



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS DE LADERAS EN LA SIERRA MADRE ORIENTAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL EN
LA ESPECIALIDAD DE GEOTECNIA
P R E S E N T A:

SUÁREZ GARCÍA OFELIA GABRIELA



TUTOR:
SALVADOR MARÍN CÓRDOVA

MÉXICO, D. F.

FEBRERO

2006

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer infinitamente,

A la **UNAM** que me ha brindado la oportunidad de crecer como persona y profesionalista.

A **CONACYT** por el apoyo de beca brindado para la realización de mis estudios de maestría.

A mi **tutor y jurado**: Dr. Salvador Marín, Dr. Juárez Badillo, Dr. J. Abraham Díaz R., Dr. Rigoberto Rivera y al Dr. J. Eduardo Aguayo, por darme la orientación necesaria para concretar mis estudios de posgrado.

A mi profesor, colega y amigo, **Dr. Salvador Marín C.**, por todo el apoyo que incondicionalmente me ha brindado durante esta importante etapa de mi superación.

A las personas que conforman la Coordinación de Ingeniería Molecular del Instituto Mexicano del Petróleo porque me han brindado cariño, amistad, además de gratos momentos (Dra. Luci, Joel, Doc. Palacios, Marcela, Dr. Florentino, Rosi, Marcelina y todos los que me faltan; quiero agradecer en especial al Dr. Vicente Garibay F. por su apoyo, ánimo, aprecio y paciencia para que pudiera concluir este ciclo.

A **Dios** por ser mi padre y creador, de quien recibo más de lo que puedo pedir, que siempre esta presente y se manifiesta en cada ser, en un atardecer, en cada rayo de sol, en cada objeto vivo o muerto que encontramos en esta tierra.

A mi Señor **Jesucristo** por ser mi amigo más ferviente, mi guía y mi salvador.

A **mi má Ofelia** por ser mi más grande bendición en esta tierra, por estar aún presente en mi vida, por estar siempre en mis pensamientos y por ser uno de mis más grandes motores para seguir y luchar; a ella por ser mi ejemplo, mi mamá, mi más fiel compañera y gran parte de mi felicidad, en este mundo, porque el haberla conocido es lo mejor que me pudo pasar.

A **mi familia** Eli y Efren, Mary, Ale y Beto, Richar, Rafa, Memo, Lalo, Monse, Andi y al *pilón*, esa pequeña traviesa de mi linda Micky; gracias por eso,...por ser mi familia en toda la extensión de la palabra, parte indispensable de mi diario respirar.

A todos **mis amigos, colegas, conocidos** y todos aquellos que participan en mi vida, que aprecio tanto y que en un momento tengo miedo que no les mencionara a todos, que gracias a ellos mi vida se ha visto colmada; donde una simple sonrisa ha sido complemento de mi vivir, donde un *hola* y *hasta luego* bastan para sentir que sin ellos la vida no se llamaría así.

A aquellas personas especiales de las que es incontable el número, a las que aprecio por el solo hecho de estar aunque sea un instante en mi caminar; me atreveré a mencionar el nombre de muchas de ellas esperando no omitir a nadie: *Juan José, Nancy, Christopher, Richar, Ruth, Toño, Frank, Beto, Arturo, Ing. Mayen, José, Huicho, Víctor, Mauricio, Eleazar, Fer, Leonardo, Luis, Manuel, Saúl, Rocío, Francisco, Felipe, Juan y Lourdes*; a *Joel R. S.* por el cariño especial que se esta ganando; gracias a todos porque me han dado una gran satisfacción y me llenan la vida de felicidad, por cada cosa que he aprendido de cada uno, por cada momento tan especial que convivimos, por cada detalle, gracias, muchas gracias.

Les agradezco enormemente a todos por ser mi alegría, por compartir un momento en este instante en la eternidad del tiempo, por compartir conmigo esta pequeña extensión de materia en la inmensidad del universo y por darle razón de ser a mi existencia, gracias,... *simplemente ... MUCHAS GRACIAS.*

DEDICATORIA

Esta, mi obra no perfecta y llena de mi humanidad,
te la dedico a ti,
a tí luz de mi vida, a ti guía de mi alma,
a ti amigo... mi fiel compañero.

A tí que sin reclamos y condiciones, me brindas tú cariño,
que sin tardanzas y sin demoras atiendes mis necesidades,
que no requieres de mis palabras para saber cuando estirarme tu mano,
que no descansas día y noche por velar mis sueños.

A ti, que te amo tanto,
A ti, que mis palabras no pueden expresar todo lo que provocas en mi,
A ti que te admiro y te idolatro,
A ti, en quien me la paso pensando y soñando.

A ti, a quien gracias te doy por tu apoyo incondicional,
A ti, por todo lo que sin merecer me has dado a manos llenas,
A ti porque eres mi luz, mi mentor y mi esperanza final,
A ti, por amarme y haber hecho un gran sacrificio en mi honor.

Gracias te ofrezco por tu paciencia y tu honestidad,
Gracias por ser el ser perfecto, mi gran ejemplo y mi salvación,
Gracias por tu bondad y misericordia,
Gracias a ti mi Señor, que te mereces mi adoración.

GRACIAS A TI... MI QUERIDO DIOS,
GRACIAS MI SEÑOR JESUCRISTO,
A quien dedico esta,... mi titulación.

ÍNDICE

RESUMEN	15
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	
1.1. INTRODUCCIÓN	17
1.2. OBJETIVOS	18
1.3. ALCANCES	18
1.4. HIPÓTESIS	18
1.5. TEMA DE INVESTIGACIÓN	18
1.6. CASOS DE DESLIZAMIENTOS REGISTRADOS EN MÉXICO	18
1.7. METODOLOGÍA	21
1.7.1. ACTIVIDADES DESARROLLADAS	21
1.7.2. SELECCIÓN DE SITIOS ESPECÍFICOS	22
1.7.3. MÉTODO EMPLEADO PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA	22
CAPÍTULO II. DESLIZAMIENTO DE LADERAS	
II.1. INTRODUCCIÓN	23
II.2. PRINCIPIOS FÍSICOS, MECÁNICOS E HIDROGEOLÓGICOS MÁS IMPORTANTES	24
II.2.1. RESISTENCIA DE LOS SUELOS AL CORTE	24
II.2.2. RELACIÓN ESFUERZO-DEFORMACIÓN DEL SUELO	25
II.2.3. PARÁMETROS DE PRESIÓN DE PORO	26
II.2.4. CÍRCULO DE MOHR	28
II.2.5. ENVOLVENTE DE FALLA	28
II.2.6. TRAYECTORIA DE ESFUERZOS	28
II.2.7. PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS	29

II.3. PROCESOS Y EFECTOS EN TALUDES Y LADERAS	31
II.3.1. PROCESOS DE METEORIZACIÓN	31
II.3.2. PROCESOS GRAVITACIONALES	32
II.3.3. PROCESOS HIDROLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS	33
II.3.3.1. FLUIDIFICACIÓN	34
II.3.3.2. FRENTE HÚMEDO	34
II.3.4. CONDICIONANTES DE FRONTERA EN LA DINÁMICA DE TALUDES Y LADERAS	35
II.4. ASPECTOS Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE TALUDES Y DESLIZAMIENTOS	35
II.4.1. ELEMENTOS DE UN TALUD	36
II.4.2. NOMENCLATURA DE LAS PARTES DE UN DESLIZAMIENTO	37
II.4.3. DIMENSIONES DE UN DESLIZAMIENTO	38
II.4.4. TIPOS DE MATERIALES DE UN DESLIZAMIENTO	38
II.4.5. CLASIFICACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS	39
II.4.6. ESTILO DE DESLIZAMIENTOS	44
II.4.7. CARACTERIZACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS POR SU CONTENIDO DE AGUA	44
II.4.8. CARACTERIZACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS POR FORMACIÓN Y ESTRUCTURA GEOLÓGICA	45
II.5. DINÁMICA DE LOS DESLIZAMIENTOS	45
II.5.1. ETAPAS DE FALLA DE UN DESLIZAMIENTO	45
II.5.2. VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO	45
II.5.3. ESTADO DE ACTIVIDAD DE UN DESLIZAMIENTO	46
II.6. FACTORES DETONANTES (ACTIVACIÓN DEL MOVIMIENTO)	46
II.6.1. CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES GEOLÓGICAS DEL TERRENO	47
II.6.2. PROCESOS DE TIPO GEOMORFOLÓGICO	47
II.6.3. PROCESOS DE ORIGEN QUÍMICO, FÍSICO Y BIOLÓGICO	47
II.6.4. PROCESOS DE ORIGEN HUMANO (ANTRÓPICOS)	48
II.7. CONDICIONES QUE PROPICIAN LA FALLA DE UN TALUD	48
II.7.1. FALLA POR DESLIZAMIENTO	48
II.7.2. FALLA POR VOLTEO	49
II.7.3. FALLA POR CAÍDA	49
II.7.4. FALLA POR FLUJO	49

II.8. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA OCURRENCIA DE UN DESLIZAMIENTO	50
II.8.1. INVENTARIOS DE DESLIZAMIENTOS	50
II.8.2. ANÁLISIS DE PROBABILIDAD DE DESLIZAMIENTOS	50
II.8.3. MÉTODOS DE CÁLCULO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	50
II.9. ACCIONES Y MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y/O MITIGACIÓN	51
II.9.1. ACCIONES RECOMENDABLES PARA LA POBLACIÓN	51
II.9.2. ACCIONES TÉCNICAS PARA IDENTIFICAR LADERAS INESTABLES	51
II.9.3. MEDIDAS ANTE LA INESTABILIDAD DE LADERAS	52
II.9.4. MONITOREO, MONITOREO SISTEMÁTICO Y ALERTAMIENTO	52
II.9.5. MÉTODOS PARA CORREGIR FALLAS EN LADERAS Y TALUDES INESTABLES	54
II.9.6. MÉTODOS GEOTÉCNICOS DE ESTABILIZACIÓN	54

CAPÍTULO III. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

III. 1. INTRODUCCIÓN	57
III.2. INFORMACIÓN DE LA REPÚBLICA MEXICANA	57
III.2.1. MARCO GEOGRÁFICO	57
III.2.2. MARCO GEOLÓGICO	58
III.2.2.1. FISIOGRAFÍA	58
III.2.2.2. LITOESTRATIGRAFÍA	59
III.2.2.3. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS MAYORES	60
III.2.2.4. HIDROGEOLOGÍA	61
III.2.2.5. TECTÓNICA	63
III.2.2.6. SISMICIDAD	65
III.2.3. CLIMATOLOGÍA	66
III.2.3.1. PRECIPITACIÓN	68
III.2.3.2. TEMPERATURA	68
III.2.3.3. VEGETACIÓN	69
III.3. INFORMACIÓN DE LA SIERRA MADRE ORIENTAL	69
III.3.1. MARCO GEOGRÁFICO	70
III.3.2. MARCO GEOLÓGICO	70
III.3.2.1. FISIOGRAFÍA	71
III.3.2.2. LITO-ESTRATIGRAFÍA	72

III.3.2.3. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS	79
III.3.2.4. HIDROGEOLOGÍA	81
III.3.2.5. TECTÓNICA	83
III.3.2.6. SISMICIDAD	84
III.3.3. CLIMATOLOGÍA	85
III.3.3.1. PRECIPITACIÓN	85
III.3.3.2. TEMPERATURA	86

CAPÍTULO IV. CASOS ESPECÍFICOS

IV.1. INTRODUCCIÓN	87
IV.2. ÁREA NORTE	87
IV.2.1. CASO RÍO LA BOCA	88
IV.2.2. CASO FRACCIONAMIENTO RESIDENCIAL DEL VALLE	90
IV.2.3. CASO FRACCIONAMIENTO GARZA-GARCÍA	92
IV.3. ÁREA SUR	95
IV.3.1. SIERRA NORTE DEL ESTADO DE PUEBLA	95
IV.3.1.1. CAUSAS NATURALES Y ANTRÓPICAS	96
IV.3.1.2. PRECIPITACIÓN PLUVIAL Y ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL	96
IV.3.1.3. MORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA	97
IV.3.1.4. ZONIFICACIÓN POR RIESGO DE DESLIZAMIENTO DE LADERAS	97
IV.3.1.5. RIESGO GEOTÉCNICO Y CONSTRUCTIVO	98
IV.3.2. CASOS ESPECÍFICOS EN LA ZONA SUR DE LA SIERRA MADRE ORIENTAL	99
IV.3.2.1. CASO ZAPOTITLÁN DE MÉNDEZ	99
IV.3.2.2. CASO TEZIUTLÁN	100

CAPÍTULO V. ELABORACIÓN DEL MAPA

V.1. INTRODUCCIÓN	103
V.2. PREPARACIÓN DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD	103
V.3. EVALUACIÓN POR UN EXPERTO	105
V.4. BASES CONSIDERADAS PARA ELABORAR EL MAPA	106

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS INTEGRAL DE LA INFORMACIÓN Y RESULTADOS	
VI.1. INTRODUCCIÓN	109
VI.2. INFORMACIÓN INTEGRADA	109
VI.3. ANÁLISIS POR SUBPROVINCIAS	110
VI.3.1. SIERRA DEL NORTE	111
VI.3.2. SIERRAS ATRAVESADAS	111
VI.3.3. SIERRAS BAJAS	112
VI.3.4. SIERRA ALTA	112
VI.4. RESULTADOS	114
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
BIBLIOGRAFÍA	121

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

- Figura II.2.2. Gráfica de esfuerzo vs deformación del suelo y gráfica de σ vs τ .
- Figura II.2.3. Presión de poro y efectos sobre el diagrama de cuerpo libre para análisis de estabilidad.
- Figura II.2.4. Esfuerzos principales en la superficie de falla de un talud
- Figura II.2.5. Envolvente de falla o ley de resistencia Mohr- Coulomb
- Figura II.2.6. Trayectorias de esfuerzos.
- Figura II.3.2. Componentes tangencial y normal sobre un plano inclinado de la acción gravitatoria (Tulane University, 2001).
- Figura II.3.3.1. Cohesión aparente y fluidificación (Tulane University, 2001; adaptado por Suárez García O. G.).
- Figura II.4.2. Partes de un deslizamiento.
- Figura II.4.3. Dimensiones de un deslizamiento. (IAEG,1990)
- Figura II.4.5.1. Falla rotacional alrededor de eje.
- Figura II.4.5.2. Falla circular y cóncava.
- Figura II.4.5.3. Grietas concéntricas y cóncavas.
- Figura II.4.5.4. Salidas de superficies circulares.
- Figura II.4.5.5. Inclinación de la superficie.
- Figura II.4.5.6. Deslizamiento traslacional en suelo y en contacto suelo-roca respectivamente.
- Figura II.4.5.7. Macizo rocoso con discontinuidades.
- Figura II.4.5.8. Intersección de discontinuidades.
- Figura II.4.5.9. Deslizamiento por pandeo.
- Figura II.4.5.10. Pandeo por flexión de capas fracturadas.
- Figura II.4.6.1. Deslizamientos rotacionales simples y múltiples.
- Figura II.4.6.2. Inclinaciones sencillas y múltiples (Cruden and Varnes, 1996).
- Figura II.6.4. Falla progresiva o deformaciones con el tiempo (Leroueil and Locat, 1996).

CAPÍTULO III

- Figura III.2.1. Ubicación de la República Mexicana.
- Figura III.2.2.1. Provincias fisiográficas de la República Mexicana.
- Figura III.2.2.3. Estructuras geológicas mayores NE - SW que afectan a la República Mexicana (Marín y Aguayo, 1987).
- Figura III.2.2.4. Provincias hidrogeológicas de la República Mexicana (Velásquez, 1994).
- Figura III.2.2.5. Placas tectónicas en las que se localiza la República Mexicana (Marín-Córdova, 2004).
- Figura III.2.2.6. Zonas Sísmicas de la República Mexicana (Marín-Córdova, 2004).
- Figura III.3.1. Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental.
- Figura III.3.2.1. Subprovincias de la Sierra Madre Oriental.
- Figura III.3.2.2. Mapa Geológico de la Sierra Madre Oriental (Carta de Geología, V.1.1., Instituto de Geografía, UNAM, Padilla y Sánchez R. J. Aceves Quesada J. F., Mayo 1992).
- Figura III.3.2.2. Columnas estratigráficas de la Sierra Madre Oriental (Compilada por Quezada y Sarmiento, 1999, adaptado por Suárez García O. G.).
- Figura III.3.2.3. Estructuras Geológicas Mayores NE – SW, representadas como sistemas de fallas transcurrentes que afectan a la Sierra Madre Oriental.
- Figura III.3.2.4.2. Comparativo de la Provincia Hidrogeológica y la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental.

- Figura III.3.2.4.1. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Sierra Madre Oriental (Velázquez, 1994).
- Figura III.3.2.6. Sismicidad de la Sierra Madre Oriental (Marín-Córdova, 2004).
- Figura III.3.3.1. Precipitación total anual en la Sierra Madre Oriental.

CAPÍTULO IV

- Figura IV.2. Recorrido en áreas de Monterrey, numerando los sitios visitados.
- Figura IV.2.2. Condiciones del fraccionamiento *Residencial del Valle*.
- Figura IV.3.2.1.1. Localización de la zona Zapotitlán de Méndez y Teziutlán. (Capra *et al.*, 2003(b), adaptado por Suárez García O. G.)
- Figura IV.3.2.1.2. Mapa geológico simplificado de la región de estudio (INEGI, 1984, en Capra *et al.*, 2003(a)).
- Figura IV.3.2.1.3. Perfiles geológicos esquematizados a lo largo del relieve meridional (Capra *et al.*, 2003 (a)).
- Figura IV.3.2.2. Mapa geológico de la distribución de unidades volcánicas y áreas afectadas de la zona Teziutlán (Capra *et al.*, 2003 (b)).

CAPÍTULO V

- Figura V.2.1. Ilustración de la metodología empleada para la elaboración del mapa de susceptibilidad.

FOTOGRAFÍAS

CAPÍTULO IV

- Fotografía IV.2.1. Deslizamiento de ladera en estratos gruesos de calizas debido a excavación al pie del talud.
- Fotografía IV.2.2. Maquinaria y zona de la excavación al pie del talud.
- Fotografía IV.2.2.1. Ladera inestable con construcciones.
- Fotografía IV.2.2.2. Agrietamientos en las vialidades.
- Fotografía IV.2.2.3. Ausencia de obras adecuadas para retención de caídos.
- Fotografía IV.2.2.4. Concreto lanzado en la parte superior de la ladera y construcciones en la cima de esta.
- Fotografía IV.2.3.1. Construcción sobre laderas inestables con métodos de estabilización insuficientes.
- Fotografía IV.2.3.2. Estabilización con concreto lanzado.
- Fotografía IV.2.3.3. Estratificación a favor de la pendiente.
- Fotografía IV.2.3.4. Colonias residenciales desplantadas en zonas de fuerte pendiente topográfica y estratos de caliza y lutita con echado a favor de la pendiente.
- Fotografía IV.2.3.5. Numerosas construcciones desplantadas en la cabeza de las laderas.
- Fotografía IV.2.3.6. Fuerte ángulo del echado de las capas con construcciones en la cima.

TABLAS

CAPÍTULO I

- Tabla I.6.1. Deslizamientos de laderas registrados por la Subsecretaría de Protección Civil.
- Tabla I.6.2. Casos de remoción de masa: archivos periodísticos.
- Tabla I.6.3. Casos publicados, reportados por el CENAPRED.

CAPÍTULO II

Tabla II.2.7.1. Coeficientes de permeabilidad dependiendo del tipo de depósito.

Tabla II.2.7.2. Grados de permeabilidad del suelo.

Tabla II.5.2. Velocidad de los movimientos.

CAPÍTULO III

Tabla III.2.2.6. Escala de Richter de sismicidad.

Tabla III.2.3.2. Regímenes Térmicos.

Tabla III.3.2.4. Características hidráulicas de la Sierra Madre Oriental.

CAPÍTULO V

Tabla V.2.1. Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a los deslizamientos.

Tabla V.2.2. Valoración de factores para evaluación de susceptibilidad a deslizamiento.

CAPÍTULO VI

Tabla VI.4. Resultados de susceptibilidad a deslizamientos definidos para la Sierra Madre Oriental.

RESUMEN

SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS DE LADERAS EN LA SIERRA MADRE ORIENTAL

El problema de deslizamiento de laderas ha generado grandes desastres en la historia de la humanidad; en la República Mexicana se presenta con gran frecuencia, principalmente en épocas de lluvias o al ocurrir un sismo, que son algunos de los detonantes de este tipo de acontecimientos.

En forma general, en este trabajo se destaca la importancia que tiene para México el conocimiento de la remoción en masa que puede representar un peligro por los efectos que causan al hombre y a su desarrollo.

Se caracterizan los principales movimientos, tales como: reptación, soliflucción, deslizamientos, flujos, aludes de rocas, licuefacción y colapsos; estas traslaciones pueden ser muy destructivas y se presentan con cierta periodicidad.

También, se determinan los factores más comunes que originan estos movimientos, las formas en que se expresan en la superficie y como se pueden identificar en el campo; asimismo, se indican algunas medidas preventivas y de mitigación a través de la búsqueda de evidencias en el terreno y de acciones que la población, sin ser especialista, pueda llevar a cabo.

Se analizan en forma general las causas más importantes que favorecen con gran regularidad los deslizamientos en la Sierra Madre Oriental, considerando que es una cordillera cuya morfología se originó debido a la deformación de las rocas mezozoicas y de su basamento, que fueron comprimidos, levantados y transportados hacia el noreste, formando diversos pliegues, cabalgaduras y fallamientos.

Se propone una regionalización, con base en el análisis según el potencial de deslizamientos y se divide la superficie en niveles de riesgo para contribuir a la prevención de desastres ocasionados por la remoción de masas.

Adicional a los factores geológicos principales, se consideran las características que influyen en la generación de este fenómeno en México: el clima, la sismicidad y la topografía; existiendo información documental suficiente, que permite formar un concepto de las regiones más vulnerables.

Se presentan los resultados de la investigación documental realizada hasta la actualidad y se obtienen datos y conceptos generales. Además se describen los estudios necesarios para determinar las características de estabilidad de laderas y los tratamientos preventivos y correctivos más utilizados.

Se elabora en forma gráfica la susceptibilidad a deslizamientos, representándola en un mapa escala 1: 4,000 000 y posteriormente se seleccionan dos áreas representativas donde han ocurrido históricamente deslizamientos de importancia, haciendo una comparativa de los sucesos ocurridos con el mapa obtenido y así determinar la confiabilidad de dicho mapa para su utilización en la sociedad y en los diversos proyectos de desarrollo en la región.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

I.1. INTRODUCCIÓN

Los problemas de inestabilidad de laderas se cuentan entre los peligros naturales más destructivos de nuestro planeta, lo cual representa una de las mayores amenazas para la vida y para los bienes materiales de la población (CENAPRED, 2001).

Los derrumbes, deslizamientos, flujos y movimientos complejos ocurren día con día. El impacto que este tipo de peligros provoca, es de mayor magnitud en países de escasos recursos debido a su alto grado de vulnerabilidad.

El fenómeno de deslizamientos ha ocasionado en diversas regiones del mundo grandes desastres, por lo que la detección previa de las áreas susceptibles a este tipo de eventos permite tomar las medidas necesarias para evitar daños a la infraestructura de las poblaciones, así como la pérdida de vidas humanas; además, es de suma importancia que la población conozca este fenómeno y se mantengan preparados a las manifestaciones que lo preceden y los factores que lo generan.

La investigación geológica y geotécnica de estas áreas resulta básica ya que sirve de apoyo para estudios específicos como los de mecánica de suelos, mecánica de rocas y los hidrológicos.

En la República Mexicana en general, los deslizamientos de laderas, han dado origen a graves problemas, los cuales implican la afectación a la integridad física de los habitantes de la región y a sus bienes materiales.

Una de las regiones del país que por su extensión, geomorfología y litología, presenta gran interés para ser estudiada bajo este enfoque, es la Sierra Madre Oriental, aunado a que en su entorno, se localizan varias poblaciones importantes, además de que contiene una importante red de vías de comunicación.

Su análisis regional constituye un primer paso para dimensionar, a nivel general, la susceptibilidad a deslizamientos de las laderas en esta área, con lo que se podrán elaborar posteriormente, programas de investigación locales y específicos.

La elaboración de un mapa de susceptibilidad a deslizamiento en la Sierra Madre Oriental, es útil para establecer las zonas de mayor riesgo y evitar que se presente un daño a la población tomando las medidas de prevención, o en el caso que ya se manifieste la ocurrencia de un deslizamiento, proponer y realizar los tratamientos adecuados para su estabilización.

Se pretende que este estudio conjunte diversos factores geológicos y geotécnicos, que coadyuven a la mejor comprensión del proceso de inestabilidad de laderas en la mencionada sierra.

Una vez obtenido este mapa, se pueden observar las zonas que están pobladas y que se encuentran en zonas de niveles altos de susceptibilidad, para así poder proponer un estudio más específico de esa determinada zona y prevenir que estos desastres naturales ocurran.

I.2. OBJETIVOS

Determinar en la Sierra Madre Oriental las áreas susceptibles a deslizamiento de ladera elaborando un mapa, efectuando estudios de detalle en dos áreas específicas diagnosticadas con susceptibilidad a deslizamiento.

I.3. ALCANCES

- Realizar un mapa a escala de 1: 4,000 000 en el cual se expongan las áreas más susceptibles a deslizamiento en dicha sierra.
- A través del mapa se pueden establecer, en etapa preventiva, los riesgos que implica la instalación de cualquier infraestructura en alguna zona determinada.

I.4. HIPÓTESIS

A través del acceso a un mapa en el cual se indiquen las áreas que son propensas a tener deslizamientos, se puede regular el asentamiento, la construcción de las obras en un sitio o tomar las medidas ingenieriles necesarias para evitar un desastre, principalmente en los casos en que se encuentre poblada alguna zona.

I.5. TEMA DE INVESTIGACIÓN

Este tema de investigación ha originado que la comunidad científica y tecnológica evolucione en la búsqueda de metodologías para la prevención, evaluación y remediación o atenuación de los deslizamientos. En particular en el área de las Ciencias de la Tierra y de la Ingeniería Civil, es cada día mayor el número de participantes en estas tareas.

Los deslizamientos son fallas de taludes o laderas que pueden producir tanto pequeños como grandes movimientos de masas que en muchas ocasiones ocurren debido a que las condiciones geológicas, el clima, la precipitación, la deforestación y la sismicidad, entre otros, las favorecen ocasionando grandes pérdidas tanto materiales como humanas, en los casos en que se encuentra una población u obra de infraestructura cerca o en el lugar del deslizamiento, por lo que la realización de un mapa que apoye en ese aspecto a la zonificación de las áreas de mayor susceptibilidad, es de gran relevancia.

I.6. CASOS DE DESLIZAMIENTOS REGISTRADOS EN MÉXICO

En México cada año se dan a conocer daños causados por remoción o movimientos de masa de diferentes tipos, tales como deslizamientos, deslaves, desprendimientos o caídos de rocas, que han perjudicado a las poblaciones, patrimonios y actividades (Universidad Iberoamericana, 1998).

Se piensa que los peligros representados por estos movimientos de masa sólo adquieren importancia cuando son rápidos, violentos, de grandes dimensiones, dejan grandes daños materiales y pérdidas de vidas, pero los movimientos menos impactantes tienden a ser más costosos, afectando en su mayoría a comunidades de escasos recursos.

En nuestro país algunas de las causas de deslizamientos se deben a: sismos, actividad minera, construcción de caminos, urbanización en terrenos de fuertes pendientes y excavaciones; siendo la lluvia una de las causas más importantes ya que propician e intensifican estos movimientos.

En la información de la Subsecretaría de Protección Civil han sido reportados fenómenos de remoción de masa en suelos a nivel nacional como se enlista en la tabla I.6.1, sin profundizar en las causas u otros aspectos.

Tabla I.6.1. Deslizamientos de laderas registrados por la Subsecretaría de Protección Civil.

ESTADO	MUNICIPIO Y/O LOCALIDADES AFECTADAS	TIPO DE MOVIMIENTO	CAUSAS	OBSERVACIONES
Baja California Sur	Alfredo V. Bonfil y municipio de La Paz	Desplazamientos		159 habitantes afectados
Chihuahua	Santa Bárbara, sistema carretero Gran división	Derrumbes y hundimientos regionales (colapsos), deslaves	Minería e inundaciones	Presencia en la época de Junio-Sep.
Durango	Municipio Lerdo	Deslizamientos de suelos		2 familias afectadas
Guerrero	Barrio de Capilintla, municipio de Taxco	Deslizamiento de suelos		200 habitantes afectados
Michoacán	Municipios Apatzingan, Coalcomán, Lázaro Cárdenas, Paracho, Cherán, Nahuatzen, carretera Uruapan-Migica	Deslizamientos de suelos, deslaves, derrumbes, colapsos	Fenómenos hidrometeorológicos	Interrupción de comunicación terrestre
Morelos	Orillas del río Tembembe, municipio de Miacatlán, cerro Santa Bárbara en Totolapan y cerro Zendejas aledaño a Tetecala	Deslizamientos	Sismos	
Oaxaca	Ixtlán y Oaxaca	Deslizamiento de suelos		500 habitantes afectados y 8 fallecidos
Puebla	San Francisco Teotimehuacán	Deslizamiento de suelo		
Querétaro	Sierra Gorda, Pinal de Amoles, municipios Amealco y Querétaro	Deslaves de cerros	Periodos largos de lluvias	Afectación en viviendas
Sonora	Nogales, Hermosillo, Yécora, Huachineras, Guaymas, Nacoziari, Sahuaripa,	Derrumbes y movimientos de masa, caída libre, deslizamientos	Lluvias, sismicidad, pendientes entre 10 y 20%, tipo de material	
Distrito Federal	Delegación Álvaro Obregón y otras	Derrumbes en cavidades	Explotación de minas	

Oropeza Orozco *et al.*, 1998

Otros casos reportados por la prensa nacional en el siglo XX de desastres provocados por diversos fenómenos, incluida la remoción de laderas, se presentan en la tabla I.6.2.

Las tablas I.6.2 y I.6.3 permiten constatar que en varios estados del país se presenta este problema que afecta constantemente al bienestar social.

Tabla I.6.2. Casos de remoción de masa: archivos periodísticos.

TIPO DE FENÓMENO	CAUSAS	VOLUMEN	FECHA	LOCALIZACIÓN	VICTIMAS
Derrumbe, flujo de agua y lodo	Fuerte tromba en las estribaciones del Ajusco	No mencionado	4/junio/1935	San Pedro Atocpan y San Gregorio Atlapalco, Deleg. Milpa Alta, D.F.	150 muertos y 147 heridos
Flujo de lodo	Rompimiento de la presa de residuos. Los jales del fundo minero Dos Estrellas	Aprox. 3 millones de toneladas de piedras y desperdicios y una extensión de 10 km.	27/mayo/1937	Michoacán: Talpujahua y barrios la Cuadrilla, Del Carmen, La Hortaliza, Tlacotepec, Rayón, El rastro, Alcantarilla	176 muertos pero pudo haber ascendido a 300 muertos, 200 familias sin hogar
Inundación por flujo de lodo	Rompimiento de una presa	No mencionan	25/agost/1951	San Luis Potosí: Cárdenas y barrio La Planilla	38 muertos, 3 heridos graves, 30 choques nerviosos, 20 golpeados y miles de personas sin hogar
Derrumbe flujo de lodo	Fuertes lluvias que desgajaron una parte de un cerro	2 metros de espesor de lodos	18/oct/1955	Jalisco: Atentique	Cerca de 60 muertos
Derrumbe flujo de lodo	Un huracán en las costas de Jalisco y Colima produjo el derrumbe de un cerro	No menciona	29/oct/1959	Colima: Minatitlán	800 personas
Derrumbe	Movimiento de arena de una mina	No mencionan	20/oct/1969	Michoacán: Morelia Teremendo	18 niños
Derrumbe	Desgajamiento de una parte del cerro La Pinzona debido a fuertes lluvias (Huracán Dolores) cayendo en Av. Adolfo López Mateos y la playa La Langosta	No mencionan	17/junio/1974	Guerrero: Acapulco	11 muertos y 16 desaparecidos
Flujo de agua y lodo	Desbordamiento del bordo de retención El Cajoncito por fuertes lluvias (Huracán Liza)	No mencionan	1/oct/1976	Baja California Sur: La Paz	400 muertos 1500 damnificados
Alud de rocas y lodo	Desgajamiento de cerro no especificado	No mencionan	11/agost/1983	Veracruz: Xicola	32 muertos y 800 personas sin hogar
Derrumbe	Desgajamiento de cerro por fuertes lluvias	No mencionan	16/agost/1983	Oaxaca: Sierra Triqui	3 muertos y varios heridos
Derrumbes	Desgajamiento de cerro en la sierra (no especifica nombre) por fuertes lluvias producidas por la tormenta Debby	No mencionan	4/sept/1988	Veracruz: Papantla	6 muertos

Oropeza Orozco *et al.*, 1998

De acuerdo con publicaciones del Centro Nacional de Prevención de Desastres, entre los tipos de movimientos de la superficie del terreno natural se encuentran:

1. Inestabilidad de laderas naturales.
2. Flujos de lodo y escombros.

3. Hundimiento regional y local.
4. Agrietamiento del terreno, originado por deslizamientos diferenciales horizontales y/o verticales, de la superficie del mismo.

De estas publicaciones se reportan los siguientes casos:

Tabla I.6.3. Casos publicados, reportados por el CENAPRED.

AÑO	DESASTRE	ESTADO	COMENTARIOS
1920-enero	Sismo, corrientes de lodos	Veracruz	A causa del sismo se presentaron numerosos derrumbes y deslizamientos en laderas cercanas al río Huitzilapa-Los Pescados, provocando corrientes de lodo en la región al sur del Cofre de Perote. Lo anterior, junto con el colapso de numerosas construcciones, produjo entre 1800 y 2000 víctimas.
1935-jun.	Lluvias, corrientes de lodos	Distrito Federal	150 muertos. Fuerte tromba en el Ajusco provoca corrientes de lodo afectando la Delegación Milpa Alta.
1937-jun.	Lluvias torrenciales	Michoacán	Más de 300 muertos a causa del derrumbe de los almacenamientos de lodo (jales) productos de la actividad de la mina "Dos Estrellas" en Tlalpujahua, el lodo cubrió totalmente 7 barrios de esta población.
1954-oct.	Deslizamiento de tierra	Jalisco	Más de 100 muertos en Atenquique.
1999-oct	Lluvias torrenciales	Puebla, Hidalgo, Veracruz, Tabasco y Oaxaca	329 Muertos, más de 259, 000 damnificados y 178 municipios afectados. Los daños estimados en más de 10, 000 millones de pesos. Las ciudades de Villahermosa, Tab. y Tulancingo Hgo. Estuvieron inundadas por varios días. Un alud sepultó casas en Teziutlán, Pue.

Como se puede ver en varios estados del país, este problema se presenta afectando constantemente al bienestar social.

Además, existen otros casos no reportados y que han ocurrido en zonas no pobladas; es necesario que la población conozca del riesgo que representa asentarse en una zona que sea susceptible a deslizamiento.

Como la Sierra Madre Oriental está constituida principalmente por rocas y suelos sedimentarios presenta este problema en gran parte de su extensión, por lo que este trabajo se enfoca principalmente a ella, sin olvidar que en muchas zonas de la República Mexicana, nos vemos afectados por este tipo de fenómenos.

I.7. METODOLOGÍA

I.7.1. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Las actividades desarrolladas para la realización de esta tesis, se mencionan a continuación:

- 1.- *Investigación general.* Esta consistió en identificar los conceptos básicos para estudiar el fenómeno y los sucesos descritos por diversos autores hasta la actualidad.

- 2.- *Recopilación de información.* Con la información geológica, cartográfica, topográfica, climatológica, de precipitación, sismicidad, vegetación y deforestación, así como con los casos que se han presentado históricamente, se identificaron las causas que favorecen a los deslizamientos en la Sierra Madre Oriental.

Inicialmente, se efectuó la compilación de información antecedente relacionada con estudios regionales realizados, tanto por instituciones oficiales como por centros de investigación, relacionados con el tema.

- 3.- *Análisis e integración de la información recopilada.* Este aspecto fue muy importante pues a través de él se contó con los datos necesarios para la elaboración del mapa mencionado. El análisis de los datos recopilados permitió elaborar un mapa confiable, por lo que es conveniente que se tenga experiencia y un conocimiento amplio sobre el tema.
- 4.- *Elaboración de un mapa de susceptibilidad a deslizamientos.* Finalmente, se elaboró el mapa de las zonas de mayor susceptibilidad a deslizamientos, indicando los niveles de riesgo e identificando las áreas y poblaciones con potencial de peligro.

El apoyo cartográfico consistió de mapas elaborados por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) así como por el Instituto de Geografía de la UNAM y por el Instituto Mexicano del Petróleo.

1.7.2. SELECCIÓN DE SITIOS ESPECÍFICOS

Esta selección se realizó basándose en la información de las zonas con antecedentes de problemas de deslizamiento en la Sierra Madre Oriental, eligiendo dos porciones de la misma, correspondientes a las zonas norte y sur, en las cuales se efectuaron análisis detallados, mediante reconocimientos directos al campo en las áreas de Monterrey, Nuevo León, y Zona Norte de Estado de Puebla, respectivamente.

1.7.3. MÉTODO EMPLEADO PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA

Para la elaboración del mapa se utilizó la base cartográfica del Instituto de Geografía de la UNAM escala 1: 4,000 000, particularmente la carta geológica, la hipsométrica, la de hidrografía, la de sismicidad y la de precipitación, complementándola con información del INEGI y del Instituto Mexicano del Petróleo.

Además, se recurrió al uso del programa ArcGis 8.2 a través del cual se realizó la digitalización de las cartas antes mencionadas, efectuando la sobreposición entre ellas e interactuando con los mismos en forma matricial para así obtener el mapa objetivo.

CAPÍTULO II

DESLIZAMIENTO DE LADERAS

II.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se sintetizan los conceptos y aspectos que conciernen a un deslizamiento de laderas, tales como son: su definición, sus principios físicos, mecánicos e hidrogeológicos, su clasificación, su composición, los factores que los propician, sus aspectos dinámicos, los métodos geotécnicos de estabilización que se emplean, además de recomendaciones de prevención y/o mitigación para el caso de que se presente un proceso de este tipo.

Los factores que detonan los deslizamientos de laderas son: fuertes pendientes, composición de los suelos y rocas, grado de alteración, planos de debilidad, saturación por infiltración de aguas a partir de lluvias fuertes o prolongadas, socavación de cauces de drenajes naturales y movimientos sísmicos.

Dentro de las causas humanas que afectan la estabilidad de las laderas encontramos: el uso urbano de deslizamientos antiguos que pueden reactivarse, la deforestación y urbanización que facilitan la escorrentía y saturación de agua en las masas de suelo, la construcción inadecuada de taludes y excavaciones y el vertimiento de aguas a través de fallas en redes de acueductos y sobre las laderas.

Los deslizamientos de acuerdo a su proceso pueden ser superficiales, que es cuando se presenta la erosión laminar o arrastre de partículas en la superficie por acción del agua, o erosión concentrada en forma de surcos y cárcavas; también pueden ocurrir en masa, en forma de desprendimientos de bloques, coladas de arcilla, y deslizamientos que pueden ser rápidos (de varios metros por segundo) o lentos (hasta de centímetros por año).

Ya que se trata de fenómenos que ocurren en la superficie o muy cerca esta, normalmente las primeras manifestaciones de los deslizamientos, tales como agrietamientos o cambios en las formas del relieve, pueden ser observados con cierta anterioridad al desplazamiento de la masa. Por esta razón, la comunidad debe ser capacitada para la detección temprana del fenómeno y proceder a dar aviso a las autoridades correspondientes, o bien, actuar por propia cuenta.

Algunas de las acciones de mitigación, además de la educación a la comunidad, son:

- Cambios de uso del suelo y relocalización de asentamientos hacia zonas de menor peligro.
- Reforestación con especies apropiadas, disposición de barreras y técnicas adecuadas de uso del suelo.
- Construcción de obras civiles de infraestructura tales como captaciones de escorrentía, acueducto, alcantarillado, pavimentación de vías y muros de contención.
- Diseños urbanos y reglamentación sobre la densidad de ocupación de los terrenos en ladera.

II.2. PRINCIPIOS FÍSICOS, MECÁNICOS E HIDROGEOLOGÍCOS MÁS IMPORTANTES

Tarbutck y Lutgens (1999), expone que la autotranslación de materiales en las laderas, como cualquier otro desplazamiento, es función de todas las fuerzas implicadas que en este caso son: el peso, la fricción y la cohesión del material. El peso contribuye a la acción motora, mediante su componente tangencial, y a la resistencia, mediante su componente normal o vertical, de acuerdo con el modelo de bloque deslizante sobre un plano inclinado.

La fricción está caracterizada, en condición estática, por un coeficiente de fricción y un ángulo crítico. El valor de este coeficiente depende del tipo de material, de la rugosidad en la superficie de deslizamiento, de la humedad y de la superficie expuesta a contacto.

La cohesión contribuye a la resistencia, es función de las características propias del material: composición, textura, compacidad y cementación, las cuales pueden ser modificadas; además, se puede tener la presencia de poros, que pueden estar llenos de agua o aire y favorecer el crecimiento de raíces.

En estos fenómenos se debe considerar una cohesión efectiva, la propia de cada material, y otra aparente, en función de los condicionantes externos, como la presión total de confinamiento, por lo que suele recurrirse, en los análisis teóricos de la estabilidad, al enfoque en términos de esfuerzos totales, o bien, al enfoque en términos de esfuerzos efectivos donde intervienen estos parámetros referidos.

