



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA.

**“ANÁLISIS DEL FRACTURAMIENTO DE LAS
ZONAS DE TOPOGRAFÍA BAJA DEL DISTRITO
FEDERAL PARA EVALUAR ÁREAS
VULNERABLES A LA CONTAMINACIÓN DE
LOS ACUÍFEROS.”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A:

ERICK LÓPEZ MENDOZA.

DIRECTOR DE TESIS:

ING. JOSÉ LUIS ARCOS HERNÁNDEZ



MÉXICO, D. F., 2012.

AGRADECIMIENTOS.

A CONACyT por el apoyo otorgado para realizar esta tesis.

A mi núcleo familiar, es un honor vivir junto a ustedes.

A mis padres, por ayudarme a guiar mi camino, por su apoyo incondicional, por sus palabras ejemplares, por enseñarme tantas cosas, y por la inefable genética, que me permite realizar todo lo que deseo y amo. Sin ustedes este documento y muchas cosas más serían inexistentes.

A mi madre, por su ejemplo de honor, disciplina, constancia, tolerancia y superación. Por el amor inconmensurable que me ha demostrado con palabras y acciones. Gracias por la magnífica alimentación, que me ayudó a desarrollarme en todos sentidos y por enseñarme a mejorar todos los días.

A mi padre, por su ejemplo de honor, valentía, entereza y superación. Por sus palabras y el apoyo recibido en innumerables ocasiones. Gracias por mostrarme el fantástico instinto de competencia y por cultivar mi pasión y aprecio por el deporte.

A mis hermanos, por soportarme tanto tiempo y cada día. A Karina y a Alberto, por el cariño y la amistad que me brindan cada día, por tantos momentos compartidos y por toda su ayuda. He aprendido mucho de ustedes.

A Dzoara Talía P. M., sin su ayuda y colaboración este trabajo no habría sido posible. Por apoyarme en las salidas de campo. Gracias por todo.

A R. "Bernáldez" R., sin su ayuda, apoyo y amistad este momento no existiría.

A todos mis sinodales, mi admiración y respeto por sus comentarios y apoyo. A los ingenieros José Luis Arcos Hernández y Javier Arellano Gil, por su apoyo en las salidas de campo y su asesoría para desarrollar este trabajo.

A Paulina T. G., por ayudarme a mejorar y por su apoyo en momentos complicados.

A Sayuri Katagiri, J.L. Valerio M., Víctor Hugo, Martín Alberto, Ozzy, Narvárez, Nacho, Sainz, Hugo, Fabiola, y a todos mis amigos, he aprendido mucho de ustedes. Anhele compartamos momentos agradables nuevamente.

A María de los Ángeles M. G. y José Luis M. G., por su valioso apoyo en momentos complicados. A Sonia, Ricardo, Ángeles, Ana María, y a todos mis primos, que sin saberlo me han brindado valiosas lecciones y han contribuido en mi desarrollo.

Y a todos quienes de alguna manera han contribuido en mi desarrollo como ser humano.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

ÍNDICE.

AGRADECIMIENTOS.	I
RESUMEN.	II
ABSTRACT.	III
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Objetivos.	2
1.2. Metas.	2
1.3. Ubicación.	3
1.4. Metodología.	6
1.5. Trabajos antecedentes.	17
CAPÍTULO II. GEOLOGÍA REGIONAL DE LA CUENCA DE MÉXICO.	21
2.1. Origen de la Cuenca.	24
2.2. Estratigrafía.	29
2.2.1. Mapa geológico del Distrito Federal.	46
2.3. Geología Estructural.	48
2.4. Evolución Geológica.	52
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DEL FRACTURAMIENTO.	55
3.1. Marco teórico.	55
3.1.1. Terminología.	55
3.1.2. Fracturamiento y fallamiento en rocas.	56
3.1.3. Modos de fracturamiento.	59
3.1.4. Mecanismos de fracturamiento en materiales arcillosos.	60
3.1.5. Factores geológicos que determinan la susceptibilidad al fracturamiento.	62
3.1.6. Variaciones mineralógicas en una secuencia lacustre.	62
3.1.7. Propiedades hidráulicas y mecánicas de los materiales arcillosos.	63
3.1.8. Factores disparadores de fracturas.	63
3.1.9. Tipos generales de fracturas en secuencias fluvio-lacustres.	64
3.1.10. Criterios de generación de grietas en la Ingeniería Civil.	65
3.1.11. Clasificación de los agrietamientos en suelos y sedimentos.	66
3.1.12. Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México.	72
3.2. Descripción del fracturamiento.	74
3.2.1. Delegación Iztapalapa.	74
3.2.2. Delegación Gustavo A. Madero.	101
3.2.3. Delegación Coyoacán.	114
3.2.4. Delegación Xochimilco.	120
3.2.5. Delegación Azcapotzalco.	127
3.2.6. Delegación Tláhuac.	131
3.2.7. Delegación Álvaro Obregón.	135
3.2.8. Mapa de fracturamiento del Distrito Federal.	136
CAPÍTULO IV. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DEL FRACTURAMIENTO.	139
4.1. Delegación Iztapalapa.	139
4.2. Delegación Gustavo A. Madero.	150
4.3. Delegación Coyoacán.	156
4.4. Delegación Xochimilco.	159
4.5. Delegación Azcapotzalco.	162

4.6. Delegación Tláhuac.	163
4.7. Delegación Álvaro Obregón.	165
CAPÍTULO V. INTERPRETACIÓN.	167
5.1. Delegación Iztapalapa.	167
5.1.1. Zona de lago.	167
5.1.2. Zona de transición.	175
5.2. Delegación Gustavo A. Madero.	177
5.2.1. Zona de lago.	177
5.2.2. Zona de transición.	181
5.3. Delegación Coyoacán.	184
5.3.1. Zona de transición.	184
5.4. Delegación Xochimilco.	186
5.4.1. Zona de lago.	186
5.5. Delegación Azcapotzalco.	189
5.5.1. Zona de transición.	189
5.6. Delegación Tláhuac.	192
5.6.1. Zona de lago.	192
5.7. Delegación Álvaro Obregón.	194
5.7.1. Zona de lomas.	194
CAPÍTULO VI. ÁREAS VULNERABLES A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.	199
6.1. Concepto de vulnerabilidad.	199
6.2. Vulnerabilidad por daños estructurales.	199
6.2.1. Delegación Iztapalapa.	199
6.2.2. Delegación Gustavo A. Madero.	205
6.2.3. Delegación Coyoacán.	207
6.2.4. Delegación Xochimilco.	209
6.2.5. Delegación Azcapotzalco.	210
6.2.6. Delegación Tláhuac.	211
6.2.7. Delegación Álvaro Obregón.	211
6.3. Vulnerabilidad por contaminación de agua potable y/o suelos.	212
6.3.1. Delegación Iztapalapa.	212
6.3.2. Delegación Gustavo A. Madero.	214
6.3.3. Delegación Coyoacán.	215
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	217
Conclusiones.	217
Recomendaciones.	218
APÉNDICE A. DATOS DEL FRACTURAMIENTO.	i
BIBLIOGRAFÍA.	xix

RESUMEN.

El objetivo de esta tesis es estudiar y caracterizar las zonas del Distrito Federal afectadas por fracturamiento y/o fallamiento, que representan zonas vulnerables a la contaminación de los acuíferos.

La primera etapa consistió en realizar visitas de campo para reconocer las zonas afectadas por fallas y fracturas, describirlas y recolectar toda la información estructural posible, así como información adicional necesaria (coordenadas geográficas, nombres de calles aledañas, fotografías, etc.). Las delegaciones políticas afectadas por dichas discontinuidades, y que fueron estudiadas son: a) Álvaro Obregón, b) Azcapotzalco, c) Coyoacán, d) Gustavo A. Madero, e) Iztapalapa, f) Tláhuac y g) Xochimilco.

Con los datos obtenidos durante el trabajo de campo, fueron elaboradas rosetas estructurales de rumbos, para conocer la orientación preferencial de las discontinuidades en cada sitio. En Google Earth, se trazaron líneas que corresponden con la orientación preferencial de cada fractura y/o falla reconocida en campo. Todos los datos se integraron en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 9.3) que permite la identificación del fracturamiento dentro del Distrito Federal.

Se recolectaron 160 datos estructurales de gran longitud (decenas y cientos de metros) que corresponden con fallas y/o fracturas, que por sus dimensiones se representan gráficamente en un mapa; también se midieron 815 fracturas de menores dimensiones. Dentro del conjunto de datos recolectados, las orientaciones preferenciales al NW-SE se encuentran alrededor de los 50°, y alrededor de 53° al NE-SW. La longitud máxima observada es de 760 m y la mínima de 2 m. La abertura mínima corresponde con 1 cm, la máxima con 22 cm. Se realizó la descripción de los daños estructurales en cada sitio, tomando en cuenta los daños al pavimento, banquetas, guarniciones, paredes de construcciones y drenaje. Dentro de los sitios estudiados, los mecanismos más comunes que explican los problemas de fracturamiento y/o fallamiento tienen que ver con las teorías de: fracturamiento por variación del contenido de agua, fracturas hidrodinámicas, fracturamiento asociado al asentamiento diferencial por hundimiento regional y fracturas tectónicas; predominan las fracturas relacionadas a la subsidencia por la extracción de agua subterránea y las que se forman por compactación diferencial donde hay cambios litológicos contrastantes.

La delegación con la mayor cantidad de sitios afectados y daños visibles importantes es Iztapalapa. Las delegaciones Azcapotzalco, Coyoacán, Gustavo A. Madero, Tláhuac y Xochimilco, presentan daños importantes pero en menor cantidad de sitios. Los sitios son vulnerables porque causan afectaciones a las construcciones, y favorecen la contaminación del suelo y agua subterránea, principalmente mediante la infiltración vertical de hidrocarburos y aguas residuales.

Palabras clave: Ciudad de México, fracturamiento, fallamiento, daños estructurales, vulnerabilidad estructural, vulnerabilidad acuífera.

ABSTRACT.

The aim of this thesis is to study and characterize areas in Mexico City affected by fracturing and / or faulting, representing vulnerable areas to water reservoirs pollution.

The first stage consisted of field trips to recognize the areas affected by faults and fractures, describe and collect all the structural information as possible, and necessary additional information (geographic coordinates, names of adjacent streets, photographs, etc.). The political delegations affected by such discontinuities are: a) Alvaro Obregon, b) Azcapotzalco, c) Coyoacan, d) Gustavo A. Madero, e) Iztapalapa, f) Tláhuac and g) Xochimilco.

With the data collected during field work structural rosettes were performed, to determine the preferred orientation of discontinuities at each site. In Google Earth, lines were drawn corresponding to the preferred orientation of each fracture and / or failure recognized at a field scale. All data were integrated into a Geographic Information System (ArcGIS 9.3) that allows identification of fracturing within the Federal District.

160 structural data of great length were collected (tens and hundreds of meters) that correspond to faults and / or fractures, which by its dimensions were plotted on a map; 815 fractures of short length were also measured. Within the set of data collected, the preferential orientation NW-SE are around 50° , and about 53° to the NE-SW. The observed maximum length is 760 m and minimum of 2 m. As to the opening, corresponds to the minimum and maximum 1 cm with 22 cm. Case the description of structural damage at each site, taking into account the damage to the pavement, sidewalks, kerbs, walls and drainage structures. Among the sites studied, the most common mechanisms that explain the problems of fracturing and / or faulting have to do with the theories of: fracturing variation of water content, hydrodynamic fractures, fracturing associated with differential settlement by regional subsidence and tectonic fractures; dominated by fractures related to subsidence by groundwater overpumping and which are formed by differential compaction where contrasting lithological changes.

The delegation with the most affected sites and major visible damage is Iztapalapa. Delegations Azcapotzalco, Coyoacán, Gustavo A. Madero, Tláhuac and Xochimilco, show significant damage but fewer sites. The sites are vulnerable because they cause damages to buildings, and favor the contamination of soil and groundwater primarily through vertical infiltration of oil and sewage.

Keywords: Mexico City, fracturing, faulting, structural damage, structural vulnerability, aquifer vulnerability.

I. INTRODUCCIÓN.

Como parte del trabajo de campo dentro del proyecto “Nivel de riesgo en la Ciudad de México en función de las características hidrogeológicas de la Zona Metropolitana del Valle de México y fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos”, proyecto patrocinado por CONACYT – GDF, clave 121128, del Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica, se realizaron varias recolecciones de datos estructurales correspondientes con fracturas y fallas geológicas para conocer las zonas que presentan estas discontinuidades, interpretar las causas que las originan y evaluar los riesgos geológicos existentes en las zonas estudiadas. La coordinación del trabajo de campo y el análisis estructural se llevo a cabo por los ingenieros Javier Arrellano Gil y José Luis Arcos Hernández, profesores de Geología Estructural de la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (DICT).

La presente tesis de nivel licenciatura se compone de 6 capítulos, conclusiones y recomendaciones.

En el Capítulo I. Introducción, se describen los objetivos y las metas por alcanzar. Se define la ubicación de la zona de estudio. Se propone una metodología para realizar la recolección de datos estructurales, así como el equipo y material utilizado para tal fin. Además se hace mención de los trabajos antecedentes que existen al respecto del problema del fracturamiento en la Ciudad de México y en otras ciudades.

Dentro del Capítulo II. Geología Regional de la Cuenca de México, se describen los aspectos geológicos generales presentes en dicha cuenca, tales como su forma, área aproximada y altitud máxima, así como los procesos geológicos que le dieron origen. Se efectúa la descripción de la Estratigrafía general de la cuenca con base en las formaciones que han sido reconocidas en campo por diversos autores, y se realiza una propuesta de seis unidades generales que agrupan formaciones con características en común. Además se describen las características geológicas estructurales presentes en la cuenca y la evolución geológica que ha sufrido desde sus inicios.

En el Capítulo III. Análisis del Fracturamiento, se describen las teorías que explican la ocurrencia y propagación del fracturamiento y/o fallamiento en rocas y suelos, así como la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México, que divide al Distrito Federal en tres zonas de acuerdo con sus características litológicas generales. En este capítulo también se realiza descripción del fracturamiento, por zonas agrupadas de acuerdo con las delegaciones políticas del Distrito Federal. Se describen cada uno de los sitios visitados para recolectar datos estructurales (fracturas y/o fallas), indicando la ubicación del sitio, el número de datos recolectados, las características generales de los mismos, así como los daños visibles en el lugar. Los datos se recolectaron en las delegaciones: a) Álvaro Obregón, b) Azcapotzalco, c) Coyoacán, d) Gustavo A. Madero, e) Iztapalapa, f) Tláhuac, y g) Xochimilco.

Dentro del Capítulo IV. Tratamiento Estadístico del Fracturamiento, se presenta la forma en que se trabajó desde el punto de vista estadístico el conjunto de datos de rumbo de las fracturas y/o fallas; se utilizó el programa StereoNet con el que se obtuvieron rosetas de rumbos que indican las direcciones preferenciales de fracturamiento y fallamiento.

