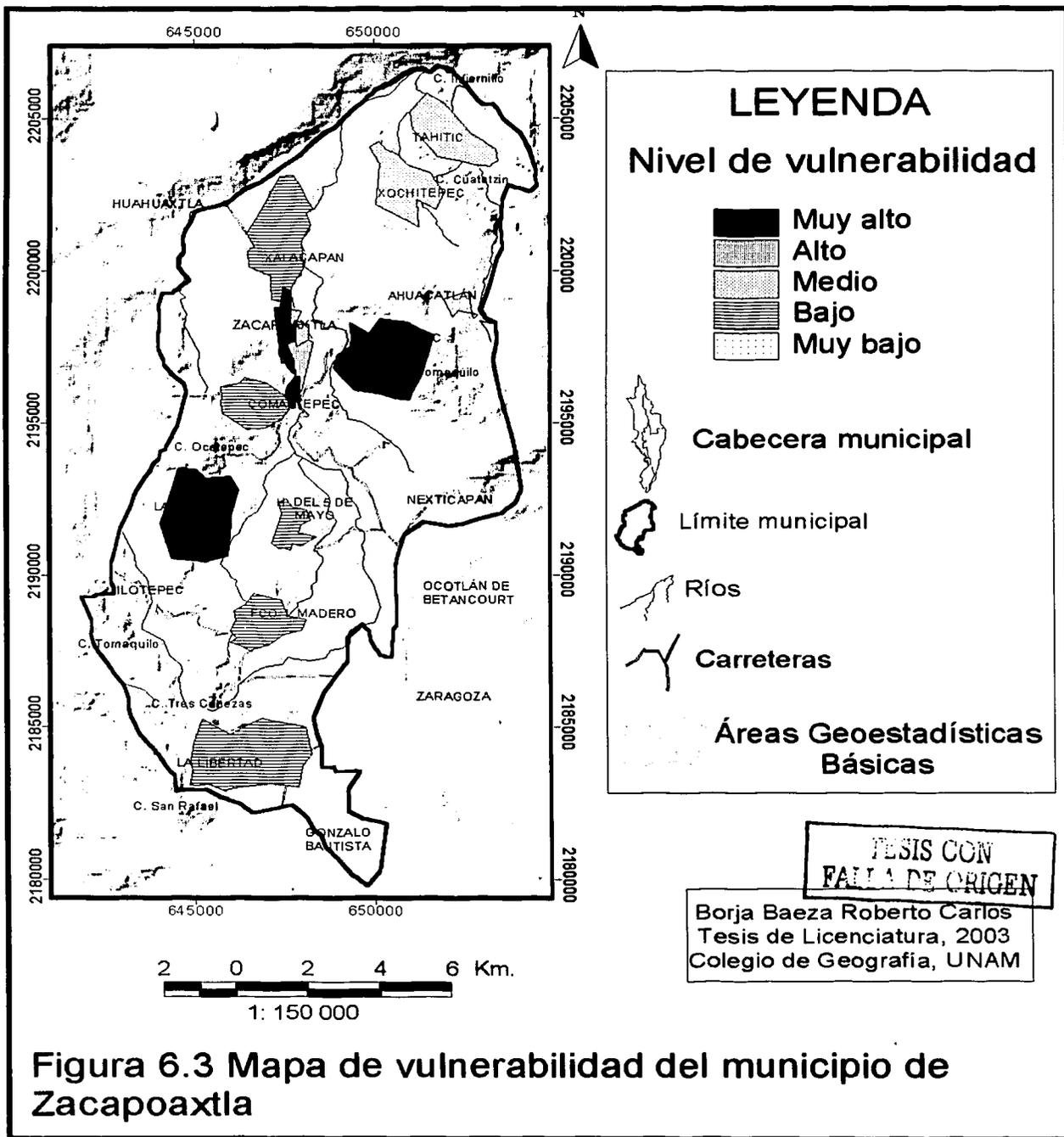
Los índices de vulnerabilidad se efectuaron tomando las 12 localidades más importantes de la entidad, constituidas por un total de 20 AGEBs.

Cuadro 6.1 Localidades analizadas para determinar la vulnerabilidad del municipio de Zacapoaxtla (fuente: INEGI, 2000)

<b>LOCALIDAD</b>	<b>NUMERO DE AGEB's</b>	<b>POBLACION</b>
<b>Ahuacatlán</b>	2	2,037
<b>Comaltepec</b>	2	2,646
<b>Fco. I. Madero</b>	2	921
<b>H. del 5 de mayo</b>	1	702
<b>La libertad</b>	2	2,694
<b>Las lomas</b>	1	2,897
<b>Sn. Fco. Zacapexpan</b>	1	1,796
<b>Sn. J. Tahitic</b>	1	2,337
<b>Tatoxcac</b>	1	4,016
<b>Xalacapan</b>	2	3,678
<b>Xochiltepec</b>	1	1,455
<b>Zacapoaxtla</b>	4	8,062

Una vez definidas las variables e identificados las AGEBs, se efectuaron los cálculos correspondientes en los programas SPSS y Excel.

Las variables utilizadas se concentran en dos grupos principales: la población y la vivienda, éstas son enlistadas a continuación:



Cuadro 6.2 Variables utilizadas para la determinación de la vulnerabilidad del municipio de Zacapoaxtla

Población menor de 14 años	2517
Población mayor de 15 años sin instrucción	388
Población de 15 años o más con primaria incompleta	640
Población económicamente inactiva	2767
Población que recibe menos de 1 salario mínimo	549
Población que recibe de 1 a 2 salarios mínimos	797
Viviendas con techos ligeros, naturales y precarios	783
Viviendas con paredes ligeras, naturales y precarias	786
Viviendas sin drenaje, electricidad y agua	6
Viviendas sin drenaje	86
Población con alguna discapacidad	78
Población no derechohabiente a servicios de salud	5235

\* La edad de la gente establece su fragilidad física y su capacidad de reacción, por lo que los niños y es el grupo más débil.

\* La población con niveles de educación bajos puede asimilar de manera clara las medidas de prevención, además de que sus condiciones económicas tienden a ser precarias, y generalmente se establecen en terrenos poco favorables ante las características del medio físico.

\* La población inactiva, sin trabajo, que percibe ingresos bajos o con alguna discapacidad, condiciona que sus recursos para afrontar y asimilar un desastre sean menores.

✱ En los casos que la población no es derechohabiente, no cuenta con el respaldo de la estructura de salud para las medidas básicas de prevención e incluso para el apoyo en caso de ocurrencia de procesos que les afecten de manera particular.

✱ Las viviendas construidas con materiales ligeros son susceptibles a sufrir daños aun con procesos de baja magnitud. Asimismo, representan un nivel económico de precario a bajo, situación descrita en el inciso anterior. Por otro lado, algunas de estas construcciones se asientan en zonas donde la inestabilidad del terreno es frecuente, preferentemente en laderas de barrancos.

✱ Por último, las viviendas que no cuentan con los servicios básicos evidencian dos situaciones principales: que en un alto porcentaje se ubican en puntos en que los servicios no pueden ser proporcionados por encontrarse en terrenos no regulados, o bien, no presentan condiciones aptas para establecer dichos servicios.

Las viviendas son susceptibles a procesos de ladera; además, cuando no se cuenta con un drenaje adecuado, los desechos son conducidos hacia fosas, o en el peor de los casos, simplemente fuera de la vivienda, lo cual contribuye a aumentar la concentración de humedad en el subsuelo. Lo anterior incrementa la posibilidad de movimientos en el terreno, tal como se explica en el capítulo cinco.

Es importante hacer notar que los resultados indican un aspecto general de la población y que existen las excepciones o casos opuestos a la tendencia. Los valores de vulnerabilidad obtenidos se clasificaron en 5 niveles principales:

- ◆ *Vulnerabilidad muy baja*, se caracteriza por presentar niveles de adecuados a óptimos en la mayoría de las variables utilizadas para establecer el parámetro de vulnerabilidad. La situación que guarda la población de estas zonas, de manera general, le permite afrontar las consecuencias que pueda ocasionar un desastre. La población tiene un nivel de educación de medio a alto, cuenta con empleo y economía solvente, lo que se relaciona con viviendas bien estructuradas. La

comunidad más favorecida en éste aspecto es Ahuacatlán en todo su territorio y una pequeña porción al suroeste de la localidad de Zacapoaxtla.