II.2.1. RESISTENCIA DE LOS SUELOS AL CORTE

Al modelar o representar matemáticamente el fenómeno de falla al cortante de rocas y suelos (Montoya *et al.*, 2002), se utiliza la ecuación generalizada de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' \text{ (para suelos saturados) y}$$

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' (\mu - \mu_a) \tan \phi'' \text{ (para suelos no saturados)}$$

Donde:

- τ : Esfuerzo cortante resistente (t/m^2)
- c' : Cohesión efectiva (t/m^2)
- σ : Esfuerzo normal total (t/m^2)
- μ : Presión del agua intersticial o de poro (t/m^2)
- μ_a : Presión del aire intersticial (t/m^2)
- ϕ' : Ángulo de fricción interna efectivo del material ($^\circ$)
- ϕ'' : Ángulo de fricción del material no saturado ($^\circ$)

Para el análisis de esta ecuación se requiere definir los parámetros de ángulo de fricción y de cohesión que se consideran como parámetros de resistencia del suelo. El valor de la resistencia del suelo se reduce por la presencia de agua dependiendo de las presiones internas o de poro, que se sustraen del valor de la presión normal cuando el suelo está completamente saturado. A la presión resultante se le conoce con el nombre de presión efectiva, σ' ($\sigma' = \sigma - \mu$).

El *ángulo de fricción*, es la representación matemática del coeficiente de rozamiento μ , donde $\mu = \tan \phi$; este, depende de la rugosidad de las superficies en contacto y que pueden deslizar una respecto a la otra, por lo que es importante considerar el tamaño de los granos, la forma de los mismos, la distribución de tamaños y la resistencia de las partículas individuales.

La *cohesión*, es una medida de las fuerzas moleculares entre las partículas del suelo; en *Mecánica de Suelos* representa la resistencia al cortante producida por la cementación. En suelos granulares, la cohesión suele considerarse despreciable respecto de la componente de fricción entre las partículas, a estos suelos se les denomina *suelos no cohesivos*.

Se conoce como *cohesión aparente* al fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares que produce el agua en los poros de un suelo no saturado; esta cohesión aparente desaparece cuando la presión de poro excede al valor de la presión atmosférica.

Las *presiones efectivas* son las que actúan entre las partículas del suelo. Al considerar un elemento de volumen infinitesimal dentro de una masa de suelo, por debajo del nivel freático, el agua que hay en su interior está soportando una presión debida a su propio peso (presión hidrostática), la cual es igual al producto del peso unitario del líquido por la profundidad del elemento respecto al nivel freático; al mismo tiempo, por el peso propio del suelo, existe una presión transmitida entre los granos sólidos (presión intergranular), y la presión del suelo soportada por el agua se llama (presión intersticial). La presión total que actúa en el elemento, suele considerarse igual a la suma de la presión intergranular y de la intersticial.

La ecuación general para las presiones en suelos saturados se puede escribir como:

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

Donde:

σ : Presión total (esfuerzo normal total) en un punto determinado

σ' : Presión intergranular o efectiva (esfuerzo efectivo)

μ : Presión intersticial o de poro

Los esfuerzos efectivos son los que determinan el comportamiento del suelo en condiciones de falla con drenaje activo, y no los esfuerzos totales. En problemas prácticos, el análisis con esfuerzos totales podría utilizarse en problemas de estabilidad a corto plazo, mientras que las presiones efectivas para analizar la estabilidad a largo plazo.

II.2.2. RELACIÓN ESFUERZO-DEFORMACIÓN DEL SUELO

Para considerar la relación esfuerzo-deformación en la estabilidad de taludes, se suelen tener en cuenta dos formas de establecer la resistencia del terreno (Fig. II.2.2):

- a. *Resistencia máxima o pico*. Es la resistencia al corte máxima del material que se identifica como el punto más alto en la curva esfuerzo-deformación. La resistencia máxima en la superficie de falla de un deslizamiento suele calcularse asumiendo que en todos los puntos que integran la superficie de deslizamiento, simultáneamente se encuentran en condición de falla (falla generalizada); sin embargo, en la realidad algunos puntos pueden haber alcanzado deformaciones mayores (falla progresiva); asumir esta resistencia simultánea puede producir errores en el análisis de la estabilidad ante el deslizamiento de todo el cuerpo de un talud.
- b. *Resistencia residual*. Es la resistencia al corte del material después de haber ocurrido la resistencia pico, como se describe en la figura II.2.2. En arcillas sobreconsolidadas (Skempton, 1964), la resistencia calculada después de ocurrido un deslizamiento, corresponde al valor de la resistencia residual. En los suelos lateríticos, bajo ciertas condiciones, la resistencia pico tiende a ser similar a la residual.

Para el cálculo de los factores de seguridad es aconsejable utilizar, los valores de los parámetros obtenidos para la resistencia residual ϕ_r y c_r .

La sensibilidad es otra propiedad que determina las diferencias entre la resistencia pico y la residual, y está relacionada con la pérdida temporal de resistencia por el remoldeo o la reorientación de las partículas de arcilla.

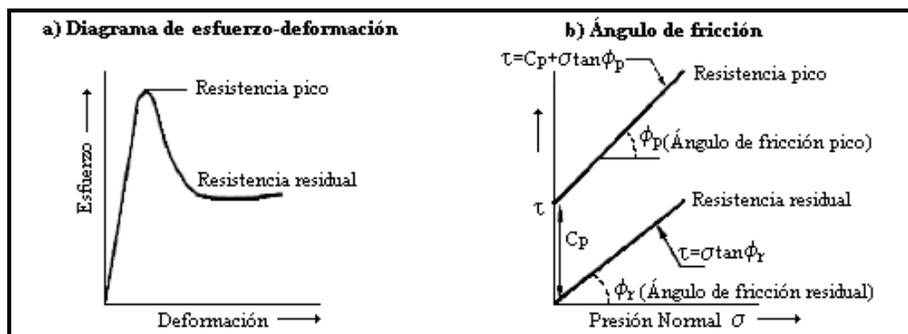


Figura II.2.2. Gráfica de esfuerzo vs deformación del suelo y gráfica de σ vs τ .

En suelos granulares (arenas, gravas y limos no plásticos), la cohesión entre sus partículas individuales suele despreciarse por ser muy pequeña respecto a la componente debida a la fricción interpartículas, por lo que puede considerarse de valor cero.

El ángulo de fricción depende de la rugosidad de la superficie de deslizamiento o falla, y esta a su vez depende de la angulosidad y tamaño de las partículas y la mineralogía.

En arcillas normalmente consolidadas y limos arcillosos, para fines de análisis simplificado de estabilidad, se considera la componente de fricción entre las partículas igual a cero y la cohesión como el valor total de la resistencia obtenida.

En suelos residuales predominan las mezclas de partículas granulares y arcillosas, por lo que es común la existencia del ángulo de fricción, esto dependiendo de la proporción de los materiales que la constituyan y de las características de cada partícula.

II.2.3. PARÁMETROS DE PRESIÓN DE PORO

La *presión de poro* depende del nivel freático, de las presiones internas de los acuíferos y de las características geológicas del sitio; la presión de poro varía con el régimen de aguas subterráneas. Un incremento o disminución en la presión de poro, ya sea positiva o negativa, se considera equivale a una disminución de la resistencia al cortante y por tanto de la estabilidad (Fig. II.2.3).

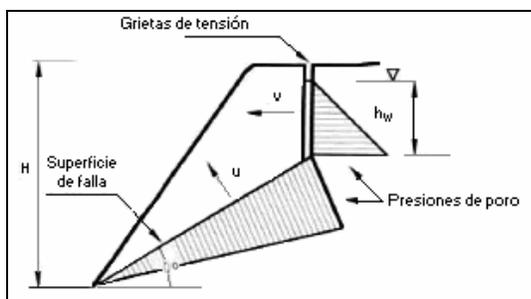


Figura II.2.3. Presión de poro y efectos sobre el diagrama de cuerpo libre para análisis de estabilidad.

El *nivel freático* es el lugar geométrico de todos los puntos dentro de un cuerpo de agua en el que la presión de poro es igual a la presión atmosférica. Los valores de presión hidrostática por debajo de este nivel son positivos, y negativos en caso contrario.

Suele considerarse que debajo del nivel freático el suelo se encuentra saturado, esto equivale a que el agua llena todos los poros del suelo. La presión de poro negativa varía según el grado de saturación.

En campo, en las laderas de zonas montañosas o de lomerío en las que ocurre la descarga del flujo de agua, la combinación de estas, con las pendientes, con la tendencia del agua subterránea de fluir hacia la cara de la misma y con la presencia de capas de suelo residual, relativamente impermeables, conllevan a la generación de altas presiones de poro que pueden desestabilizar las laderas y producir desprendimientos de bloques de roca de gran magnitud.

Terzaghi and Peck (1967) y Deere y Patton (1971) describen situaciones en las cuales, estas condiciones han llevado a un estado crítico de estabilidad produciendo la falla del talud. La presencia de rasgos desfavorables como orientaciones de diaclasas con ángulos elevados, pueden generar zonas de debilidad en el talud y desarrollar una condición aún más inestable, ya que se producen presiones muy altas.

Para el análisis de estabilidad en términos de esfuerzos efectivos, se requiere del conocimiento de las presiones de poro en campo; estas presiones se pueden estimar si se logran determinar los cambios de esfuerzos dentro del suelo. Para esta estimación se utilizan los parámetros de presión de poro **A** y **B** propuestos por Skempton (1954) para calcular la presión de poro en exceso.

$$\Delta U = B (\Delta\sigma_3 + A (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3))$$

Donde:

- ΔU : Exceso de presión de poro (t/m^2)
- A**: Parámetro de presión de poro A
- B**: Parámetro de presión de poro B
- $\Delta\sigma_1$: Incremento en el esfuerzo principal mayor (t/m^2)
- $\Delta\sigma_3$: Incremento en el esfuerzo principal menor (t/m^2)

A través de planteamientos teóricos y resultados experimentales se han obtenido los parámetros **A** y **B**. En suelos saturados, **B** se acerca a 1, pero su valor decrece con la disminución en el grado de saturación. Los valores del **A** dependen de las deformaciones, y por lo general, alcanzan sus valores máximos en el momento de la falla.

Los suelos normalmente consolidados, tienden a generar excesos de presión de poro positivos durante el corte; en contraste, los suelos sobreconsolidados pueden generar presiones en exceso negativas durante el fenómeno de falla.

El parámetro de presión intersticial de **A** (Lambe y Whitman, 1999), no es una propiedad constante del suelo y depende de:

- La deformación a que se ha sometido el elemento de suelo considerado.
- El sistema inicial de esfuerzos del suelo.
- La historia de esfuerzos de la muestra.
- La trayectoria de esfuerzos totales (carga y descarga), es decir, del tipo de variación de los esfuerzos.

II.2.4. CÍRCULO DE MOHR

En un análisis plano de deformación, los esfuerzos en un punto pueden ser representados por un elemento infinitamente pequeño sometido a los esfuerzos σ_x , σ_y y τ_{xy} .

Si estos esfuerzos se dibujan en unas coordenadas τ - σ , se puede trazar el círculo de Mohr. En este círculo se definen los valores de σ máximo (σ_1) y σ mínimo (σ_3), conocidos como esfuerzos principales. Para interpretar correctamente el fenómeno de falla al cortante en un talud debe tenerse en cuenta cuál es la dirección de los esfuerzos principales en cada sitio de la superficie de falla. El esfuerzo σ_1 es vertical en la parte superior del mecanismo de falla y horizontal en la parte inferior (Fig. II.2.4).

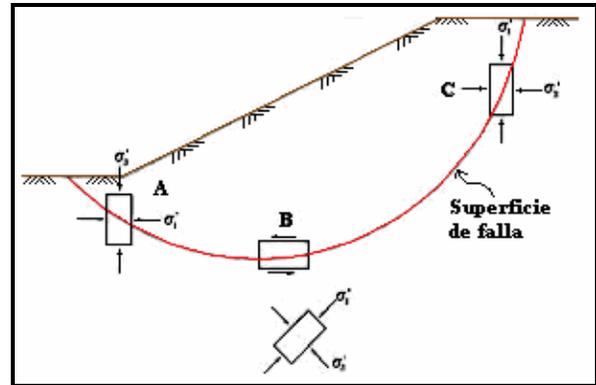


Figura II.2.4. Esfuerzos principales en la superficie de falla de un talud.

II.2.5. ENVOLVENTE DE FALLA

Con el círculo de Mohr se representa, o describe, el estado de esfuerzos en el interior de un medio térreo, mientras que la resistencia al cortante de los suelos se presenta, utilizando la envolvente de falla Mohr - Coulomb, lo cual equivale a alcanzar una combinación crítica de esfuerzos; por encima de la envolvente de falla no pueden existir esfuerzos; esta envolvente es generalmente una línea curva que se puede representar por:

$$\tau = A (\sigma')^b$$

Donde:

- τ : Resistencia al cortante
- σ' : Esfuerzo normal efectivo
- A y b: Constantes

En la práctica esta curva se considera aproximada por una recta dentro de un intervalo de esfuerzos (Fig. II.2.5) y queda representado por:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

Donde:

- c' : Intercepto del eje de resistencia (cohesión)
- ϕ' : Pendiente de la envolvente (ángulo de fricción)

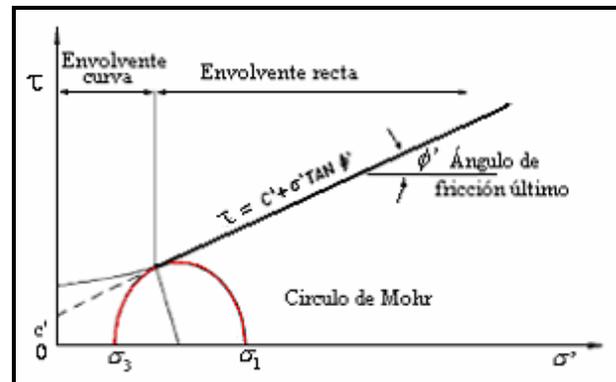


Figura II.2.5. Envolvente de falla o ley de resistencia Mohr-Coulomb

II.2.6. TRAYECTORIA DE ESFUERZOS

Este método permite estudiar el comportamiento del suelo en campo o laboratorio. La trayectoria de esfuerzos muestra estados sucesivos de esfuerzos en un espacio de esfuerzos p - q , donde p y q corresponden a los máximos esfuerzos normales y de cortante en el plano de falla del suelo y que se pueden conocer a partir del círculo de Mohr.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

De acuerdo con Lee (1996), se pueden trazar tres tipos diferentes de trayectorias (Fig. II.2.6):

- Trayectoria de esfuerzos efectivos, la cual pretende presentar el verdadero comportamiento de la muestra de suelo.
- Esfuerzos totales menos presión de poro estática; muestra el estado de esfuerzos en el suelo con un margen para la presión de poro que es la presión en exceso generada a medida que el suelo experimenta deformaciones.
- Esfuerzos totales; muestra la trayectoria de las coordenadas de los esfuerzos totales solamente.

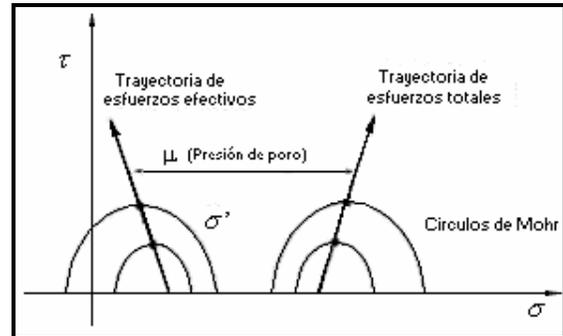


Figura II.2.6. Trayectorias de esfuerzos.

II.2.7. PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS

La cantidad de agua que se mueve en el suelo, la capacidad del mismo para almacenarla y permitir su circulación, son de las propiedades hidrogeológicas más importantes que influyen en la estabilidad de una ladera; se incluyen propiedades intrínsecas de las partículas, presión de poro y la distribución de los macroporos en la matriz del suelo; estos factores tienen que ver con: la cantidad de agua que entra en el suelo, la permeabilidad del mismo (k), la pendiente del terreno, la profundidad del nivel freático, la evapotranspiración y la manipulación de la ladera.

La *porosidad* (n) es la relación existente entre el volumen de vacíos de una masa de suelo y el volumen total que la conforma, mientras que la *relación de vacíos* es la relación existente entre el volumen de vacíos de una masa de suelo con su volumen de sólidos. La *porosidad eficaz* en el movimiento del agua a través del terreno, representa el volumen de poros interconectados entre sí; esta característica está dada por la relación existente entre un llamado volumen eficaz y el volumen total del suelo.

Entre los factores de los que es función la porosidad de un material, se encuentran:

- La textura (forma, tamaño y disposición de las partículas).
- La composición (tipo de material).
- Los procesos geológicos evolutivos del material.

La *permeabilidad o conductividad hidráulica* (k), es una propiedad que está definida como la capacidad de un material o medio poroso, para permitir el flujo de agua a través de él. Implica la determinación de la capacidad de conducción de un determinado fluido.

La permeabilidad de un suelo (Lambe y Withman, *op. cit.*) puede medirse en laboratorio o en campo; depende mucho de la estructura del suelo, tanto la microestructura o disposición de las partículas como de la macroestructura, (estratificación, discontinuidades, etc.). El coeficiente de permeabilidad se utiliza para cuantificar esta propiedad, y depende de las características del fluido y del suelo.

Terzaghi and Peck (*op. cit.*) proponen diferentes tipos de coeficientes de permeabilidad dependiendo del tipo de depósito natural del suelo.

Tabla II.2.7.1. Coeficientes de permeabilidad dependiendo del tipo de depósito.

TIPO DE DEPÓSITO	VALOR DE k (cm/s)
Depósitos fluviales	0.02 – 0.40
Depósitos glaciales	< 0.0001– 2.00
Depósitos eólicos	
Arena de medano	0.1 – 0.3
Loess	de 0.001 +/- a 0.0001+/-
Depósitos lacustres y marinos (no costeros)	
Arenas muy finas uniforme	0.0004-0.0064
Limo orgánico muy inestable	0.0001 – 0.005
Arcilla	< 0.000 0001

Terzaghi and Peck, 1967; adaptado por Suárez García O. G.

En la tabla II.2.7.2 se presenta la clasificación de los suelos, asignando diferentes nombres de *grados de permeabilidad* dependiendo de los valores de k que presenten.

Tabla II.2.7.2. Grados de permeabilidad del suelo.

GRADO DE PERMEABILIDAD	VALOR DE k (cm/s)
Elevada	Superior a 10^{-1}
Media	$10^{-1} – 10^{-3}$
Baja	$10^{-3} – 10^{-5}$
Muy Baja	$10^{-5} – 10^{-7}$
Prácticamente impermeable	< de 10^{-7}

Lambe y Whitman, 1999.

La viscosidad y el peso específico del fluido tienen influencia sobre el valor del coeficiente de permeabilidad de los suelos. Las características del suelo que tienen influencia sobre la permeabilidad son: *granulometría, relación de vacíos, composición, estructura y grado de saturación*.

Estas características están estrechamente relacionadas entre sí. La permeabilidad varía con el diámetro de la partícula; mientras más pequeñas son las partículas del suelo, menores serán los vacíos que constituyen los canales de flujo y por lo tanto, más baja será la permeabilidad.

En limos y arenas resulta más práctica una relación entre la permeabilidad y el tamaño de las partículas que en arcillas, ya que en ellos las partículas son aproximadamente equidimensionales y las diferencias de estructura no son tan dispersas como en las arcillas.

La influencia de la composición del suelo sobre la permeabilidad suele ser de poca importancia en limos, arenas y gravas (con excepción en la mica y la materia orgánica) pero tiene gran importancia en las arcillas.

De los iones de cambio más comunes, el sodio es el que da lugar a la permeabilidad más baja en la arcilla; cuanto menor es la capacidad de cambio iónico de un suelo, menor es la influencia de los iones de cambio sobre la permeabilidad.

La estructura del suelo influye sobre la permeabilidad, ya que es una de las características más importantes de este, especialmente en los de granos finos.

Al comparar suelos con una misma relación de vacíos, encontramos que a mayor estado floculado, mayor permeabilidad, y a mayor estado disperso, mínima permeabilidad.

El otro factor que tiene gran influencia en la permeabilidad es el grado de saturación, por ejemplo, en suelos arenosos, cuanto mayor sea el grado de saturación, mayor será la permeabilidad.

II.3. PROCESOS Y EFECTOS EN TALUDES Y LADERAS

Los procesos que favorecen un deslizamiento de ladera son la meteorización, la gravedad, el agua superficial y el agua subterránea; por lo que a continuación se incluye una explicación breve de cómo estos, actúan para que se generen las condiciones que desestabilizan una ladera.

II.3.1. PROCESOS DE METEORIZACIÓN

Meteorización (Tarbuck y Lutgens, 1999), es el proceso de desintegración física y química de los materiales sólidos en o cerca de la superficie de la Tierra. La meteorización física rompe las rocas sin alterar su composición y la meteorización química descompone las rocas alterando lentamente los minerales que las integran. Ambos procesos se desarrollan conjuntamente y producen fragmentos que se transportan mecánicamente o en solución como es el caso de la erosión.

Los procesos de meteorización contribuyen a la formación del suelo. La meteorización física resulta, en primer lugar, de los cambios de temperatura, tales como el calor intenso y la acción de congelación del agua en las grietas de las rocas; también influye la acción de algunos organismos vivos como son las raíces de los árboles o algunos animales con sus madrigueras. Los cambios de temperatura expanden y contraen las rocas alternativamente, causando granulación, separación en escamas o una laminación de las capas exteriores.

Las heladas (Tarbuck y Lutgens, *op. cit.*) producen tensiones en los materiales debido a la solidificación del agua y sus efectos de contracción - dilatación. La solidificación del agua afecta principalmente cuando el agua en estado líquido, al introducirse en grietas o hendiduras que puedan existir en los materiales del talud, se solidifica, convirtiéndose en hielo y por tanto aumentando de volumen, lo que produce un efecto de cuña aumentando las discontinuidades, las que a su vez facilitan la fragmentación y/o inestabilidad del terreno. Los fenómenos de dilatación - contracción son debidos a los cambios de temperatura extremos en intervalos cortos de tiempo, dando lugar a agrietamientos.

La acción del hielo y el ensanchamiento exponen a las capas más profundas a la meteorización química. Este tipo de meteorización altera la composición mineral original de la roca de diferentes maneras: disolviendo minerales en agua y debilitando los ácidos del suelo por oxidación, produciendo una reacción química con el dióxido de carbono y por hidratación, proceso mediante el cual el agua se combina y reacciona químicamente con los minerales.

Plantas, como los líquenes, también descomponen determinadas rocas al extraer nutrientes solubles e hierro de sus minerales originales.

En los taludes para alojar una carretera, los principales causantes del deterioro son la gravedad, los cambios de temperatura, el agua y los elementos biológicos; actúan de forma conjunta. El ambiente climático, es uno de los factores principales para la meteorización, mientras que la topografía del terreno, la biosfera y la hidrosfera son agentes que contribuyen a incrementar o disminuir los efectos que marcan esos factores básicos.

II.3.2. PROCESOS GRAVITACIONALES

Al ser la gravedad un campo de fuerza presente en todos los procesos exógenos, se puede decir que es el agente primario. En muchos casos la gravedad propicia indirectamente el transporte, movilizandolos determinados cuerpos, por lo general agua líquida o sólida, y éstos pasan a ser los agentes activos, desempeñando el trabajo de mover los materiales. A veces no existe ese elemento intermedio y es a partir de la gravedad como se realiza el trabajo de transporte de materiales en la superficie del terreno, por ejemplo, propiciando movimientos de autotranslación; en estos casos la gravedad debe considerarse como agente específico.

Así pues, la pendiente del talud resulta determinante en la estabilidad del terreno, ya que estos, al ser escarpados favorecen los arrastres, posibilitando que se renueve la superficie expuesta a los agentes meteóricos; sin embargo, dificultan la concentración de humedad e impiden la estabilidad necesaria para la meteorización química. Los movimientos de autotranslación tienen en su mayoría un carácter masivo, aunque no siempre es así. En concreto, la caída de materiales frecuentemente se produce en forma individual o secuencialmente y no de forma masiva.

La *gravedad* es la principal fuerza responsable de los movimientos en masa. En una superficie inclinada como una ladera, la gravedad al actuar hacia abajo es una fuerza que tiene dos componentes: una componente que actúa normal a la superficie de contacto y otra que actúa de forma tangencial a la misma (Fig. II.3.2).

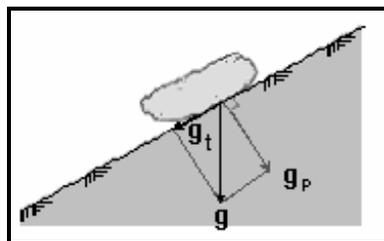


Figura II.3.2. Componentes tangencial y normal sobre un plano inclinado de la acción gravitatoria (Tulane University, 2001).

La componente perpendicular de la gravedad g_p ayuda al objeto a permanecer en su lugar, la componente tangencial g_t genera esfuerzos cortantes paralelos a la superficie del talud. Si la pendiente del talud aumenta, los esfuerzos cortantes aumentan, mientras la componente perpendicular disminuye.

Para la *resistencia cortante* del suelo se consideran todas las fuerzas que se oponen al movimiento, entre ellas están las debidas a anclajes, pilotajes, o algún tipo de reforzamiento artificial a la masa, así como las fuerzas resistentes que naturalmente presentan el propio terreno, incluyendo la resistencia a la fricción y la cohesión del material.

Si el esfuerzo cortante actuante es mayor que el esfuerzo cortante resistente entonces se producirá el movimiento o falla del material; sin embargo, no en todos los casos que cumplen esta condición, se presenta la falla del suelo, ya que cuando se tiene el caso en que la falla la determina la resistencia residual del terreno, es necesario precisar las condiciones de esfuerzos que permitan identificar o establecer el o los mecanismos de falla y la magnitud de los índices de seguridad con los que se cuantificará la estabilidad del terreno.

El factor de seguridad (F_s) se evalúa como el cociente entre la resistencia y la acción, ya sea que ambos conceptos sean representados en términos mecánicos de momentos, fuerzas o directamente

esfuerzos cortantes para los que en el caso de resistencia del terreno sean requeridos en términos totales o bien efectivos. Cuando el F_s es menor de 1 el movimiento es inminente.

Por mucho que se den las condiciones favorables para el movimiento del terreno, si no hay una masa significativa, los desplazamientos carecerían de importancia o no se darían. De aquí que la potencia (espesor de los materiales) constituya una condicionante de contorno.

La estratificación condiciona a los posibles movimientos en cuanto representa un factor que propicia o no a los desplazamientos. Una inclinación de los estratos a contra-pendiente favorece la estabilidad, todo lo contrario de lo que ocurre con un buzamiento en el sentido de la pendiente topográfica.

II.3.3. PROCESOS HIDROLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS

Cuando se produce una lluvia (Tarbuck y Lutgens, *op. cit.*), parte del agua caída es absorbida por la vegetación, otra se infiltra en el terreno y otra rellena las irregularidades que se encuentran en la superficie. Si el agua retenida no se evapora y se produce una aportación continua, ocurre una saturación de los materiales y el agua empieza a fluir hacia zonas más bajas, dando lugar a encharcamientos y erosionando la ladera conforme el agua fluye, llamándose a esto escorrentía.

El daño producido por la escorrentía dependerá del tipo de material, de la pendiente y de la intensidad de las precipitaciones; estos procesos se producen cuando la superficie es lisa, situación que se da normalmente en los taludes.

La realización de un estudio hidrogeológico es de suma importancia debido al movimiento del agua a través de los suelos y rocas y al comportamiento de la presión hidrostática en estos. La hidrogeología de una zona está determinada por la litología, las estructuras y el clima; esto convierte a la geología en la base de la interpretación de los datos hidrológicos. Es así como el agua superficial y subterránea, además de provocar la saturación, sobrepeso de los suelos y la variación de las presiones ejercidas en el suelo y los materiales rocosos, genera procesos como la socavación, erosión de taludes y la disolución de rocas solubles, entre otros.

Un agente de mucha importancia al determinar la estabilidad de los materiales es el agua; de hecho, es un factor que normalmente desencadena deslizamientos por diversas razones, en diferentes procesos, entre las que podemos mencionar:

- Se genera un incremento en el peso de la masa de suelo debido al aumento en la humedad y por consiguiente favorece las fuerzas motoras en un deslizamiento.
- Se aceleran los procesos de meteorización y erosión en los materiales, tanto a nivel externo como interno.
- Cuando se igualan las presiones neutras del suelo a las presiones totales se genera el fenómeno de licuefacción.
- La presión de agua favorece la evolución de grietas de tracción, que incrementan las fuerzas motoras en los deslizamientos.
- Ante temperaturas extremas, la congelación del agua puede generar ampliación de las discontinuidades.
- La presencia de agua en los taludes, a escala general, disminuye su estabilidad.

Otros factores que influyen en la estabilidad de laderas son la fluidificación y el frente húmedo.

II.3.3.1.FLUIDIFICACIÓN

Se conoce como *fluidificación* cuando al agregar agua a un material no consolidado los poros que contienen aire se llenan de agua, produciéndose una tensión capilar que mejora el grado de cohesión del suelo, pero si el material se satura, la cohesión se reduce considerablemente y se elimina la fricción entre granos, haciendo que el material tienda a fluir como un líquido.

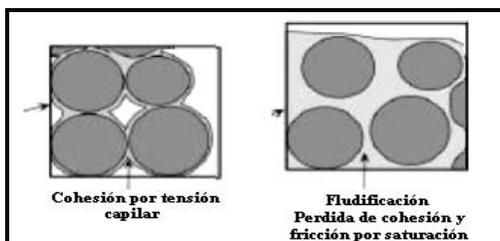


Figura II.3.3.1. Cohesión aparente y fluidificación (Tulane University, 2001; adaptado por Suárez García O. G.).

El comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo cohesivo depende de la cantidad de agua contenida en sus poros. El índice de liquidez (*IL*) de un suelo nos permite saber si su comportamiento es similar al de un sólido frágil, plástico, o líquido. El índice de liquidez se calcula con:

$$IL = (W_n - LP) / (LL - LP)$$

Donde:

- W_n: Contenido de agua natural del suelo
- LL: Límite líquido
- LP: Límite plástico
- IL: Índice de liquidez

Si $IL < 0$, el suelo remoldeado se comporta como un sólido frágil.

Si $0 < IL < 1$, el suelo remoldeado tendrá un comportamiento plástico.

Si $IL > 1$, el suelo remoldeado se comportará esencialmente como un líquido viscoso.

En las épocas de lluvia, la humedad de los suelos residuales superficiales se incrementa, haciendo que el índice de liquidez alcance valores superiores a la unidad, degradando completamente la resistencia del suelo, alterando sus propiedades plásticas y haciéndolo fluir.

II.3.3.2. FRENTÉ HÚMEDO

El *frente húmedo* es el efecto que produce la infiltración de agua en el subsuelo durante lluvias prolongadas al reducir las tensiones de succión en el suelo hasta un punto en el cual las pendientes son inestables. De acuerdo a *Lumb, 1975*, la tasa de infiltración del agua de lluvia en un suelo homogéneo es igual a la permeabilidad saturada del suelo, cuando no se forma estancamiento del agua en la superficie.

En la zona saturada los poros del suelo están llenos de agua, la presión poro-agua (U_w) iguala a la presión poro-aire (U_a), reduciendo la succión ($U_a - U_w$) a cero. En la zona de transición, la humedad del suelo permanece más o menos constante y el agua percola a través del suelo bajo la acción del gradiente potencial de gravitación; en esta zona la succión se reduce a valores muy bajos. En la zona de humedecimiento existe una transición muy marcada entre el contenido de humedad y la tensión por succión de los valores de la zona de transición a aquellos de la zona todavía no humedecida.

La profundidad de avance del frente de humedad (h) es directamente proporcional al tiempo (t). Durante las lluvias prolongadas, el frente de humedad puede penetrar perfiles completos de meteorización degradando, de todo el manto de suelo residual, la cohesión aparente (tensión capilar) a valores muy bajos; esto puede generar una disminución en la cohesión aparente, que producía el estado de no saturación.

II.3.4. CONDICIONANTES DE FRONTERA EN LA DINÁMICA DE TALUDES Y LADERAS

La condición de contorno básica en los desprendimientos, es la presencia de frentes rocosos escarpados, como son los taludes. Otras condicionantes serían: presencia de discontinuidades (fracturas y fallas de asentamiento) que faciliten el aislamiento de bloques, degradación de la resistencia de la roca por meteorización y acción de los fenómenos de erosión hídrica superficial.

En general, y para el conjunto de la dinámica de taludes y laderas, las condicionantes serían: la pendiente topográfica, la potencia del terreno susceptible al movimiento, la estratificación, la fisuración, los movimientos tectónicos que determinen superficies inestables, la facilidad del terreno para fracturarse, erosionarse y/o meteorizarse, la disponibilidad de agua, la presencia y densidad de determinadas comunidades vegetales, las actividades humanas que inducen a cambios en el terreno, y vibraciones bruscas que inicien los desplazamientos.

La pendiente topográfica juega un papel decisivo en tanto que condiciona al valor de la aceleración de la gravedad. Las pendientes críticas de equilibrio serán específicas de cada material y de sus características intrínsecas; pero además, para un mismo material con ciertas características dadas, dependerá de las restantes condiciones de contorno que le afecte.

II.4. ASPECTOS Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE TALUDES Y DESLIZAMIENTOS

Un talud es una masa de suelo o roca que no es plana sino que posee pendientes o cambios de altura significativos. Usualmente se denomina, talud cuando es de origen artificial y ladera cuando es natural.

Además es necesario tener clara la diferencia entre los siguientes conceptos: aludes (avalanchas), desprendimientos en frentes rocosos, deslizamientos, y movimientos de flujo; la combinación de las diversas circunstancias que los generan, son las que conllevan a diferenciarlos.

Los aludes y las avalanchas, son movimientos súbitos a nivel de suelo, que pueden soportar sus acumulaciones, cuando forman grandes potencias sobre laderas relativamente escarpadas y alcanzan pendientes de *estabilidad*; en estas situaciones, pequeñas perturbaciones físicas (onda acústica, microsismo u otro tipo de vibración en general) producen el desplazamiento, a favor de la gravedad de los materiales acumulados, originando que se desarrollen nuevas topografías con pendientes que tienden al equilibrio.

En ocasiones la propia avalancha puede transportar más materiales de los necesarios, para obtener perfiles de equilibrio. Como resultado, aparecerían laderas con pendientes temporales en poco *equilibrio*, en los sectores de cabecera.

Los desprendimientos son procesos extremadamente rápidos, corresponden a movimientos de porciones de terreno rocoso o no en forma de bloques aislados o masivos, siempre que en una gran parte de sus trayectorias desciendan por el aire en caída libre, volviendo a entrar en contacto con la topografía, donde se producirán saltos, rebotes y rodaduras.

En los relieves empinados, son frecuentes los desprendimientos por falta de apoyo lateral; se tratarían de desprendimientos relacionados con previas fracturas de distensión. Los bloques que se desprenden describen vuelcos cuando, en las caídas libres giran hacia el exterior, alrededor de ejes situados por debajo del centro de gravedad de la masa en movimiento. Cuando los desprendimientos son muy frecuentes, los detritos que se forman al pie de la ladera afectada pueden formar acumulaciones potentes.

Los deslizamientos de suelos y/o rocas son desplazamientos de masas, en forma súbita o lenta, sobre una superficie con cierta pendiente; estos movimientos de masa no son iguales en todos los casos, y para poder evitarlos o mitigarlos es indispensable saber las causas y la forma como se originan.

Los desprendimientos, deslizamientos y movimientos de flujo inciden, a gran escala, sobre la estabilidad de grandes volúmenes de roca o suelos. Suelen desencadenar desplazamientos de grandes magnitudes de masas y provocar efectos catastróficos. En las zonas volcánicas de los climas húmedos, son muy frecuentes los flujos de lodo. Cuando se presentan en fuertes pendientes, pueden alcanzar velocidades de hasta más de 200 kilómetros por hora (Tarbuck y Lutgens, 1999).

Estructuralmente, los deslizamientos se diferencian en: cohesivos (o coherentes) e incoherentes. En los deslizamientos cohesivos, la masa desplazada mantiene su estructura original, mientras que en los incoherentes, se adquiere una perturbación. El inicio de un deslizamiento se produce en el momento en que el esfuerzo cortante supera al valor de la cohesión del material, en una superficie de deslizamiento, cuando las fuerzas motoras son mayores a las resistentes.

Los movimientos de flujo de materiales se desplazan a favor de la gravedad de forma continua, donde las partículas se pueden desplazar a distintas velocidades según trayectorias que no tienen que ser necesariamente paralelas con régimen laminar, sin descartar excepcionales situaciones de turbulencia y que determinan a menudo superficies topográficas lobuladas a consecuencia de todo lo anterior. Los materiales susceptibles a este tipo de deslizamientos suelen tener proporciones significativas de limos y arcillas.

II.4.1. ELEMENTOS DE UN TALUD

En el talud se definen los siguientes elementos:

Altura. Es fácil definirla en taludes artificiales, pero difícil de cuantificar en los taludes naturales o laderas porque el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.

Pie o Pie de Ladera. Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior del talud.

Cabeza o Escarpe. Es la zona de cambio significativo de pendiente en la parte superior del talud.

Altura de Nivel Freático. Es la distancia vertical desde el terreno natural hasta el nivel de agua subterránea.

Pendiente. Es el ángulo de inclinación del talud o ladera con respecto a un plano horizontal; puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m/1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.

Existen además otros factores como son: la longitud, la convexidad (vertical), la curvatura (horizontal) y el área de la cuenca de drenaje, los cuales pueden definir el comportamiento geotécnico del talud.

II.4.2. NOMENCLATURA DE LAS PARTES DE UN DESLIZAMIENTO

En un deslizamiento típico, se pueden identificar diversas partes con la nomenclatura que se presenta a continuación:

Escarpe principal: Es una superficie muy inclinada en el terreno natural a lo largo de la periferia del derrumbe, causado por el desplazamiento del material del derrumbe fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material alterado forma la superficie de falla.

Escarpe secundario: Es una superficie muy inclinada en el material original, producida por movimientos diferenciales dentro de la masa que se desliza.

Cabeza: Es la parte superior del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

Cima: Es el punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

Base: Es el límite del material perturbado que se encuentra más alejado del escarpe principal.

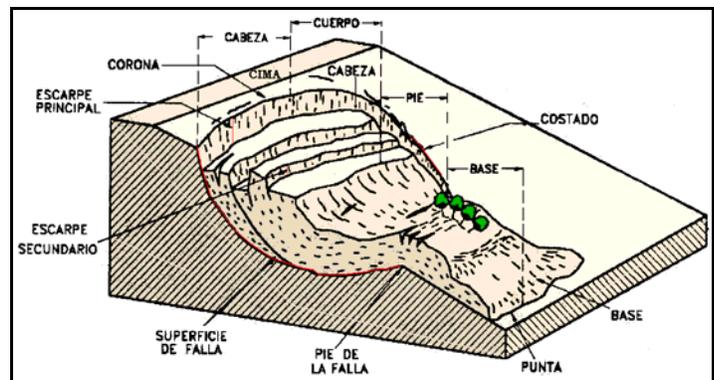


Figura II.4.2. Partes de un deslizamiento.

Punta: El punto del talón que se encuentra a más distancia de la cima.

Base de la superficie de falla: Es la línea de intersección (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

Costado: Es un lado del deslizamiento.

Corona: Es el material que está en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a las partes más altas del escarpe principal.

Superficie original del terreno: Es la pendiente que existía antes de que se presentara el movimiento que se considera. Si esta es la superficie de un antiguo derrumbe, se debe anotar este hecho.

Derecha e izquierda: Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda, deben referirse al deslizamiento visto desde la corona.

II.4.3. DIMENSIONES DE UN DESLIZAMIENTO

Para definir las dimensiones de un deslizamiento, se utiliza la terminología recomendada por el International Association of Engineering Geology (IAEG, 1990) (Fig. II.4.3):

Ancho de la masa desplazada (Wd): Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud de la masa desplazada (Ld).

Ancho de la superficie de falla (Wr): Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento, perpendicular a la longitud de la superficie de falla (Lr).

Longitud de la masa desplazada (Ld): Distancia mínima entre la punta y la cabeza.

Longitud de la superficie de falla (Lr): Distancia mínima entre el pie de la superficie de falla y la corona.

Profundidad de la masa desplazada (Dd): Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por Wd y Ld.

Profundidad de la superficie de falla (Dr): Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno medida perpendicularmente al plano conformado por Wr y Lr.

Longitud total (L): Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.

Longitud de la línea central (Lcl): Distancia desde la punta de la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos

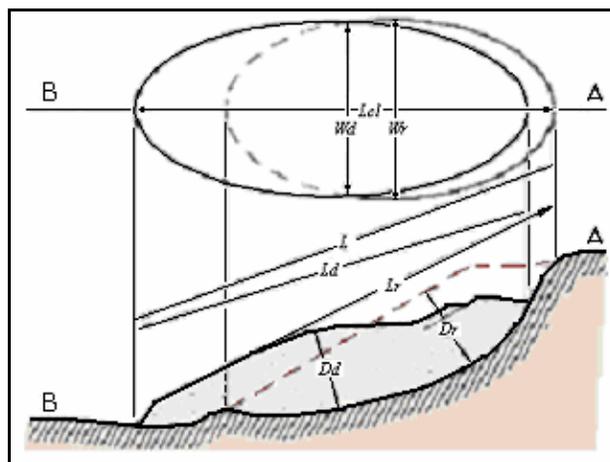


Figura II.4.3. Dimensiones de un deslizamiento. (IAEG,1990)

II.4.4. TIPOS DE MATERIALES DE UN DESLIZAMIENTO

Los términos siguientes han sido adoptados como descripción de los materiales que componen un determinado talud o ladera.