En el Capítulo V. Interpretación, se explica lo referente a la génesis de los elementos estructurales (fracturas y/o fallas), presentes en las delegaciones afectadas en el Distrito Federal; dicha interpretación se realizó con base en el análisis estadístico obtenido de las rosetas de rumbos de las fracturas, las cuales indican la(s) orientación(es) preferencial(es) en cada sitio estudiado. Se tomaron como base las teorías de fracturamiento descritas en el Capítulo III del presente trabajo, y se utilizó la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México, propuesta por Santoyo en 2005, para establecer la zona en que se ubica cada uno de los sitios dentro del marco geológico de la cuenca.

Dentro del Capítulo VI. Áreas Vulnerables a la Contaminación de los Acuíferos, se describen los sitios y las características que los convierten en zonas vulnerables a daños estructurales y contaminación de agua subterránea por hidrocarburos o aguas residuales.

Las Conclusiones y Recomendaciones se realizan con base en los resultados obtenidos y los problemas y experiencias enfrentados durante la elaboración del presente trabajo.

1.1. OBJETIVOS.

- Estudiar y caracterizar las zonas del Distrito Federal que presentan problemas de fracturamiento o fallamiento, y que genera una mayor vulnerabilidad acuífera.
- Realizar un mapa de las principales zonas afectadas por fracturamiento en el Distrito Federal, en el cual se indiquen las direcciones preferenciales.

1.2. METAS.

- Realizar una adecuada interpretación del origen del fracturamiento en las zonas estudiadas del Distrito Federal.
- Analizar y evaluar los riesgos geológicos que existen en las zonas que presentan fracturamiento en el Distrito Federal.

1.3. UBICACIÓN.

La Cuenca de México se localiza en la parte centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (Fig. 1.1), en la que se tiene una secuencia volcánica del Cenozoico, en una franja de 20 a 70 km de ancho que cruza la República Mexicana desde el Océano Pacífico hasta el Atlántico en dirección este-oeste. La cuenca se localiza entre los meridianos $98^{\circ}11'$ - $99^{\circ}30'$ y los paralelos $19^{\circ}03'$ - $20^{\circ}11'$ (Fig. 1.2), su altitud varía de 2,240 a 2,390 msnm, con una longitud máxima de 70 km de norte a sur y de 20 km de este a oeste; su área aproximada es de $9,600 \text{ km}^2$, integrando la totalidad del territorio del Distrito Federal, parte de los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y del Estado de México. La Cuenca de México está limitada al norte por las sierras de Tezontlalpan y Pachuca, al sur con la Sierra de Chichinautzin y Ajusco, al oriente con la Sierra Nevada, Río Frío y Calpulapan y al poniente con la Sierra de las Cruces (Fig. 1.3).

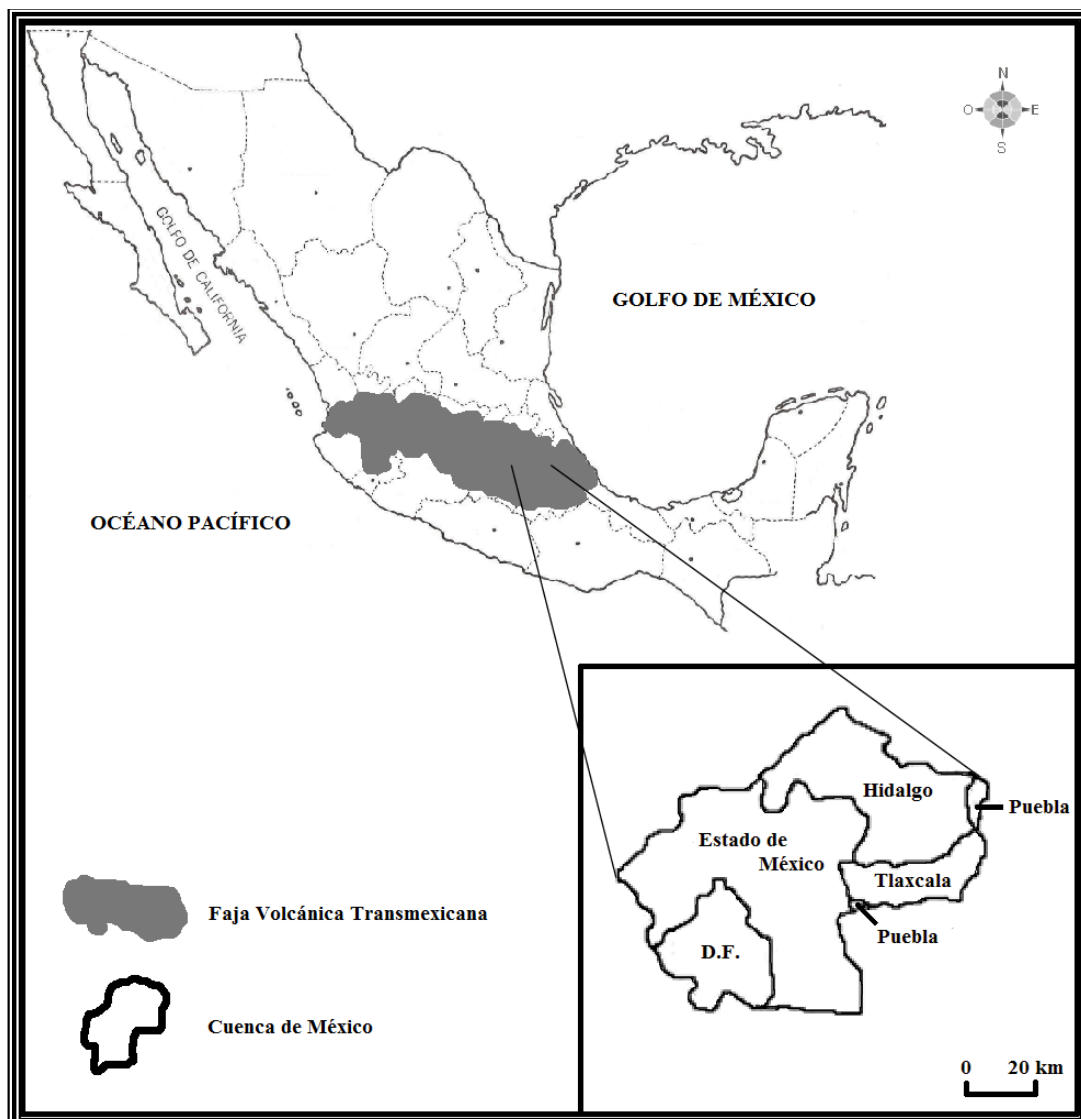


Figura 1.1. Localización y superficie de la Cuenca de México.

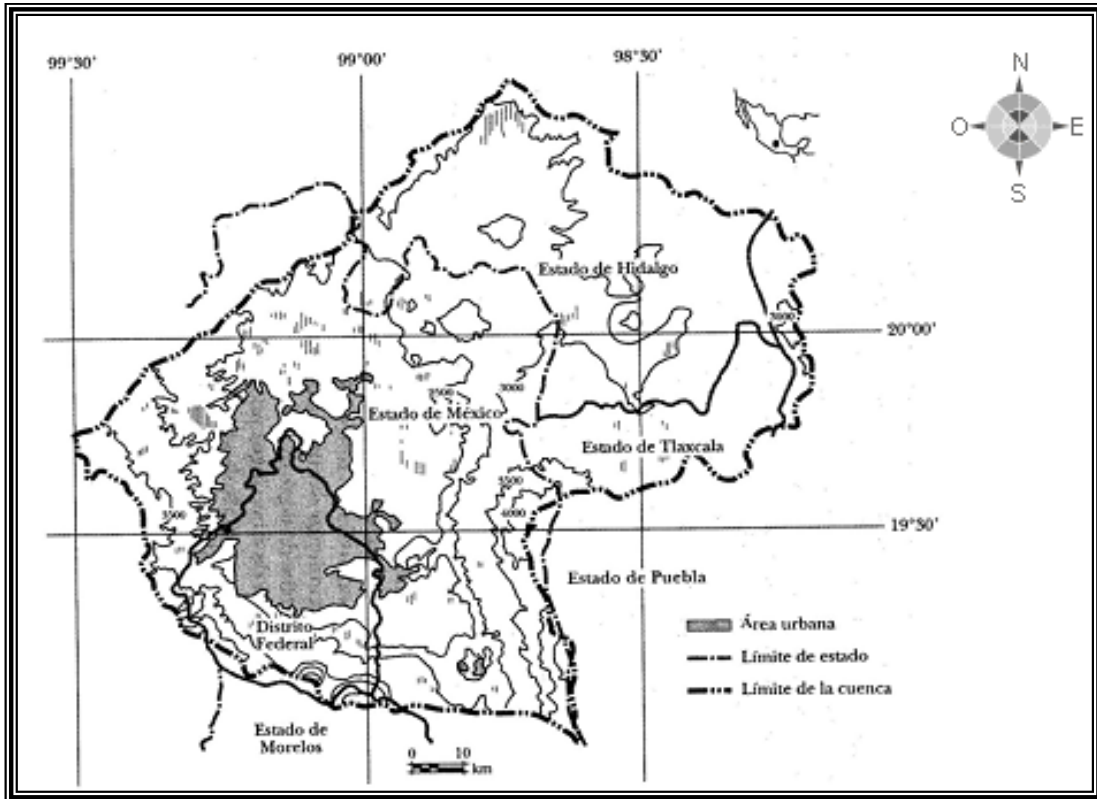


Figura 1.2. Localización de la Cuenca de México y límites estatales de México (Ezcurra et al. 2006).

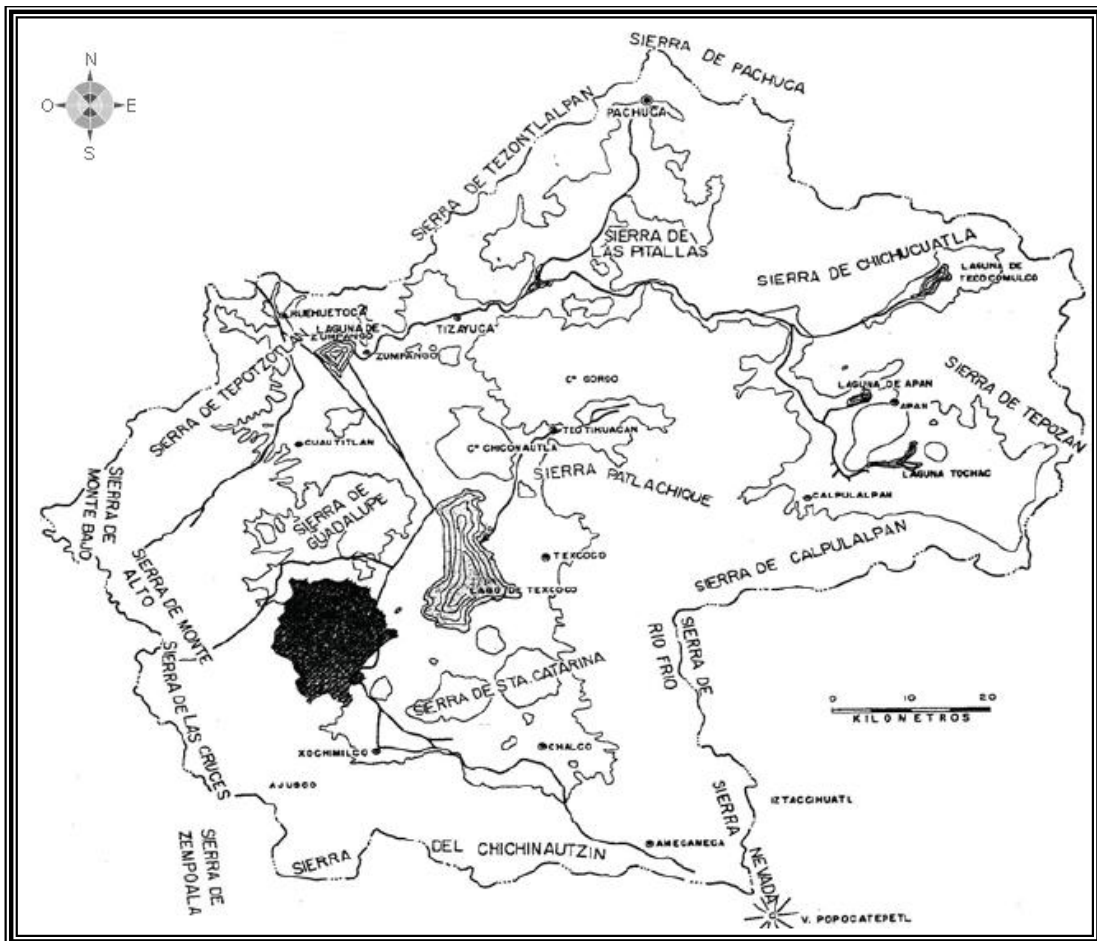


Figura 1.3. Las sierras y los lagos de la Cuenca de México (Mooser, 1975).

Para fines del proyecto se tomó como límite la superficie que abarca el Distrito Federal, la cual se ubica entre los meridianos $98^{\circ}57'$ - $99^{\circ}22'$ y los paralelos $19^{\circ}36'$ - $19^{\circ}03'$ (Figura 1.4). La Ciudad de México se encuentra limitada al oeste por la Sierra de Las Cruces, al sur por la Sierra Chichinautzin y al norte por la Sierra de Guadalupe, el Cerro de Chiconautla y la Sierra Patlachique.



Figura 1.4. Límites geográficos del Distrito Federal (Modificada de Google Earth).

1.4. METODOLOGÍA.

Se realizó investigación bibliográfica, trabajo de campo, análisis de datos e interpretación de la información geológica, particularmente de Estratigrafía y Geología Estructural.

La medición de fracturas se realizó en las calles afectadas en la Ciudad de México. Para la selección de lugares a visitar se recopiló información bibliográfica, notas periodísticas y demás material disponible en el que se encontraron referencias de daños estructurales a viviendas o inmuebles, fracturamiento en vialidades o hundimientos; además se visitaron zonas de las cuales se tenía previo conocimiento al ser de ruta de traslado diaria. Con el fin de maximizar la calidad de los datos, se procuró encontrar lugares en los cuales la dirección de las fracturas se observa claramente, lo que además en algunos casos coincide con el daño en el pavimento, banquetas, guarniciones y viviendas.

La consulta de información bibliográfica, así como de notas periodísticas se realizó mediante la herramienta de internet. En estos casos, se encontraron algunos documentos e imágenes que hacen referencia a problemas de fracturamiento, agrietamiento y hundimientos en diversas colonias y delegaciones del Distrito Federal. De igual forma, se tomó referencia de algunos artículos científicos que mencionan la existencia de familias de fracturas y fallas en distintas delegaciones de la Ciudad de México.

Después de leer la información disponible se realizaron visitas de reconocimiento a los sitios para constatar si existen las condiciones adecuadas para la toma de datos estructurales representativos.