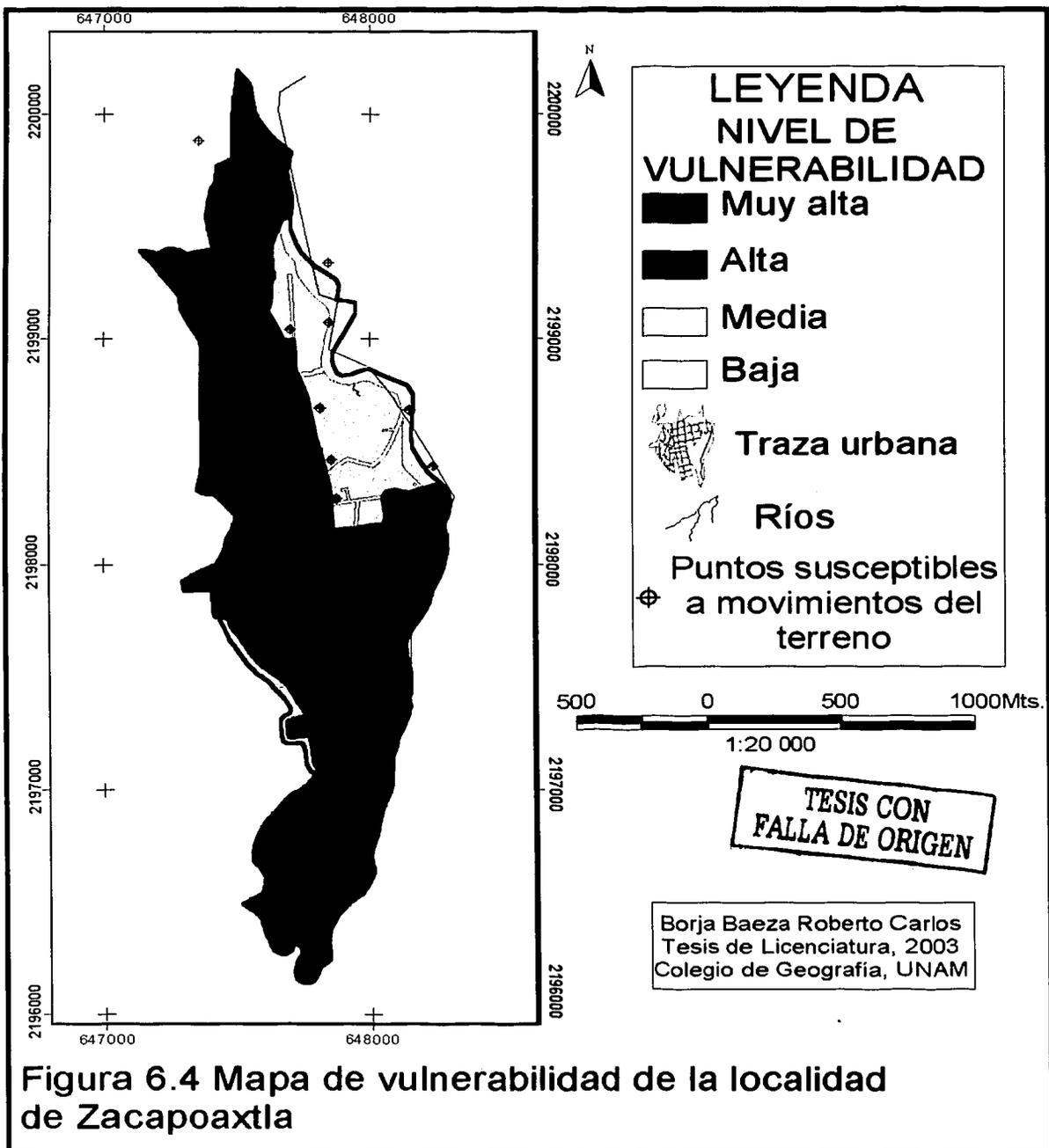
- ◆ *Vulnerabilidad baja*, que presenta condiciones de la sociedad, vivienda y estructura de servicios básicos que le favorecen ante situaciones de calamidad por fenómenos naturales. La población muestra capacidad receptiva de planes de protección civil, economía para reestablecer, en un lapso de corto a mediano plazo, condiciones previas en caso de afectación de viviendas, que si bien no son inmunes a grandes procesos, sí pueden afrontar pequeñas contrariedades, como tormentas, inundaciones y procesos de ladera menores, por mencionar algunos. Las localidades que muestran estos valores aceptables son Comaltepec, La Libertad, Fco. I. Madero, Héroes del Cinco de Mayo, Xalacapan y el noreste de Zacapoaxtla.
- ◆ *Vulnerabilidad media*, que presenta los valores intermedios de la estructura social, lo que resulta en ciertas dificultades de la población para asimilar los estragos de un siniestro ocasionado por un fenómeno natural. Ante la presencia de procesos de ladera, y de otros más, su capacidad de reacción es más lenta y el tiempo de recuperación mayor. Las regiones de Xochitepec, San Juan Tahitic y San Francisco Zacapexpan reúnen condiciones para clasificarlos en este rango.
- ◆ *Vulnerabilidad alta*, con contexto que pone en evidencia carencias notables en la estructura social y económica para afrontar situaciones críticas, los habitantes de éstas zonas precisan de largos períodos y ayuda para solventar sus necesidades básicas, posterior a la ocurrencia de una contrariedad por fenómenos físicos, y también económicos, aun cuando éstos no sean de gran magnitud. La zona sureste de la localidad de Zacapoaxtla es la única dentro de éste rango. Sin embargo, las poblaciones de rango medio en ésta escala se acercan más a éste nivel que los grados de baja vulnerabilidad.
- ◆ *Vulnerabilidad muy alta*, en donde la población presenta los niveles más bajos de bienestar, educación y servicios básicos. Requieren de ayuda externa no sólo para

recuperar su situación previa a un desastre, sino para establecer condiciones que le permitan reactivar su precaria economía. La restauración de la actividad cotidiana toma años en recuperarse, por la baja capacidad de absorción de capital por parte de las familias. Los planes de prevención necesitan de una especial atención en estas zonas. Las Lomas, Tatoxcac y la parte oriental de la localidad de Zacapoaxtla muestran ésta característica, que por sí misma precisa opciones para la población.

A primera vista, el mapa de vulnerabilidad del municipio de Zacapoaxtla (Figura 6.3) podría prestarse a confusiones, ya que presenta valores bajos como los más abundantes. Es importante mencionar que en ésta evaluación no fue posible incorporar las localidades pequeñas debido principalmente a la falta de datos relacionados con las variables utilizadas. De acuerdo con algunos datos del INEGI disponibles, dichas localidades muestran una tendencia a la alta vulnerabilidad, por lo que es importante considerarlas de manera particular.

### **6.3.2 Vulnerabilidad de la localidad de Zacapoaxtla**

Si bien la localidad de Zacapoaxtla muestra grados de vulnerabilidad propios a nivel municipal, con el propósito de elaborar un mapa de riesgos más preciso, se realizó el cálculo de la vulnerabilidad de esta entidad de manera particular, considerando la relación que existe de los 4 AGEBS que conforma dicha comunidad. Asimismo, al contar con un número mayor de variables, se incorporaron 3 factores adicionales para obtener un resultado más preciso. Población mayor de 60 años, población desocupada y viviendas con drenaje a fosa séptica son los elementos que, junto a los mencionados a nivel municipal, representan una aproximación de la vulnerabilidad de la localidad que se consideraron para determinar ésta evaluación. La fuente de información y la metodología para obtener los valores son similares a lo expuesto previamente. La figura 6.4 muestra el mapa de la vulnerabilidad local de Zacapoaxtla.



