



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMAN
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

***ANÁLISIS DEL AGRIETAMIENTO Y LOS PROCESOS DE REMOCIÓN
EN MASA PARA LA SIERRA DE SANTA CATARINA EN EL DISTRITO
FEDERAL Y ZONAS ALEDAÑAS AL ESTADO DE MEXICO***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS EN GEOLOGÍA
OPCIÓN RIESGOS GEOLÓGICOS

POR:

NOHEMI MEJÍA CISNEROS

DIRECTOR DE TESIS:
M. en C. RODRIGO MONDRAGON GUZMÁN

ASESOR EXTERNO:
Dr. VÍCTOR CARLOS VALERIO



México D.F. Enero 2012



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 14:30 horas del día 02 del mes de Diciembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA. U. Ticomán para examinar la tesis titulada:
Análisis del Agrietamiento y los Procesos de Remoción en Masa para la Sierra de Santa Catarina el Distrito Federal y Zonas Aledañas al Estado de México

Presentada por el alumno:

<u>Mejía</u>	<u>Cisneros</u>	<u>Nohemí</u>							
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)							
		Con registro: <table border="1"> <tr> <td>B</td> <td>0</td> <td>9</td> <td>1</td> <td>7</td> <td>6</td> <td>5</td> </tr> </table>	B	0	9	1	7	6	5
B	0	9	1	7	6	5			

aspirante de:

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Victor Carlos Valerio

M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán

Dr. Luis Enrique Ortiz Hernández

Dr. Arturo Ortiz Uvilla

M. en C. Leobardo Salazar Peña

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Ing. Julio Esquivel de la Garza





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 12 del mes Enero del año 2012, el (la) que suscribe C. Nohemi Mejía Cisneros, alumno (a) del Programa de Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales, con número de registro B091765, adscrito a SEPI ESIA, Ticomán, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán y del Dr. Víctor Carlos Valerio y cede los derechos del trabajo intitulado “Análisis del Agrietamiento y Procesos de Remoción en Masa para la Sierra de Santa Catarina en el Distrito Federal y Zonas Aledañas al Estado de México”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: pririta_esiaipn@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Nohemi Mejía Cisneros

Nombre y firma

DEDICATORIA

A mi padre Javier M.R y a mi madre Alejandra C.E, por ser los pilares en mi vida, brindarme su apoyo y amor incondicional y por enseñarme los valores necesarios para que cada día sea una persona mejor. A mis hermanos Oscar y Alejandro, por todo su amor y por ser para mí grandes ejemplos de vida que son y fueron básicos en el desempeño de mis objetivos. Y a mis sobrinas Monserrat y Frida Mejía Corzas que por su alegría y su razón de existir. A esa familia GRACIAS.

Dedico en especial este trabajo a mi tío José Ricardo M.R⁺ por darme su apoyo, sabiduría, consejos, alegría y fortaleza en todo momento.

A mi tía Yolanda Irenne C.E, porque ella ha sido siempre un ejemplo a seguir.

A Fausto C.L por su infinito APEO, consejos, comprensión. PACIENCIA, cariño y un sin fin de cosas de las cuales sin ellas no hubiera sido posible el éxito de este trabajo y no sería lo que, 1 MILLON DE GRACIAS.

Y por último a mi koko y a mi kamila por existir.

AGRADECIMIENTOS

Este agradecimiento se extiende ampliamente a Armando M.M por su temple y actitud hacia las dificultades, de las cuales me han acompañado en todo momento y han sido una guía en mi camino.

A Jannete Hernández Hernández por su AMISTAD (alegrías y tristezas), consejos, complicidad y fortaleza en todo instante. A Diego Amancio Rojas por ser un partícipe valioso en nuestra amistad y complicidad en las buenas y malas. Al Ingeniero Héctor Romero Espejel por su gran amistad, apoyo y buenos momentos. Al Doctor Miguel García Reyes por su apoyo y solidaridad; al M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán por su apoyo, enseñanzas, consejos y buenos momentos. Al Doctor Víctor Carlos Valerio por su apoyo, amistad, consejos y risas.

GRACIAS a todas aquellas personas restantes (familia y amigos) de las cuales siempre han forjado en mi, una inspiración para llegar a cumplir mis objetivos.

Y a Dios por darme la oportunidad de estar en este momento con todos mis seres amados, cumpliendo un objetivo más en mi vida.

CONTENIDO

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. GENERALIDADES	10
1.1 Introducción	10
1.2 Planteamiento del problema	12
1.3 Objetivos	12
1.4 Metodología	12
1.5 Localización	13
1.6 Asentamientos humanos e influencia	15
16.1 Uso de Suelo	18
1.6.2 Zonificación Geotécnica	23
2. MARCO GEOLÓGICO	25
2.1 Fisiografía	25
2.2 Geología Regional	25
2.3 Geología Estructural	27
2.4 Morfología	29
2.5 Geología Local	35
2.6 Estratigrafía Local	38
2.7 Sismología	41
3. MARCO TEÓRICO DE LOS PRM	47
3.1 Antecedentes	47
3.2 Clasificación de los procesos de remoción de masa	52
3.3 Factores condicionantes para los PRM	61
3.4 Estados de actividad de los movimientos	63

4. MARCO TEÓRICO DEL AGRIETAMIENTO	66
4.1 Antecedentes	66
4.2 Agrietamiento y procesos de reptación en la zona de Transición	71
4.3 Agrietamiento en la zona Lacustre	72
4.4 Mecanismo del Agrietamiento	73
4.5 Factores para la formación de grietas	74
4.6 Explotación del agua subterránea y la relación con el Agrietamiento	76
5. ANÁLISIS CUALITATIVO	78
5.1 Análisis de la SSC por la presencia de PRM	78
5.1.1 Controles Geomorfológicos	78
5.1.2 Controles Geológicos	82
5.1.3 Controles Climáticos	84
5.1.4 Controles Sísmicos	86
5.2 Análisis de la SSC por la presencia de Agrietamiento	93
5.2.1 Grietas Hidrodinámicas	93
5.2.2 El fenómeno de Agrietamiento	94
5.2.3 Mecanismo de Agrietamiento	94
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
REFERENCIAS	104

RESUMEN

El Distrito Federal, se encuentra localizado al SW de la planicie lacustre de la Cuenca de México. Dicha demarcación está rodeada de estructuras volcánicas, al norte se encuentra la Sierra de Guadalupe, al poniente la Sierra de las Cruces, al sur la Sierra de Chichinautzin y al oriente la Sierra de Santa Catarina y existen otras elevaciones menores tales como el Peñón de los Baños, Peñón del Marques y el Cerro de la Estrella. La Sierra de Santa Catarina (SSC), está situada al oriente de la Ciudad de México y está constituida por un conjunto de conos volcánicos del cuaternario, ocupando una superficie aproximada de 161.95 km².

Dos problemáticas han motivado este trabajo. Primero, puesto que la sierra al quedar prácticamente dentro de la zona urbana, las necesidades de espacios han provocado que la mayor parte de la misma esté irrumpida por desarrollos urbanos. Segundo, esta zona ha sido foco de escasos trabajos de investigación, debido a esto, es considerada por muchos como una de las de mayor riesgo en el Distrito Federal.

En los últimos años se ha reportado diversos fenómenos geológicos que han afectado directamente a la población. De estos fenómenos se definirán en el presente trabajo, los procesos de remoción en masa (PRM) y el agrietamiento y su probable relación. En este trabajo, se estudiaron las clasificaciones y los factores detonantes que influyen en el desencadenamiento de estos fenómenos con la finalidad de desarrollar mapas de peligro de las posibles zonas susceptibles, esto para caracterizar y delimitar zonas de alto riesgo.

Palabras clave: Sierra de Santa Catarina (SSC), Procesos de Remoción en masa (PRM), agrietamiento, peligro, riesgo.

ABSTRACT

The Federal District, it is located SW of the lacustrine plain of the Cuenca of Mexico. This demarcation is surrounded of volcanic structures, to the north Sierra from Guadalupe is, to the west Sierra of Cruces, to the south Sierra of Chichinautzin and to the east Sierra of Santa Catarina and other smaller such elevations exist as the Peñón de los Baños, Peñón del Marques y el Cerro de la Estrella. Sierra of Santa Catarina (SSC), it is located to the east of Mexico City and it is constituted by a group of volcanic cones of the quaternary, occupying an approximate surface of 161.95 km².

Two problems have motivated this work. First, the mountain when being practically inside the urban zone, the necessities of spaces have provoked that most of the same one is entered by urban developments. Second, this zone it is a focus of scarce investigation works, due to this, is considered by many like one of those of more risk in the Federal District.

In the last years it has been reported geologic diverse phenomena that have affected the population directly. Of these phenomena they will be defined work, the processes of mass removal (PRM) and cracking and their probable relationship presently. In this work, the classifications and the detonating factors were studied that influence in the gating of these phenomena with the purpose of developing maps of danger of the susceptible possible areas, this to characterize and to define areas of high risk.

Words key: Sierra of Santa Catarina (SSC), Processes of mass Removal (PRM) cracking, danger, risk.

1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

En la porción oeste del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) y dentro de una antigua cuenca lacustre se encuentra la Ciudad de México, donde es considerado como uno de los complejos urbanos más grandes del mundo, esta ciudad está rodeada por varias unidades volcánicas tales como la Sierra de Guadalupe al norte, la Sierra de Chichinautzin al sur y la Sierra de las Cruces al poniente y la SSC al oriente.

La SSC marca la división entre dos Delegaciones Políticas, al sur la Delegación Tláhuac, al norte la Delegación Iztapalapa y al oriente con el Municipio de Los Reyes Acaquilpan en el Estado de México; Igualmente constituye la división de los antiguos lagos de Texcoco al norte y el lago de Chalco al sur. Asimismo la sierra está conformada por un conjunto de seis conos volcánicos: Yuhualixqui o San Nicolás, Xaltepec, Tetecón, Mazatepec, Tecuatzi, Guadalupe o Santa Catarina y La Caldera.

Por otro lado, el incremento poblacional ha aumentado de manera rápida a partir de la década de los 60', debido a que las fuentes de trabajo se asentaron principalmente en la Ciudad de México. La SSC es una de las regiones que más concentración de población tiene y a causa de esto, los espacios, servicios y la infraestructura se han visto cada vez más insuficientes, debido a esto la población se ha visto obligada a asentarse en zonas altas, poniéndose en riesgo su integridad.

En México, existen numerosas causas tanto naturales como antrópicas que determinan el incremento en el desencadenamiento de los procesos de remoción en masa y el agrietamiento. Entre las primeras se encuentran los sismos, vulcanismo, fallamiento, tipo de relieve, lluvias, entre otras. Las causas no naturales o antrópicas principalmente corresponde a la actividad minera de la zona para la extracción de material para la construcción, la arquitectura de caminos y carreteras, poco o nulo mantenimiento de las tuberías subterráneas,

presencia de peso muerto en las laderas, deforestación y falta de difusión de las medidas de prevención ante un peligro geológico (Oropeza *et. al.*, 1998; Iturralde-Vinent, 2006).

El presente trabajo consta de seis capítulos. En el primero describe las generalidades del estudio y el medio físico de la zona de trabajo: a) localización, b) población e influencia antrópica, c) uso de suelo y d) zonificación geotécnica.

En el segundo capítulo se reinterpreto y se analizó el contexto geológico local de la SSC. Donde lo anterior consistió de dos etapas: 1) revisión y recopilación de la información geológica y sísmica regional y local disponible y 2) recopilación y verificación de datos geológicos y estructurales en campo.

En el capítulo tercero hace referencia de los accidentes ocurridos, contexto teórico y las condiciones detonantes de los PRM que afectan a la zona de estudio.

En el capítulo cuarto hace referencia a los efectos negativos de la zona por la presencia de los agrietamientos y se describe su contexto teórico.

En el capítulo quinto se recopiló, verificó y se delimitó detalladamente datos geológicos donde posteriormente se procesó para obtener mapas temáticos y de peligros mediante la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Mediante el procesamiento de la información obtenida, se analizó y se describió detalladamente las observaciones resultantes.

En el capítulo sexto y último, se dan a conocer las conclusiones alcanzadas mediante las observaciones desarrolladas lo largo del presente trabajo, así como las recomendaciones y propuestas.

1.2 Planteamiento del problema

Debido al crecimiento de los asentamientos humanos en la SSC se asocia diferentes tipos de deficiencias naturales y urbanas suscitándose problemáticas geológicas tales como los PRM y Agrietamiento.

1.3 Objetivos

- En base a la recopilación de información técnica, se reconocerán las características y relaciones que guardan los peligros geológicos estudiados en el presente trabajo.
- Generar mapas temáticos, en base al reconocimiento de la zona.
- Mediante la ayuda de los SIG se realizarán mapas de peligros, delimitando zonas de riesgo.
- Realizar un análisis cualitativo del peligro geológico en la zona afectada por las problemáticas antes mencionadas.

1.4 Metodología

El desarrollo del presente trabajo, se realizó en base a la bibliografía disponible y de campo llevando una cronología gabinete-campo-gabinete.

Trabajo de Gabinete

- Recopilación de información bibliográfica.
- Realización y edición de mapas base, previos al trabajo de campo.
- Realización de fichas técnicas de los cuales se denotan las características relevantes de la zona para el desarrollo del trabajo de campo.

Trabajo de campo

- Reconocimiento de la zona de estudio, recopilación y verificación de datos físicos tales como: litológicos, estratigráficos, morfológicos, estructurales, entre otros.

Trabajo de gabinete

- Análisis de la información obtenida en campo.
- Reelaboración de la geología superficial y subterránea identificando la litología.
- Elaboración de la estratigrafía.
- Realización de los mapas de inventario de los PRM y Agrietamiento, en base a la identificación de sus mecanismos y características.
- Generar mapas temáticos en base a datos vectoriales.
- Elaboración de los mapas de peligros por PRM y Agrietamiento.
- Elaboración de las conclusiones y recomendaciones.

1.5 Localización

El CVT es una provincia geológica y geomorfológica formada en el Plioceno y Cuaternario por una intensa actividad volcánica y tectónica (Hernández-Cruz, 2007B). Ferrari *et al.*, (2005) una síntesis de la evolución geológica que abarca a partir del Mioceno medio hasta el Cuaternario. El CVT es un arco magmático continental que se extiende desde las costas del Pacífico en San Blás, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (Dermant, 1978).

La Cuenca de México (CM) forma parte de la porción oriental del CVT y consiste en una altiplanicie de nivel base a una altitud aproximada de 2240 msnm, misma que estuvo ocupada por los lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco, actualmente casi desecados. Esta planicie se encuentra totalmente rodeada por elevaciones volcánicas, fundamentalmente de edad Plioceno-Cuaternario (Hernández-Cruz, 2007).

La cuenca se caracteriza por una serie de unidades acuíferas en materiales granulares y de doble porosidad intercaladas con unidades aluviales del Terciario y Cuaternario. Subyaciendo a estas unidades, formaciones calcáreas plegadas, falladas y de extensión mayor a la de la cuenca del Cretácico y cuya profundidad al basamento se desconoce (Ramos-Leal y colaborador, 2008). Al norte limita con la Sierra de Pachuca, al occidente (de norte a sur) continúa con la sierras de Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo con una orientación al noroccidente. El límite oriental lo constituyen las sierras Nevada y Río Frío, con los grandes volcanes (de sur a norte) Popocatepetl, Iztaccihuatl, Telapón y Tláloc. Entre los volcanes Ajusco y Popocatepetl se presenta la Sierra Chichinautzin, la más joven de la CM a la que se le atribuye una edad menor a los 600 mil años, aunque su relieve se considera que se formó fundamentalmente en los últimos 50 mil años (Martín Del Pozzo, 1981).

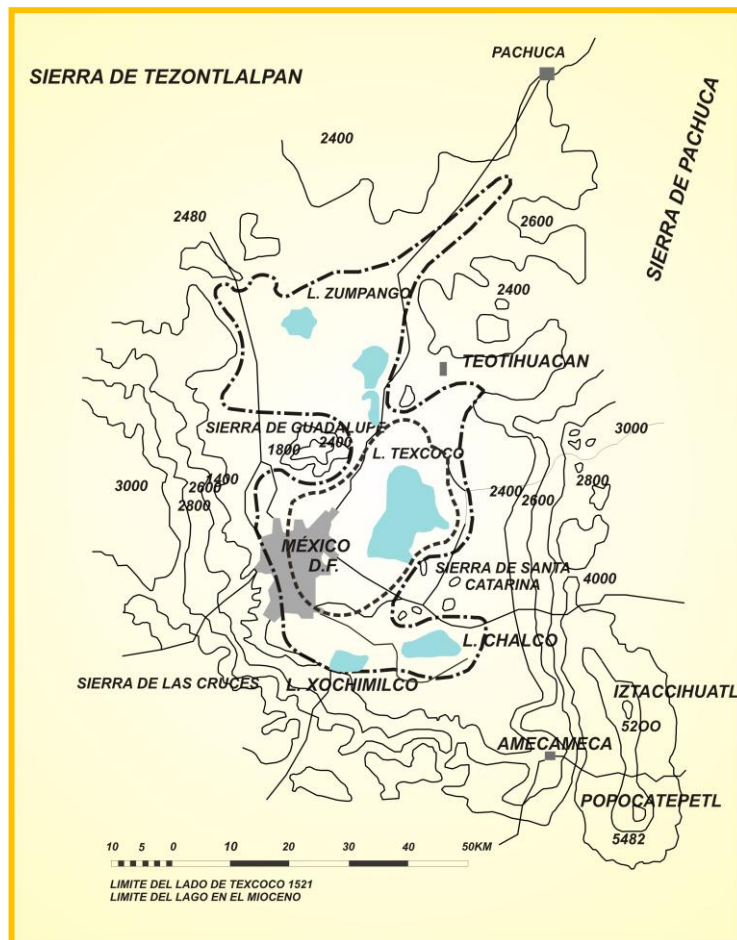


Figura 1.1. Cuenca de México. Fuente: Macau-Vilar, 1955.

Otras elevaciones volcánicas menores forman los límites de la cuenca como las sierras de Tepoztlán, Tezontlalpan, Calpulapan y otras más que se asientan

sobre la planicie de la CM, como las sierras de SSC, Guadalupe, Los Pitos, Patla Hique, Cerro Gordo y otras. Entre la base de las laderas montañosas y la planicie, se encuentra el piedemonte formada por depósitos volcánicos y fluviales donde al sur de la cuenca es principalmente de origen lacustre, hacia el centro y norte esta constituida por rocas volcánicas y depósitos fluviales. (Hernández-Cruz, 2007).

El área de estudio se localiza en la porción sur de la Cuenca de México, en el límite norte de la Sub-cuenca de Chalco y al oriente del Distrito Federal, entre los límites de las Delegaciones de Iztapalapa, Tláhuac y cubriendo una fracción del Municipio de Los Reyes Acaquilpan en el Estado de México y esta limitada por sus coordenadas geográficas $98^{\circ} 53'$ a $99^{\circ} 00'$ longitud oeste y $19^{\circ} 15'$ a $19^{\circ} 23'$ latitud norte, donde ocupa un área de 92 km^2 .

1.6 Asentamientos humanos y su influencia

Debido al crecimiento demográfico que se ha registrado en décadas anteriores a la fecha, da como resultado la poca o nula planeación territorial propiciando el crecimiento acelerado de la mancha urbana en lugares montañosos, provocando sobrecarga e inestabilidad en el terreno. En el caso particular la SSC se ha desarrollado una gran cantidad de asentamientos humanos en zonas de riesgo, muchos de los cuales son irregulares y donde las autoridades correspondientes han construido muros ecológicos en las partes altas para frenar esta problemática.

No obstante, en base a estas disposiciones en la actualidad se siguen ubicando estos asentamientos, donde han ocasionado grandes alteraciones al medio físico y a las condiciones naturales que favorecen en cierta medida a la inestabilidad de los suelos y rocas existentes.

La actividad antrópica que tienen un gran impacto en la modificación del relieve natural de la sierra son las instalaciones de servicios públicos y vías de

comunicación, explotación minera, acelerando la ocurrencia de fenómenos que geológicos que ponen en riesgo la integridad de la población.

A pesar de que la SSC se divide en dos delegaciones y solo ocupa una fracción mínima del Estado de México, la mayoría de los asentamientos se ubican en Iztapalapa debido a la presencia de vías de acceso, Ermita-Iztapalapa y la Calzada Zaragoza, ubicadas en la misma delegación (Ibáñez, 1994). Actualmente los asentamientos irregulares en la SSC se ubican en Suelo Urbano, Áreas Naturales Protegidas y Suelo de Conservación, donde los asentamientos más antiguos se han decretado como regulares gracias al proceso de regularización de la tierra mediante Plan Parcial de Desarrollo Urbano. En la tabla 1.1 muestra la antigüedad de dichos asentamientos, los cuales en su mayoría han sido regularizados (Ramírez-Ramírez, Rodríguez-Oropeza, 2002).



Figura 1.2. Influencia negativa antrópica en la Sierra de Santa Catarina. A) Tiradero de basura a cielo abierto, Lomas de Estancia, Iztapalapa y B) Colonización desmedido, abarcando las zonas más altas del terreno, Lomas de la Estancia, Iztapalapa.

Fuente: Archivo personal, 2011.

Año de formación de los asentamientos	Número de asentamientos
1974-1979	3
1980-1982	12
1983-1987	34
1988-1990	3
N.E	3
Total	55

Tabla 1.1. Antigüedad de los asentamientos humanos en la Sierra de Santa Catarina.

Fuente: Ibáñez, 1994.

En la tabla 1.2 se muestra el proceso de poblamiento, desde el año de 1990, donde ya se había dado la mayor parte de la regularización de la sierra, lo que permite tener datos para saber cuántas personas ya estaban asentadas y de cuanto ha crecido la población hasta la actualidad, puesto que a pesar de las condiciones no aptas para ser zona sujeta a la urbanización se sigue registrando la llegada de más población (Ramírez-Ramírez, Rodríguez-Oropeza, 2002).

Año	Población
1990	137,181 +
1995	186,195 *
2000	208.229 /

Tabla 1.2. Proceso del crecimiento poblacional en la SSC. Fuente: + Datos por Ageb del XI censo general de población y vivienda, 1990, INEGI, * Datos por Ageb del conteo de población y vivienda, 1995, INEGI, / Datos por Ageb del XII censo general de población y vivienda, 2000, INEGI.

El crecimiento de la mancha urbana en la zona de estudio se deriva de dos factores fundamentales: 1) por la tendencia de la tierra y 2) por el uso actual del suelo, mediante la invasión del terreno la organización, explotación, regularización y consolidación de los grupos sociales (Azuara-Bobadilla, 2002). En relación a lo mencionado, se destaca que el incremento poblacional que ha sufrido la sierra se da primordialmente hacia la periferia ubicándose en Suelo Urbano, Área Natural Protegida y Suelo de Conservación Ecológica (Programa Parcial de Desarrollo Urbano en la SSC y Cerro de la Estrella, 2000).

1.6.1 Uso de Suelo

El ritmo de vida que día a día se ha generado en el Distrito Federal y en el Área Metropolitana, ha creado espacios dedicados no solo para la vivienda, sino también para la producción, el consumo, áreas recreativas, servicios de educación, de salud, etc., lo que ha causado un efecto de alteración en el uso de suelo.

El concepto del uso de suelo, se entiende como la actividad a la que se destina la edificación que ocupa el suelo y los elementos que se le incorporan, los que le permiten y definen su uso (Villavicencio y Durán, 1993).

Las formas de incorporación del uso de suelo, constituye un antecedente primordial para entender y conocer las características que adquiere el proceso de edificación en la región. El suelo es un recurso natural básico, es un medio que interviene en diversos ciclos naturales y que además funciona como soporte del hábitat de diferentes especies, incluyendo al hombre (Belausteguigoitia *et. al.*, 1999).

La SSC se divide en dos áreas básicas: 1) Área de Desarrollo Urbano y 2) Área de Conservación Ecológica (Suelo de Conservación). En donde la primera, se llevan a cabo las actividades de uso y destino del suelo inherentes a la zona urbana. Para esta zona, los Programas Delegacionales de Desarrollo Urbano definen qué usos de suelo y tipo de construcciones pueden ser desarrolladas en función de las características físicas y urbanas de la zona. (www.sma.df.gob.mx: 2002). Y segundo, el Suelo de Conservación, posee características que además de favorecer la existencia de especies de flora y fauna de valor comercial, ofrece bienes y servicios ambientales en beneficio de toda la población del Distrito Federal (figura 1.3) a través del papel multifuncional de los recursos naturales que albergan, los bienes y los servicios: la infiltración de agua para la recarga de los mantos acuíferos, del cual proviene aproximadamente 60% del agua que consume la Ciudad de México; la función de ser una barrera contra partículas, producto de la

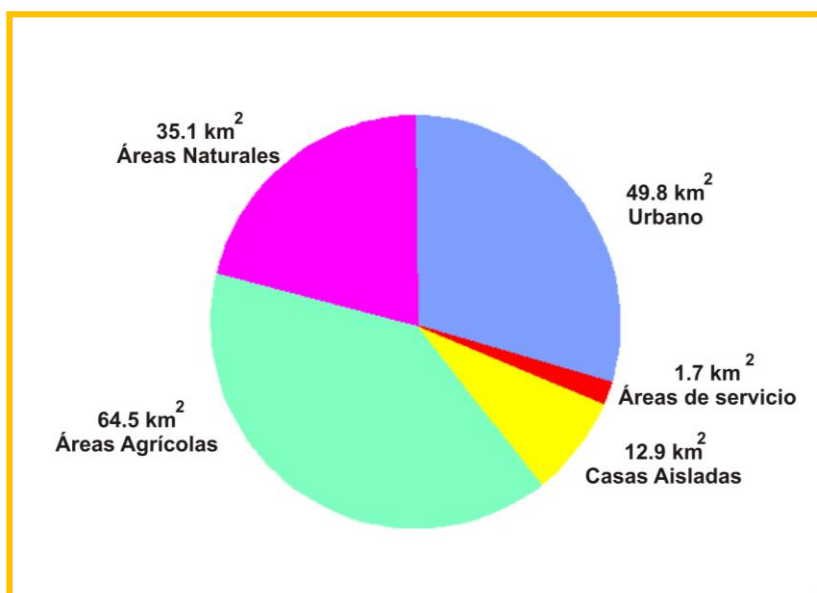


Figura 1.5 Uso de suelo, 1970. Estudio Geomorfológico de la SSC. Fuente: Pérez-Vega, 1992.

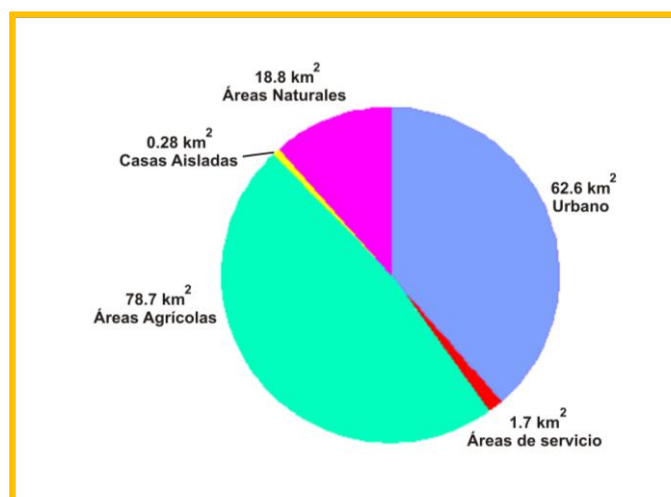


Figura 1.6. Uso de suelo, 1985. Estudio Geomorfológico de la SSC. Fuente: Pérez-Vega, 1992.

En las tablas 1.4, 1.5 y 1.6 muestran los kilómetros cuadrados y porcentajes de las áreas que han sido transformadas en el uso de suelo de la sierra. La información de ambos cuadros pone de manifiesto la gran alteración del entorno natural resultado de la alta concentración de habitantes en el área.

	1950	1950	1970	1970	1985	1985
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Área Urbana	2.9	1.8	49.8	30.7	62.61	38.5
Área Naturales	71.7	44.2	35.1	21.4	18.8	11.6
Área Agrícolas	86.6	53.4	64.5	39.8	78.7	48.5
Casas Aisladas	0.8	0.52	12.9	7.9	0.28	0.17
Servicios			1.7	1	1.7	1

Tabla 1.3. Superficies de uso de suelo en la SSC, 1950-1985.

Fuente: Pérez-Vega, 1992.

	Km ²	%
Áreas Naturales a Áreas Urbanas	33.2	38.6
Áreas Naturales a Áreas Agrícolas	17.7	20.6
Áreas Naturales a Servicios	1.6	1.8
Áreas Agrícolas a Áreas Urbanas	25.5	29.7
Áreas Agrícolas a Servicios	7	8.1
Casas Aisladas a Áreas Urbanas	0.8	0.9

Tabla 1.4. Áreas modificadas en el uso de suelo de la SSC.

Fuente: Pérez-Vega, 1992.

Uso de Suelo	No. De lotes	%
Habitacional unifamiliar	22,356	85.62
Habitacional plurifamiliar	366	1.40
Habitacional plurifamiliar con comercio	87	0.33
Habitacional unifamiliar con comercio	2,487	9.52
Habitacional con industrial	65	0.25
Equipamiento urbano	236	0.90
Oficinas	10	0.04
Comercio	24	0.09
Industria	108	0.42
Baldíos	371	1.43
Total	26,110	100.0

Tabla 1.5. Actual uso de suelo de la SSC (2000). Fuente: Iztapalapa, Dirección General Jurídica y Gobierno, Padrón de Giros Mercantiles, Octubre del 2002 y Dirección General de Obras y Desarrollo Urbano, Alineamientos y Números Oficiales, Octubre del 2000.

Es importante hacer notar que la superficie agrícola se incrementó para el uso de los pastizales; sin embargo, una importante fracción de ésta fue transformada al uso urbano, el cual se incrementó en un 150%. De esta manera, es fácil ver que el primer paso para la urbanización, en el Suelo de Conservación, es la conversión de vegetación natural al sistema agrícola, enseguida cuando éste ya no resulta productivo, se urbaniza. En la tabla 1.6 muestra las secciones de Suelo de Conservación, abarca una superficie de 87,204 ha, y se extiende por toda la Sierra del Chichinautzin, la Sierra de las Cruces y la Sierra del Ajusco, el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina, así como en las planicies lacustres de Xochimilco-Tláhuac y Chalco. Asimismo, la porción más pequeña del Suelo de Conservación abarca solamente 1,238 ha y está localizada al norte del Distrito Federal, en la Sierra de Guadalupe y el Cerro del Tepeyac. Actualmente existe un total de 17 Áreas Naturales Protegidas establecidas en territorio del Distrito Federal (Ramírez-Ramírez, Rodríguez-Oropeza, 2002).

ANP de competencia local	ANP de competencia federal
1. ZSCE. Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco	1. P.N. Cerro de la Estrella
2. ZSCE. Tercera Sección del Bosque de Chapultepec I.	2. P.N. Cumbres del Ajusco
3. ZSCE. Tercera Sección del Bosque de Chapultepec II.	3. P.N. Desierto de los Leones
4. ZSCE. Parque Ecológico de la Ciudad de México	4. P.N. El Tepeyac
5. ZSCE. Bosques de las Lomas	5. P.N. Fuentes Brotantes de Tlalpán
6. ZSCE. Sierra de Guadalupe	6. P.N. Histórico Coyoacán
7. ZSCE. Sierra de Santa Catarina	7. P.N. Insurgentes Miguel Hidalgo y Costilla
8. P.U. Bosques de Tlalpán	8. P.N. Lomas de Padierna
	9. Z.P.F. Los bosques de la Cañada de Contreras

Tabla 1.6 Número de Áreas Naturales Protegidas para la Ciudad de México. Fuente: www.sma.d.f.gob.mx; 2002; ZSCE: Zona Sujeta a Conservación Ecológica; ZPF: Zona Protectora Forestal; P.N.: Parque Nacional; P.U.: Parque Urbano.