En particular, el trabajo de campo consistió en la recolección, ordenamiento, análisis e interpretación de datos estructurales en campo que ayudaron a caracterizar e interpretar las direcciones preferenciales de las fracturas y fallas que se localizan en el Distrito Federal en las zonas de relieve bajo y relativamente plano.

Para recolectar dicha información se visitaron algunas áreas de las siguientes delegaciones del Distrito Federal:

- Delegación Álvaro Obregón.
- Delegación Azcapotzalco.
- Delegación Coyoacán.
- Delegación Gustavo A. Madero.
- Delegación Iztapalapa.
- Delegación Tláhuac.
- Delegación Xochimilco.

A continuación se presenta una lista de los lugares visitados y una breve descripción.

a) Delegación Álvaro Obregón.

En esta delegación se visitó un sitio de la colonia Barrio Norte. Aparentemente este lugar no presenta un daño grave, pero se tomó información estructural de un sitio donde se tiene una zona con fracturas.

- Colonia Barrio Norte, calle Despertador Americano.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	477820	2142618	2353

b) Delegación Azcapotzalco.

Se visitó la Alameda Norte, en la cual se observan daños en el pavimento de las avenidas y del estacionamiento. Incluso se aprecian fracturas en la pista de corredores y en el suelo de la zona arbolada.

- Alameda Norte.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	481474	2156286	2203

c) Delegación Coyoacán.

Se realizó el recorrido a lo largo de la Avenida Canal de Miramontes, en la cual se observan daños en el pavimento. Además se realizaron mediciones de datos estructurales en la colonia Jardines de Coyoacán, en la cual se presentan daños en el pavimento y en las casas habitación.

- Avenida Canal de Miramontes esquina con Calzada de La Virgen.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	485616	2137027	2237

- Avenida de Tzinnias y Avenida de las Dalias, colonia Jardines de Coyoacán.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486696	2135661	2234

- Avenida Canal de Miramontes esquina con Calzada de Las Bombas.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486965	2135244	2215

d) Delegación Gustavo A. Madero.

En esta delegación los daños son más visibles, resaltando las zonas de La Villa y del Instituto Mexicano del Petróleo. Se visitaron varios puntos dentro de esta delegación.

- Bosque de Aragón.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486778	2135599	2230

- Deportivo Los Galeana, colonia Ampliación Casas Alemán.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	491530	2151593	2227

- Colonia Lindavista, calles Colector 13 y Ricarte.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486225	2154739	2265

- Inmediaciones del Campus de Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	485121	2155818	2127

- Inmediaciones del Instituto Mexicano del Petróleo, colonia Nueva Vallejo.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	484693	2155109	2239

e) Delegación Iztapalapa.

En esta delegación se efectuaron varias mediciones, pues es la zona más afectada del Distrito Federal por las fallas y fracturas. En cada uno de estos puntos se observaron fuertes daños en las viviendas, calles, las banquetas y el pavimento. Se visitaron y tomaron datos de los siguientes sitios:

- Colonia El Edén.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	498570	2141163	2248

- Colonia Guelatao de Juárez.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	495268	2143603	2237

- Colonia Jacarandas.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	494641	2139316	2239

- Colonia Lomas de San Lorenzo.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	492899	2136171	2251

- Colonia Popular Ermita Zaragoza.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	500207	2140958	2236

- Colonias Reforma Educativa y Tepalcates.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	494314	2143568	2240

- Colonia Santa Cruz Meyehualco.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	496440	2138928	2259

- Unidad Habitacional Concordia Zaragoza.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	499145	2141469	2229

f) Delegación Tláhuac.

En San Andrés Mixquic se visitó la zona del tianguis y el panteón, además de la calle Emiliano Zapata. Se realizaron mediciones y descripciones en el siguiente sitio:

- Pueblo San Andrés Mixquic.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	503669	2125789	2234

g) Delegación Xochimilco.

Se realizó la medición frente a las instalaciones de la Red de Transportes de Pasajeros (RTP), sobre la Avenida México en el Barrio de San Marcos. Además se tomaron datos estructurales en la Unidad Habitacional FOVISSSTE Rinconada del Sur, la cual presenta daños en el pavimento de las calles. Se visitaron los siguientes sitios:

- Av. México, Barrio San Marcos.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	488191	2130104	2234

- Unidad Habitacional FOVISSSTE Rinconada del Sur, colonia Huichapan.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	487380	2129811	2234

A continuación se presenta una breve descripción del material utilizado y del procedimiento que se empleó para realizar la medición de datos estructurales de fracturas y fallas:

Material empleado.

- ❖ Brújula Brunton.
- ❖ Cinta métrica de 30 m.
- ❖ Flexómetro de 5 m.
- ❖ Gises de colores.
- ❖ Regla.
- ❖ Libreta de campo.
- ❖ Cámara fotográfica.
- ❖ GPS.

En caso de encontrar los elementos suficientes para realizar el levantamiento de fallas y fracturas se realizó la toma de datos de la siguiente manera:

- a) Al llegar a la colonia de la cual se tienen reportes o indicios de fracturamiento se realizó un recorrido por las calles para identificar el o los sitios que presentan afectaciones por dicho problema. Al reconocer y observar las zonas afectadas se eligió el sitio más representativo para realizar la medición de datos estructurales, y la descripción de las zonas afectadas.
- b) Se delimita el área para realizar el levantamiento de datos, midiendo la superficie (Figura 1.4.1).

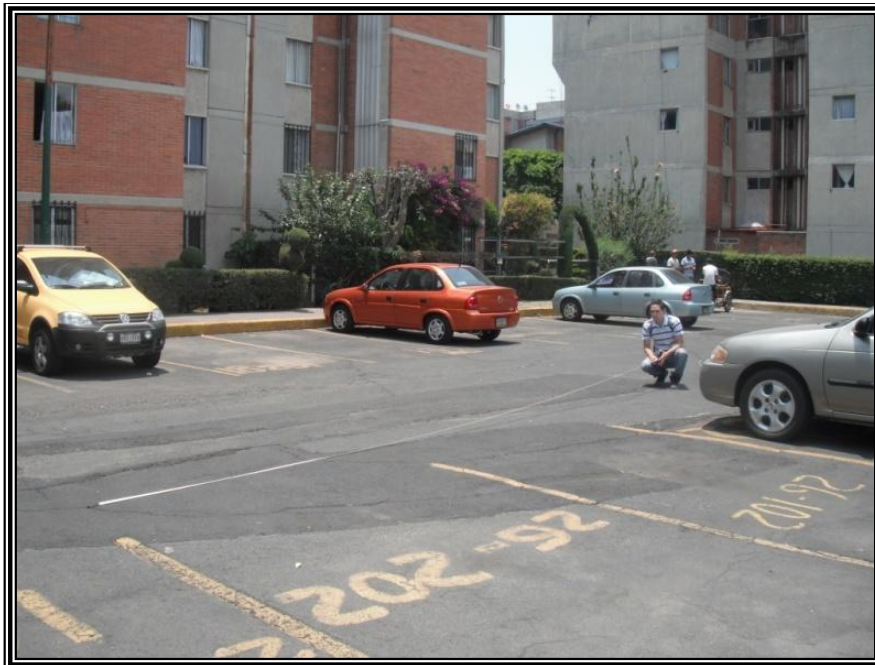


Figura 1.4.1. Delimitación del área para tomar datos estructurales en Xochimilco, D.F.

- c) Se ubica el punto en el mapa topográfico con la información proporcionada por el GPS (Figura 1.4.2), en coordenadas UTM, en sistema WGS 84.



Figura 1.4.2. Toma de coordenadas UTM en Av. México, Xochimilco D.F.

- d) Se marcan con gises de colores todas las fracturas de las cuales se van a medir los datos estructurales dentro del área delimitada (Figura 1.4.3).



Figura 1.4.3. a) Marcado con gis de las fracturas; b) Acercamiento para ver detalles de las fracturas marcadas en Xochimilco.

- e) Se mide la dirección de fracturamiento utilizando la Brújula Brunton. Para realizar esta medición y obtener el rumbo de la fractura o falla, la persona se coloca en un extremo de la fractura o falla y alinea la brújula con la dirección del elemento a medir (Figura 1.4.4), con la pínula mayor apuntando en la dirección de la discontinuidad.



Figura 1.4.4. Toma de rumbo de fracturas en el pavimento de Av. México, Xochimilco D.F.

Se nivela la brújula horizontalmente para obtener la lectura correcta (con el nivel horizontal en el centro). En el caso de que la fractura tenga corta longitud se coloca la brújula directamente sobre la fractura para obtener una medición más precisa (Figura 1.4.5).



Figura 1.4.5. Toma de rumbo de fractura en el pavimento de Av. México, Xochimilco D.F.

- f) Después de tomar la lectura del rumbo se procede a medir la longitud de la falla o fractura con la cinta métrica o con el flexómetro (Figura 1.4.6).



Figura 1.4.6. Medición de la longitud de fracturas en el pavimento de Av. México, Xochimilco D.F.

- g) Se mide además la abertura de la falla o fractura (Figura 1.4.7) y en caso de que sea una falla se debe tomar el salto de la misma (Figura 1.4.8).



Figura 1.4.7. Medición de la abertura de una fractura en el pavimento de Av. México, Xochimilco D.F.

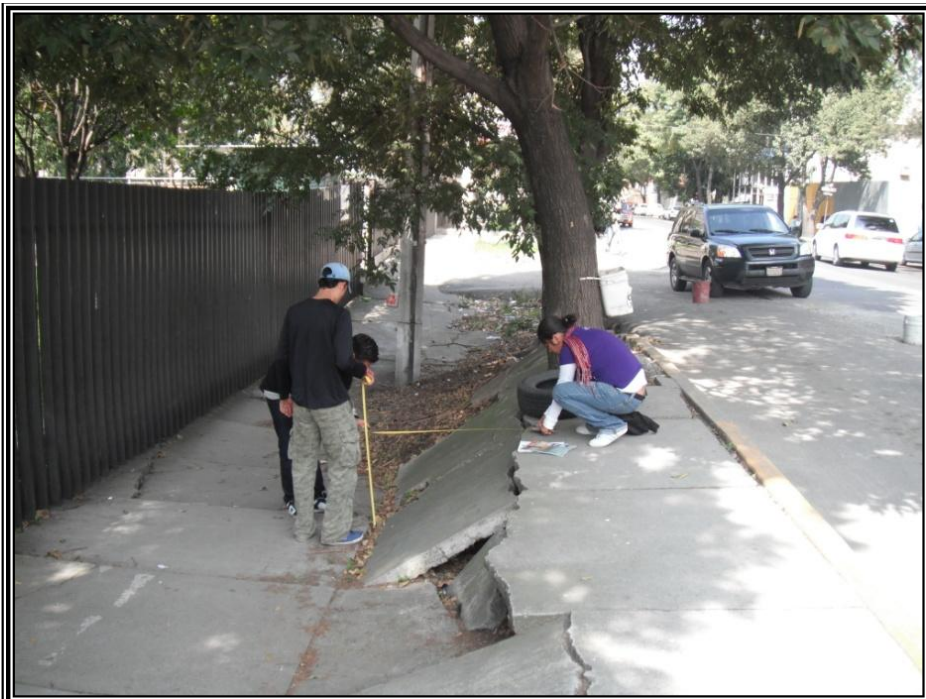


Figura 1.4.8. Medición del salto de falla geológica en la calle Poniente 134, Gustavo A. Madero D.F.

- h) Posteriormente se toma la distancia (separación o espaciamiento) entre fracturas (Figura 1.4.9).



Figura 1.4.9. Distancia entre fracturas en el pavimento de Av. México, Xochimilco D.F.

- i) Posteriormente se debe tomar una o varias fotografías representativas de la discontinuidad y del lugar en el que se realizó la medición (Figura 1.4.10). Se recomienda tomar 4 fotografías de cada sitio, una que ofrezca un panorama general de la zona fracturada (Figura 1.4.11), otra cuya visión esté en la dirección de la discontinuidad (Figura 1.4.12), una con un ángulo perpendicular al elemento a medir (Figura 1.4.13), y por último una que muestre los daños estructurales ocasionados por la discontinuidad.



Figura 1.4.10. Toma de fotografía del pavimento con fracturas en Av. México, Xochimilco D.F.



Figura 1.4.11. Fotografía que muestra un panorama general de un sitio con pavimento fracturado en Azcapotzalco D.F.



Figura 1.4.12. Fotografía en la que se muestra la dirección del fracturamiento en un sitio en Azcapotzalco D.F.



Figura 1.4.13. Fotografía tomada en dirección perpendicular al fracturamiento en un sitio en Azcapotzalco D.F.

1.5. TRABAJOS ANTECEDENTES.

Existen abundantes trabajos sobre aspectos geológicos de la Cuenca de México, sin embargo son pocos los que tratan de manera específica el tema del fracturamiento en el Distrito Federal y que además analicen e interpreten el origen de este fenómeno y los innumerables problemas que esto implica.

El comportamiento mecánico y el fracturamiento que afecta suelos, rocas, sedimentos e infraestructura civil de la Cuenca de México han sido estudiados con diferentes enfoques por diferentes investigadores desde la mitad del siglo anterior.

El reporte de la primera descripción técnica del hundimiento como problema urbano la presentó Gayol (1925), ante la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos; pues siendo director de las obras de drenaje de la Ciudad de México vivió el angustiante problema que inducían las deformaciones que se habían producido en la red de agua potable. Su interpretación del fenómeno fue clara y sorprendente, pues demostró que la Ciudad de México se hundía respecto al Lago de Texcoco, quedando pendiente encontrar la explicación científica del origen del fenómeno.

Carillo (1947) explicó la relación teórica entre el hundimiento y la consolidación de las arcillas inducida por la extracción de agua.

Marsal (1947) y Mazari (1952) trabajaron intensamente en aclarar experimentalmente el fenómeno del hundimiento y su repercusión en el comportamiento de las cimentaciones. Las contribuciones de Zeevaert (1953) fueron esenciales para ampliar y profundizar ese conocimiento.

En 1952, Hiriart *et al.* mencionan a Carrillo (1947) como el primer científico que explicó “el mecanismo que regula la formación de grietas en el Valle de México”, fenómeno que en aquella época ya se hacía notable. Las fracturas entonces observadas se presentaban en terrenos lacustres, aparecían en una época del año y en otra se extinguían.

De igual manera, desde hace varias décadas ciertos aspectos de la relación entre la subsidencia regional, el fracturamiento y la extracción de agua subterránea fueron establecidos por varios autores (Zeevaert; 1953, Marsal y Mazari, 1959; Juárez, 1962; Juárez y Figueroa, 1984; Figueroa, 1989; Orozco y Figueroa, 1991 y Lugo *et al.*, 1991).

A partir de la década de los años setenta del siglo pasado, el problema del fracturamiento de suelos recibió atención especial por parte de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS).