Roca: Se denomina *roca* al material duro y firme que se encontraba intacto en su lugar antes de la iniciación del movimiento.

Residuos: Se denomina con el nombre de residuos o *detritos* al suelo que contiene una significativa proporción de fragmentos gruesos, siempre y cuando más del 20% del material en peso, sea mayor de 2 milímetros de diámetro equivalente.

Suelo fino: Se le denomina al material de un deslizamiento en el que más del 80% de las partículas, son menores de 2 milímetros. Se incluyen los materiales desde arenas a arcillas muy plásticas.

Aunque estos términos se salen de la terminología tradicional de la mecánica de suelos, se les emplea más como elemento descriptivo general que como criterio estricto de la clasificación.

II.4.5. CLASIFICACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS

La clasificación de los deslizamientos trata de describir e identificar los cuerpos que están en movimiento relativo. Los principales tipos de movimientos son:

Caídos: Un caído, es una masa de cualquier tamaño que se desprende de un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte; desciende en forma rápida y puede o no ser precedido de movimientos menores que conduzca a la separación progresiva del bloque o masa. El material desciende principalmente a través del aire por caída, rebotando o rodando, ocurriendo en forma rápida sin dar tiempo a eludirlas.

Los *caídos de roca* corresponden a bloques de roca relativamente sana; los caídos de los residuos o detritos están compuestos por fragmentos de materiales pétreos; y los caídos de suelo corresponden a materiales compuestos de partículas pequeñas.

Inclinación o volcamiento: Este tipo de movimiento ha sido incluido recientemente en las clasificaciones geotécnicas y anteriormente no se reconocía como deslizamiento; consiste en una rotación hacia el frente, de una unidad o unidades de suelo o roca con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad desplazada.

Las fuerzas que lo producen son generalmente las unidades adyacentes, la acción de la gravedad, las presiones ejercidas por el agua en las grietas o juntas, expansiones, y los movimientos sísmicos. Es una especie de inclinación sin llegar al colapso. La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes de varios millones de metros cúbicos.

Dependiendo de las características geométricas y de la estructura geológica, la inclinación puede o no terminar en caídos o en derrumbes. En los suelos, el caso de *reptación* puede incluirse como una inclinación de materiales.

Derrumbes: Aunque se les menciona en la literatura con el nombre de deslizamiento, para objeto del presente contexto, se cambió el nombre por el de derrumbes que aunque es menos descriptivo, permite el empleo de la palabra deslizamiento en forma general para todos los tipos de movimiento de los taludes.

Este movimiento consiste en desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies que pueden detectarse fácilmente, o dentro de una zona relativamente delgada.

El movimiento puede ser *progresivo*, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda la que sería la superficie de falla.

Se pueden a su vez dividir en dos subtipos denominados rotacionales, y traslacionales o planares, según que la superficie de deslizamiento sea plana o cóncava respectivamente. Esta diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y estabilización a emplearse.

Derrumbe rotacional: Los desplazamientos ocurren o tienen lugar a lo largo de una superficie de ruptura de forma curva o cóncava, el giro tiene una naturaleza más o menos *rotacional* que se efectúa conforme a un eje dispuesto paralelamente a la ladera o talud y se encuentra encima del centro de gravedad del cuerpo en movimiento. (Fig. II.4.5.1). En tales casos, los frentes de avance

y/o las terrazas de asentamiento, podrían quedar incluso a contra-pendiente. El derrumbe rotacional es común en rocas con fracturamiento denso y aleatorio y/o muy alteradas.

En muchos derrumbes rotacionales se forma una superficie cóncava en forma de *cuchara*. El movimiento no es necesariamente circular, lo cual es común en materiales residuales donde la resistencia al corte de los materiales aumenta con la profundidad. Estos deslizamientos, tienen lugar a lo largo de una superficie de deslizamiento *interna*, de forma aproximadamente *circular* y *cóncava* (Fig. II.4.5.2).

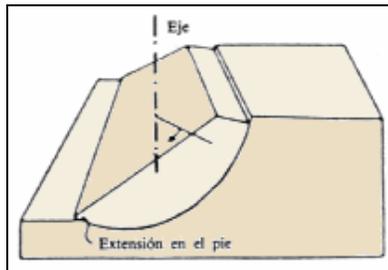


Figura II.4.5.1. Falla rotacional alrededor de eje.

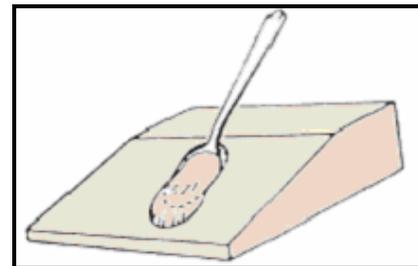


Figura II.4.5.2. Falla circular y cóncava.

En la cabeza del deslizamiento, el movimiento es aparentemente semi-vertical y tiene muy poca rotación, pero sin embargo, se puede observar que generalmente la superficie original del terreno gira en dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta.

Visto en planta, en la superficie del terreno suelen aparecer grietas concéntricas y cóncavas hacia la dirección del movimiento con un escarpe en su parte alta; en tanto más evidente, mayor desplazamiento sufre la masa deslizada (Fig. II.4.5.3).

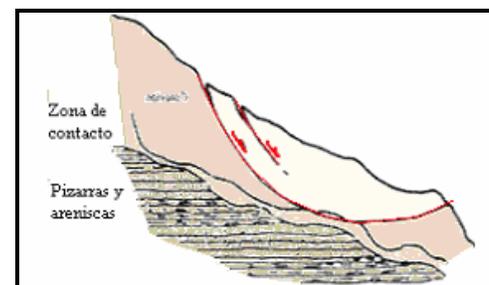


Figura II.4.5.3. Grietas concéntricas y cóncavas.

Frecuentemente, la forma y localización de la superficie de falla está influenciada por las discontinuidades, juntas y planos de estratificación. La influencia de estas discontinuidades debe tenerse muy en cuenta cuando se haga un análisis de estabilidad.

Los deslizamientos estrictamente rotacionales ocurren comúnmente en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales y por su facilidad de análisis son el tipo de deslizamiento más estudiado en la literatura.

En zonas tropicales este tipo de suelos no es común y cuando existe rotación, la superficie de falla es generalmente curva pero no circular; sin embargo, en zonas de meteorización muy profunda y en rellenos de altura significativa, algunas superficies de falla pueden aproximarse a círculos.

Dentro de estos, es frecuente que ocurran otros con forma curva que dan lugar a escarpes secundarios. En ocasiones ocurren varios deslizamientos sucesivos que conforman una zona de derrumbes rotacionales.

La salida de las superficies circulares sobre las que se produce la rotura, puede originarse en tres partes diferentes del talud, según las características de resistencia del material, la altura, la inclinación del talud, etc. (Fig. II.4.5.4).

- a. Si la superficie de rotura corta al talud por encima de su pie, se denomina *superficie de rotura del talud*.
- b. Cuando la salida se produce por el pie del talud y queda por encima de la base de dicho talud, recibe el nombre de *superficie de rotura de pie de talud*.
- c. Si la superficie de rotura pasa bajo el pie del talud con salida en la base del mismo y alejada del pie, se denomina *superficie de rotura de base de talud*.

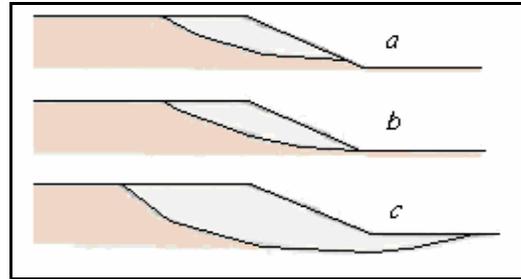


Figura II.4.5.4. Salidas de superficies circulares.

La velocidad de estos movimientos varía de lenta a moderada, teniendo gran influencia la inclinación de la superficie de rotura en el pie del deslizamiento (Fig. II.4.5.5).

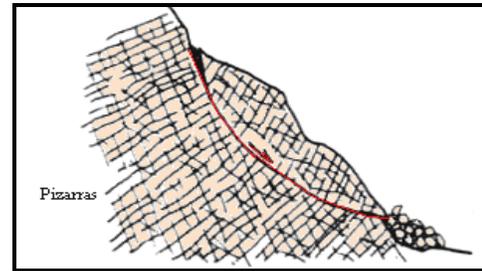


Figura II.4.5.5. Inclinación de la superficie.

Derrumbe traslacional: En el deslizamiento o derrumbe de traslación (Fig. II.4.5.6), el movimiento de la masa progresa hacia fuera o hacia abajo a lo largo de una superficie de ruptura más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. En muchos de estos deslizamientos la masa se deforma o rompe y puede convertirse en flujo.

La diferencia importante entre los movimientos de rotación y traslación está principalmente en la aplicabilidad o no de los diversos sistemas de estabilización; sin embargo, un movimiento de rotación trata de autoestabilizarse mientras uno de traslación puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo.

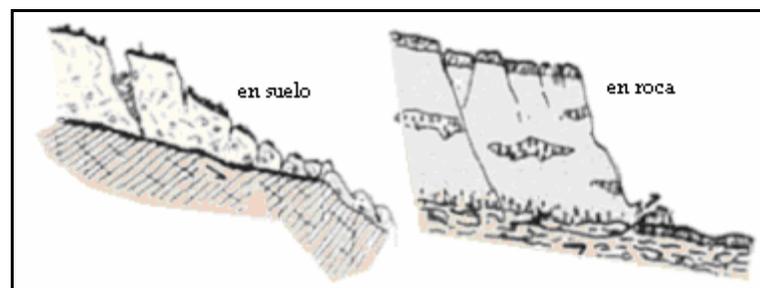


Figura II.4.5.6. Deslizamiento traslacional en suelo y en contacto suelo-roca respectivamente.

Los movimientos de traslación pueden ser controlados por el contacto entre la roca y los coluviones (depósitos de talud). Comúnmente el movimiento de la masa deslizada hace que esta quede sobre la superficie original del terreno.

Los deslizamientos traslacionales también dependen del número y de las condiciones de las superficies de debilidad, por lo que están controlados por las discontinuidades (fallas, juntas, planos de estratificación, esquistosidad, diaclasas, etc.).

Además influye la variación de la resistencia al corte de los materiales entre estratos de diferente naturaleza, los distintos tipos de relleno en las discontinuidades, el diferente grado y zona de cambio de la meteorización, entre otras.

Generalmente se desarrollan en macizos rocosos, con discontinuidades bien marcadas (Fig. II.4.5.7).

El progreso de estos deslizamientos tiende a ser indefinido, siempre que la inclinación de la superficie de deslizamiento sea lo suficientemente grande, y la resistencia al corte, inferior a las fuerzas desestabilizadoras.

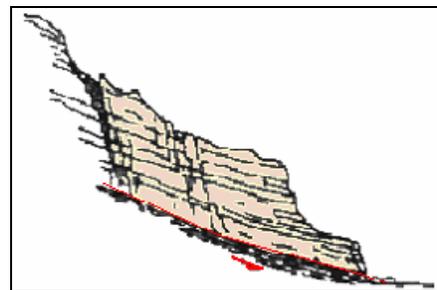


Figura II.4.5.7. Macizo rocoso con discontinuidades.

Por sus rasgos estructurales, los movimientos traslacionales se dividen en dos:

- *Deslizamientos planos de roca.* Se presenta en superficies planas formadas por discontinuidades que pueden estar rellenas de materiales arcillosos.
- *Deslizamientos en cuña.* El deslizamiento se presenta en masas rocosas en las que éste se desarrolla sobre la línea de intersección de dos discontinuidades planas.

En este tipo de deslizamientos la masa de terreno se desplaza hacia fuera y abajo a lo largo de una superficie más o menos plana o suavemente ondulada, con pequeños movimientos de rotación.

Existen deslizamientos traslacionales de gran variedad, formados por la intersección de dos discontinuidades o superficies de debilidad (Fig. II.4.5.8).

Cuando coinciden una serie de condiciones estructurales y geométricas determinadas en un macizo rocoso (Fig. II.4.5.9), pueden aparecer deslizamientos peculiares denominados pandeos (pequeños pliegues).

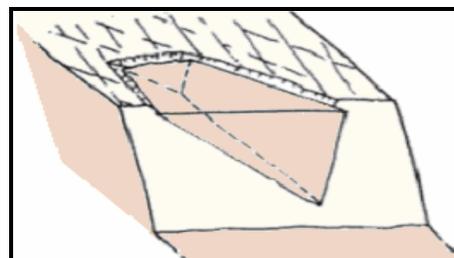


Figura II.4.5.8. Intersección de discontinuidades.

Este fenómeno aparece cuando la estratificación es subvertical y existe gran diferencia, entre al menos dos de las tres dimensiones que definen geoméricamente la estructura.

Generalmente en los deslizamientos de tipo traslacional el movimiento se produce de forma rápida.

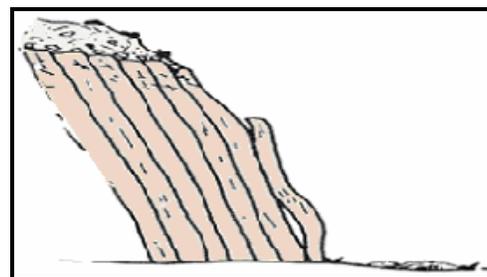


Figura II.4.5.9. Deslizamiento por pandeo.

Si existe una serie de diaclasas pseudoortogonales a la estratificación pueden producirse pandeos por flexión de capas fracturadas (Fig. II.4.5.10).

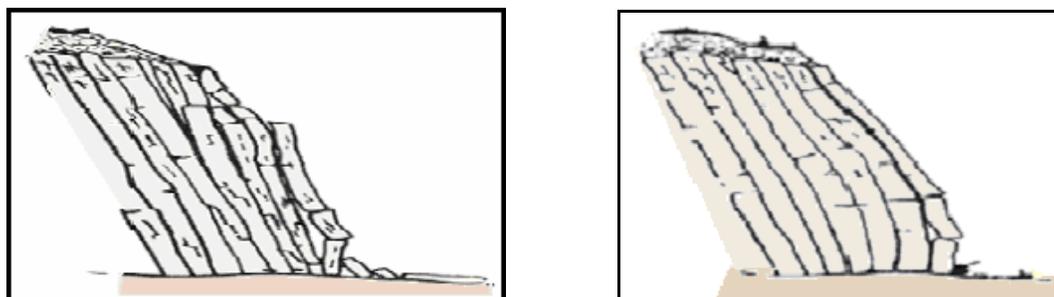


Figura II.4.5.10. Pandeo por flexión de capas fracturadas.

Flujos: En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos o de suelo.

Los flujos lentos pueden parecerse al fenómeno de reptación, pero la diferencia consiste en que en los primeros, existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente.

Los movimientos de flujo se pueden clasificar en solifluxión y reptación:

- La solifluxión es un movimiento, relativamente rápido, donde toman identidad la presión del agua intersticial y la plasticidad de los materiales.
- *Reptación.* Es la deformación que sufre la masa de suelo o roca como consecuencia de movimientos muy lentos por acción de la gravedad. Se suele manifestar por la inclinación de los árboles y postes, la aparición de grietas y el corrimiento de carreteras y líneas férreas.

La reptación se define como movimientos superficiales prácticamente imperceptibles, salvo después de largos períodos de medida. Estos movimientos suelen ocurrir en materiales con altos contenidos de arcillas que, con una cierta periodicidad, se saturan de agua.

Deslizamiento en roca: Los movimientos de deslizamiento en roca comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. La distribución de velocidades puede simular la de los líquidos viscosos; este tipo de movimiento ocurre con mucha frecuencia en zonas de alta montaña y poca vegetación en zonas tropicales.

Se observa una relación de estos flujos con perfiles de meteorización poco profundos en los cuales las fallas están relacionadas con cambios de esfuerzos y lixiviación ocasionados por la filtración momentánea del agua en las primeras horas después de una lluvia fuerte. Las pendientes de estos taludes son generalmente muy empinadas (más de 45°); su ocurrencia es mayor en rocas ígneas y metamórficas muy fracturadas y pueden estar precedidos por fenómenos de inclinación. Estos flujos tienden a ser ligeramente húmedos y su velocidad tiende a ser de rápida a muy rápida.

Flujos de residuos y suelo: Por lo general un deslizamiento de rocas termina en uno de residuos; en las avalanchas, la falla progresiva es muy rápida y el flujo desciende formando una especie de ríos de roca y suelo. Estos flujos generalmente se relacionan con lluvias ocasionales muy intensas en zonas de alta montaña, y la ausencia de vegetación, aunque es un factor influyente, no es un requisito para que ocurran.

Recientemente se han realizado estudios para cuantificar el nivel de lluvias que se requiere para producir flujos. Es de común ocurrencia que los flujos sucedan simultáneamente en sitios diferentes, dentro de una misma formación en el momento de una determinada lluvia. En los flujos de suelo, que son movimientos lentos de materiales blandos, frecuentemente se arrastra parte de la capa vegetal.

Los *flujos de lodo* en los cuales los materiales de suelo son muy finos y las humedades muy altas, (estado viscoso) llegándose al punto de suelos suspendidos en agua, se forman en el momento en que los materiales y la vegetación son debilitadas considerablemente por la misma, alcanzando

gran fuerza cuando la intensidad de las lluvias es fuerte y su duración es larga. Los flujos de lodo poseen grandes fuerzas destructoras que dependen de su caudal y velocidad.

Los flujos de suelo también pueden ser secos y más lentos de acuerdo a la humedad y pendiente de la zona de ocurrencia. En zonas de alta montaña y desérticas ocurren flujos muy secos frecuentemente pequeños pero de altas velocidades. Otro fenómeno importante en la producción de flujos son los movimientos sísmicos.

Movimientos complejos: Con mucha frecuencia los movimientos de un talud incluyen una combinación de dos o más de los principales movimientos descritos anteriormente, a los cuales se les denomina *complejos*.

Adicionalmente, un tipo de movimiento puede convertirse en otro a medida que progresa el fenómeno de desintegración. Es así como una inclinación puede terminar en caído, o un derrumbe en flujo.

II.4.6. ESTILO DE DESLIZAMIENTOS

Los deslizamientos pueden ser (Cruden and Varnes, 1996): *a. Complejo*, tiene al menos dos tipos de movimiento. *b. Compuesto*, ocurren simultáneamente varios movimientos en diferentes áreas. *c. Múltiple*, muestra movimientos repetidos del mismo tipo *d. Sencillo*, un solo tipo de movimiento.

En las siguientes figuras (II.4.6.1 y II.4.6.2) se muestran algunos de los estilos de deslizamientos rotacionales simples y múltiples.

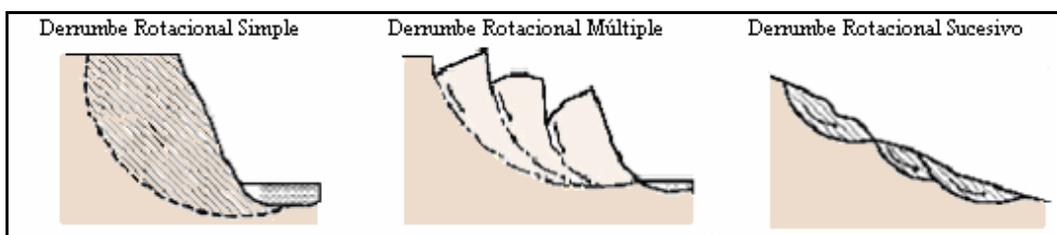


Figura II.4.6.1. Deslizamientos rotacionales simples y múltiples.

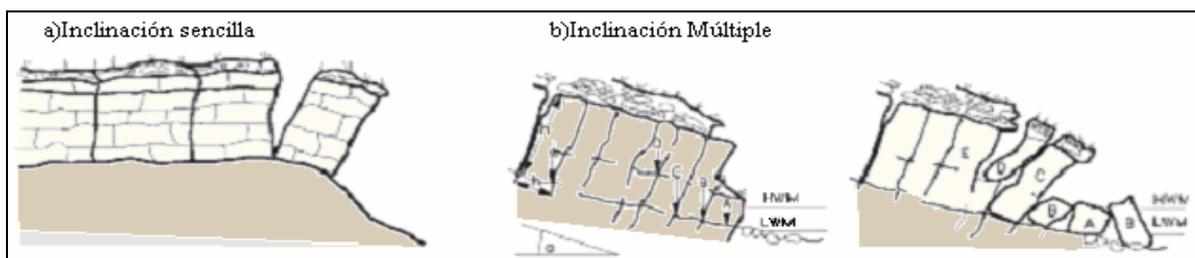


Figura II.4.6.2. Inclinaciones sencillas y múltiples (Cruden and Varnes, 1996).

II.4.7. CARACTERIZACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS POR SU CONTENIDO DE AGUA

Se pueden definir cuatro términos sencillos para caracterizar a los deslizamientos basándose en las condiciones de humedad que presenten:

Seco: No contiene humedad visible.

Húmedo: Contiene algo de agua pero no posee agua libre y puede comportarse como un sólido plástico pero no como un líquido.

Mojado: Contiene suficiente agua para comportarse en parte como un líquido y posee cantidades visibles de agua que pueden salir del material.

Muy Mojado: Contiene agua suficiente para fluir como líquido aún en pendientes bajas.

II.4.8. CARACTERIZACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS POR FORMACIÓN Y ESTRUCTURA GEOLÓGICA

La geología del sitio del movimiento es un factor determinante en el mecanismo de falla y en el comportamiento del movimiento en un talud, especialmente en ambientes de montaña donde la textura y estructura geológica definen generalmente la ocurrencia de fallas en los taludes.

Los taludes rocosos son macizos afectados por discontinuidades o superficies de debilidad que constituyen arreglos regulares o irregulares, que constituyen bloques de roca intacta de diferentes formas y dimensiones que definen su estructura interna (Gaziev, 1984).

Las discontinuidades regularmente se presentan agrupadas en familias, las cuales presentan orientación y características físicas similares. Las fallas y fracturas (discontinuidades visibles) forman un conjunto de bloques más o menos regulares y de aspecto monolítico (Marsal y Reséndiz, 1983).

II.5. DINÁMICA DE LOS DESLIZAMIENTOS

II.5.1. ETAPAS DE FALLA DE UN DESLIZAMIENTO

De acuerdo con las condiciones presentes en una ladera, se han determinado cuatro etapas de desarrollo:

1. Etapa de deterioro (o antes de la falla).
2. Caracterización por formación de superficie de falla.
3. Etapa post-falla (desde la aparición de la falla a la detención de la masa).
4. Posible reactivación.

II.5.2. VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO

La velocidad del movimiento tiene influencia sobre el poder destructivo de un deslizamiento.

Tabla II.5.2. Velocidad de los movimientos.

CLASE	DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD (mm/s)	DESPLAZAMIENTO	PODER DESTRUCTOR
7	Extremadamente rápido	$\geq 5 \times 10^3$	≥ 5 m/s	Catástrofe de violencia mayor, edificios destruidos por el impacto o el material desplazado, muchas muertes; escape improbable.
6	Muy rápida	de 5×10^3 a 5×10^1	de 5 m/s a 3 m / min	Algunas pérdidas de vidas, velocidad demasiado alta para permitir a todas las personas escapar.
5	Rápida	de 5×10^1 a 5×10^{-1}	de 3 m / min a 1.8 m/hora	Escape posible; estructuras, propiedades y equipos destruidos.
4	Moderada	de 5×10^{-1} a 5×10^{-3}	de 1.8 m/hora a 13 m / mes	Algunas estructuras temporales y poco sensitivas pueden mantenerse temporalmente.
3	Lenta	De 5×10^{-3} a 5×10^{-5}	de 13 m / mes a 1.6 m/año	Construcciones remediales pueden llevarse a cabo durante el movimiento. Algunas estructuras insensitivas pueden conservarse con mantenimiento frecuente.
2	Muy lenta	de 5×10^{-5} a 5×10^{-7}	de 1.6 m/año a 16 mm/año	Algunas estructuras permanentes no son dañadas por el movimiento.
1	Extremadamente lenta	$\leq 5 \times 10^{-7}$	≤ 16 mm/año	Imperceptible sin instrumentos; construcción posible pero deben tenerse precauciones.

Adaptado de Cruden and Varnes, 1996

II.5.3. ESTADO DE ACTIVIDAD DE UN DESLIZAMIENTO

De acuerdo con su estado de actividad, (Suárez, 1998) los deslizamientos se han caracterizado de la siguiente forma:

- *Activo*. Se está moviendo actualmente.
- *Reactivado*. Está nuevamente activo, después de haber estado inactivo.
- *Suspendido*. Ha estado activo pero que no se está moviendo en la actualidad.
- *Inactivo*. Llevan varios ciclos estacionales sin actividad.
- *Dormido*. Inactivo pero las causas del movimiento permanecen.
- *Abandonado*. Río que cambió de curso por lo que se están generando deslizamientos.
- *Estabilizado*. Suspendido por obras remediales artificiales.
- *Relicto*. Que ocurrieron hace varios miles de años.

El volumen de material medido antes del deslizamiento generalmente aumenta con el movimiento, debido a que el material se dilata. El término *factor de expansión* puede ser utilizado para describir este aumento en volumen, como un porcentaje del volumen antes del movimiento. En algunas ocasiones como en el caso de roca, el factor de expansión puede ser hasta de un 70%.

II.6. FACTORES DETONANTES (ACTIVACIÓN DEL MOVIMIENTO)

Existen diversas condiciones, activas o pasivas, que interviene en los procesos de inestabilidad de los taludes. El resultado es un aumento en los esfuerzos de cortante. Estos esfuerzos aumentan a lo largo de la superficie de falla hasta que ocurre el movimiento.

Entre los agentes detonantes más importantes, se tienen aquellos que son de origen antrópicos, de los cuales se puede evitar su influencia.

Si bien la gravedad que actúa sobre las laderas es la principal causa de un deslizamiento, su ocurrencia también depende de las siguientes variables:

- Clase de rocas y suelos.
- Topografía (lugares montañosos con pendientes fuertes).
- Orientación de las fracturas o grietas.
- Cantidad de lluvia en el área.
- Actividad sísmica.
- Actividad humana (cortes en ladera, falta de canalización de aguas, etc.).
- Erosión (por actividad humana y de la naturaleza).

En el fenómeno de detonación actúan una serie compleja de procesos los cuales en ocasiones, se traslapan con los factores de deterioro. Los factores que potencialmente pueden inducir inestabilidad en los taludes se pueden agrupar en cuatro categorías (Herrera, 2002):

1. Características y condiciones geológicas del terreno.
2. Procesos de tipo geomorfológico.
3. Procesos de origen químico, físico y biológico.
4. Procesos de origen humano o antrópicos.

Basándose en la forma en que actúan los factores detonantes, se pueden distinguir entre factores antecedentes y factores iniciadores o detonantes del movimiento. Los factores antecedentes hacen que una ladera sea susceptible a la falla reduciendo su grado de seguridad a un valor marginal, mientras que los factores detonantes dan inicio al movimiento.

II.6.1. CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES GEOLÓGICAS DEL TERRENO

Estas características son de tipo antecedente y se refieren a las condiciones del macizo de roca o suelo, dividiéndose en:

- *Litológicas*: Consiste en la presencia de formaciones suaves o de baja resistencia, material alterado, cizallado o fracturado.
- *Estratigráficas*: Consta de la presencia de capas masivas descansando sobre capas poco competentes, presencia de capas permeables y contraste entre la rigidez de los materiales.
- *Estructurales*: Incluye echados de discontinuidades muy inclinados, roca fuertemente fracturada o cizallada debido a fallamiento, plegamiento, enfriamiento y esfuerzos por deformación interna causada por erosión rápida.
- *Topográficas*: Involucra acantilados o fuertes pendientes causados por erosión y/o fallamiento.

II.6.2. PROCESOS DE TIPO GEOMORFOLÓGICO

Estos procesos pueden ser de tipo antecedente y también detonadores. Son los procesos que actúan en el modelado de la corteza terrestre y a través del tiempo producen cambios en el estado de equilibrio de las laderas (Herrera, *op. cit.*).

- Procesos endógenos:
 - Fenómenos tectónicos.
 - Fenómenos volcánicos.
- Procesos exógenos:
 - Erosión fluvial, erosión subterránea y costera por oleaje.
 - Remoción de la vegetación por erosión, incendio o sequía.
 - Deposito de materiales en forma natural sobre la cresta de taludes.

II.6.3. PROCESOS DE ORIGEN QUÍMICO, FÍSICO Y BIOLÓGICO

Este tipo de procesos, propician condiciones desfavorables en la estabilidad de las laderas al aumentar los esfuerzos actuantes en el terreno o al disminuir los esfuerzos resistentes del mismo. De estos, los principales son el clima y la sismicidad. Además, pueden ser de origen antecedente y también detonante.

- Meteorización.
- Fuertes precipitaciones en periodos cortos.
- Lluvias prolongadas.
- Sismos.
- Contracción y expansión de suelo en discontinuidades.

- Crecimiento de raíces en discontinuidades.
- Congelamiento del agua en discontinuidades.

II.6.4. PROCESOS DE ORIGEN HUMANO (ANTRÓPICOS)

Estos procesos pueden ser de tipo antecedente y también detonante. Son las actividades que realiza el ser humano y que afectan las condiciones de estabilidad de una ladera.

- *Excavación en laderas.* Adecuación para obras civiles (caminos, viviendas y canales).
- *Excavación de canteras.* Obtención de materiales para diversos usos.
- *Sobrecarga.* Volteo de material de rezaga de minas, canteras, excavaciones, colocación de rellenos, sobrecarga de las viviendas y terraplenes en la corona y el cuerpo del talud.
- *Irrigación.* Construcción de embalses de presas.
- *Fugas de agua.* Mantenimiento deficiente de redes de drenaje en tanques y líneas de conducción.
- *Deforestación.* Tala inadecuada e inmoderada de bosques y selvas.
- *Vibraciones del terreno.* Ocasionadas por perforaciones, explosiones, paso de vehículos pesados, vibraciones de maquinaria.
- *Creación de tiraderos con materiales muy sueltos.* Deficiencia en la compactación de los desechos industriales y urbanos.
- *Acción de cuña y palanqueo.* Inducido por cuñas, explosivos y trabajos manuales.

En las presas la disminución repentina del nivel del agua de embalse ya sea por fugas en el vaso o por la operación misma de la presa, provoca en algunas laderas deslizamientos; en la siguiente figura se muestra el proceso de una falla progresiva producto de la realización de un corte en arcilla.

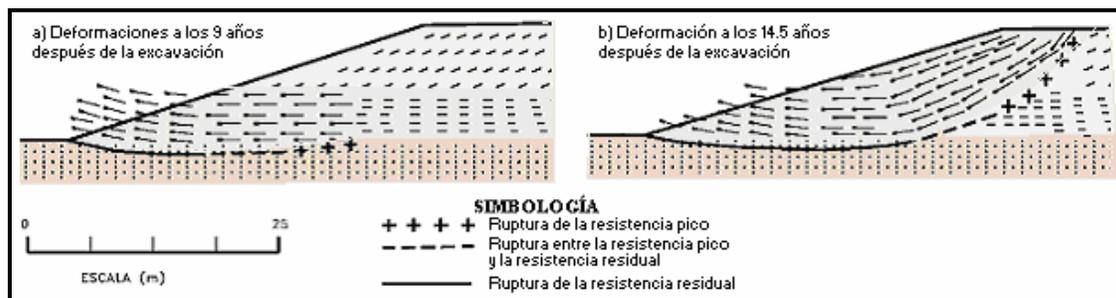


Figura II.6.4. Falla progresiva o deformaciones con el tiempo (Leroueil and Locat, 1996).

II.7. CONDICIONES QUE PROPICIAN LA FALLA DE UN TALUD

Las condiciones que propician la falla de un talud, varían de acuerdo a las circunstancias que se presenten en una determinada zona; a continuación se mencionan algunas de ellas y el mecanismo de falla que generan.

II.7.1. FALLA POR DESLIZAMIENTO

Para que ocurra un deslizamiento sobre un solo plano, es preciso que se satisfagan las siguientes condiciones geométricas (Hoek and Bray, 1996).

El plano sobre el cual ocurre el deslizamiento debe tener un rumbo paralelo o casi paralelo (dentro de aprox. $\pm 20^\circ$) al rumbo de la cara del talud.

El plano de la falla tiene que aflorar en la cara del talud. Si el echado del plano de falla es α y el del talud es β ; se debe cumplir que $\beta < \alpha$.

El *echado* (α) del plano de falla debe ser mayor que el *ángulo de fricción* (ϕ) en dicho plano; esto es, $\alpha > \phi$.

Si se trata de una falla en cuña limitada por dos planos, entonces el ángulo α se refiere a la inclinación de la línea de intersección.

II.7.2. FALLA POR VOLTEO

Las condiciones que propician un volteo, se pueden deducir con el modelo de un bloque que descansa sobre un plano inclinado. En este caso, la forma del bloque es tan importante como su peso. La forma se define por una altura (H) y por el ancho (B), el peso (W) y el ángulo de inclinación del plano (α).

El volteo lo determina la posición del vector peso con relación a la base del bloque; si el vector peso, que normalmente pasa por el centro de gravedad del bloque, llegara a caer fuera del tercio central de la base, ocasionaría un volteo; o bien, también se presenta volteo, si la sumatoria de momentos actuantes alrededor de un punto pivote en la base, es mayor que la sumatoria de momentos resistentes.

Los taludes muy escarpados y fracturados verticalmente muestran claras señales de la falla por volteo.

II.7.3. FALLA POR CAÍDA

Los desprendimientos por caída, son frecuentes en laderas de zonas montañosas escarpadas, acantilados o en cortes verticales; son caídas libres de bloques o masas rocosas separadas por planos de discontinuidad preexistentes (tectónicos, planos de flujo o grietas de tensión).

Los factores que provocan este tipo de falla, son la erosión y pérdida de apoyo al pie de los bloques, el agua en las discontinuidades, el empuje sísmico, la acción de raíces, entre otros.

El rodamiento se presenta cuando existen bloques que han sido separados o se han desprendido y yacen sobre la cara del talud, con la posibilidad de rodar pendiente abajo en caso de que se erosione la base o se induzca una fuerza que inicie el movimiento, el cual puede incluir rebotes, caída libre, rodamiento o deslizamiento dependiendo si el bloque es redondeado o tabular.

II.7.4. FALLA POR FLUJO

Los flujos son movimientos de masa de suelo, detritos o bloques rocosos con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un fluido. No se presentan superficies definidas de deslizamiento.

Los flujos están asociados a áreas montañosas donde un deshielo o una *precipitación abundante* pueden incorporar *detritos, material alterado y disgregado* (de origen natural o antrópico) de la cara de los taludes e incorporarlos en un flujo.

II.8. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA OCURRENCIA DE UN DESLIZAMIENTO

II.8.1. INVENTARIOS DE DESLIZAMIENTOS

Después de un análisis de las fotografías aéreas y correlaciones de campo, se digitalizan sobre los mapas topográficos las áreas de deslizamientos activos o inactivos que se detectaron en el área estudiada. Para la preparación de un mapa de inventario de deslizamientos se recomiendan los pasos siguientes (Brabb, 1993):

- Determinación de los recursos humanos disponibles.
- Entrenamiento del personal en el reconocimiento de los fenómenos.
- Preparación de las convenciones a utilizar y sistema de clasificación.
- Investigación de las fotografías aéreas disponibles del área a analizar.
- Preparación de los *mapas-base* en los cuales se van a dibujar los deslizamientos.
- Interpretación de las fotografías aéreas y transferencia de la información a los planos.
- Chequeos de campo de áreas representativas para asegurarse de la precisión de la información.

El producto final presenta la distribución espacial de los deslizamientos en forma de áreas afectadas o símbolos. La distribución de deslizamientos puede presentarse en forma de mapa de densidades o zonas de igual cantidad de deslizamientos.

II.8.2. ANÁLISIS DE PROBABILIDAD DE DESLIZAMIENTOS

La probabilidad de la ocurrencia de deslizamientos puede expresarse en los siguientes términos:

- a. El número de deslizamientos de ciertas características que puede ocurrir en un área por año.
- b. La probabilidad de que una ladera o talud particular presente deslizamientos en un determinado tiempo.
- c. Las fuerzas actuantes que exceden las fuerzas resistentes en términos de probabilidad sin tener en cuenta su frecuencia anual (factor de seguridad).

II.8.3. MÉTODOS DE CÁLCULO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

Existen varias formas de calcular la probabilidad de ocurrencia:

- Datos históricos en el área de estudio o en áreas de características similares.
- Métodos empíricos basados en correlaciones de acuerdo con sistemas de clasificación en estabilidad de taludes.
- Uso de evidencia geomorfológica junto con datos históricos o basada en criterio de los profesionales.
- Relación con la frecuencia e intensidad de los eventos detonantes, por ejemplo lluvias o sismos.
- Valoración directa basada en el criterio de un experto.
- Modelación de variables primarias como por ejemplo presiones fisiométricas contra eventos detonantes, junto con conocimiento de las características físicas.
- Aplicación de métodos formales probabilísticos, tomando en cuenta la incertidumbre en geometría, resistencia al cortante, mecanismos de deslizamiento y presiones piezométricas.

Es importante unir la información subjetiva con la información medida, lo cual puede hacerse formalmente o informalmente. Debe anotarse que existen una serie de datos importantes, los cuales no están disponibles para el análisis y cualquier valoración puede resultar incorrecta si no se tienen en cuenta.

II.9. ACCIONES Y MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y/O MITIGACIÓN

De los eventos sucedidos con anterioridad en la historia de México y muchos lugares del mundo, se han determinado una serie de recomendaciones y medidas para prevenir y/o mitigar los deslizamientos en las laderas, con el fin de evitar grandes daños y pérdidas tanto materiales, como de vidas humanas.

Algunas instituciones como el CENAPRED, se ha encargado de especificar algunas acciones recomendables para que toda persona tenga acceso a ella y prevenga las posibles consecuencias de la ocurrencia de este fenómeno en su localidad.

II.9.1. ACCIONES RECOMENDABLES PARA LA POBLACIÓN

La inestabilidad de laderas ha causado múltiples desastres; la prevención de estos desastres depende de los conocimientos y acciones que puedan tomar las autoridades de Protección Civil y los habitantes de las comunidades propensas a este tipo de peligro.

Es importante conocer las causas de estos movimientos, cómo afectan y cuáles son las acciones a tomar antes, durante y después de su ocurrencia; esto, con la finalidad de mitigar y prevenir consecuencias desastrosas; es necesario asegurarse de que todos los miembros de la comunidad sean partícipes del desarrollo de una cultura de prevención.

La potencialidad por deslizamiento de una zona sólo se puede determinar con estudios específicos, estableciendo que medidas deben tomarse para evitar o reducir la ocurrencia del fenómeno.

De acuerdo con el CENAPRED (2001) las acciones recomendables para la población civil, que se pueden realizar previamente a un proceso de inestabilidad son:

1. Investigar los antecedentes de los terrenos o si han ocurrido deslizamientos en el área.
2. Fomentar y apoyar que se implanten y respeten las normas y reglamentos que regulan la planificación y construcción de estructuras en áreas susceptibles a movimientos de ladera. Toda estructura debe ser construida en áreas lejos de taludes empinados, arroyos, ríos, canales y en las desembocaduras de canales provenientes de las montañas.
3. Vigilar el drenaje en los taludes aledaños; observar los lugares donde las corrientes de agua convergen. Inspeccionar rasgos que indiquen algún movimiento en las colinas como pequeños deslizamientos, flujos de escombros y/o múltiples árboles inclinados cuesta abajo.
4. Enterarse de los planes de evacuación en su área en caso de emergencia.

II.9.2. ACCIONES TÉCNICAS PARA IDENTIFICAR LADERAS INESTABLES

- Observar el sitio desde el aire y estudiar fotografías aéreas de la zona.
- Estudiar los movimientos previos que se puedan localizar.

- Analizar las causas de que haya ocurrido un determinado deslizamiento.
- Estudiar los registros referentes al clima local y la sismicidad de la región.
- Efectuar estudios geotécnicos de exploración, muestreo y pruebas de laboratorio, para determinar las características de resistencia, deformabilidad y permeabilidad.
- Efectuar los análisis de estabilidad necesarios.
- Diseñar la solución basada en los cálculos de estabilidad correspondientes.
- Instalar los sistemas de drenaje y/o estabilización necesarios.
- Afinar y determinar los taludes, además de plantar una cubierta vegetal apropiada.
- Preparar expedientes y registros del problema depositándolos y manteniéndolos en un sitio adecuado para ser usados en la inspección y el mantenimiento a lo largo de los trabajos enfocados a la estabilización, a mediano y largo plazo.

II.9.3. MEDIDAS ANTE LA INESTABILIDAD DE LADERAS

Al ser el deslizamiento de laderas un proceso natural favorecido por diferentes factores, las medidas a tomar con la finalidad de reducir el peligro por inestabilidad de laderas son:

- No cortar los árboles ni destruir la vegetación natural de la región.
- No excavar las laderas de los cerros en forma de cortes y terrazas sin autorización.
- Si la superficie del terreno natural se encuentra inclinada, es importante no permitir que el agua de los drenajes domésticos se infiltre en el terreno.
- En caso de fuga de agua, dar aviso inmediato a las autoridades de protección civil, para que se encarguen de los trabajos de reparación, con el fin de que no se reblandezca el terreno.
- Estar atento a las indicaciones de las autoridades de protección civil de la comunidad, sobre todo durante la temporada de lluvias.
- Si la casa se encuentra ubicada en la ladera de un cerro, se deben revisar constantemente las paredes, pisos y techos en busca de grietas o hundimientos.
- Considerar la posibilidad de que la ladera se vuelva inestable, si la ladera de residencia se ubica en una región que pueda ser afectada por sismos intensos.