1.6.2 Zonificación Geotécnica

En el Artículo 170 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, se clasifica una zonificación general, esto según al tipo de suelo (RCDF, 2008).

Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente formes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en el suelo para explotar minas de arena.

Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limoarenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de éstas es variable entre docenas de centímetros y pocos metros.

Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente comprensible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arcillosas son de una consistencia poco firme y de mediana dureza y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales donde el espesor de este conjunto puede superar los 50 m.

La zona de estudio está conformada por las tres categorías de zonificación anteriormente descritas. La zona lacustre (zona III) estuvo ocupada por los antiguos lagos de Chalco y Xochimilco que en la actualidad están desecados, por fenómenos de deposición lacustre eólica y aluvial de diferentes materiales, entre los que predominan las cenizas volcánicas. Donde estos suelos se expanden y contraen según la época del año, provocando agrietamientos.

Para las zonas de transición (zona II) y de lomas (zona I) son en las que se encuentran las curvas de nivel en las que se visualizan pendientes que varían entre suaves a fuertes, aquí se sitúan suelos inestables o colapsables en los

que se presentan los factores que generan asentamientos diferenciales de importancia existiendo grietas en el terreno.

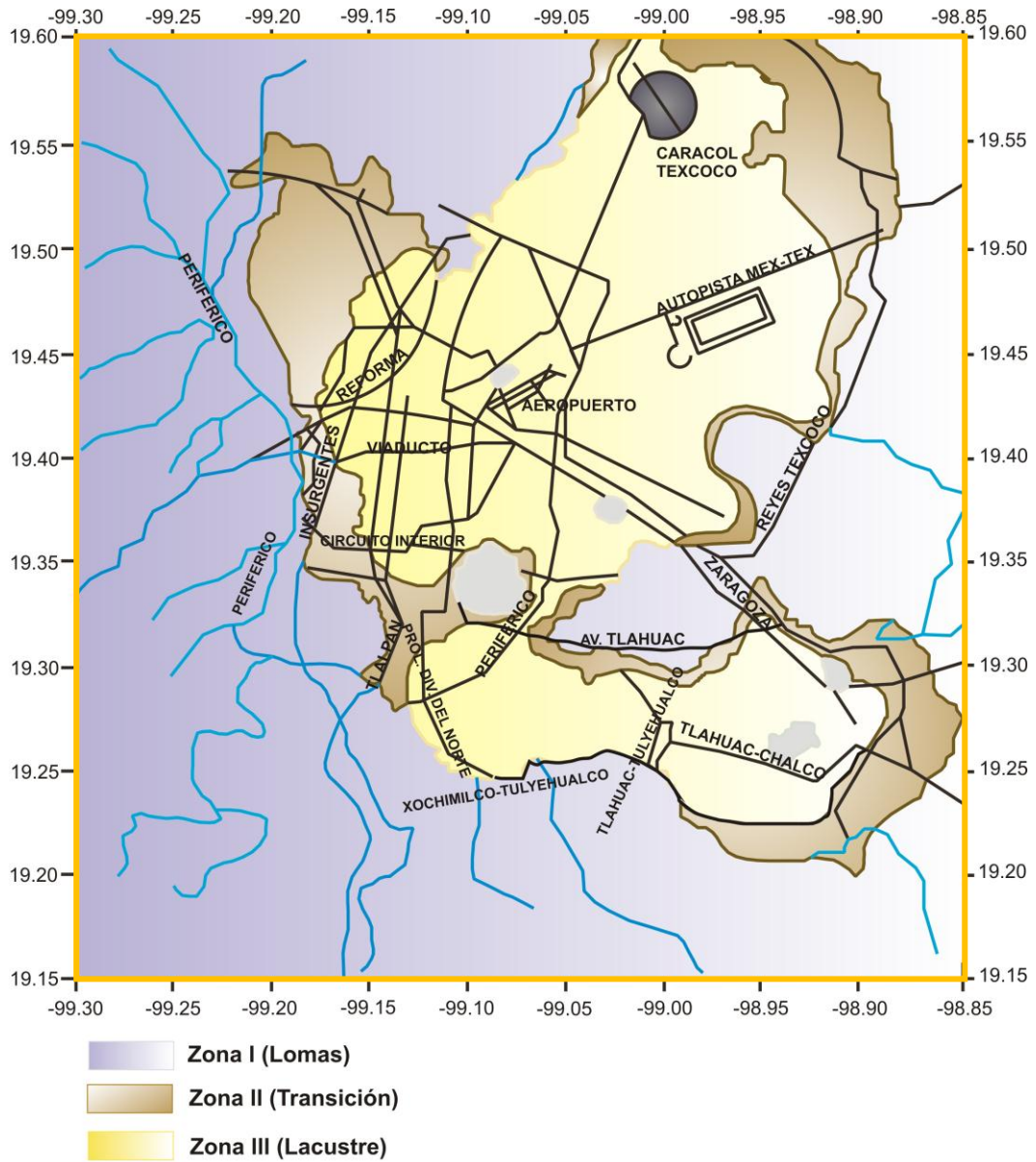


Figura 1.7 Zonificación geotécnica de la Ciudad de México. Fuente: NTCDYCC, 2008.

2. Marco Geológico

2.1 Fisiografía

El Distrito Federal se localiza en el sector oriental del CVT, esta provincia es un arco volcánico que se desarrolla sobre la margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco y está constituido por rocas volcánicas (Mooser, 1972). Atraviesa la parte central de México y se extiende en dirección E-W por más de 1000 km desde la costa de Nayarit hasta las costas de Veracruz (Demant, 1978).

La edad de CVT es variable, en estudios recientes se le ha asignado una edad que abarca desde el Cuaternario (Demant, 1978), Plioceno Tardío (Cantagrel y Robin, 1979), Plioceno Temprano (Nixon *et. al.*, 1987) hasta el Oligoceno (Mooser, 1972) y constituye unos de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región circum-Pacífica, su relieve consiste en una serie de planicies escalonadas que se extienden desde las cercanías de la costa de Colima y Nayarit hasta la región de los volcanes Pico de Orizaba y Cofre del Perote, en el Estado de Veracruz.

2.2 Geología Regional

En el Oligoceno predominó la actividad volcánica en la actual margen occidental de México desde el norte de Sonora hasta Guerrero, donde estas rocas se reconocen en la Sierra Madre Occidental y hacia el sur. Durante el Mioceno continuó el vulcanismo provocado por la subducción de la placa oceánica de Farallón, donde las rocas correspondientes a este evento tienen mayor expresión que las del Oligoceno en el CVT y en la CM (Hernández-Cruz, 2007).

Las rocas marinas del Cretácico son el basamento de la secuencia volcánica y sedimentaria continental del Terciario y del Cuaternario dentro de la CM. Entre las rocas del Cretácico y las del Terciario, existe una gran discordancia puesto

que no hay evidencias de rocas del Paleoceno, sino hasta el Eoceno Medio (Vázquez y Jaimes, 1989).

La CM se encuentra en la parte central del CVT, tiene un área aproximada de 9000km², tiene una altitud promedio de 2400msnm (CM, 2009) y su orientación es NNE-SSW. Los sistemas montañosos que los rodean son: 1) al norte la Sierra de Pachuca, 2) al sur la Sierra de Chichinautzin, 3) al oriente La Sierra Nevada y Río Frío, 4) al oeste Sierra de las Cruces y otras tales como la SSC al igual que la Sierra de Guadalupe, el Cerro de Chapultepec, El Pino, Peñón de Márquez y el Cerro de la Estrella (Estrada-Mendoza, 2009).

La Sierra de Pachuca se encuentra en al norte de la Ciudad de México, está constituida por una composición andesítica-dacítica del Oligoceno. Se considera que la andesitas son las más antiguas y se localizan especialmente en la parte NW de la sierra, seguidas de las dacitas en menor proporción, confinadas en la parte SE y cubriendo el resto de la sierra se encuentran los emplazamientos de basaltos (Estrada-Mendoza, 2009).

La Sierra de Chichinautzin se emplazo al sur de la CM, está constituida por un conjunto de volcanes monogenéticos de composición principalmente andesítico, en menor proporción de basaltos-andesíticas correspondientes a erupciones de tipo estrombolianas, originando materiales tales como bombas, lapillis, cenizas y flujos de lava (Martín Del Pozzo, *et. al.*, 1981) y (Siebe *et. al.*, 2005). Su edad corresponde del Pleistoceno tardío al Holoceno, siendo la cadena volcánica más joven en la cuenca (Meriggi-Lorenzo *et. al.*, 2008).

En el Plioceno existió una fuerte reactivación tectónica lo que se manifestó en toda la cuenca con la emisión de andesitas y dacitas porfídicas originando la Sierra Nevada y Río Frío que se localizan al oriente de la Ciudad de México, donde los volcanes que lo conforman son el Tláloc, Telapón, Iztaccihuatl, Popocatepetl que están alineados de norte a sur respectivamente, siendo de tipo monogenético (Mooser, 1975) y están interdigitados con sedimentos y tobas de la Formación Tarango.

La Sierra de las Cruces se localiza al poniente de la Ciudad de México con una edad del Plioceno-Pleistoceno medio (Mora *et. al.*, 1991) y (Osete *et. al.*, 2000). Las secuencia de rocas que afloran son de composición andesítica-dacítica, definida como la Formación Xochitepec que está parcialmente cubierta por la Formación Las Cruces, así como por una serie de derrames de composición andesítico-dacítico con variación hasta riodacitas, está cubierta por lahares y tobas andesíticas de la Formación Zempoala y por derrames de andesitas basálticas de la Formación Ajusco. (SGM, 2005).

La Sierra de Guadalupe se une al occidente con la Sierra De Las Cruces y se ubica al norte de la Ciudad de México, Mooser (1992) la separa en tres partes dispuestas de W-E, la Caldera de Atizapán, la Sierra de Barrientos y la Sierra de Guadalupe y con edades que cambia del Oligoceno, Mioceno y Pleistoceno respectivamente. Los volcanes principales de esta sierra son el Guerrero, Zacatenco, Jaral, María Auxiliadora, Los Díaz, Tres Padres y Moctezuma, originados por erupciones de tipo explosivo; y otras elevaciones menores tales como el Gordo, Chiquihuite, Tenayo, Tepeyac, Pico del águila, las calderas de Atizapán, Cuatepec; entre otros (Lugo-Hubp *et. al.*, 1996) y (Mooser, 1992).

La SSC, está situada al oriente de la Ciudad de México, conformada con un conjunto de volcanes monogenéticos cuaternarios correspondientes al Pleistoceno tardío, su composición es principalmente basalto-andesítico, siendo considerada como contemporánea a la sierra de Chichinautzin y consiste de conos de escoria alineados de NE-SW, compuestos por flujos de lavas y depósitos de piroclásticos (Lugo-Hubp, *et. al.*, 1994).

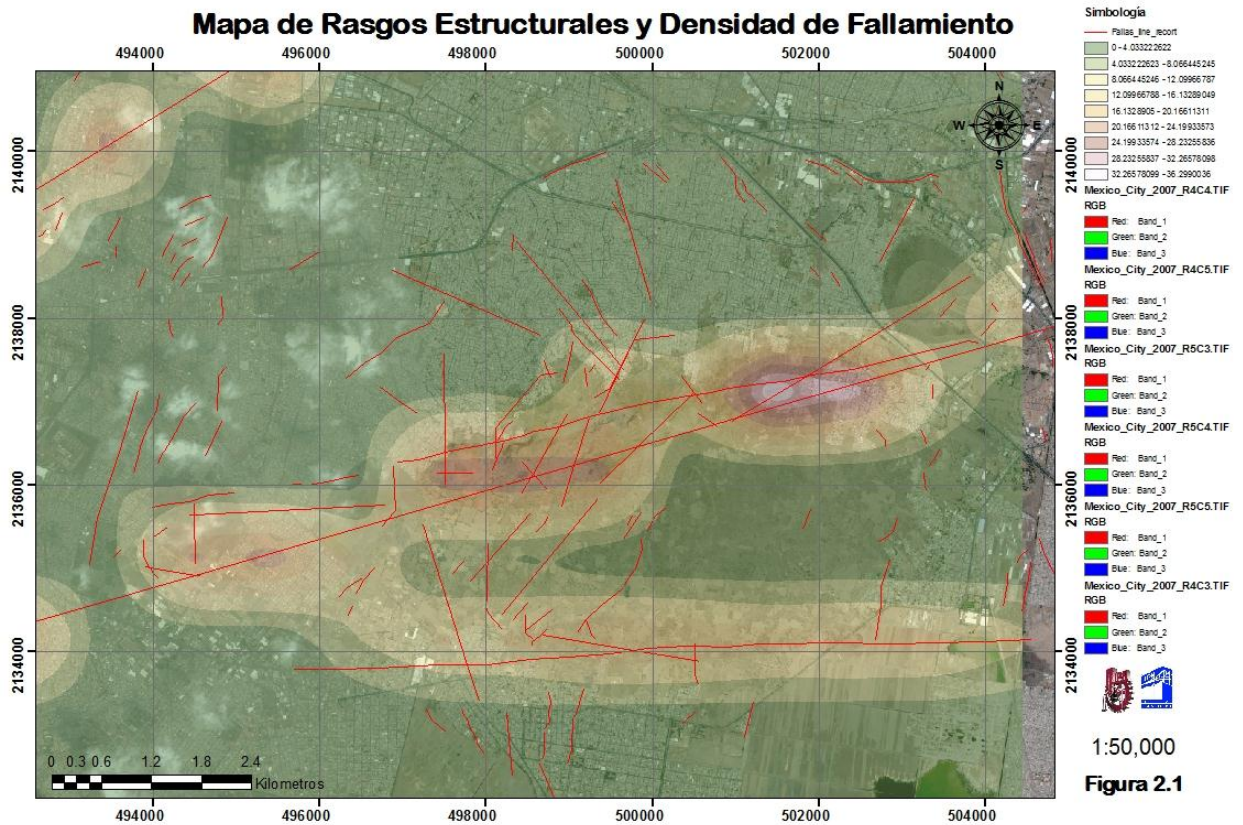
2.3 Geología Estructural

Durante el Plioceno tardío-Cuaternario, el CVT experimenta un emplazamiento de lavas máficas a intermedias (Wallace y Carmichael, 1989; Lange y Carmichael, 1990; Carmichael *et., al.*, 1996), y volcanes monogenéticos y estratovolcanes alineados a lo largo de fallas regionales con una orientación WNW-ESE, que aparentemente se levantó durante el Paleógeno (Rosas-

Elguera *et. al.*, 1996). El vulcanismo en la parte oriental del CVT se emplazó dando origen a volcanes poligenéticos alineados NNW-SSE formando la Sierra de Las Cruces en la Ciudad de México (Mora-Álvarez *et. al.*, 1991) y la Sierra de Chichinautzin (Martín Del Pozzo, 1982; Márquez *et. al.*, 1999; Siebe *et. al.*, 2004) que son evidencias que el CVT se encuentra influenciado por un régimen tectónico distensivo y débilmente por un régimen transgresivo (Gómez-Tuena *et. al.*, 2005).

La CM es una depresión tectónica cuya formación se remota al Oligoceno-Eoceno (Ferrari *et. al.*, 2003; Alanís-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005) así como también en las Sierras de Guadalupe, Tepoztlán y el Cerro de Chimalhuacán existe una serie de fallas normales con desplazamientos y buzan en direcciones indefinidas tienen un ángulo de echado grande que varía de entre 60° a 80° con rumbo este-oeste; donde algunas de estas fallas conforman pequeños *grabens* (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Se infieren otras fallas normales sepultadas con alineamientos de conos cineríticos monogenéticos de las formaciones cuaternarias Chichinautzin y El Pino (Nakamura, 1977). Los alineamientos más evidentes corresponde a los volcanes Cerro de la Estrella, Peñón del Marqués y Chimalhuacán.

La orientación de los volcanes que integran a la SSC tienen un control tectónico-estructural sobre una fracturas de tensión orientadas al N75°y 80°E (De Cserna *et. al.*, 1988; Magaña, 2003) y otra de tipo normal antitética la cual corta espesores considerables de depósitos aluviales de una edad del Pleistoceno-Reciente, denominada por el mismo nombre que la sierra. Mosser (1990) atribuyó que el origen de la sierra corresponde a un sistema de fallas “cizalleo” al ENE, la primera controla ala volcán Yuhualixqui y la segunda controla la posición actual de los conos de la sierra (figura 2.1).



2.4 Morfología

El relieve de la SSC se clasifica en tres principales procesos: 1) endógeno, 2) exógeno y 3) exógeno antrópico. El primero es catalogado como de origen volcánico explosivo acumulativo (conos de tefra y piroclásticos) y efusivo (domos de lava y derrames de lava). El segundo corresponde a aquellos procesos que intervienen en la morfología del relieve: 1) erosivo, donde se encuentran principalmente en las partes de las barrancas incipientes, grietas, fracturas, contactos litológicos y circos de erosión y 2) acumulativo, pie de monte, depósitos fluviales, planicie lacustre. Y el tercero se cataloga por la erosión expresada por las actividades antrópicas.

La SSC tiene una extensión de 12km y una franja de anchura de hasta 6km (Lugo-Hubp *et. al.*, 1994) está constituida por una serie de conos de lava y escoria, de poniente a oriente: Yuhualixqui 2400msnm, Xaltepec 2500msnm, Tetecón 24600nsnm, Mazatepec 2550msnm, Tecuatzi 2640msnm, Guadalupe 2700msnm y La Caldera 2500msnm (figura 2.2).

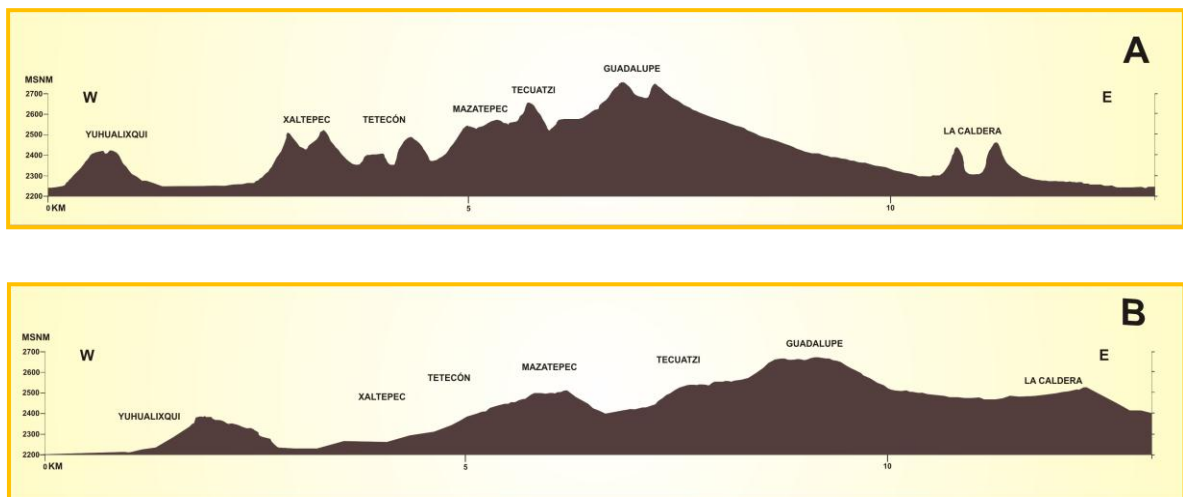


Figura 2.2. A) Perfil longitudinal de la Sierra de Santa Catarina. Fuente Lugo Hubp *et. al.*, 1994., y B) Perfil longitudinal que muestra la actual morfología de la sierra, donde presenta relieves sujetos por los procesos exógenos, especialmente por los antrópicos. Fuente: Archivo personal. Modificado para este trabajo.

El ángulo de las pendientes naturales y artificiales están asociadas a los PRM activos, así mismo varían en su ángulo de entre 12° a 45° de inclinación y pasan de manera transicional hacia la zona plana lacustre que rodea a la sierra, de acuerdo a información proveniente de pozos cercanos, los depósitos volcánicos y derrames lávicos de la sierra están inter-digitados a profundidad por depósitos lacustres. Generalmente el drenaje es de primer orden y de escurrimiento se presenta en forma radial de corta longitud y profundidad (Estrada-Mendoza, 2009).

El volcán Yuhualixqui se localiza independiente del resto de los otros, donde la actualidad la mayor parte de esta estructura ha estado sometida a la intensa modificación de su relieve debido a la extracción de material para la construcción, está conformado por material piroclástico, escoria y ceniza de color rojo a negro de composición basáltica donde el tamaño y forma del material es variable. Los derrames de lava están casi en su totalidad, cubiertos por material piroclástico con más de una decena de metros de espesor y solo en algunas partes se visualizan los derrames de lava (figura 2.3). La superficie del volcán presenta un suelo de tipo litosol con cultivos y rasgos antrópicos (asentamientos irregulares y antiguo tiradero de San Lorenzo).



Figura 2.3 Volcán Yuhualixqui. Fuente: Archivo personal

El volcán Xaltepec se considera como un cono perfecto (Lugo-Hubp *et. al.*, 1994) de la misma constitución volcánica, los derrames de lava se encuentran expuestos en la superficie y se extienden por el flanco oriente, en la actualidad los materiales de esta estructura son explotados, generando modificaciones considerables en su topografía (figura 2.4).



Figura 2.4 Volcán Xaltepec. Fuente: Archivo personal.

El volcán Tetecón igualmente es un cono de escoria y tiene una forma de herradura, actualmente el cono solo es existente en una parte de las laderas meridionales, el resto ha sido removido a causa de la actividad antrópica, debido a esto actualmente se encuentra destruido más del 50% de su volumen original (figura 2.5), y la superficie del volcán está constituido por suelos de cultivo.

El volcán Mazatepec es un cuerpo volcánico constituido por derrames de lava y escoria que se origino mediante dos bocas ubicadas al norte y sur (Lugo-Hubp *et. al.*, 1994). En el fondo del cráter existen dos domos con derrames de lava dispuestos hacia el sur y posee pendientes que varían de entre 15° a 50° de inclinación (figura 2.5).



Figura 2.5 Volcanes Tetecón y Mazatepec . Fuente: Archivo personal.

El volcán Teciatzi es un domo andesítico de hiperstena (Ordoñez, 1985) con laderas empinadas y verticales de hasta 65°, el suelo está compuesto por litosol donde gran parte de esta superficie está cubierta por ceniza y depósitos de caída (figura 2.6).

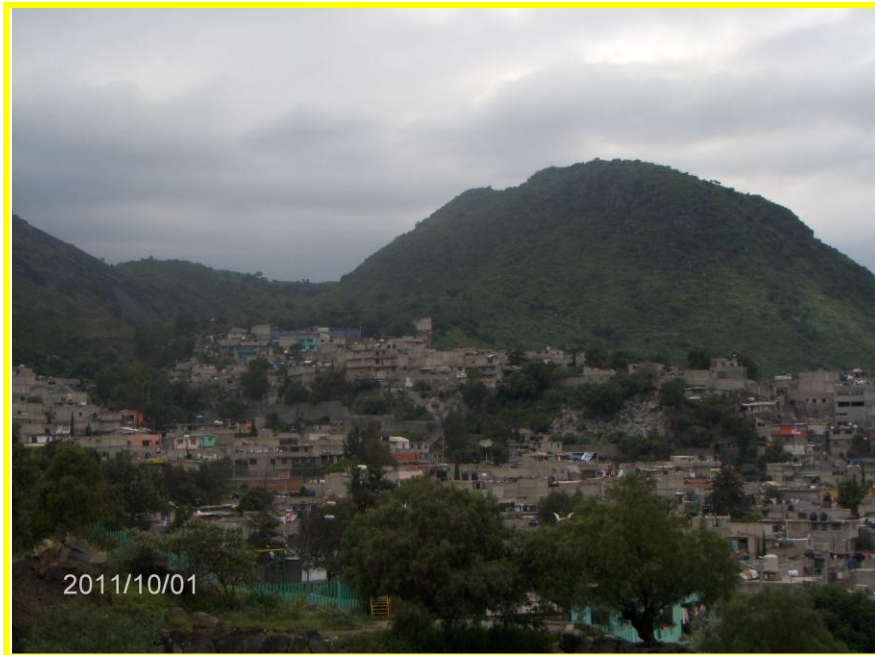


Figura 2.6 Volcán Teciatzi. Fuente: Archivo personal.

El volcán Guadalupe es la estructura más grande de la sierra, el diámetro de su cráter es de 120 m, donde en el fondo de éste se localizan dos estructuras menores bien definidos (Lugo-Hubp *et. al.*, 1994), el tipo de roca observado varía entre los cuales se hayan depósitos de lapilli y ceniza, derrames de basalto altamente fracturados, escoria y vidrio y sus pendientes varían de los 19° a los 55° (figura 2.7).

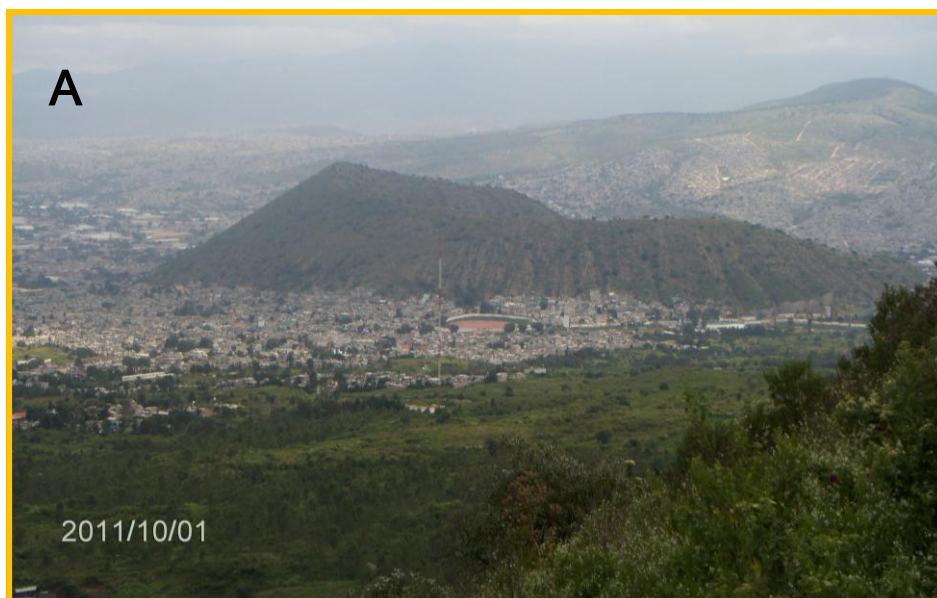




Figura 2.7 Volcán Guadalupe o Santa Catarina. A) Base noroeste del volcán y B) Cráter suroeste y deposito de caída.

Fuente: Archivo personal.

El volcán La Caldera es una estructura de pequeñas dimensiones su altura es de 150m, tiene dos cráteres los cuales se consideran como independientes (Magaña, 2003). Está constituido por flujos piroclásticos (Ordoñez, 1985) y cenizas basálticas (Bryan, 1948) cubiertas por escorias y derrames de lava expulsadas por el volcán Guadalupe y el suelo es de tipo Regosol (figura 2.8).



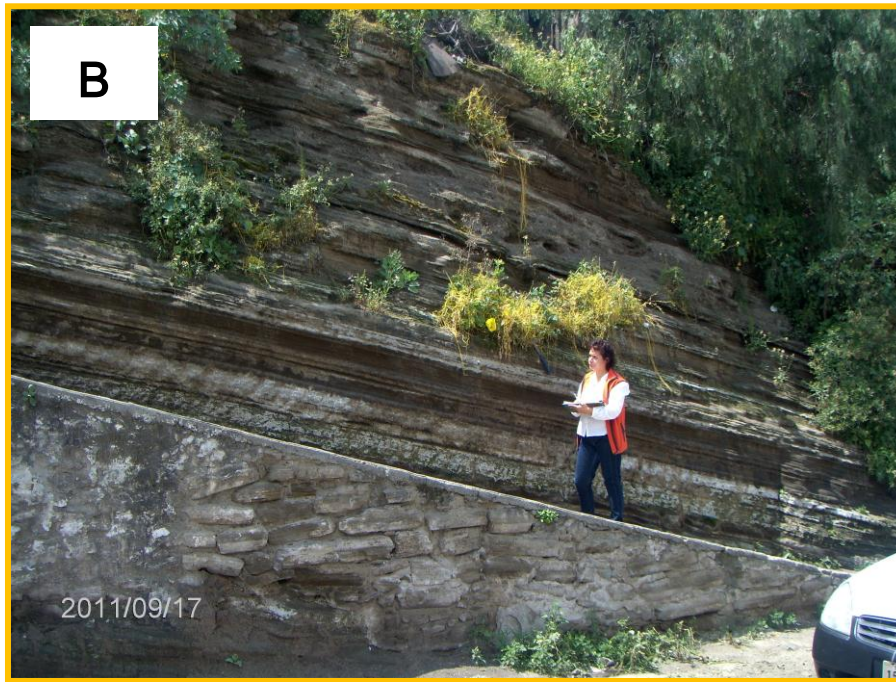


Figura 2.8 A) Vista noroeste desde el volcán Guadalupe, B) Deposito de ceniza ubicado en el flanco noroeste y C) Vista panorámica orientada al este del cráter. Fuente: Archivo personal.

2.5 Geología Local

La SSC está compuesta por rocas volcánicas que fueron clasificadas como andesita de hiperstena por Ordoñez (1885) y basalto que vistas bajo el microscopio contienen un su mayoría plagioclasa (de labradorita y bytownita) y olivino y la planicie lacustre reconoce una alternancia de arcillas con materiales de acarreo fluvial y volcánico del Grupo Chichinautzin (Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

Los productos asociados son principalmente derrames de lava y depósitos de piroclásticos constituidos de escorias, cenizas no consolidadas y depósitos vulcano-sedimentarios.

Hasta la fecha, no hay datos publicados sobre la edad absoluta de las estructuras volcánicas de la SSC, sin embargo se han realizado diversas interpretaciones. En base a la morfología, Ordoñez (1985) consideró que “las erupciones del volcán Guadalupe tuvieron lugar hace poco”. Aguilera (*in* Arellano, 1953) supuso que la sierra tenía edad cercana a la del Xitle, aproximadamente 2,200 años. Bryan (1948) con base al reconocimiento de capas de caliche en los derrames de lava de la sierra y depósitos semejantes (Fm. Becerra), considero una edad de fines del Pleistoceno o principios del Pleistoceno Tardío. Diversos estudios arqueológicos cercanos a la localidad de Tlapacoya han arrojado edades de los depósitos volcánicos de aproximadamente entre 4,000 y 35,000 años (Mirambell, 1986), el material más joven fue andesítico-basáltico de entre 13,000 y 15,000 años (Lambert, 1986). Un estudio de núcleos en Chalco arrojaron edades de entre 10,000 y 20,000 años (Ortega-Guerrero, 1992). Bloomfield (1975) realizó dataciones de Carbono 14, donde encontró conos desde holocénicos hasta de 38,590 años. Los resultados de Martín del Pozzo (*op. cit.*) aportó edades de 20,000 años.