En una sesión del simposio “El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México” (1978), se plantea que el origen de las fracturas en Naucalpan (La Florida y Echegaray), se relaciona con fallas por esfuerzo cortante asociadas a la consolidación diferencial del subsuelo y se

reportan por primera vez las fracturas en las inmediaciones del cerro Xico, en Chalco, Estado de México. Durante el mismo simposio, Ellstein (1978) propone una teoría sobre el mecanismo de falla, en la que el estado de tensión del suelo genera una cuña triangular que se hunde entre los bloques delimitados por ambas fracturas. En esta discusión sobre el problema de fracturamiento de los sedimentos lacustres en la Ciudad de México, se retoman las hipótesis propuestas por Carrillo (1947), Marsal y Mazari (1959) y Zeevaert (1953) sobre la importancia del abatimiento de presión en los acuíferos en el origen del fenómeno.

Aguayo (1989), establece que dentro de la Cuenca de México se manifiestan altos estructurales y depresiones locales a diferentes niveles estratigráficos, los cuales se originan por la influencia regional de fallas y fracturas conjugadas SW-NE y SE-NW, que afectan a toda la República Mexicana, desde el Pacífico hasta el Golfo de México.

Un segundo aporte al estudio de fracturas lo realizó la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS), en 1991, con la publicación de un volumen especial sobre "Agrietamiento de Suelos". En este volumen Orozco y Figueroa (1991), hacen mención de los simposios internacionales sobre hundimientos del terreno (IASH: 1969, 1976, 1984 y 1991) en donde se presentan problemas semejantes en ciudades de Arizona, Idaho, California, Texas y Nevada en E.U.A.

Resaltan los trabajos de Schumann y Poland (1969) que relacionan de manera directa las fracturas con abatimientos del agua subterránea en materiales arenosos; Holzer y Davis (1976) y Holzer (1984) hacen una clasificación de fracturas y proponen un método para estimar la profundidad de las mismas; Kreitler (1976, 1977) asocia la aparición de fallas a un sistema preexistente que actúa como barrera al flujo subterráneo formando escalones piezométricos.

Larson (1984) describe las posiciones favorables para la aparición de grietas, Sandoval y Bartlett (1991) hacen una evaluación de probables hundimientos y agrietamientos en Arizona. En particular, el trabajo de Poland (1984) ha sido fundamental para el establecimiento de la relación cuantitativa entre la subsidencia y el abatimiento piezométrico, a través de la medición de la compresibilidad de los materiales en campo y en laboratorio.

Sobre la problemática en México, en el volumen de 1991 de la SMMS se mencionan los casos de fracturamiento de las ciudades de Celaya (Trujillo, 1989) y Aguascalientes que se asocian a abatimientos piezométricos de alrededor de 40 m. Se mencionan también los casos de Toluca, Estado de México y Abasolo, Apaseo, Villagrán y Santa Cruz de Juventino Rosas en Guanajuato y se señala la influencia de la estratigrafía y del abatimiento piezométrico para el caso de la Ciudad de Querétaro (Trejo y Bains, 1991).

Estudios posteriores como el de Juárez, *et al.* (2002) y Rojas *et al.* (2002) se enfocan a estudiar las relaciones numéricas o analíticas que permiten simular el fracturamiento bajo estados de esfuerzo específicos, pero no consideran las heterogeneidades de la secuencia ni la variación de sus propiedades

mecánicas e hidráulicas en el espacio y en el tiempo, por lo que estas aproximaciones no pueden ser utilizadas para la evaluación de mecanismos de propagación. En este sentido, el trabajo de Álvarez (2000) es precursor ya que introduce al modelo numérico la variación de la compresibilidad de los materiales a medida que desciende el nivel piezométrico del agua para un caso real en Querétaro.

Carreón (2006) discute los mecanismos de fracturamiento en secuencias fluvio-lacustres y hace una diferencia entre los factores geológicos que propician la generación de fracturas y los factores disparadores, principalmente antropogénicos. Reconoce la importancia de considerar que las características estratigráficas de los suelos y la disminución de la presión de poro en una secuencia fluvio-lacustre no presentan una distribución homogénea, lo que se observa en el comportamiento mecánico de los materiales y se traduce en deformaciones diferenciales.

García *et al.* (2008) exponen que la Sierra de las Cruces está compuesta por ocho estratovolcanes traslapados con una actividad del Plioceno al Pleistoceno. Morfológicamente está conformada por tres grandes bloques denominados bloque norte, centro y sur, definidos de acuerdo con las características morfotectónicas, diferencias en patrones de drenaje, vulcanismo, edad y deformación, así como la presencia de fallas. Las tres principales direcciones de fallas son N–S, NE–SW y E–W, cuya interacción, al menos desde el Pleistoceno, provocaron levantamientos, hundimientos, escalonamiento y basculamiento de bloques.

En la parte sur de la Sierra de las Cruces, la morfoestructura geológica está fuertemente controlada por las fallas E–W, mientras que, en el centro y norte de la misma, las direcciones N–S y NE–SW son las que ejercen el control. Si este arreglo se extrapola al basamento granular de la Cuenca de México, al menos en su parte oeste estaría conformado de igual forma por una serie de bloques levantados, hundidos y basculados y por lo tanto el relleno tendría diferentes espesores desempeñando un papel importante en la distribución y control de los riesgos geológicos de la Cuenca de México.

II. GEOLOGÍA REGIONAL DE LA CUENCA DE MÉXICO.

La Cuenca de México presenta una forma alargada de norte a sur, con una extensión amplia hacia el noreste, en su eje mayor, el cual comprende desde las Chinampas de Xochimilco al suroeste, hasta las regiones semiáridas de Pachuca en el norte; mide aproximadamente 110 kilómetros. Su eje menor va desde los bosques que coronan la Sierra de las Cruces en el oeste, hasta las cimas nevadas del Iztaccíhuatl en el este, mide aproximadamente 80 km incluyendo la región de Apan, Tochac y Tecocomulco, situadas al pie de la Sierra de Calpulalpan; la Cuenca de México cubre un área aproximada de 9,600 km². La planicie central de la Cuenca de México está rodeada de elevaciones, siendo las del sur las más importantes, la gran planicie central tiene una altitud que oscila entre 2,240 metros en el sur y 2,390 en el norte.

La Cuenca de México se encuentra dentro del denominado Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana (FVT), la cual se extiende en dirección este-oeste atravesando la República Mexicana. Esta zona se considera una provincia fisiográfica independiente al resto de la República Mexicana. Álvarez (1958), denominó a esta provincia como Zona de Fosas Tectónicas y Vulcanismo Reciente, menciona que está caracterizada por predominar en ella derrames basálticos, numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución sugieren estar situados en fosas tectónicas y de ahí se le asigna dicho nombre.

Aunque por más de un siglo se han propuesto varias hipótesis sobre el origen de la FVT y la falta de paralelismo entre la trinchera mesoamericana y el arco magmático (Von Humboldt, 1808; De Cserna, 1958; Mooser, 1972; Gastil y Jensky, 1973; Johnson y Harrison, 1989), las múltiples evidencias geofísicas con las que se cuenta en la actualidad indican claramente que las placas oceánicas de Cocos y de Rivera se introducen con un ángulo diferente hacia el manto por debajo del continente. Por este motivo, la mayor parte de los investigadores asumen que la formación de magmas en la FVT, y su distribución oblicua con respecto a la trinchera, deben estar de alguna manera ligadas al proceso en subducción (Urrutia y Del Castillo, 1977; Urrutia y Böhnelt, 1987; Pardo y Suárez, 1993; Pardo y Suárez, 1995).

La evolución espacio-temporal del magmatismo, particularmente la transición entre la Sierra Madre Occidental y la FVT, estuvo sujeta a discusión por largo tiempo (Mooser, 1972; Demant, 1978; Cantagrel y Robin, 1979; Demant, 1981; Robin y Cantagrel, 1982; Venegas *et al.*, 1985; Nixon *et al.*, 1987), en la actualidad, y gracias a la abundancia de fechamientos isotópicos obtenidos en las últimas dos décadas, parece ser claro que la individualización de la FVT como una entidad geológica distintiva ocurrió durante el Mioceno medio y tardío, como resultado de una rotación antihoraria del arco que formó la Sierra Madre Occidental (Ferrari *et al.*, 1999).

Posteriormente, Ferrari *et al.* (2005) elaboraron la primera cartografía geológica digital de la FVT. De acuerdo a estos autores y de manera muy sintética, la historia geológica de la FVT se puede dividir en cuatro episodios principales:

(a) la instauración de un arco de composición intermedia en el Mioceno Medio y Tardío, (b) un episodio máfico del Mioceno Tardío, (c) un episodio silíceo de finales de Mioceno que llega a ser bimodal en el Plioceno Temprano, y (d) la reinstauración de un arco con gran variabilidad composicional a partir del Plioceno Tardío.

La Cuenca de México se ubica en el sector central de la FVT, esta cuenca tiene como límites naturales más sobresalientes a los siguientes elementos topográficos: al norte, la Sierra de Pachuca, con una altura máxima de 3,000 m; al noreste las Sierras de Chichucuatlán y del Tepozán, que limitan con la Sierra Madre Oriental; al este y al sureste, la Sierra Nevada, donde destacan en su porción septentrional los cerros Tláloc, Telapón y el Papayo, que sobrepasan los 3,500 m y en el meridional, el Iztaccíhuatl, de 5,286 metros de altura; el Popocatepetl, de 5,452 m al sur, la Sierra de Chichinautzin, cuya cumbre más alta es el Pico del Águila (3,952 m) en el Ajusco; al suroeste, la Sierra de la Cruces; al oeste, las Sierras de Monte Alto y Monte Bajo; y al noroeste, la Sierra de Tezontlalpan o Tolcayuca, que al conectarse con la de Pachuca, complementa el circuito (Figura 2.1).

En el interior de la cuenca se encuentran otras formaciones orográficas: al norte, la Sierra de Guadalupe, cuya mayor altura es el Cerro del Sombrero (3,000 m), que marca el extremo septentrional de la Ciudad de México; al este, la Sierra de Santa Catarina y la Caldera, el volcán de Xico y el Cerro del Pino, en la jurisdicción de Chalco; y dentro del perímetro urbano, el Peñón de los Baños, El Peñón del Marqués y el Cerro de la Estrella (Figura 2.1).

Lo que ahora constituye el Valle de México, antiguamente drenaba hacia el sur, donde las corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por las salidas de productos volcánicos a través de conos volcánicos que dieron origen a la Sierra de Chichinautzin, dejando el área del Valle de México sin drenaje al exterior, razón por lo que se acumuló agua en la parte central dando origen a los lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Chalco.

Los materiales que constituyen el subsuelo corresponden a intercalaciones de productos volcánicos tales como lavas, tobas y cenizas que incluyen materiales granulares transportados por ríos y arroyos provenientes de las partes topográficamente altas que circularon hacia los valles. Cubriendo a dichos materiales y en espesores variables, se encuentran arcillas y arenas finas que son el producto del sedimento de los antiguos lagos.

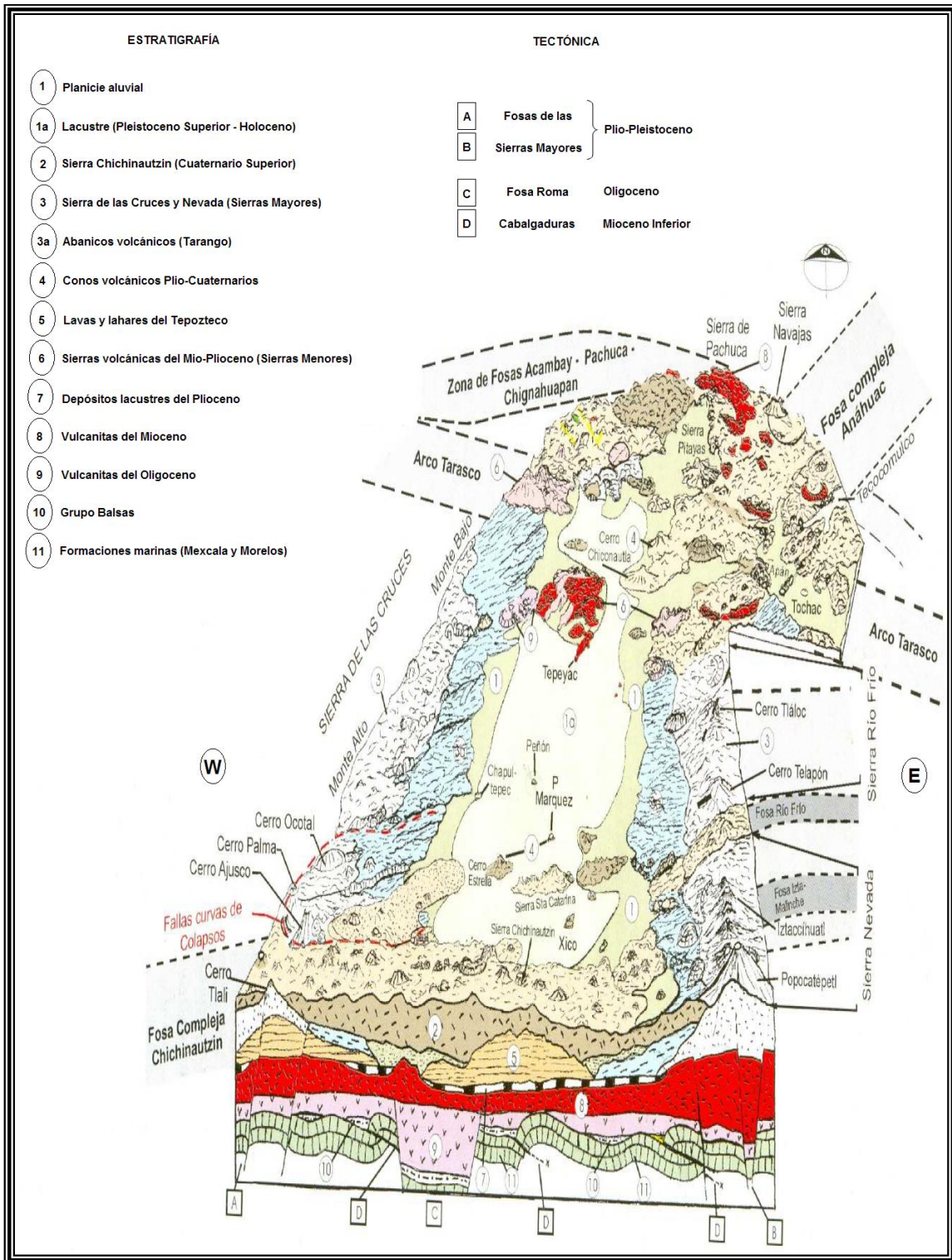


Figura 2.1. Bloque esquemático de los elementos topográficos y la estructura geológica de la Cuenca de México (Modificado de Santoyo, 2005).