**Figura 6.4 Mapa de vulnerabilidad de la localidad de Zacapoaxtla**

## 6.4 MAPAS DE RIESGO

Como hemos visto, los riesgos naturales derivan de la convivencia entre la actividad humana y los procesos geomorfológicos activos, de lo que resulta la necesidad de plasmar recomendaciones y delimitaciones de las zonas de riesgo a través de documentos cartográficos que permitan su lectura y comprensión, con la cualidad de mostrar la capacidad de territorio de asumir los procesos del mapa en cuestión y deslindar zonas aptas para la actividad social. De acuerdo con Cendrero (1987) deben de proporcionar los datos necesarios para establecer los lineamientos de prevención, facilitar la emisión de medidas correctivas, servir de base para establecer sistemas de alerta y diseñar planes de protección civil propios del lugar.

La valoración de la susceptibilidad a los movimientos en masa y la ubicación de las zonas inestables en potencia, se basa en la información que proporcionan los mapas de pendientes, el mapa morfogenético, la litología, los antecedentes históricos y las características sociales, como nivel económico, vivienda y demografía, principalmente (Centeno, 1994)

En la literatura especializada en la determinación de zonas de riesgo por deslizamientos, se han propuesto una extensa gama de métodos para determinar las áreas de peligro. Éstos se pueden dividir en dos principales grupos: mapas de peligro directo y mapas de peligro indirecto. En el primer caso, las áreas susceptibles son determinadas por expertos geomorfológicos, que basan sus resultados en la experiencia y el conocimiento del terreno. En los mapas de peligro indirecto, el grado de peligro se deduce a partir del uso de modelos determinísticos y/o probabilísticos para detectar áreas potenciales de movimiento, cuya base es la información resultante de la interacción de los factores del paisaje y la distribución de deslizamientos conocidos (Van Westen, 1999).

Los mapas de riesgo de movimientos de ladera no están exentos de faltas en su precisión, puesto que pueden determinar la potencialidad de ocurrencia de un fenómeno, y la localización con alto grado de certeza, además de sentar bases para crear escenarios, tanto

previos como posteriores a la ocurrencia de un movimiento, sin embargo, no es posible determinar con cierto nivel de puntualidad cuándo sucederán tales procesos (Maskrey, 1993).

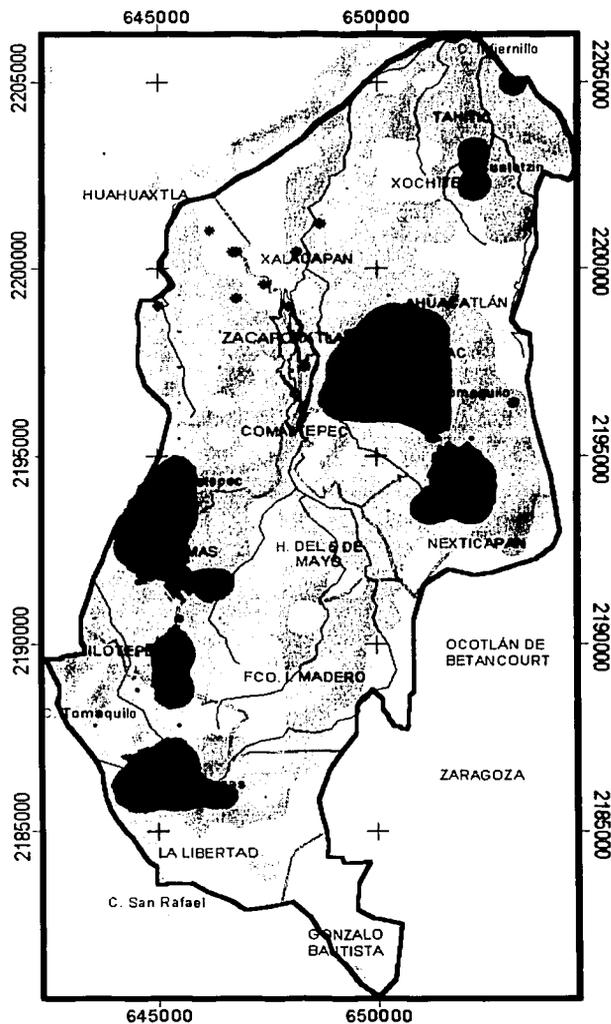
#### **6.4.1 Mapa de riesgo por deslizamientos municipal**

El mapa de peligros que resulta de los cálculos del índice de estabilidad utilizando SINMAP en la plataforma ArcView (ver capítulo 5) muestra las zonas susceptibles de deslizamientos de tipo traslacional, es decir, los más comunes e importantes en el municipio de Zacapoaxtla y en general en La Sierra Norte de Puebla. Dicho mapa fue combinado con el mapa de vulnerabilidad para obtener el mapa de riesgo municipal. Los datos obtenidos del mapa de riesgos fueron interpolados con la finalidad de generar áreas reconocibles y facilitar su interpretación sin alterar su exactitud.

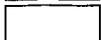
Con el fin de crear zonas lo más homogéneas posible para el mapa de riesgo, la resolución del píxel utilizada es de 100x100 metros para el mapa municipal, mientras que el referente a la localidad de Zacapoaxtla es de 20x20 metros. Además, los límites entre las regiones tienen un grado de incertidumbre inherente a éstas zonas de transición (Figura 6.5). El mapa de riesgo muestra 4 rangos. Antes de analizar el mapa de riesgos por deslizamientos del municipio de Zacapoaxtla, es importante comentar que los rangos de riesgo, están conformados a su vez por niveles de vulnerabilidad comparativos aplicados localmente. Lo anterior se refiere a que a una escala de análisis diferente, por ejemplo estatal, es muy posible que la vulnerabilidad municipal fuera de baja a media, hecho que cambiaría los rangos de riesgo expuestos en el mapa.

#### **RIESGO MUY ALTO**

Las zonas de riesgo muy alto se caracterizan por contar con las condiciones topográficas, litología y relieve más favorables para la ocurrencia de procesos de remoción en masa, además de una alta vulnerabilidad de la población para afrontar dificultades por la acción de fenómenos naturales. Son las áreas que requieren de una atención especial, no sólo para



## LEYENDA Nivel de riesgo

-  Muy alto
-  Alto
-  Medio
-  Bajo

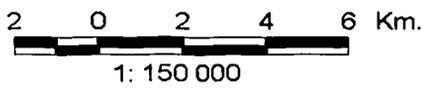
 Cabecera municipal

 Límite municipal

 Carreteras

 Ríos

**\* Procesos de remoción en masa registrados por SEPROCI en 1999**



Borja Baeza Roberto Carlos  
Tesis de Licenciatura, 2003  
Colegio de Geografía, UNAM

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Figura 6.5 Mapa de riesgo por deslizamientos en el municipio de Zacapoaxtla

su planeación futura, sino para su atención en corto tiempo, con el propósito de disminuir el nivel de riesgo.

Las zonas con riesgo muy alto del municipio corresponden a las localidades de Tatoxcac y Las Lomas, además de algunas zonas en las montañas altas de calizas al poniente, cerca de los cerros Tres Cabezas y Ocoatepec. Las comunidades presentan litología de calizas y pendiente de 10° a 20°, factores que condicionan su grado de riesgo. Ambas localidades presentan un nivel de vulnerabilidad muy alto, situación que complementa los factores de riesgo.

Al norte de Nexticapan, se localiza otra área de riesgo muy alto, condicionado principalmente por factores físicos, montañas de rocas sedimentarias muy erosionables, dado que la vulnerabilidad en la zona es de nivel medio.

## **RIESGO ALTO**

Con una combinación de vulnerabilidad alta y con posibilidades potenciales de ocurrencia de procesos de ladera frecuentes, las zonas de alto riesgo generalmente rodean las áreas de riesgo muy alto. Las zonas de premontañas y de laderas de flujos piroclásticos coinciden en alto grado con el nivel de riesgo alto. Se presenta riesgo alto en el oriente de San Juan Tahitic y Xochitepec, cerca del cerro Tepetzintan, entre los ríos Ochiateno y Culcuahualco. A la orilla de Las Lomas y Tatoxcac se presenta una franja de transición al riesgo medio. Asimismo, entre los cerros Tomaquilo y Tres Cabezas existen puntos de alto riesgo, influenciados por el río Chichilaco, dado que la erosión fluvial de la zona es intensa, con algunas laderas con pendientes de 30° a 40°. En ésta zona no existen asentamientos importantes, y los factores físicos condicionan en su totalidad el riesgo de algunos puntos aislados de Ixtacapa y Jilotepec. La parte suroriental de la cabecera municipal se encuentra en este nivel de riesgo, determinado por la vulnerabilidad local.