En lo que respecta a la información de los pozos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México cercanos a la sierra, muestran rocas que cortan el subsuelo identificadas en base a 15 perforaciones que corresponden a los pozos: SC-2, SC-3, SC-4, SC-5, SC-6, SC-7, SC-9, SC-10, SC-11, SC-12, SC-13, SC-13-1, SC-13-1, Pozo-202, Pozo-203, Pozo-247, de los cuales la mayoría de estos pozos se encuentran en la zona de transición (figura 2.9).

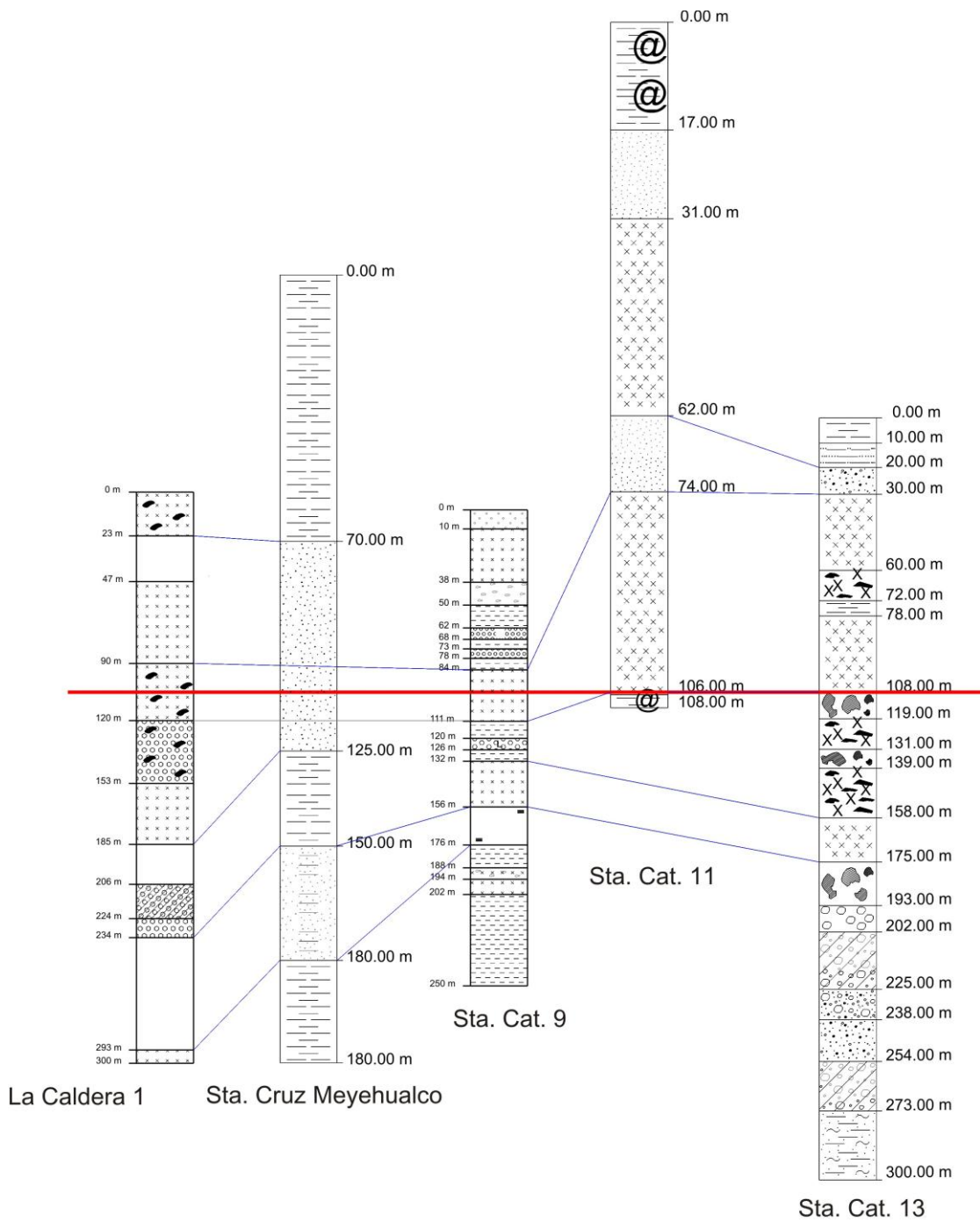


Figura 2.9 Geología del subsuelo. Fuente: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

2.6 Estratigrafía Local

Vázquez y Jaimes (1989) y otros autores aportaron datos sobre la sucesión litoestratigráfica superficial y del subsuelo de la zona de estudio (figura 2.10).

Terciario

Andesita-Dacita-Toba intermedia, Tm (a-da-ti). Sucesión de lavas andesíticas, dacíticas, tobas andesíticas y en algunos lugares interestratificados con brechas volcánicas, las coladas de lava se encuentran muy fracturadas. De acuerdo a fechamientos isotópicos se le asignó un rango de edad del Mioceno Medio a Mioceno Tardío. Cubre en discordancia a rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Superior, Grupo Balsas o a rocas Cretácicas; es cubierta en discordancia por unidades Pliocénicas y en ocasiones por unidades del Cuaternario (Damon, 1981).

Piroclástico-conglomerado, Tpl (pc-cg). Rocas piroclásticas como tobas, brechas volcánicas y lapillis pumíticos interdigitados localmente con horizontes de conglomerados, arenas y arcillas. Su origen está relacionado con la actividad fluvial y piroclástica. Su origen está relacionado con la actividad y piroclástica del Plioceno, que se acumularon en paleocuevas o fosas tectónicas (*Graven* de Chalco) y rellenando amplios valles. Está cubierto discordantemente por aluvión cuaternario y descansa rellenando unidades volcánicas oligocénicas y miocénicas. Su espesor tiene aproximadamente 750m por sus relaciones estratigráficas descritas, para estos depósitos sugieren una edad del Plioceno.

Cuaternario

Andesita-basalto-aglomerado, Q(a-b-ag-). Constituye coladas lávicas de composición andesítica-basáltica y traquíticas con fracturamiento de moderado a intenso, tobas limo arcillosas y con intercalaciones delgadas de tefra no consolidada, formadas por cenizas cristalinas y vítreas, lapillis líticos y escoria del tamaño de lapilli. Yace discordantemente sobre unidades volcánicas

terciarias y está cubierta por la formación Chichinautzin. A estas rocas volcánicas máficas, se les asigna el nombre de Formación El Pino; se reconoce en el subsuelo y en el volcán el Pino, su expresión en los conos cineríticos terminales, volcanes de escudo y amplias coladas lávicas principalmente en bloques, su espesor máximo es de 750m. Por relaciones estratigráficas y pruebas de magnetismo remanente inverso se le asigna una edad del Pleistoceno.

Andesita-piroclástico, Q(a-pc). Esta unidad está formada en su mayoría por lavas andesíticas-basálticas y andesíticas, están son extensas, masivas o lajeadas y en ocasiones alteradas con tobas y capas delgadas de material piroclástico en donde predominan las cenizas y fracturamiento intenso; forma estratovolcanes y conos cineríticos. Sobreyace en discordancia a las unidades del Terciario y Formación El Pino y se encuentran interdigitadas con depósitos con depósitos lacustres y aluvión. Se define como la Formación Chichinautzin (Martin Del Pozzo, 1982), aflora en el subsuelo y forma el Volcán Guadalupe, Volcán La Caldera y el Cerro Xico. Su espesor varía, donde el máximo espesor es de 1800m (Fries, 1960). Se le asigna una edad del Pleistoceno Tardío-Holoceno.

Depósitos aluviales, Q(al). Material clástico fluvial (grava, arena, limo y arcilla) poco consolidado, contiene localmente tierras diamáceas, turba y travertino, con interestratificaciones de de tobas de grano fino y lapílicas. Esta unidad se interdigita con las formaciones volcánicas de la misma edad (sedimentos lacustres). Aflora formando llanuras aluviales y se encuentra en grandes acumulaciones rellenando los bajos morfológicos, así como las depresiones tectónicas como el *Graben* de Chalco. Su espesor es de alrededor de 500m se debe al bloque del desagüe causado por el emplazamiento de derrames lávicos y también por fallamientos normales del Cuaternario que favorecieron los cambios en la dirección y velocidad de los causes fluviales con la consecuente distribución variable del tamaño de grano en estos depósitos (Vázquez y Jaimes, 1989), Su espesor se adelgaza hacia los márgenes de la llanura. Se le propone una edad del Pleistoceno al Holoceno (Fries, 1962).

Depósitos lacustres, Q(al). Está formado por arcillas lacustres con intercalaciones de sedimentos clásticos (arena y limo), con lentes de piroclastos (ceniza, pómez y lapilli) e interdigitados con productos volcánicos de la Formación Chichinautzin que se depositaron en ambientes lacustres y depósitos aluviales. Forma una planicie lacustre que aflora en la zona centro-poniente del área y su espesor varía de 30 a 300m, los mayores espesores se presentan en el centro de la planicie y se adelgaza hacia las márgenes de la Subcuenca de Chlaco. Su edad obtenida implica del Pleistoceno Tardío al Holoceno. El origen de los depósitos lacustres está íntimamente relacionado con la obstrucción definitiva del desagüe de la Cuenca de México, causando la intensa actividad volcánica de la Sierra Chichinautzin.

ERA	PERIODO	ÉPOCA	ÁREA DE ESTUDIO				
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO (0.01Ma)	ALUVION	LACUSTRE	ANDESITA PIROCLASTICA		
		PLEISTOCENO (1.6 Ma)		ANDESITA BASALTO AGLOMERADO			
	TERCIARIO	NEOGENO	PLIOCENO (5.3 Ma)	PIROCLASTICO CONGLOMERADO			
			MIOCENO (23.7 Ma)	ANDESITA - DACITA TOBA INTERMEDIA			
		PALEOGENO	HOLIGOCENO (36.6 Ma)	¿	?	?	?
			EOCENO (57.2 Ma)	?	?	¿	?

Figura 2.10 Columna estratigráfica de la Sierra de Santa Catrina.

Fuente: Magaña-García, 2003.

2.7 Sismología

La localización de los sismos locales de algunas estructuras, tal es el caso de la SSC, está en función al origen de la CM ya que los diferentes periodos de actividad volcánica ocurridos desde el Terciario han originado que, hacia las márgenes de la cuenca se interdigiten rocas sedimentarias con ígneas, teniendo las primeras una granulometría variable y las segundas diversos grados de fracturamiento (Tabla 2.1). El carácter tectónico-volcánico de la cuenca ha provocado que los procesos sedimentarios se enmarquen en una irregular distribución espacial y temporal (Mondragón-Guzmán *et. al.*, 2009).

Para evaluar el peligro sísmico en un determinado lugar, se deben identificar todas las posibles fuentes de actividad sísmica, la identificación de estas las fuentes sismogénicas requiere de un cierto trabajo de detección observando e identificando rasgos naturales de los cuales algunos pueden ser obvios u ocultos.

Durante la ocurrencia de un sismo se emiten dos tipos de movimientos de onda P (+ compresión y – dilatación), este movimiento está directamente relacionado con el movimiento de los bloques de falla, como se muestra en la figura 2.12, que en el carácter geofísico donde se presenta un sismo, es representado por el fenómeno de fallamiento en el interior de la Tierra.

Fecha	Latitud	Longitud	Prof.(km)	Mag.	Zona
23/03/1998	19.42	-98.86	4.00	3.7	Eje Volcánico Oriental
18/06/1998	19.43	-98.87	32.00	3.5	Eje Volcánico Oriental
04/07/1998	19.82	-99.16	11.00	3.2	Eje Volcánico Central
08/07/1998	19.33	-98.73	5.00	3.4	Eje Volcánico Oriental
08/09/1998	19.37	-99.03	5.00	3.2	Eje Volcánico Central
30/10/1998	19.22	-98.84	2.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
04/12/1998	19.21	-98.61	1.00	3.8	Eje Volcánico Oriental
24/12/1998	19.46	-99.2	78.00	2.9	Eje Volcánico Central
28/01/1999	19.49	-99.34	1.00	2.7	Eje Volcánico Central
16/03/1999	19.68	-98.63	5.00	3	Eje Volcánico Oriental
19/03/1999	19.23	-98.61	0.00	3.4	Eje Volcánico Oriental
20/04/1999	19.53	-99.2	2.00	2.3	Eje Volcánico Central
22/05/1999	19.21	-98.97	3.00	3.1	Eje Volcánico Oriental
30/05/1999	19.83	-98.85	7.00	2.4	Eje Volcánico Oriental
27/07/1999	19.43	-98.79	0.00	3.6	Eje Volcánico Oriental
21/08/1999	19.4	-98.82	9.00	3.3	Eje Volcánico Oriental

02/11/1999	19.32	-98.62	11.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
13/11/1999	19.41	-98.89	14.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
07/12/1999	19.25	-98.92	4.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
08/12/1999	19.2	-98.92	3.00	2.9	Eje Volcánico Oriental
09/12/1999	19.24	-98.93	6.00	3.1	Eje Volcánico Oriental
15/12/1999	19.24	-99.22	43.00	3.3	Eje Volcánico Central
10/04/2000	19.23	-98.89	17.00	2.6	Eje Volcánico Oriental
06/07/2000	19.2	-98.97	9.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
05/10/2000	19.44	-99.38	14.00	2.8	Eje Volcánico Central
12/06/2001	19.29	-99.44	14.00	3.2	Eje Volcánico Central
14/09/2001	19.49	-99.24	5.00	2.8	Eje Volcánico Central
15/11/2001	19.55	-99.16	3.00	3.5	Eje Volcánico Central
01/02/2002	19.5	-99.25	1.00	2.4	Eje Volcánico Central
21/04/2002	19.5	-98.91	17.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
21/04/2002	19.49	-98.92	19.00	2.8	Eje Volcánico Oriental
21/04/2002	19.5	-99.02	24.00	3.1	Eje Volcánico Central
21/04/2002	19.44	-99.02	11.00	3	Eje Volcánico Central
09/05/2002	19.51	-99.03	26.00	3.7	Eje Volcánico Central
09/05/2002	19.49	-99.02	20.00	3.3	Eje Volcánico Central
09/05/2002	19.49	-99	16.00	3.4	Eje Volcánico Central
11/05/2002	19.51	-99.01	24.00	3.1	Eje Volcánico Central
17/11/2002	19.2	-98.64	4.00	3.4	Eje Volcánico Oriental
21/12/2002	19.31	-98.75	23.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
01/11/2003	19.29	-98.99	5.00	3.6	Eje Volcánico Oriental
08/07/2004	19.43	-99	5.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
13/09/2004	19.37	-99.11	10.00	3.1	Eje Volcánico Central
07/10/2004	19.32	-98.94	2.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
08/10/2004	19.64	-99.18	20.00	2.8	Eje Volcánico Central
14/12/2004	19.27	-98.9	14.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
19/12/2004	19.23	-98.85	11.00	3	Eje Volcánico Oriental
07/02/2005	19.27	-98.91	10.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
16/10/2005	19.29	-99.19	10.00	3.5	Eje Volcánico Central
02/02/2006	19.25	-98.94	14.00	3.5	3 km al noroeste de San Mateo Huitzilzingo, Mex.
11/02/2006	19.32	-98.95	5.00	3.5	3 km al Noroeste de Xico, Mex.
30/05/2007	19.22	-99.24	14.00	3.9	3 km al oeste de San Miguel Ajusco, DF.
12/12/2008	19.68	-98.68	2.00	3.2	15 km al suroeste de Cd Sahagun, Hgo.
03/05/2009	19.28	-98.82	17.00	3.2	2 km al este de San Martín Cuatlalpan, Mex.
11/07/2009	19.33	-99.13	10.00	2.9	4 km al sureste de Coyoacán, DF.
14/07/2009	19.83	-99.14	13.00	3.6	2 km al noroeste de San Juan Zitlaltepec, Mex.
09/02/2010	19.7	-98.62	4.00	2.9	9 km al suroeste de Cd Sahagun, Hgo.
11/02/2010	19.28	-99.16	11.00	2.6	3 km al noroeste de Xochimilco, DF.
05/04/2010	19.4	-99.1	43.00	2.5	0 km al noroeste de Iztacalco, DF.
24/06/2010	19.3	-99.04	2.00	3.4	2 km al este de Tlahuac, DF.
24/06/2010	19.33	-99.09	9.00	2.9	3 km al sur de Iztapalapa, DF.
28/06/2010	19.44	-98.82	14.00	3.5	5 km al este de San Miguel Coatlinchan, Mex.
05/07/2010	19.2	-98.94	10.00	3.7	3 km al suroeste de San Mateo Huitzilzingo, Mex.
05/07/2010	19.27	-98.88	9.00	3.2	2 km al noroeste de Chalco, Mex.
08/09/1998	19.37	-99.03	N/D	3.2	Peñon del Marques
24/12/1998	19.46	-99.2	N/D	2.9	N/D
28/01/1999	19.49	-99.34	N/D	2.7	N/D
20/04/1999	19.53	-99.2	N/D	2.3	N/D
15/12/1999	19.24	-99.22	N/D	3.3	N/D
14/09/2001	19.49	-99.24	N/D	2.8	N/D

15/10/2001	19.55	-99.16	N/D	3.5	N/D
01/02/2002	19.5	-99.25	N/D	2.4	N/D
21/01/2002	19.5	-99.02	N/D	3.1	N/D
21/04/2002	19.44	-99.02	N/D	3	N/D
09/05/2002	19.51	-99.03	N/D	3.7	N/D
09/05/2002	19.49	-99.02	N/D	3.3	N/D
09/05/2002	19.49	-99	N/D	3.4	N/D
11/05/2002	19.51	-99.01	N/D	3.1	N/D
12/04/2003	19.1	-99.17	N/D	3	N/D
13/09/2004	19.37	-99.11	N/D	3.1	N/D
16/10/2005	19.29	-99.19	N/D	3.5	N/D
11/03/2006	19.15	-98.96	N/D	3.7	8 km al Sureste de San Antonio Tecomil, D. F.
11/03/2006	19.17	-98.95	N/D	3.5	6 km al Sur de San Andrés Mixquic, D. F.
30/05/2007	19.22	-99.24	N/D	3.9	3 km al Oeste de San Miguel Ajusco, D. F.
11/07/2009	19.33	-99.13	N/D	2.9	4 km al Sureste de Coyoacán, D. F.
11/02/2010	19.28	-99.16	N/D	2.6	3 km al Noroeste de Xochimilco, D. F.
N/D	19.38	-99.19	N/D	2.1	Mixcoac
N/D	19.5	-99.16	N/D	3.3	Chiquihuite
N/D	19.44	-99.09	N/D	2.4	Peñón de los Baños
21/03/1998	19.11	-98.6	5.00	4.1	Eje Volcánico Oriental
23/03/1998	19.42	-98.86	4.00	3.7	Eje Volcánico Oriental
13/06/1998	19.99	-99.6	5.00	3.2	Eje Volcánico Central
13/06/1998	19.81	-99.64	5.00	3	Eje Volcánico Central
18/06/1998	19.43	-98.87	32.00	3.5	Eje Volcánico Oriental
24/06/1998	19	-98.64	1.00	3.5	Eje Volcánico Oriental
04/07/1998	19.82	-99.16	11.00	3.2	Eje Volcánico Central
08/07/1998	19.33	-98.73	5.00	3.4	Eje Volcánico Oriental
27/07/1998	19.64	-99.66	41.00	2.9	Eje Volcánico Central
18/08/1998	19.19	-98.98	3.00	2.9	Eje Volcánico Oriental
18/08/1998	19.19	-98.99	1.00	2.9	Eje Volcánico Oriental
21/08/1998	19.99	-99.39	42.00	2.9	Eje Volcánico Central
08/09/1998	19.37	-99.03	5.00	3.2	Eje Volcánico Central
22/09/1998	19.03	-98.56	0.00	4	Eje Volcánico Oriental
23/09/1998	19.09	-98.53	2.00	3.9	Eje Volcánico Oriental
30/10/1998	19.22	-98.84	2.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
25/11/1998	19.15	-98.54	3.00	3.8	Eje Volcánico Oriental
25/11/1998	19.09	-98.55	4.00	3.8	Eje Volcánico Oriental
25/11/1998	19.12	-98.78	1.00	3.8	Eje Volcánico Oriental
26/11/1998	19.12	-98.62	0.00	3.8	Eje Volcánico Oriental
26/11/1998	19.08	-98.6	1.00	3.6	Eje Volcánico Oriental
26/11/1998	19.08	-98.59	7.00	3.7	Eje Volcánico Oriental
27/11/1998	19.07	-98.61	1.00	3.6	Eje Volcánico Oriental
29/11/1998	19.1	-98.79	0.00	3.9	Eje Volcánico Oriental
03/12/1998	19.08	-98.57	0.00	3.9	Eje Volcánico Oriental
04/12/1998	19.21	-98.61	1.00	3.8	Eje Volcánico Oriental
15/12/1998	19.07	-98.65	0.00	3.8	Eje Volcánico Oriental
17/12/1998	19.16	-98.64	1.00	3.7	Eje Volcánico Oriental
24/12/1998	19.46	-99.2	78.00	2.9	Eje Volcánico Central
14/01/1999	19.14	-98.61	0.00	3	Eje Volcánico Oriental
28/01/1999	19.49	-99.34	1.00	2.7	Eje Volcánico Central
16/03/1999	19.68	-98.63	5.00	3	Eje Volcánico Oriental
19/03/1999	19.23	-98.61	0.00	3.4	Eje Volcánico Oriental
04/04/1999	19.02	-98.55	0.00	3.3	Eje Volcánico Oriental

20/04/1999	19.53	-99.2	2.00	2.3	Eje Volcánico Central
19/05/1999	19.19	-98.95	5.00	3.1	Eje Volcánico Oriental
22/05/1999	19.21	-98.97	3.00	3.1	Eje Volcánico Oriental
30/05/1999	19.83	-98.85	7.00	2.4	Eje Volcánico Oriental
06/06/1999	19.18	-98.96	3.00	3.5	Eje Volcánico Oriental
12/06/1999	19.23	-98.57	0.00	3.4	Eje Volcánico Oriental
12/06/1999	19.23	-98.56	0.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
16/06/1999	19.16	-98.66	0.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
16/06/1999	19	-98.59	12.00	3.5	Eje Volcánico Oriental
14/07/1999	19.06	-98.65	1.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
25/07/1999	19.16	-98.94	11.00	3.5	Eje Volcánico Oriental
27/07/1999	19.43	-98.79	0.00	3.6	Eje Volcánico Oriental
21/08/1999	19.4	-98.82	9.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
02/11/1999	19.32	-98.62	11.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
13/11/1999	19.41	-98.89	14.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
07/12/1999	19.25	-98.92	4.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
08/12/1999	19.2	-98.92	3.00	2.9	Eje Volcánico Oriental
09/12/1999	19.24	-98.93	6.00	3.1	Eje Volcánico Oriental
15/12/1999	19.24	-99.22	43.00	3.3	Eje Volcánico Central
10/04/2000	19.23	-98.89	17.00	2.6	Eje Volcánico Oriental
10/06/2000	19.16	-98.95	14.00	3	Eje Volcánico Oriental
06/07/2000	19.16	-98.93	14.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
06/07/2000	19.2	-98.97	9.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
05/10/2000	19.44	-99.38	14.00	2.8	Eje Volcánico Central
12/06/2001	19.29	-99.44	14.00	3.2	Eje Volcánico Central
14/09/2001	19.49	-99.24	5.00	2.8	Eje Volcánico Central
15/11/2001	19.55	-99.16	3.00	3.5	Eje Volcánico Central
01/02/2002	19.5	-99.25	1.00	2.4	Eje Volcánico Central
21/04/2002	19.5	-98.91	17.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
21/04/2002	19.49	-98.92	19.00	2.8	Eje Volcánico Oriental
21/04/2002	19.5	-99.02	24.00	3.1	Eje Volcánico Central
21/04/2002	19.44	-99.02	11.00	3	Eje Volcánico Central
09/05/2002	19.51	-99.03	26.00	3.7	Eje Volcánico Central
09/05/2002	19.49	-99.02	20.00	3.3	Eje Volcánico Central
09/05/2002	19.49	-99	16.00	3.4	Eje Volcánico Central
11/05/2002	19.51	-99.01	24.00	3.1	Eje Volcánico Central
15/05/2002	19.01	-98.59	1.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
13/07/2002	19.19	-98.55	34.00	3.4	Eje Volcánico Oriental
04/09/2002	19.37	-98.53	44.00	3.8	Eje Volcánico Oriental
16/11/2002	19.16	-98.68	1.00	3.9	Eje Volcánico Oriental
16/11/2002	19.2	-98.53	7.00	3.4	Eje Volcánico Oriental
17/11/2002	19.2	-98.54	4.00	3.4	Eje Volcánico Oriental
17/11/2002	19.2	-98.64	4.00	3.4	Eje Volcánico Oriental
21/12/2002	19.31	-98.75	23.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
08/01/2003	19.18	-98.97	12.00	3	Eje Volcánico Oriental
04/02/2003	19.12	-98.78	5.00	4.1	Eje Volcánico Oriental
12/04/2003	19.1	-99.17	9.00	3	Eje Volcánico Central
01/11/2003	19.29	-98.99	5.00	3.6	Eje Volcánico Oriental
10/11/2003	19.16	-99	21.00	3.1	Eje Volcánico Oriental
11/11/2003	19.18	-98.94	14.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
15/11/2003	19.18	-98.95	5.00	3.8	Eje Volcánico Oriental
15/11/2003	19.18	-98.93	12.00	3.3	Eje Volcánico Oriental

25/11/2003	19.19	-98.96	3.00	3.5	Eje Volcánico Oriental
08/07/2004	19.43	-99	5.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
13/09/2004	19.37	-99.11	10.00	3.1	Eje Volcánico Central
07/10/2004	19.32	-98.94	2.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
08/10/2004	19.64	-99.18	20.00	2.8	Eje Volcánico Central
14/12/2004	19.27	-98.9	14.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
19/12/2004	19.23	-98.85	11.00	3	Eje Volcánico Oriental
07/02/2005	19.27	-98.91	10.00	3.3	Eje Volcánico Oriental
29/06/2005	19.06	-98.69	5.00	3.2	Eje Volcánico Oriental
06/08/2005	19.8	-98.58	21.00	4	Eje Volcánico Oriental
16/10/2005	19.29	-99.19	10.00	3.5	Eje Volcánico Central
02/02/2006	19.25	-98.94	14.00	3.5	3 km al noroeste de San Mateo Huitzilzingo, Mex.
11/02/2006	19.32	-98.95	5.00	3.5	3 km al noroeste de Xico, Mex.
11/03/2006	19.15	-98.96	5.00	3.7	8 km al sureste de San Antonio Tecomilt, DF.
11/03/2006	19.17	-98.95	5.00	3.5	6 km al sur de San Andres Mixquic, DF.
15/11/2006	19.02	-98.6	1.00	3.5	19 km al oeste de San Buena ventura Nealtican, Pue.
14/12/2006	19.48	-98.55	20.00	3.8	2 km al suroeste de Cd de Nanacamilpa, Tlax.
25/01/2007	19.06	-99.06	14.00	3.8	9 km al noroeste de Tepoztlan, Mor.
30/05/2007	19.22	-99.24	14.00	3.9	3 km al oeste de San Miguel Ajusco, DF.
12/12/2008	19.68	-98.68	2.00	3.2	15 km al suroeste de Cd Sahagun, Hgo.
03/05/2009	19.28	-98.82	17.00	3.2	2 km al este de San Martin Cuautlalpan, Mex.
11/07/2009	19.33	-99.13	10.00	2.9	4 km al sureste de Coyoacán, DF.
14/07/2009	19.83	-99.14	13.00	3.6	2 km al noroeste de San Juan Zitlaltepec, Mex.
09/02/2010	19.7	-98.62	4.00	2.9	9 km al suroeste de Cd, Sahagun, Hgo.
11/02/2010	19.28	-99.16	11.00	2.6	3 km al Noroeste de Xochimilco, DF.
05/03/2010	19.18	-98.89	5.00	3	6 km al sureste de San Mateo Huitzilzingo, Mex.
11/03/2010	19.37	-98.52	4.00	3.1	11 km al noroeste de San Rafael Tlanalapan, Pue.
05/04/2010	19.4	-99.1	43.00	2.5	0 km al noroeste de Iztacalco, DF.
20/05/2010	19.14	-98.55	10.00	3.5	15 km al oeste de Huejotzingo, Pue.
24/06/2010	19.3	-99.04	2.00	3.4	2 km al este de Tlahuac, DF.
24/06/2010	19.33	-99.09	9.00	2.9	3 km al sur de Iztapalapa, DF.
28/06/2010	19.44	-98.82	14.00	3.5	5 km al este de San Miguel Coatlinchan, Mex.
05/07/2010	19.2	-98.94	10.00	3.7	3 km al suroeste de San Mateo Huitzilzingo, Mex.
05/07/2010	19.27	-98.88	9.00	3.2	2 km al noreste de Chalco, Mex.
03/12/2010	19.12	-99.2	5.00	3.7	10 km al sur de San Miguel Ajusco, DF.
14/12/2010	19.73	-98.58	1.00	3.8	4 km al sur de Cd Sahagun Hgo.
26/06/2011	19.04	-99.16	20.00	3.3	9 km al Noroeste de Tepoztlan, Mor.
05/09/2011	19.18	-98.75	16.00	3.1	4 km al sur de San Rafael, Mex.
05/09/2011	19.15	-98.55	20.00	3.1	15 km al oeste de Huejotzingo, Pue.
19/09/2011	19.17	-98.62	2.00	3.7	15 km al sureste de San Rafael, Mex.
23/09/2011	19.14	-98.54	20.00	3.3	15 km al oeste de Huejotzingo, Pue.

Tabla 2.1 Se muestra la información resumida referente a la ubicación de sismos en el Distrito Federal y la CM información referente a la ubicación del sismo y su fecha de ocurrencia. A*, B* y C* aún sin dato de profundidad, pero con mecanismo focal.

Fuente. Servicio Sismológico Nacional, 1998-2011.

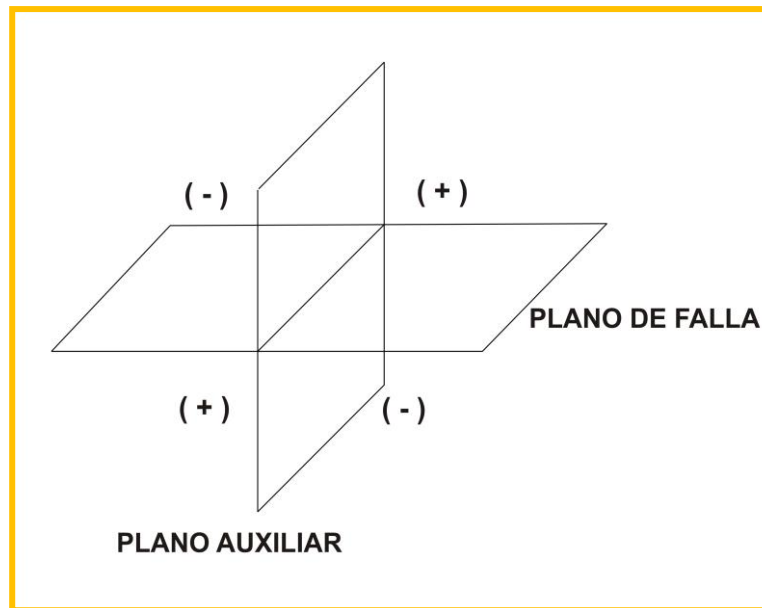


Figura 2.12 La distribución de movimiento vertical de la onda P de un sismo. Dos planos perpendiculares separan los movimientos, uno es el plano de falla y el otro es un plano auxiliar.

Fuente. Mondragón-Guzmán *et. al.*, 2009.