2.1. ORIGEN DE LA CUENCA.

La Ciudad de México está situada en una planicie lacustre en la Cuenca de México, dicha cuenca ocupa un área de aproximadamente 9,600 km² situada a una altura promedio de 2,250 m sobre el nivel del mar. La Cuenca de México tiene un contorno irregular, alargado de norte a sur, de aproximadamente 125 km de largo y 75 km de ancho.

Es una cuenca endorreica de carácter lacustre, donde la corteza ha sufrido eventos geológicos que causaron diferentes sistemas de esfuerzos, produciéndose un intenso fracturamiento y fallamiento que afectaron a las rocas del subsuelo durante dos fases de deformación principales. La cuenca está circundada por elevaciones y cubierta en diferentes puntos por áreas lacustres. Al cerrarse la cuenca en el Cuaternario Superior, las aguas pluviales quedaron encajonadas, formando un conjunto de lagos someros. Podrían mencionarse hacia el centro el Lago de México, al este el de Texcoco, al sur los de Xochimilco y Chalco, que formaban uno solo y al norte el de Zumpango (Figura 2.2).

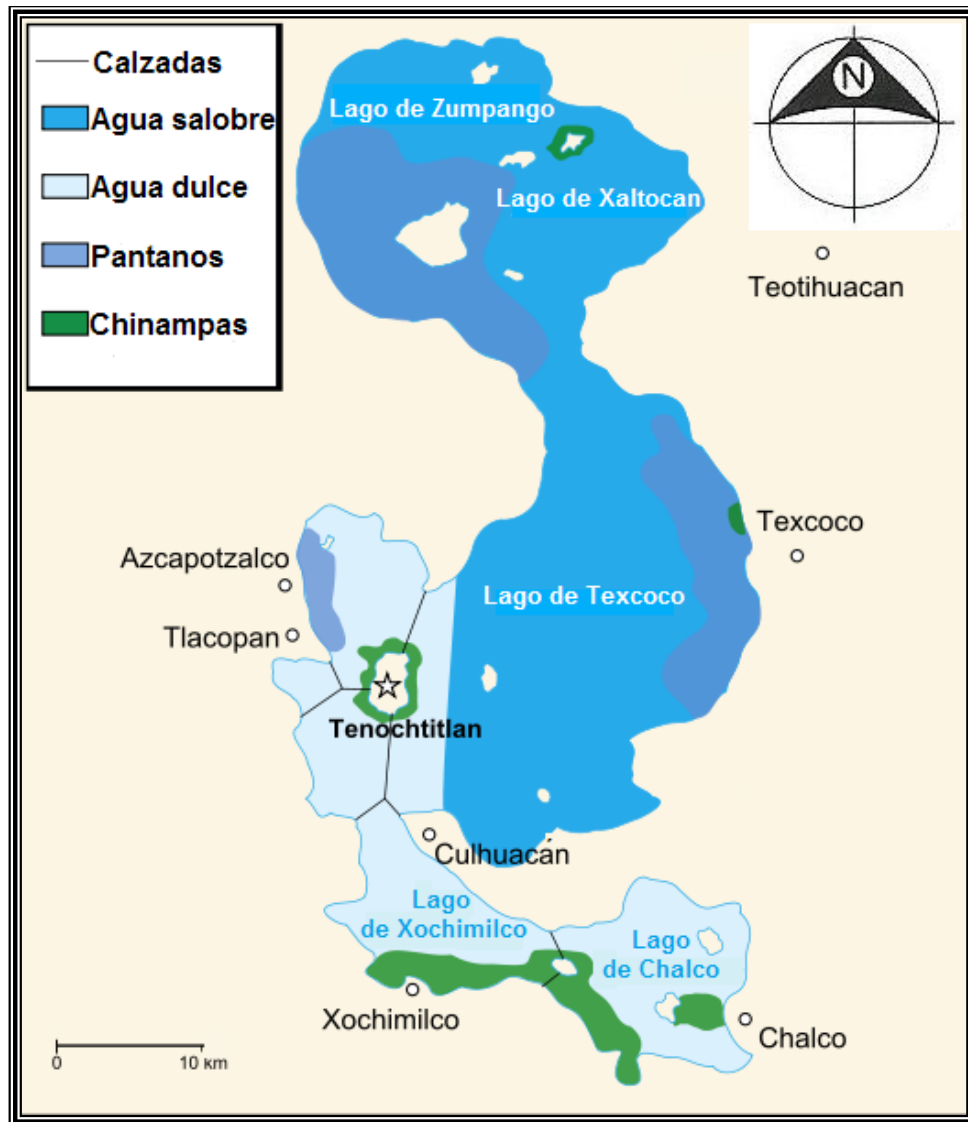


Figura 2.2. Ubicación de los lagos antiguos en la Cuenca de México.

El centro de la Cuenca es una planicie lacustre de 1,431 km², a una altitud que varía entre 2,230 y 2,240 msnm, y se mantiene seca artificialmente. El parteaguas de la cuenca se extiende por la zona montañosa circundante, la que se eleva por encima de los 3,000 msnm.

La Cuenca de México permaneció abierta (exorreica) hasta hace 700,000 años, cuando una gran actividad volcánica formó una enorme cortina natural: la Sierra de Chichinautzin, que cerró la cuenca (Mooser, 1963) y obstruyó el drenaje que alimentaba al Río Balsas. Está relacionado con los movimientos mayores de la placa tectónica continental de Norteamérica hacia el occidente y al suroccidente, y la oceánica de Cocos hacia el noreste. Este conjunto montañoso interrumpió el drenaje existente, debido a la acumulación de lavas que formaron una represa natural. Estas condiciones favorecieron la existencia de lagos y el asolvamiento paulatino de todo este territorio.

Por esta razón se almacenó agua y dio origen a varios lagos. Los ríos que descendían de las sierras circundantes depositaron sedimentos que formaron abanicos aluviales, materiales clásticos de muy diversos tamaños al confluir a dichos lagos. La parte central de la cuenca se fue llenando con materiales limo-arenosos, limo-arcillosos y emisiones de cenizas y pómez provenientes de los volcanes del sur. Al pie de las sierras y por el brusco cambio de pendiente de los ríos, acumularon sedimentos aluviales de composición muy variable, con estratos de espesor irregular, rellenos de canal y estratificación cruzada o lenticular, evidencia de una dinámica erosiva asociada a periodos de lluvia intensa.

El origen de la cuenca está íntimamente relacionado con el inicio y desarrollo de la FVT, para la que se tienen cuatro episodios principales de actividad volcánica, que corresponden con los siguientes eventos.

Arco del Mioceno Medio y Tardío.

Los inicios de la actividad volcánica en la FVT se remontan al Mioceno Medio, cuando un arco magmático con orientación aproximada E-W se emplaza en el centro de México, entre la longitud donde actualmente se ubica Morelia, Querétaro y las costas del Golfo de México en el Estado de Veracruz. Los vestigios de esta actividad inicial se encuentran en proximidad con el frente volcánico actual del sector central de la FVT, en los complejos volcánicos de la Sierra de Mil Cumbres y la Sierra de Angangueo, en Michoacán (Pasquaré *et al.*, 1991; Capra *et al.*, 1997), así como en el área de Tenancingo y Malinalco, Estado de México. También se tiene registro en las rocas volcánicas de la parte más profunda del subsuelo de la Cuenca de México (Ferrari *et al.*, 2003a). Posteriormente, el vulcanismo se aleja de la trinchera y forma estratovolcanes y conos de lava con edades que varían entre ~13 y 10 Ma. Entre éstos se encuentran el grupo de estratovolcanes Palo Huérfano, La Joya y Zamorano en Querétaro-Guanajuato (Carrasco *et al.*, 1989; Pérez *et al.*, 1996; Valdez *et al.*, 1998; Verma y Carrasco, 2003), el volcán Cerro Grande en Puebla (Carrasco *et al.*, 1997; Gómez y Carrasco, 2000), la Sierra de Guadalupe y varios centros volcánicos al noroeste de la Ciudad de México (Jacobo, 1986), así como el

campo volcánico de Apan (García *et al.*, 2002). Hacia el extremo oriental, en la región de Palma Sola, los vestigios de este episodio volcánico están representados por cuerpos plutónicos y subvolcánicos de composición gabroica a diorítica con edades que varían entre ~15 y 11 Ma (Gómez *et al.*, 2003; Ferrari *et al.*, 2005b).

Episodio máfico del Mioceno Tardío.

El vulcanismo de arco relativamente normal que se desarrolló durante el Mioceno Medio se ve interrumpido en el Mioceno Tardío cuando un extenso episodio de vulcanismo máfico se emplaza de costa a costa, desde Nayarit hasta Veracruz, inmediatamente al norte del arco precedente, con edades que se vuelven progresivamente más jóvenes de oeste a este (Ferrari *et al.*, 2000b; Ferrari, 2004; Ferrari *et al.*, 2005b). Este episodio está esencialmente conformado por mesetas basálticas, por lo general emplazadas a través de fisuras, con edades que varían entre ~11 y 8.9 Ma en la costa de Nayarit y al noroeste de Tepic (Righter *et al.*, 1995; Ferrari *et al.*, 2000a); entre ~11 y 8 Ma al norte de Guadalajara, en los Altos de Jalisco y en Cotija, Michoacán (Nieto *et al.*, 1981; Verma *et al.*, 1985; Moore *et al.*, 1994; Alva *et al.*, 2000; Rossotti *et al.*, 2002; Rosas *et al.*, 2003); y entre ~9 y 7 Ma en Querétaro y en el área de Pathé, Hidalgo (Pasquaré *et al.*, 1991; Suter *et al.*, 1995a; Aguirre y López, 2001).

Vulcanismo silíceo del final de Mioceno y vulcanismo bimodal del Plioceno Temprano.

Después del episodio de magmatismo máfico, el vulcanismo decrece significativamente y se vuelve más diferenciado. Hacia el final del Mioceno Superior y durante el Plioceno Temprano se emplazaron complejos de domos dacíticos y riolíticos, así como grandes volúmenes de ignimbritas emitidas por calderas regionales, formando una franja que se distribuye justo al sur de las rocas producidas en el episodio máfico anterior. Volúmenes importantes de coladas riolíticas e ignimbritas se emplazaron entre Santa María del Oro y Plan de Barrancas (Ferrari *et al.*, 2000a), en la parte oeste de la FVT; mientras que entre la Presa de Santa Rosa y San Cristóbal, al norte de Guadalajara (Ferrari *et al.*, 2000a; Rossotti *et al.*, 2002), dominan los complejos de domos exógenos y algunos flujos piroclásticos. Estas rocas tienen edades comprendidas entre 7.5 y ~3 Ma (Gilbert *et al.*, 1985; Rossotti *et al.*, 2002; Ferrari *et al.*, 2003b; Frey *et al.*, 2004) y prácticamente representan el único vestigio de actividad volcánica en la parte oeste de la FVT hasta los ~5 Ma. En la porción central de la FVT dominan las grandes calderas que producen tobas pumicíticas e ignimbritas con volúmenes de decenas de kilómetros cúbicos que se distribuyen sobre una superficie de varios miles de kilómetros cuadrados. Dentro de las más notables se encuentran las calderas de Amazcala (7.3-6.6 Ma; Aguirre y López, 2001), Amealco (4.7 Ma; Aguirre y McDowell, 2000), Huichapan (4.7-3.4 Ma; Aguirre *et al.*, 1997), Los Azufres (~6-3 Ma; Ferrari *et al.*, 1991; Pradal y Robin, 1994), Zitácuaro (Mioceno superior-Plioceno

temprano; Capra *et al.*, 1997), Apaseo y Los Agustinos (Plioceno temprano; Aguirre *et al.*, 1997).

Arco del Plioceno Tardío-Cuaternario.

En casi toda la FVT el vulcanismo silíceo y bimodal se ve reemplazado por un arco volcánico de composición predominantemente andesítico-basáltica que comienza a desarrollarse a partir del límite del Plioceno Temprano y el Plioceno Tardío. En la porción occidental de la FVT, las lavas con características intraplaca siguen emplazándose a partir de 3.6 Ma, pero también existen lavas con características más típicas de subducción en la parte noroccidental del arco (Richter *et al.*, 1995; Ferrari *et al.*, 2000a).

A partir del Plioceno Tardío, el frente volcánico está dominado por campos de volcanes monogenéticos (Wallace y Carmichael, 1989; Lange y Carmichael, 1990; Lange y Carmichael, 1991; Richter y Carmichael, 1992; Carmichael *et al.*, 1996). Es también durante el Cuaternario que se construyen los principales estratovolcanes de la FVT occidental. El complejo volcánico de Colima, emplazado en la terminación meridional del rift homónimo, representa por mucho el mayor volumen de material volcánico emplazado en la región (~700 km³; Robin *et al.*, 1987). El resto de los estratovolcanes tienen volúmenes menores a los 100 km³ (Tequila, Ceboruco, Tepetitlic, Sangangüey, Las Navajas y San Juan), y se alinean a lo largo de fallas regionales de orientación WNW-ESE que definen la frontera norte del bloque Jalisco.

Hacia la porción central de la FVT, el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) cubre una extensa región entre el Lago de Chapala y el Estado de Querétaro. El vulcanismo comienza hacia los ~2.8 Ma y continúa activo hasta nuestros días, como ocurre con los volcanes Jorullo y Parícutin. Este campo volcánico incluye más de 1,000 conos monogenéticos y, en menor medida, domos de composición intermedia a silíceo (Hasenaka y Carmichael, 1985). El único estratovolcán del campo es el Cerro Tancítaro, que ha sido fechado en ~0.5 Ma (Ban *et al.*, 1992). Si se excluye a los basaltos alcalinos de la región de Palma Sola y a la secuencia bimodal de Pachuca-Tlanchinol, el vulcanismo de la porción oriental de la FVT experimenta un hiato que cubre el final del Mioceno y todo el Plioceno Temprano. El vulcanismo se restablece a los ~3.7 Ma con el emplazamiento de diferentes centros poligenéticos alineados NNW-SSE, formando la Sierra de las Cruces, al occidente de la Ciudad de México (Mora *et al.*, 1991; Osete *et al.*, 2000), y algunos centros poligenéticos medianos del campo volcánico de Apan, ubicado al norte de la Cuenca de México (García *et al.*, 2002). Sin embargo, la mayor parte del vulcanismo del sector oriental de la FVT se desarrolla durante el Cuaternario.

El vulcanismo máfico se concentra en los conos monogenéticos de los campos de la Sierra de Chichinautzin (Martín, 1982; Márquez *et al.*, 1999c; Siebe *et al.*, 2004b) y Apan (García *et al.*, 2002); y en la región del Pico de Orizaba y Cofre de Perote (Siebert y Carrasco, 2002).

Al oriente de la Ciudad de México se desarrolla la Sierra Nevada que corresponde con una cadena volcánica con orientación N-S constituida por el Cerro Tláloc, el complejo volcánico Iztaccíhuatl y el volcán Popocatepetl, con edades que se vuelven progresivamente más jóvenes hacia el sur (Nixon, 1989). Más al oriente se encuentra el volcán La Malinche y el alineamiento aproximado N-S del Pico de Orizaba-Cofre de Perote (Carrasco y Ban, 1994). Aparentemente, todos los estratovolcanes de esta parte de la FVT tienen edades menores a 1 Ma.