## **RIESGO MEDIO**

El riesgo medio mantiene un equilibrio de los elementos del mismo, vulnerabilidad y peligro con valores medios o cercanos a la media. En el caso del municipio de Zacapoaxtla, son zonas potencialmente riesgosas, pero los niveles de vulnerabilidad son de medio a bajo.

Al este de la cabecera municipal, se presenta una zona en donde prevalece el riesgo medio sobre el bajo, en algunas áreas de las localidades de Comaltepec y Xaltipac. Las calizas de la premontaña y laderas de 15° a 30° son condicionantes del peligro medio del área. La vulnerabilidad baja de Comaltepec determina el riesgo medio de la zona.

Las localidades de Francisco I. Madero, Héroes del Cinco de Mayo y Xalacapan también presentan un nivel de riesgo medio. El nivel de baja vulnerabilidad que caracteriza a estas localidades es el factor determinante en la evaluación del riesgo de estas entidades. Otro factor común de tales localidades es la pendiente, de 0° a 10° como máximo, lo que estabiliza en alto grado las laderas, y en general el terreno de dichas zonas.

Algunos de los procesos de remoción en masa registrados por la Secretaría de Protección Civil de Puebla (SEPROCI) en 1999 se presentaron en las zonas de riesgo medio. Lo anterior condicionado por la cercanía a los ríos Tepetitlán y Papaloateno, además de presentarse en la rampa piroclástica, compuesta de ignimbrita del Cuaternario, con origen en la Caldera de los Humeros.

## **RIESGO BAJO**

Este nivel de riesgo es el dominante en el municipio, hecho que se explica por los espacios deshabitados a lo largo de la entidad, más que por condiciones de vulnerabilidad baja o aspectos físicos que favorezcan la estabilidad del terreno.

Las comunidades de Ahuacatlán, y Xochitepec al norte del municipio muestran valores de riesgo bajo, puesto que su nivel de vulnerabilidad es de medio a muy bajo, al ubicarse en material antiguo de origen volcánico (Plioceno) y con pendientes no mayores a  $10^{\circ}$ , son factores determinantes en la estabilidad del terreno y en el nivel de riesgo bajo.

Las localidades de La Libertad y Gonzalo Bautista la sur, se encuentran en áreas de riesgo bajo, principalmente por la pendiente que no supera los  $10^{\circ}$  y la ausencia de cauces que favorezcan la erosión en laderas y la ausencia de grandes elevaciones. En algunas partes de Comaltepec, que presenta un nivel de vulnerabilidad bajo, se presentan de pendiente no mayor a  $5^{\circ}$ , lo que estabiliza el terreno, condiciones que favorecen un nivel de riesgo bajo.

El análisis del riesgo por deslizamientos en el municipio de Zacapoaxtla, considerando los aspectos socioeconómicos generales, la geología y la geomorfología que presentan condiciones que favorecen el riesgo por procesos de remoción en masa, y otros fenómenos naturales, no se considera el nivel de riesgo muy bajo a nulo en la clasificación.

#### **6.4.2 Mapa de riesgo por deslizamientos de la localidad de Zacapoaxtla**

En este mapa se incluyeron puntos susceptibles a movimientos del terreno, mismos que fueron determinados en recorridos por la zona urbana y que se localizan, en su mayoría, cerca o adjuntos a calles, por lo que, independientemente de los resultados arrojados por el cálculo del *software*, requieren de una atención especial (Figura 6.6).

Para la determinación de las zonas de riesgo por deslizamientos de la cabecera municipal se utilizó el modelo digital de elevación con una resolución de 20 x 20 metros, con la finalidad de obtener mayor fidelidad en los resultados, dado que disminuye el área en relación al mapa de riesgos municipal. Asimismo, el índice de vulnerabilidad calculado es independiente del empleado para toda la entidad, lo que le confiere una validez sólo para la localidad de Zacapoaxtla, aun cuando los valores son parecidos en ambos casos.

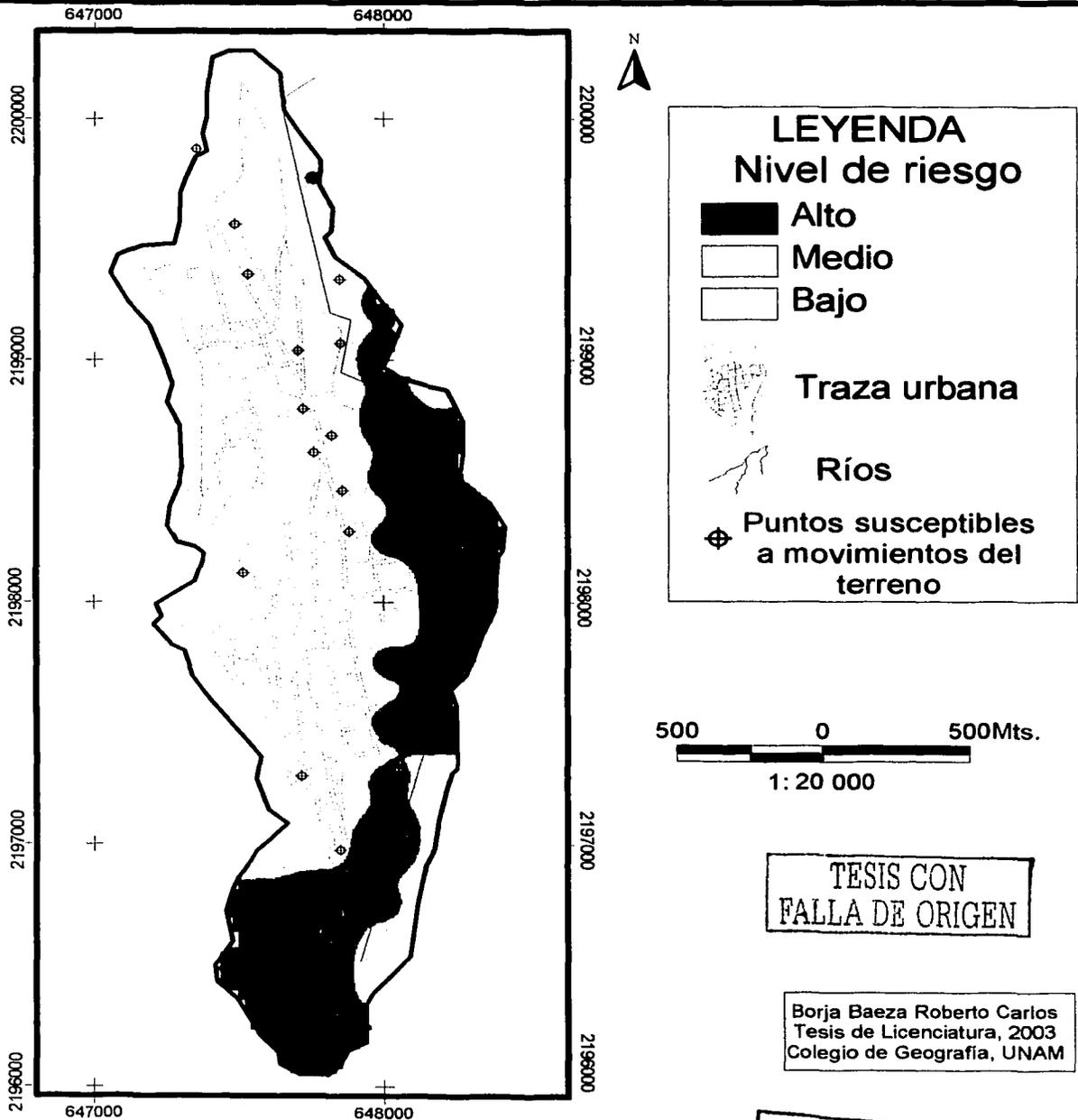


Figura 6.5 Mapa de riesgo por deslizamientos de la localidad de Zacateaxtla

Los rangos de riesgo por deslizamientos de la cabecera municipal son:

*Alto* representa área de riesgo, principalmente a las orillas de la zona urbana, cerca del camino a Zapopan y al sur de la localidad cerca del terrapié oriental y al río Tepic. Figuras 6.7, 6.8 y 6.9.