Los factores que influyen para la efectiva rotura superficial del terreno al momento de presentarse un sismo son entre otros:

- **Fallas activas.** Los movimientos en la superficie del terreno por fallas activas están asociados a sismos importantes con magnitudes superiores o iguales a 6,0, sin embargo cabe la posibilidad de que al presentarse un sismo de menor magnitud pueda reactivarse la falla.
- **Propiedades dinámicas del suelo.** Espesor rocoso por encima del sustrato o nivel resistente.
- **Las características del sismo.** Donde equivale a registrar durante un sismo la magnitud, profundidad y distancia al epicentro.

3. Marco teórico de PRM

En la naturaleza existen diversos fenómenos naturales que por su frecuencia e intensidad causan daños a la infraestructura e integridad físicas de la población asentada en los lugares donde se pueden presentar. Dentro de esta gama de fenómenos se encuentran los PRM, que en la actualidad se presentan como una seria preocupación para las autoridades competentes y habitantes.

3.1 Antecedentes

Los PRM han cobrado mayor importancia en el mundo en las cuatro últimas décadas, debido al considerable crecimiento de la mancha urbana en zonas de eminente peligro. De lo anterior el riesgo está condicionado a la poca o nula planeación urbana y por las características socioeconómicas de la población. De acuerdo con la Cruz Roja Internacional, el desastre anual causado por los movimientos de tierra cobra aproximadamente 30,000 personas y 81,000 viviendas afectadas, de lo anterior varios autores han desarrollado diversos trabajos que analizan de manera específica a los PRM.

- Alcantara-Ayala (2000) realizó un trabajo donde se analizó las interacciones ambientales entre los factores del clima, topografía y geología que juegan como un mecanismo desencadenante de los PRM al sur de la Provincia de Granada, España.
- Borja-Baeza y Alcantar-Ayala (2004) llevan a cabo un análisis que involucra la inestabilidad de laderas a partir de la modelación de la interacción del relieve, concentración de humedad y las propiedades de los materiales de Zacapoaxtla, Puebla.
- Fernández y Lutz (2003) realizaron un estudio de incidencia en donde relacionan los PRM y la erosión fluvial en la quebrada del río Los Sosa, provincia de Tucumán.
- Lugo-Hubp y colaboradores (2005) clasifico el relieve de la Sierra Norte de Puebla en unidades morfológicas donde se asocian con la geología de la región donde indica la vulnerabilidad y los riesgos para los PRM.

- Pérez-Gutiérrez (2007) realizó un análisis de la vulnerabilidad por deslizamientos en la región de Tlacuitlapa, Guerrero, donde hace mención de los daños ocasionados en la infraestructura.
- Catañeda-Leonides (2011) realizó una tesis aportando datos geológicos del Peñón del Marqués y Peñón de los Baños en el Distrito Federal donde genera uno de los primeros mapas de inventario y peligros por PRM.
- Carlos-Valerio (2004) realizó una tesis donde propone una zonificación de peligros por inestabilidad de taludes en la Sierra de Guadalupe donde también propone una propuesta geotécnica de mitigación.

La Secretaría de Protección Civil del Distrito Federal ha colaborado con otras autoridades para atender emergencias suscitadas en distintas partes dentro Ciudad de México, por mencionar algunos se tiene:

- Octubre 2008. Vivienda afectada por la presencia de un talud, el cual podría presentar inestabilidad ubicado en la Calle General Monteverde esquina Avenida de los Toros en la Delegación Miguel Hidalgo (figura 3.7).
- Septiembre 2008. Rehabilitación del acceso denominado Camino Real a San Bartolo, ubicado en los límites de las colonias Santa María Nativitas y Santa Cecilia Tepetlapa, Delegación Xochimilco (figura 3.8)
- Septiembre 2008. Verificar las condiciones de riesgo en la Barranca Juárez, localizada en la esquina de la Calle Juárez y Avenida Camino al Desierto de los Leones, en la Colonia Pueblo de Santa Rosa Xochiac, Delegación Álvaro Obregón (figura 3.9).
- Septiembre 2008. Evaluación del riesgo en la Calle Tarango, Colonia Las Águilas en la Delegación Álvaro Obregón (figura 3.10).
- Octubre 2008. Revisión y evaluación del riesgo en el Peñón del Marqués o Viejo, en la Delegación Iztapalapa (figura 3.11).
- Enero 2009. Revisión y análisis de riesgo del talud en la Colonia Palmitas en la Delegación Iztapalapa (figura 3.12).

- Abril 2009. Revisión y análisis de riesgo por el desprendimiento y caídas de rocas en la Calle Cerrada de las Flores y Cerrada de las Minas, Colonia Buenavista, Delegación Iztapalapa.
- Septiembre 2008. Deslizamiento de tierra en Cerrada Minatitlán, Colonia Ampliación Piloto, Delegación Álvaro Obregón.
- Abril 2009. Revisión ocular en el talud ubicado en la Calle Jacarandas y Santa Catarina de Sena en la Delegación Iztapalapa (figura 3.13).



Figura 3.7. Talud de tierra y fragmentos de roca donde se encuentra en estado de riesgo, debido a la posible caída o deslizamiento, debido a la carga y filtraciones de agua.

Fuente: SPC del DF.

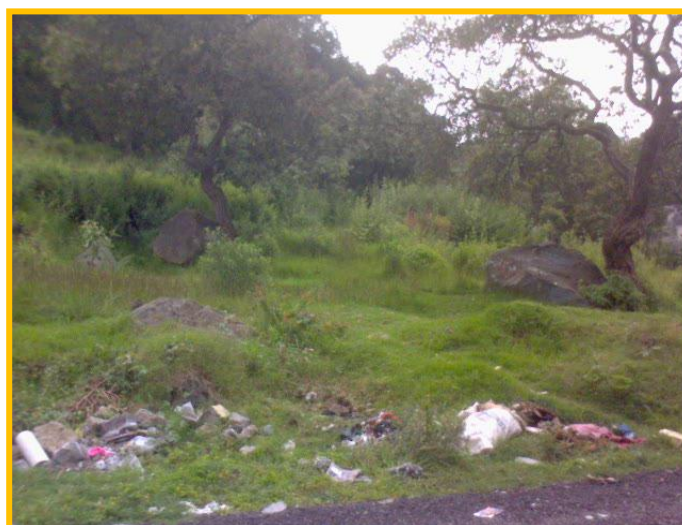


Figura 3.8 Caídos rocosos, afectando al camino que es transitado por el transporte local. Fuente: SPC del DF.



Figura 3.9 Vivienda afectada debido a su localización esta en las orillas de la Barranca Juárez, Álvaro Obregón. Fuente: SPC del DF.



Figura 3.10 A) Zona de riesgo por deslizamiento y B) Contaminación de las aguas, debido a la actividad antrópica de la zona. Fuente: SPC del DF.



Figura 3.11 A) Presencia de bloques obstruyendo las calles aledañas al volcán y B) Morfología del talud constituido de escoria volcánica. Fuente: SPC del DF.



Figura 3.12 Caída de bloques. Fuente: SPC del DF.

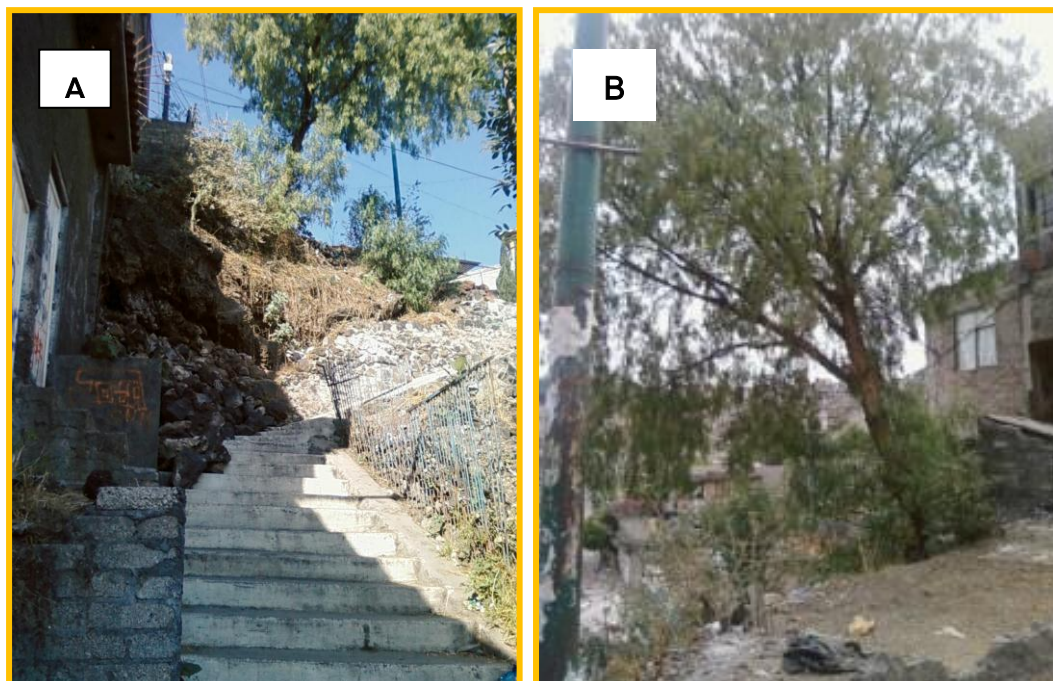


Figura 3.13 A) Se muestra una vista frontal del talud y B) Se muestra la infraestructura afectada y los individuos arbóreos en la cima del talud. Fuente: SPC del DF.

3.2 Clasificación de los PRM

Los PRM son aquellos movimientos que involucran materiales que conforman las laderas naturales o artificiales bajo la influencia de la gravedad (o bien, procesos gravitacionales) con la asistencia esencial de algún agente de transporte fluido (Brunsden, 1979). De tal forma que incluyen la caída o desprendimiento de materiales, vuelcos, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos, estos últimos, resultado de la combinación de dos o más de los mencionados anteriormente.

Existen diversas clasificaciones que se le dan a los PRM. La primera clasificación fue la que propuso Sharpe (1938), posteriormente aparecieron las de Varnes (1958, 1978), Nemcok *et. al.* (1972), Hutchinson (1988), Sassa (1989) y más recientemente, las de Dikau et al. (1996) y Cruden y Varnes (1996), García Yagüe (1988) los clasifica basándose mediante la terminología de Corominas y apareció posteriormente en España con la primera clasificación completa, Corominas y Alonso (1984) presentaron una versión simplificada de

la de Varnes (1978) y otra segunda después por las de Ayala *et. al.*, (1987), Ferrer (1988), García-Yagüe y García-Álvarez (1988) y Corominas (1989).

1) **Desprendimientos o caídas.** Se originan por el despegue de una masa de suelo o roca de una pared empinada o acantilado. El movimiento tiene lugar mediante caída libre y posterior rebote o rodadura de rápido movimiento. Es frecuente que al impactar contra la superficie del terreno, la masa caída se rompa en fragmentos (figura 3.14).

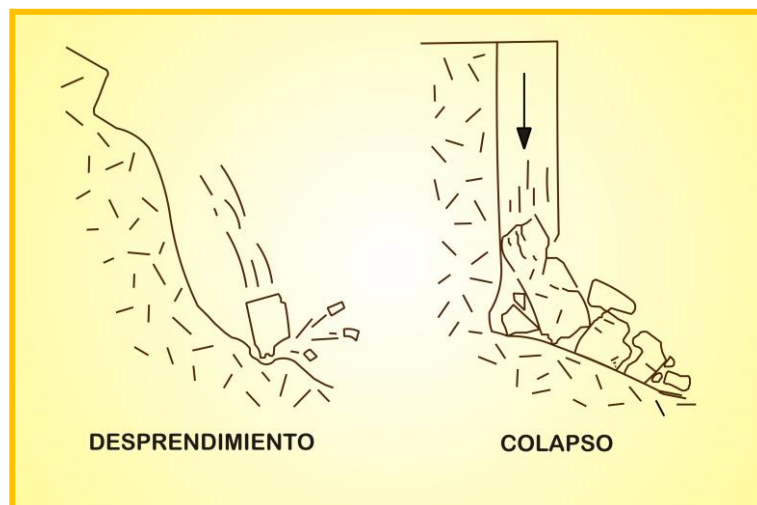


Figura 3.14 Esquema de los mecanismos de desprendimientos y caídas.

Fuente: Corominas y García Yagüe, 1997.

2) **Vuelcos.** Es la rotación de un suelo o roca hacia adelante y hacia el exterior de la ladera, de un eje situado por debajo de su centro de gravedad. La fuerza que actúa como deslizadora es la gravedad así como el empuje ejercido por el terreno adyacente o los fluidos (agua o hielo) en las grietas, dentro de los vuelcos se distingue una subclasificación.

- **Vuelco por flexión.** Tiene lugar en rocas con un sistema preferente de discontinuidades, formando vigas semicontinuas en voladizo (Goodman y Bray, 1976). Las columnas continuas cuando se doblan hacia delante, rompen por flexión. Este tipo de movimiento es característico en esquistos, filitas, pizarras y en secuencias finamente estratificadas, la generación de un mecanismo de vuelco natural en macizos rocosos es

poco frecuente, su desarrollo está asociado a excavaciones artificiales (figura 3.15).

- **Desplome.** La parte movida cae con un movimiento brusco de giro, al menos inicial, apoyado en su base externa. Estos movimientos se producen en bordes acantilados rocosos o de materiales arenarcillosos compactados. Si la ladera es muy empinada, las roturas por vuelco pueden transformarse en caídas (figura 3.15).

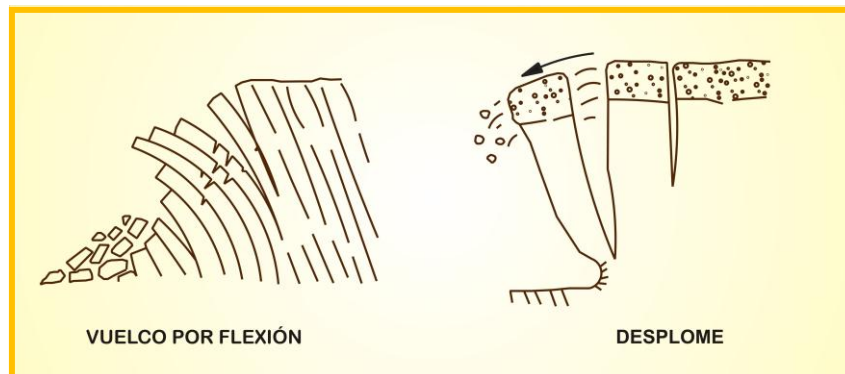


Figura 3.15 Esquema de vuelcos y desplomes.

Fuente: Corominas y García Yagüe, 1997.

3) Deslizamientos. Un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, que tiene lugar predominantemente sobre una o más superficies de rotura, o zonas relativamente delgadas con intensa deformación de cizalla. Los elementos característicos de este movimiento son la presencia de superficies de rotura definidas y la preservación de la forma de la masa desplazada. Dentro de los deslizamientos se distingue la siguiente subclasificación (figura 3.16).

- **Deslizamientos rotacionales.** La rotura se produce a lo largo de una superficie curvilínea y cóncava. El terreno experimenta un giro según un eje situado por encima del centro de gravedad de la masa desplazada, el material de cabecera efectúa una inclinación contra ladera generando depresiones donde se acumula el agua e induce nuevas reactivaciones. Este tipo de mecanismo es característico de suelos cohesivos homogéneos y de macizos rocosos intensamente fracturados. En materiales arcillosos especialmente si hay presencia de agua, el pie puede evolucionar hacia un deslizamiento de tierras o colada de tierras.

Una vez producido el movimiento es susceptible de reactivarse o a estabilizarse.

- **Deslizamientos traslacionales.** Tienen lugar a lo largo de una superficie de rotura plana u ondulada, los componentes de la masa desplazada se mueven a la misma velocidad, sigue trayectorias paralelas y la masa deslizada puede proseguir por la ladera, a medida que un deslizamiento traslacional progresa puede romperse, en particular si aumenta la velocidad del flujo.
- Los deslizamientos traslacionales de bloques de suelo o roca sin apenas fraccionarse sobre superficies únicas en macizos rocosos se han denominado **resbalamientos** (García-Yagüe, 1966) o **deslizamientos planos** (Hoek y Bray, 1981). Cuando la superficie de rotura está formada por dos planos que obligan a la masa rocosa a desplazarse según la línea de intersección se forma un **deslizamiento en cuña**. Los deslizamientos en los que la masa desplazada se trocea en su movimiento descendente y resulta una acumulación caótica de bloques al pie de la ladera se denominan **corrimientos** (García-Yagüe, 1966). Cuando la rotura por cizalla tiene lugar en suelos no cohesivos constituidos por partículas gruesas se denominan **deslizamientos de derrubios**.

Mientras que la rotación tiende a restablecer el equilibrio en la masa desplazada, el deslizamiento traslacional puede mantenerse indefinidamente si la superficie de rotura es lo suficientemente inclinada y continua.

4) Expansiones laterales. Varnes (1978) diferenció dos tipos 1) la fracturación y extensión de material compacto (suelo y roca), debido a la licuefacción del material subyacente y 2) los movimientos afectan al conjunto de formación sin que se identifiquen zonas basales de cizalla o flujo plástico, o por lo menos, sin que estén bien definidas. El desplazamiento lateral provoca la fracturación de las capas de recubrimiento separándose en grandes bloques por entre los cuales es

capaz de penetrar la arcilla y se caracteriza por ser un movimiento considerablemente lento. Las expansiones laterales afectan a litologías blandas y deformables que se encuentran por debajo de niveles potentes de materiales resistentes y densos (figura 3.17).



Figura 3.16 Esquema de los tipos de deslizamientos.

Fuente: Corominas y García-Yagüe, 1997.

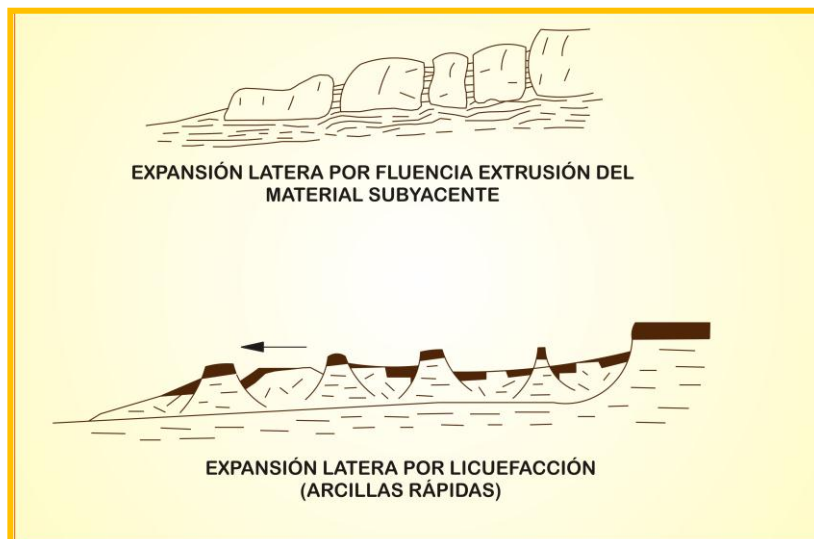


Figura 3.17 Expansiones laterales. Arriba: por fluencia y extrusión del material subyacente. Abajo: por licuefacción (arcillas rápidas).

Fuente: Corominas y García-Yagüe, 1997.

5) Flujos. Son movimientos continuos de suelo o fragmentos de roca ladera abajo en donde el movimiento de sus partículas es relativo dentro de la masa que se mueve sobre una superficie de la falla. Los flujos se dividen según el material de suelo o fragmentos de rocas, contenido de agua y la circulación en pendientes empinadas.

- **Soliflucción.** Este término es utilizado para describir deformaciones de pequeñas dimensiones en suelos cohesivos y de poco espesor, dan lugar a formas lobuladas de superficies de cizalla de poca extensión (figura 3.18).
- **Golpes de arena y limo.**- Es el movimiento brusco de arenas y limos, a veces en estado seco (García-Yagüe y García Álvarez, 1988). Normalmente se producen por colapso estructural por efecto de una sacudida sísmica o al iniciarse la rotura del suelo por deslizamiento (figura 3.18).



Figura 3.18 Tipos de movimiento de flujos.

Fuente: Corominas y García-Yagüe, 1997.

6) Reptación. Es aquel movimiento extremadamente lento y es imperceptible excepto para largos períodos de tiempo (Sharpe, 1938) y no muestra superficies de cizalla definidas. Este término se ha utilizado en diversos sentidos en estudios sobre la estabilidad de las laderas, como por ejemplo (Hutchinson, 1988; Selby, 1993) 1) desplazamiento estacional de partículas aisladas o delgadas capas de suelo por efecto de la gravedad con la ayuda de ciclos de hielo-deshielo o humectación-desección, 2) desplazamiento muy lento pero continuo a gran profundidad, 3) desplazamientos, inicialmente muy lentos que se aceleran progresivamente y que preceden a la rotura de la ladera; Zischinsky (1966) considera que la reptación es un mecanismo importante en la deformación de laderas de alta montaña y ha sido incluido dentro del grupo de deformaciones previas a la rotura (figura 3.18).

7) Coladas de tierra. Es considerada como una deformación plástica, lenta y no necesariamente muy húmeda de tierra o rocas blandas (*flysch*, pizarras, filitas), en laderas de inclinación moderada. Cuando existen en su gran mayoría materiales cohesivos con un elevado contenido de limos y arcillas se les denomina **coladas de barro** (Corominas y Alonso, 1984; Ayala *et. al.*, 1987), adoptan una forma elongada formando un volumen positivo sobre la superficie, el estiramiento del material y el cambio de forma caracteriza al movimiento como un flujo. Algunos autores han observado que algunas formas de coladas de barro progresan sobre superficies de cizalla con moderada deformación interna (Hutchinson, 1988), en este caso se denominan deslizamiento de tierra (figura 3.18).

8) Movimientos Complejos

Son el resultado de la transformación del movimiento inicial en otro tipo de movimiento al ir desplazándose ladera abajo (Coraminas, 2007).

- **Flujo de derrubios.** Son movimientos rápidos de material detrítico en el que predomina la fracción gruesa (arenas, gravas y bloques). El contenido de agua es elevado y la fracción sólida puede llegar a

constituir el 80% en peso de la masa en movimiento. Debido a la baja de cohesión de sus componentes, se desparrama en la parte inferior de las laderas sin generar un depósito de forma definida, pero cuando se canaliza por barrancos suelen dar lugar a conos de deyección (figura 3.18).

- **Avalanchas.** Es la movilización de grandes masas de tierra, fragmentos de rocas o derrubios con aire y agua atrapados y se caracteriza por su gran velocidad. Igual que ocurre con otros desprendimientos, el relieve es el que condiciona que la rotura de grandes volúmenes de roca o suelos derive hacia una avalancha o se mantenga como un deslizamiento o una corriente. En las avalanchas de derrubios, por el contenido de agua o por efecto de la pendiente, el conjunto puede licuefacer al menos parcialmente, fluir y precipitarse hacia abajo. (figura 3.18).

9) Otros movimientos

Estos movimientos de masa implican deformaciones iniciales y dan como resultado el fracturamiento y una ruptura del suelo o roca implicada.

- **Deformaciones sin rotura o previas a la rotura.** En ocasiones, las deformaciones de la ladera no dan lugar al despegue de la masa movida ni a la formación de superficies de rotura continuas en todo el conjunto y por lo tanto se trata de deformaciones de corta extensión. Estas deformaciones pueden acelerarse hasta la rotura, reactivarse periódicamente o dejar de producirse (figura 3.19).
- **Reptación por fluencia.** Son desplazamientos inicialmente muy lentos, que se aceleran progresivamente y que preceden a la rotura de la ladera (figura 3.19). En términos físicos, estos desplazamientos son el reflejo indudable del desarrollo de una rotura progresiva.
- **Cabeceo.-** Es un proceso de alteración química y física de los macizos rocosos que se desarrollan en la parte superficial de las laderas intensamente fracturadas (esquistos, filitas, pizarras, *flysch*) presentando un marcado buzamiento hacia el interior del macizo. Los

primeros metros superficiales suelen encontrarse descomprimidos y alterados, condición suficiente para que si se erosiona la parte inferior de la ladera el conjunto alterado tienda a girar hacia abajo (Corominas, 1989). El mecanismo implica además de la rotación de los niveles rocosos, el deslizamiento relativo a través de las discontinuidades preexistentes. La zona donde se produce el cambio de inclinación da lugar a la formación de una zona de debilidad que se convierte en una superficie potencial de deslizamiento (figura 3.19).

- **Combadura y pando en valle.** Las combaduras aparecen asociadas con el abombamiento de los fondos de valle, es característico de valles excavados en estratos casi horizontales con un nivel rocoso fisurado por encima de arcillitas, limolitas o margas que, a su vez, reposan sobre un substrato más competente. Las principales características del movimiento es la combadura del nivel rocoso superior hacia el valle, dando lugar al ensanchamiento de las fisuras, el nivel arcilloso inferior muestra un marcado adelgazamiento hacia el valle y un plegamiento monoclin al intenso. Las partes superiores de estos pliegues suelen coincidir con el levantamiento o pando del fondo del valle (Hutchinson, 1988). Este mecanismo Cruden y Varnes (1996) lo consideran como una variante de las expansiones laterales (figura 3.19).

- **Deformaciones gravitatorias profundas o hundimientos de ladera.**

Se le denominan a las deformaciones a gran escala de las laderas con rotura y desplazamiento, las evidencias sobre el terreno de las deformaciones son la presencia de escarpes de fracturas antitéticas con una alineación a grandes rasgos paralela con las curvas de nivel de la ladera y el hundimiento de la zona de cresta (figura 3.19). En la base de las laderas puede haber evidencias de abombamientos que causan el desplazamiento. No obstante, las evidencias de los abombamientos son menos claras que el hundimiento y desplazamiento de la cresta. Algunas condiciones geológicas bajo las que ocurre la expansión de crestas son (Selby 1993): 1) flexión profunda, plegamiento y flujo plástico en rocas, 2) abombamiento, extensión y fractura de crestas empinadas, 3) fluencia de rocas rígidas sobre rocas blandas sin flexión.

- **Roturas confinadas.** Se trata de mecanismos de rotura progresiva que dan lugar a la deformación y agrietamiento de la ladera (normalmente las grietas aparecen en la zona de cabecera) sin que la superficie de cizalla se desarrolle completamente y produzca la rotura general del terreno afectado (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988) (figura 3.19). Para este último caso, las roturas confinadas en macizos rocosos mostrarían características de las deformaciones o hundimientos gravitatorios profundos.

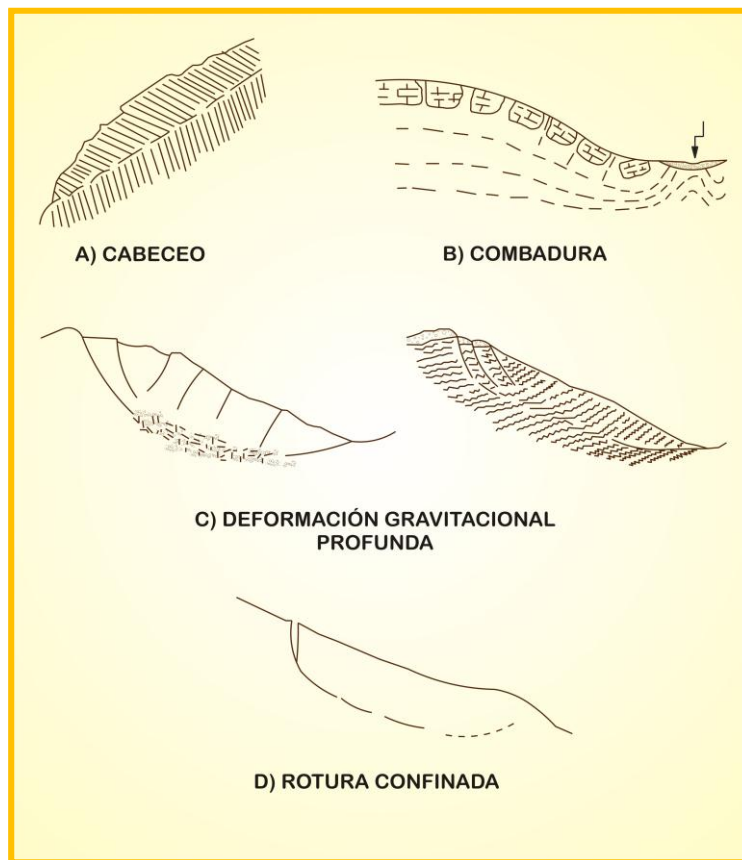


Figura 3.19 Tipos de deformaciones sin ruptura de la ladera.

Fuente: Corominas y García-Yangüe, 1997.

3.3 Factores condicionantes para detonar los PRM

De acuerdo con Terzaghi (1950) y Selby (1993) los factores que propician la ocurrencia de los PRM se pueden dividir en dos, 1) Causas externas que producen un cambio en el campo de esfuerzos, pero no en la resistencia de los materiales y 2) Causas internas que disminuyen la resistencia de los materiales

sin cambiar el campo de esfuerzos a su vez, dependiendo en cómo actúan, se clasifican en dos grupos (SNET, 2004): 1) Condicionantes. También conocidos como pasivos o intrínsecos, son aquellos que dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno y 2) Desencadenantes. También llamados activos o externos, son factores que actúan desde fuera del medio que se estudia, provocando o desencadenando un PRM.

1) Factores condicionantes

- **La gravedad.** Es considerada como el factor más importante de todos, puede mover los materiales térreos sólo cuando es capaz de vencer la resistencia del material que le impide moverse. Entonces, es claro que cualquier factor que reduzca esta resistencia hasta el punto donde la gravedad pueda intervenir, contribuye al movimiento de masa.
- **La morfología.** Este factor necesita de cierta pendiente para que se produzcan los movimientos hacia abajo, también se le conoce con el nombre de factor de relieve, topográfico ó geométrico.
- **La geología.** Este factor es determinante al contribuir con los movimientos en los diferentes tipos de suelos y rocas. Aspectos como la composición, resistencia, deformabilidad, grado de alteración, fracturación, porosidad y permeabilidad determinan la posibilidad del terreno de sufrir rupturas y desplazamientos, también recibe el nombre de factor litológico o estratigráfico.
- **El agua subterránea.** Juega un triple papel negativo en la resistencia de los materiales: 1) Reduce la resistencia por la generación de presiones intersticiales, 2) incrementa el peso del terreno y 3) contribuye a la meteorización de los suelos y rocas. A este factor también se le denomina factor humedad.

2) Factores Desencadenantes

- **La Lluvia.** Los PRM están relacionados con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones debido a esto, es importante tomar en

consideración la respuesta del terreno a precipitaciones durante horas, días, meses, años ó incluso durante ciclos de lluvia y sequía de varios años. La Lluvia contribuye a elevar el nivel de agua subterránea, ocasionando incrementos en las presiones intersticiales aumento de peso, procesos de erosión interna y cambios mineralógicos, condiciones que modifican las propiedades y resistencia de los suelos.

- **La Sismicidad.** La magnitud y la distancia al epicentro de los sismos pueden provocar efectos negativos de todo tipo, dependiendo de las características de los suelos, conllevando a presentar derrumbes, deslizamientos y flujos.
- **La actividad antropogénica.** Entre las actividades humanas que pueden desencadenar un accidente de ladera son: la actividad minera, vibraciones artificiales, irrigación, deforestación, desecación de cuerpos de agua, incremento de peso en las laderas, excavación en o al pie de laderas (Cruden y Varnes, 1996).