La única acción que permite reducir los efectos por inestabilidad de laderas es la detección oportuna y la toma inmediata de decisiones por parte de las autoridades, especialistas y público en general, a fin de poner en práctica los planes de evacuación y salvamento previamente diseñados para cada localidad.

II.9.4. MONITOREO, MONITOREO SISTEMÁTICO Y ALERTAMIENTO

Los sistemas de monitoreo y alertamiento se utilizan para proteger las vidas y las propiedades, no para evitar los problemas generados por la inestabilidad de laderas naturales. Sin embargo, esos sistemas frecuentemente proporcionan el alertamiento de movimiento de laderas, con el tiempo suficiente para la construcción física de medidas que podrían reducir el peligro inmediato, a mediano o a largo plazo.

Las técnicas de monitoreo incluyen la observación de campo y el uso de varios instrumentos apropiados para medir los movimientos del terreno natural. En forma genérica, entre otros instrumentos se pueden incluir medidores de alambre, radares, rayos láser y medidores de vibración. La información proporcionada por estos instrumentos puede manejarse en tiempo real mediante un sistema de telemetría.

En las zonas identificadas como potencialmente peligrosas, en lo que se refiere a problemas de inestabilidad de laderas es importante implementar medidas de monitoreo permanente, tales como:

- Medición de la cantidad de agua de lluvia con pluviómetros, asociada a las características de saturación del material térreo que pueden desencadenar la inestabilidad de una ladera.
- Detección y medición directa de deformaciones y agrietamientos de la superficie de las laderas y sus tendencias de crecimiento.
- Medición directa de la presión del agua subterránea mediante la instalación de piezómetros.
- Los habitantes de una determinada zona, pueden detectar la inestabilidad de laderas cuando se presenta en forma lenta y paulatina.

Es necesario realizar una estimación sencilla de la lluvia que como se ha mencionado anteriormente puede desencadenar un movimiento de ladera, por lo que es importante medir regularmente la precipitación pluvial del sitio; se puede medir la cantidad al captar en un recipiente graduado el agua que cae.

Entre los distintos recipientes hay receptores en forma de probeta que tienen una graduación en milímetros ó pulgadas, unidades con las cuales se mide la lluvia. Es preferible el graduado en milímetros, ya que permite comparar los valores medios de precipitación con la cantidad de agua que cae en los días con lluvias poco comunes; este instrumento debe ser colocado al aire libre en un sitio donde no haya obstáculos para la acumulación de agua y que no esté expuesto a perturbaciones por actividad humana.

Los miembros de la comunidad deben ser informados de la importancia de este aparato, para que lo protejan y verifiquen que esté funcionando correctamente, además de que una persona se encargue de llevar el control de la cantidad de agua que se capta.

Para obtener una estadística confiable, la lluvia se debe medir diariamente de preferencia a la misma hora. Estos datos deben organizarse semanal, mensual y anualmente. Si no se cuenta con un dispositivo de medición, es factible usar una cubeta o recipiente que tenga marcas en milímetros y centímetros.

Para monitorear en forma sistemática y con la aplicación de las tecnologías apropiadas la evolución de la inestabilidad de una ladera, es importante tener presente la medición a lo largo del tiempo de ciertos parámetros como:

- Niveles de agua subterránea en la pendiente de la ladera.
- El desplazamiento o movimiento, incluyendo la profundidad de la superficie de falla o deslizamiento, la dirección, magnitud y velocidad del movimiento.
- Medición directa y continua de la evolución de la presión del agua subterránea, mediante la instalación de piezómetros de medición continua y señal telemétrica.

Entre los instrumentos que la tecnología actual nos permite disponer para obtener esta información, encontramos los siguientes:

- Inclínómetros, que permiten detectar dirección de la superficie de falla o deslizamiento.
- Extensómetros, que permiten indicar la magnitud del desplazamiento.
- Piezómetros, que permiten determinar los niveles de agua subterránea infiltrada en el cuerpo de una ladera.

Actualmente hay variadas técnicas y equipos de medición de las condiciones de estabilidad de una ladera, suficientemente precisos y con respuesta inmediata. Es indispensable diseñar el sistema de instrumentación y monitoreo, en función de las características geotécnicas, geohidrológicas y morfológicas particulares de cada problema en particular.

II.9.5. MÉTODOS PARA CORREGIR FALLAS EN LADERAS Y TALUDES INESTABLES

La acción más recomendable es consultar a especialistas en geotecnia. La línea de acción que ofrece más variantes es la de aumentar las fuerzas resistentes; algunas de estas son: el subdrenaje, la eliminación de estratos débiles o zonas de falla potencial, la construcción de estructuras de retención y el uso de tratamientos químicos.

Las líneas de acción que siguen los métodos correctivos son: evitar la zona de movimiento o desplazamiento, reducir las fuerzas motoras, aumentar las fuerzas resistentes.

Evitar la zona de falla suele estar ligado a acciones de reubicación de las zonas habitacionales, a la remoción total de los materiales inestables o a la construcción de estructuras que se apoyan en zonas firmes.

La reducción de las fuerzas motoras se puede lograr por dos métodos: Remoción de material en la zona de la falla, y subdrenaje para disminuir el efecto de empujes hidrostáticos y el peso de las masas de tierra, que es menor cuando pierden agua.

II.9.6. MÉTODOS GEOTÉCNICOS DE ESTABILIZACIÓN

Para la corrección de un talud, se deben conocer a detalle las propiedades intrínsecas de los materiales, la geometría del talud y los factores externos que influyen en su inestabilidad. Con objeto de definir las soluciones adecuadas, la aplicación de uno u otro tratamiento, estos deben ser valorados previamente, desde un punto de vista técnico y económico.

Para estabilizar una ladera en roca se puede recurrir a los siguientes métodos más usados (RENFE, 1999; González *et al.*, 2002; Gaziev, 2003):

- ***Modificación de la geometría del talud.***

La geometría de un talud se puede modificar al eliminar masa inestable o potencialmente inestable, o al eliminar material de la parte superior de la masa; ya que el peso del material contribuye al deslizamiento y la superficie de falla suele tener mayor inclinación.

• Instalación de drenaje.

Considerando la influencia del agua sobre la estabilidad de las laderas, el drenaje es muy efectivo, para llevar a cabo esta medida se requiere conocer las condiciones hidrogeológicas de la zona en estudio, para la adecuada elección del sistema a utilizar; estos, pueden ser de dos tipos: drenaje superficial o profundo.

Dentro del drenaje superficial se encuentra las *cunetas* que pueden ser *de coronación*, *de berma* o *de base o pie*, y su función es captar el agua fuera del talud; estas, se construyen paralelamente al talud.

En el drenaje profundo, encontramos las *zanjas con relleno drenante*, los *drenes horizontales o californianos* (perforaciones subhorizontales de 10 a 15 cm de diámetro y longitud de 20 a 40 m), las *galerías* y los *pozos verticales* con bombeo o drenes al exterior.

• Implementación de elementos estructurales para incrementar la resistencia.

Los anclajes consisten de elementos constituidos por barras o cables de acero alojados de la superficie al interior del terreno; sirven para estabilizar bloques y en taludes de roca fracturada.

• Protección superficial activa o pasivamente.

Para controlar los desprendimientos se puede recurrir a medidas de forma *activa o de estabilización* y *pasiva o de protección*, la primera contribuye al control impidiendo el movimiento de los bloques rocosos y la segunda al control de los bloques que ya han sido movidos de su lugar de origen.

Dentro de las medidas activas se puede:

- a) *Eliminar el bloque* inestable de forma controlada, para lo cual hay diferentes métodos y se debe tener cuidado de eliminar solo los adecuados, para evitar provocar el efecto contrario y desestabilizar otros bloques.
- b) *Atar el bloque* o bloques sueltos con cables anclados en los extremos o malla tupida anclada en la zona no meteorizada (de 10 a 25 m³).
- c) *Fijar el o los bloques* de mediano tamaño con barras de acero colocadas en perforaciones hechas en la roca y rellenas de resina o mortero; a mayor dimensión se recomienda utilizar anclaje.
- d) Utilizar un *sistema mixto de cables y malla* colocando una pantalla metálica, se le superponen cables en forma de retícula y se anclan a una zona estable, se utiliza para rocas muy fracturadas.
- e) *Colocar concreto lanzado* en la superficie del talud, con reforzamiento de una malla anclada; sirve para evitar desprendimientos, la infiltración y prevenir la meteorización, debe llevar drenes al exterior.

Entre las medidas pasivas encontramos:

- a) La *malla de guiado* que consiste de una malla de alambre de acero que se tiende de la parte superior a la base y su función es guiar los caídos (< 0.5 m³) para no dañar la malla.

- b) La *mallá de sostenimiento* que es una mallá de alambre de triple torsión que se ancla a 1 m aprox. del borde superior del talud y en la base con elementos móviles para su mantenimiento, se utiliza para material muy suelto y bloques pequeños.
- c) Las *trincheras o zanjas* ubicadas al pie del talud que sirven para recolectar los bloques.
- d) Las *barras de contención* que se colocan en la superficie o al pie del talud para interceptar los bloques en su caída, pueden ser de mampostería, concreto, gaviones, postes metálicos, redes o vigas de acero.

- ***Construcción de muros u otros elementos de contención.***

Los muros pueden ser de *recalce* o *anclados*, comúnmente se construyen al pie del talud, sirven para inestabilidades superficiales y se consideran elementos resistentes de contención o sostenimiento.

Los *muros de recalce* se emplean para servir de apoyo a rocas en voladizo para evitar su desprendimiento; los muros *anclados* evitan los volteos, son reforzados con anclaje y se le instala drenaje, se emplean para taludes en roca de mala calidad, con orientación desfavorable de las discontinuidades y grandes bloques o masas de roca inestables.

CAPÍTULO III

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

III.1. INTRODUCCIÓN

La gran diversidad de formas que presenta el relieve de México, hace que sea uno de los países del mundo con mayor número de características y variedades topográficas contrastantes y heterogéneas, y poseedor de un gran potencial en recursos naturales.

Las diversas conformaciones topográficas desempeñan un papel importante en las actividades económicas y sociales del país, puesto que influyen en las características climáticas, en el tipo de suelos y en la vegetación; éstos a su vez inciden en las actividades agrícolas, ganaderas, forestales e industriales, así como en los asentamientos humanos.

El territorio de la República se sitúa casi por partes iguales, al norte y sur del Trópico de Cáncer. México se ubica en una zona de transición climática, con condiciones de aridez en el norte, cálidos húmedos y subhúmedos en el sur y de climas templados o fríos en las regiones elevadas. El territorio mexicano es uno de los más complejos en características morfológicas y geológicas.

III.2. INFORMACIÓN DE LA REPÚBLICA MEXICANA

El conocimiento de la ubicación, de las características geológicas y climatológicas de la República Mexicana, permite comprender mejor el conjunto de condiciones en las que se encuentra esta. El marco geográfico, geológico y la climatología es la información que se considera primordial para esta investigación.

III.2.1. MARCO GEOGRÁFICO

La República Mexicana se encuentra situada en el norte del Continente Americano, junto con Canadá y Estados Unidos de América; se localiza en el hemisferio occidental hacia el oeste del meridiano de Greenwich.

La extensión territorial del país es de 1'964,375 km², con una superficie continental de 1'959,248 km² y una insular de 5,127 km².

México colinda en su parte norte con los Estados Unidos de América, a lo largo de una frontera de 3,152 km y al sureste con Guatemala y Belice con una frontera conjunta de 1,149 km de extensión (Atlas de México, 1999).



Figura III.2.1. Ubicación de la República Mexicana.

III.2.2. MARCO GEOLÓGICO

A continuación se hace referencia del Marco Geológico de la República Mexicana, analizando la dinámica regional que ha dado origen a las diversas estructuras mayores tales como las provincias fisiográficas, así como a las principales formaciones geológicas, geoformas y su relación con la tectónica.

III.2.2.1. FISIOGRAFÍA

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, con base en las características morfológicas y geológicas más sobresalientes, ha dividido al territorio mexicano en provincias fisiográficas que describen e integran el relieve del país.

Los límites políticos no suelen ajustarse a los naturales; por esto, algunas de las provincias se comparten con los países vecinos, como son los casos de la provincia *Gran Llanura de Norteamérica*, que se manifiesta con una pequeña penetración en México y se extiende hasta Canadá, y la provincia *Cordillera Centroamericana*, que ocupa mayores territorios en los países septentrionales centroamericanos que en México.

Las provincias fisiográficas de la República Mexicana son:

1. Península de Baja California.
2. Desierto Sonorense.
3. Sierra Madre Occidental.
4. Sierras y Llanuras del Norte.
5. **Sierra Madre Oriental.**
6. Grandes Llanuras de Norteamérica.
7. Llanura Costera del Pacífico.
8. Llanura Costera del Golfo Norte.
9. Mesa del Centro.
10. Eje Neovolcánico.
11. Península de Yucatán.
12. Sierra Madre del Sur.
13. Llanura Costera del Golfo Sur.
14. Sierras de Chiapas y Guatemala.
15. Cordillera Centroamericana.



Figura III.2.2.1. Provincias fisiográficas de la República Mexicana.

III.2.2.2. LITOESTRATIGRAFÍA

La República Mexicana presenta una gran variedad de rocas, estructuras y formaciones geológicas de interés económico, que surgieron como resultado de la acción de fenómenos volcánicos, tectónicos y otros, tanto internos como externos, ocurridos a lo largo del tiempo geológico.

La interpretación de todos estos elementos puede llevar a la reconstrucción de la historia geológica del territorio nacional y en consecuencia, a la comprensión del origen y posible distribución de muchos yacimientos de importancia económica, así como a su interacción con las diversas obras de ingeniería civil.

Las rocas predominantes en la República Mexicana son: al occidente, las ígneas extrusivas, principalmente cenozoicas, escasas metamórficas, ígneas intrusivas, extrusivas meso y paleozoicas; aún más escasas las sedimentarias paleozoicas. En la porción oriental se hallan profusamente rocas sedimentarias marinas meso y cenozoicas, principalmente calcáreas y en menor grado, rocas constituidas a partir de clásticos; además depósitos continentales del Cenozoico Superior que se encuentran ampliamente distribuidos.

La porción norte y noreste de México está constituida principalmente por rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas, así como por depósitos continentales recientes, que cubren gran parte de la Mesa Central, Sierras y Cuencas del Norte y la Paleocuenca de Burgos del Cenozoico. En diversas localidades se tienen pequeñas ventanas de rocas metamórficas principalmente del Precámbrico y Paleozoico. Un rasgo importante en esta zona de México es la Sierra Madre Oriental, cuya formación se inicia a mediados del Mesozoico y culmina al inicio del Cenozoico.

La porción septentrional de la Península de Baja California, está constituida de oriente a poniente por tres franjas: la primera batolítica y metasedimentaria mesozoica con una provincia cenozoica en el Golfo de California; la segunda volcanoclástica mesozoica y la tercera sedimentaria del Mesozoico Superior. La porción sur de esta península es una zona de rocas sedimentarias marinas y volcánicas cenozoicas, además de algunos depósitos continentales del Cenozoico Tardío y plutónicas mesozoicas, así como una secuencia de afinidad oceánica también mesozoica.

En la región de Sonora se encuentran rocas metamórficas y sedimentarias precámbricas; sedimentarias paleozoicas; ígneas, sedimentarias y metamórficas mesozoicas, con estructuras esencialmente de homoclinales en distribución errática de bloques colapsados, de sierras y cuencas, bajo una escasa cubierta volcánica cenozoica de la Sierra Madre Occidental que se interna en territorio estadounidense.

Rocas metasedimentarias de plataforma afloran primordialmente en el flanco occidental de la Sierra Madre Occidental, cuyo núcleo lo constituyen las rocas intrusivas ácidas del Batolito de Sinaloa. A mediados del Cenozoico sucede el evento volcánico piroclástico-ignimbrítico que origina la gran meseta volcánica, que es propiamente esta expresión fisiográfica, siendo la cubierta de este tipo más extensa de la Tierra.

En el Cenozoico Superior la neotectónica distensiva irrumpe en la mayor parte del territorio nacional, y adquiere su máxima expresión en la provincia de Cuencas y Sierras del Norte; como un reflejo de la apertura y migración del Golfo de California y quizá en la Cordillera Neovolcánica, se ubican rocas cenozoicas situadas transversalmente en las principales estructuras del país.

La Sierra Madre del Sur, es un complejo cristalino intrusivo-metamórfico principalmente del Mesozoico, alineado a la Trinchera de Acapulco, que hacia el sureste de la República continúa como el Macizo Chiapaneco del Paleozoico Superior.

En el área del Golfo de México, principalmente en el subsuelo de las Cuencas Terciarias del Istmo y Tabasco, así como las correspondientes plataformas continentales de Campeche, principalmente, yacen las reservas más importantes de hidrocarburos con que cuenta el país.

La península de Yucatán constituye una plataforma estable de rocas sedimentarias cenozoicas en posición horizontal sin perturbación orogénica importante.

III.2.2.3. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS MAYORES

La geodinámica global ha dado como resultado la complejidad estructural de México, que ha afectado a las diversas provincias geológicas que constituyen al país; del Mioceno al Cuaternario, la asimilación de la antigua dorsal del Pacífico Oriental bajo el continente, controló el fracturamiento y fallamiento distensivo con orientación noroeste-sureste, asociado al origen y evolución del Golfo de California y del sistema Motagua-Polochic, en el noroeste y sur de México respectivamente (Aguayo y Trápaga, 1996).

Estos esfuerzos han sido los más importantes del Mioceno al Cuaternario, sin detrimento de aquellos que fueron localmente significativos y que generaron otros sistemas estructurales. La información geológica y geofísica en el subsuelo y en la superficie es amplia en descripciones sobre sistemas de fallas, fracturas y pliegues con orientación noreste-suroeste; sin embargo, su origen es controvertido, por lo que es necesario analizar simultáneamente los rasgos fisiográficos y estructurales. Se han delimitado varios sistemas estructurales distensivos y de cizallamiento observándose que no son accidentes tectónicos locales cuando se integran regionalmente.

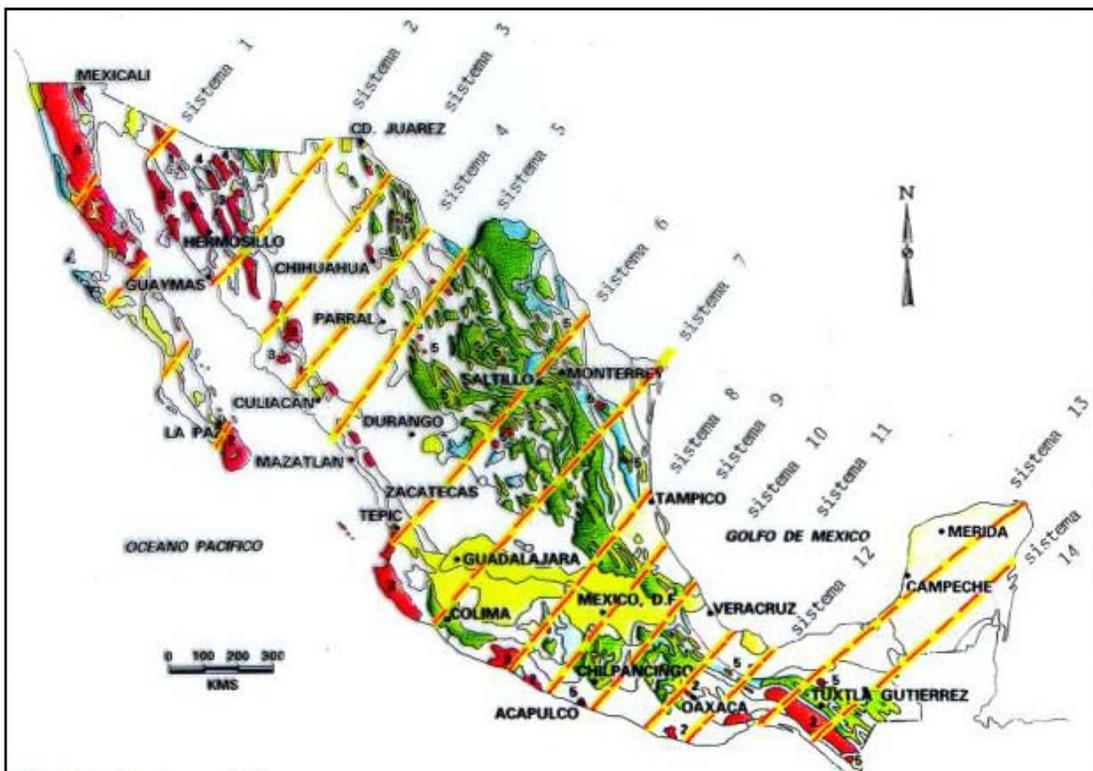


Figura III.2.2.3. Estructuras geológicas mayores NE - SW que afectan a la República Mexicana (Marín y Aguayo, 1987).

En la República Mexicana, de entre los rasgos morfotectónicos, se destacan estructuras mayores asociadas a los sistemas de fallas y fracturas con orientación noreste-suroeste. La delimitación de las alineaciones es complicada debido a que existen numerosas bifurcaciones en los sistemas de fracturamiento conjugados. No obstante, es posible visualizar los sistemas cuando se relacionan conjuntamente con los cambios de flexión estructural, contactos estratigráficos y fisiográficos, cauces fluviales mayores, distribución de fuentes termales y de focos sísmicos que así lo indican (Aguayo y Marín, 1987).

Los sistemas estructurales mencionados limitan a grandes bloques continentales, presentándose entre ellos otros no menos importantes, también regionales que cruzan el país. Las subplacas oceánicas en el subsuelo del país, se detectan mediante la ubicación de la profundidad y distribución de los focos sísmicos. Sus límites se manifiestan en la superficie como sistemas de fracturas y de fallas de tipo distensivo generalmente asociadas con aparatos volcánicos, así como con derrames ígneos de tipo fisural, fuentes hidrotermales y zonas mineralizadas (Aguayo y Marín, *op. cit.*).

III.2.2.4. HIDROGEOLOGÍA

En el territorio mexicano los ríos se encuentran en tres vertientes: Occidental o del Pacífico, Oriental o del Atlántico (Golfo de México y Mar Caribe) e Interior, en la que los ríos no tienen salida al mar.

En la vertiente Occidental o del Pacífico existen alrededor de 100 ríos, entre los que destacan por su caudal los ríos Balsas, Lerma-Santiago y Verde. La vertiente Oriental está constituida por 46 ríos importantes, entre los que destacan los ríos Usumacinta, Papaloapan, Grijalva, Coatzacoalcos y Pánuco. La vertiente Interior está formada por grandes cuencas cerradas. El sistema más importante es el del río Nazas-Aguanaval.

Para la delimitación de las 11 provincias hidrogeológicas del país se ha utilizado como base a la división de las regiones hidrológicas de la SARH, las provincias fisiográficas, geológicas y los terrenos tectonoestratigráficos (Fig. III.2.2.4). Para cada provincia es fundamental el comportamiento del agua subterránea. (Velázquez, 1994). Las once regiones y sus características hidrogeológicas son:

1. La *Península de Baja California* está constituida por valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos de aluvión separados por montañas alineadas. Compuestas por rocas sedimentarias y metamórficas de edad mesozoica y rocas volcánicas del Cenozoico; dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 1 - 100 m/d.
2. La *Planicie Costera del Pacífico* está compuesta por zonas litorales, que en algunas áreas se internan al continente varias decenas de kilómetros, compuestas por sedimentos arenosos hacia el interior; su base la forman rocas intrusivas y metamórficas del Mesozoico y volcánicas del Cenozoico; dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 5 - 100 m/d.
3. La *Sierra Madre Occidental* es una región disectada relativamente alta, compuesta por una compleja secuencia de rocas volcánicas del Cenozoico cubiertas en algunos lugares por delgados depósitos de suelos residuales dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 10 - 500 m/d.
4. Las *Cuencas aluviales del norte* se componen de valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos aluviales, separados por alargadas y discontinuadas cadenas de

- montañas compuestas, en parte, de rocas sedimentarios paleozoicas y mesozoicas, y en parte de rocas volcánicas del Cenozoico; dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 10 - 200 m/d.
5. La *Sierra Madre Oriental* es un área alta de cadenas montañosas anticlinales y valles sinclinales, compuestos por rocas sedimentarias del Mesozoico, cubiertas por delgadas capas de suelos residuales; dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 1 - 50 m/d.
 6. La *Meseta Central* está formada por valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos aluviales separados por suaves cadenas de montañas, compuestas por rocas sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico, además de rocas volcánicas del Cenozoico; dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 10 - 200 m/d.
 7. La *Planicie Costera del Golfo de México* es una planicie baja, poco disectada, que descansa sobre una interstratificación compleja de arenas, limos y arcillas del Mesozoico y Cenozoico, que progresivamente se hacen más densos hacia la costa; dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 5 - 100 m/d.
 8. La *Faja Volcánica Transmexicana* es un área de montañas altas compuestas por una secuencia compleja de rocas volcánicas del Cenozoico, con fosas profundas rellenas con material lacustre del Terciario y Cuaternario; dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 10 - 500 m/d.
 9. La *Sierra Madre del Sur* está integrada de áreas montañosas altamente disectadas compuestas por rocas metamórficas y paleozoicas, rocas sedimentarias del Mesozoico y rocas volcánicas del Mesozoico y Cenozoico, cubiertas en las altiplanicies por suelos residuales y en las costas por material granular; dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 1 - 200 m/d.

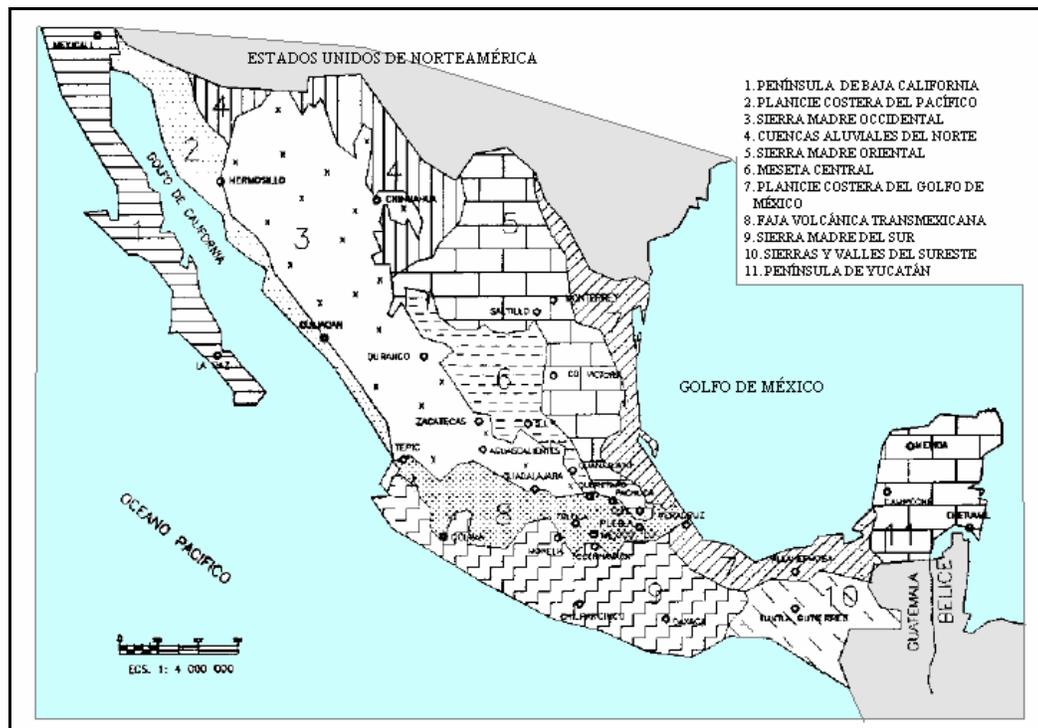


Figura III.2.2.4. Provincias hidrogeológicas de la República Mexicana (Velázquez, 1994).

10. Las *Sierras y Valles del Sureste* es un área relativamente alta de cadenas de montañas anticlinales y valles sinclinales, compuestos por rocas sedimentarias del Mesozoico, cubiertas por delgadas capas de suelos residuales; dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 1 - 50 m/d.
11. La *Península de Yucatán* es una extensa planicie baja constituida por rocas carbonatadas consolidadas a semiconsolidadas del Cenozoico; dentro de los rangos de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes la permeabilidad es de 10 - 200 m/d.

III.2.2.5. TECTÓNICA

La corteza de la Tierra se encuentra dividida en fragmentos denominados *placas* que se mueven unas con respecto a otras (Atlas de México, 1999). El territorio mexicano está contenido en cuatro placas tectónicas: Cocos, Pacífico, Norteamérica y Caribe. El movimiento relativo entre estas placas ocasiona que nuestro país se ubique en una de las zonas sísmicas más peligrosas del mundo (Fig. III.2.2.5).

La configuración geográfica actual de México es consecuencia de la interacción del bloque continental con las provincias oceánicas que lo circundan. En la región del Pacífico, la Península de Baja California se está separando del resto del continente con un movimiento hacia el noroeste.

Por otra parte, en el Pacífico Sur de México, desde Cabo Corrientes en el estado de Jalisco hasta Centroamérica, la placa oceánica de Cocos es asimilada por el continente a lo largo de una fosa oceánica a la que se conoce como *Trinchera de Acapulco* o *Mesoamericana*. (Aguayo y Trápaga, *op. cit.*).

En las provincias geológicas del Golfo de México y del Caribe, se tienen esfuerzos tectónicos de tensión o distensivos, que están actuando en los márgenes continentales; éstos a su vez, avanzan sobre los fondos profundos de las cuencas oceánicas, como consecuencia del desplazamiento de la placa tectónica de Norteamérica hacia el poniente, y la del Caribe hacia el oriente.

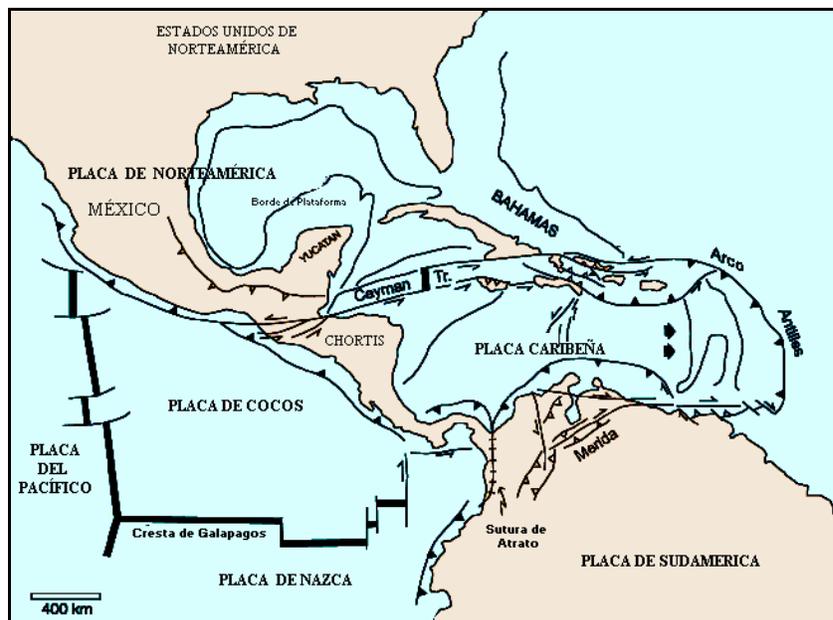


Figura III.2.2.5. Placas tectónicas en las que se localiza la República Mexicana (Marín-Córdova, 2004).

En el margen continental de la provincia del Golfo de México, la Sierra Madre Oriental continuó emergiendo por plegamiento y fallamiento, y al pie de la misma se formaban una serie de cuencas y subcuencas debido al rompimiento del basamento que subsidia hacia el golfo mencionado.

Estas depresiones marginales se hundían intermitentemente y se rellenaban con sedimentos provenientes de la misma sierra, depositándose en ambientes que variaban desde litorales hasta marinos someros y profundos, dependiendo de la actividad tectónica local.

Durante el Oligoceno y el Mioceno Inferior en la provincia del Golfo de México, las cuencas terciarias siguieron evolucionando con subsidencias continuas, presentándose un gran traslape de las secuencias estratigráficas del Mesozoico sobre las del Terciario. Desde el norte hasta el sur, el basamento del margen continental subsidió rápidamente y en forma simultánea con la emersión de la Sierra Madre Oriental.

En general, las montañas son el resultado de procesos y fenómenos geológicos (Atlas de México, *op. cit.*), como la actividad volcánica y el diastrofismo (plegamientos y fallas), derivados de la dinámica de las placas tectónicas.

Nuestro país ha sido en gran medida producto de esos fenómenos, ya que se encuentra dominado por montañas y volcanes; son pocas las regiones donde no predominan los sistemas montañosos, por ejemplo, la Península de Yucatán, la costa del Golfo de México y algunas planicies en el interior del país; se estima que el 70% del territorio mexicano es montañoso y el resto lo ocupan superficies planas.

Actualmente (Aguayo y Marín, 1987), la configuración de la República Mexicana se debe a los tres desplazamientos tectónicos mayores y de otros menores, que han estado actuando simultáneamente desde el Cretácico Superior Tardío, el Terciario y el Cuaternario; estos desplazamientos consisten en:

- Migración al occidente y al suroccidente de la Placa Continental de Norteamérica.
- Subducción, con dirección hacia el noreste de la Placa Oceánica del Pacífico.
- Movimiento inicial hacia el noreste y posteriormente al oriente de la Placa Oceánica del Caribe.

Se observan en el interior del continente y en sus márgenes, varios rasgos morfotectónicos mayores tales como: fracturas, fallas distensivas y de cizallamiento con orientación NE 45° - 55° SW, así como cabalgaduras cuya vergencia es hacia el norte-noreste.

Estos sistemas estructurales están asociados con hidrotermalismo, rocas volcánicas básicas, zonas de mineralización y focos sísmicos, y se extienden desde la vertiente del Pacífico hasta la Provincia del Golfo de México.

Durante la asimilación de la Placa Oceánica del Pacífico por el continente, fueron provocados estos rasgos estructurales; la litósfera oceánica está fragmentada en subplacas por fallas de transformación, cada una desciende hacia el manto con diferente inclinación y rumbo azimutal. Sus límites se reflejan superficialmente en forma de sistemas de fracturas y fallas de transcurrancia, cuyas paredes son casi verticales.

Debido a la geodinámica que existe entre las placas tectónicas (Aguayo y Marín, *op. cit.*), se han formado otras provincias geológicas destacadas las cuales se conocen como:

- Sierra Madre Oriental.
- Sierra de Chiapas.
- Cuencas Marginales.
- Sierra Madre Occidental.
- Golfo de Tehuantepec.
- Golfo de California.
- Cinturón Volcánico Transmexicano.

III.2.2.6. SISMICIDAD

La mayoría de los sismos en México se originan a lo largo de las fronteras entre las placas tectónicas, sin embargo, un número menor se generan en el interior del territorio, principalmente a lo largo de la faja volcánica, donde se concentra la mayor población de México.

En una recopilación que el Sistema Sismológico Nacional realizó entre 1964 y 1995, se determinó que en promedio, los sismos que se presentan al año y sus magnitudes, según la escala de Richter, son los siguientes:

- Cien sismos al año con magnitudes mayores o iguales a 4.5.
- Tres sismos al año con magnitudes iguales o mayores a 6.0.
- Un sismo de magnitud igual o mayor a 7.5 cada 5 años.

El mayor peligro lo presentan los sismos que ocurren a lo largo de las costas del Pacífico, entre las ciudades de Puerto Vallarta y Tapachula. No sólo se producen sismos con mayor frecuencia, sino también los mayores sismos registrados en México tuvieron su epicentro en estas poblaciones.

Estos sismos, que por su cercanía a las costas representan un grave peligro para las poblaciones costeras, también afectan al Valle de México, como se ha constatado durante los grandes sismos de 1911, 1957, 1979 y 1985.

La *Escala Richter*, establecida por el Dr. Charles F. Richter, representa la energía sísmica liberada en cada terremoto y se basa en el registro sismográfico.

Tabla III.2.2.6. Escala de Richter de sismicidad.

MAGNITUD	EFFECTOS DEL SISMO
Menos de 3.5	Generalmente no se siente, pero es registrado
3.5 - 5.4	A menudo se siente, pero sólo causa daños menores
5.5 - 6.0	Ocasiona daños ligeros a edificios
6.1 - 6.9	Puede ocasionar daños severos en áreas muy pobladas
7.0 - 7.9	Terremoto mayor que causa graves daños
8 o mayor	Gran terremoto, con destrucción total a comunidades cercanas

La República Mexicana se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas. Esto se realizó con fines de diseño antisísmico. Para realizar esta división (Fig. III.2.2.6) se utilizaron los catálogos de sismos de la República Mexicana desde inicios del siglo XX, los grandes sismos que aparecen en los registros históricos y los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos en el siglo pasado.

Estas zonas son un reflejo de que tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar durante un siglo.

- La zona A, es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.
- La zona D, es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.
- Las otras dos zonas (B y C), son zonas intermedias donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.

En el mapa siguiente se pueden observar el contorno de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, las zonas sísmicas y la división política.

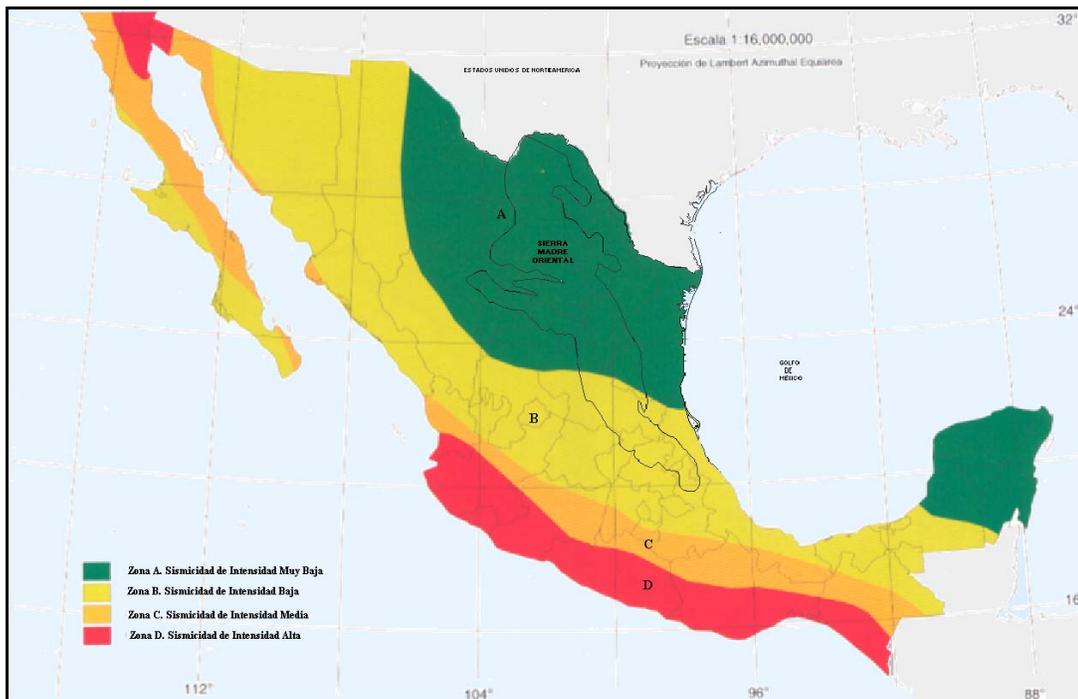


Figura III.2.2.6. Zonas Sísmicas de la República Mexicana. (Marín-Córdova, 2004)

Los sismos más significativos se localizan frente a las costas del Océano Pacífico y son producto de la subducción de la placa oceánica bajo la placa continental. Los eventos ocurren a lo largo de la falla o interface entre dichas placas denominada Fosa Mesoamericana. La falla se extiende desde Puerto Vallarta, hasta el sur de Costa Rica en Centroamérica. Las zonas de ruptura de los grandes sismos llegan a alcanzar hasta 200 km. El movimiento relativo entre estas placas ocasiona uno de los peligros sísmicos y volcánicos más altos del mundo.

III.2.3. CLIMATOLOGÍA

El clima es el resultado de la interacción de diversos elementos y factores atmosféricos como la lluvia, el viento, la vegetación, las nubes, la altitud, los cuerpos de agua y el relieve. A su vez, los

climas definen el tipo de flora y fauna que predomina en una región y hacen lo propio con el hombre y sus actividades.

El clima de acuerdo con las características que presenta, puede favorecer la inestabilidad del subsuelo al aportar una suficiente cantidad de agua. Ello debido a la presión que ejerce el líquido en los poros y fisuras del suelo. Así mismo, las lluvias y la formación de corrientes de agua por la superficie (escorrentía superficial) favorecen los procesos de erosión.

Las altas precipitaciones en combinación con el tipo de suelo, en algunos casos material muy alterado, fomenta la formación y aceleración de los deslizamientos, ya que por ejemplo, un suelo arcilloso se satura por la cantidad de agua recibida, se hace más pesado y aunado al grado de pendiente existente, se puede deslizar.