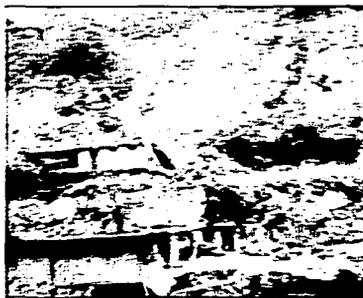
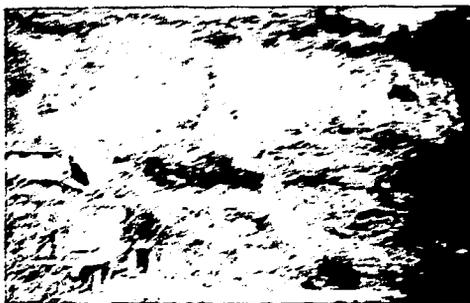


Figura 6.7 Ladera a gran inclinación por procesos de ladera en 1999 a la orilla del terrapié oriental en la zona con niveles de riesgo alto. El movimiento es complejo, probablemente con un *slump* rotacional e deslizamiento, resultado del corte de carretera en la parte alta, y de la erosión de la parte baja de la ladera por el río Tepic. La construcción de la vivienda y la agricultura *subsisten* como cumplimiento de la inestabilidad de esta ladera.



Figura 6.8 Corte vertical al poniente de la localidad, en cuya cabecera se asientan viviendas. El índice de estabilidad muestra dicha pared como de alto peligro, debido a la pendiente. Sin embargo, el material es resistente y sólo se observan en campo algunos desprendimientos menores. En la parte baja se encuentran acumulaciones de material removido por caída libre (detritos). En la terraza fluvial se observan bloques, probablemente desprendidos de la misma ladera.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Figura 6.9 Imágenes de la unidad habitacional La Concordia, zona de riesgo alto a deslizamientos. En la imagen se observa parte del muro de contención, construido en el circo de erosión, el cual presenta fracturas por el avance del circo, resultado de la erosión en la base de la ladera. Al fondo se observa un pequeño abanico de acumulación, lo que confirma que el material, compuesto por tobas, se encuentra poco consolidado. Las laderas muestran una pendiente de hasta  $60^\circ$ , en las cuales se descargan el desagüe de la unidad en la parte alta, al tiempo que existen pequeños sembradíos, factores que facilitan la inestabilidad de la ladera y el crecimiento del barranco. Aún cuando la vulnerabilidad no es alta, el riesgo es evidente, por lo que se le confiere un nivel alto.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Medio**, que muestra áreas de riesgo a lo largo de toda la zona urbana. La zona norte y centro-este se ubica en este rango de riesgo, al igual que el un área al noroeste, rodeando a la plaza principal. Así mismo, al sur de la localidad, por la salida a Zaragoza los valores son de riesgo medio. La influencia de los ríos periféricos a la localidad se presenta en estas zonas, principalmente el Texpilco. Los barrancos al poniente de la cabecera municipal condicionan el grado de riesgo en la avenida 5 de febrero, camino a Cuetzalan. (Figuras 6.10 y 6.11).



Figura 6.10 Zona que muestra rasgos de movimientos de ladera antiguos, con tendencia a reactivarse por la reptación que se observa. En el mapa de riesgo se localiza en la zona de riesgo medio, al oeste de la cabecera municipal.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 6.11 Imagen superior de la zona de riesgo medio al oriente de localidad de Zacapoaxtla. Aquí se observan campos de cultivo, que desestabilizan la ladera en su parte baja, así como las viviendas e incluso una escuela, las cuales se encuentran bajo el riesgo de procesos de remoción en masa, posiblemente un deslizamiento, debido a muestras de movimientos anteriores. En la ladera al fondo, después del río Texpilco se distinguen algunas costras dejadas por flujos recientes. La litología es principalmente de calizas cubiertas por tobas.

**Bajo**, grado que se presenta al centro y este de la localidad, abarcando la plaza principal y las manzanas que le rodean, principalmente hacia el sur. Pendientes de 4° a 8° como máximo y favorecen la estabilidad del terreno. Algunas zonas de la traza urbana central presentan riesgo medio, por la influencia de su alta vulnerabilidad, aun cuando las características topográficas no favorecen la presencia de deslizamientos.



Figura 6.12 en la imagen se distingue el cuerpo de un movimiento avanzado de reptación, que puede convertirse en deslizamiento, a la orilla del libramiento oriente, cerca del río Texpilco. La zona es de nivel de riesgo medio a alto. Aquí el factor principal de inestabilidad de la ladera es la construcción de la carretera, y en menor grado la deforestación del área.

Es importante mencionar que la escala del píxel, que abarca áreas de 20 m por 20 m, condiciona la exactitud en los resultados, por lo que en el mapa se incluyen algunos puntos susceptibles a movimientos del terreno, y por ello de riesgo, determinado en recorridos de campo.

TESIS CON:  
FALLA DE O!

## 6.5 MITIGACION DEL RIESGO

Con algunas excepciones, es poco factible evadir un peligro natural, pero el nivel de impacto en un área urbana se puede controlar. Lograr un nivel aceptable para la mitigación requiere colocar los elementos necesarios para la preparación de la comunidad, lo que minimiza los costos económicos, sociales y psicológicos de la población.

La evaluación debe hacerse rápidamente, para identificar prioridades en orden respecto a las acciones futuras. Utilizando fuentes existentes de información y con la cooperación de los líderes de los mayores sectores de la infraestructura urbana deben de ser identificados los parámetros siguientes:

- La naturaleza de los peligros potenciales, predecir su frecuencia, intensidad y duración.
- Las áreas urbanas que puedan ser más vulnerables incluyendo áreas fuera de la zona que pudieran afectar, por ejemplo, líneas de conexión eléctrica.
- Los sectores económicos de la comunidad y los componentes de la infraestructura más vulnerables.
- La estimación de pérdida asociada a peligros de distinta magnitud.

Posterior a la evaluación del riesgo y las pérdidas potenciales, es conveniente establecer el rango de posibles acciones para mitigar el riesgo, junto con la estimación de los costos y beneficios de estas acciones. La mitigación puede ser implementada en una o más maneras con diferentes objetivos, por ejemplo (Solway, 1995):

- *Medidas preventivas*, en donde se pretende minimizar el daño psicológico creado por el evento.
- *Diseminar el riesgo*, encaminado a reducir los efectos del daño físico al asegurar un rango de alternativas de salida
- *Diseminar la responsabilidad*, destinado a establecer más de una autoridad responsable.
- *Cubrir o minimizar el impacto*, aquí se pretende manejar los daños potenciales.
- *Manejo de planes de desastre*, donde se pretende como sea posible, manejar de manera amplia los programas de prevención.