3.4 Estados de actividad de los movimientos

Al igual que los volcanes, los PRM tienen diferentes grados de actividad (tabla 3.1) es decir, cuando un terreno tiene un movimiento actual, es un *movimiento activo*. Si el movimiento ha tenido lugar en los últimos meses se le considera como un *movimiento suspendido*. Un movimiento que ha estado inactivo, pero en la actualidad es activo, se le denomina como *movimiento reactivo*. Cuando un movimiento no ha tenido actividad en los últimos doce meses, se le considera como un *movimiento apagado, abandonado, estabilizado o reliquia* (tabla 3.2).

La evaluación de los estados de actividad de un movimiento está en función de la recolonización vegetal y de la dinámica topográfica. Los estados de actividad no solo se miden en el tiempo, sino que también en el espacio (figura 3.20).

No.	Distribución espacial de la actividad	Características
1	Progresivo	Si la superficie de la ruptura se extiende en la dirección del movimiento
2	Retrogresivo	Si la superficie de la ruptura se extiende en dirección opuesta que el movimiento.
3	Extensivo	La superficie del movimiento se extiende en una o más direcciones.
4	Diminutivo o abrasivo	El volumen del materia desplazado disminuye con el tiempo.
5	Confinado	Existe un escarpe, pero no una visible superficie de ruptura al pie de la masa desplazada.
	Móvil	El material desplazado continúa su movimiento sin cambio visible alguno en la superficie de la ruptura y en el volumen desplazado.
	Crecimiento transversal	La superficie de ruptura se extiende hacia uno o ambos flancos del movimiento.

Tabla 3.1 Distribución espacial de la actividad de un movimiento.

Fuente: WP/WLI, 1993.

No.	Tipo de movimiento	Características
1	M. activo	Tienen un movimiento actual.
2	M. en suspenso	Ha tenido un movimiento en los últimos doce meses.
3	M. reactivado	Es un movimiento activo, que ha estado inactivo.
4	M. inactivo	No ha tenido movimiento en los últimos doce meses.
5	M. apagado	Es un movimiento inactivo, que puede ser reactivado como resultado de los factores desencadenantes que lo originaron o por otros.
6	M. abandonado	Es un movimiento inactivo, el cual no es afectado por los factores que lo originaron.
7	M. estabilizado	Es un movimiento inactivo, el cual ha sido protegido de los factores que lo originaron a través de medidas.
8	M. reliquia	Es un movimiento inactivo, el cual se desarrolló bajo condiciones climáticas o geomorfológicas totalmente diferentes a sus condiciones actuales.

Tabla 3.2 estados de actividad de los movimientos de ladera.

Fuente: Alcántara-Ayala, 2000.

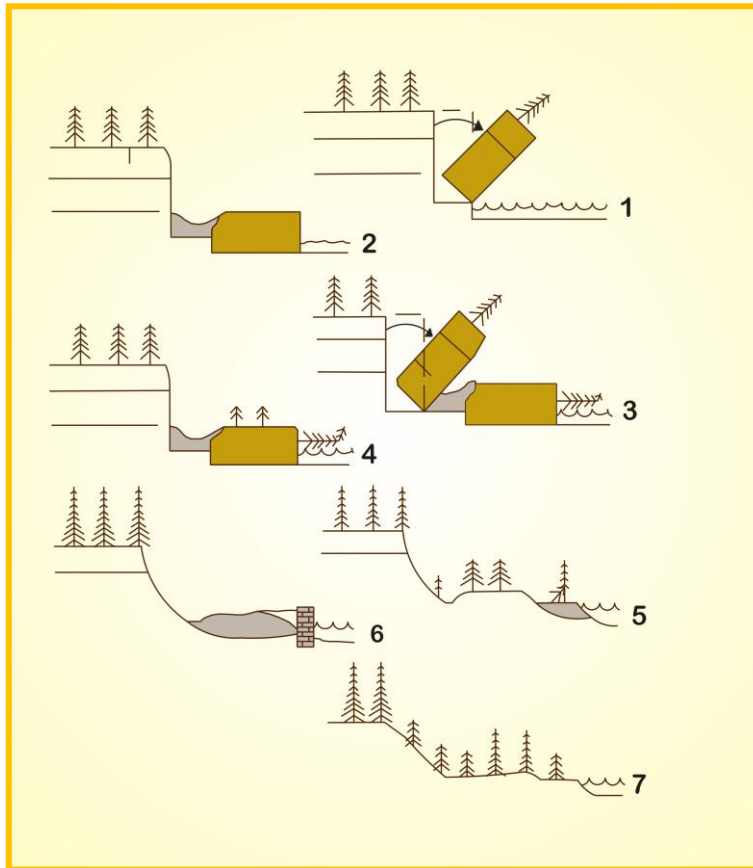


Figura 3.20 Estados de actividad de los movimientos de ladera.

Fuente: WP/WLI, 1993.

4. Marco teórico del Agrietamiento

El fenómeno del agrietamiento representa un problema complejo, donde varios autores han estudiado este fenómeno bajo diferentes enfoques. Debido a esta complejidad resulta difícil predecir con certeza aspectos tales como: el punto de inicio de una grieta, profundidad, dirección e interacción con otras grietas.

Para nuestro caso el agrietamiento se presenta desde en la zona de transición que se extiende desde el pie de monte hacia la zona lacustre, debido a los súbitos cambios superficiales y subterráneos.

4.1 Antecedentes

- Gayol, R., 1925 fue el primero en observar y dar a conocer los problemas de hundimiento en la Ciudad de México, sus estudios los realizó principalmente en el Gran Canal.
- Carrillo, N., 1947 realizó un estudio en el Lago de Texcoco, donde menciona que cuando la cantidad de agua varía en el subsuelo, los esfuerzos de tensión y compresión se invierten, generando la formación de grietas.
- Poland, J. y Davis, G. H., 1969 investigaron que los hundimientos y la formación de grietas se relacionan con la extracción de excesiva de agua utilizada para el riego, en la zona de Eloy-Picacho, USA.
- Melgoza, C., 1978 investigó la presencia de fallas geológicas activadas por bombeo de los acuíferos asociadas a la consolidación diferencial del subsuelo, en la zona de Naucalpan, Estado de México.
- Auvinet, G. y Arias, A., 1990 realizaron un estudio de vértices en una grieta y definieron la intensidad de esfuerzos críticos, donde una grieta puede ser reactivada por la presión del agua de lluvia infiltrada, esto se llevo a cabo en el área de la Cuenca de México.
- Riquelme del Réjon, 2003. Aportó datos sobre la formación de grietas por la aparición de una estructura volcánica sepultada en el

fraccionamiento de los Olivos en la Delegación de Tláhuac, Distrito Federal.

Por otro lado, la Secretaría de Protección Civil ha colaborado con otras autoridades para atender emergencias suscitadas en distintas partes de la ciudad, por mencionar algunos se tiene:

- Julio 2007. Ruptura de una tubería de gasolina magna de 8" de diámetro y de acero proveniente de PEMEX, encontrándose una separación del tubo de 30 cm, localizada en el predio de Avenida Las Torres número 5, Delegación Iztapalapa, debido a la reactivación de una grieta.
- Julio 2007. Se atendió la emergencia en la colonia Lomas de San Lorenzo, Delegación Iztapalapa, por la activación de una grieta en el terreno, lo que ocasionó la ruptura de la tubería de agua potable, drenaje y gas natural (figura 4.1).
- Marzo 2008. Se realizó una visita en la Unidad Habitacional Rinconada del Sur, Delegación Xochimilco, debido a las afectaciones en el predio, debido a la presencia de grietas en el terreno (figura 4.2).
- Septiembre 2008. En la Calle Comonford, entre avenida de la Naranja y Calle José Cardel, en la Colonia San Pedro Xalpa, Delegación Azcapotzalco, perdida de verticalidad de viviendas afectadas por la presencia grietas (figura 4.3).
- Septiembre 2008. Se realizó una inspección ocular al edificio de la Secretaría del Medio Ambiente, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, en el domicilio Calle Netzahualcóyotl, número 109, colonia Cuauhtémoc, debido a la presencia de grietas en el suelo y analizar las afectaciones que tiene el inmueble (figura 4.4).
- Abril 2009. Por petición a la Institución se realizó una visita técnica a la colonia Pensador Mexicano, Delegación Venustiano Carranza, debido a la afectación de la zona, debido a la presencia de grietas (figura 4.5).
- Junio 2009. Debido a la existencia de grietas en la zona, se realizó un análisis del afectamiento de diversos predios en la Calle Vista Hermosa, colonia Lomas de San Lorenzo, Delegación Iztapalapa (figura 4.6).

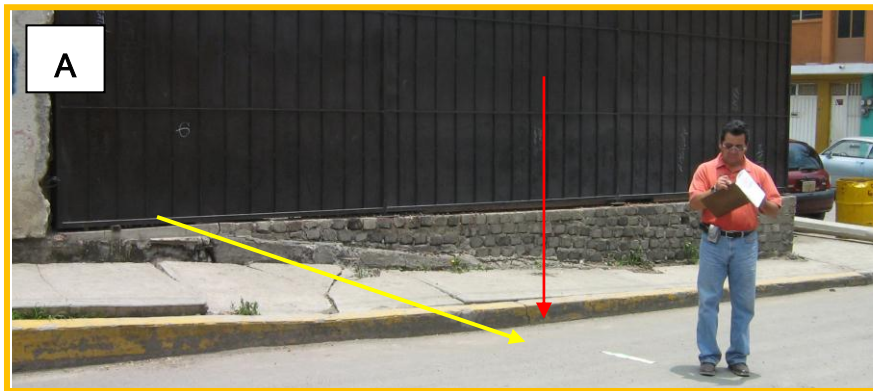


Figura 4.1 Socavación originado la reactivación de una grieta.

Fuente: SPC del DF.



Figura 4.2 Daños en la carpeta asfáltica de la U.H. Rinconada del Sur. A) Agrietamiento de relevo y B) Agrietamiento simple. Fuente: SPC del DF.

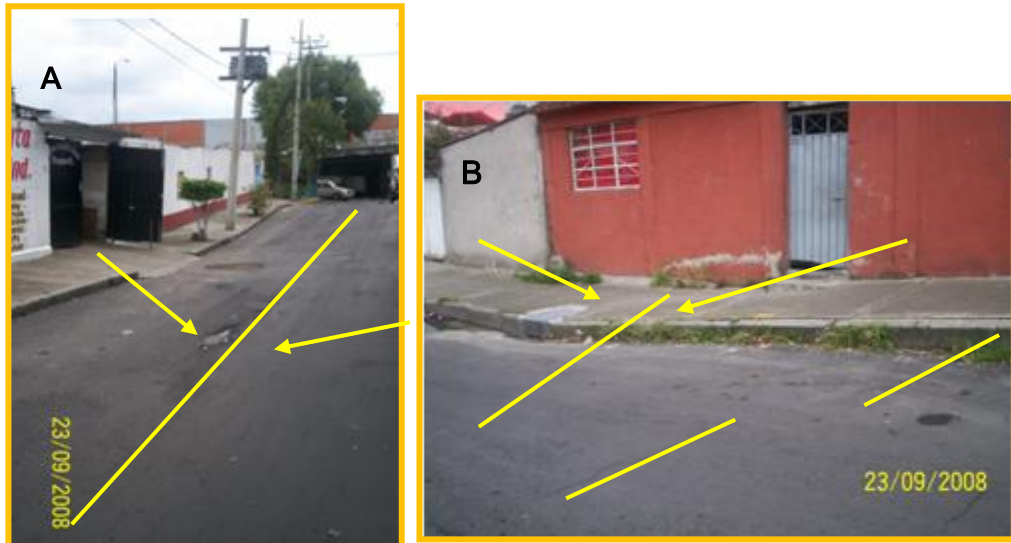


Figura 4.3 A) Agrietamiento manifestado mediante una inclinación y B) Grieta que pasa perpendicularmente sobre la calle afectando a la vivienda y carpeta asfáltica.

Fuente: SPC del DF.

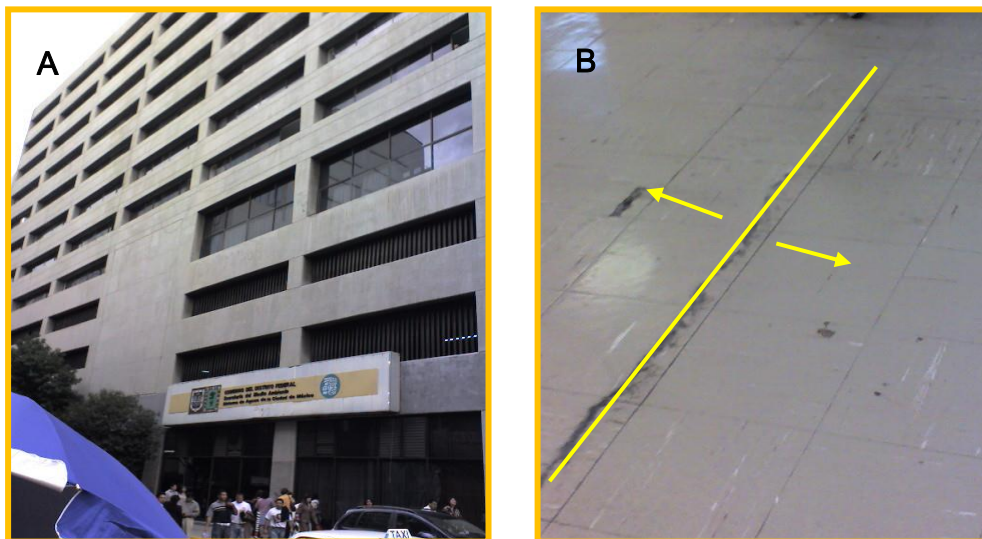


Figura 4.4 A) Fachada externa del Sistema de Aguas de la Ciudad de México y B) Fisuramiento de pisos dentro de las instalaciones del inmueble.

Fuente: SPC del DF.



Figura 4.5 A) Vista frontal del predio Liberia No. 291 Colonia Pensador Mexicano y B) Daño estructural en escuela localizada en Avenida del Peñón, a causa del agrietamiento de la zona.

Fuente: SPC del DF.

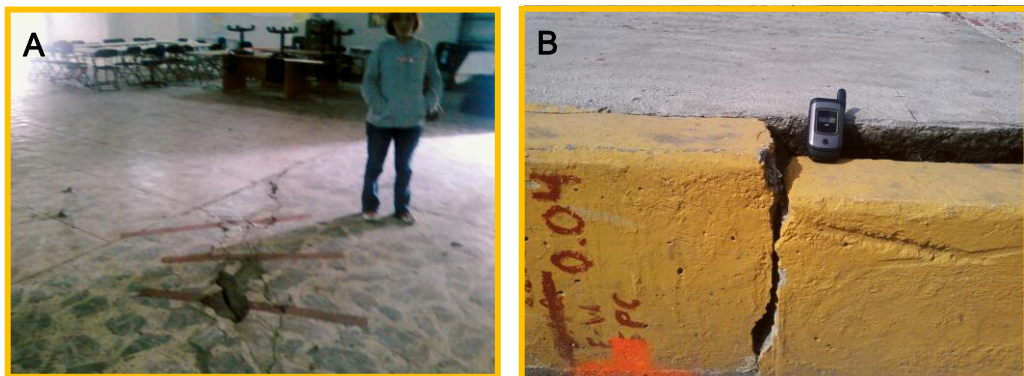


Figura 4.6 A) Daño estructural en el piso de loseta, en las instalaciones del Centro de Estudios y Monitoreo de Agrietamiento de la Zona Oriente del Distrito Federal, debido a una grieta y B) y caída de la guarnición en la banquetta.

Fuente: SPC del DF.

Cabe mencionar que para la mayoría de las emergencias y accidentes que se han suscitado bajo la influencia del agrietamiento, es constante, ya que también otros medios se encuentran interesados en prever a la población de la amenaza en la que se encuentran (figuras 4.7 y 4.8).



Figura 4.7 Daños estructurales considerados como mayores en una vivienda localizada en la Colonia San Sebastián Tecoloxtitlan, Delegación Iztapalapa.

Fuente: Reforma, 2011.



Figura 4.8. Daños estructurales en una fachada. El problema de las grietas de Iztapalapa, se extiende de San Lorenzo cerca de Tláhuac hasta Ermita Zaragoza.

Fuente: Reforma, 2011.

4.2 Agrietamiento y procesos de reptación en la zona de Transición

En la zona de estudio son comunes las grietas en las superficies de contacto entre la planicie lacustre y elevaciones volcánicas, el pie de monte es afectado por un movimiento lento ladera abajo, debido por el asentamiento del material volcánico no consolidado que se apoya en lavas, esto desarrolla la formación de grietas de tensión que constituyen un sistema periférico al

volcán dispuestas a distintas altitudes y con desplazamiento hacia abajo de uno de los bordes, hacia debajo de uno de los bordes, a manera de fallas normales con un salto de aproximadamente de 20 a 50 centímetros.

En la zona de estudio se observa que el agrietamiento se asocia a derrames volcánicos sepultados. Esta influencia para la formación de grietas es muy obvia pues en las a proximidades de las estructuras volcánicas, es donde se presenta la mayor manifestación de agrietamiento (Figura 4.9).



Figura 4.9 Agrietamiento y daños a la infraestructura civil e instalaciones del metro ligero (estación La Paz).

4.3 Agrietamiento en la zona Lacustre

Desde hace más de cuarenta años se han observado en la Ciudad de México, agrietamientos en la superficie del terreno, de manera particular, para la zona lacustre del área de estudio también se ha observado este fenómeno, si bien puede parecer variables que acentúan esta problemática tales como lluvias, encharcamientos, bombeo de agua subterránea, incremento en las presiones hidrostáticas del manto acuífero, etc., donde éstas tienen un origen en común “la ocurrencia de una red de flujo y de fuerzas de filtración que generan esfuerzos de tensión en la masa arcillosa” (Alberro y Hernández, 1991).

En definitiva, se considera complejo mencionar una sola causante de la propagación de grietas y si bien es sabido que el subsuelo presenta características físicas constituidas por potentes estratos de arcillas, limos y arenas con diferentes grados de cementación y compactación altamente compresibles donde el comportamiento es heterogéneo ejerciendo efectos de tensión y compresión originando poca nula estabilidad en la superficie del terreno suscitándose rupturas.

4.4 Mecanismo del Agrietamiento

El agrietamiento es la manifestación de una serie de desplazamientos verticales y horizontales del terreno, que resultan principalmente de dos casos en particular: 1) Extracción excesiva de agua del subsuelo mediante el bombeo profundo y 2) debilidad y ruptura del suelo debido a la modificación que ha tenido el terreno por la acción de actividades antrópicas.

Carreón-Freyre *et. al.*, (2006) clasifican los mecanismos del agrietamiento en materiales arcillosos en: 1) mecánica de fracturas (grietas), con un criterio de propagación basado en el factor de intensidad de esfuerzos críticos y realización de los modelos de propagación bajo presión hidráulica, aplicando el método del elemento Finito, 2) teoría de flujo unidimensional hacia un conjunto de pozo y 3) cuantificación de las tensiones inducidas por el abatimiento del agua subterránea basada en la teoría de la elasticidad incluyendo fuerzas de filtración.

Orozco y Figueroa (1991), de la misma manera señalan que las grietas aparecen en zonas de fuerte hundimiento, los cuales condicionan sus propiedades y de las transiciones estratigráficas laterales. Por lo que en zonas volcánicas relativamente recientes, hay una alta heterogeneidad en la secuencia estratigráfica y el comportamiento mecánico diferencial de los materiales, está condicionado por la permeabilidad y granulometría determinando el gradiente hidráulico, y establece que el fracturamiento en los sedimentos está influenciado por la interacción entre los factores geológicos

que condicionan sus propiedades y los factores disparadores que rompen el equilibrio mecánico del sistema.

Para estos casos se toma en cuenta las variaciones mineralógicas, las condiciones climáticas y de depósito, ya que determinan el comportamiento mecánico y de las capas litológicas y obedeciendo el equilibrio sistemático ante la influencia antrópica.

4.5. Factores para la formación de grietas

Los factores disparadores que obedecen a los desequilibrios mecánicos, de las propiedades de un sistema pueden variar en un tiempo muy corto, ocasionados por fenómenos naturales como actividad sísmica y las inundaciones causadas por lluvias torrenciales, pero las más importantes son de origen antropogénico, inducido por sobre carga estática y dinámica y la despresurización del medio geológico debido a la extracción de los recursos naturales del subsuelo, ya sea petróleo, gas o agua.

Desde el punto de vista literario, el tema del agrietamiento es escasamente descrito donde diversos autores tales como Carrillo-Nava (1947), Juárez V. y Figueroa, V. (1984), Figueroa, V. (1990) y Holzer, T. y Davis, S. (1976) destacan principalmente seis factores de formación de grietas.

1) Litología. Cambio sustancial en las propiedades mecánicas del suelo en la constitución en los estados húmedo y seco, donde es expresada por hundimientos. Las irregularidades del subsuelo pueden favorecer rupturas del paquete arcilloso.

2) Estructura geológica. La grieta puede ser favorecida por un contacto litológico subterráneo que ante el hundimiento diferencial del material arcilloso provoque una ruptura.

3) Fallas geológicas o fracturas de origen profundo. Se caracteriza por la formación de escarpes.

4) Cambio de temperatura. Las grietas generadas por este factor constituyen en gran medida a grandes problemáticas en el terreno, esto es, cuando las partículas arcillosas o de material volcánico de poca compactación dos principales esfuerzos: 1) expansión, las partículas experimentan esfuerzos de expansión, al adquirir temperaturas altas y 2) contracción, posteriormente decae esta temperatura donde dichas partículas se ejerce esfuerzos compresionales (Suarez-Díaz, inédito) (Figura 4.10).

5) Variaciones de humedad. La adquisición de humedad está relacionada directamente con el clima, donde se presentan principalmente precipitaciones (verano e invierno). Al momento de que el suelo adquiere humedad, se desencadenan una serie de esfuerzos en todas direcciones, posteriormente el suelo entra en un proceso de desecación causado por la evaporación o remoción de agua a través de las raíces (Figura 4.10).

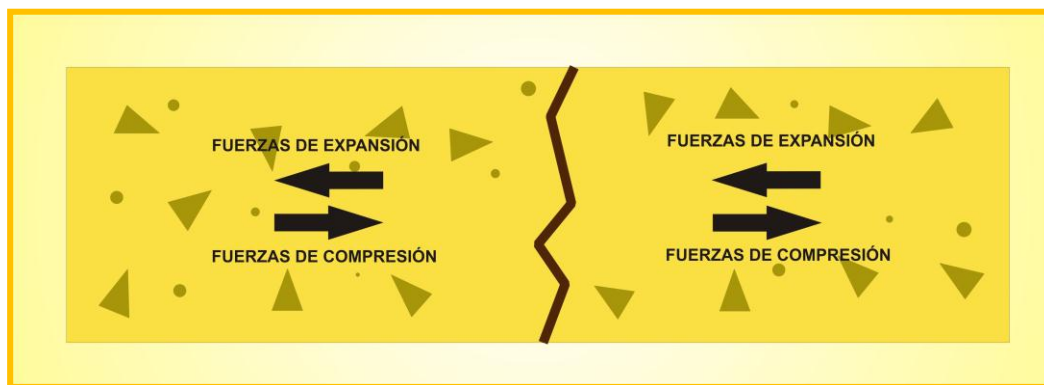


Figura 4.10 Esquema representativo de los esfuerzos provocados en el suelo, debido al aumento de temperatura o bien a las variaciones de humedad.

Fuente: Suarez-Díaz, J., inédito. Modificado para este trabajo.

6) Factores biológicos. En las áreas donde existen grietas, las raíces de la vegetación pueden actuar como cuña en el suelo propiciando la apertura del suelo y por otro lado también influye en las variaciones de humedad del terreno.

Estos seis factores mencionados juegan un papel muy importante en la formación de grietas, donde los procesos de formación se representan en dos etapas:

- 1) Consiste en fisuras delgadas de 1 a 2 mm en las arcillas (Juárez, B., 1984). Estas fisuras pueden crecer gradualmente y captar los escurrimientos superficiales.
- 2) Se produce con la presencia de las lluvias extraordinarias, que provocan la presencia repentina de grietas anchas y la saturación del subsuelo, aquí la presión da lugar a la ruptura de la capa arcillosa en un plano vertical, la masa de tierra se colapsa y buena parte de ésta es removida por el flujo de agua (DGCOH, 1992., tomado de Estrada-Mendoza, 2009).

En las dos etapas mencionadas se presenta la sufosión, donde es un proceso que contribuye el desarrollo de grietas, su mecanismo se describe en el agua que circula verticalmente a través de una grieta con velocidad considerable hacia la capa subyacente altamente porosa, en este flujo el agua continúa transportando material fino.

4.6 Explotación del agua subterránea y la relación con el Agrietamiento

Generalmente a lo largo de la historia de los asentamientos humanos, ha generado que la demanda de agua se haya incrementado, lo que esto ocasiona que en la zona de lomas se infiltre dos veces menos agua de la que se extrae (Hernández-Cruz, 2007) y que en la porción plana los sedimentos arcillosos pierdan agua y se compacten, ocasionando hundimientos y agrietamientos del suelo que varían según a la intensidad de la extracción de agua y de las condiciones del suelo.

Para este caso, al disminuir la presión de poro se propicia la compactación creando esfuerzos de tensión, tanto horizontal como vertical, (figura 4.10) formando conos de abatimiento piezométrico donde las grietas generadas pocas veces son mayores de 200 m de longitud y del orden de 5 m de profundidad, donde los bordes de las grietas se erosionan rápidamente y se azolvan en pocos meses (Rodríguez-Murillo *et. al.*, 1995, *in* Estrada-Mendoza, 2009).

Sin embargo, hay que considerar la asociación de la irregularidad de las variaciones que se establecen en el terreno: 1) La irregularidad del basamento fracturado que subyace a las secuencias sedimentarias y materiales volcánicos, determina en gran medida la ubicación del fracturamiento que se propaga desde profundidad hacia las secuencias sedimentarias someras, retomando planos de debilidad preexistentes, 2) la existencia de una falla que puede actuar como canal preferencial o como barra de flujo formando gradientes piezométricos importantes (Estrada-Mendoza, 2009).

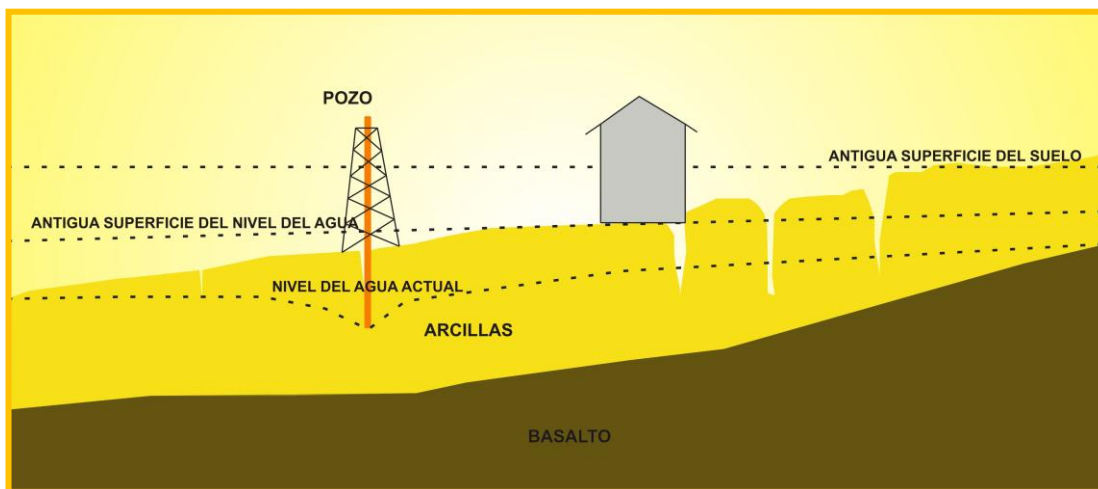


Figura 4.10 Mecanismo que se ejerce en el subsuelo debido a la extracción de agua, mediante el bombeo profundo. Fuente: Estrada-Mendoza, 2009.

5. Análisis Cualitativo

La zona de estudio está integrada por un sistema volcánico lineal y una planicie lacustre bien definida, donde el presente análisis se llevo a cabo en las zonas medias y altas de la sierra.

Para la elaboración de los mapas fue necesario la manipulación de los SIG mediante la obtención de datos vectoriales que son representados mediante puntos, líneas y áreas, donde cada uno de los objetos geográficos están identificados por la escala: 1:50,000, resolución: 1m, dimensiones: 2D, proyección cartográfica: Universal Transversal de Mercator (UTM) y Sistema Geodésico de Referencia: Nad27, 1980.

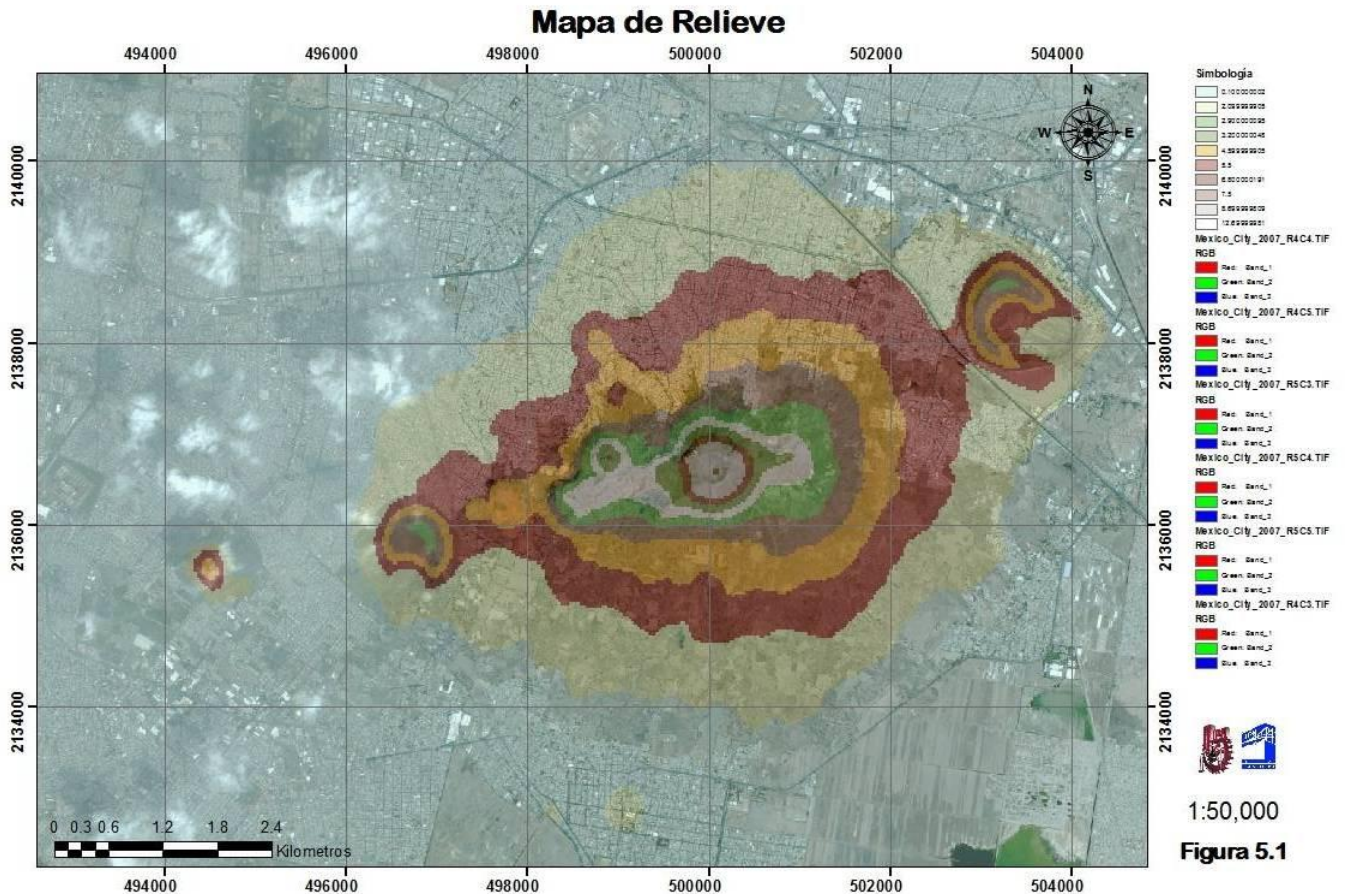
5.1 Análisis de la SSC por la presencia de PRM

5.1.1 Controles geomorfológicos

La topografía controla las laderas existentes a nivel regional y local, por otro también provee de un factor detonante de los PRM muy importante, la gravedad, mientras más inclinada sea una ladera será mayor el peligro de presentarse un fenómeno de esta índole. El relieve de la sierra resulta de la acumulación volcánica y de la combinación de altiplanicies intercaladas por valles y barrancos, productos de la erosión de precipitaciones, que generan escurrimientos superficiales y erosión antrópica. En general todos los montículos y volcanes que constituyen a la sierra están en su mayoría compuestos por depósitos de escoria y derrames de lava (figura 5.1). En general las variaciones de pendiente condicionan los eventos de los PRM donde estas características inciden en el volumen y velocidad del material (Popescu, 2002).