La recarga, transmisión y evapotranspiración, determinan el nivel del agua subterránea en el suelo del talud, influyendo en su estabilidad por duración de lluvias.

El manejo de la vegetación puede afectar el régimen de aguas subterráneas en laderas inestables durante ciertos periodos del año. Al remover o cambiar la vegetación se reduce significativamente la evapotranspiración y se incrementa la humedad del suelo.

La influencia del agua subsuperficial en la iniciación o aceleración de los deslizamientos, está bien documentada a través de estudios empíricos. Análisis regionales de diferentes áreas del mundo relacionan la distribución temporal de la lluvia y las tormentas a deslizamientos rápidos (So, 1971).

En las zonas tropicales los procesos que son influyentes en la estabilidad de taludes son principalmente asociados a la lluvia. Ya sea después de una tormenta o durante periodos lluviosos largos, todo esto se asocia al control del agua subterránea.

Debe diferenciarse el caso de zonas de precipitación alta permanente, en las cuales el nivel de agua freática es alto y constante y en donde un corte del terreno puede producir una falla casi inmediata del talud, generalmente a este caso se asocian deslizamientos pequeños.

Al caso de lluvias no tan fuertes pero duraderas, en donde el suelo se satura poco a poco hasta producirse la falla, el frente húmedo demora en alcanzar el nivel freático, a este caso se asocian movimientos de masa grandes. Para el estudio de los efectos de la lluvia sobre taludes se deben tratar varios aspectos (Suárez, 1998):

- Lluvias promedio y máximas anuales.
- Régimen de lluvias.
- Distribución espacio temporal de las tormentas.
- Lluvia acumulada.
- Intensidad de la lluvia y el desencadenamiento del deslizamiento.
- Tiempo de lluvia que produce deslizamiento.
- Ciclo hidrológico en el talud y sus vecindades.

El flujo subterráneo y los cambios en la cantidad de agua acumulada son críticos para la estabilidad del talud. La respuesta del régimen de aguas subterráneas a la lluvia es diferente de acuerdo al talud, formación geológica y características ambientales.

En las zonas cercanas al talud la respuesta de infiltración por lluvia suele ser inmediata, mientras que la respuesta por infiltración regional puede tomar varios meses dependiendo de la velocidad con la cual avanza el agua. Aunque se han desarrollado relaciones empíricas entre la ocurrencia de deslizamientos y su relación con las tormentas, pocos estudios enfocan el problema al efecto del agua subterránea en la estabilidad de laderas.

III.2.3.1. PRECIPITACIÓN

En gran parte de la República Mexicana la temporada de lluvias tiene lugar en verano. En mayo comienzan a presentarse lluvias esporádicas y en agosto se observa un breve lapso de disminución en las precipitaciones y aumento en la temperatura.

En nuestro país las lluvias son provocadas por los vientos alisios, provenientes del noreste; soplan desde áreas oceánicas de la parte media del Atlántico y dejan de soplar durante el invierno y primavera, ya que se desplazan hacia el sur; en esta época los vientos del oeste soplan en el territorio nacional, pero sin provocar lluvias porque son secos.

Los ciclones tropicales o huracanes son vientos muy húmedos que alcanzan gran velocidad; se dejan sentir en el país junto con los vientos alisios en la época de verano y, principalmente, en otoño. Afectan tanto la costa del Pacífico como la del Golfo de México.

Durante el invierno y al inicio de la primavera soplan corrientes de aire que provienen de Norteamérica y provocan en el país descenso de las temperaturas, así como algunas lloviznas y nevadas ocasionales en las partes más altas y en el norte del país. Estos son los llamados *nortes* que soplan con gran fuerza por varios días sobre las planicies costeras del Golfo de México.

En algunas regiones del norte del país cercanas a las zonas desérticas y esteparias, como las de Nuevo León y Tamaulipas, se presentan escasas lluvias durante el año. En general, este régimen se observa en zonas con clima seco y templado en toda la república.

III.2.3.2. TEMPERATURA

La situación geográfica de México, latitud, altitud y la relación con la distribución de tierras y mares, confieren al país una gran diversidad de climas, que se intensifica aún más por las características de relieve del territorio nacional. Estas características hacen que el país cuente con una diversidad de climas; en lugar de dos (templado y tórrido), se aprecian cinco tipos de regímenes térmicos: cálido, semicálido, templado, semifrío y frío.

Tabla III.2.3.2. Regímenes térmicos.

REGÍMENES	TEMPERATURA MEDIA ANUAL
Cálido	Mayor de 25°C
Semicálido	Entre 18° y 25°C
Templado	Entre 12° y 18°C
Semifrío	Entre 5° y 12°C
Frío	Menor de 5°C

Régimen cálido. Estas temperaturas se registran en las zonas costeras localizadas a no más de mil metros de altitud; entre ellas se encuentra la península de Yucatán y el Istmo de Tehuantepec. Quedan fuera de este régimen la costa occidental de la península de Baja California y la costa del norte de Sonora.

Régimen semicálido. Este tipo de comportamiento térmico se presenta a lo largo del año en todas las zonas del territorio nacional que tienen de 1,000 a 1,800 m de altitud; poseen estas características la costa occidental de la península de Baja California y la costa del norte de Sonora.

Régimen templado. Estas temperaturas se presentan hacia el norte y centro del país y, en general, en terrenos con una altitud de 1,900 a 2,900 m. Comprende parte de las sierras de Zacatecas, Guanajuato, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur, el Sistema Volcánico Transversal, la Mixteca y la Meseta Central de Chiapas.

Régimen semifrío. Este régimen es propio de las áreas localizadas por arriba de 2,900 y hasta 4,000 m de altitud sobre el nivel del mar; se incluyen: la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental, el Sistema Volcánico Transversal, así como la Sierra de Juárez en Baja California.

Régimen frío o polar de montaña. Las temperaturas más bajas que tienen lugar en el país son características de las zonas montañosas que superan los 4,000 m de altitud; tal es el caso de las cumbres nevadas del Eje Neovolcánico.

III.2.3.3. VEGETACIÓN

México presenta una gran variedad de vegetación y fauna, en él pueden encontrarse extensiones territoriales donde casi no se presenta vegetación, como sucede en las partes más áridas de los desiertos o cerca de las nieves perpetuas. En contraste, existen zonas como la Selva Lacandona, en el estado de Chiapas, que constituye uno de los ecosistemas más importantes y representativos del trópico húmedo; su flora es rica en especies, destacando árboles de caoba y cedro rojo.

La superficie de bosques y terrenos forestales del país cubren 28.9 % de su territorio, crecen árboles de maderas preciosas como caoba, sándalo, ébano, cedro rojo, nogal, palo de rosa y palo de Campeche; abarcando las zonas templadas y frías de las sierras Madre Oriental, Occidental y las sierras volcánicas del centro del país. En el centro y norte de México, el principal ecosistema está conformado de matorrales desérticos, chaparral, pastizal, matorrales semiáridos, bosques templados y matorrales asociados.

En la región neotropical, los principales ecosistemas son selvas altas y medianas, selvas bajas o bosques y matorrales asociados, bosques de niebla o mesófilos, bosques templados y matorrales asociados del sur del país tropicales y vegetación sabanoide. Dentro de los ecosistemas costeros se encuentran las tierras bajas cálidas húmedas o subhúmedas, así como algunas partes altas de la sierra de Chiapas y la Sierra Madre del Sur; abarca también todo el Caribe.

III.3. INFORMACIÓN DE LA SIERRA MADRE ORIENTAL

Una vez ubicada la Sierra Madre Oriental en el contexto nacional (regional), se procederá a describir sus características en forma específica.

III.3.1. MARCO GEOGRÁFICO

Localizada en la porción centro oriental de la República Mexicana, se extiende con un rumbo NNW-SSE desde las cercanías del Big Bend en Texas hasta las inmediaciones de Jalapa donde se ve limitada por el Eje Neovolcánico; por el oriente se encuentra la Planicie Costera del Golfo de México y por el occidente la Mesa Central.

La Sierra Madre Oriental es la más grande del país con una longitud de 1,350 km desde la frontera norte con Estados Unidos hasta su unión con el Eje Neovolcánico por el sur (Atlas de México, 1999).

Esta provincia geológica se encuentra ubicada entre las coordenadas 19° 30' - 29° 45' de latitud norte y 97° 00' - 104° 30' de longitud oeste.

Sus elevaciones oscilan entre los 2,000 y los 3,000 metros sobre el nivel del mar en promedio, y su anchura media es de 150 km.

En el norte, la sierra está separada de la costa del Golfo de México unos 250 km y en el sur, apenas unos 75 km.

En su porción central esta provincia muestra una faja adyacente que corre hacia el oeste hasta la región de Nazas en el estado de Durango, conectándose con la Sierra Madre Occidental.

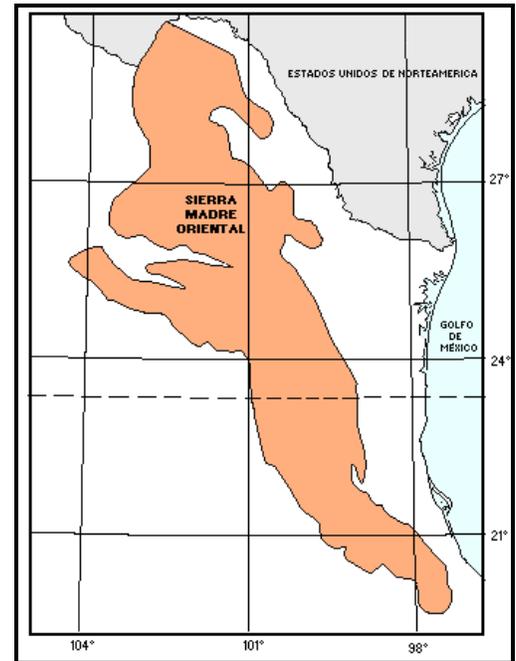


Figura III.3.1. Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental.

Esta provincia abarca parte de los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla y Veracruz.

La Sierra Madre Oriental es un imponente conjunto montañoso caracterizado por profundas barrancas y cañones, y en su parte central por prominentes montañas; la cruzan numerosos ríos en los que se encuentran sitios que reúnen características geológicas y morfológicas aceptables para establecer aprovechamientos hidroeléctricos y/o con fines agrícolas.

La red hidrológica está integrada principalmente por los ríos Sabinas y Candela afluentes del río Salado en el área de Coahuila; el río Pesquería, San Juan y Conchos en el estado de Nuevo León; más hacia la región centro y sur de la sierra se encuentran los ríos San Fernando, Soto la Marina, Guayalejo y Moctezuma, estos dos últimos afluentes del río Panuco; otros ríos en el extremo sur, son Tuxpan, Cazones y Tecolutla.

III.3.2. MARCO GEOLÓGICO

Los aspectos geológicos más relevantes que pueden influir en los deslizamientos de laderas en la Sierra Madre Oriental, corresponden al tipo de rocas, a la posición que tiene unas respecto a las otras, a las diversas discontinuidades que presentan, a la actividad neotectónica y a la sismicidad que afectan en esa área.

III.3.2.1. FISIOGRAFÍA

El rasgo fisiográfico más significativo lo constituye la flexión que sufre la Sierra Madre Oriental a la altura de Monterrey, a partir de la cual adquiere una orientación general de E-W.

Al norte de esta flexión los elementos orográficos se vuelven más espaciados y las estructuras geológicas menos estrechas; además, el relieve disminuye gradualmente al oriente hasta constituirse en la Llanura Costera del Golfo.

Por lo abrupto de las montañas y la naturaleza de los materiales, es común observar fenómenos de inestabilidad de taludes.

La provincia de la Sierra Madre Oriental se divide en cuatro subprovincias; en la figura III.3.2.1 se muestran estas y se nombran:

- Sierra del Norte.
- Sierras Atravesadas.
- Sierra Alta.
- Sierras Bajas.

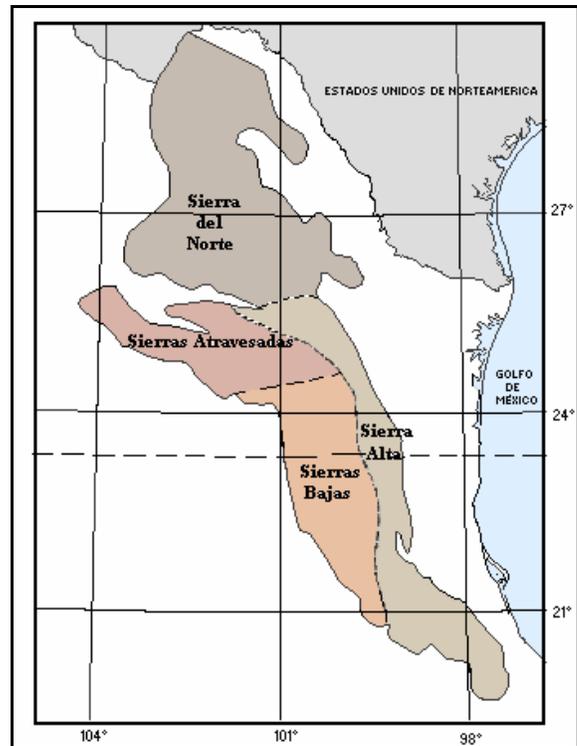


Figura III.3.2.1. Subprovincias de la Sierra Madre Oriental

Subprovincia de la Sierra del Norte

Esta subprovincia se encuentra localizada al norte de la Sierra Madre Oriental. Las sierras que la constituye forman principalmente amplias estructuras alargadas y muy irregulares. Los elementos intensamente deformados de la provincia de Sierras y Cuencas, hacia el N y NE de Monterrey, se encuentran en contraste con las estructuras suavemente plegadas y quizás normalmente afalladas de la Sierra de Picachos, la Sierra de Sabinas-Lampazos, la Sierra de Peyotes y la Serranía del Burro.

Se presenta mayor vulcanismo en esta subprovincia que en las otras partes de la provincia sobre todo en la parte norte, y la actividad intrusiva también se manifiesta con mayor profusión a lo largo de toda la subprovincia.

Los bolsones que se constituyen se deben a que los valles que separan las cordilleras son generalmente amplios (Bolsón de Monclova). En la región al norte de Monclova se encuentran depósitos de carbón en sedimentos del Cretácico (Formación Olmos; areniscas, lutitas y limolitas); además, son comunes los potreros formados por la erosión de grandes estructuras anticlinales de esta región.

Subprovincia de las Sierras Atravesadas

La Subprovincia de las Sierras Atravesadas está formada por una serie de sierras alineadas de dirección E-W (Sierra de Parras y de Jimulco), que van desde Saltillo hasta Torreón y Nazas, donde su

alineación vuelve a ser NW-SE (Sierra del Rosario), separadas entre sí por valles de fondo plano y paredes empinadas (Valle de Agua Nueva, Bolsón de San Carlos y Laguna de Viesca).

Las sierras generalmente están compuestas por sedimentos mesozoicos (calizas en su mayoría) y atravesadas por numerosos cañones; las montañas alcanzan alturas comprendidas entre 1,500 y 2,800 msnm; los valles se encuentran constituidos por grandes espesores de sedimentos terciarios y cuaternarios (gravas, arenas y limos), productos de la meteorización de las sierras que los bordean.

Subprovincia de la Sierra Alta

A esta subprovincia la forman cordilleras de caliza que constituyen grandes anticlinales con flancos escarpados, atravesados a su vez con profundos cañones y gargantas. Hacia el sur, la altura de estas cordilleras disminuye.

En algunos lugares se presenta el fenómeno de carsticidad debido a la disolución de las rocas calcáreas. A todo lo largo de la subprovincia, la transición a las tierras bajas de la costa es repentina, debido a que no existen abanicos en esta parte.

El abrupto cambio en el rumbo tectónico regional en el área de Monterrey, es lo más notable de la deformación que puede observarse en esta subprovincia; es donde la dirección NNW de la sierra, voltea hacia Saltillo en un apretado manojito de pliegues estrechamente arqueados y convexos hacia el NE.

Subprovincia de las Sierras Bajas

Esta subprovincia está constituida por una serie de sierras paralelas a las de la provincia de la Sierra Alta que la limita al oriente; sus rasgos estructurales son semejantes, únicamente su altura es un poco menor ya que su base tiene un promedio de 1800 msnm.

Los valles son un poco más amplios que en la Sierra Alta y se encuentran rellenos de aluviones que bajan de las sierras. La transición hacia la Provincia de la Mesa Central, a la cual limita hacia el oriente, es imperceptible la mayoría de las veces.

III.3.2.2. LITO-ESTRATIGRAFÍA

La Sierra Madre Oriental y las zonas adyacentes se caracterizan por la presencia predominante de rocas sedimentarias mesozoicas, que se depositaron y evolucionaron sobre un basamento paleozoico y precámbrico. Las rocas sedimentarias son de origen marino y han sufrido plegamientos y fallamientos.

En el Jurásico Superior actúa una transgresión al noreste de México que da lugar a la formación del Golfo de Sabinas, la Isla de Coahuila y la Península y Archipiélago de Tamaulipas.

Predominan en toda la provincia rocas representadas por calizas, margas, lutitas, limolitas y areniscas. En ciertos lugares la secuencia sedimentaria está afectada por pequeños cuerpos intrusivos de composición granítica o cubierta por rocas volcánicas andesíticas y basálticas.

El basamento precámbrico y paleozoico se observa en afloramientos aislados que constituyen ventanas en la secuencia mesozoica plegada. En muy escasos lugares aparecen afloramientos de rocas paleozoicas y precámbricas como en Peregrina, Tamaulipas y la región norte de Molango, Hgo.

En el mapa geológico (figura III.3.2.2) se muestra la geología superficial que constituye la provincia de la Sierra Madre Oriental.

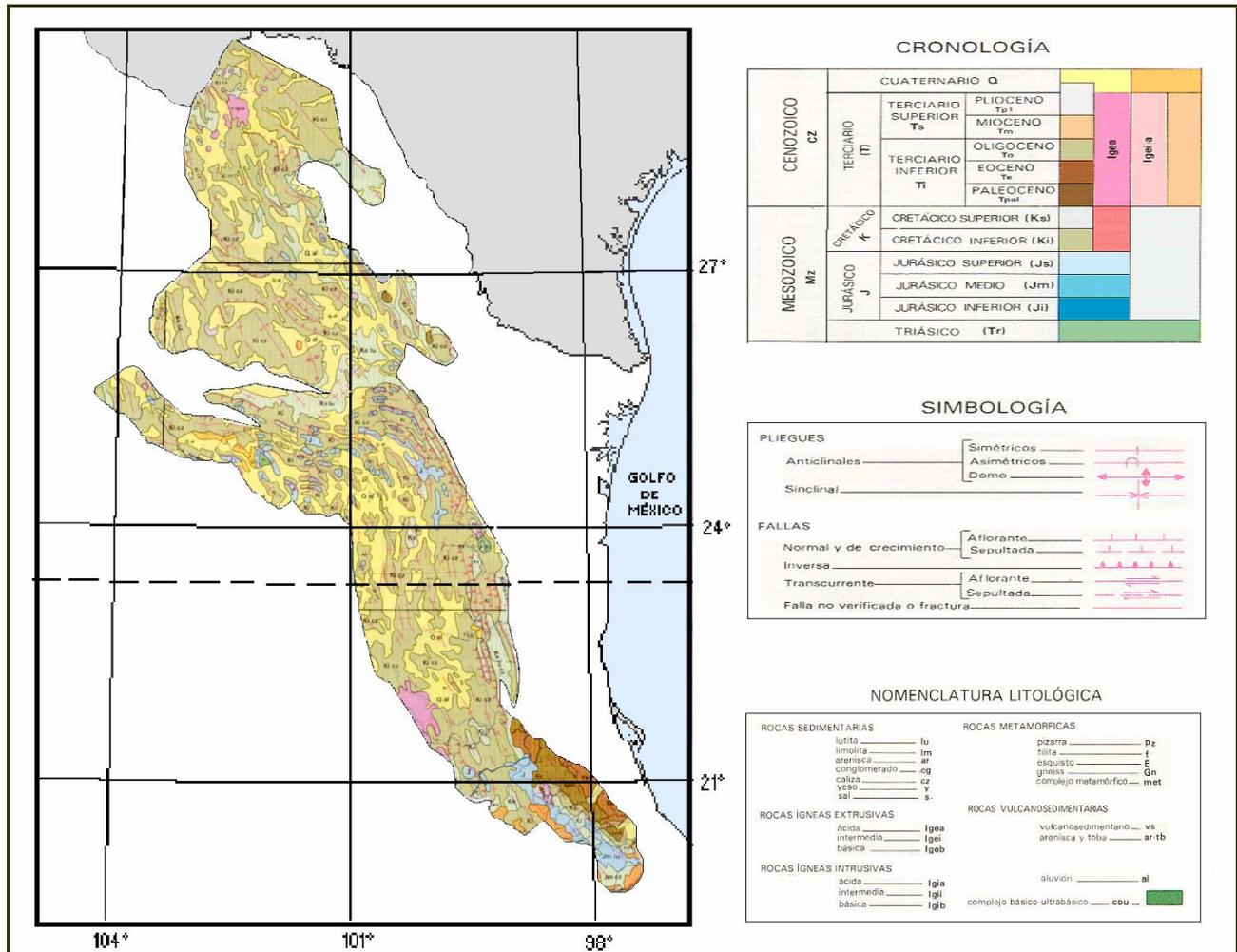


Figura III.3.2.2. Mapa Geológico de la Sierra Madre Oriental. (Carta de Geología, IV.1.1, Instituto de Geografía, UNAM, Padilla y Sánchez R. J. Aceves Quesada J. F., Mayo 1992.)

Las principales formaciones geológicas (López-Ramos, 1980) que fueron analizadas en esta tesis, con base en su litología, su posición geográfica y su relación con la posibilidad de generar deslizamientos, se describen a continuación:

Formación Nazas: Secuencia de tobas, limolitas, areniscas y conglomerados de color rojo con lavas interestratificadas. En el sur de San Julián, la formación consiste de una secuencia piroclástica y volcánica de toba, toba arenosa, ignimbrita y aglomerado con intercalaciones de derrames riolíticos. El aglomerado de color rojo contiene fragmentos de riolita pobremente clasificados que van de angulosos a subredondeados; están embebidos en una matriz de color rojizo bien consolidada compuesta de hematita, limonita, sericita y vidrio parcialmente devitrificado. El espesor medio es aproximadamente de 500 m.

Formación Zuloaga: Está representada por una sección de calizas, dolomías y calizas parcialmente dolomitizadas que subyacen a la Formación Olvido y cubren en algunos casos a capas rojas triásicas y en otras ocasiones a capas rojas jurásicas; se encuentra en la Sierra Sombrerillo, al norte de Melchor Ocampo, en la porción norte del estado de Zacatecas.

Formación Olvido: Tiene más o menos 150 m de potencia y de la base a la cima se encuentra constituida por un cuerpo de 8 m, de espesor de lutitas rojas yesíferas, con intercalaciones de lutita verde y amarilla; arriba de dichas lutitas se encuentran más o menos 120 m de calizas de grano fino de color crema amarillento ligeramente rosado y crema ligeramente gris, en capas delgadas a medias; alternan con margas de color amarillo y gris verdoso y algunas capas delgadas de yeso; en la cima de la formación, se encuentra un cuerpo de poco más de 20 m de espesor de calizas de grano fino de color crema amarillento en capas de espesor medio; algunas de las capas de caliza de este cuerpo litológico contienen pedernal blanco y en otras capas se observan foraminíferos recristalizados.

Formación La Casita: Es una secuencia de conglomerados, areniscas, lutitas, margas, caliza, yeso y poco carbón que descansa sobre rocas de la porción inferior del Jurásico Superior y subyace al Cretácico Inferior. Se encuentra en el Cañón de la Casita, los cañones y algunos caminos del Anticlinorio Huizachal - Peregrina, también en gran parte del norte y noreste de México.

Formación Tamán: Se trata de calizas negras bien estratificadas en capas medianas y gruesas, de grano fino (microcristalinas) que alternan con delgadas intercalaciones de margas (lutitas calcáreas) negras de estructura laminar. Localmente las margas negras tienen tendencia esquistosa en la base de la serie, y en comparación con los bancos de caliza pueden alcanzar una proporción importante. No hay sílice, los bancos se presentan bien marcados y su espesor medio es de 40 a 60 cm. Sus caracteres muestran que se trata de una sedimentación marina franca. El espesor es muy variable, habiéndose registrado hasta un espesor de 500 m.

Formación Taraises: Consta de dos miembros, el inferior con lutitas de color gris oscuro que intemperizan a color gris amarillento en estratos de 20 a 60 cm, presenta huellas de disolución y vetillas de calcita, fracturamiento moderado; el miembro superior consta de calizas arcillosas delgadas de color negro, interestratificada con lutitas calcáreas gris claro y calizas nodulares, intemperiza a pardo claro y rojizo. Debido a su litología, es fácilmente erosionable, desarrollándose pequeños valles y puertos suaves de erosión, así como redondeados. Se encuentra al flanco sur de la Sierra de Parras, aflora a lo largo de la Sierra Torreón - Monterrey. En la columna generalizada Tardy (1976) da un espesor de 360 m para la Sierra Madre Oriental.

Formación Tamaulipas Inferior: Se encuentra compuesta por más de 100 m, de calizas de grano fino y color crema amarillento, en capas medianas y gruesas, con estilolitos bien desarrollados y paralelos a los planos de estratificación y nódulos irregulares y de forma esferoidal de color castaño oscuro y gris claro distribuidos en forma irregular; se observan algunos cuerpos de calizas clásticas. Estos, subyacen concordantemente a la Formación Otates y descansan sobre el miembro superior de la Formación Pimienta. Se encuentra en los flancos del Anticlinorio Huizachal-Peregrina, al norte del Valle de Huizachal, en todos los cañones, en la región de Cd. Victoria, en el Cañón de La Peregrina y en el Cañón de la Boca.

Formación Cupido: Unidad principalmente constituida por calizas dolomíticas y dolomías con algunos nódulos de pedernal y en estratos de medianos a gruesos, predominado los gruesos. Su parte inferior está caracterizada por presentar una estratificación más delgada con intercalaciones de lutitas y en la base por presentar calizas dolomíticas y dolomías en capas de estratificación gruesa. Se le han medido espesores de 70 a 400 m. Cuando no presenta metamorfismo está constituida por calizas de color gris oscura con estilolitos paralelos a los planos de estratificación. Se le encuentra en la Provincia de Sierras y Cuencas en la Sub-Provincia de Sierras Tamaulipecas.

Formación La Peña: Unidad compuesta por dos miembros que en conjunto tienen un espesor de 50 m. La parte superior está compuesta de calizas que se adelgazan y toman un aspecto lajoso, presentando transiciones a limolitas calcáreas, va de tonos rojizos a parduscos por intemperismo; la parte inferior está formada por capas delgadas a medianas de calizas color gris claro con nódulos de pedernal y escasas interestratificaciones de material arcilloso. Se encuentra en La Sierra de La Peña, la Sierra de La Gloria, la Sierra de Parras, la Cuenca de Sabinas, Sección del Cedral y Sección de Piloncillo.

Formación Horizonte Otates: Se encuentra formado por calizas de color negro que intemperizan en gris amarillento, en estratos ondulantes de 10 a 20 cm de espesor, alternan con lutitas laminadas de color gris oscuro y negro, contiene algunas concreciones calcáreas, lentes de pedernal negro y nódulos de hematita.

Formación Tamaulipas Superior: El espesor de la formación varía de 270 a 400 m, se divide en:

- Miembro inferior, consta de calizas criptocristalinas de color gris crema y gris oscuro a negro, en capas de espesor de medio a grueso.
- Miembro superior (*Cuesta del Cura*) se halla integrado por calizas criptocristalinas de color gris, gris claro, gris acero y negro finamente bandeadas en capas de espesor medio; estas capas alternan con estratos de espesor delgado y medio de margas laminadas de color gris oscuro; ambas rocas contienen abundantes lentes y bandas delgadas de pedernal negro. Tanto la estratificación ondulante como el contenido del pedernal pseudoestratificado son rasgos distintivos. Se localiza en el Cañón del Novillo, el camino a Cd. Victoria y el Cañón de la Peregrina.

Formación Aurora: Contiene capas de calizas densas de estratificación mediana a gruesa de 0.80 a 1.20 m de espesor, en un color que varía del gris al gris claro y de bancos de calizas con contenido de rudistas. La caliza varía de acuerdo a su pureza llegando a presentar horizontes de textura criptocristalina en algunos casos y en otros arcillosa con gran contenido de microfauna. Presenta algunos horizontes de caliza muy fosilífera con contenidos de amonitas y valvas de pelecípodos y gasterópodos. Se le encuentra en Valle del Arroyo de San Carlos, en el frente del Cerro del Diente.

Formación Indidura: Calizas oscuras laminadas intercaladas con lutitas yesíferas rosadas con estratificación indefinida. Su espesor es del orden de 30 m. Está distribuida en La Sierra de La Peña, la Sierra de Mayrán y la Sierra de Parras.

Formación El Abra: Consiste de calizas arrecifales; en la Sierra del Abra se distinguen dos miembros:

- Miembro inferior: Está constituido por una caliza de rudistas, a la que se le denominó Taninul, que es un bioherma de rudistas (Cenomaniano) con abundancia de radiolítidos, caprínicos, nerineas y pocos corales. Los estratos están casi horizontales y pueden verse expuestos 40 m, de una caliza masiva hasta de 3 m de espesor criptocristalina de color gris a gris crema con manchas negras de restos de hidrocarburos.

- Miembro superior: Es una caliza con abundantes miliólidos y está formado casi exclusivamente por una caliza gris masiva, con intercalaciones de calizas biostronales con Toucasias.

Formación El Doctor: En la localidad tipo, consiste de calizas grises y gris oscuro bien estratificadas, en capas de 10 a 30 cm., presentando en la base un conglomerado de rocas cretácicas. El espesor es de unos 400 m, donde también pueden verse intercalaciones de caliza masiva de aspecto lenticular de posible origen arrecifal, con intercalaciones fosilíferas. Son calizas relativamente puras, de textura variada y con o sin lentes de pedernal. No es aparente una discordancia angular entre las calizas y las rocas subyacentes. En el área de los grandes anticlinales, desde el noreste de Pachuca, Hgo. hasta Jaumave, Tamps., se alcanza el millar de metros.

Formación Agua Nueva: De acuerdo con López-Ramos (1980) a esta formación la constituyen calizas arcillosas de estratificación mediana a gruesa con estructura laminar color gris, gris oscuro y negro, que alternan con lutitas y margas laminadas de color café a gris oscuro, bituminosas y carbonosas; es común que en la base se presenten capas de bentonita de color verde que sirven como horizontes índice para marcar el contacto inferior de esta formación. En la localidad tipo, su espesor es de 127 m; superficialmente se extiende tanto alrededor de la Sierra de Tamaulipas, como a lo largo de la Sierra Madre Oriental.

Formación San Felipe: Está caracterizada por una alternancia de calizas y lutitas grises, llegándose a presentar calizas arcillosas y margas gris y verde. También es común encontrar varias intercalaciones de bentonita alternando con la secuencia antes mencionada. En el área de San Carlos, presenta una estratificación uniforme con capas de calizas arcillosas color crema a gris claro, de 30 a 50 cm, de espesor alternando con capas de lutitas y margas con un espesor de 10 a 15 cm. Sus espesores son muy variables, aumentando considerablemente en la Sierra Madre Oriental, al sur de Cd. Victoria hasta 760 m.

Formación Parras: Su litología es de lutitas carbonosas negras, físis, nodulares y calcáreas, que intemperizan en un color amarillento. El espesor de la columna general es de 600 m; se observa en el arroyo de Santiago, en la Sierra de Parras y en el Cerro del Pilar al norte de la Estación Marte, pero aflora en la porción norte de la Sierra Torreón – Monterrey en la antifosa que se extiende al oeste y norte de Saltillo; estas lutitas que con un espesor de más de 1,000 m, representan las facies de cuenca de la Formación San Felipe.

Formación Méndez: Está constituida por lutitas y margas con fractura concoidal, en colores café claro a verdoso, encontrándose en la cima del miembro inferior un horizonte de areniscas en estratos gruesos como de 2 a 3 m de espesor, capas que marcan la separación entre el miembro inferior y el superior. Sus espesores también son muy irregulares, habiéndose medido hasta 1 900 m en el frente de la Sierra Madre Oriental, entre Linares, Cd. Victoria y Cd. Mante. Superficialmente aflora desde Monterrey hasta Tamazunchale.

Tobas del Terciario Superior: Consiste de depósitos de flojo de ceniza parcialmente soldadas emitidas por actividad volcánica del Terciario. Corresponde a la secuencia piroclástica de la caldera de los Humeros; este depósito no tiene una distribución continua y homogénea sobre toda el área (Capra *et al.*, 2003(a)).

En la figura III.3.2.2 se presentan las columnas estratigráficas de diversas áreas de la Sierra Madre Oriental, con la denominación de las formaciones geológicas del Triásico, Jurásico y Cretácico.

ERA	SUB-ERA	SERIE	EDAD*		SIERRA DEL NORTE		SIERRAS ATRAVESADAS	SIERRAS ALTA Y BAJAS	
			PISO	EN MILLONES DE AÑOS	CUENCA DE SABINAS	PENINSULA DE TAMAULIPAS	SECTOR TRANSVERSAL	SECTOR ORIENTAL	CUENCA DE TAMPIO MISANTLA
MESOZOICO	SUPERIOR	CAMPANIANO	MAASTRICHTIANO	66.4	ESCONDIDO	ESCONDIDO	GRUPO DIFUNTA	CARDENAS	MENDEZ
			OLMOS	74.5	SAN MIGUEL	SAN MIGUEL	PARRAS	CARRACOL	MENDEZ
			SANTONIANO	84.0	AUSTIN	AUSTIN	INDIDURA	TAMPAPO	SAN FELIPE
			CONIACIANO	87.5	EAGLE FORD	EAGLE FORD	INDIDURA	INDIDURA	AGUA NUEVA
			TURONIANO	88.5	BUDA	BUDA	CUESTA DEL CURA	EL DOCTOR	EL ABRERA
			GENOMANIANO	91.0	DEL RIO	DEL RIO	CUESTA DEL CURA	EL ABRERA	TAMPAPO
			ALBIANO	97.5	LA PEÑA	LA PEÑA	LA PEÑA	EL ABRERA	TAMPAPO
		INFERIOR	APTIANO	113	LA VIRGEN	LA VIRGEN	LA VIRGEN	OTATES	OTATES
			BARREMIANO	119	LA MULA	LA MULA	LA MULA	OTATES	OTATES
			HAUTERIVIANO	124	PADILLA	PADILLA	PADILLA	OTATES	OTATES
			VALANGINIANO	131	BARRIL VIEJO	BARRIL VIEJO	BARRIL VIEJO	OTATES	OTATES
			BERRIASIANO	134	MENCHACA	MENCHACA	MENCHACA	OTATES	OTATES
			TITHONIANO	144	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	OTATES	OTATES
			KIMMERIDGIANO	152	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	OTATES	OTATES
	JURASICO	SUPERIOR	OXFORDIANO	156	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
		MEDIO	CALLOVIANO	163	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
			BATHONIANO	169	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
			BAJOCIANO	176	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
		INFERIOR	AALENIANO	183	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
			TOARCIANO	187	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
			PLEINSBACHIANO	193	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
			SINEMURIANO	198	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
		TRIASICO	SUPERIOR	RHAETIANO	208	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA
			MEDIO	NORIANO	225	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA
	CARNIANO			230	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
	INFERIOR		LADINIANO	235	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
			ARTISTIANO	240	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	
	SCYTHIANO	245	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA	LA CASITA			

Figura III.3.2.2. Columnas estratigráficas de la Sierra Madre Oriental (Compilada por Quezada y Sarmiento, 1999, adaptado por Suárez García O. G.).

Litoestratigrafía de la Sierra del Norte

Lo que caracteriza esta subprovincia, (Moran Z, 1984) es la presencia de las rocas sedimentarias mesozoicas plegadas que predominan y que descansan sobre un basamento paleozoico y precámbrico.

En un ambiente de plataforma se depositaron las calizas de la Formación Cupido, que constituyen gran parte del Golfo de Sabinas, además del desarrollo de un alineamiento arrecifal que corre de Laredo a Monterrey y de ahí al oeste, hacia Torreón, que se considera como parte integral de la misma formación; fuera de este margen arrecifal se desarrollaron facies de mar adentro correspondientes a la Formación Tamaulipas Superior.

Un aporte generalizado de terrígenos finos al Golfo de Sabinas dan lugar a la Formación La Peña en el Aptiano-Albiano; en todo el noreste del país durante el intervalo Albiano-Cenomaniano se originó el desarrollo de gruesas secuencias carbonatadas debido a una importante transgresión marina que cubre incluso los elementos hasta entonces positivos.

Se depositaron secuencias de facies someras y evaporíticas sobre las Plataformas del Burro (Península de Tamaulipas) y Coahuila (Isla de Coahuila), gracias a la presencia de arrecifes que bordeaban los elementos; a este intervalo pertenecen las formaciones Aurora y Tamaulipas Superior.

En la parte inferior del Cenozoico se desarrollaron principalmente las deformaciones de la Orogenia Laramide; a este episodio pertenecen las estructuras anticlinales y sinclinales tan características del paisaje coahuilense.

Después del Cenozoico ocurrieron eventos aislados de actividad ígnea en esta región del país, sobre todo en el Oligoceno, cuando fueron emplazados intrusivos. La zona carbonífera de Sabinas está formada por yacimientos sedimentarios alojados en la secuencia deltáica del Cretácico Superior.

Por lo que respecta a las formaciones geológicas que afloran en esta subprovincia y que fueron analizadas para el objetivo de esta tesis son: Tamaulipas Superior, Aurora, La Peña, Cupido, Taraises y La Casita principalmente.

Litoestratigrafía de las Sierras Atravesadas

La litología en la subprovincia de la Sierras Atravesadas, está formada por lavas interestratificadas con lutitas, limolitas y areniscas rojas de la Formación Nazas, sobre las que yacen lutitas carbonosas, areniscas de grano fino de las Formaciones Zuloaga y La Casita; el Cretácico lo constituyen areniscas, calizas y lutitas de las Formaciones La Mula, Barril Viejo, Cuesta del Cura, Parras, Patula, Indidura y Caracol.

El Terciario está representado por conglomerados constituidos con materiales de los mencionados anteriormente, además de algunas brechas volcánicas basálticas y riolíticas (Formación Ahuichila); además de gravas y arenas de la Formación Santa Inés; y el Cuaternario lo constituyen los aluviones de espesor desconocido y abanicos aluviales al pie de las sierras y en el fondo de los valles (CFE, 1980).

Litoestratigrafía de la Sierra Alta

En la subprovincia de la Sierra Alta, se presentan rocas desde el Precámbrico, entre los que encontramos gneisses y esquistos de la Formación Granjeno cerca de Cd. Victoria, Tamaulipas y esquistos Huiznopala cerca de Molango Hgo.

Las rocas paleozoicas están representadas por cuarcitas, calizas, dolomias, lutitas, areniscas y gneisses (Formaciones Naranjal, La Yerba, La Presa, Guacamaya, Vicente Guerrero y Caballeros), todas las localidades están restringidas a los estados de Tamaulipas, Hidalgo y Puebla.

La mayor parte de las rocas que constituyen estas sierras son calizas, dolomías, margas, lutitas y areniscas del Mesozoico siendo las más numerosas las calizas (Formaciones La Casita, Pimienta, La Gloria, Cupido, Aurora, El Doctor, Tamaulipas Superior e Inferior). Hacia la porción suroeste de la provincia se localizan extensas áreas cubiertas por materiales volcánicos de tipo riolítico, andesítico y

basáltico, sobre todo en el estado de Hidalgo y noroeste del estado de Puebla, principalmente representados por el Grupo Pachuca.

Litoestratigrafía de las Sierras Bajas

Las rocas que constituyen a la subprovincia de las Sierras Bajas son en general las mismas de la subprovincia adyacente con un dominio de calizas y calizas arcillosas y valles rellenos por gravas y arenas; sin embargo, esta subprovincia presenta una mayor abundancia de rocas volcánicas tales como: riolitas, dacitas, andesitas y basaltos, principalmente en las zonas cercanas al Eje Neovolcánico (Estados de Querétaro y San Luis Potosí).

III.3.2.3. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

Los plegamientos de la Sierra Madre Oriental se inician al principio del Eoceno Inferior los cuales continuaron durante todo el Terciario. Sus zonas de rocas intensamente plegadas, afalladas y amplias estructuras sinclinales y anticlinales en conjunto, están orientadas de norte a sur y ocasionalmente están afectadas por grandes fallas de diversos tipos (normales, inversas y transtensionales).

La Sierra Madre Oriental está compuesta de estrechos pliegues con una orientación que sigue el rumbo general de la sierra. Hacia la Mesa del Centro los valles son más amplios, las sierras anticlinales menos estrechas, y hacia el occidente son cubiertos paulatinamente por las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental.

Los pliegues anticlinales y sinclinales son importantes en la Sierra Madre Oriental, así como las fallas, además de las características de carsticidad debida a la disolución en las calizas, de acuerdo con el Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y el Instituto de Geología de la UNAM.

Las fallas transcurrentes descritas en el inciso III.2.2.3 que afectan a la Sierra Madre Oriental, son las denominadas: *sistemas 5, 6, 7, 8, 9 y 10*.