La mitigación no sólo se refiere al fortalecimiento de la infraestructura física, a la retroalimentación inmediata, o la reconstrucción de toda la ciudad; la mitigación está en

**función de las acciones después de un desastre; la comunidad, incluidas la educación, la conciencia pública, la investigación, planeación, el diseño y las actividades de la población.**

## ANEXO AL CAPÍTULO SEIS

La elección de un lugar adecuado para establecer la vivienda y evitar en lo posible los procesos de ladera, principalmente cuando se trata de relieve montañoso, debe considerar, entre otras, las siguientes recomendaciones (Pérez-Guevara, 1996):

- Observar si hay evidencias de antecedentes de derrumbes en el área
- Observar si hay ojos de agua en el área
- Notar si varios de los árboles en las laderas se inclinan o se curvan
- Estar alerta ante largos períodos de lluvias y tomar nota si estas lluvias son intensas
- Solicitar asesoramiento de personal capacitado

En México, con la finalidad de no afectar la estabilidad de una ladera, el CENAPRED (Alcántara y Echevarría, 2000) recomienda:

1. No cortar los árboles ni destruir la vegetación en la región.
2. No excavar en las laderas y evitar excavar al pie de las mismas.
3. No permitir que el agua de los drenajes se infiltre en el terreno.
4. Estar atento a las indicaciones de las autoridades de Protección Civil de la comunidad, principalmente en temporada de lluvias.
5. Revisar constantemente las paredes, pisos y techos en busca de posibles grietas, hundimientos, expansiones del terreno y formación de escalonamientos. En caso de localizarlos avisar a Protección Civil.
6. Estar alerta sobre la inclinación de postes y árboles en las laderas.
7. Antes de iniciar alguna construcción o hacer una excavación o instalación consultar a las autoridades de Protección Civil.
8. En caso de encontrar alguna grieta en la superficie del terreno, sobre la ladera en que se habite, en la parte superior del cerro o al pie de éste, avisar de inmediato a las autoridades de Protección Civil de la localidad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Además es recomendable:

- En las laderas utilizadas para cultivos, los surcos deben construirse contrarios a la dirección de la pendiente.
- Asegurar buenos sistemas de drenaje para el desalojo rápido de las aguas superficiales

Es importante también observar algunos rasgos que se presentan previos a la ocurrencia de un deslizamiento, entre los cuales se pueden enumerar los siguientes (Pérez-Guevara, 1996)

- ❖ Se presentan manantiales, filtraciones o suelos saturados en áreas en que la humedad generalmente era baja o nula
- ❖ Se desarrollan grietas o, por el contrario, abultamientos en el terreno, sobre el pavimento, en las aceras, etc. Sin una razón visible o provocada
- ❖ Estructuras complementarias a una principal (por ejemplo, terrazas, marquesinas, portales, salientes, etc) que se muestran desplazados o inclinados con relación a la construcción principal, o bien, muestran con grietas marcadas sin motivo que las justifique
- ❖ Inclinación y/o agrietamiento de pisos y fundiciones de concreto
- ❖ Ruptura de estructuras conductoras de agua subterráneas
- ❖ Inclinación de postes telefónicos y/o eléctricos, árboles, muros de contención o cercas
- ❖ Cercas desalineadas
- ❖ Carreteras con hundimiento constante, con un inicio súbito
- ❖ Niveles de agua de arroyos con incremento rápido y agua turbia
- ❖ Los niveles del agua de arroyos descienden aún con lluvias
- ❖ Puertas y ventanas que cierran con dificultad y espacios entre los marcos

En caso de sospecha de la posibilidad de que ocurra un proceso de remoción inminente (por ejemplo ante una precipitación extraordinaria, sismo o vibración del terreno) se debe de evacuar el área de forma inmediata, de ser posible avisar a los vecinos que también

pudiesen ser afectados y acudir a las autoridades locales (bomberos, policía, protección civil, etc.) (Pérez-Guevara, 1996).

Si los deslizamientos ocurren de improviso, es poco lo que se puede proteger con efectividad, pero si se observan indicios antes de que se produzcan, se deben tomar las siguientes medidas:

- Retroceder ante lo peligroso del recorrido y buscar un sendero más seguro. De lo contrario, ubicarse en sitios donde los riesgos disminuyan
- Evite pasar o detenerse en lugares que podrían ser sepultados por materiales naturales u otros que se encuentren en montañas cercanas

En caso de que el deslizamiento suceda en el momento en que la persona está cerca de la pendiente, debe entonces evitar los ruidos o vibraciones del terreno, salir de cañadas o barrancos por donde pudiese dirigirse la masa en movimiento y acercarse a un lugar lo más seguro posible, como pueden ser laderas opuestas o separadas por una depresión u hondonada

Las observaciones citadas pueden ser consideradas como poco viables dada la rapidez con que llegan a presentarse los procesos de ladera, por lo que la prevención resulta la herramienta más eficaz para evitar daños ocasionados por dichos fenómenos.

Finalmente, en el hecho de conocer que tipo de eventos y en donde pueden ocurrir dentro de una región determinada, aun cuando no sea posible determinar cuando, radica su importancia, con lo cual se apoyan los planes de desarrollo y crecimiento de dicha región, de tal forma que el impacto de tales procesos se reduzca al mínimo posible.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CONCLUSIONES

1. La dinámica que dio origen a la zona de estudio, así como la que le controla en el presente facilitan la creación de escenarios de sucesos previos y sus características, al igual que permite recrear, con el manejo de variables, posibles condiciones futuras y sus resultados, en este caso particular los movimientos gravitacionales. Además, con la aplicación de *software* especializado se generan imágenes y mapas que complementan dichas proyecciones y facilitan su manejo, por ejemplo en los modelos digitales de elevación, los mapas de pendientes y los morfométricos.
2. El manejo de sistemas de información geográfica han demostrado su eficacia en diversas áreas del estudio de las ciencias de la Tierra y de otras disciplinas. Particularmente, los resultados arrojados por los programas *ArcView* y *SLOPE* fueron corroborados en campo y en fotografías aéreas, con resultados que permiten confiar en su precisión para el manejo de mapas de riesgo y en otras aplicaciones (plantación, regionalización, etc.). Asimismo, si se cuenta con los datos requeridos por el programa, el manejo de la extensión SINMAP del mismo es accesible y no requiere de conocimientos avanzados en computación, lo cual puede permitir en un futuro ampliar el uso de éste sistema para obtener índices de estabilidad en las regiones en que sea necesario.
3. El análisis de la vulnerabilidad de la población que se realizó para el municipio y la localidad de Zacapoaxtla, proporciona un peso específico a cada una de las variables, lo que ofrece un resultado cercano a la condición real de la sociedad. Sin embargo, las condiciones económicas de la población son las de mayor influencia, puesto que de la situación de éstas dependen otras, como el nivel de escolaridad y las características de la vivienda. Este tipo de estudio de la vulnerabilidad es indispensable para el análisis de los riesgos de cualquier fenómeno natural, en particular de los riesgos por deslizamientos. La vulnerabilidad de la población del municipio de Zacapoaxtla se encuentra en niveles medios. Es importante recalcar

que este análisis de vulnerabilidad fue en un ámbito municipal, y que puede variar al ampliar el área de estudio.

4. Las zonas de riesgo, tanto en el mapa municipal como en la localidad de Zacapoaxtla, van estrechamente ligados a la vulnerabilidad de la población, a las propiedades de los materiales y al relieve actual. Los resultados plasmados en el mapa de riesgo, permitirán su utilización en planes de prevención de desastres y mitigación del riesgo por deslizamientos, así como en la planeación de crecimiento de las poblaciones. Si bien los mapas no pueden indicar cuando ocurrirán los procesos, sí muestran en donde es mayor la posibilidad de que se presenten, y cuando las condiciones del entorno sean favorables la detonación de procesos de remoción en masa (por ejemplo, precipitaciones extraordinarias), lo que facilitará las medidas que la autoridad correspondiente decida aplicar.
5. El municipio de Zacapoaxtla se asienta sobre un relieve cuya susceptibilidad ante procesos de remoción en masa es evidente, lo que aunado a las condiciones de la población, que resultan en un alto grado de vulnerabilidad, evidencian un riesgo elevado, no sólo ante los procesos mencionados, sino también a otros fenómenos de origen meteorológicos principalmente. El reordenamiento urbano, el control en el crecimiento de la zona urbana e informar a la población de manera objetiva, sin generar falsos temores, es necesario en la cabecera municipal, principalmente en la periferia de la comunidad.
6. Si bien el presente trabajo cumple con su objetivo principal de elaborar una zonificación de riesgos por deslizamientos en el municipio de Zacapoaxtla, y aporta las bases físicas y teóricas para su elaboración, éste necesita actualizarse con frecuencia, por la variación de las condiciones sociales y el crecimiento poblacional. Asimismo, en las zonas de riesgo alto y muy alto, son necesarios estudios más específicos del tema.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

7. Por último, es importante mencionar que el trabajo aquí presentado es resultado de la integración de los aspectos teóricos de los procesos de remoción en masa y del manejo de modelos, del análisis de las condiciones físicas del relieve (geomorfología) y de los materiales que lo componen (geología-mecánica de suelos), junto con los aspectos sociales de la población (características socio-económicas y vulnerabilidad); todo ello fundamental para la evaluación del riesgo por deslizamientos, o por cualquier fenómeno natural.

## BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- Alcántara-Ayala, I. (1999). "¿Se cae o no se cae? Procesos de remoción en masa, avances y perspectivas". *Ciencia y Desarrollo*, Num. 146. Mayo-Junio, pp.25-31.
- (2000). "Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología." *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, Num. 41.
- Bromead, E. N. (1988) "Slope stability análisis package, user's manual". Inedito.
- Casale, R. & Margottini, C. (2000). "*Floods and landslides: Integrated Risk Assessment*" Springer, Berlin.
- Dikau R., Brunnsden, Schrott L. e Ibsen M. (1996). "*Landslide recognition: identification, movement and causes*". John Wiley & Sons edit, Baffins Lane.
- Garza, M. y Rodríguez, D. (Comp.) (1998). "*Los desastres en México, una perspectiva multidisciplinaria*" Universidad Iberoamericana, México.
- Graham A. y Burrell E. (1997). "*Natural hazards. Explanation and integration*". The Guilford Press, Londres.
- Gutiérrez-Puebla, J. (1994). "*SIG: Sistemas de información geográfica*" Síntesis, Madrid.
- Gutiérrez-Puebla & Rodríguez, V. (1992) "*Prácticas de técnicas cuantitativas en Geografía: I*" Oikos Tau, Barcelona.
- INEGI (2000). "*Cuaderno estadístico municipal de Zacapoaxtla*" Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- (1997). "*Perspectiva estadística de Puebla*" Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática, México.
- Lugo-Hubp, J. (1991). "*Elementos de geomorfología aplicada*", Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Lugo-Hubp, J. (1989). "*Diccionario geomorfológico*". Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Pack, R., Tarboton, D. y Goodwin, C. (2001). "Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP". Presented at the 15<sup>th</sup> annual GIS conference, February 19-22, Vancouver, British Columbia.
- Peña-Monné, J. L. edit. (1997). "*Cartografía geomorfológica básica y aplicada*". Geoforma ediciones, España.

Sagredo, J. (1986). "*Diccionario de geografía*". EDIPLESA, México.

Utah State University. "*SINMAP user's Manual*" Universidad Estatal de Utah.

## REFERENCIAS

Alcalde-Lancharro, E. (1998). "*Informática básica*". McGraw-Hill, Madrid, pp 178-190.

Alcántara-Ayala, I. (1997). "*Modelling mass movement risk under semi-arid mountainous conditions: The Alpujarride Complex, Spain*", Tesis de Doctorado, Universidad de Londres, pp. 370.

----- (1999). "The Torvizcón, Spain, landslide of February 1996: the role of lithology in a semi-arid climate". *Geofísica Internacional, Vol. 38, Num 3*, pp. 175-184.

----- (2000). "Índice de susceptibilidad a movimientos del terreno y su aplicación en una región semiárida". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 17, No. 1*, México, pp. 66-75.

Alcántara, I. y Echevarría, A. (2001). "*Cartilla de diagnóstico preliminar de inestabilidad de laderas*" Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. México. Pp 22-23

Alexander, D. (1993) "*Natural disasters*". Department of Geology & Geography, University of Massachusetts.

"*Atlas Nacional de Riesgos*" Secretaria de Gobernación. México, 1991.

Bitrán-Bitrán, D. (2000). "*Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana durante 1999*". Cuadernos de investigación Num. 50 Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México, pp 194-210.

Blaikie, P., Cannon, T. Davis, I. y Wisner, B. (1994). "*At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*." Routledge, London and New York, pp. 284.

Bolt, B. A. (1975). "*Geological hazards*". Springer-Verlag, pp148-197.

Bond, A. (1995). "*Hard Facts on software*". Ground Engineering, pp 14-16

Brunsdon, D. (1988). "Slope instability, planning and geomorphology in the United Kingdom." En: J.M. Hocke (ed.), *Geomorphology in Environmental Planning* Wiley, Chichester, pp: 105-119.

----- (1993). "Mass movement; the research frontier and beyond: a geological approach" *Geomorphology 7*, pp 85-128.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Brunsdon, D. y Prior D. (1984). "*Slope Instability*". John Wiley & Sons, pp. 620.
- Burby, R. (1991). "*Sharing enviromental risks*" Westview Press, Estados Unidos.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J. y Borselli, L. (2001). Mass movements in tropical volcanic terrains: the studied case of Teziutlán (México). Inedito
- Carrara, Alberto (1993). "*Geographical information systems in assessing natural hazards*" Kluwer academic publishers, Holanda, pp 135
- Cendrero, A. (1987). "Riesgos geológicos, ordenación del territorio y protección del medio ambiente" En *Riesgos Geológicos*, Ayala, F. J. (Compilador). Pp. 327-333.
- Centeno, J. D. (1994) "*Geomorfología práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental*" Rueda. pp. 66.
- Clerici, Aldo (2000). "Simulation of the Parma River blockage by the Corniglio landslide (Northern Italy)". *Geomorphology No. 33 pp 1-23*.
- Commons-de la Rosa, A. (1971). "*Geohistoria de las divisiones territoriales del Estado de Puebla*". Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-9.
- Congreso Geológico Internacional (1956). "*Estratigrafía y paleontología del Jurásico inferior y medio marino de la región central de la Sierra Madre Oriental*" Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, México.
- , (1956). "*Geología entre México, D. F. Y Huauchinango, Puebla, Campos petroleros de Poza Rica Veracruz y la faja de oro.*" Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, México.
- (1956). "*Estratigrafía del Cenozoico y del Mesozoico a lo largo de la carretera entre Reynosa, Tamaulipas y México D. F. Tectónica de la Sierra Madre Oriental. Vulcanismo en el Valle de México.*" Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, México.
- Córdova, C. (1988) "*Cartografía geomorfológica en escala pequeña del occidente de la República Mexicana*" Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Crozier, M. J. (1973). "Landslide: causes, consequences and environment" *Croom Helm*, Londres.
- (1993) "Management issues arising from landslides and related activity" *New Zealand geographer* 49, pp 7-35.
- Cruden, D. & Varnes, D (1996). "Landslides types and process", en Turner, A. K. et al (editor) *Landslides: investigation and mitigation, transportation research board, Special Report 247*, National Academy Press, Washington, pp 36-75.

Dai, F. C. (2002). "Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong". *Geomorphology No. 42*, pp 213-228, Holanda.

Derrau, M. (1983) "*Geomorfología*". Ariel, Barcelona. 517 pp.

EPOCH (European Community Programme; 1993). "Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community". *Flageollet, J.C. (ed.)*, 3 Volumes, Contract no. 90 0025.

Fantucci, R. (1995) "Reconstruction of landslides dynamic with dendrochronological methods". Pp 13-48.

Flamand-Rodríguez, C. L. (1995). "*Introducción a la mecánica de suelos*" Universidad Autónoma de Chapingo, México, pp. 177-194.

García-Romero, (1993). "*Análisis geomorfológico de la distribución de los riesgos naturales en la delegación Cuajimalpa de Morelos, Distrito Federal*". Tesis de Licenciatura, FFyL, UNAM, México, 110p.

Guadarrama-Salazar, G. (2001). "*Elaboración e interpretación de la carta geomorfológica escala 1: 50 000 de la hoja Tenango del valle*". Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca. Pp 80-94.

Guillén-Guerrero, M. A. (1996). "*Geomorfología de la vertiente occidental del volcán Iztaccihuatl*". Tesis de Licenciatura. FFyL, UNAM, México, pp180.

Gutiérrez-Valdez, M. A. (1989). "*Estudio geomorfológico y su relación con la conservación de los recursos naturales en el municipio de Xilotepec de Juárez, Estado de Puebla*". Tesis de licenciatura, F. F. y L., UNAM, México. pp 84.

Hernández-Madrigal, V. M. (2001). "*Caracterización y estudio de las arcillas y estudio geomorfológico del movimiento en masa de San Miguel del Monte, Michoacán, México*". Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

Hohl, P. (1997). "*GIS data conversión, strategies, techniques management*". Pat Hohl.

IAEG Commission on Landslides (1990). "Suggested nomenclature for landslides", *Bulletin International Association for Engineering Geology*, 41, pp. 13-16.