Los principales eventos geológicos que han afectado a la Cuenca de México, desde el Mesozoico al Reciente, se pueden sintetizar de la siguiente forma:

- Depósito de aproximadamente 2,000 m de espesor de calizas, areniscas y lutitas en un ambiente marino con cambios de batimetría durante el Cretácico.
- Plegamiento y fallamiento inverso de las rocas marinas durante el Cretácico Tardío y Cenozoico Temprano. Deformación con extensión que dio origen a un sistema estructural regional con un graben principal centrado en la Cuenca de México durante el Cenozoico Temprano (Fries, 1960; Marín *et al.*, 1986; De Cserna *et al.*, 1988).
- Depósito de sedimentos volcánicos, fluviales y lacustres en el graben durante el Plioceno-Eoceno.
- Depósito de flujos de lava y materiales piroclásticos durante el Oligoceno, Mioceno y Pleistoceno.
- Depósito de abanicos aluviales y de deslizamientos por gravedad en las regiones del este y oeste de la cuenca, durante el Plioceno superior y el Pleistoceno (Arellano, 1953; Fries, 1960; Schlaepfer, 1968).
- Erupciones volcánicas de basalto y pómez durante el Pleistoceno, en la parte central y sur de la cuenca. Las más importantes efusiones del Cinturón volcánico del Chichinautzin, lo que causó el cierre de la cuenca (Fries, 1960; Mooser, 1963).
- Desarrollo del ambiente lacustre como una consecuencia del cierre de la cuenca (De Cserna *et al.*, 1988).

2.2. ESTRATIGRAFÍA.

En la zona que ocupa la Ciudad de México no existen afloramientos extensos, a excepción de algunos cuerpos volcánicos aislados y lo que aflora en las sierras que la rodean, por lo que la geología del subsuelo se obtuvo de diferentes estudios, los cuales consideraron la interpretación de cortes litológicos de pozos perforados en el Valle de México; pozos perforados por el Departamento del Distrito Federal (DDF), por la Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento del Estado de México (CAEM), además de las perforaciones exploratorias profundas de PEMEX (PEMEX 1988).

La descripción de la estratigrafía se realizó de la formación más antigua a la más reciente. Para fines de este trabajo se incluyen en la estratigrafía regional de la Cuenca de México un total de 23 formaciones, divididas en 6 unidades generales. Dichas unidades son: Unidad Sedimentaria Marina, Grupo Balsas, Unidad Volcánica Inferior, Unidad Volcánica Superior (Grupo Tarango), Cuaternario Volcánico y Cuaternario Sedimentario (Tabla 2.1).

Cretácico.

Este Periodo comprende a lo que en el presente trabajo se denomina Unidad Sedimentaria Marina (Tabla 2.1).

Unidad Sedimentaria Marina.

Es la unidad más antigua del área (Tabla 2.1), se compone de rocas sedimentarias marinas y comprende a las formaciones Xochicalco (Kx), Morelos (Km), Cuautla (Kc) y Mexcala (Kmx), las que se describen a continuación de la más antigua a la más reciente. A este conjunto de unidades se le asigna una edad que se ubica entre el Aptiano y el Maestrichtiano.

Formación Xochicalco (Kx).

La Formación Xochicalco (Fries, 1960), es la unidad más antigua reconocida y descrita en el subsuelo del área. "A esta se le ha asignado un espesor que excede los 500 m, su base y cima no están expuestas y está cubierta discordantemente por la Formación Morelos. Está constituida por una secuencia de calizas principalmente arcillosas y limosas, en capas de delgadas a medianas que presentan laminación fina, contenido carbonoso variable y abundantes vetillas de calcita; preferentemente hacia la cima aumenta el contenido de capas laminares y nódulos de pedernal. La Formación Xochicalco se depositó durante el Aptiano en ambientes marinos de cuenca relativamente profunda" (Fries, 1960, *op. cit.*).

Era	Edad	Unidad	Formación	Litología	Ambiente de depósito	
Cenozoico	Pleistoceno Tardío - Holoceno	Cuaternario Sedimentario (Qs)	Depósitos aluviales (Qal)	Sedimentos clásticos y piroclásticos, arcillas, ceniza y pómez	Lacustre	
	Pleistoceno - Holoceno		Depósitos lacustres (Qla)	Fluvial		
	Pleistoceno Tardío - Holoceno		Formación Chichimautzin (Qc)	Lavas andesítico-basálticas y andesíticas	Volcánico	
	Pleistoceno Tardío - Holoceno		Formación Popocatepetl (Qp)	Secuencias eruptivas, andesitas, pómez, cenizas y piroclastos	Volcánico	
	Pleistoceno Medio	Cuaternario Volcánico (Qv)	Formación Iztaccihuatl (Qi)	Derribes lávicos	Volcánico	
	Pleistoceno		Formación Tláloc (Qt)	Coladas lávicas, pómez y líticos	Volcánico	
	Pleistoceno		Formación El Pino (Qpp)	Flujos lávicos, tefra, cenizas, lapilli y escoria	Volcánico	
	Pleistoceno Temprano (Cuaternario)		Formación Llano Grande (Qllg)	Lapilli, flujos de cenizas, brechas y derrames lávicos	Volcánico	
	Plioceno	Unidad Volcánica Superior - Grupo Tarango (Qt)	Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc)	Tobas, brechas volcánicas, aglomerados, conglomerados, arenas y arcillas	Volcánico	
	Plioceno Tardío		Riolita Navajas (Tpn)	Derrames lávicos	Volcánico	
	Plioceno Tardío		Formación Zempoala (Tpz)	Derrames de lava, capas volcánoclasticas y lahares	Volcánico	
	Plioceno Tardío		Formación Las Cruces (Tpc)	Depósitos piroclásticos, pómez, cenizas y material aluvial	Volcánico	
	Plioceno Tardío - Pleistoceno Temprano	Unidad Volcánica Inferior	Rocas Volcánicas Máficas del Plioceno Tardío (Tpb)	Derrames lávicos, brechas volcánicas y piroclastos	Volcánico	
	Plioceno Tardío		Formación Otomi (Tpo)	Depósitos piroclásticos	Volcánico	
	Plioceno Temprano		Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv)	Tobas cristalinas, vitreas, líticas y pumíticas	Volcánico	
	Mioceno Medio - Mioceno Tardío		Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Trmv)	Tobas, brechas volcánicas y lavas	Volcánico	
	Oligoceno - Plioceno		Grupo Pachuca (Tomo)	Brechas volcánicas, piroclastos, derrames lávicos y tobas	Volcánico	
	Oligoceno Tardío - Mioceno Temprano		Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Tomv)	Depósitos piroclásticos, tobas líticas, cristalinas y vitreas	Volcánico	
	Mesozoico	Eoceno Tardío - Oligoceno Temprano	Unidad Sedimentaria Marina	Grupo Balsas (Teob)	Conglomerado oligomictico calcáreo	Continental fluvial y de talud
		Turoniano - Maestrichtiano		Formación Mexcala (Kmx)	Turbiditas, limoltas y lutitas	Manto de plataforma
		Cenomaniano Tardío - Turoniano Tardío		Formación Cuatula (Kc)	Calcarentas	Manto de plataforma
		Albiano Medio - Cenomaniano		Formación Morelos (Km)	Calizas y dolomitas	Manto de plataforma
		Aptiano		Formación Xochitcalco (Kx)	Calizas arcillosas y limosas	Manto de cuenta

Tabla 2.1. Tabla estratigráfica.

Formación Morelos (Km).

La Formación Morelos (Fries, 1960) aflora al sur de la Sierra Chichinautzin, “se caracteriza por un espesor máximo de 900 metros, los que se adelgazan al oriente y poniente” (Fries, 1960, *op. cit.*). En los pozos exploratorios Mixuca-1 y Tulyehualco-1 (PEMEX, 1988, *op. cit.*), a profundidades de 2,060 m y 2,160 m, respectivamente se cortó a esta unidad con espesores incompletos de 410 m y 650 m; se reporta que corresponde con la Formación Morelos, ya que contiene microfósiles *Nummoloculina heimi* y *Dycyclina schlumbergeri*, los cuales son idénticos a los reportados por Fries (1960, *op. cit.*). “En donde aflora, descansa discordantemente encima de la Formación Xochicalco y está cubierta mediante una discordancia erosional por las formaciones Cuautla y Mexcala, y por discordancia angular por unidades más recientes. Esta formación constituye una interestratificación de capas gruesas de calizas y dolomías diagenéticas, concordantes a una secuencia de anhidritas laminares subyacentes” (Fries, 1960, *op. cit.*).

De acuerdo con Fries (1960, *op. cit.*) la edad tanto de la base como de la cima de esta formación es variable en sus distintas localidades, debido a que esta unidad por un lado fue depositada sobre una superficie irregular y por otro a la erosión que sufrió principalmente en la parte superior, sin embargo, menciona que la presencia de *Nummoloculina heimi* y *Dycyclina schlumbergeri* permiten ubicar a esta unidad dentro del Albiano Medio al Cenomaniano. Fries (1962) menciona que probablemente esta unidad se interdigita hacia el norte en el subsuelo con rocas equivalentes a la Formación El Doctor.

Formación Cuautla (Kc).

Esta formación fue propuesta por Fries (1960), quien describe facies de cuenca, de banco y de litoral del Cenomaniano Tardío al Turoniano Tardío. Las facies de banco afloran al sur de la Sierra Tepoztlán a una altitud promedio de 1,500 msnm y al norte de Zumpango a una elevación promedio de 2,400 msnm.

Los pozos Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 (PEMEX, 1988, *op. cit.*) penetraron la Formación Cuautla a profundidades de 1,575 m y 2,100 m respectivamente, las cuales contienen a los microfósiles *Dicyclina s.p.* y *Valvulomina s.p.* (PEMEX, 1988, *op. cit.*), son de aguas someras (Loeblich y Tappan, 1964). Según Fries (1966, *op. cit.*) “los espesores varían entre 200 m y 750 m y está conformada por calizas principalmente calcarenitas de estratificación gruesa, con abundantes biostromas de rudistas. Es concordante con la Formación Mexcala suprayacente y está cubierta discordantemente por el Grupo Balsas y por rocas volcánicas del Cenozoico y Cuaternario”.

Formación Mexcala (Kmx).

Denominada por Fries (1960) y descrita con detalle en la localidad tipo, cercana al pueblo y al Río Mexcala, por Bohnenberger (1955); se distribuye preferentemente en zonas de sinclinales, también aflora al sur de la Sierra Chichinautzin y en el cerro La Palma al noreste de la Cuenca de México. “El espesor máximo es de 1,500 m y constituye una interestratificación gradual rítmica de grauvacas, limolitas y lutitas (turbiditas)”, (Fries, 1960, *op. cit.*). En el pozo Mixhuca-1 (PEMEX, 1988, *op. cit.*) a profundidades entre 1,720 m y 1,850 m, se considera la existencia de esta unidad, ya que las calizas arcillosas encontradas en este nivel contienen microfósiles *Margino-truncana* s.p. y *Archeoglobigerina* s.p. (PEMEX, 1988, *op. cit.*), las cuales son del Turoniano-Maestrichtiano (Loeblich y Tappan, 1964, *op. cit.*).

La Formación Mexcala corresponde con una secuencia turbidítica que se depositó en el Coniaciano-Campaniano (Fries, 1960, *op. cit.*) y representa una secuencia de aguas relativamente profundas (De Cserna, 1988), que tuvo origen como posible consecuencia del levantamiento y erosión del arco magmático del Cretácico, localizado en ese entonces en el borde occidental del continente (Damon *et al.*, 1981).

Cenozoico.

En esta Era se tienen a cinco unidades estratigráficas, que corresponden con: Grupo Balsas, Unidad Volcánica Inferior, Unidad Volcánica Superior (Grupo Tarango), Cuaternario Volcánico y Cuaternario Sedimentario (Tabla 2.1).

Grupo Balsas (Teob).

Está formado por un conglomerado oligomítico calcáreo. Se le asigna una edad que se ubica entre el Eoceno Tardío y el Oligoceno Temprano (Tabla 2.1).

Este grupo está formado por depósitos continentales del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano (Fries, 1960); afloran al sur de la cuenca y localmente al noreste de Apaxco, Hidalgo. Consta de un conglomerado oligomítico calcáreo generalmente compacto, con matriz limo-arcillosa cementada por calcita y óxido de hierro, de estratificación masiva; el espesor máximo de la unidad es de 500 m. Los estratos conglomeráticos se interdigitan y están cubiertos por una secuencia de 800 m a 2,000 m de espesor, formadas por capas deleznable de lutita, limolita y areniscas; localmente estos depósitos clásticos contienen interestratificaciones de yeso y caliza lacustres lenticulares, además de derrames lávicos basálticos y en la parte superior se presentan intercalaciones de toba riolítica (Fries, 1960, *op. cit.*).

Fries (1960, *op. cit.*) menciona que este grupo descansa discordantemente encima de las formaciones del Cretácico, y sugiere que tanto la Riolita

Tilzapotla como las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano cubren discordantemente al Grupo Balsas. La distribución espacial y temporal del Grupo Balsas representa un depósito continental fluvial y depósitos de talud en laderas de fuerte pendiente (De Cserna *et. al.*, 1988), es una unidad post-orogénica Laramide, la cual se acumuló simultáneamente con fallamiento normal y lateral derecho; también hubo vulcanismo basáltico probablemente fisural. Es importante mencionar que el Grupo Balsas aflora al sureste en la Cuenca de México.

Unidad Volcánica Inferior.

Esta unidad se compone de rocas volcánicas y comprende a las siguientes formaciones: Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío - Mioceno Temprano (Tomv), Grupo Pachuca (Tomp), Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv), Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv), Formación Otomí (Tpo), Rocas Volcánicas Máficas del Plioceno Tardío (Tpb), Formación Las Cruces (Tpc), Formación Zempoala (Tpz), Riolita Navajas (Tpn), Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc), las cuales se describen a continuación de la más antigua a la más reciente. Se le asigna una edad que se ubica entre el Oligoceno Tardío y el Plioceno Tardío (Tabla 2.1).

Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío - Mioceno Temprano (Tomv).

Se agrupan con este nombre las secuencias volcánicas que por sus características líticas, relaciones estratigráficas y edad, se diferencian de las rocas del Mioceno Medio-Tardío. Dentro de este conjunto de rocas se incluye por su posición estratigráfica a la Riolita Tilzapotla (Fries, 1960) que aflora fuera de la Cuenca de México, en el extremo suroccidental. La secuencia, donde aflora, está profundamente erosionada y fracturada en los cerros Picacho y Pulpito del Diablo y en otras localidades con afloramientos pequeños. Este grupo de rocas tiene espesores variables entre 390 m y 1,750 m, cuya composición varía de andesítica a riódacítica.