- *Sistema 5*. El quinto sistema estructural de importancia se inicia en las costas del estado de Sinaloa en las inmediaciones del poblado de San Ignacio, sobre el cauce del río Piaxtla; continuando la alineación estructural hacia el noreste, en los alrededores del poblado de El Palmito en el estado de Durango, sobre el cauce del río Ramos, afluente del río Nazas; siguiendo su traza con la misma orientación, coincidiendo con los límites estatales de Chihuahua y Coahuila, así como con una porción del Río Bravo.
- *Sistema 6*. La porción suroccidental del sexto sistema estructural mayor, se localiza entre las ciudades de Tepic y Compostela, en el estado de Nayarit, continuando hacia el noreste por las ciudades zacatecanas de Fresnillo y Concepción del Oro, prosiguiendo con esa misma orientación en el estado de Coahuila, en las cercanías de la ciudad de Saltillo, incidiendo en la curvatura de la Sierra Madre Oriental, en el tramo de esta última ciudad y Monterrey, así como en el río Sabinas y la presa Falcón.

El sistema 6 está relacionado con el fuerte plegamiento de la sierra hacia el E - W (límites entre la subprovincia de las Sierras Alta y Bajas, con las Sierras Atravesadas.

- *Sistema 7.* Se encuentra relacionado con la actividad del volcán de Colima y las manifestaciones termales de La Primavera, Jal. así como agrietamientos en el poblado de Zapopan, Jal. y Aguascalientes, Ags.; provoca efectos de alta permeabilidad negativos en la presa de Teocaltiche, Jal. y desplazamientos en la carretera Charcas - San Luis Potosí.

Entre los *sistemas 6 y 7* se tienen los mayores empujes de la sierra, originando los pliegues recumbentes hacia el noreste.

- *Sistema 8.* Influye en la inestabilidad del delta del río Balsas, afectando al puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.; la actividad del volcán Parícutín; la inestabilidad de las laderas en la presa de El Bosque, Mich. y la alta permeabilidad en la presa fallida de El Bathán en el estado de Querétaro.
- *Sistema 9.* Tiene efectos sobre la estabilidad en las carreteras que van del D. F. a los estados de Morelos y de Guerrero; es la zona que resultó más afectada en el sismo de 1985 en la Ciudad de México, aunado a la actividad del volcán Popocatepetl; así como en los desplazamientos en la cortina de la presa de Guadalupe y el deterioro de diversos ductos en la Cuenca de México.
- *Sistema 10.* Afecta la estabilidad de laderas en el área de Acapulco, Gro.; efectos negativos en la presa de Huachinantla, Pue.; relacionado también con la actividad volcánica del Pico de Orizaba.

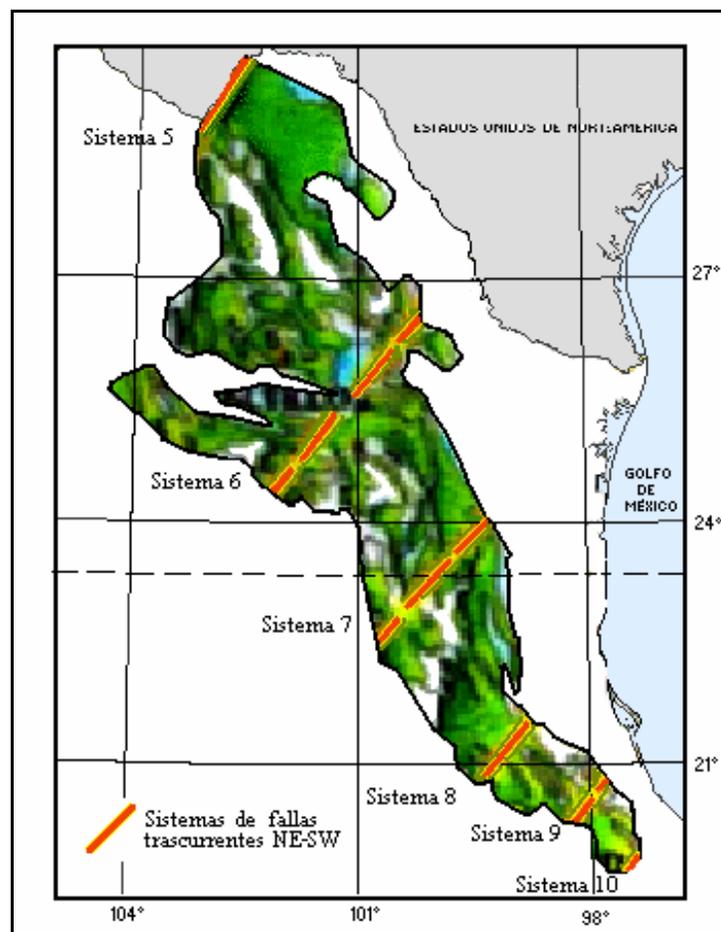


Figura III.3.2.3. Estructuras Geológicas Mayores NE-SW, representadas como sistemas de fallas trascurrentes que afectan a la Sierra Madre Oriental.

III.3.2.4. HIDROGEOLOGÍA

La Sierra Madre Oriental (Velázquez, 1994) constituye acuíferos libres y confinados de rocas calcáreas plegadas, cuyas zonas de recarga se localizan principalmente en los anticlinales. Velázquez muestra una configuración de la Sierra Madre Oriental de acuerdo a las propiedades hidrogeológicas; la siguiente figura corresponde a una comparación entre la provincia hidrogeológica de Velázquez y la provincia fisiográfica considerada para esta tesis.

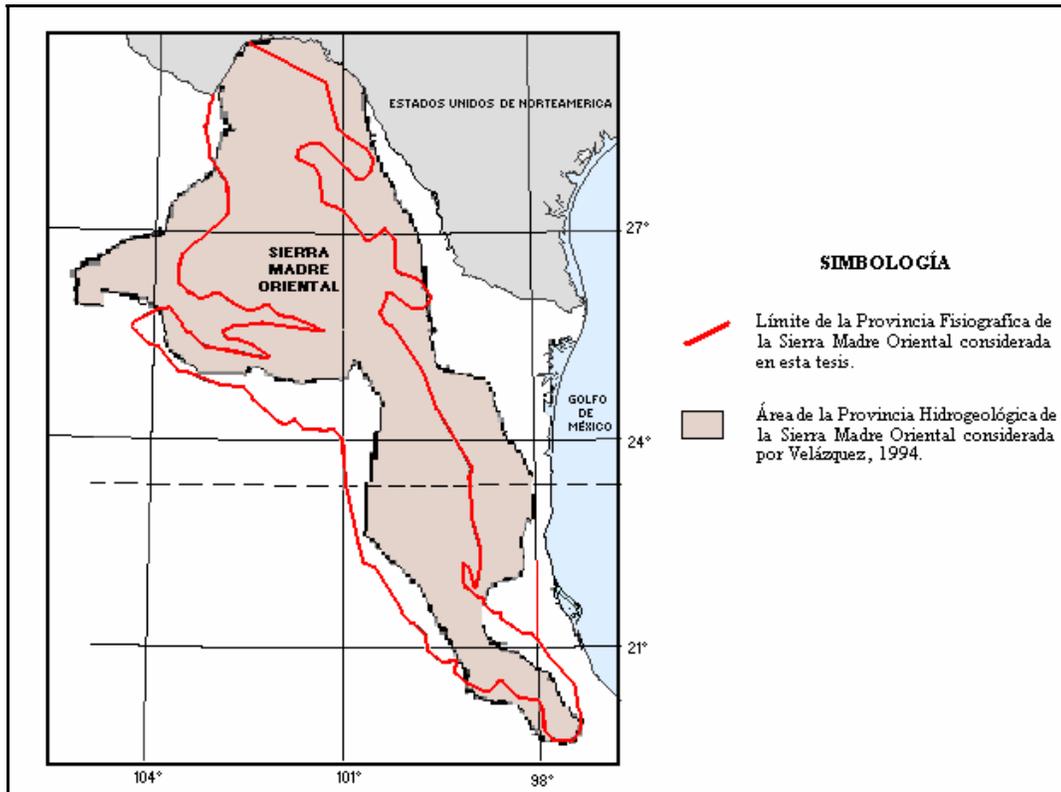


Figura III.3.2.4.2. Comparativo de la Provincia Hidrogeológica y la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental.

En la tabla III.3.2.4 se presentan las principales características hidráulicas que constituyen a la Sierra Madre Oriental, entre los que encontramos los rangos de variación de la transmisividad, permeabilidad, lamina de recarga y producción por pozo.

Tabla III.3.2.4. Características hidráulicas de la Sierra Madre Oriental.

REGIÓN	SITUACIÓN HIDROGEOLÓGICA	RANGOS DE VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LOS ACUÍFEROS DOMINANTES			
		T (m ² /d)	k (m/d)	R (mm/año)	Q (l/s)
Sierra Madre Oriental	Área relativamente alta de cadenas montañosas anticlinales y valles sinclinales, compuestos por rocas sedimentarias del Mesozoico, cubiertas por delgadas capas de suelos residuales.	10-1 000	1-50	5-50	10-200

T = Transmisividad, k = Conductividad Hidráulica, R = Lámina de recarga, Q = Prod. por pozo.

En la figura III.3.2.4.1 se presenta una sección esquemática con orientación oeste - este, de las condiciones hidrogeológicas de la Sierra Madre Oriental, donde se pueden identificar zonas de recarga y descarga y los niveles freáticos de esta sección.

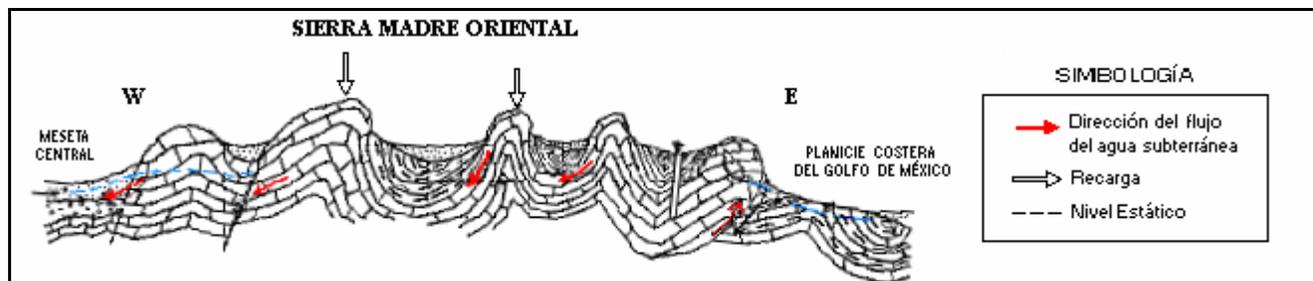


Figura III.3.2.4.1. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Sierra Madre Oriental (Velázquez, 1994).

La provincia hidrogeológica de la Sierra Madre Oriental cubre una superficie de 250 096 km², se subdivide en tres regiones hidrogeológicas: norte, central y sur, que se han designado, respectivamente, como:

- Sector Sierra del Burro.
- Sector Ojinaga - La Paila.
- Sector Sierra Madre Torreón - Monterrey - Tamazunchale.

Los dos primeros se ubican en la subprovincia de Sierra del Norte y el tercer sector corresponde a las subprovincias: Sierras Atravesadas, Sierra Alta y Sierras Bajas; a continuación se mencionan específicamente las características hidrogeológicas consideradas por Velázquez (*op. cit.*) de cada una de ellas.

Sector Sierra del Burro

En esta sierra se localizan rocas del Cretácico Inferior y Medio que son altamente solubles, calizas de estratificación media con pequeñas cantidades de lutitas. Estas rocas varían lateralmente dentro del arrecife Stuart City, el cual tiene una alta porosidad primaria y algunas fracturas que incrementan la permeabilidad. Las rocas del Cretácico Superior contienen más arcilla y tienen una permeabilidad más baja.

La erosión e intemperismo de las regiones topográficamente más altas, han producidos cubiertas por rellenos aluviales y conglomerados del Terciario y Cuaternario en el flanco este de la sierra. Estos depósitos tienen un espesor aproximado de 50 m, son altamente permeables y contienen importantes volúmenes de agua subterránea.

En la sub-región existen diferentes unidades de rocas las cuales contienen acuíferos confinados. Al romperse las estrechas confinantes por esfuerzos tensionales, el grado de interconexión hidráulica entre acuíferos, mejora.

El Peyote, prolongación sureste de esta sierra, es un anticlinal con flancos suavemente buzantes. Los afloramientos están constituidos por rocas calcáreas con pequeñas cantidades de pizarras (Formación Austin). El flanco de la Sierra del Burro, se recarga por el acuífero en las calizas y está cubierto por aluvión granular permeable de 30 a 50 m de espesor.

Sector Ojinaga - La Paila

Esta sub-región pertenece al Cretácico y está constituida de rocas calcáreas plegadas que forman una serie de anticlinales, que a su vez, producen sierras orientadas al noroeste - sureste. Estas emergen en forma aislada dentro de las planicies formadas por el material aluvial.

Los sedimentos de edad cretácica fueron depositados en un mar abierto sobre una plataforma y están constituidos por caliza densa, con poca o nula permeabilidad primaria. Estos sedimentos forman acuíferos solo en las zonas plegadas que han sido fracturadas, donde la disolución en las fracturas resulta del desarrollo de buena permeabilidad.

Dos tipos de acuíferos se localizan en esta sub-región, los que ocurren en los rellenos granulares sedimentarios y los que se dan en las calizas; en los primeros, los sedimentos granulares de los valles y cuencas contienen arenas y arcillas de baja permeabilidad y aguas salinas, derivadas de la evaporación de materiales acumulados en las porciones centrales de las cuencas; en las calizas del Cretácico Medio, los acuíferos afloran en las sierras y son recargados por las lluvias; esta recarga se mueve hacia la parte baja de los valles.

Las perforaciones profundas localizadas en los flancos de las sierras penetraron a los acuíferos a profundidades de 1 000 y 2 000 m.

Sector Sierra Madre Torreón - Monterrey - Tamazunchale

En las cercanías de Torreón se encuentran sierras entre las que existen valles intermontanos y cuencas constituidas por materiales aluviales formadores de acuíferos. La región de la laguna de Torreón es un área de clima árido. Hacia el oeste y sur, los acuíferos de las rocas carbonatadas, presentan espesores mayores de 1 000 metros; las calizas pueden o no contener pequeñas cantidades de lutitas, están dolomitizadas y han estado sujetas a disolución.

En la parte más grande de la sierra, en Monterrey, existen complejos arrecifales que contienen permeabilidad primaria, la cual aumenta por el fracturamiento y forma zonas altamente permeables. Las zonas de recarga están representadas por las elevaciones más altas y los acuíferos se encuentran en las más bajas.

Los anticlinales que forman los cerros de esta región, tienen fuertes pendientes, con flancos inclinados y estratos escarpados que favorecen la porosidad primaria y la secundaria, desarrollando acuíferos de gran potencial. Sobre los flancos y anticlinales con nariz buzante de estas estructuras, el agua se encuentra en una profundidad aproximada de 1 000 m y bajo condiciones artesianas.

En la parte sur de la Sierra Madre Oriental, en la zona de Tamazunchale, los patrones de sedimentación de los carbonatos juegan un papel fundamental en el desarrollo del acuífero; la extensión del complejo arrecifal, El Abra - Doctor que se formó en los márgenes de la plataforma Valles - San Luis Potosí, en el Albiano Cenomaniano, contienen carbonatos con alta permeabilidad. En el área existen numerosas dolinas y huecos donde el agua se infiltra.

III.3.2.5. TECTÓNICA

Según Eguiluz *et al.* (2000), la Sierra Madre Oriental es una cordillera cuyo relieve se debe a la deformación de rocas mesozoicas y de su complejo basal, los cuales fueron levantados, comprimidos y transportados hacia el noreste, formando pliegues y cabalgaduras durante la Orogenia Laramide.

Se distinguen varios sectores a lo largo del frente de este cinturón, que tienen variantes internas en el estilo y orientación de deformación. La distribución de las facies y la evolución sedimentaria tuvieron una influencia directa sobre el posterior desarrollo del plegamiento regional.

Las evaporitas del Oxfordiano, en la Cuenca del Centro de México y la evaporitas del Cretácico, en la Plataforma de Valles - San Luis Potosí, propiciaron despegues originando desbordamientos de salientes estructurales, produciendo pliegues de caja, un despegue profundo y pocas fallas emergentes.

Los vectores de desplazamiento sugieren un transporte tectónico regional dirigido hacia el noreste, dando origen a los pliegues recumbentes y a las fallas inversas en el lado oriental de la Sierra Madre Oriental.

III.3.2.6. SISMICIDAD

La ubicación de la Sierra Madre Oriental con respecto a las diversas regiones sísmicas de México (Fig. III.3.2.6) permite establecer que la porción norte de la sierra se encuentra ubicada en la Zona A, donde no se tienen registros históricos de sismos ya que no se han reportado en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.

Por lo que respecta a la porción sur de la sierra, esta se encuentra en la Zona B de la misma figura, en donde no se registran sismos tan frecuentes o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad.

La porción norte de la Sierra Madre Oriental, corresponde a los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y el norte de San Luis Potosí y la porción sur de la misma sierra, se encuentra en los estados de Puebla, Hidalgo, Veracruz y el sur de San Luis Potosí. En esta última porción, se han registrado ocasionalmente algunos sismos.

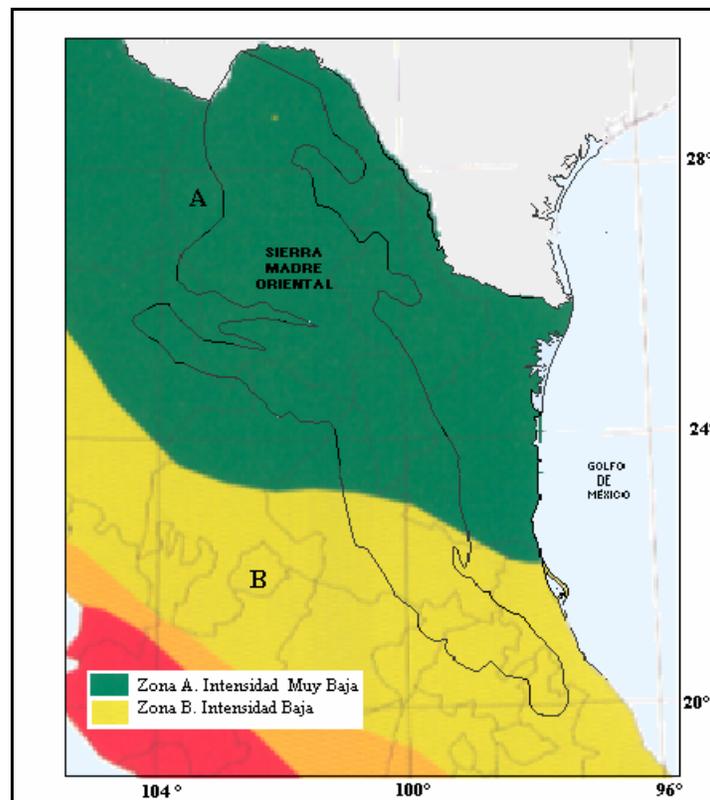


Figura III.3.2.6. Sismicidad de la Sierra Madre Oriental (Marín-Córdova, 2004).

III.3.3. CLIMATOLOGÍA

La Sierra Madre Oriental se encuentra influenciada por las regiones templadas y semifrías ya que sus elevaciones oscilan entre los 2 000 y los 3 000 msnm; además, el Trópico de Cáncer atraviesa la sierra aproximadamente por la mitad provocando así la diversidad de climas en la República y por lo tanto en la sierra.

La topografía y la altitud varían las condiciones climáticas de la Sierra Madre Oriental. Predominan dos principales tipos de climas: el templado - semicálido - semiárido, el cual abarca desde el Río Bravo y centro de Coahuila, y continúa por toda la porción occidental de la sierra, aquí la precipitación media anual es de 500 mm y la temperatura de 22° C; esta puede variar localmente en algunos sitios altos hasta los 16° C.

En la porción oriental de la sierra, el otro tipo de clima abarca desde el sur de Monterrey hasta el límite con la Faja Volcánica Transmexicana, se caracteriza por variar de tropical húmedo o templado a subhúmedo y de semicálido a húmedo; la precipitación media anual en esta zona varía de 700 mm en la cercanía de Monterrey, hasta 2 000 mm en la porción norte del estado de Hidalgo. La temperatura media anual es de 22° C. (Velázquez, *op. cit.*)

III.3.3.1. PRECIPITACIÓN

La estabilidad de taludes y laderas, se ve notablemente influenciada por la presencia del agua; el aumento de la presión de poro en el suelo, puede desencadenar un deslizamiento. La mayoría de los deslizamientos en zonas tropicales ocurren después de lluvias fuertes o durante períodos lluviosos prolongados, haciendo que el control de las aguas subterráneas sea uno de los mecanismos más utilizados para prevenir este tipo de fenómeno.

La lluvia, la escorrentía, la infiltración, el flujo subsuperficial y la tasa de evaporación son parámetros que pueden ser determinantes para el inicio o aceleración de un movimiento de masa. Estos factores se conjugan con factores de tipo geomórfico, propiedades de los suelos, la vegetación, la sismicidad y los factores antrópicos.

Con base en las características climatológicas descritas para la República Mexicana y con la información contenida en la *Carta de Precipitación IV.4.6* del Atlas Nacional de México del Instituto de Geografía de la UNAM (1989), se considera adecuado para este estudio dividir a la Sierra Madre Oriental en tres porciones:

- ✓ *Porción Norte:* Corresponde a la zona comprendida entre la frontera de México con Estados Unidos, hasta la ciudad de Monterrey, donde la precipitación es baja (< de 400 mm anuales).
- ✓ *Porción Centro:* Queda comprendida entre las poblaciones de Monterrey y Cd. Valles, incrementándose la precipitación entre 600 mm y 2 000 mm anuales del norte hacia el sur.
- ✓ *Porción Sur:* La zona comprendida entre Cd. Valles y el norte del estado de Puebla; reporta precipitaciones anuales que van de los 1 200 mm a más de 4 000 mm, correspondiendo los valores más altos a la parte alta de la sierra, descendiendo a los valores más bajos hacia los flancos de la misma, tanto al oriente como al poniente de ella.

Estos valores presentados en la carta del Instituto de Geografía, corresponden a un periodo de datos de 1921 a 1980.

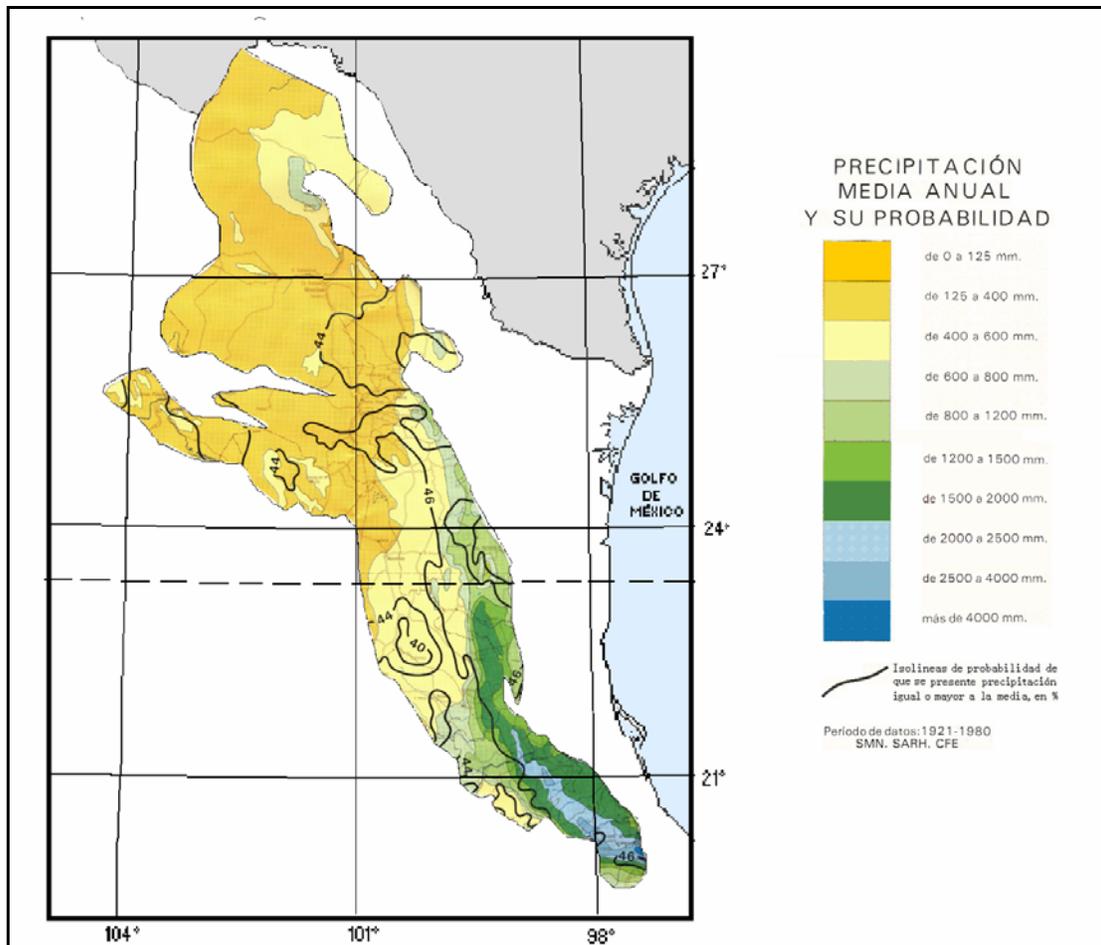


Figura III.3.3.1. Precipitación total anual en la Sierra Madre Oriental

III.3.3.2. TEMPERATURA

En la Sierra Madre Oriental las condiciones climáticas varían con la topografía y la altitud.

En la porción oriental de la sierra, que abarca desde el sur de Monterrey hasta el límite con la Faja Volcánica Transmexicana, el clima se caracteriza por variar de tropical húmedo o templado a subhúmedo y de semicálido a húmedo. La temperatura media anual es de 22° C.

- *Régimen semifrío.* Este régimen es propio de las áreas localizadas por arriba de 2,900 y hasta 4,000 m de altitud sobre el nivel del mar; que es la altitud en la que oscila la Sierra Madre Oriental.
- *Régimen templado.* Estas temperaturas se presentan hacia el norte y centro del país y, en general, en terrenos con una altitud de 1,900 a 2,900 m. Comprende parte de las sierras de Zacatecas, Guanajuato, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur, el Sistema Volcánico Transversal, la Mixteca y la Meseta Central de Chiapas.

Predominan dos principales tipos de climas: el templado - semicálido - semiárido, que abarca desde el Río Bravo y centro de Coahuila, y continúa por toda la porción occidental de la sierra, la temperatura media anual es de 22° C y disminuye localmente en algunos sitios altos hasta los 16° C.

CAPÍTULO IV

CASOS ESPECÍFICOS

IV.1. INTRODUCCIÓN

Para poder contar con información geológica y geotécnica que ratificara o rectificara el marco de la Sierra Madre Oriental establecido con la compilación y el análisis bibliográficos antecedentes, se seleccionaron dos áreas para realizar en ellas investigaciones de campo; una en la región norte de la sierra y la otra en la región sur.

Para la región norte se eligió el área correspondiente a Monterrey, N. L. y para la sur, la zona norte del estado de Puebla, en razón de que, para el primer caso, se tiene la mayor expresión del fuerte plegamiento que ha afectado a la sierra, asociada a una zona urbana de grandes dimensiones; y para el segundo caso por su relación con el Cinturón Volcánico Transmexicano en donde se incrementa la sismicidad y la presencia de fallamiento activo, además de ser una zona de alta densidad poblacional del país.

IV.2. ÁREA NORTE

Los sitios reconocidos en la porción norte de la sierra, se localizan en la subprovincia fisiográfica de las Sierras Atravesadas, que son características de Nuevo León.

La Sierra Madre Oriental, en la porción media y sur del estado de Nuevo León, sigue un rumbo de N 30° W, pero voltea al oeste, cambiando a un rumbo este - oeste, entre Monterrey y Torreón.

La ciudad de Monterrey, con una superficie de 451.30 km², se encuentra situada a 530 metros de altitud sobre el nivel del mar, en la vertiente oriental de la Sierra Madre Oriental, en uno de los pasos que comunica la llanura costera con las depresiones del interior.

En Monterrey, capital de Nuevo León, la mancha urbana ya ha superado la parte plana constituida por el valle del río Santa Catarina, el cual nace en el flanco noreste de la sierra y fluye con dirección al oriente, para desembocar posteriormente al Golfo de México.

El reconocimiento geotécnico realizado, abarcó la Sierra de las Mitras y el cerro de Topochico, localizadas al norte de la ciudad, así como Loma Larga y La Silla al sur y sureste respectivamente (Fig. IV.2), en las que se observaron las diversas características litológicas, estratigráficas y estructurales que presentan, asociándolas con la topografía y con los efectos que originan en la infraestructura de la ciudad.

El Cerro de la Silla es un anticlinal recostado y alargado, su eje tiene rumbo S 26° E, en su parte sur es asimétrico y en la parte central se torna recostado, sus flancos se inclinan con un promedio de 40° a 60° al S 60° W. En su flanco sur se localiza una gran falla que pone en contacto al Jurásico (Formación La Casita) con el Cretácico (Formación Méndez). Actuaron sobre este, las mismas fuerzas

que en la Sierra Madre Oriental, principalmente en el centro, pues en sus extremos no se observan perturbaciones ni echados invertidos.

Estructuralmente consisten de pliegues anticlinales con ejes longitudinales al E - W y NW - SE, que afectaron entre otras a las formaciones cretácicas identificadas como: Formación Tamaulipas Superior, Formación Agua Nueva, Formación San Felipe y Formación Méndez descritas de la más antigua a la más reciente.

La primera de ellas (Formación Tamaulipas Superior), constituye el núcleo de las sierras (anticlinales), continuando hacia los flancos de las laderas y en forma consecutiva las demás formaciones; todas ellas con echados fuertes, mayores de 40°.

Las características litológicas de las formaciones mencionadas también varían gradualmente desde calizas, margas y lutitas, siendo más calcárea la Formación Tamaulipas Superior y más arcillosa la Formación Méndez; con espesores de estratos mayores la primera (>0.60 m) y menores la última (<0.02 m).

El marco geológico mencionado para el área de Monterrey, asociado a los rasgos topográficos y a la actividad antropogénica, favorecen la inestabilidad de las laderas, en los flancos de los anticlinales; efecto que se incrementa en épocas de lluvia; presentándose a continuación algunos casos observados.

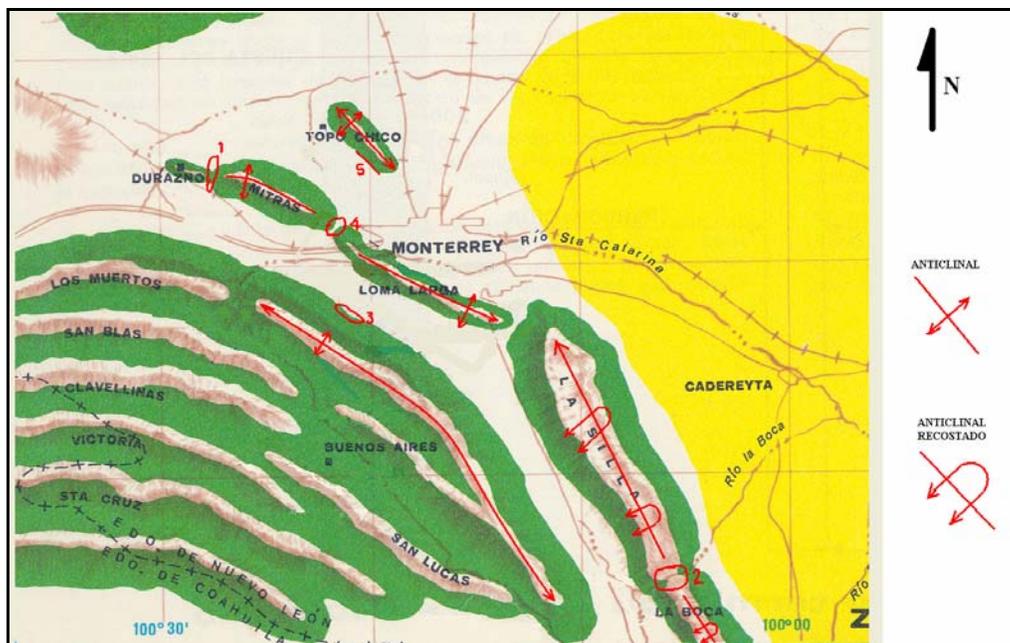


Figura IV.2. Recorrido en áreas de Monterrey, numerando los sitios visitados.

IV.2.1. CASO RÍO LA BOCA

Como se puede observar en la figura IV.2, en este sitio ubicado en la margen izquierda (con número 2) del río del mismo nombre localizado al sureste de Monterrey, ocurrió en el mes de octubre del 2002 un gran deslizamiento de varios miles de metros cúbicos en forma instantánea (Fotografía IV.2.1).

Los principales motivos que generaron el deslizamiento fueron:

- Pendiente topográfica mayor de 40°.

- Posición de los echados en promedio de 40° hacia el suroeste coincidiendo con la pendiente topográfica.
- Excavación para explotación de materiales al pie de la ladera.

Las rocas afectadas corresponden a estratos gruesos de caliza de la Formación Tamaulipas Superior, dañando únicamente a las instalaciones y equipo de la cantera.



Fotografía IV.2.1. Deslizamiento de ladera en estratos gruesos de calizas debido a excavación al pie del talud.

En las fotografías IV.2.1 y IV.2.2, se observa dicho deslizamiento, así como la parte de extracción de los materiales.



Fotografía IV.2.2. Maquinaria y zona de la excavación al pie del talud.

IV.2.2. CASO FRACCIONAMIENTO RESIDENCIAL DEL VALLE

En la figura IV.2 se marca este sitio con el número 3 y se localiza en la porción noreste del mayor plegamiento de la Sierra Madre Oriental, en donde afloran las rocas calcáreas de las formaciones Agua Nueva y Cuesta del Cura, en las porciones altas y la Formación Méndez; y San Felipe en las laderas.

La inestabilidad de la ladera, en donde se tienen construcciones residenciales se debe a los fuertes echados hacia el noreste que presentan las capas delgadas (menores de 0.15 m) de calizas y lutitas interestratificadas de la San Felipe y las lutitas lajeadas de la Formación Méndez, así como a la presencia de material de talud, al pie de las laderas.

Los deslizamientos en esta zona afectan tanto a las residencias como a las avenidas que sirven para su acceso, mismas que por su inadecuada ubicación o cimentación, propician el movimiento, muchas de ellas al sobrecargar la cresta de la ladera.

En la figura IV.2.2 se muestran las condiciones del fraccionamiento y posteriormente algunas de las fotografías de esta zona. Este mismo panorama se presenta en numerosos lugares, donde las condiciones y las medidas preventivas, no son las adecuadas.

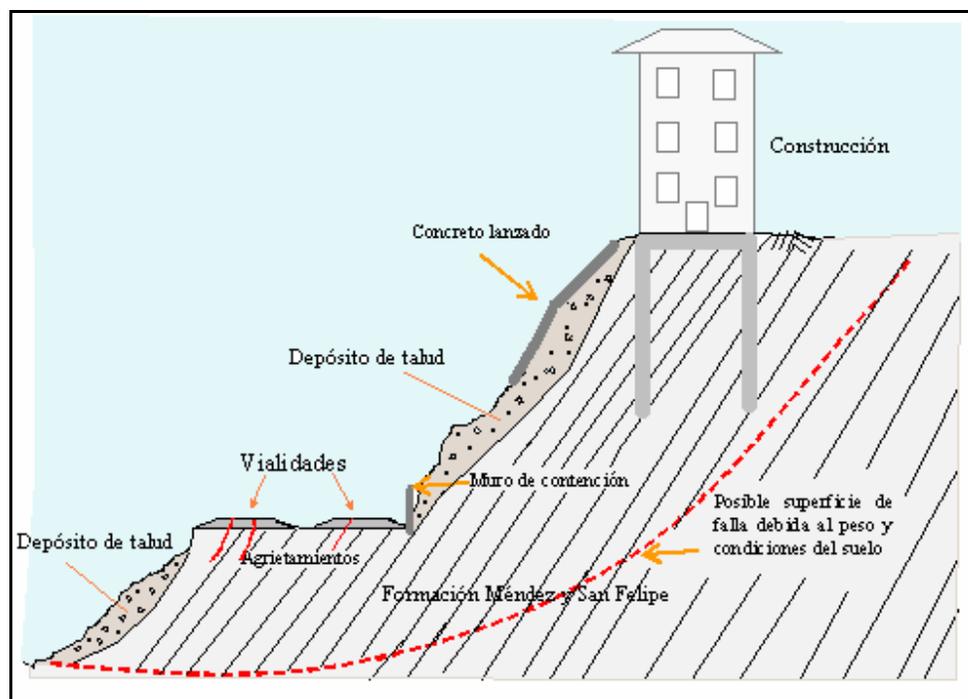


Figura IV.2.2. Condiciones del fraccionamiento *Residencial del Valle*.

En algunos casos se han utilizado métodos de estabilización con el uso de concreto lanzado y mallas; sin embargo, en muchos casos no se ha logrado detener del todo los movimientos ya que se siguen manifestando.

En la fotografía IV.2.2.1 se observa el material inestable en la ladera, constituido por fragmentos de lutita lajeada y depósitos de talud, sobre los que se cimentaron inadecuadamente las residencias. La fotografía IV.2.2.2 muestra las condiciones de las vialidades, ya que presentan agrietamientos, con posibilidades de derrumbes.



Fotografía IV.2.2.1. Ladera inestable con construcciones.



Fotografía IV.2.2.2. Agrietamientos en las vialidades.

La fotografía IV.2.2.3 pertenece a la misma zona; en esta se pueden apreciar las obras inadecuadas, realizadas para la retención de los materiales, además de la pretensión de evitar los deslizamientos, sin obtener resultados positivos.



Fotografía IV.2.2.3. Ausencia de obras adecuadas para retención de caídos.



Fotografía IV.2.2.4. Concreto lanzado en la parte superior de la ladera y construcciones en la cima de esta.

IV.2.3. CASO FRACCIONAMIENTO GARZA-GARCÍA

En esta zona de Monterrey recientemente urbanizada, indicada con el número 4 de la figura IV.2; los cortes efectuados para la vialidad, facilitan el deslizamiento de las capas de calizas y lutitas de la Formación Agua Nueva, que presentan un echado promedio de 60° hacia el sureste, en el mismo sentido que la pendiente topográfica.



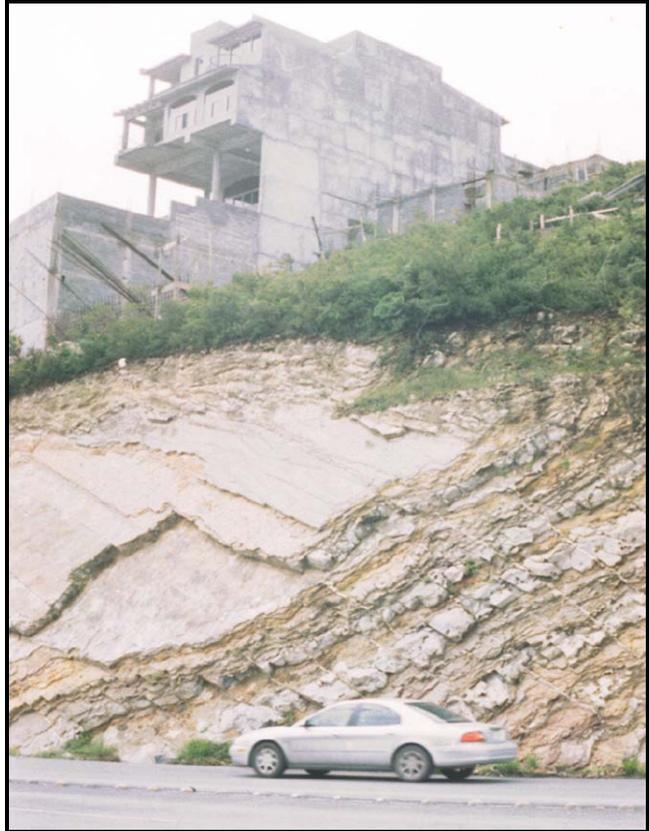
Fotografía IV.2.3.1. Construcción sobre laderas inestables con métodos de estabilización insuficientes.

Las grandes construcciones urbanas desplantadas sobre ellas han presentado ya fracturamientos de importancia, debidas al deslizamiento de la ladera, no obstante que se ha tratado de evitar el movimiento con la aplicación de concreto lanzado y anclaje.

Las fotografías IV.2.3.2 y IV.2.3.3 muestran diferentes vistas de la estratificación con fuerte echado de las capas de lutitas y calizas de la Formación Agua Nueva, a favor de la pendiente.



Fotografía IV.2.3.2. Estabilización con concreto lanzado.