Instituto de Geografía, (1984). "*Datos de precipitación de Puebla*". Vol. 21.

Juárez-Badillo, E. & Rico Rodríguez, A. (1996). "*Mecánica de suelos*" Tomo I, Limusa, México, pp. 373-439.

Lavell, A. (comp.), (1994). "*Viviendo en riesgo: comunidades vulnerables y prevención de desastres en América Latina*". Tercer Mundo Editores. Colombia.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- López-Blanco, J. (1994). "Evaluaciones geomorfológicas y de recursos naturales aplicando un sistema de información geográfica (ILWIS)" Tesis de Doctorado, F. F. Y L., UNAM. México, pp222.
- López-Ramos, E. (1982). "Geología de México Tomo II" Secretaria de Educación Publica, México. pp 244-402.
- Lugo-Hubp, J. (1991). "Elementos de geomorfología aplicada (Métodos cartográficos)". Instituto de Geografía, UNAM, México, 109 p.
- Lugo-Hubp, J., García, T., Zamorano, J. y Salas, O. (1996). "Landslide in Meztlán (State of Hidalgo), México-causes and effects." *Geomorphology*. 103, pp. 323-343.
- Lugo-Hubp, J., Moshe, I. (2002) "Desastres naturales en América Latina" Fondo de Cultura Económica, México. pp 12
- Mandy Lineback, G. (2001). "Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payette River, Idaho". *Geomorphology No. 37*, pp 149-165, Holanda.
- Mark, D. M. (1988). "Networks models in geomorphology" en *Modelling in geomorphological systems*, Editado por M. G. Anderson, John Wiley, pp.73-97, Londres.
- Maskrey, A. (1993). "Los desastres no son naturales". La Red: Red de estudios sociales en prevención de desastres naturales en América Latina, Ed. Tercer Mundo, Colombia, pp. 61-74.
- Montgomery, d. R. y W. E. Dietrich, (1989). "Source areas, drainage density and channel initiation" *Water Resources Research*, 25, pp 1907-1918.
- Oropeza-Orozco, O., Zamorano Orozco, J. J. y Ortiz Pérez, M. A. (1998). "Peligros geomorfológicos en México: remoción en masa" en *Los desastres en México: una perspectiva multidisciplinaria*. Garza-Salinas edit. Universidad Iberoamericana, México, pp 286.
- Ortega-Gutiérrez, F. (1992). "Texto explicativo de la quinta edición de la carta geológica de la República Mexicana" Instituto de geología, UNAM. pp11-26
- Palacio-Prieto, J. L. (1991). "Evaluación geomorfológica estructural a través de modelos sombreados y pares estereostópicos generados a partir de modelos digitales del terreno" *Investigaciones geográficas No. 23 UNAM*, México, pp89-101.
- 1993). "Introducción al manejo del integrated Land and Water Information System (ILWIS 3.1)" Instituto de Geografía, UNAM, México, pp 42-48.

Panizza, M. (1987). "Geomorphological hazard assessment and the analysis of geomorphological risk", en V. Gardiner Editor, *International Geomorphology 1986, part 1*, pp 225-229.

Panizza, M. (1996), "*Environmental geomorphology*", in *Developments in Earth Surface Process Vol 4*, Elsevier, Holanda, pp 7-13.

Parise, M. (2001). "Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard". *Phys. Chem. Earth Vol 26, No. 9*, pp. 697-703.

Pasuto, A. (1999). "The use of landslide units in geomorphological mapping: an example in the Italian Dolomites". *Geomorphology No. 30*, Holanda, pp. 53-64.

Paul, S. K. (2000). "Catastrophic mass movement of 1998 monsoons at Malpa in Kali Valley, Kumaun Himalaya" *Geomorphology, No. 35 pp 169-180*.

Pedraza, J. (1996). "*Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*". Edit. Rueda. Madrid.

Pérez-Guevara, E. (1996). "*Manejo de cuencas. Una orientación hacia los países en desarrollo*". FAO, Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile pp. 90-102.

Pérez-Reynoso, J. (1978). "Geología y petrografía de la caldera de Los Húmeros." *GEOMIMET 91*, pp. 97-106.

Rosenfeld, C. (1994). "The geomorphological dimensions of natural disasters". *Geomorphology No. 10*, Holanda, pp. 27-36.

Salinas-Montes, A. (1994) "*Geomorfología de la sierra de Guadalupe y riesgos naturales*" Tesis de licenciatura, FFL, UNAM, México. pp 73-76.

Selby, M.J. (1993). "*Hillslope material and process*" *Oxford University Press* pp 45-82

Sharpe, C.F.S. (1938). "*Landslides and Related Phenomena.*" *Columbia Univ. Press*, New York, pp. 137.

Solway, L. (1995). "*Megacities-reducing vulnerability to natural disasters*" Thomas Telford Publications, Londres.

Sorriso-Valvo, M (1999). "Mass-movement, geologic structure and morphologic evolution of the Pizzotto-Greci slope (Calabria, Italy)". *Geomorphology No. 30*, Holanda, pp. 147-163.

Spiridonov, A. (1981) "*Principios de la metodología de las investigaciones de campo en el mapeo geomorfológico*" Tomo I, la Habana, Cuba. pp 225.

Tapia-Varela, G. (1999). "Geomorfología morfogenética de la vertiente tributaria oriental del ex-lago de Texcoco". Tesis de Licenciatura, FFyL, UNAM, México, pp 192-193.

Terzaghi, K. (1950). "Mechanism of landslides." *Geol. Soc. Am., Berkeley Volume*, pp. 83-123.

Tilling, R. (1989). "Los peligros volcánicos". *Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos*. Santa Fe, Nuevo México.

Van Westen, C. J. (1999). "Comparing Landslides hazard maps". *Natural Hazards No. 20 Kluwer Academic Publishers, Holanda*. Pp. 137-158.

Varnes, D. (1978). "Slope movements and types and processes. En *Landslides: Analysis and Control*." Transportation Res. Board Nat. Ac. Sci. Washington Spec. Rep. 176, pp. 11-33.

Vázquez, M., Lugo-Hubp, J., Matías, L. (2001). Heavy rainfall effects in México during early October 1999. E. Grunfest and Handmer (eds.) *Coping with Flash Floods*, 189-299.

Vázquez, M. (2001). "Cartografía geomorfológica de la zona comprendida en la hoja Ciudad Sahagun, escala 1: 50.000". Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. Distrito Federal, México.

Viniegra-Osorio, F. (1992). "Geología histórica de México". Facultad de ingeniería, UNAM, México. pp 94-105, 182-197.

WP/WLI, (1993). "A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 47, pp. 53-57

Yañez-García, C. y García-Durán, S. (1982). "Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz." Comisión Federal de Electricidad, 98 pp.

Zaruba, O. y Mencl, N. (1969). "Landslides and their control." Elsevier N. York/Academia, Praga, 205 pp.

## MESOGRAFÍA

Centro Nacional de Desarrollo Municipal, CEDEMUN. "Enciclopedia de los municipios de México tomo I

INEGI, (2001). "XII Censo General de población y Vivienda".

INEGI, (1998) "NIBA, Niveles de Bienestar por AGEB (Área Geoestadística Básica).

INEGI (1999). "Carta topográfica Teziutlán, E14B15, escala 1 :50 000".

INEGI (1999). "Carta topográfica Xonacatlán E14B25, escala 1:50 000".

INEGI (1984). "Carta geológica Veracruz, E14-2, escala 1: 250 000"

[www.el-universal.com.mx](http://www.el-universal.com.mx)

[www.oem.com.mx](http://www.oem.com.mx)

<http://moose.cee.usu.edu/sinmap/sinmap.htm>

<http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishydro99/uwrl/sinmap.htm>

[http://www.engineering.usu.edu/dtarb/.](http://www.engineering.usu.edu/dtarb/)

<http://www.landslides.usgs.gov>

<http://www.rsr.org>

<http://www.wrds.uwyo.edu>

[www.c~com.net](http://www.c~com.net)

[www.maximus.ce.washington.edu](http://www.maximus.ce.washington.edu)

[www.sol-solution.com](http://www.sol-solution.com)