Se compone de una secuencia de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados. Los depósitos piroclásticos de la parte superior, se presentan interestratificados y/o cubiertos por derrames lávicos. La secuencia volcánica contiene algunas intercalaciones de capas de clásticos aluviales con espesores de hasta 6 m, lo que indica tiempo de reposo en la actividad volcánica donde ocurrió erosión y depósito clástico. Los flujos lávicos son de textura fina a media y algunos de ellos tienen buena estructura fluidal y xenolitos serpentinizados.

Los derrames lávicos son porfiríticos–holocristalinos-hipidiomórficos, con fenocristales de andesina, oligoclasa, sanidino, cuarzo, augita e hiperstena, que yacen en una matriz compuesta por micro-intercrecimientos de feldespato y cuarzo, con ilmenita acicular, magnetita, apatito y zircón intergranulares.

En el subsuelo de la Cuenca de México estas rocas volcánicas cubren localmente en forma discordante a unidades cretácicas y, son discordantes al Grupo Balsas subyacente; también se encuentran cubiertas discordantemente por rocas volcánicas del Mioceno Medio y Tardío y localmente por formaciones del Plio-Cuaternario.

Grupo Pachuca (Tomp).

Definido como Grupo por Segerstrom (1961), es una secuencia que representa la actividad volcánica desde el Oligoceno hasta el Plioceno. Por este amplio rango de edad, se incluyen en él, a las rocas volcánicas correspondientes tanto al arco magmático de la parte superior de la Sierra Madre Occidental como los de la base de la Faja Volcánica Transmexicana; se compone de ocho formaciones (Geyne *et al.*, 1963). Se encuentra localizado únicamente en la región del Distrito Pachuca–Real del Monte y sus zonas adyacentes; la suma total de los espesores máximos es de 3,700 m (Geyne *et al.*, 1963, *op. cit.*).

Consiste de una secuencia de material vulcanoclástico en la base, brechas volcánicas, piroclásticos, derrames lávicos y tobas intercaladas, separados por discordancias. Las lavas varían en composición de basalto a riolita, pero predominan la andesita y la dacita. Las dos formaciones inferiores (Santiago y Corteza) consisten en riolitas, dacitas y andesitas que por sus características texturales y posición estratigráfica se consideran como correspondientes al arco magmático del Cenozoico Medio (Damon, 1981, *op. cit.*).

Las formaciones que constituyen la mayor parte del espesor del grupo y que tienen grandes afloramientos (formaciones Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis y Vizcaína), consisten en sucesiones de derrames lávicos de composición andesítica y dacítica, interestratificados con brechas volcánicas y tobas, separadas por suelos que podrían indicar diferentes secuencias volcánicas correlacionables en edad con las rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío.

Las formaciones superiores del Grupo Pachuca (Cerezo y Tezuantla) se constituyen de brechas volcánicas, lavas y depósitos piroclásticos de composición que varía de dacítica a riolítica. Tomando en cuenta la discordancia existente entre estas rocas con las unidades volcánicas más antiguas y las características de las rocas, se considera que posiblemente son contemporáneas de las rocas volcánicas del Plioceno Temprano y que la edad de este grupo puede quedar como originalmente se había establecido, del Oligoceno Medio-Tardío al Plioceno Temprano.

Este grupo solo aflora al Norte de la Cuenca de México y se encuentra en contacto discordante con las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano; sin embargo los productos piroclásticos tienen una distribución más amplia, por lo que es posible que se encuentren en el subsuelo del sector norte del Distrito Federal.

Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv).

Se les llama así a las rocas volcánicas que difieren en composición litológica y posición estratigráfica con respecto a las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. Sus afloramientos se distribuyen en gran parte de la cuenca en áreas pequeñas, en la mayoría de los casos se encuentran cubiertas por los materiales volcánicos más recientes. En la porción sur de la cuenca se encuentran principalmente en los cerros El Elefante, El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños, la base de la Sierra Guadalupe, la base de la Sierra de las Cruces, El cerro Patlachique y en algunos otros afloramientos en el norte de Texcoco. En el norte se encuentran ampliamente distribuidas en pequeños afloramientos, de los que se destaca la base de la Sierra Tepoztlán. Se incluyen también aquí, por posición estratigráfica y edad, los depósitos de la Formación Tepoztlán (Fries, 1960) de la sierra del mismo nombre y la andesita Jalpan (Segerstrom, 1961), de los cerros Jalpan y Zincoque.

Es una secuencia volcánica que está constituida por tobas, brechas volcánicas y derrames de lavas; estas últimas en algunos lugares se encuentran interestratificadas con brechas volcánicas. Los derrames observados corresponden con andesitas de lamprobolita o de augita, de textura principalmente porfirítica-afanítica, hipidiomórfica-merocristalina, con andesina, lamprobolita, feldspatos, augita, piroxenos y anfíboles como minerales esenciales, y magnetita, ilmenita, clorita, calcita, cuarzo y apatito como accesorios en una mesostasis microlítica-pilotaxítica en ocasiones propilitizada (Vázquez y Jaimes, 1989). Se han identificado también dacitas de textura porfirítica-afanítica hipidiomórfica-mesocrática con oligoclasa, cuarzo, anfíboles, piroxenos e ilmenita, magnetita, apatito y circón, como minerales accesorios en una mesostasis microlítica. También contiene tobas cristalinas andesíticas y andesitas, las primeras son de textura clástica con andesina, relictos de anfíbol y magnetita en una matriz desvitrificada; las segundas son andesitas de hiperstena de textura afanítica-porfirítica, panidiomórfica-mesocrática, con andesina, hiperstena y augita, como minerales esenciales en una mesostasis pilotaxítica.

En el subsuelo del sector sur de la Cuenca de México, esta unidad se distribuye ampliamente, además de que se le ha encontrado en los pozos Texcoco-1, Roma-1, Tulyehualco, Mixhuca-1 y Copilco-1, con una profundidad promedio de 900 m. De acuerdo con los numerosos fechamientos isotópicos que se le han hecho a esta unidad, se le ha asignado un rango de edad del Mioceno Medio al Mioceno Tardío. Estas rocas cubren con discordancia a las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano; a la secuencia del Grupo Balsas y a las rocas cretácicas. Por su parte, se encuentran cubiertas por las unidades pliocénicas, con discordancia y en ocasiones por unidades del Cuaternario.

Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv).

Es un conjunto de rocas ígneas extrusivas que representan un segundo periodo magmático de la FVT, localmente afloran en los flancos de las Sierras

Las Cruces, Zempoala y Río Frío, y en cerros aislados en el resto de la cuenca; también coronan las Sierras de Guadalupe y Tepetzotlán; por otra parte, los afloramientos exponen espesores del orden de 650 m. Sobreyacen con discordancia a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno y están cubiertas de la misma forma por unidades volcánicas del Plioceno Tardío y Cuaternario.

La composición de estas rocas varía de andesítica a dacítica, y cuando son piroclastos, generalmente no son consolidados; contiene tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas, las cuales se encuentran cubiertas por intercalaciones de derrames lávicos, algunos autobrechados, con brechas de flujo. Los flujos lávicos más máficos tienen exfoliación regular horizontal con vesículas alargadas en dirección del derrame; los más ácidos tienen incipiente estructura fluidal y los domos presentan bandeamiento fluidal irregular. Generalmente las lavas son de textura fina a media, porfiríticas-mesocráticas-hipidiomórficas, con fenocristales de labradorita, bitownita, andesina, oligoclasa, cuarzo, olivino, lamprobolita, augita, pigeonita e hisperstena, que yacen en mesostasis pilotaxítica e intergranular.

Las relaciones estratigráficas que presenta sugieren una edad tentativa del Plioceno Temprano para este grupo de rocas volcánicas.

Formación Otomí (Tpo).

Se agrupa de esta manera a los productos volcánicos emitidos durante la parte más temprana del Plioceno Tardío, que se encuentran al occidente de la Cuenca de México, en lo que se conoce como Sierra de Monte Alto. Se le asignan como secciones de referencia los cortes en la carretera que se dirige al centro ceremonial Otomí, del que toma su nombre esta unidad.

La secuencia está formada en su mayor parte por depósitos piroclásticos, que se presentan como flujos lobulados, los cuales en comparación con los que se encuentran en otras unidades de la cuenca, son los que más se extienden. Se deduce que existen varias secuencias volcánicas dentro de esta unidad, en la que predominan los flujos piroclásticos, principalmente los de ceniza. Las lavas de esta unidad se encuentran únicamente aflorando en las regiones altas de la Sierra de Monte Alto, en las que se caracterizan por presentar intercalaciones con brechas, las cuales presentan textura porfídica en los derrames de mayor consistencia que son los que más afloran. El espesor máximo que se le estima a esta unidad es de 1,300 m en el cerro Las Palomas. Esta unidad cubre discordantemente a las rocas volcánicas del Plioceno Temprano y se encuentra cubierta discordantemente por la Formación Las Cruces, del Plioceno Tardío; por lo tanto y con base en sus relaciones estratigráficas, se le considera una edad del Plioceno Tardío.

Rocas Volcánicas Máficas del Plioceno Tardío (Tpb).

Se compone de rocas máficas cuyos afloramientos se encuentran ampliamente distribuidos en la región septentrional de la cuenca formando mesetas de lava y

conos aislados, originalmente fueron llamadas Grupo San Juan por Segerstrom (1961) y posteriormente nombradas rocas volcánicas máficas sin nombre, por Fries (1962). Posteriormente, Cantagrel y Robin (1979) relacionaron a estas rocas con otras mesetas máficas y lavas no diferenciadas que afloran en Guanajuato y Jalisco, las cuales se consideran como típicas de la parte septentrional del vulcanismo Plio-Cuaternario de la FVT. Se incluye en esta unidad a la Formación San Cristóbal (Geyne *et al.*, 1963).

Estas rocas están constituidas por derrames lávicos interestratificados, en ocasiones, con capas de poco espesor de brechas volcánicas y/o con piroclastos cuya composición varía de basáltica a andesítica. Geyne *et al.* (1963, *op. cit.*) reportan la presencia de tridimita y cristobalita en las vesículas. Al conjunto de rocas Plio-Cuaternarias del norte de la FVT se le ha asignado una edad entre 2.5 y 1.5 Ma, a partir de fechamientos isotópicos (Cantagrel y Robin, 1979, *op. cit.*), por lo que su edad quedaría dentro del Plioceno Tardío a la parte más temprana del Pleistoceno. El espesor máximo reportado en la región de Pachuca no sobrepasa los 300 m (Geyne *et al.*, 1963 *op. cit.*).

Dichas rocas máficas yacen discordantemente sobre las unidades cenozoicas anteriores. “En algunos sitios cubren discordantemente a las rocas mesozoicas, con marcada discordancia angular y erosional” (Fries, 1960, *op. cit.*).

Formación Las Cruces (Tpc).

Schlapfer (1968) designó como Formación Las Cruces “al conjunto de rocas volcánicas que forma las Sierras de Las Cruces y Monte Alto”. Depósitos piroclásticos congénitos de las secuencias efusivas de la Formación Las Cruces, fueron definidos sin cartografiar por Bryan (1948) como Formación Tarango, en los afloramientos que se tienen a 4 km al suroeste de Mixcoac; posteriormente, Segerstrom (1961), extendió la Formación Tarango y la correlacionó con la Formación Atotonilco el Grande, del Plioceno (Segerstrom, 1961, *op. cit.*), para referirse a secuencias aluviales con productos piroclásticos del norte de la Cuenca de México, los cuales no se relacionan genéticamente con los depósitos de la Formación Tarango.

Esta formación se distribuye en el límite sudoccidental de la Cuenca de México, en donde se tienen tres estratovolcanes alineados, junto con sus depósitos piroclásticos, con una orientación NNW a SSE y dividen la Cuenca de México y del Río Lerma. La localidad tipo se encuentra en “... la parte inferior de la barranca del Río Magdalena, al poniente de Contreras” (Schlaepfer, 1968, *op. cit.*), como secciones de referencia adicionales se tienen a los afloramientos expuestos en el tramo Desierto de los Leones-La Marquesa; los afloramientos de la carretera Naucalpan-Jiquipilco y los afloramientos de flujos piroclásticos que corta la carretera Naucalpan-Cuajimalpa.

Los depósitos piroclásticos pertenecientes a esta unidad consisten en pómez tipo pliniana, cubiertos por flujos piroclásticos generalmente no soldados de cenizas cristalinas, vítreas y de pómez con o sin fragmentos y bloques accidentales; en la mayoría de los casos de composición heterogénea. Los

flujos piroclásticos están cubiertos a su vez por cenizas vítreas, los cuales en algunos casos se encuentran cubiertos o interestratificados con material aluvial y paleocanales fluviales. Los derrames se encuentran intercalados con brechas en las partes altas de la Sierra de Las Cruces, en algunos casos culminadas con domos; se componen de andesita de pigeonita o de lamprobolita, de textura afanítica-porfirítica, panidiomórfica o hipidiomórfica-mesocrática con andesina, pigeonita o hiperstena y augita como minerales esenciales, en una mesostasis pilotaxítica de microlitos de plagioclasa con magnetita y criptofelsita; también contiene dacitas de lamprobolita o de pigeonita de textura afanítica-porfirítica, hipidiomórfica-holocristalina o mesocrática, con oligoclasa, andesina, cuarzo, pigeonita o lamprobolita, e hiperstena, como minerales esenciales en una mesostasis que es criptofélsica o pilotaxítica, con magnetita, ilmenita y apatito como minerales accesorios. Se ha reportado también una brecha lítica andesítica originada por un flujo piroclástico, la cual consiste en fragmentos líticos (accidentales) de andesita porfirítica, cuyo tamaño varía de lapilli a bloques; en la matriz cloritizada y desvitrificada existen fragmentos de andesina, pómez, hornblenda alterada y escasos microlitos de plagioclasa.

El espesor máximo de esta unidad es de 990 metros y cubre por discordancia erosional las rocas extrusivas del Mioceno Medio y Mioceno Tardío y a las rocas volcánicas del Plioceno Temprano; se encuentra cubierta, a su vez, por depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario, así como también por derrames lávicos y piroclásticos de las Formaciones Chichinautzin y El Pino. Su edad corresponde al Plioceno Tardío.

Esta formación es el producto de tres estratovolcanes alineados en una dirección norte-sur, cuyas características morfológicas y variación de edades de lo más antiguo a lo más reciente, de norte a sur, podrían indicar una migración del volcanismo en la dirección mencionada. Tomando en cuenta lo anterior, podría considerarse este volcanismo como representativo del Plioceno Tardío en la Cuenca de México.

Formación Zempoala (Tpz).

Fries (1960) definió la “Andesita Zempoala” como una interestratificación de derrames de lava, capas volcanoclásticas y lahares, todos de composición andesítica, dacítica y riodacítica.