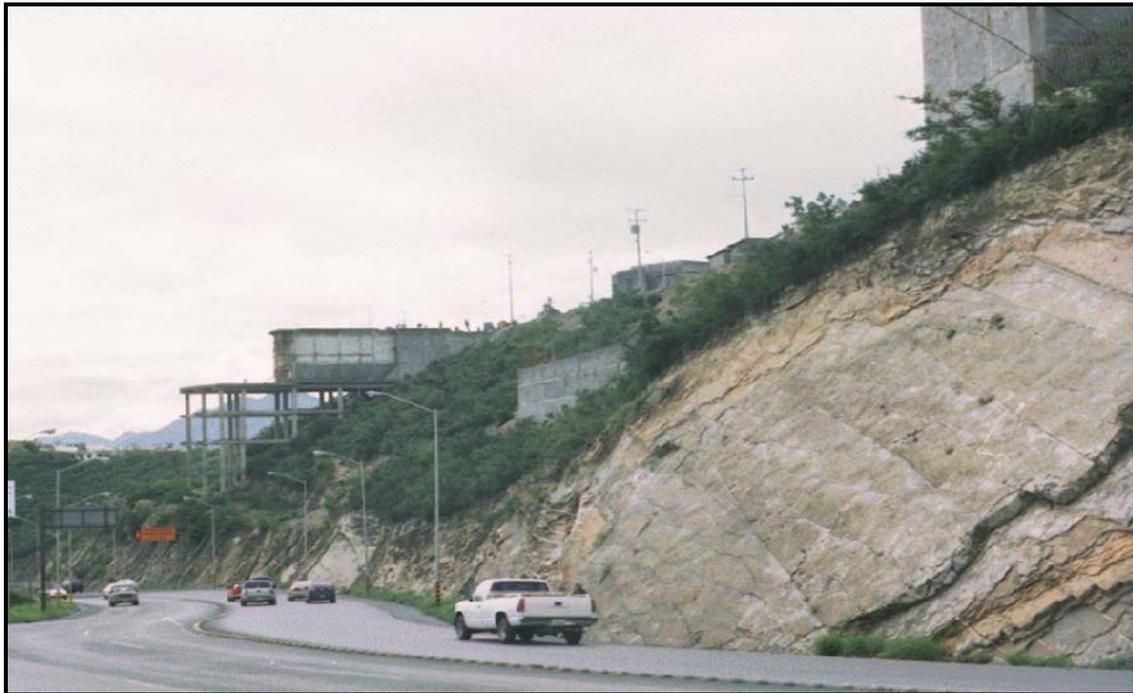


Fotografía IV.2.3.3. Estratificación a favor de la pendiente.



Fotografía IV.2.3.4. Colonias residenciales desplantadas en zonas de fuerte pendiente topográfica y estratos de caliza y lutita con echado a favor de la pendiente.

En la Fotografía IV.2.3.4 se observa la urbanización de zonas con alto nivel de susceptibilidad, debido a las condiciones del material sobre el que se desplantan, las fuertes pendientes que constituyen la zona y la magnitud del incremento de peso que sobre la cabeza del talud; de igual forma, las fotografías IV.2.3.5 y IV.2.3.6 exponen la misma situación, donde se observa el fuerte ángulo de echado de los estratos y las construcciones en la porción alta de la Formación Agua Nueva.



Fotografía IV.2.3.5. Numerosas construcciones desplantadas en la cabeza de las laderas.



Fotografía IV.2.3.6. Fuerte ángulo del echado de las capas con construcciones en la cima.

IV.3. ÁREA SUR

Para el área sur se presentan los casos de Teziutlán y Zapotitlán de Méndez, que se encuentran en la Sierra Norte del Estado de Puebla, y su elección se basó en las condiciones que presenta esta zona ya que los deslizamientos son numerosos con la presencia de las lluvias afectando constantemente a la población.

IV.3.1. SIERRA NORTE DEL ESTADO DE PUEBLA

Una parte importante del territorio poblano, ubicado en las regiones norte y nororiental, está constituido por serranías de varios cientos de metros de altura que pertenecen a la cadena montañosa de la Sierra Madre Oriental.

Durante 1999, en esta región, se produjeron una gran cantidad de deslaves, fallas de laderas, erosión de suelos, inundaciones y represamiento de ríos causando pérdidas económicas y humanas en más de 80 comunidades; algunos de estos poblados fueron los de Zapotitlán de Méndez y Teziutlán.

En la comunidad de Zapotitlán de Méndez (Cuanalo y Melgarejo, 2002), se presentaron deslizamientos de laderas e inundaciones por las precipitaciones pluviales acaecidas entre los meses de septiembre y octubre de dicho año.

El área en cuestión, corresponde a la subprovincia de las Sierras Bajas, en su límite con la Provincia Fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano; por esta razón, se encuentran relacionadas formaciones geológicas marinas características de la Sierra Madre Oriental, con rocas volcánicas del Cinturón Volcánico Transmexicano de edad Terciaria.

A partir de la ciudad de Zaragoza, donde se pasa de zona de valle a sierra, existe una gran variedad de rocas y suelos que conforman las serranías; entre las rocas encontramos las calizas, lutitas, limolitas y areniscas, todas ellas de origen sedimentario marino, razón por la cual se pueden encontrar entre su estructura, fósiles de animales marinos que existieron hace millones de años.

También aparecen rocas volcánicas producto de emisiones de lava, lapillis y ceniza, arrojados en diferentes eventos por los volcanes existentes en la región (Cofre de Perote, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, etc.). Este último tipo de rocas incluye basalto tanto masivo como vesicular, además de tobas, las cuales cuando aparecen consolidadas dan origen a materiales que se han utilizado en la construcción (rocas suaves y fáciles de labrar), y cuando no están consolidadas dan origen a suelos granulares pumíticos (arenas limosas).

Se pueden observar en algunos taludes de cortes de carretera, rocas de origen metamórfico, como esquistos y pizarras, que según Fries *et al.* (1962) corresponden al basamento más antiguo de materiales existentes en el estado de Puebla, con edad estimada en más de 900 millones de años (Consejo de Recursos Minerales, 1999).

Varios ríos se originan de escurrimientos superficiales y manantiales de la zona como los de Chignautla que abastecen a Teziutlán. Los ríos han labrado su cauce a través de los materiales volcánicos granulares no consolidados, los cuales fueron depositados en los eventos volcánicos

ocurridos posteriormente a la etapa de compresión que se produjo por movimientos tectónicos y que provocaron el levantamiento y exposición de las rocas sedimentarias marinas.

IV.3.1.1. CAUSAS NATURALES Y ANTRÓPICAS

La problemática en las regiones norte y nororiente de Puebla es muy compleja e incluye fenómenos como deslizamientos rotacionales y traslacionales de laderas, erosión de suelos y caídos de rocas, lo que dio origen a flujos de suelos y rocas.

Los deslizamientos rotacionales y traslacionales se presentaron fundamentalmente en rocas frágiles y deleznales como lutitas y limolitas, cuyo intemperismo produce suelos finos arcillosos y/o limosos que forman la capa de cobertura superficial; en buena parte de las fallas observadas, este fue el material que deslizó a lo largo de un plano que delimita el contacto de suelo y del estrato rocoso que no está o está poco afectado por los efectos de intemperismo como son los cambios estacionales, los cambios térmicos y la humedad.

La erosión de suelo por escurrimiento de agua superficial se observó fundamentalmente en materiales granulares volcánicos no consolidados como arenas pumíticas que contienen algo de limos. La caída de rocas se presentó en zonas de cierta resistencia que presentaban discontinuidades como grietas, fracturas o fisuras, incluyendo calizas de origen sedimentario, tobas (ignimbritas) de procedencia volcánica y rocas metamórficas como esquistos.

La inestabilidad y fallas que sufrieron varias laderas se debieron a una combinación de los siguientes factores naturales: la morfología y topografía de la zona, la geología y características de los suelos de cobertura vegetal, la precipitación pluvial y el escurrimiento superficial; además, los factores antrópicos que incluyen la deforestación, la construcción de obras y el cambio en el uso del suelo.

La vegetación boscosa en las sierras norte y nororiental, impidió que el proceso erosivo fuera acelerado; sin embargo, las condiciones cambiaron a partir de 1940 cuando la población aumentó, la cual necesitó abrir espacio en los bosques y preparar el terreno para actividades agropecuarias.

Esto desarrolló una cerrada red caminera que modificó la hidrología; las veredas generan sitios de alta infiltración que aceleran los procesos de saturación y disparan el movimiento de grandes volúmenes de material.

La deforestación (Cuanalo, 2001), los caminos y el cambio en el uso del suelo, entre otros, han provocado una modificación de la flora y la hidrología; la nueva vegetación, no protege a las rocas con la misma eficacia que los bosques, por lo que se amplifican la intensidad y la velocidad del proceso erosivo, dando origen a caídos, deslizamientos y flujos de materiales.

IV.3.1.2. PRECIPITACIÓN PLUVIAL Y ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

La precipitación pluvial de 1999, originada por las depresiones tropicales 11 y 14, causó serios daños e inundaciones en el Distrito Federal, Puebla, Veracruz, Tabasco, Campeche y Chiapas.

En las sierras norte y nororiental del estado de Puebla se registraron precipitaciones del orden de 1,500 mm en tres meses (CNA, 2000), provocando que los ríos, arroyos y corrientes tributarias aumentaran significativamente su caudal, arrastrando partículas mucho más grandes y en mayor

volumen, incrementando su velocidad, su régimen de flujo que durante y después de una tormenta se vuelve turbulento, por lo que aumenta su fuerza erosiva.

Esto tuvo un gran impacto en las cuencas pequeñas de esta zona, las cuales por su fisiografía son mucho más sensibles a lluvias de alta intensidad y corta duración (Springall, 1980).

La lluvia se infiltró y saturó los suelos que constituyen la capa superficial que cubre las formaciones rocosas de las montañas, que tienen varios metros de espesor y donde crecen plantas y árboles, aumentando su peso por unidad de volumen y provocando las fallas de taludes con superficie de deslizamiento plana o circular, debida a fuerzas gravitacionales.

IV.3.1.3. MORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA

Esta zona presenta una morfología de tipo montañoso y escarpado, que incluye cerros con elevaciones de hasta 3,200 msnm (Sierra de Teziutlán y Zacapoaxtla) y algunas planicies o valles. Debido a que los cerros presentan pendientes muy pronunciadas y alturas de varios cientos de metros, las fuerzas gravitacionales tienen marcada influencia en su estabilidad, afectando el comportamiento de las masas de roca o suelo que constituyen las laderas naturales.

Esta región presenta una geología muy variada, que incluye rocas sedimentarias de la era mesozoica como calizas, conglomerados, areniscas, lutitas y limolitas; entre estas rocas y cubriéndolas, se encuentran rocas de tipo volcánico de la era cenozoica como basaltos, andesitas, riolitas e ignimbritas. Los suelos que cubren a las montañas han sido originados por los agentes de intemperismo y desintegración, de los cuales la temperatura, la humedad y la vegetación han sido determinantes en la descomposición de los minerales que integran las rocas subyacentes, dando origen a suelos cohesivos arcillosos y limosos, y suelos friccionantes como gravas, arenas y limos inorgánicos (Bowles, 1989).

En gran parte de la región, las rocas calizas presentan planos de estratificación que delimitan espesores de material variables entre 0.20 y 1 m; estas formaciones son estables cuando la inclinación de la ladera es contraria al buzamiento de los planos estratigráficos. La estabilidad de las laderas conformadas por lutitas y limolitas es precaria, ya que estos materiales presentan planos de foliación con espesores de unos cuantos centímetros, y son rocas muy deleznales y frágiles.

Los suelos friccionantes como gravas, arenas y limos inorgánicos, que cubren principalmente a rocas de tipo volcánico, son susceptibles de erosión provocada por escurrimientos de agua, además presentan inestabilidad cuando la inclinación del talud es mayor que su ángulo de fricción interna. Con relación a los suelos finos, cohesivos, limosos y arcillosos, y sus mezclas con suelos gruesos (grava y arena), su comportamiento depende de su cohesión, que a su vez es un parámetro de resistencia en función de su contenido de agua; suelos de este tipo en estado seco pueden ser resistentes como un tabique, en cambio, si poseen altos contenidos de agua pueden fluir como un líquido viscoso.

Además de las características de los suelos y rocas, la geometría del propio talud, incluyendo su altura e inclinación, tienen mucho que ver con su estabilidad (Winterkorn and Fang, 1985).

IV.3.1.4. ZONIFICACIÓN POR RIESGO DE DESLIZAMIENTO DE LADERAS

A partir de estudios topográficos, geológicos, de mecánica de suelos e hidrológicos realizados por la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (FI-BUAP), se

estableció una zonificación preliminar de riesgo por deslizamiento de laderas con base en (Cuanalo, *op. cit.*):

- a) Las rocas sedimentarias frágiles como lutitas, limolitas o areniscas, cuyos suelos residuales presentan superficies de falla rotacional que se originan por la reducción de su resistencia al esfuerzo cortante y variación de su consistencia (pasando de un estado sólido a plástico y finalmente a viscoso al aumentar su contenido de agua), tienen pendientes entre 15 y 25 grados, resultando en principio atractivos para la construcción de viviendas sobre su talud.

Estas laderas fallan súbitamente una vez que el suelo se satura y se comporta como fluido viscoso. Todas estas fallas se presentaron en zonas deforestadas.

- b) Los materiales volcánicos granulares constituidos por arenas pumíticas, vulnerables a las corrientes de agua superficial, presentaron en general superficies de falla plana típica de suelos friccionantes.
- c) La caída de rocas, que va acompañada con fuertes corrientes de agua, produce considerable ruido, lo que permite en ocasiones el desalojo oportuno de la población.

También se encuentran laderas que presentan morfología de tipo lomerío, las cuales se pueden clasificar como sitios de alto riesgo para las familias y construcciones emplazadas en la corona, el cuerpo del talud o al pie de la misma.

Las características de estas laderas son:

- Pendientes del orden de 20 grados.
- Deforestación.
- Emplazamiento de viviendas en la cresta, en su parte media o en su pie.
- Corte en alguna parte de la ladera para la construcción de un camino u obras.

IV.3.1.5. RIESGO GEOTÉCNICO Y CONSTRUCTIVO

Esta zonificación fue realizada desde el punto de vista geotécnico y constructivo, e implica que los materiales que existen en esa zona son susceptibles de experimentar fuertes cambios en sus propiedades mecánicas (resistencia y compresibilidad), al variar su contenido de agua o al experimentar descompresión de las rocas por cortes efectuados en las laderas, situación que provoca que pasen de una condición de estabilidad a una de deterioro acelerado.

Estos materiales presentarán en general buena resistencia en estado seco y se comportarán como un sólido, pero al aumentar su contenido de agua pasarán a un estado plástico y posteriormente a uno viscoso con un comportamiento similar al de un líquido, lo que los hace muy peligrosos al saturarse durante o después de la época de lluvias.

Las construcciones en las laderas de materiales sedimentarios (lutitas y limolitas), pueden sufrir daños como agrietamientos, desplome, distorsión y hundimientos. Varios de los deslizamientos rotacionales observados en materiales de este tipo, se originaron en la zona donde se había efectuado previamente un corte para un camino o para conformar una terraza para una vivienda. De ahí la importancia de contar con un estudio geotécnico de estabilidad que contemple el diseño de estructuras de contención. También debe recomendarse la reforestación de los sitios clasificados como de riesgo.

A continuación se comentan dos casos específicos, para ejemplificar la problemática de la zona norte del estado de Puebla.

IV.3.2. CASOS ESPECÍFICOS EN LA ZONA SUR DE LA SIERRA MADRE ORIENTAL

IV.3.2.1. CASO ZAPOTITLÁN DE MÉNDEZ.

Los días 4 y 5 de octubre de 1999 ocurrieron los picos máximos de precipitación pluvial en esa zona (Capra *et al.*, 2003(a)), alcanzando un máximo de 400 mm en 24 horas, con graves daños en la infraestructura de Zapotitlán de Méndez.

De acuerdo con los autores mencionados anteriormente, en esa región se presentaron dos tipos de movimiento:

1. Deslizamiento superficial de suelo volcánico y capa vegetal, alcanzando una distancia máxima de 10 m.
2. Deslizamientos profundos de tipo rotacional que se convirtieron en flujos de escombros, alcanzando una distancia máxima de 500 m.

Ambos movimientos tuvieron una gran relación con las características litológicas que afectaron; tratándose para el primer caso de suelos volcánicos del Terciario y capa vegetal, y para el segundo caso de lutitas plegadas del Cretácico.

Además, el flujo superficial por su magnitud limitada no afectó directamente a la población; por otro lado, el deslizamiento profundo que al estar asociado a la debilidad estructural de la ladera ocasionó una mayor afectación; esto se debió al buzamiento de las capas plegadas de las lutitas en dirección a favor de la pendiente.

En la figura IV.3.2.1.1 se presenta la localización del sitio con respecto a la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico Transmexicano, especialmente dentro de la Sierra Norte de Puebla. Se observa también, la densidad de poblados y el área de afectación.

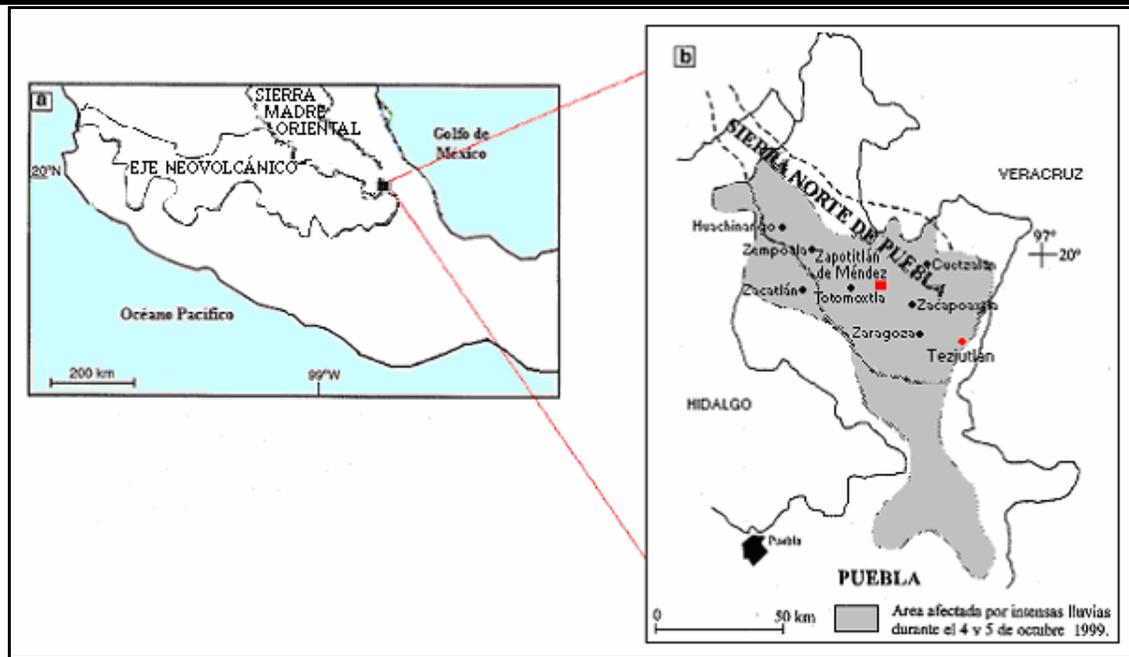


Figura IV.3.2.1.1. Localización de la zona Zapotitlán de Méndez y Teziutlán (Capra *et al.*, 2003(b), adaptado por Suárez García O. G.)

La estratigrafía de la región está constituida por:

- Terciario Superior. Depósitos de ceniza volcánica.
- Jurásico Superior. Formación Pimienta (calizas).
- Jurásico Superior. Formación Tamán (calizas, margas, lutitas y areniscas).
- Jurásico Medio. Compuesta por secuencia deltaica (limolitas, areniscas y conglomerados).

En la figura IV.3.2.1.2 se muestran las diferentes litologías en el área y las estructuras geológicas presentes, así como los perfiles geológicos esquematizados en la figura IV.3.2.1.3.

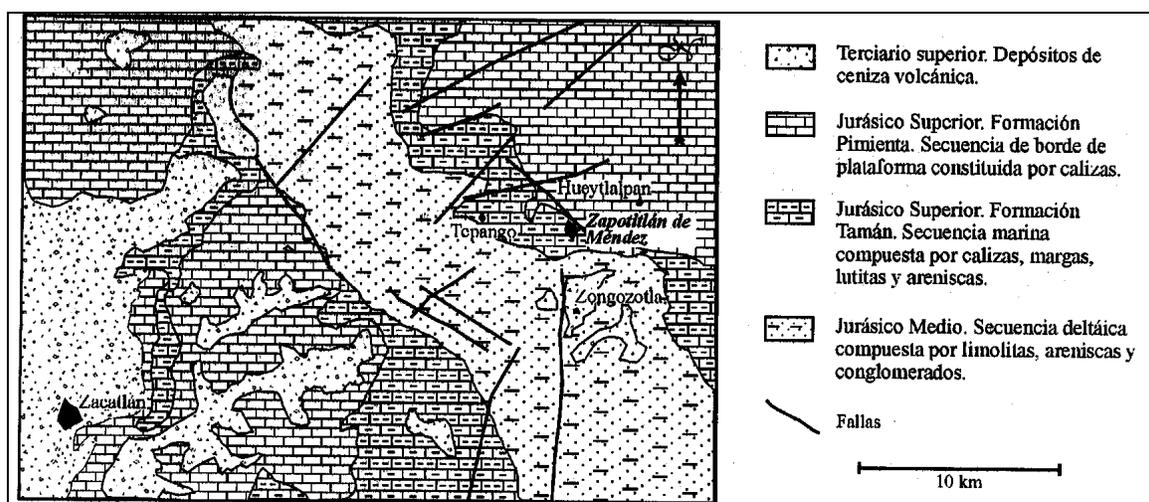


Figura IV.3.2.1.2. Mapa geológico simplificado de la región de estudio (INEGI, 1984, en Capra *et al.*, 2003(a)).

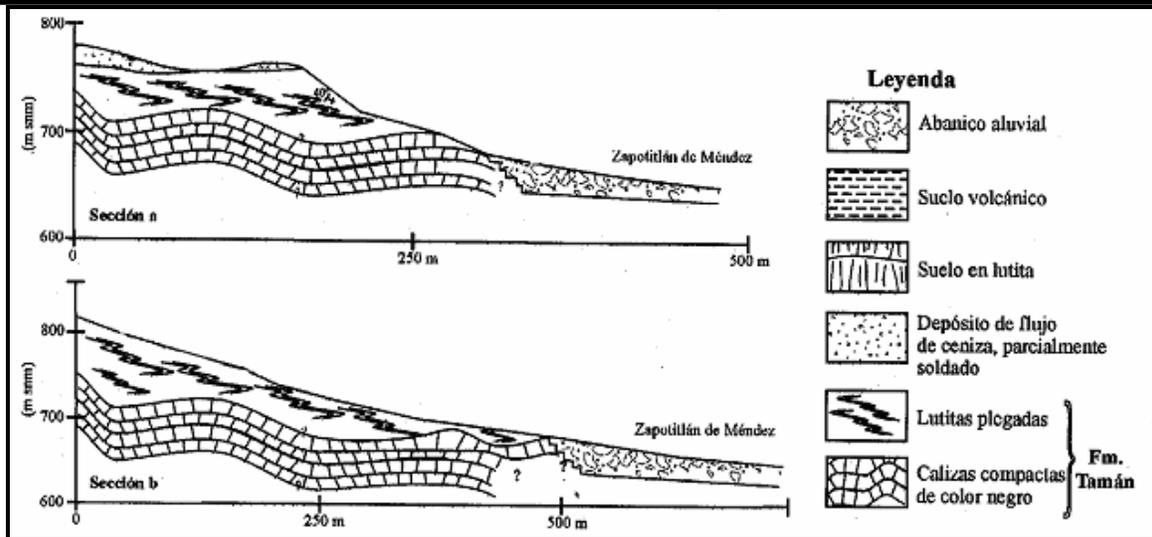


Figura IV.3.2.1.3. Perfiles geológicos esquematizados a lo largo del relieve meridional (Capra *et al.*, 2003 (a)).

IV.3.2.2. CASO TEZIUTLÁN

En el mismo año y debido a las precipitaciones mencionadas, se presentó un evento de remoción en masa en la población de Teziutlán, ocasionando aproximadamente 150 muertes.

Los investigadores Capra *et al.* (2003 (b)), identificaron dos tipos de movimientos:

- ❖ *Erosión superficial* de una secuencia de ignimbritas poco soldadas, que formaron pequeños abanicos de detritos.
- ❖ *Flujos detríticos* por la remoción de secuencias volcánicas compuestas de horizontes de ceniza y suelos antiguos arcillosos, en los que se favorecía la formación de acuíferos colgados sobre un acuícludo.

La causa de la falla se debió a la generación de presión de poro.

Las características geológicas del área de Teziutlán, están constituidas por una secuencia delgada del Cretácico compuesta por calizas plegadas, cubierta por delgados depósitos volcánicos, arrojados desde la caldera de los Humeros localizada a 40 km al sur del sitio.

En estos deslizamientos fue importante también el ángulo del talud, variando de 17° a 40° y afectando superficies que van de los 200 m² hasta 53,500 m².

En este caso se demostró la alta susceptibilidad de falla de las laderas, durante lluvias intensas.

En la figura IV.3.2.2 se muestran las diferentes unidades litológicas, así como el área afectada por los dos tipos de movimientos.

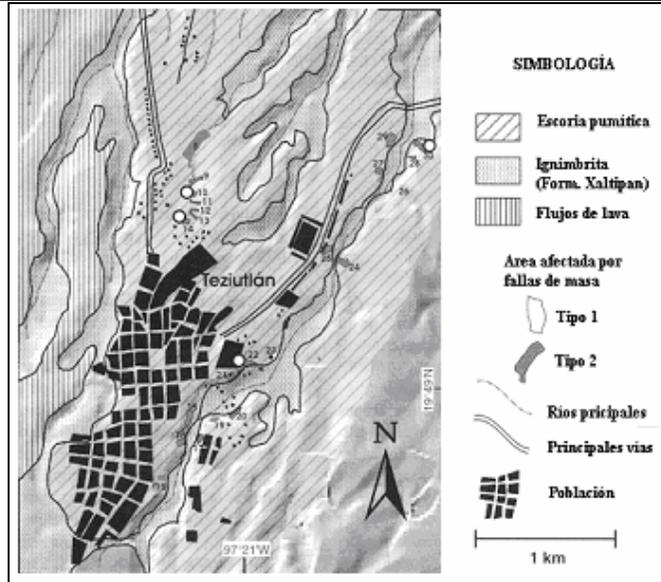


Figura IV.3.2.2. Mapa geológico de la distribución de unidades volcánicas y áreas afectadas de la zona Teziutlán (Capra *et al.*, 2003 (b)).

CAPÍTULO V

ELABORACIÓN DEL MAPA

V.1. INTRODUCCIÓN

A través de los mapas se pueden observar de forma gráfica las características de un sitio determinado; ya que se asimila mejor y más rápidamente la información a través de imágenes; por su parte, la cartografía es un método muy efectivo para representar las condiciones o características de una determinada región. Con esto se pretende que la población civil, a través de cartografía puede apreciar el grado de susceptibilidad a deslizamientos que presenta el área de su residencia.

Para la prevención de un desastre, es de gran utilidad contar con un mapa en el que se zonifique el riesgo en el que, de acuerdo a su situación, se encuentra una superficie determinada.

Los deslizamientos están sujetos a muchos grados de incertidumbre por los diferentes tipos de movimientos, velocidades, modos de falla, materiales, restricciones geológicas, etc. (Morgenstem, 1997).

Zonificar consiste en dividir el terreno en áreas homogéneas y calificarlas de acuerdo al grado real o potencial de amenaza o de riesgo.

En este caso se trabaja con una metodología de mapeo indirecto con base en los factores que contribuyen a la ocurrencia de un deslizamiento.

De acuerdo a la International Association of Engineering Geology (IAEG, 1976), una zonificación se puede efectuar en diferentes escalas de acuerdo a las necesidades y a las dimensiones de la región.

1. Escala nacional (más de 1: 1,000 000).
2. Escala regional (1: 100 000 a 1: 500 000).
3. Escala de cuenca (1: 25 000 a 1: 50 000).
4. Escala grande (1: 5 000 a 1:15 000).

V.2. PREPARACIÓN DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD

La *susceptibilidad* (Suárez, 1998), expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno. La probabilidad de ocurrencia por un factor detonante como una lluvia o un sismo no se considera en un análisis de este tipo y se puede evaluar de dos formas:

1. *Sistema empírico*. Se observa directamente la mayor cantidad de deslizamientos ocurridos en el área estudiada y se evalúa la relación entre los deslizamientos y la geomorfología del terreno.

2. *Sistema teórico.* Se mapea el mayor número de factores que se considera que puedan afectar la ocurrencia de deslizamientos y luego se analiza la posible contribución de cada uno de los factores.

Para la preparación de un mapa de susceptibilidad a deslizamientos, no existe un procedimiento estandarizado; existe mucha libertad en la determinación de los pasos a seguir, más sin embargo, el mapa de susceptibilidad se considera un mapa en el que se zonifican las unidades de terreno que muestran una actividad de deslizamientos similar o de igual potencial de inestabilidad, la cual es obtenida de un análisis multivariable entre los factores que pueden producir deslizamientos y el mapa de inventario de deslizamientos.

Suárez (*op. cit.*) menciona que al superponer los elementos o parámetros de los mapas indicados, como se muestra en la figura V.2.1, se puede elaborar un plano delimitando las áreas susceptibles a deslizamiento, analizando las situaciones con la ayuda de los diversos planos. Deben determinarse en cada sector el tipo de proceso, las áreas de influencia y el nivel de susceptibilidad en lo referente a la posibilidad de pérdida de vidas humanas, bienes materiales y obras de infraestructura y la evolución de los procesos con referencia al tiempo y al espacio.

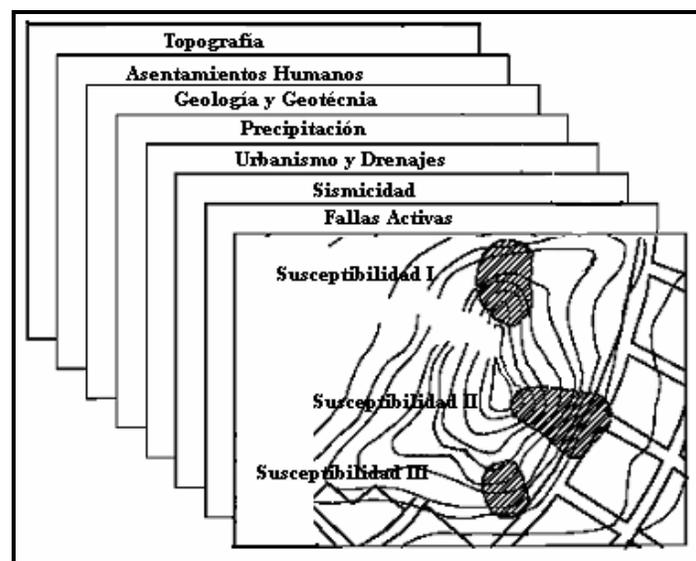


Figura V.2.1. Ilustración de la metodología empleada para la elaboración del mapa de susceptibilidad.

De acuerdo a su topografía se pueden identificar las áreas más susceptibles en áreas de montañas de alta pendiente y valles semiplanos.

En un mapa geológico, a cada formación se le puede asignar un grado de susceptibilidad. Dentro de una misma zona se pueden identificar áreas con diferentes niveles de susceptibilidad dentro de la misma formación por la combinación de diversos factores.

Las áreas cubiertas por coluviones, son generalmente de susceptibilidad alta, al igual que las áreas con procesos intensos de erosión y las áreas de influencia de las grandes fallas geológicas. El uso de la tierra y el drenaje son otros factores comunes que pueden influir en la inestabilidad.

Kanungo (1993) presenta un criterio para determinar el grado de susceptibilidad a

deslizamientos, proponiendo cinco grados que van de muy alta a muy baja dependiendo de las condiciones; en la tabla V.2.1 se presenta este criterio.

Tabla V.2.1. Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a los deslizamientos.

GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD	CRITERIO
Muy alta	Laderas con zonas de falla, masas de suelo altamente meteorizadas y saturadas, y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe alta posibilidad de que ocurran.
Alta	Laderas que tienen zonas de falla, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran.
Moderada	Laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturados donde no han ocurrido deslizamientos pero no existe completa seguridad de que no ocurran.
Baja	Laderas que tienen algunas fisuras, materiales parcialmente erosionados no saturados con discontinuidades favorables, donde no existen indicios que permitan predecir deslizamientos.
Muy baja	Laderas no meteorizadas con discontinuidades favorables que no presentan ningún síntoma de que puedan ocurrir deslizamientos.

Kanungo, 1993.

La información de los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos se puede utilizar más eficientemente si se incluyen las técnicas que se pueden utilizar para la reducción de la susceptibilidad.

En la tabla V.2.2 se presenta la valoración de factores para evaluación de susceptibilidad a deslizamiento debida a lluvia (Asian Technical Committee on Geotechnology for Natural Hazards in ISSMFE, 1997).

Tabla V.2.2. Valoración de factores para evaluación de susceptibilidad a deslizamiento.

FACTOR	CARACTERÍSTICA	RANGO DE AFECTACIÓN
Altura del talud	≥10 m.	7
	<10 m.	3
Inclinación del talud	≥45°	1
	<45°	0
Salientes topográficas	Presentes	3
	Ausentes	0
Espesor de suelo superficial	≥0.5 m.	1
	<0.5 m.	0
Nacimientos de agua	Presentes	1
	Ausentes	0
Fallas alrededor del área	Presentes	3
	Ausentes	0

Suárez, 1998 adaptado por Suárez García O. G.

V.3. EVALUACIÓN POR UN EXPERTO

La evaluación por expertos es tal vez, el método del mapeo más utilizado. Este se basa en la experiencia de un experto quien define las reglas y criterios de estabilidad y evolución de los movimientos. Estos criterios se basan en la experiencia adquirida en situaciones supuestamente similares.

Las ventajas de la evaluación por parte de un experto son el análisis multicriterio que está implícito en la mente del profesional experimentado, que puede ser analizado en diferentes escalas con un manejo constante de información anterior basada en la descripción detallada de la situación de campo.

Las desventajas de la evaluación por expertos están en la subjetividad de los criterios. Cada experto puede llegar a conclusiones diferentes de acuerdo a su propia experiencia. El experto no es dado a analizar alternativas y es muy difícil y prácticamente imposible que el experto pueda explicar su criterio y sus reglas para permitir un análisis crítico de los resultados obtenidos (Leroi, 1996).

V.4. BASES CONSIDERADAS PARA ELABORAR EL MAPA

Para el caso del mapa objetivo de esta tesis, se consideró adecuada la escala 1: 4000 000, dadas las dimensiones de la Sierra Madre Oriental que atraviesa a la República Mexicana, desde la frontera con Estados Unidos de Norteamérica hasta el Eje Neovolcánico, además de contar con planos base de diversos temas relacionados con ella, elaborados particularmente por el Instituto de Geografía de la UNAM.

Para la determinación de la configuración de los límites de la fisiografía de la sierra, se emplearon las siguientes cartas por la diversidad que existe en algunas de ellas:

- Carta de *Clasificación de Regiones Naturales de México 1, Provincias Fisiográficas* del Instituto de Geografía de la UNAM de Raisz, 1964.
- Carta de *Clasificación de Regiones Naturales de México 2* del Instituto de Geografía de la UNAM de Cervantes-Zamora et al., Enero 1991.
- Carta de *Geología* del Instituto de Geografía de la UNAM de Padilla y Sánchez y Aceves Quesada, Mayo 1992.
- Carta de *Geomorfología 2* del Instituto de Geografía de la UNAM de Lugo-Hubp y Córdova Fernández, Marzo 1992.
- Carta de *Hidrografía e hidrometría* del Instituto de Geografía de la UNAM de Maderey y Torres, Septiembre 1991.
- Carta de *Hipsometría y Batimetría* del Instituto de Geografía de la UNAM de INEGI, Lugo-Hubp et al., Junio 1989.
- Carta de *Provincias Fisiográficas* del INEGI.

A través de la carta de *hidrografía e hidrometría* se verificó que el parteaguas y los principales ríos que nacen en ella coincidieran con la configuración de la sierra. Con las tres primeras cartas y las dos últimas se determinó la configuración de la Sierra Madre Oriental que se presenta en esta tesis; con la carta geológica se obtuvieron las principales unidades litológicas y estructuras a nivel regional que integran a la sierra.

De acuerdo con los diversos criterios analizados en los trabajos de varios autores que han realizado investigaciones relacionadas con la susceptibilidad a deslizamientos en laderas y tomando en consideración las características geomorfológicas, geológicas, climatológicas y sísmicas donde se ubica la Sierra Madre Oriental, se consideró adecuado el utilizar cinco niveles de susceptibilidad, denominándolas: muy alta, alta, media, baja y muy baja, para hacer una descripción a nivel regional, tomando específicamente en cuenta los siguientes factores:

- Formaciones Geológicas
- Estructuras Geológicas
- Precipitación
- Sismicidad
- Topografía
- Fallas activas

Sin embargo, para el caso de esta tesis por tratarse de condiciones regionales y no locales, se emplearon parcialmente los dos sistemas de evaluación propuestos por Suárez (*op. cit.*) tanto teórica como empíricamente, analizando en los mapas los diversos factores que se consideraron más importantes para la ocurrencia de deslizamientos en la Sierra Madre Oriental, así como la contribución de cada uno de ellos y su influencia.

En los casos específicos se pudieron observar directamente los deslizamientos ocurridos en las diversas áreas, evaluando su relación con respecto a los parámetros mencionados anteriormente.

Para el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de la Sierra Madre Oriental final, se efectuó la sobreposición de las siguientes cartas:

- Carta de Hipsometría y Batimetría.
- Carta de Geología.
- Carta de Precipitación.
- Carta de Sismicidad.

Para la realización del mapa se recurrió al uso de uno de los programas de información geográfica denominado ArcGIS 8.2, a través del cual se llevó a cabo la digitalización de cada mapa, para posteriormente hacer una tabla de valores, con los cuales poder hacer el efecto de la suma de matrices y así obtener el mapa resultado.

El proceso detallado consiste en:

- Con un sistema de información geográfica, se digitalizan las capas de información trazando zonas representativas.
- Se asignan valores a cada zona usando una base de datos; cada zona está enlazada a un registro de una tabla en una base de datos.
- Se sobreponer las capas espacialmente
- Se suman gráficamente y las capas de información se fusionan; las capas y las zonas comparten sus límites y se combinan con los límites de otras zonas, al mismo tiempo de que comparten sus valores.

- Cuando se han combinado las capas de información, se suman sus valores para obtener el total de susceptibilidad.
- En el sistema de información geográfica, se cambia la simbología (colores de relleno y bordes) para representar con distinto color los rangos de valor.
- -Se agregan otras capas complementarias como Ciudades, Estados, etc.

Los valores, se asignaron dependiendo de las diversas características topográficas, geológicas (litológicas y estructurales) de precipitación y de la sismicidad que se presenta en cada zona, además de la influencia de cada uno de estos factores en la ocurrencia de los deslizamientos.

Los valores para el factor de topografía, se asignaron de acuerdo a las condiciones que están presentes en cada región; estos variaron de 1 a 5 y se eligieron basándose en las diferentes elevaciones y pendientes. En las zonas de poca pendiente, en la base o en la cima se les asignó el valor más bajo ya que su influencia sobre los deslizamientos es baja y para las zonas en que la sierra presenta elevaciones mayores, específicamente las laderas, el valor es más alto.

El rango asignado al factor de litología, varió de 0 a 4, y se eligieron dependiendo de las características propias de cada formación correspondiendo los valores bajos a las calizas y/o rocas ígneas extrusivas densas o masivas y los valores altos a las formaciones de granulometría fina (arcillosas, limosas y arenosas), fracturadas y lajeadas.

Los valores utilizados para calificar a las estructuras geológicas, fluctúan de 1 a 4 correspondiendo el valor de uno a pliegues de pequeñas dimensiones y amplios, el valor de 2 a pliegues anticlinales mayores con fuertes buzamientos, el valor de 3 a la zona con fallas normales y el valor de 4 para las zonas de pliegues recumbentes, fallas inversas y fallas transcurrentes NE - SW; dentro de las que encontramos los sistemas 5, 6, 7, 8, 9 y 10.

Con respecto a las zonas sísmicas presentes en la Sierra Madre Oriental, se consideraron únicamente dos valores, 1 y 2, correspondiendo el más bajo a la zona A en el que se presenta muy baja intensidad de sismicidad, y el mayor a la zona B donde la sismicidad es de intensidad baja.

Adicionalmente, para la influencia de la precipitación en la ocurrencia de los deslizamientos, los valores variaron en un rango de 0 a 5 para los cuales, correspondiendo el valor de cero a las precipitaciones menores a 600 mm anuales y el de 5 a las zonas con precipitaciones mayores a los 4,000 mm anuales.

Los rangos de valores considerados en cada uno de los factores que influyen en la estabilidad de las laderas para la realización del mapa de esta tesis, fue de baja escala atendiendo a la magnitud de la zona de estudio, por lo cual se generalizó, presentándose los resultados en el mapa anexo.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS INTEGRAL DE LA INFORMACIÓN Y RESULTADOS

VI.1. INTRODUCCIÓN

Para determinar las áreas susceptibles a deslizamientos y poder construir el mapa establecido, ha sido necesario analizar en conjunto toda la información, tanto la existente como la obtenida en forma personal, teniendo así un panorama más amplio de las condiciones y los factores que favorecen la remoción de masa en el área de estudio.

Para realizar el *análisis integral de la información*, fue indispensable tomar en cuenta el tipo de materiales (suelos y/o rocas) que son susceptibles a deslizamiento, analizando también los casos ya registrados, así como aquellos aunados a ciertas condiciones tales como la sismicidad y las estructuras geológicas.

También se hace una consideración de las propiedades mecánicas e hidráulicas más importantes desde el punto de vista de la mecánica de suelos, además de los aspectos geotécnicos e hidrogeológicos que dominan la región.

Atendiendo al objetivo principal de esta tesis; y con base tanto en el análisis integral mencionado como en los reconocimientos directos al campo en las regiones norte y sur de la Sierra Madre Oriental, se elaboró la tabla VI.4 anexa en la que en forma resumida se presenta la susceptibilidad a deslizamientos, en cada una de las subprovincias que integran a la Sierra Madre Oriental.