Los PRM están asociados específicamente a las zonas altas, tal es el caso que en la zona de estudio se documentó dicho fenómeno donde el relieve se eleva de los 2376 hasta los 2714 msnm. Sin embargo puede presentarse en zonas más bajas, donde pueden ser originados por la relación que guarda la altura,

humedad, actividad antrópica y la resistencia de la roca. Por otro lado se determinó que el agrietamiento se genera en las zonas de transición, donde en el mapa es representado por las áreas de colores verdes más tenues a azules, donde las alturas oscilan entre los 2220 a los 2350 msnm (figura 5.2).



Para obtener el modelo sombreado se usa como plataforma el modelo altimétrico y es el resultado del grado de iluminación de los píxeles de acuerdo a dos posiciones relativas, una con respecto a la orientación y otra respecto al ángulo de elevación solar. Fue utilizado para la observación de rasgos naturales del terreno, en este caso se observan con mas detalles los posibles lineamientos, morfología, y delimita la dirección y depositación de los materiales volcánicos de la sierra y zona lacustre (figura 5.3).

Mapa de Altimétrico

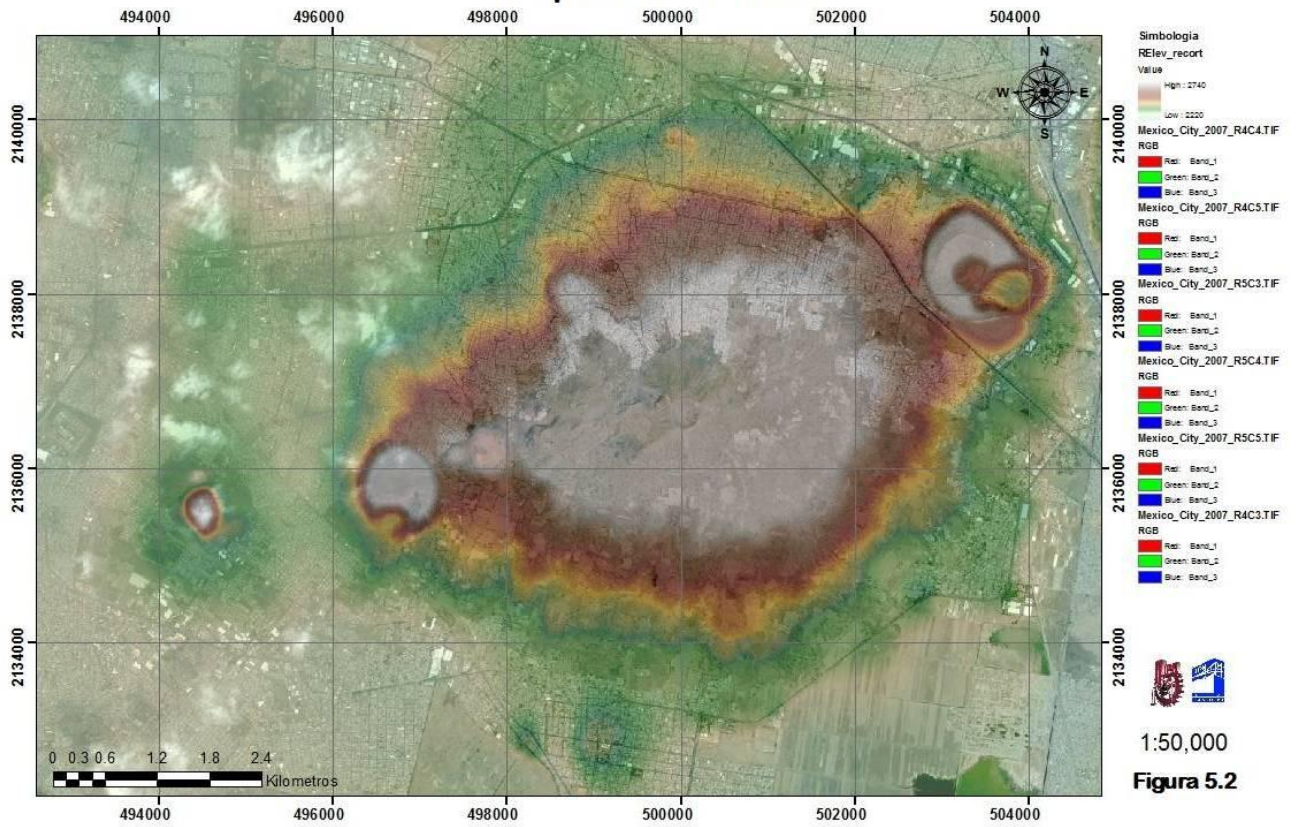


Figura 5.2

Modelo Sombreado

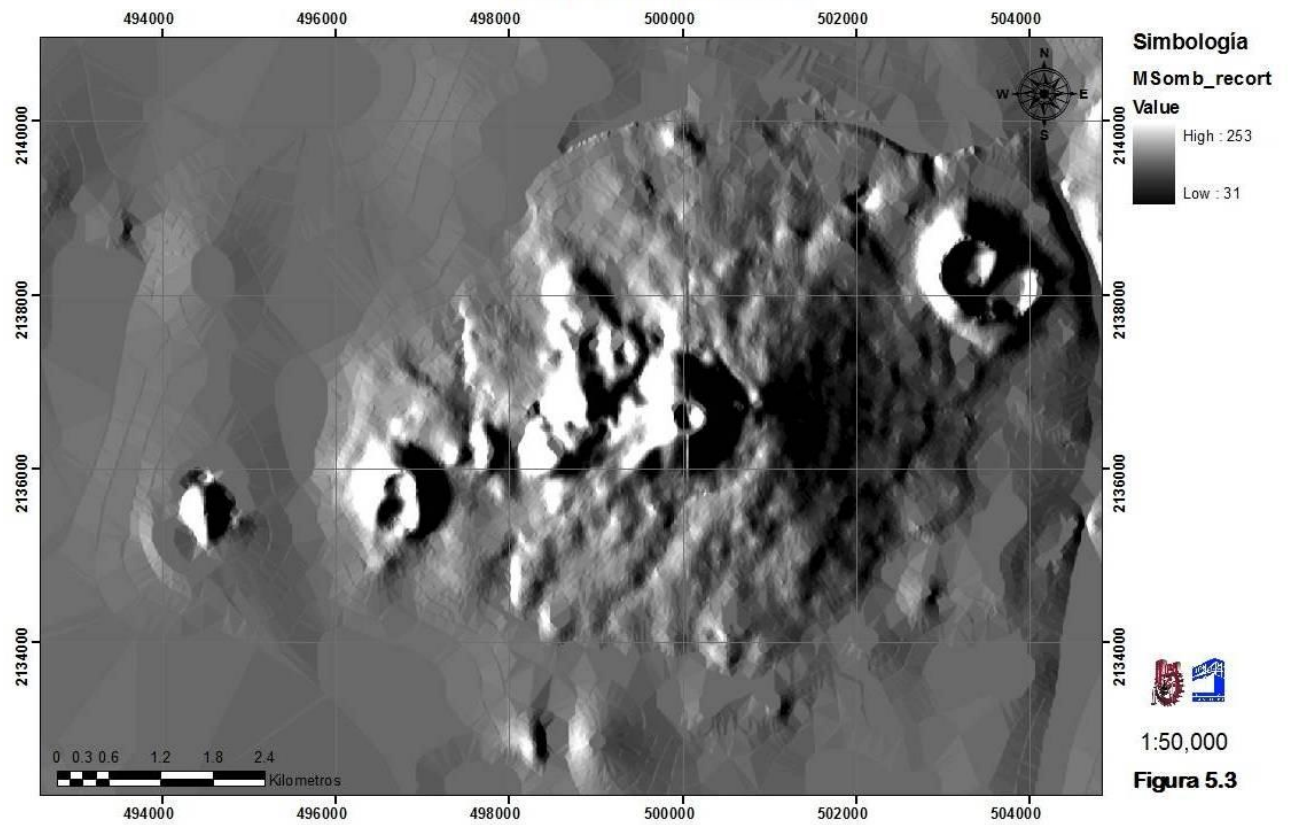
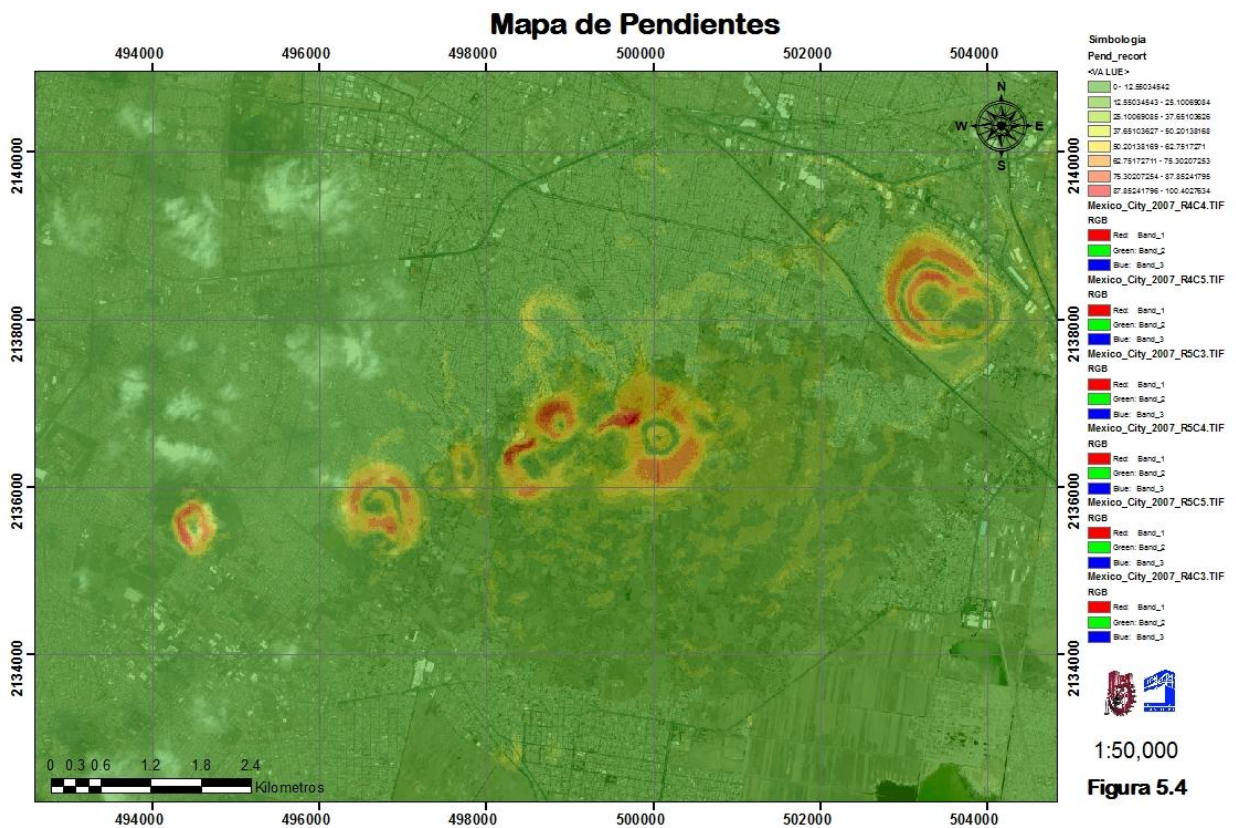


Figura 5.3

Las pendientes delimitan zonas donde pueden ser círculos potencialmente altos para presentar un PRM. En la figura 5.4 delimita zonas en las que existen laderas naturales y artificiales en general conforme aumentan los valores de pendiente, tiende a aumentar la inestabilidad de la roca o depósito de material volcánico provocando un PRM tal es el caso de volteos, caídos, tal es el caso para las zonas rojas que tienen un intervalo de valores de pendientes de 46.69° a pendientes negativas, por otro lado en donde existen pendientes intermedias se asocian a rodamientos y deslizamientos, estas áreas son representadas en base a los colores anaranjados donde el intervalo de pendientes varia de 33.73° a 46.69° , los flujos se presentan en pendientes menores en donde el intervalo de los valores oscilan entre los 15.25° los 23.16° en el cual está representado en el siguiente mapa por los colores verdes opacos. Por última instancia cabe mencionar en este mapa que en las zonas de color verde más intenso tiene un rango de pendiente de 0 a 9.52° es delimitada como suelo lacustre.



En el mapa de Orientación de Laderas (figura 5.5) es derivado de la plataforma del modelo altimétrico, es denominado como un Modelo Digital de Terreno, se

denomina así porque es parte de un conjunto de mapas que representan distintas características de la superficie terrestre, tal es el caso también del mapa altimétrico y el mapa de pendientes. Este mapa hace la referencia de la exposición de la dirección donde mira la cuesta o la dirección de la pendiente.

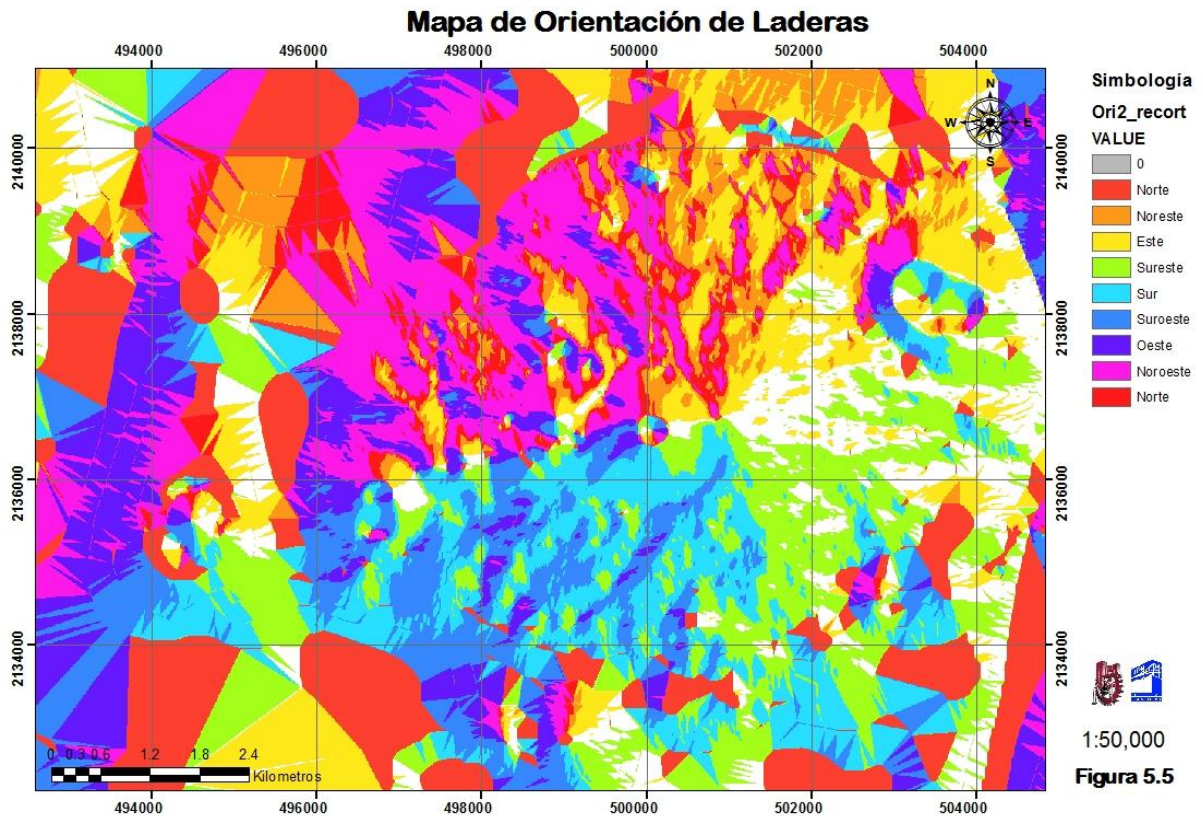
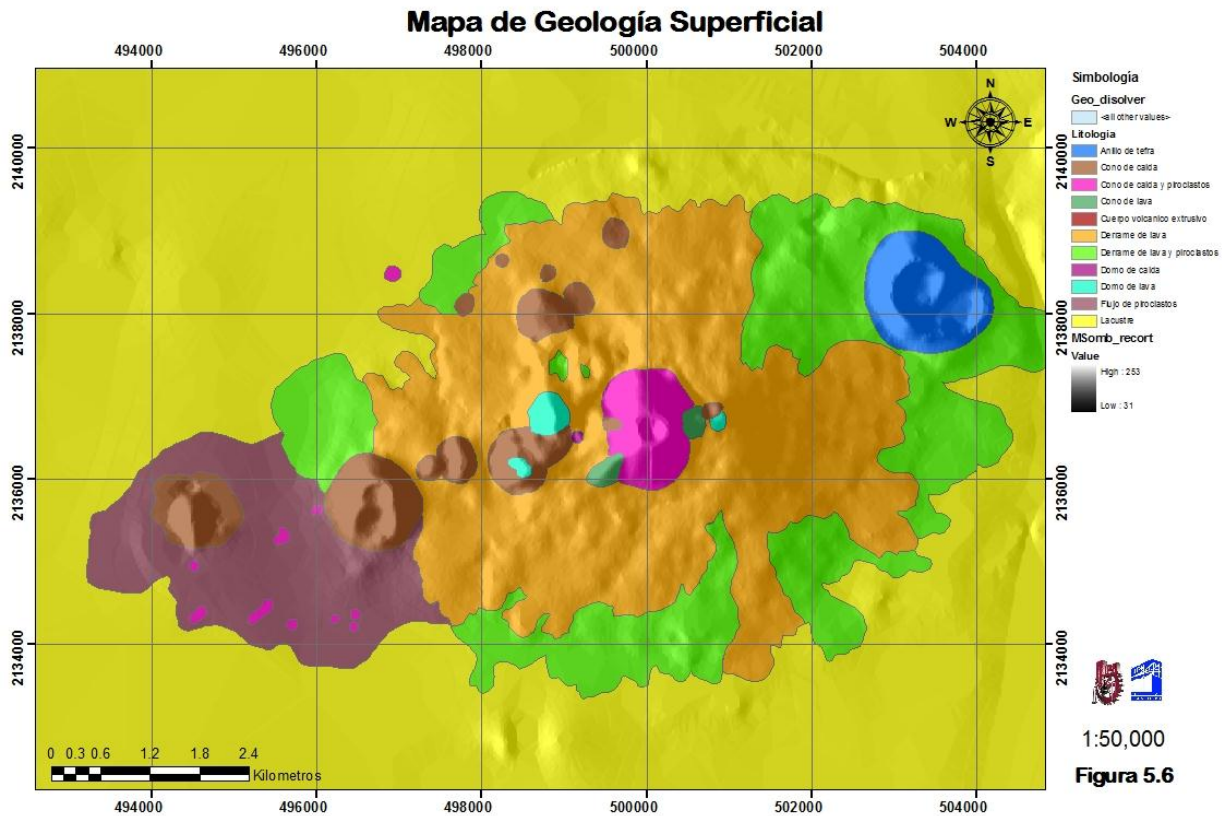


Figura 5.5

5.1.2 Controles Geológicos

La geología influye como uno de los factores que propician los PRM, entre los que se encuentran: el tipo de depósito, densidad, plasticidad, humedad, permeabilidad, litología, estructura y meteorización. Para evaluar los controles geológicos de la SSC se dividen en cuatro principales unidades de roca: 1) bloques (derrame de lava), 2) Escoria, 3) depósito de ceniza y 4) compuestos, en los cuales cada uno tiene un mecanismo diferente para desencadenar un PRM (figura 5.6). En general, las zonas donde existen bloques de roca serán más propensas a presentarse caídas de roca, vuelcos, desplomes, deslizamiento de bloques. Las regiones donde predomina la escoria y la ceniza tendrán en su mayoría deslizamientos, desplomes, avalanchas, flujos, soliflucción y coladas donde estos depósitos son susceptibles a ser removidos principalmente por el

agua que son se infiltra produciendo una saturación rápida y facilitando el escurrimiento del agua (Hauser, 1997). Por otro lado en las zonas donde se intercala la geología existirán deslizamientos, avalanchas, caídos, flujos, extensiones laterales, reptación, coladas, entre otros, esto aplica a materiales semisuelos donde la granulometría y cohesión adquiere relevancia a la resistencia del depósito (figura 5.7).



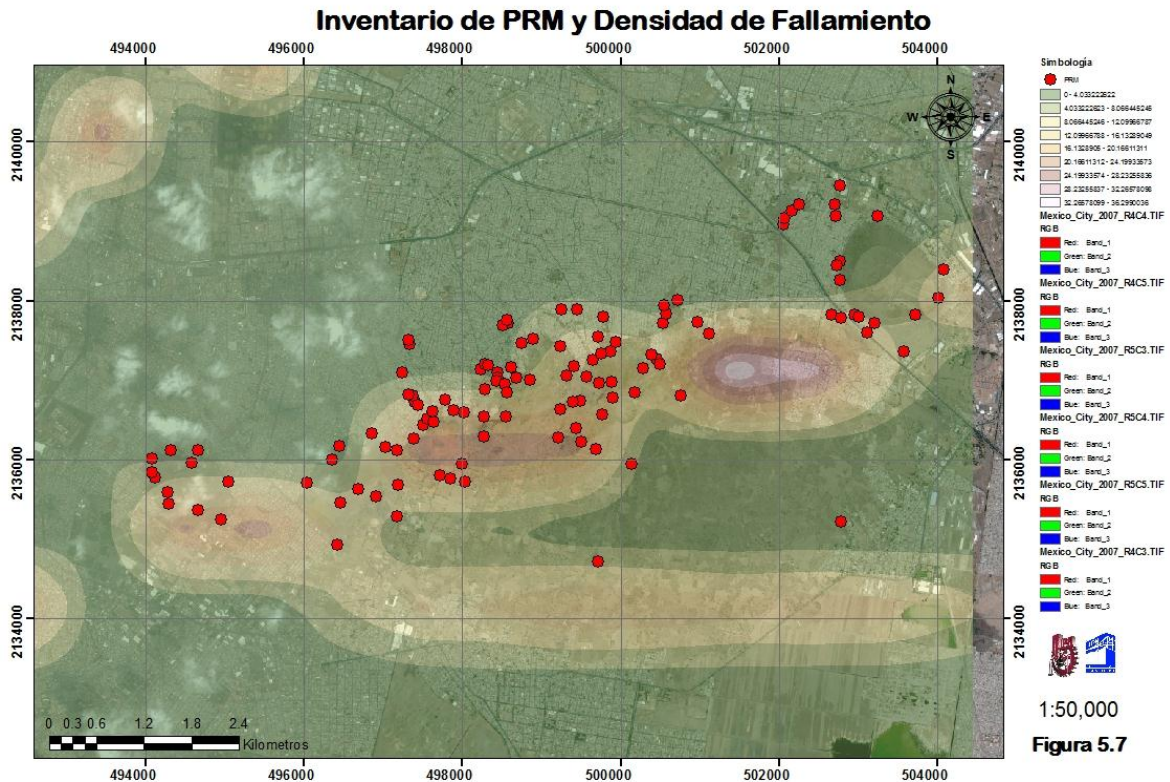
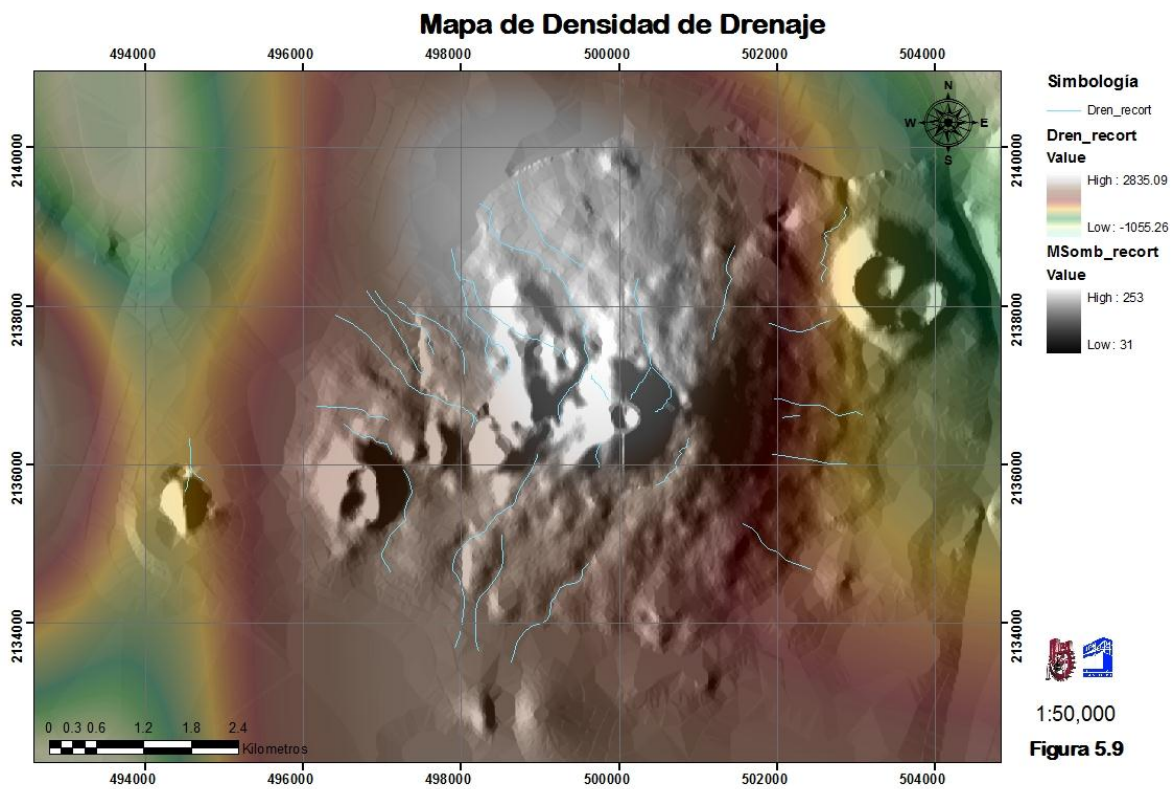
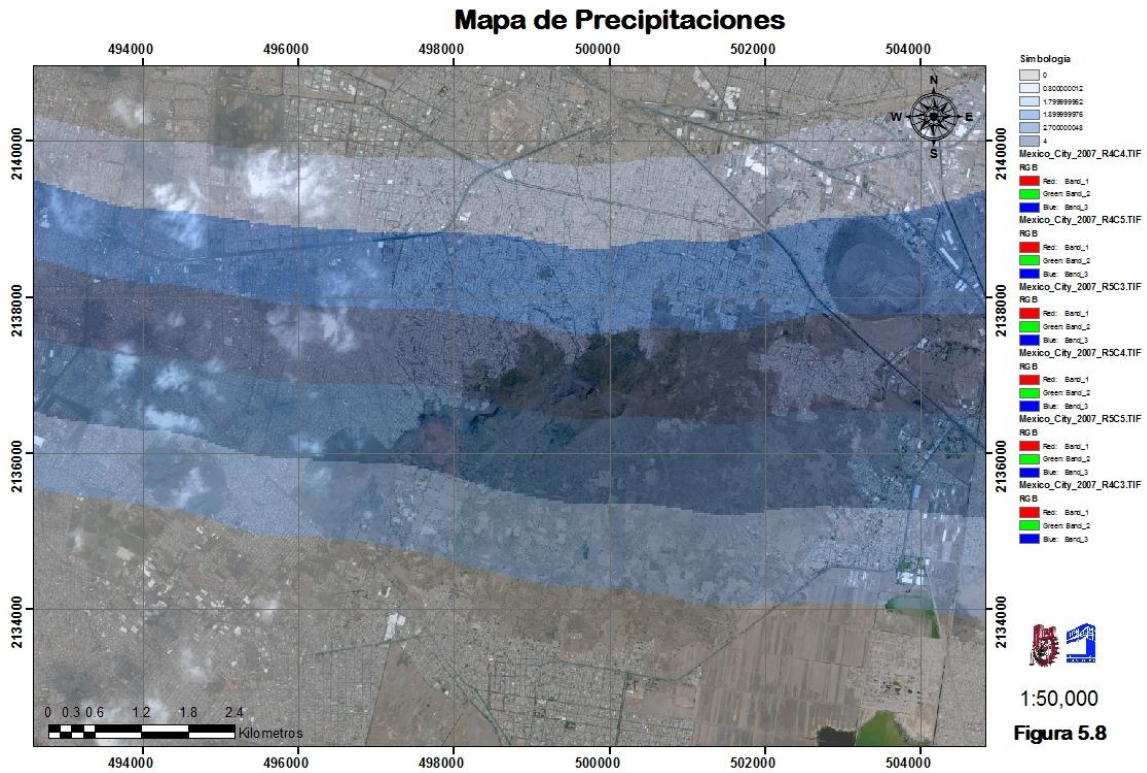


Figura 5.7

5.1.3 Controles Climáticos

Otro de los factores que se considera de importancia para este análisis son las precipitaciones, donde en el ciclo hidrológico existen cuatro componentes fundamentales: 1) Infiltración, 2) Evaporación, 3) Escorrentía y 4) Encharcamiento. Para el presente estudio el elemento considerado más importante es la infiltración, la cual a través de esta se crean condiciones de presiones altas en las rocas. Es más probable que se presente algún PRM en los eventos de precipitaciones extraordinarias. En la zona de estudio la intensidad de la lluvia se ha incrementado considerablemente en los últimos años, esto debido también a eventos atmosféricos, donde los valores más altos de precipitación máxima registrados en 24 horas durante el periodo de 1998-2005 fueron de 50 mm (Vera-Pérez y López Blanco, 2009) (figura 5.8). Estas precipitaciones por su parte, llegan a inundar la zona y también moldean el paisaje contribuyendo a la formación de drenaje superficial donde según la litología y topografía se hace mayor la concentración de éste. El drenaje

superficial es relativamente joven, donde principalmente se considera como drenaje de escurrimiento controlando la erosión de los depósitos volcánicos,



cabe mencionar que dicho drenaje es de primer grado debido a dos razones: primero a la edad relativamente joven y segundo por la influencia antrópica de la zona donde no ha tenido un desarrollo completo (figura 5.9).