VI.2. INFORMACIÓN INTEGRADA

Por lo que respecta al tipo de material, a través de toda la recopilación de datos y los recorridos realizados, se observa que la Sierra Madre Oriental es principalmente de origen sedimentario, por lo que contiene grandes cantidades de rocas carbonatadas, arcillosas, limosas y arenosas.

Entre las rocas que encontramos están las calizas, lutitas, limolitas y areniscas, las cuales son materiales que presentan más susceptibilidad a deslizamientos, aunado a los factores de estratificación, plegamiento, fallamiento y los que detonan estos movimientos, como la precipitación, los sismos y la pendiente del terreno.

La principal unidad tectónica que integra a la Sierra Madre Oriental (López-Ramos, 1980), es un anticlinorio formado de rocas cretácicas y jurásicas. En su mayor parte los plegamientos son asimétricos y están recostados al noreste formando cabalgaduras, donde desaparecen algunas formaciones, como puede verse en el frente de la Sierra de Montemorelos y el Cerro de la Silla, en la subprovincia de la Sierra Alta.

En el Capítulo IV se mencionan como casos registrados en la porción norte de la sierra el correspondiente al río de La Boca, donde se observó que el deslizamiento se presentó en estratos gruesos de calizas, pertenecientes a la Formación Tamaulipas Superior; los principales factores detonantes fueron la excavación al pie del talud y la presencia de agua en la ladera por saturación debida a las lluvias.

En la región sur de la misma sierra, los materiales involucrados en los deslizamientos de Zapotitlán correspondieron a suelos volcánicos del Terciario y capa vegetal, así como lutitas plegadas del Cretácico. En el caso de Teziutlán, se trató de ignimbritas poco soldadas y secuencias volcánicas, además de suelos antiguos arcillosos. El detonante en ambos casos fue la intensa precipitación pluvial, generándose presión de poro aunados a la pendiente topográfica.

A lo largo de la Sierra Madre Oriental se han presentado diversos casos de deslizamientos, la variedad de condiciones propician este tipo de fenómeno, considerando que el material, la pendiente, la dirección del echado y la precipitación, entre otros factores, los han provocado.

En el Capítulo III se mencionó que las condiciones de sismicidad en la República Mexicana, se presentan divididas en cuatro niveles: Alta, Media, Baja y Muy Baja, dependiendo de la intensidad y la frecuencia de ocurrencia de esta.

En particular, la Sierra Madre Oriental se ve afectada por dos zonas, la A y B que corresponden a las de intensidad *Muy Baja* y *Baja* respectivamente; en estas, los sismos no son muy frecuentes y la intensidad no es uno de los factores que predominan en la ocurrencia de los deslizamientos, por lo que su influencia se consideró con valores bajos en esta tesis.

Con relación a las estructuras geológicas potenciales, los procesos orogénicos que han dado lugar a la Sierra Madre Oriental generaron una serie de plegamientos, fracturamientos y fallamientos; además, de las formaciones que constituyen a esta sierra, no todas presentan problemas de deslizamiento, ya que solo las que se encuentran en las laderas de la misma son en las que se originan dichos movimientos, especialmente en la porción este de la sierra, debido a las fallas inversas y a los pliegues recumbentes que afectan particularmente a las formaciones más arcillosas.

En lo que concierne a las propiedades mecánicas e hidráulicas, la resistencia al esfuerzo cortante en las laderas se ve afectada enormemente por el tipo de material, como en los materiales de granulometría fina (lutitas y limolitas) especialmente si se encuentran en estado de saturación.

Finalmente las condiciones hidrogeológicas en una zona pueden afectar la estabilidad; como se ha venido mencionando, el agua es un agente que altera las condiciones del terreno provocándole inestabilidad, disminuyendo la resistencia, generando incremento de presiones, que actúan como fuerzas motoras, en juntas, incrementando el peso propio del material; entre otros estos son algunos de los cambios que ocasiona la presencia de agua por lo que todo lo relacionado con ésta, fue de gran importancia considerarlo en los resultados.

VI.3. ANÁLISIS POR SUBPROVINCIA

Dadas las características propias de la Sierra Madre Oriental y su gran extensión, se consideró apropiado, efectuar el análisis integral en cada una de las subprovincias fisiográficas que la constituyen.

En cada una de las cuatro subprovincias se analizaron las principales formaciones geológicas que afloran y su relación con la topografía, la precipitación, las estructuras geológicas, las fallas activas y la sismicidad, para poder tener un adecuado manejo de la información, ya que dada la extensión de la sierra y la variedad de sus características, se tiene un mayor control de las condiciones de cada subprovincia y así con esto se efectúa un mejor análisis.

VI.3.1. SIERRA DEL NORTE

En esta subprovincia se encuentran como formaciones arcillosas las denominadas: La Casita, Taraises, La Peña, Agua Nueva, San Felipe y Méndez; como formaciones básicamente constituidas por calizas, las correspondientes a la Cupido, Tamaulipas y Aurora.

Debido a la gran separación de las sierras, las cuales reflejan a su vez la amplitud de las estructuras geológicas (pliegues), las características topográficas presentan en general condiciones de sierras bajas y lomeríos. Con respecto a la *precipitación media* en esta zona es de baja a muy baja presentando valores comprendidos entre 400 y 800 mm al año.

De las principales estructuras geológicas se tienen anticlinales NW - SE de gran amplitud, constituyendo a las sierras y sinclinales que corresponden con los valles.

Las formaciones arcillosas presentan estratificación delgada menor a 0.15 m. y las constituidas por calizas, son de estratos gruesos (> 0.60 m) y masivas.

Con respecto a las fallas activas NE - SW se pueden mencionar las denominadas *Sistema 5* que coincide con el Río Bravo en el tramo NW de la Sierra Madre Oriental (Fig. III.3.2.3) y el *Sistema 6* que limita a la subprovincia en su extremo sureste.

La sismicidad en esta subprovincia corresponde a la denominada *Zona A* (Fig. III.3.2.6), con intensidad *Muy Baja*, en la que no se tienen registros de sismos.

Considerando las características descritas, para el caso de esta subprovincia se definieron principalmente grados de susceptibilidad *Muy Baja*, *Baja*, *Media* y *Alta*, correspondiendo la primera a las formaciones a base de calizas en estratos gruesos o masivas, y las segundas a las formaciones arcillosas.

Únicamente se tiene susceptibilidad muy alta en dos pequeñas áreas localizadas al noreste de la Sierra del Carmen, debido a fallas inversas NW-SE, a los pliegues recumbentes y a los efectos de la precipitación pluvial, que es la de mayor rango en esta subprovincia.

VI.3.2. SIERRAS ATRAVESADAS

Para esta subprovincia también se consideraron cuatro niveles de susceptibilidad (muy baja, baja, media y alta) en base principalmente a que los valores de precipitación media anual, fluctúan entre con valores entre 400 y 600 mm, además de que se encuentran estructuras geológicas que han afectado a las diversas formaciones, dentro de las que se tienen pliegues recumbentes y fallamiento inverso.

La susceptibilidad alta se consideró para las formaciones más arcillosas (lutitas), correspondientes a las formaciones Taraises, La Peña y Parras. La susceptibilidad media para la

Formación la Casita; para las formaciones Cuesta del Cura e Indidura una susceptibilidad baja, y la susceptibilidad muy baja para las calizas masivas de las formaciones Aurora y Cupido.

VI.3.3. SIERRAS BAJAS

Se efectuó el análisis considerando los factores analizados que corresponde a las formaciones geológicas, de precipitación, sismicidad y estructuras geológicas que afectan a esta subprovincia.

En forma específica, el grado de susceptibilidad corresponde básicamente al tipo de litología, el factor de precipitación pluvial y los sistemas de falla considerándose *muy alta* para las formaciones Méndez y San Felipe; *alta* para las formaciones Tamán y Agua Nueva; la susceptibilidad media a las formaciones Tamaulipas Superior y Tobas del Terciario Superior; la susceptibilidad *baja* para las formaciones Tamaulipas Inferior y Horizonte Otates, y la susceptibilidad *muy baja* para las calizas masivas de las formaciones El Abra y Doctor.

VI.3.3. SIERRA ALTA

En este caso se consideró adecuado efectuar el análisis de susceptibilidad a deslizamientos con base en los factores considerados para la Sierras Bajas, por lo que corresponde a las formaciones geológicas, de precipitación, sismicidad y estructuras geológicas que les afectan, debido a su similitud entre ambas subprovincias.

En forma específica, el grado de susceptibilidad corresponde básicamente con el tipo de litología, considerándose muy alta para las formaciones Méndez y San Felipe, *alta* para las formaciones Tamán y Agua Nueva; la *susceptibilidad media* a las formaciones Tamaulipas Superior y Tobas del Terciario Superior; la susceptibilidad *baja* para las formaciones Tamaulipas Inferior y Horizonte Otates y *muy baja* para las calizas masivas de las formaciones El Abra y Doctor.

DESCRIPCIÓN DE LAS FORMACIONES

A continuación se describen las características principales de las formaciones de la Sierra Madre Oriental que presentan susceptibilidad media y alta a deslizamiento, incluidas en las cuatro subprovincias fisiográficas:

Tobas del Terciario Superior: Consiste de depósitos de flujo de ceniza parcialmente soldadas emitidas por actividad volcánica del Terciario.

Corresponde a la secuencia piroclástica de la caldera de los Humeros; este depósito no tiene una distribución continua y homogénea sobre toda el área (Capra *et al.*, 2003(a)).

Formación Tamán: Se trata de calizas negras bien estratificadas en capas medianas y gruesas, de grano fino (microcristalinas) que alternan con delgadas intercalaciones de margas (lutitas calcáreas) negras de estructura laminar.

Localmente las margas negras tienen tendencia esquistosa en la base de la serie, y en comparación con los bancos de caliza pueden alcanzar una proporción importante. No hay sílice, los bancos se presentan bien marcados y su espesor medio es de 40 a 60 cm.

Sus caracteres muestran que se trata de una sedimentación marina franca. El espesor es muy variable, habiéndose registrado hasta un espesor de 500 m.

Formación Tamaulipas Superior: El espesor de la formación varía de 270 a 400 m, se divide en:

- Miembro inferior, consta de calizas criptocristalinas de color gris crema y gris oscuro a negro, en capas de espesor de medio a grueso.
- Miembro superior (*Cuesta del Cura*) se halla integrado por calizas criptocristalinas de color gris, gris claro, gris acero y negro finamente bandeadas en capas de espesor medio; estas capas alternan con estratos de espesor delgado y medio de margas laminadas de color gris oscuro; ambas rocas contienen abundantes lentes y bandas delgadas de pedernal negro.

Tanto la estratificación ondulante como el contenido del pedernal pseudoestratificado son rasgos distintivos. Se localiza en el Cañón del Novillo, el camino a Cd. Victoria y el Cañón de la Peregrina.

Formación La Casita: Es una secuencia de conglomerados, areniscas, lutitas, margas, caliza, yeso y poco carbón que descansa sobre rocas de la porción inferior del Jurásico Superior y subyace al Cretácico Inferior. Se encuentra en el Cañón de la Casita, los cañones y algunos caminos del Anticlinorio Huizachal - Peregrina, también en gran parte del norte y noreste de México.

Formación Taraises: Consta de dos miembros, el inferior es una limolita de color gris oscuro que intemperiza a color gris amarillento en estratos de 20 a 60 cm, presenta huellas de disolución y vetillas de calcita, fracturamiento moderado; el miembro superior consta de calizas arcillosas delgadas de color negro, interestratificada con lutitas calcáreas gris claro y calizas nodulares, intemperiza a pardo claro y rojizo.

Debido a su litología, es fácilmente erosionable, desarrollándose pequeños valles y puertos suaves de erosión, así como redondeados. Se encuentra al flanco sur de la Sierra de Parras, aflora a lo largo de la Sierra Torreón - Monterrey.

Formación La Peña: Unidad compuesta por dos miembros:

- La parte superior está compuesta de calizas que se adelgazan y toman un aspecto lajoso, presentando transiciones a limolitas calcáreas, va de tonos rojizos a parduscos por intemperismo.
- La parte inferior está formada por capas delgadas a medianas de calizas color gris claro con nódulos de pedernal y escasas interestratificaciones de material arcilloso. Se encuentra en La Sierra de La Peña, la Sierra de La Gloria, la Sierra de Parras, la Cuenca de Sabinas, Sección del Cedral y Sección de Piloncillo.

Formación Agua Nueva: Está constituida por calizas arcillosas de estratificación mediana a gruesa con estructura laminar color gris, gris oscuro y negro, que alternan con lutitas y margas laminadas de color café a gris oscuro, a veces bituminosas y carbonosas; es común que en la base se presenten capas de bentonita de color verde que sirven como horizontes índice para marcar el contacto inferior de esta formación.

Formación San Felipe: Está caracterizada por una alternancia de calizas y lutitas grises, llegándose a presentar calizas arcillosas y margas gris y verde. También es común encontrar varias intercalaciones de bentonita alternando con la secuencia antes mencionada.

En el área de San Carlos, presenta una estratificación uniforme con capas de calizas arcillosas color crema a gris claro, de 30 a 50 cm, de espesor alternando con capas de lutitas y margas con un espesor de 10 a 15 cm.

Formación Parras: Su litología es de lutitas carbonosas negras, físis, nodulares y a veces calcáreas, que intemperizan en un color amarillento. El espesor de la columna general es de 600 m.; se observa en el arroyo de Santiago, en la Sierra de Parras y en el Cerro del Pilar al norte de la Estación Marte, pero aflora en la porción norte de la Sierra Torreón - Monterrey; estas lutitas que con un espesor de más de 1,000 m, representan las facies de cuenca de la Formación San Felipe.

Formación Méndez: Está constituida por lutitas y margas con fractura concoidal, en colores café claro a verdoso, encontrándose en la cima del miembro inferior un horizonte de areniscas en estratos gruesos como de 2 a 3 m de espesor, capas que marcan la separación entre el miembro inferior y el superior.

VI.4. RESULTADOS

En la tabla VI.4 se presenta un resumen de resultados, en el que se reúnen los principales factores que propician un deslizamiento de ladera, entre los que se consideran las formaciones geológicas, la precipitación, la sismicidad, la topografía, las fallas activas y las estructuras geológicas que están actuando en un determinado sitio.

Originalmente se había pensado en considerar tres grados de susceptibilidad pero a través del trabajo realizado se consideró que cinco niveles mostraban de una manera más certera la distribución de las zonas que presentan uno u otro grado de ocurrencia de un deslizamiento.

El resultado involucra cinco niveles de susceptibilidad, caracterizados según el grado:

- Muy Alta. Zonas en donde se reúnen todas las condiciones del terreno para generar deslizamiento.
- Alta. Zonas en donde la mayoría de las condiciones del terreno son favorables para generar deslizamientos.
- Media. Zonas en donde el terreno presenta algunas condiciones para generar deslizamientos.
- Baja. Zonas en donde únicamente bajo condiciones excepcionales se podría generar un deslizamiento.
- Muy Baja. Zonas en donde las condiciones del terreno no son favorables para generar deslizamientos.

Tabla VI.4. Resultados de susceptibilidad a deslizamientos definidos para la Sierra Madre Oriental.

SUBPROVINCIA	SUSCEPTIBILIDAD	FORMACIONES GEOLÓGICAS	PRECIPITACIÓN	SISMICIDAD	TOPOGRAFÍA	ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS Y FALLAS ACTIVAS*	LOCALIZACIÓN Y CASOS REGISTRADOS
SIERRA DEL NORTE	Muy Baja	Aurora Cupido	Menor de 400 mm	Zona A	Cimas de las sierras	-	
	Baja	Tamaulipas Inf.	Menor de 400 mm	Zona A	Cimas de las sierras	-	
	Media	La Casita	Menor de 600 mm	Zona A	En laderas con pendiente topográfica >20°	Sistema 5 y Sistema 6, pliegues y fallas.	
	Alta	La Peña Taraises Agua Nueva	Menor de 600 mm	Zona A	En laderas con pendiente topográfica >20°	Sistema 5, Sistema 6 y Fallas inversas y pliegues.	
	Muy Alta	Méndez San Felipe	Entre 600 mm y 800 mm	Zona A	En laderas con pendiente topográfica >20°	Fallas inversas y pliegues recumbentes.	
SIERRAS ATRAVESADAS	Muy Baja	Aurora Cupido	Menor de 400 mm	Zona A	Cimas de las sierras	-	
	Baja	Indidura Cuesta del Cura	Menor de 400 mm	Zona A	Cimas de las sierras	-	
	Media	La Casita	Menor de 600 mm	Zona A	En laderas con pendiente topográfica >20°	Sistema 6, Fallas normales, Fallas inversas y Pliegues recumbentes	
	Alta	La Peña Taraises Parras	Menor de 600 mm	Zona A	En laderas con pendiente topográfica >20°	Sistema 6, pliegues recumbentes y fallas inversas.	
SIERRAS BAJAS	Muy Baja	Doctor El Abra	Menor de 400 mm	Zona A y B	Cimas de las sierras	-	
	Baja	Horizonte Otates Tamaulipas Inf.	Menor de 600 mm	Zona A y B	Cimas de las sierras	-	
	Media	Tobas Terciario Sup. Tamaulipas Sup. Tamán	Menor de 600 mm	Zona A y B	En laderas con pendiente topográfica >20°	Sistema 7 y fallas normales.	
	Alta	Agua Nueva	De 400 mm a 1200 mm.	Zona B	En laderas con pendiente topográfica >20°	Sistema 7, pliegues recumbentes y Fallas inversas.	
	Muy Alta	Méndez San Felipe	De 600 mm a 1200 mm.	Zona A y B	En laderas con pendiente topográfica >20°	Sistema 8, pliegues recumbentes y fallas inversas.	
SIERRA ALTA	Muy Baja	Doctor El Abra	Menor de 600 mm	Zona A y B	Cimas de las sierras	-	
	Baja	Horizonte Otates Tamaulipas Inf.	Menor de 800 mm	Zona A y B	Cimas de las sierras	-	
	Media	Tobas Terciario Sup. Tamaulipas Sup.	De 600 mm a 4000 mm.	Zona A y B	En laderas con pendiente topográfica >20°	Sistema 6, sistema 7 sistema 8, sistema 9, sistema 10, fallas normales, fallas inversas y pliegues recumbentes	Edo. de Puebla (Teziutlán Zapotitlán)
	Alta	Tamán Agua Nueva	De 600 mm a 4000 mm.	Zona A y B	En laderas con pendiente topográfica >20°	Sistema 6, sistema 7 sistema 8, sistema 9, fallas normales, fallas inversas y pliegues recumbentes	Monterrey N. L Sierra Norte del
	Muy Alta	Méndez San Felipe	De 1200 mm a 4000 mm.	Zona A y B	En laderas con pendiente topográfica >20°	Sistema 6, sistema 7 sistema 8, sistema 9, fallas normales, fallas inversas y pliegues recumbentes	

* Sistema de fallas truncantes NE-SW

Por lo que se observa, de las formaciones que constituyen la Sierra Madre Oriental, no todas presentan el problema de susceptibilidad a deslizamientos dado que las condiciones varían y aún cuando contengan características similares, como: la misma estratigrafía, el tipo de suelo o roca, el fracturamiento y se tengan precipitaciones máximas altas, entre otras, el hecho de localizarse en posición horizontal en las cimas y de que la pendiente topográfica no sea pronunciada favorece a la estabilidad de la estas, haciendo incluso nula la posibilidad de deslizamientos.

Por lo que respecta a la sismicidad, aún cuando es un factor importante en la detonación de un proceso geológico de este tipo, para el caso de la Sierra Madre Oriental, no se consideró como uno de los más importantes, ya que la porción norte y central de la sierra se encuentra situada (Fig. III.2.2.5) en la *Zona A*, donde la intensidad de la sismicidad es muy baja y la porción sur de la misma sierra se encuentra situada en la *Zona B* donde el nivel de intensidad de la sismicidad es baja, por lo que para efecto de la sobreposición de las cartas, para realizar el mapa final, se le asignaron valores bajos.

A pesar que de acuerdo al libro de Suárez (1998) la susceptibilidad de una determinada zona está en base únicamente a las condiciones locales del área en estudio y que los factores extrínsecos no deben ser considerados, para la realización de esta tesis, sí se ha tomado en cuenta la precipitación ya que a pesar de no ser una de las características permanentes de la localidad, es uno de los principales factores que propician la inestabilidad de los taludes, ya que la presencia del agua, genera deslizamientos en suelos y rocas.

Otro aspecto de la precipitación pluvial que influye en los deslizamientos, son las lluvias ocasionales, que en muchos casos ocurren superando el promedio anual como fue en el área de la Sierra de Puebla, que en tres meses llovieron 1,500 mm, mientras que la media anual es de 800 mm equivaliendo esto, al doble de precipitación, en la cuarta parte del año.

De hecho, en la Sierra Madre Oriental, los principales registros de remoción en masa se han presentado en épocas de lluvia; como también se puede observar en la tabla VI.5, la precipitación es de tres a cinco veces mayor en la zona sur que en la zona norte, por lo que es un factor importante de considerar principalmente en el sur de la sierra.

En los casos expuestos en el Capítulo IV, en la zona norte de la sierra, en el caso del Río La Boca, en la Formación Tamaulipas Superior, adicional a la excavación de procesos antrópicos al pie del talud, a la pendiente y al echado, el deslizamiento se presentó con la presencia del agua de una lluvia en el mes de octubre; para la zona sur, la presencia de agua también al saturar las laderas provocó severos daños a las poblaciones aledañas debido a que las laderas fallaron, ya que la precipitación se duplicó en la cuarta parte del tiempo.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con este trabajo se pudieron identificar a nivel regional las zonas de susceptibilidad a deslizamientos de la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre Oriental, que por sus características presenta numerosos casos ocurridos en sus laderas principalmente en épocas de lluvia.

A lo largo de este trabajo se han investigado y analizado los factores, causas y consecuencias de los deslizamientos, para que al tener un panorama más amplio de estos procesos, se tenga una mayor visión para realizar una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

Es ilógico pretender, en la mecánica de suelos como en la geología, que los resultados obtenidos sean únicos y verdaderos; es difícil generalizar, ya que cada sitio tiene sus propias características y un comportamiento particular; pues es bien sabido que la naturaleza tiene, como la vida misma, comportamientos inexplicables; más sin embargo, los conocimientos adquiridos hasta la actualidad nos permite llegar a comprender el problema y las condiciones, lo suficiente como para proporcionar una solución aceptable.

Como se observa en el mapa objetivo de esta tesis, que se obtuvo de la investigación y análisis realizado; en la Sierra Madre Oriental la mayor parte de la sierra presenta cierto nivel de susceptibilidad a deslizamientos en comparación con otras provincias que por sus orígenes y condiciones presentan mayor estabilidad las zonas susceptibles cubren una gran extensión, predominando el nivel medio de susceptibilidad.

Este mapa es un indicativo de las zonas a las que se requiere poner más atención, para el caso de querer realizar obras o vivienda; en este, se han considerado la mayoría de los factores naturales que influyen, pero no la influencia que el hombre puede ejercer sobre este fenómeno, que en muchas ocasiones logra tener gran impacto.

También se puede considerar como una herramienta preliminar para la planificación urbana y de infraestructura, facilitando la toma de decisiones, en cuanto a su factibilidad, o a la necesidad de ampliar y detallar el análisis geotécnico de un sitio específico.

Su finalidad consistió en definir y jerarquizar las posibles áreas críticas que deberán de ser sometidas a una evaluación detallada, mediante métodos más específicos.

De las formaciones que constituyen la Sierra Madre Oriental, no todas presentan el problema de susceptibilidad a deslizamientos con diferente grado dado que las condiciones varían y aún cuando contengan características similares, como: la misma estratigrafía, el tipo de suelo o roca, el fracturamiento y se tengan precipitaciones máximas altas, entre otras, el hecho de localizarse en posición horizontal en las cimas y de que la pendiente topográfica no sea pronunciada favorece a la estabilidad de las mismas, haciendo incluso nula la posibilidad de deslizamientos.

Otro caso sería similar al considerado en la zona sur de la sierra, donde la precipitación, la sismicidad y otros factores pueden hacer una determinada zona susceptible de deslizamientos, disminuyendo de acuerdo con el tipo de roca, el cual es determinante para que no se presente el deslizamiento.

La zona de Teziutlán y Zapotitlán en el mapa se localizan en zona de mediana susceptibilidad y aún así una precipitación extraordinaria provocó deslizamientos importantes, por lo que es indispensable no olvidar que aún cuando la zona no parezca tener problemas de estabilidad, o no se encuentre en zonas de alta susceptibilidad muchas zonas pueden deslizar, por lo que siempre se debe recurrir a un estudio más específico de estabilidad.

Se puede también mencionar que en las zonas de susceptibilidad media, que son las que abarcan un mayor porcentaje de la sierra, un factor de importancia que puede detonar los deslizamientos, es la actividad antropogénica.

Las susceptibilidades alta y muy alta se presentan particularmente en el flanco oriental de la sierra en la subprovincia de Sierra Alta, así como en la porción sur, asociada con la mayor precipitación y los sistemas de falla transcurrentes.

En términos generales y considerando a las cuatro subprovincias fisiográficas en que se dividió a la Sierra Madre Oriental, se considera que la subprovincia de la Sierra del Norte es la que presenta menores riesgos con respecto a deslizamientos de laderas y la razón es la baja precipitación, la baja sismicidad y la menor presencia de estructuras geológicas potenciales en zonas de pendientes pronunciadas; y el principal factor que puede cambiar las condiciones de estabilidad se considera que es la actividad antropogénica.

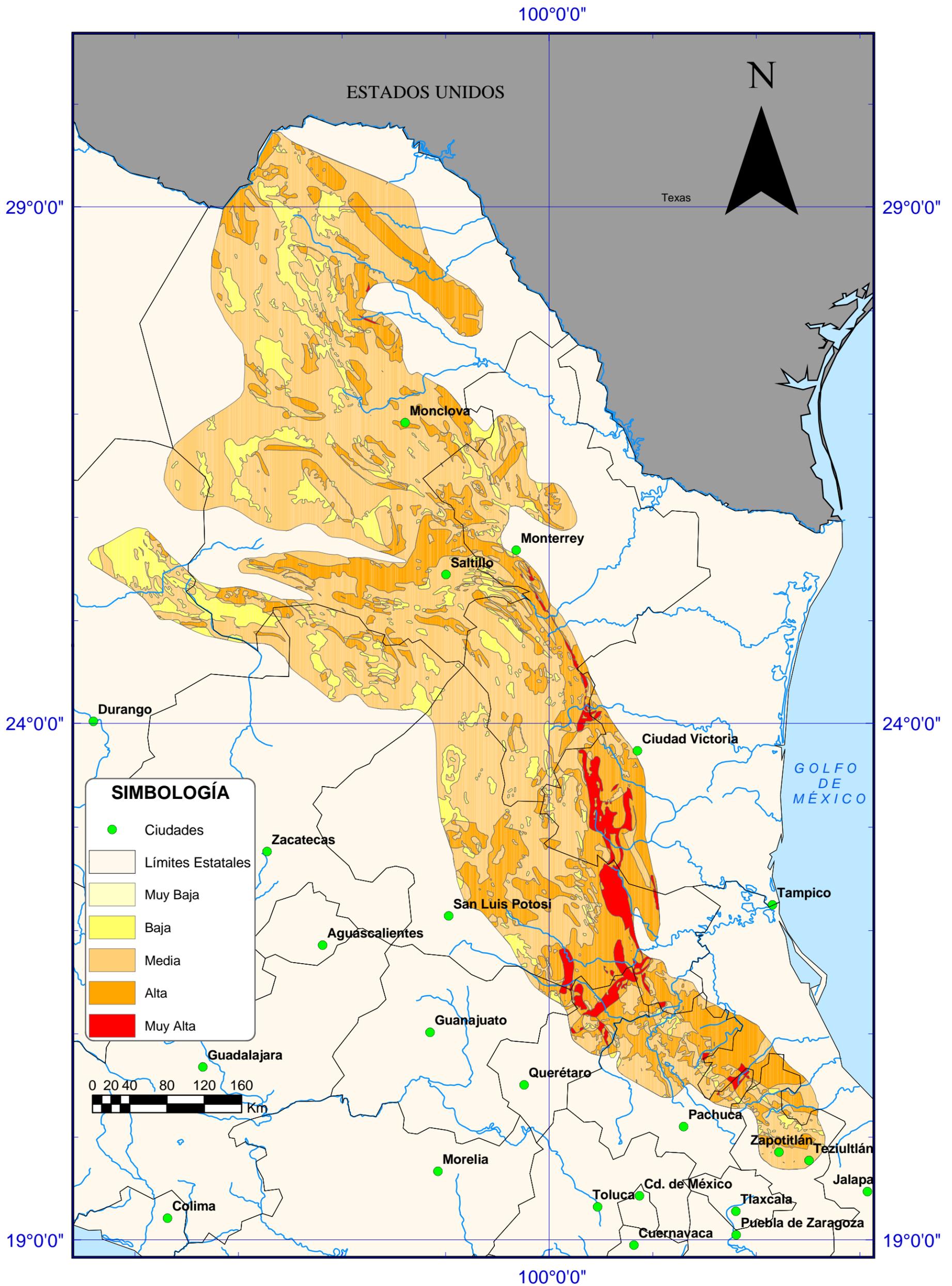
Los sistemas de fallas transcurrentes 5, 6, 7, 8, 9 y 10 afectan a la sierra en diversos puntos, haciendo estas zonas más susceptibles que aquellas que no se encuentran influenciadas por fallas activas.

Debido a que de acuerdo con el objetivo planteado al inicio de esta tesis, se consideró a toda la Sierra Madre Oriental, con superficie de km^2 , se comprende que esta fue una evaluación a nivel regional, por lo que se recomienda efectuar análisis en áreas detalladas, tomando en cuenta lo aquí realizado, como base para los estudios a detalle posteriores.

Es preciso recordar además que el problema de deslizamientos no únicamente afecta a poblaciones, sino a toda la infraestructura de vías de comunicación e instalaciones industriales, por lo que es recomendable el realizar estudios geotécnicos específicos de detalle.

Susceptibilidad a deslizamientos

Sierra Madre Oriental



BIBLIOGRAFÍA

1. Asian Technical Committee on Geotechnolgy for Natural Hazards in ISSMFE, 1997. “*Manual for zonation on areas susceptible to rain induced slope failure*”, Japanese Geotechnical Society, 81 p.
2. Aguayo C. J. E. y Marín-Córdova S., 1987. “*Origen y evolución de los rasgos morfotectónicos postcretácicos de México*”, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo XLVIII, N° 2, pp. 15-39.
3. Aguayo C. J. E. y Trápaga R., 1996. “*Geodinámica de México y minerales del mar*”, La ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, Vol. 141, 105 p.
4. Atlas de México, 1999. www.elbalero.gob.mx/explora/html/atlas
5. Bowles J., 1989. “*Physical and geotechnical propieties of soils*”, Chapter 2nd, Soil propieties, and Chapter 13th, Shear Sttrength of soils, Mac Graw Hill.
6. Brabb. E. E., 1993. “*Proposal for worldwide landslide hazard maps*”, Seventh international conference and field workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics, pp 15-27.
7. Capra L., Lugo-Hubp J. y Dávila-Hdez N., 2003(a). “*Fenómeno de remoción de masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento*”, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 20, Núm. 2, p 95-106.
8. Capra L., Lugo-Hubp J. and Borselli L., 2003(b). “*Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán (México)*”, Engineering Geology 69 (3-4), pp. 359-379.
9. Carta de Clasificación de Regiones Naturales de México 1, IV.10.1, Instituto de Geografía, UNAM, Raisz, 1964. “*Provincias Fisiográficas*”, Escala 1: 4, 000 000, Atlas Nacional de México, Impreso por Sistemas de Información Geográfica, S. A.
10. Carta de Clasificación de Regiones Naturales de México 2, IV.10.2, Instituto de Geografía, UNAM, Enero 1991. “*Clasificación de Regiones Naturales de México 2*”, Escala 1: 4,000 000, Atlas Nacional de México, Impreso por Sistemas de Información Geográfica, S. A.
11. Carta de Geología, IV.1.1, Instituto de Geografía, UNAM, Padilla y Sánchez R. J. Aceves Quesada J. F., Mayo 1992. “*Geología*”, Escala 1: 4,000 000, Atlas Nacional de México, Impreso por Sistemas de Información Geográfica, S. A.
12. Carta de Geomorfología 2, IV.3.4, Instituto de Geografía, UNAM, Lugo-Hubp, Marzo 1992. “*Regionalización Geomorfológica*”, Escala 1: 4,000 000, Atlas Nacional de México, Impreso por Sistemas de Información Geográfica, S. A.
13. Carta de Hidrografía e Hidrometría, IV.6.1, Instituto de Geografía, UNAM, Maderey R. L. E. y Torres – Ruata C., Septiembre 1991. “*Hidrografía e Hidrometría*”, Escala 1: 4,000 000, Atlas Nacional de México, Impreso por Sistemas de Información Geográfica, S. A.
14. Carta de Hipsometría y Batimetría, I.1.1, Instituto de Geografía, UNAM, INEGI, Lugo-Hubp J., Vidal Z. R., Fernández E. A., Gallegos G. A., Zavala H. J., Junio 1989. “*Hipsometría y Batimetría*”, Escala 1: 4,000 000, Atlas Nacional de México, Impreso por Sistemas de Información Geográfica, S. A.

15. Carta de Precipitación, IV.4.6, Instituto de Geografía, UNAM, Vidal-Zepeda R., Abril 1989. "Precipitación", Escala 1: 4,000 000, Atlas Nacional de México, Impreso por Sistemas de Información Geográfica, S. A.
16. CENAPRED, 2001. "Inestabilidad de laderas", Centro Nacional de Prevención de Desastres, Serie Fascículos, 2ª Edición.
17. CFE (Comisión Federal de Electricidad), 1980. "Información geológica existente de México", Manual de Diseño de Obras Civiles, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Fascículo B.1.3., pp. 24-28.
18. CNA, 2000. "Evaluación de daños por inundaciones", reporte interno Gerencia de la Comisión Nacional del Agua.
19. Consejo de Recursos Minerales, 1999. "Monografía geológica – Minera del Estado de Puebla", Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
20. Cruden D. M. and Varnes D. J., 1996. "Landslide types and processes" In: Turner A. K., Schuster R. L. (Eds.), Landslides – Investigation and Mitigation. Special Report – U. S. National Research Council, Transportation Research Board, Vol. 247, pp. 36-75. Washington D. C.
21. Cuanalo C. O. 2001. "Proyecto de investigación de riego en taludes y laderas naturales de la Sierra Norte y Nororiental del estado de Puebla"; Informe interno de la FI-BUAP a SEPROCI.
22. Cuanalo C. O. y A, Melgarejo. P. G.; 2002. "Inestabilidad de laderas Sierra Norte y Nororiental del estado de Puebla"; Elemento 47, pp. 51-55.
23. Deere D. V. y Patton F. D., 1971. "Estabilidad de taludes en suelos residuales", IV Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, San Juan Puerto Rico, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. 1, pp. 87-170.
24. Eguiluz de A. S., Aranda G. M. y Marte R., 2000. "Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México", Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. LIII, pp. 1-26.
25. Fries C. Jr., Schmitter, E., Damon P. E. y Livingston D. E., 1962. "Rocas precámbricas de edad greenvillana, de la parte central de Oaxaca en el sur de México", Boletín del Instituto de Geología, UNAM, N° 64, parte 3, pp. 97-119.
26. Gaziev E. G., 1984. "Estabilidad de los macizos rocosos y métodos de estabilización", Series del Instituto de Ingeniería N° D-21.
27. Gaziev E. G., 2003. "Análisis de estabilidad de taludes rocosos", Series del Instituto de Ingeniería, series docencia, SD/43.
28. González de V. L. I., Ferrer M., Ortuño L., Oteo C., 2002. "Ingeniería geológica", 1ª Edición, Editorial Prentice Hall, Madrid, 744 p.
29. Herrera C. S., 2002. "Regionalización de los deslizamientos en México", Academia Mexicana de Ingeniería, México, 21 p.
30. Hoek E. and Bray J. W., 1996. "Rock slope engineering", Instituto of Mining and Metallurgy, 3a Edición.
31. IAEG (International Association of Engineering Geology), 1976. "Engineering geological maps: A guide to their preparation". UNESCO. Press, Paris, 79 p.

32. IAEG (International Association of Engineering Geology) Commission on Landslides, 1990. “*Suggested nomenclature for landslides*”, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, N° 41, pp. 13 -16.
33. INEGI, “*Carta Geológica de la República Mexicana*”, Escala 1:400,000, México, Instituto, Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
34. Kanungo D. P., 1993. “*Studies on slopes, landslides and mass movements in Himalaya, India*”, Seventh international conference and field workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics, pp 35-41.
35. Lambe T. W. y Whitman R. V., 1999. “*Mecánica de suelos*”, Instituto Tecnológico de Massachussets, Editorial Limusa, México, 2ª Edición, 583 p.
36. Lee, T. S., 1996. “*Laboratory testing an interpretation*”, Slope stability and stabilization methods. Wiley-Interscience, pp. 253-336.,
37. Leroi, E., 1996. “*Landslide hazard – Risk maps at different scales: Objectives, tools and developments*”, Proceedings of the Seventh International Symposium on landslides, Trondheim, pp. 35-51.
38. Leroueil S. and Locat J., 1996. “*Geotechnical characterization of slope movements*”, Proceedings of the Seventh International Symposium on Lanslides, Trondheim, pp. 53-71.
39. López-Ramos E., 1980. “*Geología de México*”, Tomo II, Edición Escolar, 2ª Edición, México, 454 p.
40. Lumb, P., 1975. “*Slope failures in Hong Kong*”. Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological Society of London, Vol. 8, pp. 31-65.
41. Marín-Córdova S. y Aguayo C. J. E., 1987. “*Carta de rasgos morfotectónicos mayores*”, Escala 1:5,000 000, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo XLVIII, N° 2.
42. Marín-Córdova S., Abril 2004. “*Desarrollo sustentable: desarrollo urbano, medio ambiente, vivienda y agua*”, Memorias del Foro Centroamericano y del Caribe, Cancún Quintana Roo.
43. Marsal R. J. y Reséndiz D., 1983. “*Presas de tierra y enrocamiento*”, México, Editorial Limusa.
44. Montoya V. J. D., Rhenals G. R. L. y Moero R. H. A., 2002. “*Los deslizamientos y su relación con la lluvia*”, Proyecto Especial de Trabajo Académico (PETA), Universidad Nacional de Colombia, SEDE Merlin, Facultad de Minas, Medellín, 116 p.
45. Morán Z. D. J., 1984. “*Geología de la República Mexicana*”, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2ª Edición, México D. F., 88 p.
46. Morgenstem, N. R., 1997. “*Toward landslide risk assessment in practice*” Proceedings of the International Workshop on landslide risk assessment. Honolulu, Hawaii, USA, pp. 15-23.
47. Oropeza O. O., Zamorano, O. J. y Ortiz P. M. A., 1998. “*Peligros geomorfológicos en México: remoción en Masa*”, Los desastres en México, Una perspectiva multidisciplinaria, Universidad Nacional y Universidad Iberoamericana, pp. 149 – 184.
48. Quezada M. J. M. y Sarmiento B. R., 1999. “*Tabla de correlación estratigráfica de la República Mexicana*”, Departamento General e Integración Geológica, Superintendencia General de Integración gerencia de Integración e interpretación, Petróleos Mexicanos, Asociación Mexicana de Geólogos Petróleos.

49. RENFE, 1999. “*Normas Españolas para Proyectos, Estudios Geotécnicos, Explanaciones y Taludes*”, Dirección de Mantenimiento de Infraestructura, 1ª Edición.
50. Skempton A. W., 1954. “*The pore-pressure coefficients A and B*”, *Geotechnique*, 4, pp. 143-147.
51. Skempton. A. W., 1964. “*Long-term stability of clay slopes*”, *Geotechnique*, 14, pp. 77-101
52. So C. L., 1971. “*Mass movements associated with the rainstorm of June 1966 in Hong Kong*” *Institute of British Geographers Transactions, Hong Kong, Journal, No. 53*, pp. 55-65.
53. Springall R., 1980. “*Hidrología primera parte*”, Series del Instituto de Ingeniería D-7, UNAM.
54. Suárez D. J., 1998. “*Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*”, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil, 580 p.
55. Tarbuck E. J. y Lutgens F. K., 1999. “*Ciencias de la tierra, Una Introducción a la Geología Física*”, PRENTICE HALL, Madrid, 616 p.
56. Tardy M., 1976. “*Estructura de la Sierra Madre Oriental (Sector Transversal), Edo de Coahuila*”, Resúmenes III, Conf. Lat. de Geol. Exc. 3, Acapulco Guerrero.
57. Terzaghi K. and Peck R. B., 1967. “*Soil mechanics in engineering practice*”, 2a Ed., John Wiley and Sons, Nueva York.
58. Tulane University, 2001. <http://www.tulane.edu/~sanelson/geol204>
59. Universidad Iberoamericana, 1998. “*Los desastres en México: una perspectiva multidisciplinaria*”, 1ª impresión, México, 288 p.
60. Velázquez A. L. y Ordaz A. A., 1994. “*Provincias hidrogeológicas de México*”, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LII, N° 1-2, México, pp. 15-33.
61. Winterkorn H. F. and Fang H., 1985. “*Foundation engineering handbook*”, Chapter 11th, Landslides, Van Nostrand Reinhold.