5.1.4 Controles Sísmicos

Otro de los aspectos para evaluar es la sismicidad, donde principalmente se utilizaron datos de actividad por medio de las estaciones sísmicas. En base al procesamiento de dicha información se elaboro un mapa donde se determinan las profundidades y movimientos del terreno, dicho de otra manera se delimita la ubicación de las posibles y de las fallas activas documentadas de la región. Keefer (1984) ha realizado estudios a partir de sismos ocurridos principalmente en Los Ángeles, U.S.A., estableciendo que los tipos de remociones más abundantes generados por terremotos corresponderían a caídas de rocas, deslizamientos de suelos con pendientes de laderas $>15^\circ$ y deslizamientos de roca con pendientes de laderas $\geq 40^\circ$, y secundariamente derrumbes en suelo, deslizamientos en bloques de suelo y avalanchas de tierra (tabla 5.1 y 5.2).

Tipo de PRM	Velocidad	Profundidad
Caídas de roca	Extremadamente rápido (>3 m/s)	Superficies (>3 m.)
Deslizamiento de roca	Extremadamente rápido a rápido (> 3 m/s a 1.5 m/d)	Superficies (>3 m.)
Avalanchas de roca	Extremadamente rápido (> 3 m/s)	Superficies (>3 m.)
Caídas de suelo	Extremadamente rápido (> 3 m/s)	Superficies (>3 m.)
Suelo perturbado	Rápido a moderado (0.3 m/min. a 1.5 m/mes)	Superficies (>3 m.)
Avalanchas de suelo	Extremadamente rápido a muy rápido (>3 m/s a 0.3 m/min.)	Superficies (>3 m.)
Subsidencia de roca	Rápido a lento (0.3 m/min. a 1.5 m/año)	Profundos (>3 m.)
Deslizamiento de bloques	Rápido a lento	Profundos

	(0.3 m/min. a 1.5 m/año)	(>3 m.)
Subsidencia de suelo	Rápido a lento (0.3 m/min. a 1.5 m/año)	Profundos (>3 m.)
Deslizamiento de suelo en bloques	Rápido a lento (0.3 m/min. a 1.5 m/año)	Profundos (>3 m.)
Flujos de tierra	Moderado a lento (1.5 m/día a 0.6 m/año)	Generalmente superficiales, ocasionalmente profundos
Extensiones laterales de suelo	Muy rápido (0.3 m/min. a 3 m/s)	Variable
Flujos de suelo	Extremadamente rápido a muy rápido (>3 m/s a 0.3 m/min.)	Superficies (>3 m.)

Tabla 5.1 Clasificación de PRM basada en la generación por sismos.

Fuente: Modificado de Keefer, 1984.

Magnitudes mín. aproximadas (M_L) según Keefer (1984)	Magnitudes mín. aproximadas (M_L) según Rodríguez (1999)	Tipo de PRM
4.0	5.5	Caídos, deslizamientos de roca.
4.5	5.5	Subsidencias de suelo, deslizamiento de suelo en bloques.
5.0	6.5	Subsidencias de roca, deslizamientos de roca en bloque, flujos lentos de tierra, extensiones laterales, flujos rápidos de suelo.
6.0	6.5	Avalanchas de roca.
6.5	6.0	Avalanchas de suelo.

Tabla 5.2 Tipos de PRM generados por sismos. Fuente: Rodríguez *et. al.*, 1999, modificado de Keefer, 1984 y modificado para este trabajo.

Los rasgos superficiales obtenidos se asocian a fallas y lineamientos geológicos y algunos de los aspectos observados en relación al fallamiento superficial son los siguientes (González-V. *et. al.*, 2002):

- Los movimientos de fallas pueden inducir roturas superficiales, con menor probabilidad, si el espesor rocoso por encima del sustrato es superior de 15 metros.
- La dislocación que se produce en una falla oculta (falla no visible al estar cubierta por sedimentos) puede producir fallamiento superficial en el terreno.
- Para un sismo de Magnitud ≥ 6 y de poca profundidad (10 a 30 km), es prácticamente segura la dislocación tectónica en superficie.
- A partir de 30 m de espesor de roca sobre el sustrato las posibilidades de que se den roturas en superficie son bajas, dada a su capacidad para absorber energía, y la deformación.
- El ancho de la zona de rotura superficial suele ser del orden de varios metros o varias decenas de metros, es decir, constituye un estrecho corredor, aunque la longitud de fractura tectónica puede extenderse a cientos de metros.

El presente mapa (figura 5.10) resulta del bosquejo bibliográfico disponible, observaciones de campo de fallas y lineamientos y la interpretación de rasgos del relieve y estructuras geológicas reconocibles del modelo sombreado generando datos vectoriales.

Mediante los datos vectoriales del fallamiento y su interpolación, se procesó el presente mapa donde expresa las regiones donde se han presentado con sismos y su profundidad.

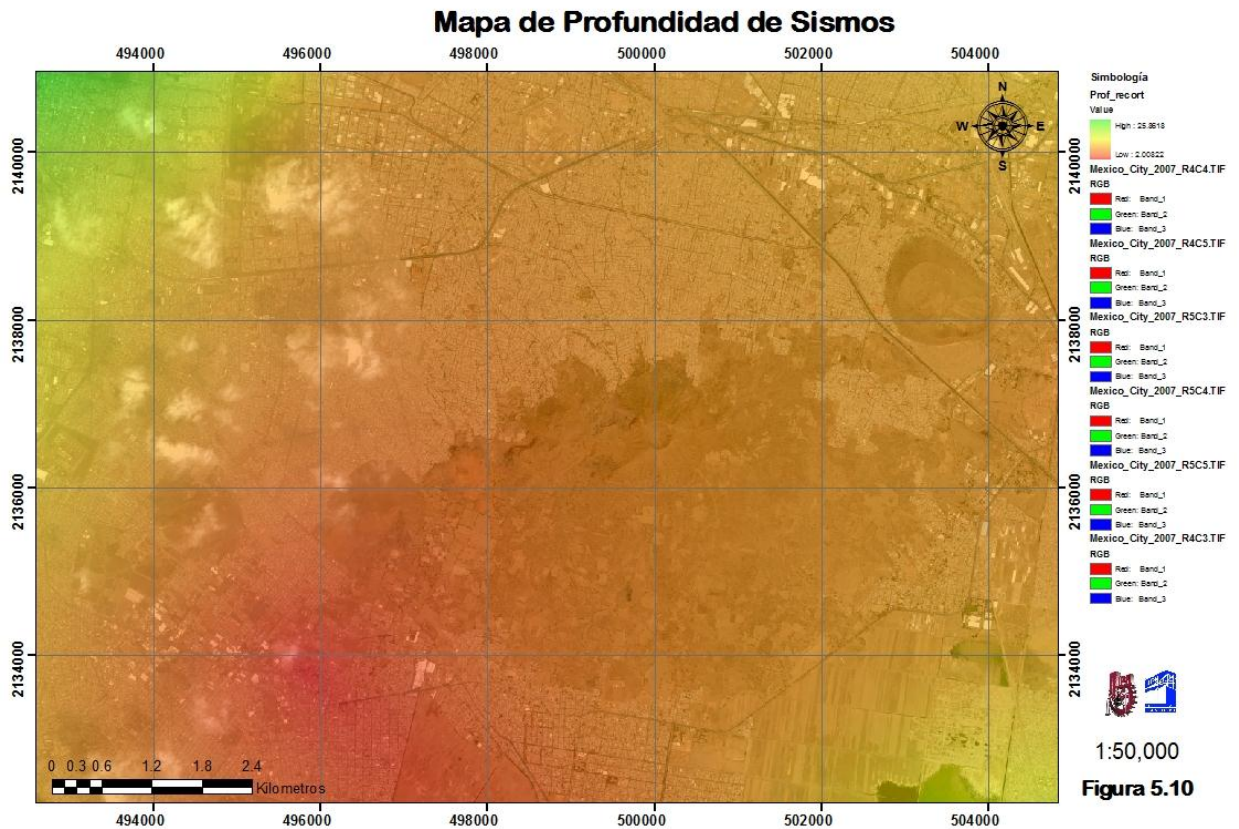


Figura 5.10

En base a los datos vectoriales anteriores, se tomo como partida realizar una ponderación en Gis entre los mapas Geológico +Pendientes +Profundidad de Sismos+ Precipitaciones + Orientación de Laderas + Densidad de Lineamientos + Relieve + Uso de Suelo. De esto expresa las posibles zonas donde predomina el peligro debido a la presencia de PRM (figura 5.11 y tabla 5.3).

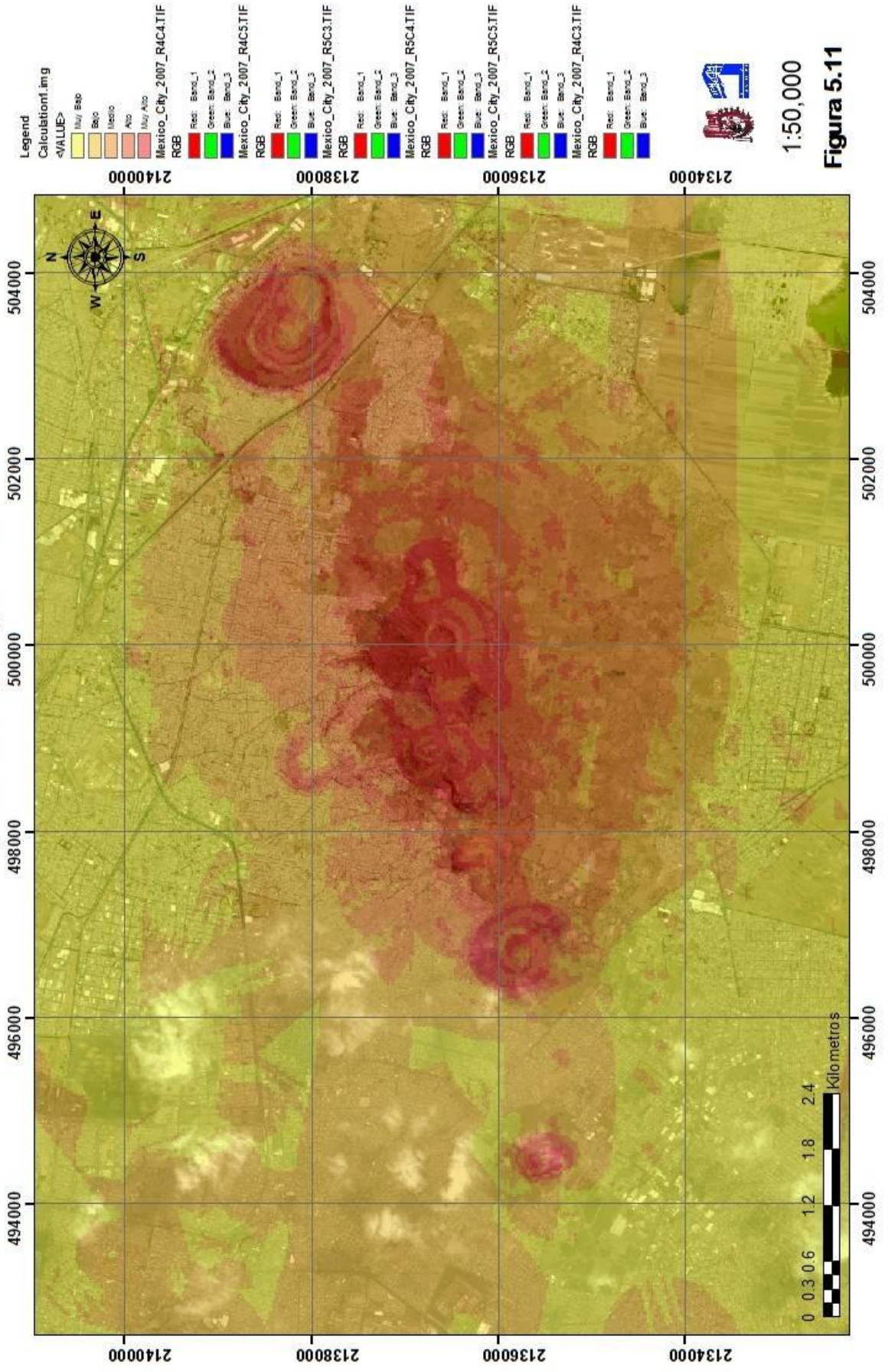
FACTOR	RANGOS	AREA DEL RANGO (km2)	% DEL DOMINIO	No. DE PRM	% DE PRM	RESULTANTE
GEOLOGICO	Anillo de tefra	1.73	3.0	10	8.3	2.7
	Cono de caída	3.41	6.0	22	18.2	3.0
	Cono de caída y piroclastos	1.45	2.5	11	9.1	3.6
	Cono de lava	0.21	0.4	1	0.8	2.3
	Cuerpo volcánico extrusivo	6.16	10.8	0	0.0	0.0
	Derrame de lava	20.72	36.2	56	46.3	1.3
	Derrame de lava y piroclastos	12.48	21.8	10	8.3	0.4
	Domo de caída	0.02	0.0	0	0.0	0.0
	Domo de lava	3.41	6.0	1	0.8	0.1
	Flujo de piroclastos	6.16	10.8	7	5.8	0.5
	Lacustre	1.45	2.5	3	2.5	1.0

		161.95		121	100.0	
PENDIENTES	NA	1.44	0.9	0	0	0
	12.55	144.70	89.3	43	35.5	0.4
	25.10	9.53	5.9	29	24.0	4.1
	37.65	2.39	1.5	13	10.7	7.3
	50.20	1.45	0.9	16	13.2	14.8
	62.75	1.36	0.8	13	10.7	12.8
	75.30	0.92	0.6	4	3.3	5.8
	87.85	0.15	0.1	3	2.5	26.5
	90.00	0.01	0.0	0	0	0
		161.95		121	100.0	
PROFUNDIDAD DE SISMOS	6.78	130.20	80.4	121	100	1.2
	11.55	19.80	0	0	0	0
	16.32	6.93	0	0	0	0
	21.09	3.78	0	0	0	0
	25.86	1.24		0	0	0
		161.95		121	100	
PRECIPITACIONES	609.72	54.95	33.9	0	0	0
	620.19	14.01	8.7	8	6.6	0.8
	630.66	14.73	9.1	21	17.4	1.9
	641.13	14.52	9.0	43	35.5	4.0
	651.61	14.59	9.0	29	24.0	2.7
	662.08	14.70	9.1	20	16.5	1.8
	672.55	14.72	9.1	0	0	0
	683.02	12.40	7.7	0	0	0
	693.49	5.61	3.5	0	0	0
	703.96	1.72	24.1	0	0	0
		161.95		121	100.0	
ORIENTACION DE LADERAS	ND	1.88	1.2	0	0	0
	Plano	27.18	16.8	6	5.0	0.3
	Norte	11.47	7.1	8	6.6	0.9
	Noreste	17.86	11.0	16	13.2	1.2
	Este	13.28	8.2	3	2.5	0.3
	Sureste	17.76	11.0	5	4.1	0.4
	Sur	14.74	9.1	11	9.1	1.0
	Suroeste	17.69	10.9	8	6.6	0.6
	Oeste	14.04	8.7	14	11.6	1.3
	Noroeste	19.71	12.2	40	33.1	2.7
	Norte	6.33	3.9	10	8.3	2.1
		161.95		121	100.0	
DENSIDAD DE LINEAMIENTOS	ND	6.45	4.0	0	0	0
	4.54	109.10	67.4	30	24.8	0.4
	9.07	20.37	12.6	33	27.3	2.2

		13.61	16.23	10.0	31	25.6	2.6
		18.15	6.01	3.7	20	16.5	4.5
		22.69	2.70	1.7	7	5.8	3.5
		27.22	0.60	0.4	0	0	0
		31.76	0.41	0.3	0	0	0
		36.30	0.08	0.1	0	0	0
		161.95			121	100.0	
RELIEVE			1.90	1.2	0	0	0
			125.03	77.2	14	11.6	0.1
			15.51	9.6	24	19.8	2.1
			8.80	5.4	36	29.8	5.5
			4.94	3.1	17	14.0	4.6
			2.50	1.5	14	11.6	7.5
			1.40	0.9	3	2.5	2.9
			0.95	0.6	9	7.4	12.7
			0.42	0.3	1	0.8	3.2
			0.20	0.1	1	0.8	6.8
			0.31	0.2	2	1.7	8.7
		161.95			121	100.0	
USO DE SUELO	Agricultura de Temporal		35.45	21.9	64	52.9	2.4
	Área Urbana		123.95	76.5	57	47.1	0.6
	Pastizal Inducido		0.83	0.5	0	0.0	0
	Agricultura de Riego Eventual		1.72	1.1	0	0	0
		161.95			121	100	

Tabla 5.3 Valores de los factores y resultantes de peligros. Fuente: Saro-Lee y Touch-Sambath, 2006.

Mapa de Peligro por PRM



1:50,000

Figura 5.11

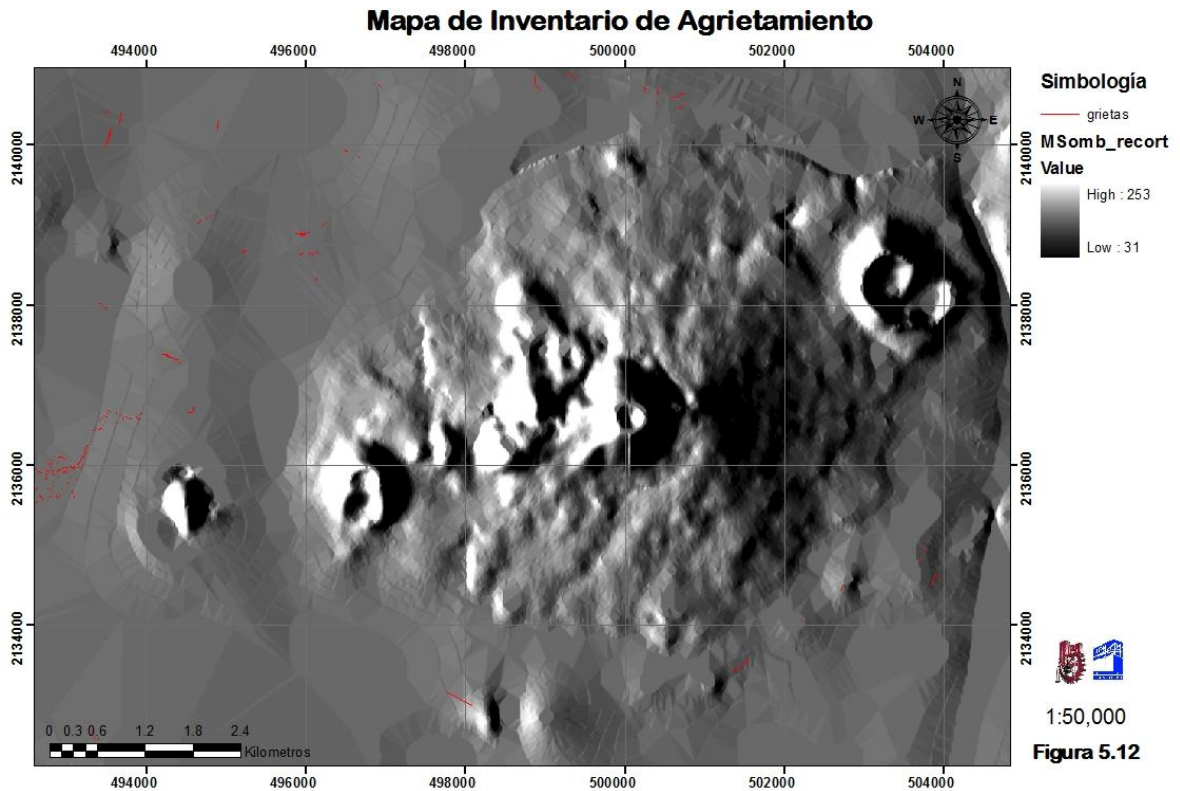
5.2 Análisis de la SSC por la presencia de Agrietamiento

El fenómeno se presenta principalmente en las regiones de transición y lacustre que rodea a la sierra debido al proceso de consolidación de los suelos blandos de constitución volcánico arenoso-limoso y limo-arcilloso.

5.2.1 Grietas Hidrodinámicas

Las grietas presentes en la zona son de tipo hidrodinámico y por esfuerzos debidos a estructuras civiles. Donde los mecanismos que detonan las grietas hidrodinámicas son entre otras:

- Fracturas ocasionadas por tensión debidas a esfuerzos horizontales de filtración en acuíferos confinados (Figuroa-Vega, 1984).
- Fracturas ocasionadas por tensión generada por la contracción horizontal que se presenta en la zona afectada por abatimientos piezométricos (Figuroa-Vega, 1987). Al extraer agua subterránea por medio de un pozo tiende a formarse un cono de abatimiento, en los bordes de dicho cono se presentan cambios bruscos de gradientes hidráulicos y en estas zonas tienden a formarse grietas.
- Fracturas ocasionadas por la geometría irregular en los basamentos rocosos (Figuroa-Vega, 1987). Si el basamento rocoso que subyace a un acuífero presenta geometría irregular y se producen abatimientos del nivel piezométrico, se inducen esfuerzos cortantes verticales que pueden ocasionar grietas.
- Fracturas ocasionadas por el colapso de un estrato pumítico de muy baja resistencia (Figuroa-Vega, 1989). En las áreas donde se tienen estratos de arenas-gravas pumíticas y si se someten a esfuerzos de tensión, tienden a formarse grietas debido a la baja resistencia de estos materiales, como ejemplo las grietas paralelas a las curvas de nivel en la zona de piedemonte.



5.2.2 El fenómeno de Agrietamiento

Este fenómeno se interpreta como el resultado del bombeo de agua del subsuelo, lo que provoca la compresión de los materiales arcillosos. Los hundimientos están directamente relacionados con los espesores de arcilla que subyacen en la región, es decir entre más potente son los espesores de arcilla más pronunciado son los hundimientos.

El análisis realizado en los pozos ubicados muestra un descenso en los niveles estáticos comprendido entre 1985 a 1995, lo cual nos da un promedio de 60 centímetros por año. El resultado es la formación de grietas y desplazamientos ladera abajo y escalones a manera de escarpes de falla normal.

5.2.3 Mecanismo de Agrietamiento

La consolidación de material arcilloso provoca hundimientos diferenciales, en los que influye la estructura geológica del subsuelo, como derrames de lava,

escarpes de falla y otros. En la zona son comunes las grietas en las superficies de contacto entre la planicie lacustre y elevaciones volcánicas.

El piedemonte es afectado por un movimiento lento ladera abajo, por asentamiento del material volcánico no consolidado que se apoya en lavas. Esto desarrolla la formación de grietas de tensión que constituyen un sistema periférico a los volcanes dispuestos a distintas altitudes y con desplazamiento hacia abajo de uno de los bordes (figura 5.12).



Figura 5.12 Agrietamiento asociado a un PRM, ubicado al piedemonte.

El mapa de Peligro por Agrietamiento expresa un cinturón de peligro en las zonas potencialmente agrietadas donde se tomo como partida la densidad de agrietamiento y a la Zonificación Geotécnica y manipulando un Buffer de 50- 75- 87- 92-100 metros (figura 5.13).

Mapa de Peligro por Agrietamiento

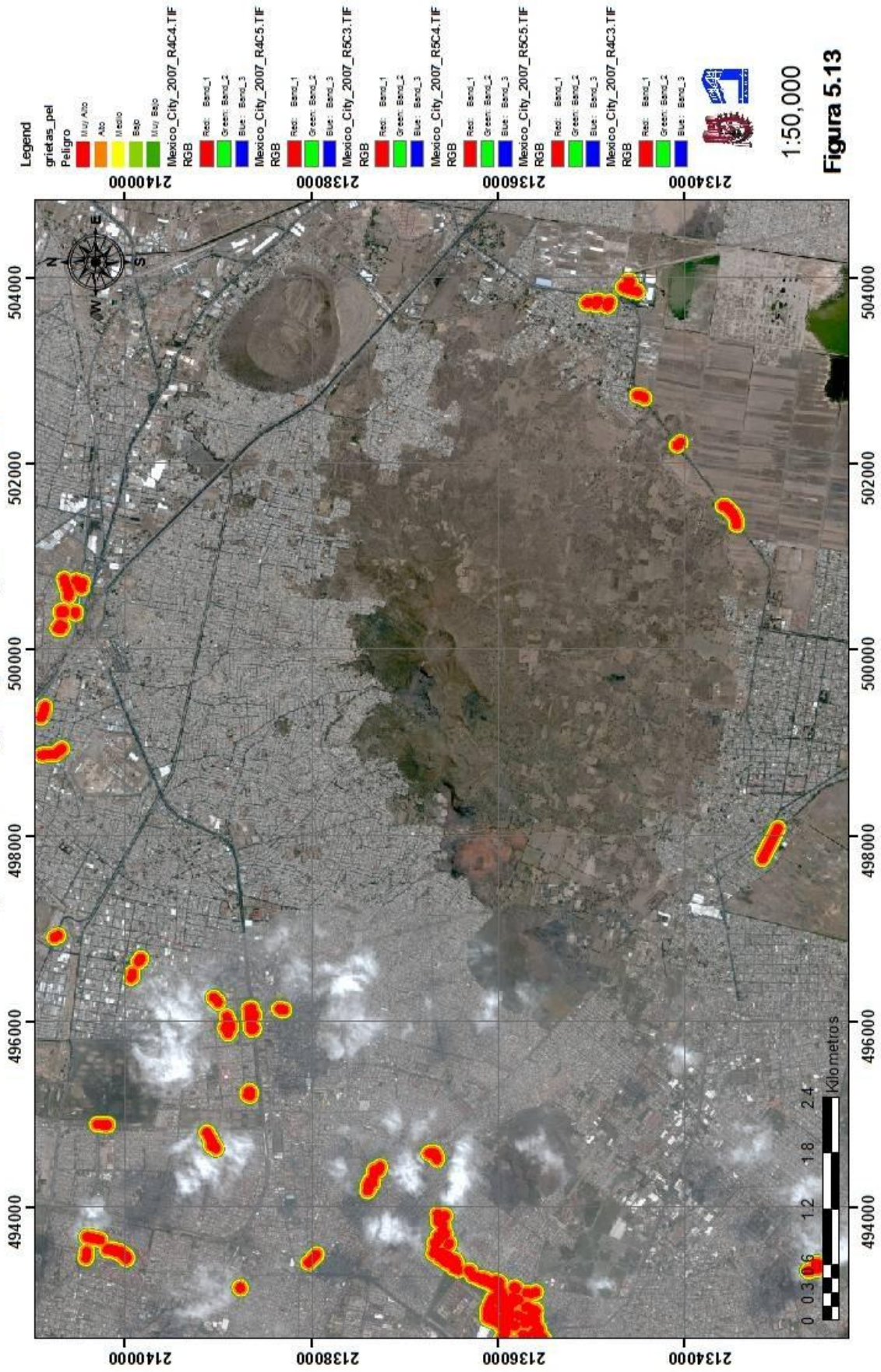


Figura 5.13

6. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Al oriente del Distrito Federal en las demarcaciones de las Delegaciones Tláhuac e Iztapalapa y en los límites del Municipio Los Reyes Acaquilpan en el Estado de México, se encuentra un conjunto de conos monogenéticos basáltico-andesítico del Pleistoceno tardío y Holoceno compuestos principalmente de escoria y depósitos piroclásticos, que interrumpen el piso de lacustre que están alineados de occidente a oriente tal es el caso de los conos: Yuhualixqui, Xaltepec, Tetecón, Mazatepec, Tecuatzin, Guadalupe, y la Caldera.
- El relieve de la SSC se clasifica en tres principales procesos:
 - 1) **Endógeno**, es clasificado como volcánico acumulativo, el origen del material que lo constituye es explosivo (conos de tefra, piroclásticos) y efusivo (domo de lava, derrame de lava).
 - 2) **Exógeno**, corresponde a aquellos procesos que intervienen en la morfología del relieve: 1) erosivo, donde se encuentran principalmente en las partes de las barrancas incipientes, grietas, fracturas, contactos litológicos y circos de erosión y 2) acumulativo, se encuentra en el piedemonte y planicie lacustre y consisten en el depósito de materiales fluviales y volcánicos.
 - 3) **Exógeno erosivo antrópico**, corresponden a aquellas actividades humanas que tienen un impacto en la, generalmente negativa en la sierra.
- El carácter tectónico-volcánico de la sierra, está en base a la disposición de sismos regionales y locales y están en función al origen de la CM, ya que los diferentes períodos de actividad volcánica ocurridos desde el terciario han originado que, las márgenes de la cuenca se interdigiten rocas sedimentarias con rocas ígneas, teniendo las primeras con una granulometría variable y las segundas encontrándose con fracturamiento (Mondragón Guzmán, R. *et. al.*, 2009).

- La sierra está afectada principalmente por tres sistemas de elevación tectónica, dos sistemas son de tipo pronunciado y el tercer sistema es poco pronunciado siendo una sierra volcánica poco compacta.
- Debido a que la mancha urbana se ha expandido de manera considerable, se han suscitado accidentes que involucran a los PRM y el Agrietamiento afectando a la infraestructura y a la población de la región, donde finalmente estos fenómenos se han acentuado cada vez más.
- Los PRM representan un potencial riesgo en la región:
 - 1) **Geológico-estructural**, la geología de la sierra está basada en las intercalaciones de basalto y escoria, donde aquí se presentan diversos grados de inestabilidad de los taludes. Los sistemas de fallas y fracturas afectan a las rocas donde generan son zonas de debilidad estructural y delimitando bloques. El fracturamiento asociado y los planos de enfriamiento, controlan los procesos de inestabilidad de las rocas, donde se tiene como frecuencia los volteos, caídos y deslizamientos.
 - 2) **Geomorfológico**, los factores que modifican la geomorfología del relieve tienen influencia en la geoformas actuales, tales como los circos de erosión que definen laderas de captación de bloques y flujos de roca.
 - 3) **Factor antropogénico**, principalmente da como resultado a los cortes de las laderas, lo que propicia la inestabilidad en los taludes. En diversas zonas de la sierra, se encontró la existencia de diversos tiraderos de basura a cielo abierto, lo que esto provoca que estos escombros puedan originar un flujo de detritos.
- El agrietamiento superficial que se presenta en el pie de monte de la sierra, es considerado su mecanismo como deformación diferencial, ya que los materiales del suelo presentan una distribución heterogénea de propiedades hidráulicas y mecanismo de los materiales, presentándose:
 - 1) **Grietas generadas por evaporación-deseccación**, en zonas planas arcillosas.
 - 2) **Grietas de tensión**, localizadas en las zonas de transición y pie de monte; donde éstas se generan debido a la fuerza de filtración ocasionada en el bombeo de agua o a la tensión de fuerzas horizontales de filtración en acuíferos confinados.

- Debido a la complejidad de la región, es de considerar que al presentarse un peligro geológico cualesquiera de este trabajo o de seguir de manera desconsiderada las actividades antropogénicas, podría interrelacionarse con otro o varios peligros, esto es:
 - 1) Los PRM están fuertemente influenciados por la existencia de fallas y fracturamiento en laderas, donde generan material deleznable, y si la zona afectada también presenta filtraciones de agua natural o residual, favorece la inestabilidad del macizo y el desplazamiento súbito vertical de material.
 - 2) e la presencia de grietas en el suelo y al suscitarse un movimiento en las fallas activas locales o al presentarse un sismo, y si el agrietamiento es alimentado por filtraciones de agua natural o residual, el agrietamiento existente en la zona se acentuaría.
 - 3) Las fallas y fracturas en las zonas montañosas, favorecen la recarga de los mantos acuíferos. Si la mancha urbana crece hacia esas regiones, puede provocar la disminución en la recarga de agua, lo que agudizará la sobreexplotación de agua y eventualmente agravará el problema del agrietamiento en la zona (García Palomo *et. al.*, 2006).
 - 4) Se registraron 212 PRM y 839 grietas en la zona estudiada.
- Los elementos fundamentales citados en este presente trabajo, requirieron de un análisis detallado de los diferentes peligros, en este sentido este estudio es considerado como punta de lanza que podría ser utilizado para proponer estudios o bien trabajos destinados a evaluar los programas de desarrollo urbano y las condiciones de construcción.

Recomendaciones

Para los peligros descritos en este presente trabajo, se observó la problemática que afecta a la zona de estudio, de esto se llegó a una serie de recomendaciones de las cuales se tiene:

- Restringir las construcciones en las taludes de ámbito civil, ya sea en las áreas agrícolas y en las áreas protegidas.
 - No verter agua y dar mantenimiento a la fugas de agua, principalmente de las viviendas que se encuentran en la corona de los taludes, esto para evitar las filtraciones de agua y generar en el talud desgaste de la roca o de los rellenos de fracturas, ocasionando empujes hidrostáticos e inestabilidad del macizo.
 - Para las áreas destinadas a construir viviendas, se recomienda hacer cortes en terraza en el talud, esto para proporcionar mayor estabilidad el macizo rocoso.
 - Realizar estudios especializados en ingeniería civil, geotecnia y procedimientos constructivos donde se evalué cada caso y los posibles tratamientos para estabilizar (Víctor- Carlos, 2004).
- 1) Modificación de geometría, consiste en la eliminación de una masa inestable, obteniendo un nuevo perfil del talud (figura 6.1).
 - 2) Drenaje, son en general, las más efectivas, ya que el agua es el principal agente que desencadenan los procesos de inestabilidad en los taludes, aquí se determina la corrección del drenaje superficial o profundo.
 - 3) Anclajes, son elementos formados por barras o cables de acero alojados en el interior del terreno y perforados desde la superficie, estos se emplean generalmente en los taludes fracturados (figura 6.2)

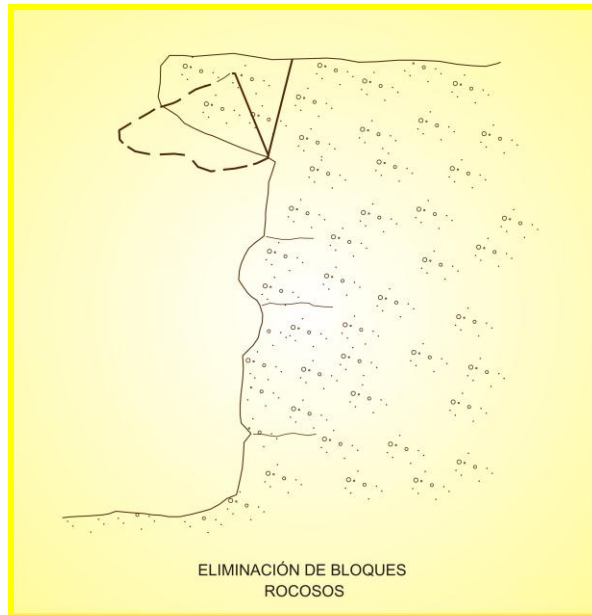


Figura 6.4 Eliminación de bloques rocosos para la estabilización de laderas.

Fuente: Víctor- Carlos, 2004.

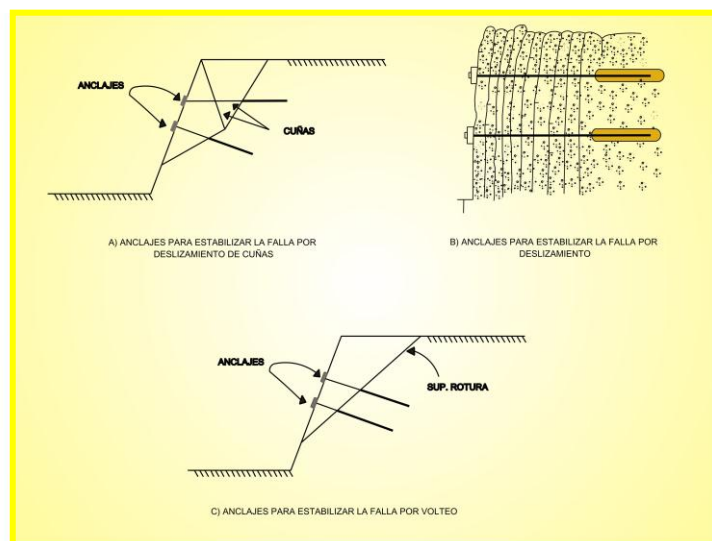


Figura 6.2 Diferentes tipos de anclajes de roca para la estabilización de laderas.

Fuente: Víctor- Carlos, 2004.

- 4) Construcción de muros de contención, los muros se construyen al pie del talud como elementos resistentes y son efectivos a inestabilidades superficiales (figura 6.3).



Figura 6.3 Muros para la estabilización de laderas.

Fuente: Víctor- Carlos, 2004.

- 5) Medidas de protección superficial, estas medidas se llevan a cabo en la superficie de los taludes de manera controlada y son entre ellas: eliminación de bloques, fijación de bloques, atado de bloques, sistema mixto de cables y malla, concreto lanzado, trincheras o zanjas
- Realizar estudios profundos mediante métodos eléctricos, que proporcionen más detalle del subsuelo y aporten datos de interés donde se delimiten nuevas zonas de agrietamiento, aún no identificados.
 - Establecer un sistema permanente de monitoreo de PRM y Agrietamiento conformado por las autoridades delegacionales y municipales en conjunto evaluando las diferentes situaciones de riesgo y tomar las medidas necesarias para mitigar el riesgo.
 - Limitar o restringir el paso de vehículos pesados en las áreas construidos en las zonas de taludes abruptos o en zona de agrietamiento.
 - Proponer diversos señalamientos peatonales, automovilísticos, recreativos, civiles, entre otros, que indiquen las zonas de peligros latentes por PRM y agrietamiento en la zona de estudio.
 - Realizar una evaluación en los interiores de las viviendas para detectar el grado de afectaciones en ambos casos para los PRM y el

agrietamiento, donde paralelamente se proponga la reubicación de la población afectada.

- Para ambos casos, proponer un plan de mitigación de riesgo, involucrando a las autoridades y científicos correspondientes.
- Aplicar técnicas para estudiar la sismicidad local asociada a fallas tectónicamente activas, relacionando la magnitud de los sismos y el área de la rotura, o bien, en la magnitud y el periodo de recurrencia de sismos, los cuales están relacionados con la velocidad media con la que se mueven las fallas. Las fallas que tienen una alta tasa de desplazamiento, por ejemplo del orden de 10mm por año, acumulan gran cantidad de energía en tiempos pequeños. Esto da lugar a terremotos de magnitud alta (6 o 7) con períodos de recurrencia relativamente cortos, del orden de 200 años. Por el contrario, las fallas lentas, con velocidades de 0,1 a 0,01 mm por año, producen sismos de las mismas magnitudes en períodos de tiempo mucho mayores, del orden de los 45,000 a 500,000 años.

REFERENCIAS

- Alanís, Samaniego, S. A., Á. F., 2005., **El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana , dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico.**, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana., 57(1)., Pg. 63-80.
- Alberro, A.J. y Hernández R., 1991., **Evaporación y Agrietamiento.**, Universidad Nacional Autónoma de México., Instituto de Ingeniería., Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos., Pg. 13-19.
- Alcántara, Ayala, I., 2000; **Índice de susceptibilidad a movimientos del terreno y su aplicación en una región semiárida**; Revista Mexicana de Ciencias Geológicas; Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; Vol. 17; Núm. 1; Pg. 66-75.
- Alcántara, Ayala I., 2000., **¿Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología.**, Universidad Autónoma de México., Investigaciones geográficas., Boletín del Instituto de Geografía., Núm. 41.
- Arellano, A.R.V., 1953., **Estratigrafía de la Cuenca de México.**, Universidad Nacional Autónoma de México., Congreso Científico Mexicano, México D.F., 1951. Memorias., Vol. 3., Pg. 172-186.
- Auvinet, G. y Arias A., 1990., **Propagación de grietas. En agrietamiento de suelos.**, SMMS., Pg. 21-31.
- Ayala, F.J., Andreu, F.J., Fe, M., Ferrer, M., de Simón, A., Fernández, I., Olalla, C., Gómez, J. Sanpedro, J. y Cienfuegos, F.J., 1987., **Manual de Taludes.**, Serie Geotecnia., IGME.. Madrid., Pg. 456.
- Azuara, Bobadilla, C., 2002., **Asentamientos Humanos Irregulares en la Sierra de Santa Catarina, Delegación Iztapalapa.**, Tesis Universidad Nacional Autónoma de México., Facultad de Ciencias Políticas y Sociales., México., Pg. 115.
- Belausteguigoitia, J. C., Guadarrama Luis, et. al., 1999., **Instrumentos económicos en la política ambiental.**, en Beristain Javier (coord.), Los retos de la Ciudad de México en el umbral del siglo XX, M. A., Porrúa, ITAM, Parmec., México., Pg. 149-184.
- Bloomfield, K., 1975., **A late-Quaternary monogenetic volcano field in central México.**, Geol. Rundschau., 64., Pg. 476-497.
- Borja, Baeza R.C. y Alcántara, Ayala R.C., 2004., **Procesos de remoción en masa asociados en Zacapoaxtla, Puebla.**, Universidad Autónoma de México., Boletín del Instituto de Geografía., ISSN 0188-4611., Núm. 53., Pg. 7-26.
- Bryan, Kirk., 1948., **Los suelos complejos y fósiles de la altiplanicie de México, en relación a los cambios climáticos.**, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana., Vol. 13., Pg. 1-20.
- Brunsdén, D., 1979., **Mass Movement.**, in Embleton , C. y Thornes, J.B., eds., Process in Geomorphology: New York, John Wiley & Sons., Pg. 130-186.

- Cantagrel, J. M. y Robin, C., 1979., **K-Ar dating on Eastern Mexican volcanic rocks—Relations between the andesitic and the alkaline Provinces**: Journal of Volcanological and Geothermal Research., Vol., 5., Pg. 99-114.
- Castañeda, Leonides F., 2011., **Análisis de peligros por procesos de remoción en masa en estructuras volcánicas. Peñón de los Baños y Peñón del Marqués, Distrito Federal.**, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Ticomán., Ciencias de la Tierra., Tesis.
- Carlos, Valerio, V., 2004., **Zonificación de peligros por inestabilidad de taludes en la Sierra de Guadalupe y propuesta geotécnica de mitigación.**, Universidad Autónoma de México., Facultad de Ingeniería. Tesis.
- Carmichael, I., Lange, R., Luhr, J., 1996., **Quaternary minettes and associated volcanic rocks of Mascota, western México: a consequence of plate extension above a subduction modified mantle wedge**: Contributions to Mineralogy and Petrology., 24., Pg. 302-333.
- Carreón, Freyre, D. C., 2006., **Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal.**, Ingeniería Geológica.
- Carrillo, N., 1947., **Influence of artesian Wells in the sinking of México City.**, Secretaría de Hacienda y Crédito Público En volumen Nabor Carrillo, Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica., Anuario 47., publicado en 1969., Pg. 7-14.
- Corominas, J. y Alonso, E., 1984., **Inestabilidad de laderas en el Pirineo Catalán. Tipología y causas.**, Jornadas sobre Inestabilidad de Laderas en el Pirineo., Universidad Politécnica de Barcelona: C-1-C.53.
- Corominas, J., 1989., **Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera.**, En: J. Corominas (Ed.). Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales. Monografía., núm. 3., Sociedad Española de Geomorfología., Zaragoza., Pg. 1-30.
- Corominas, J. y García Yagüe, A. 1997., **Terminología de los movimientos de ladera.**, IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables., Granada. Vol. 3: 1051-1072.
- Coromidas, J., 2007., **Tipos de rotura en laderas y taludes**; Apuntes Docentes, Ingeniería Geológica en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cruden, D. M. y Varnes D.J., 1996., **Landslide types and processes.**, In A. K. Turner y R.L. Schuster (Editores): Landslides. Investigation and mitigation., Transportation Research Board Special Report 247., National Academy Press., Washington D.C., Pg. 36-75.
- (MC) Cueva de México., 2009., wikipedia.mht.
- Damon, E.P., Shafiqullah F.K., 1981., **Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis.**, Revista del Instituto de Geología., Universidad Nacional Autónoma de México., Pg. 5, 2, 223-238.
- De Cerna, Zoltan, *et al.*, 1988., **Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México.**, Boletín 104., Universidad Autónoma de México., Instituto de Geología.

- Demant, A., 1978; **Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación**; Revista Instituto de Geología; 2., Pg. 172-187.
- Diario Oficial de la Federación., 2000., **Programa Parcial de Desarrollo Urbano Cerro de la Estrella**.
- Dikau, R.; Brunsten, D.; Schrott, L. y Ibsen, M-L. (Eds)., 1996., **Landslide recognition: identification, movement and causes.**, John Wiley and Sons., Pg. 251.
- Estrada, Mendoza M., 2009., **Mapa de inventarios y análisis de la vulnerabilidad y riesgo por agrietamiento de suelos, Lomas de San Lorenzo, Iztapalapa.**, Instituto Politécnico Nacional., Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura., Tesis.
- Ferrari, L., Rosas Elguera, J., Orozco Esquivel M. Carrasco Núñez G., Norato Cortéz T., 2005., **Digital geologic cartography of the Trans-Mexican Volcanic Belt and adjoining areas: Digital Geosciences.**, Universidad Autónoma de México.,, Mapa 1., Pg.2 texto.
- Ferrari, L., López Martínez, M., González Cervantes, N., Jacobo Albarran J., Hernández Bernal, M., 2003., **Volcanic record and age of formation of the México city basin.**, en Reunión Anual 2003., Resúmenes: GEOS., 23(2)., 120.
- Ferrer, M., 1988., **Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas.**, En: Riesgos Geológicos., Serie Geología Ambiental., IGME., Madrid., Pg. 175-192.
- Figuroa, Vega, G., 1987., **Structural stability problems of Wells and aquifers workshop on Leaky Aquifers Mechanics.**, Geophysics Institute, National University of Mexico., unpublished.
- Figuroa, Vega, G., 1984., **Mecanismos de producción de grietas inducidos por la explotación del agua subterránea.**, Alternativas Tecnológicas 29., Academia Mexicana de Ingeniería., Pg. 373-378.
- Figuroa, Vega, G., 1989., **Recomendaciones para el manejo del problema de grietas por explotación de agua subterránea.**, Alternativas Tecnológicas 29., Academia Mexicana de Ingeniería., Pg. 373-378.
- Figuroa, Vega, G., 1990., **Grietas por sobreexplotación y hundimientos durante los sismos. El suelo de la Cuenca del valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo.**, SMMS., México.
- Fries, Carl Jr., 1960., **Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México.**, Universidad Nacional Autónoma de México., Intitulo de Geología., Vol. 60., Pg. 236.
- Fries, Carl Jr., 1962., **Hoja Pachuca 14Q-e (11). Con resumen de la geología de la hoja Pachuca, Estado de Hidalgo, México.**, Universidad Nacional Autónoma de México., Intitulo de Geología., Carta Geológica de México., serie de 1:100,000., Mapa con texto.
- García, Palomo, A., Víctor Carlos V., López Miguel C., Galván García A. H., 2006., **Los peligros.**, Ingeniería Civil., Órgano del Colegio de Ingenieros Civiles de México., Núm. 443.

- García, Palomo, A., Macías, J., Garduño, V., 2000., **Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, Central México**: Tectonophysics., 318., Pg. 281-302.
- García, Yagüe, A., 1996., **Contribución para la clasificación de los movimientos del terreno.**, Revista de Obras Públicas., Madrid., Pg. 995-1003.
- García, Yagüe, A. y García Álvarez, J., 1988., **Clasificación tipológica de los movimientos de ladera.**, Comunicaciones II Simposio sobre Taludes y Laderas Inestables., Andorra la Vella., Pg. 53-64.
- Gobierno del Distrito Federal., 2000., Gaceta Oficial del Distrito Federal: **Decreto por el que se aprueba el Programa Parcial de Desarrollo Urbano Sierra de Santa Catarina del Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación Iztapalapa.**, Décima Época., 7 de Julio del 2000, Núm. 122., Pg. 216.
- Gómez, Tuena A., Orosco Esquivel Ma., Ferrari, L., 2005., **Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana.**, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana., Tomo LVII., Núm. 3., Pg. 227-283.
- Gómez, Nava, J. A., 2007., **Condiciones hidrológicas al sur poniente de la Sierra de Santa Catarina.**, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra., Tesis, Licenciatura.
- González, V. L. *et. al.*, 2002., **Ingeniería Geológica.**, Editorial PEARSON EDUCACIÓN. Madrid. Pg. 744.
- Hauser, A., 1997., Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: Un análisis crítico a cinco años del desastre., Boletín Núm. 49. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Hernández, Cruz, G . *et. al.*; 2006; **Análisis de riesgos por hundimiento y agrietamiento en el noroeste de la Delegación Tláhuac**; Servicio Geológico Metropolitano; Departamento de Geología Regional, Instituto de Geología.
- Hernández, Cruz, G., 2007B., **Zonificación de riesgos por hundimiento y agrietamiento al noroeste de la Delegación Tláhuac, Distrito Federal.**, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía., Tesis.
- Hoek, E. y Bray, J.W., 1981., **Rock slope engineering.** Institution of Mining and Metallurgy., London., Pg. 358.
- Holzer, T.L y Davis, S.N., 1976., **Earth fissures associates with wáter-table declines.**, Geol. Soc. America, Abs. With Programs., Vol. 8., Núm. 6., Pg. 923-924.
- Hutchinson, J.N., 1988., **Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology.**, In Ch. Bonnard (Ed.): Landslides., Proceedings 5th International Conference on Landslides., Lausanne., Vol. 1., Pg. 3-35.
- Ibáñez, César., 1994., **Ocupación urbana en áreas de conservación ecológico: el caso de la Sierra de Santa Catarina, Ciudad de México.**, Universidad Nacional Autónoma de México., Facultad de Filosofía y Letras., Colegio de Geografía., México., Pg. 147. Tesis.

- INEGI 2001., **Estadísticas del Medio Ambiente del D.F. y Zona Metropolitana.**, INEGI y Secretaría del Medio Ambiente., México., Pg. 316.
- INEG 2001., **Anuario estadístico del Distrito Federal.**, México., Pg. 426.
- INEGI 2001., **Cuaderno Estadístico Delegacional Iztapalapa.**, Varios años: 1970, 1980, 1990, 2000 Edición 2001., INEGI., Gobierno del Distrito Federal., México., Pg. 140.
- Juarez, B. E. y Figueroa Vega G., 1984., **Stresses and displacements in an aquifer due to seepage forces (one dimensional case).**, Jour. Of Hydrology., Vol. 73., Pg. 259-288.
- Keefer, D. K., 1984., **Landslides caused by earthquakes.**, Geological Society of America Bulletin., Vol. 95., P. 406-421.
- Lambert, P.W., 1986., **Descripción preliminar de los estratos de tefra de Tlapacoya.**, in Lorenzo, J.L., y Mirambell, L., eds., Tlapacoya 35,000 años de historia del Lago de Chalco., México D.F., Secretaría de Educación Pública., Revista del Instituto Nacional de Antropología e Historia., Pg. 167-172.
- Lange, R., Carmichael, I., 1990., **Hydrous basaltic andesites associated with minette and related lavas in western México:** Journal of Petrology., 31., Pg. 1225-1259.
- Lugo, Hubp, J., 1990., **El relieve de la República Mexicana.**, Universidad Autónoma de México., Instituto de Geología., Revista., Vol. 9., Núm 1., Pg. 82-111.
- Lugo, Hubp, J., Mooser, Federico., Pérez Vega, A., Zamorano Orozco, J., 1994., **Geomorfología de la Sierra de Santa Catarina.**, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Universidad Autónoma de México., Instituto de Geología., Vol. 11., Núm. 1., Pg. 43-52.
- Lugo, Hubp J. y Salinas Montes Araceli., 1996., **Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales.**, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas., Universidad Nacional Autónoma de México., Instituto de Geología., Vol. 13., Núm. 2., Pg. 240-251.
- Lugo, Hubp J. *et al.*, 2005., **Procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: causa y efectos.**, Universidad Autónoma de México., Instituto de Geología., Revista Mexicana de Ciencias Geológicas., Vol. 22., Núm. 2., Pg. 121-228.
- Macau, Vilar, F., 1955., **El hundimiento de la Ciudad de Mejiço y su repercusión en los sistemas de cimentación.**, Revista de Obras Públicas., Núm. 2909.
- Magaña, García, Ma. del Pilar., 2003., **Geología de la Sierra de Santa Catarina.**, Universidad Nacional Autónoma de México., Facultad de Ingeniería.
- Marquez, A., Verma, S., Anguita, F., Oyarzum, R., Brandle, J., 1999., **Tectonics and volcanism of Sierra Chichinautzin: extentision at the front of the central transmexican volcanic belt:** Journal of Volcanology and Geothermal Research., 93., Pg. 125-150.
- Martín del Pozzo, A. L., 1981., **Monogenetic volcanism in Sierra Chichinautzin.**, México., Boletín Volcanologique., 45., Pg. 9-24.
- Martín Del Pozzo, A., 1982; **Monogenetic volcanism in Sierra Chichinautin., México:** Bulletin of Volcanology., 45., Pg. 9-24.

- Melgoza, P.G.A., 1978., **Descripción, evolución y origen de los agrietamientos. El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México.**, SMMS., México.
- Meriggi, Lorenzo., Macías José Luis., Tommasini Simone., Capra Lucia., Conticelli Sandro., 2008., **Heterogeneous magmas of the Quaternary Sierra Chichinautzin volcanic field (central México): the role of an amphibole-bearing mantle and magmatic evolution processes.**, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas., Vol. 25., Núm. 2., Pg. 197-216.
- Mondragón, Guzmán, R., Mauvois Guitteaud, A. R., Salazar Peña, L., Carlos Valerio, V., Castañeda Leonides, F., Mejía Cisneros N., Amancio Rojas, D., Hernández Hernández, J., 2009., **"Análisis de Fallas Tectónicamente Activas en la Cuenca de México"**., Instituto Politécnico Nacional., Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Ticomán., Ciencias de la Tierra.
- Mora, Álvarez, G., Caballero Miranda, C., Urrutia Fucugauchi, J., Uchiumi, S., 1991., **Southward migration of volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, basin of México? A preliminary K-Ar dating and palaeomagnetic study:** Geofísica Internacional., 30., Pg. 61-70.
- Mooser, F., 1972., **The Mexican Volcanic Belt—Structure and tectonics:** Geofísica Internacional., Vol. 12., Pg. 55-70.
- Mooser, F., 1975., **Historia Geológica de la Cuenca de México: Memorias de las obras de drenaje profundo del D.F.**, Tomo I., Pg. 9-38.
- Mosser, F., 1990., **Estratigrafía y Estructura del Valle de México, el subsuelo de la Cuenca de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo.**, SMMS, México.
- Mooser, F., Montiel. A., Zúñiga. A., 1992., **Nuevo Mapa Geológico del sur poniente del Valle de México.**, Instituto de Investigaciones eléctricas (CFE).
- Nakamura, K., 1977., **Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation principle and proposal.**, J. Volcanol., Geotherm., Res, (Holanda) 2., Pg. 1-16.
- Nemcok, A., Pasek, J. y Ryber, J., 1972., **Classification of landslides and other mass movements.**, Rock Mechanics: 4., Pg. 71-78.
- Nixon, G.T., Demant, A., Armstrong, R. L., y Harakal, J. E., 1987., **K-Ar and geologic data bearing on the age and evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt:** Geofísica Internacional, Vol. 26., Pg. 109-158.
- (NTCDYCC) Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcciones de Cimentaciones., 2008.
- Ordoñez, E., 1985., **Las rocas eruptivas del suroeste de la Cuenca de México.**, Universidad Nacional Autónoma de México., Instituto Geológico de México., Boletín 2., Pg. 46.
- Oropeza, O. O., Zamorano, O. J .J., Ortiz, P. M. A., 1998., **Peligros geomorfológicos en México: remoción en masa. En los desastres en México, una perspectiva multidisciplinaria.**, Garza y Rodríguez (coord)., Universidad Iberoamericana-UNAM., México., Capítulo VI., Pg. 149-184.

- Ortega, Guerrero B., 1992., **Paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y paleoecología del Cuaternario Tardío en el Lago de Chalco, Cuenca de México.**, Universidad Nacional Autónoma de México., Unidad de los Ciclos Profesional y de Posgrado., Colegio de Ciencias y Humanidades., Disertación doctoral., Pg. 167 (inédita).
- Orozco, J. M. y Figueroa, V.G., 1991., **Descripción cronológica del desarrollo de los conocimientos sobre el agrietamiento de terrenos.**, Agrietamiento de Suelos., Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos., Pg., 1-12.
- Osete, M. L., Ruiz, Martínez, V. C., Caballero, C., Galindo, C., Urrutía, Fucgauchi, J., Tarling, D. H., 2005., **Soutward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, México: paleomagnetic and radionetric evidence.**, Tectonophysics, 318., Pg. 201-215.
- Pérez, Vega, B., 1992., **Estudio morfológico de la Sierra de Santa Catarina D.F.**, Tesis, UNAM, Facultad de Filosofía y Letras., México., Pg. 74.
- Pérez, Gutiérrez R., 2007., **Análisis de la vulnerabilidad por los deslizamientos en masa, caso: Tlacuítlapa, Guerrero.**, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana., Vol. 59., Núm. 2., Pg. 171-181.
- Poland, J. y Davis, G. H., 1969., **Land subsidence due to withdrawal of fluids, reprinted from.**, Reviews in engineering geology II., The Geological Society of America Inc.
- Popescu, M.E., 2002., **Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options.**, Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides., Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore., Pg. 61-81.
- Ramírez, Ramírez, G., Rodríguez Oropeza, Tania E., 2002., **Asentamientos Humanos y sustentabilidad ambiental en la Sierra de Santa Catarina.**, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, División De Ciencias Sociales y Humanidades, México D.F. Tesis.
- Ramos, Leal, José A. y Hernández Moreno, Jorge I., 2008., **Las Cuencas hidrológicas desde el punto de vista regional.**, Aquaforum., Año 12., Núm. 48.
- RCDF., 2008., **Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.**, Secretaria de Protección Civil., México D. F.
- Riquelme de Rejón., D., 2003, **Fracturas del fraccionamientos Los Olivos, en la región cercana al volcán San Nicolás, Tláhuac.**, Instituto de Investigaciones Geográficas., Núm. 050., Pg.144-146.
- Rosas, Elguera, J., Ferrari, L., Garduño Monroy, V., Urrutia Fucgauchi, J., 1996., **Continental boundaries of the Jalisco Block in the Pliocene-Quaternary kinematics of western México: Geology.**, 24 Pg. 921-924.
- Sassa, K., 1989., **Geotechnical classification of landslides.**, Landslide News, 3., p. 21-24.
- Selby, M.J., 1993., **Hillslope materials and processes.**, 2ª Edition., Oxford University Press. Oxford., Pg. 451.
- (SGM) Servicio Geológico Metropolitano; 2005; **Atlas de Peligros Geológicos del Distrito Federal; Primer Avance, Peligro Sísmico y Procesos de Remoción en Masa.**

- Sharpe, C.F.S., 1938., **Landslides and related phenomena.**, New Jersey., Pageant Books Inc.
- Saro, Lee and Touch, Sambath., 2006., **Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models.**, *Environ Geolo* 50: 847-855., DOI 10.1007/s00254-006-0256-7.
- Siebe, C., Rodríguez Lara, V., Schaaf, P., Abrams, M., 2004., **Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of México City: implications for archaeology and future hazards:** *Bulletin of Volcanology.*, 66., Pg. 203.225.
- (SNET) Servicio Nacional de Estudio Territoriales., 2004., **Memoria técnica para el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de tierra en el Salvador.**, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- (SPC) Secretaría de Protección Civil del Distrito Federal., **Departamento de la J.U.D.** Archivos no publicados.
- Suarez, Días, J., **Materiales de tierra para pavimentos.**, *Trabajo inédito.*
- Tapia, Varela G. y López Blanco J., 2008., **Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100,000.**, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.* Vol. 19., Núm.1., Pg. 50-65.
- Terzaghi, K., 1950., **Mechanism of landslides.**, in Paige, S., **Applications of Geology to Engineering practice:** Boulder, Co., Geological Society of America, Berkeley., Pg. 83-123.
- Valerio, Carlos Víctor., 2010., **Procesos de Remoción en masa en rocas volcánicas, porción SO de la Cuenca de México.**, Universidad Autónoma de México., Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra.
- Varnes, D.J., 1958., **Landslide types and processes.**, In E.B. Eckel (Ed.) **Landslides in Engineering Practice.**, Highway Research Board., Special Report, 29., Pg. 20-47.
- Varnes, D.J., 1978., **Slope movement types and processes.** In R.L. Schuster y R. J. Krizek (Eds.) **Landslides: analysis and control.**, Transportation Research Board. Special report 176., Pg. 11-33.
- Vázquez, Sánchez. E. y Jaimes Palomera. R., 1989. **Geología de la Cuenca de México.**, *Revista de la Unión Geofísica Mexicana.*, Auspiciada por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México., número 2., Vol. 28., Pg. 133-190.
- Vela, Enrique., 1955., **La Cuenca de México a vuelo de pájaro.**, *Arqueología Mexicana.*, México., Pg. 84.
- Vera Pérez M. y López Blanco J., 2009., **Evaluación de amenazas por inundaciones en el centro de México: El caso de Iztapalapa, Distrito Federal (1998-2005).**, Universidad Autónoma de México, *Investigaciones Geográficas.*, Boletín del Instituto de Geografía., ISSN 0188-4611., Núm. 73, 2010., Pg. 22-40.
- Villavicencio, Judith y Durán, Ana M., 1993., **Características territoriales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.**, en Coulomb René y Duhau Emilio (coord.), *Dinámica Urbana y procesos socio-políticos*, OCIM, UAM-I, CENVI, México., Pg. 119-136.

- Voight, B. y Kennedy, B. A., 1979., **Slope failure of 1967-1969, Chuquicamata mine, Chile.**, In B. Voight (Ed.) Rockslides and avalanches., Vol. 2., Pg. 595-632.
- Wallace, P., Carmichael, I., 1989., **Minette lavas and associated leucities from the western front of the Mexican Volcanic Belt:** petrology, chemistry and origin: Contributions to Mineralogy and Petrology., 103., Pg. 470-492.
- WP/WLI., 1993., **A suggested method for describing the activity of a landslide.**, Bulletin of the International Association of Engineering Geology., 47., Pg. 53-57.
- Zischinsky, U. 1966., **On the deformation of high slopes.**, Proc. 1st. Conference of the International Society of Rock Mechanics., Lisboa., Vol. 2., Pg. 179-185.

Páginas web:

<http://www.sma.df.gob.mx>

<http://www.inegi.com>

<http://www.sma.d.f.gob.mx>

http://satori.geociencias.unam.mx//digital_geosciencias

<http://reforma/2011.com>

<http://sismologiconacional.com>