Schlaepfer (1968) cambió el término descriptivo a la Formación Zempoala, debido a las características líticas de esta unidad. Esta formación es el conjunto de productos volcánicos de dos centros eruptivos alineados en dirección norte-sur, que se encuentran en la porción suroccidental de la Cuenca de México y que de acuerdo con sus características morfológicas, posición estratigráfica y características litológicas, son posiblemente contemporáneos del volcanismo de la Formación Las Cruces, aunque es posible que esta actividad volcánica culminó antes del fin de la actividad de la sierra de Las Cruces.

Esta unidad consiste en la parte norte en una secuencia de lavas andesíticas afaníticas-porfiríticas, con escasos fenocristales pequeños de anfíbol, con algo de cuarzo secundario y depósitos piroclásticos, entre los que se han identificado flujos de ceniza y brechas volcánicas. Las brechas volcánicas consisten en fragmentos mal clasificados, cuyos tamaños varían de lapilli a bloques, en una matriz vítrea y cristalina con abundancia de líticos, cuya composición varía de andesítica a riódacítica.

La parte más meridional de esta unidad, junto con los sedimentos contemporáneos, con los que se encuentra interdigitada en algunos lugares, se ha cartografiado como "Formación Cuernavaca" (Fries, 1960). Las lavas consisten de andesita de lamprobolita de textura afanítica-porfirítica-hipidiomórfica con lamprobolita, clinopiroxenos, feldespatos y andesita como minerales esenciales, en una matriz microlítica de andesina euedral con magnetita, apatito y vidrio como minerales accesorios.

El espesor aflorante máximo que se estima es de 1,000 m en el Cerro de Zempoala. Por su posición estratigráfica y similitud con el vulcanismo de la Formación Las Cruces, se considera que su edad corresponde al Plioceno Tardío. La Formación Zempoala cubre discordantemente los depósitos volcánicos del Plioceno, las rocas extrusivas del Mioceno Medio al Mioceno Tardío; con discordancia también se encuentra sobreyacida por la Formación Chichinautzin.

Riolita Navajas (Tpn).

"La Riolita Navajas del Plioceno Tardío edifica la Sierra Navajas en el sector nororiental de la Cuenca de México, con un espesor aflorante aproximado de 500 m en su parte central. Descansa discordantemente sobre el Grupo Pachuca y rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno (Tomv)" (Geyne *et al.*, 1963); está cubierta discordantemente por la Formación El Pino. El mismo autor describe una secuencia riolítica de derrames lávicos con buena estructura fluidal, porfiríticos- holocristalinos, con fenocristales de cuarzo y sanidino en matriz micrográfica; estos derrames tienen intercalaciones de brechas soldadas y no soldadas de flujo de cenizas vítreas, con fragmentos líticos, pumíticos y de obsidiana.

Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc).

Se designa con este nombre a los depósitos no diferenciados, relacionados genéticamente con la actividad piroclástica y fluvial de todo el Plioceno. Estos depósitos afloran al poniente de Cuautla. En el sector septentrional de la Cuenca de México fueron reportados por Segerstrom (1961, *op. cit.*), Fries (1962) y Geyne *et al.* (1963, *op. cit.*), en donde forman extensas llanuras y piedemontes aluviales. "El espesor máximo es de 400 m y constituye gravas, arenas, limos y arcillas de constitución volcánica" (Fries, 1966, *op. cit.*).

En el subsuelo de la porción meridional de la cuenca, dichos depósitos constan de tobas, brechas volcánicas y aglomerados, con horizontes de conglomerados, arenas y arcillas; se encuentran cubiertos discordantemente por aluvión del Cuaternario y están acumulados en fosas tectónicas (Graben de Chalco) y relleno de amplios valles surcados en rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno (Tomv y Tmv); su espesor máximo es del orden de 750 m, se encuentra en el centro de estas depresiones y se adelgaza hacia los márgenes. Las relaciones estratigráficas sugieren una edad del Plioceno para estos depósitos.

Cuaternario.

Unidad Volcánica Superior.

También llamada Grupo Tarango, esta unidad se compone de rocas volcánicas y comprende a las formaciones Llano Grande (Qllg), El Pino (Qpp) y Tláloc (Qt), las cuales se describen a continuación de la más antigua a la más reciente; son de edad Pleistoceno (Tabla 2.1).

Grupo Tarango (QT).

Bryan (1948) denomina como Formación Tarango a los depósitos volcánicos expuestos en las cercanías del poblado de Mixcoac, Distrito Federal. El mismo Bryan (1948) describe esta unidad en una localidad situada en las minas de arena que existían a 4 km al suroeste de Mixcoac. Debido a que la guía de clasificación y nomenclatura de unidades de roca (Ashley et al., 1933) no establece la asignación de una localidad tipo como tal, sino únicamente se recomienda que al momento de la propuesta se haga mención de una localidad específica, en la cual se muestre un desarrollo típico de la unidad, la localidad mencionada por Bryan (1948) podría considerarse como su localidad tipo.

Esta unidad estratigráfica está constituida de acuerdo con Bryan (1948), por toba, brecha-toba, depósitos fluviales con clastos de origen volcánico y capas delgadas de pumicita. En los alrededores de Mixcoac, Arellano (1953 en Segerstrom, 1962) señala que la Formación Tarango está constituida por depósitos de lahar, flujos de lodo y depósitos aluviales. De acuerdo con Segerstrom (1962) y De Pablo-Galán *et al.* (2001, 2002) en la región de Tula-Ixmiquilpan-Tasquillo, esta unidad está constituida por una intercalación de limolita y pumicita, arenisca y lutita; cerca del poblado de Florida (25 km al este de Ixmiquilpan). Segerstrom (1962) documenta lentes delgadas de pedernal, mientras que en Tezontepec, Ajacuba (Hidalgo), Apaxco y Hueyopxtla-Tlapanaloyan (Estado de México), reconoce la presencia de lentes de caliza lacustre de alrededor de 12 m de espesor.

Posteriormente, Cervantes y Armienta (2004) describen de manera detallada la litología de esta unidad en el Valle del Mezquital (Hidalgo), donde está constituida por: a) arenisca y conglomerado pobremente cementados, con un espesor máximo de 5 m; b) arenisca pobremente cementada y arcilla

intercaladas con un espesor de 7 m; c) capas de arcilla que en su conjunto alcanzan un espesor de 10-50 m; d) algunas capas de basalto intercaladas con unidades detríticas cuyo espesor alcanza 150 m; e) lentes de conglomerado poco compactados de aproximadamente 1 m de espesor; f) lentes aislados de caliza lacustre; g) lentes delgadas de ceniza volcánica y toba y h) nódulos de caliche o capas delgadas de material heterogéneo.

Bryan (1948), Segerstrom (1962) y Jiménez (1977 en Trujillo, 1977) reportan a esta unidad en el Distrito Federal, Estado de México e Hidalgo. De manera particular Segerstrom (1962) reporta esta formación en los alrededores de Mixcoac (Distrito Federal), en la región de Tula-Ixmiquilpan-Tasquillo y al norte del Valle del Mezquital (Hidalgo); así como en el área del Tajo de Nochistongo (Estado de México). Castillo et al. (1996) reconocen depósitos de la Formación Tarango al noroeste de Pachuca, así como en los alrededores de Actopan, ambos en el estado de Hidalgo. Finalmente, Acevedo et al. (2002) reconocen esta formación en el municipio de Nicolás Romero, Estado de México.

Cervantes y Armienta (2004) mencionan que los depósitos de la Formación Tarango sobreyacen discordantemente a rocas carbonatadas de edad Cretácico o bien sobre rocas volcánicas del Cenozoico Temprano; su límite superior no ha sido documentado. Jiménez (1977 en Trujillo, 1977) determina una edad de Plioceno Tardío para esta formación con base en el estudio de diatomeas, por otro lado, Castillo y Carranza (1994 en Suter *et al.*, 2001) consideran que la parte superior de esta unidad es de edad Cuaternario con base en su fauna fósil. Castillo et al. (1996) documentan una edad de Pleistoceno para esta unidad con base en su contenido de vertebrados fósiles.

Para asignar la edad del Grupo Tarango autores como Schlaepfer (1968), De Cserna (1988), Mooser *et al.* (1996) se basaron en las características de los depósitos y en dataciones radiométricas, por lo que lo ubican en el Plioceno Tardío. Castillo y Carranza (1994 en Suter et al., 2001) consideran que la parte superior de esta unidad es de edad Cuaternario con base en su fauna fósil. Castillo et al. (1996) documentan una edad de Pleistoceno para esta unidad con base en su contenido de vertebrados fósiles.

Autores como de Cserna (1988), Schlaepfer (1968) e igualmente Mooser (1996) extendieron al Grupo Tarango con las secuencias piroclásticas de las formaciones Llano Grande, El Pino y Tláloc.

Formaciones del Grupo Tarango (QT).

Se describen a continuación las principales características de las tres formaciones que comprende el Grupo Tarango (Tabla 2.1).

Formación Llano Grande (Qllg).

Se denominan así a las secuencias eruptivas de composición variable de andesítica a riodacítica que forman el volcán del mismo nombre, el cual es

ancestro del volcán Iztaccíhuatl. Aflora en la base noroccidental de la Sierra Nevada, que es donde se ubica la sección tipo, la que se puede observar a lo largo de las cañadas El Agua y Cosa Mala.

Las secuencias reconocidas constan de capas delgadas de lapilli pumítico y lítico de caída, flujos de cenizas vítreas y brechas soldadas de flujo; estos piroclastos están cubiertos por derrames lávicos y la actividad termina con domos. Los flujos lávicos observados son de andesita de piroxeno y anfíbol, con estructura fluidal, de grano fino a medio, porfiríticos-mesocráticos-hipidiomórficos, conteniendo fenocristales de andesina, augita, hiperstena y lamprobolita, que se encuentran en mesostasis pilotaxítica y hialopilitica. Nixon et al. (1987) describen principalmente andesitas y dacitas con piroxenos del mismo tamaño de grano.

Esta unidad está cubierta discordantemente por las formaciones Telapón e Iztaccíhuatl y sobreyacen de la misma forma a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno (Tomv). A esta formación se le asigna una edad del Pleistoceno Temprano.

Formación El Pino (Qpp).

Se agrupa con este nombre a las rocas volcánicas, principalmente máficas, que forman los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuache, Chiconautla, Gordo y otros cerros aislados; así como los campos volcánicos de Tezontepec-Otumba; la sección tipo se puede reconocer en las cañadas del Volcán El Pino. La expresión geomorfológica corresponde con conos cineríticos, volcanes de escudo y de amplias coladas lávicas, principalmente en bloques. Los espesores máximos son del orden de 750 m, que se presentan en los centros eruptivos y se acuñan hacia la periferia. Se compone de una secuencia de flujos lávicos con intercalaciones delgadas de tefra no consolidada, de caída, formada por cenizas cristalinas y vítreas, lapilli lítico y escoria tamaño lapilli; estas características de la tefra implican un vulcanismo del tipo estromboliano (Sheridan & Wohletz, 1983); los derrames lávicos reconocidos son de andesita basáltica de olivino y los andesíticos de anfíbol, generalmente tienen una buena estructura fluidal con vesículas alineadas en la dirección del flujo y otros con lajamiento regular. Los flujos lávicos son de textura fina a media, porfiríticos-afaníticos-mesocráticos-panidiomórficos, con fenocristales de labradorita, olivino, pigeonita, hiperstena y augita; contienen también intercrecimientos de piroxenos, en una matriz microcristalina.

Esta formación cubre discordantemente a unidades volcánicas del Oligoceno, Mioceno, Plioceno y la Formación Llano Grande del Pleistoceno Temprano; está cubierta de igual forma por las formaciones Chichinautzin y Telapón.

Formación Tláloc (Qt).

Schlaepfer (1968, *op. cit.*) definió esta unidad, la cual consiste de coladas lávicas que forman parte de la Sierra de Río Frío; las secciones de referencia

se pueden observar en los bancos de material localizados en el flanco poniente de la sierra, además en las cañadas El Muerto, El Partidor y Los Pilares. El espesor aflorante en el centro de la sierra es de aproximadamente 1,800 m y se acuña hacia los alrededores. La composición de esta formación es andesítica, latítica y dacítica; consta de varias sucesiones caracterizadas en su base por pómez y líticos angulosos, del tamaño de lapilli, constituyendo capas de aproximadamente un metro de espesor las cuales presentan gradación inversa lo que corresponde a una erupción tipo pliniana de caída (Sheridan, 1979).

La Formación Tláloc cubre discordantemente a rocas volcánicas del Mioceno Medio-Tardío y del Plioceno Temprano y a las formaciones El Pino y Llano Grande; está sobreyacida aparentemente con discordancia por las formaciones Chichinautzin e Iztacihuatl. Tomando en cuenta las relaciones estratigráficas anteriores, a esta formación se la asigna una edad pleistocénica.

Cuaternario Volcánico (Qv).

Esta unidad se compone exclusivamente de rocas volcánicas y comprende a las formaciones Iztaccihuatl (Qi), Popocatepetl (Qp) y Chichinautzin (Qc), las cuales se describen a continuación de la más antigua a la más reciente. Se le asigna una edad del Pleistoceno Medio al Holoceno (Tabla 2.1).

Formación Iztaccihuatl (Qi).

La Formación Iztaccihuatl fue propuesta por Schlaepfer (1968, *op. cit.*) para referirse a las rocas de los volcanes Llano Grande, Iztaccihuatl y Nexpayantla (White, 1956), antecesor del volcán Popocatepetl. No se ha asignado una localidad tipo, pero se tienen buenos afloramientos en la parte superior de la cañada Cosa Mala, cañada Alcalica y en la barranca Nexpayantla. El espesor total se desconoce, no obstante, los afloramientos en el volcán Iztaccihuatl exponen un espesor aproximado a 2,500 m. Esta formación está constituida por varias secuencias principalmente efusivas, cuya composición varía de andesita basáltica a dacítica; las secuencias se inician con derrames lávicos y finalizan con extrusiones dómicas. Los derrames lávicos y los domos se componen de andesitas de olivino y/o anfíbol y dacitas de anfíbol, los más básicos son de textura fina con lamamiento regular e irregular por enfriamiento y los más ácidos son de textura gruesa con buena estructura fluidal, generalmente porfiríticos-afaníticos-mesocráticos; contienen fenocristales de cuarzo, biotita, plagioclasa, anfíbol, piroxeno y olivino, que yacen en una matriz microcristalina y vítrea. Nixon *et al.* (1987, *op. cit.*) describen lavas andesíticas y dacíticas de hornblenda; por otro lado Carrasco (1985) en el volcán de Nexpayantla, identifica una secuencia de 1600 m de espesor, formada por derrames lávicos de andesitas basálticas, andesitas afaníticas de olivino y/o augita, y en la cima dacitas porfiríticas-afaníticas de augita y/o hiperstena, algunos de estos derrames están autobrechados y contienen intercalaciones de tobas líticas y brechas tobáceas.

La Formación Iztaccíhuatl descansa con discordancia encima de las formaciones Llano Grande y Tláloc, mientras que es suprayacida por discordancia por las formaciones Chichinautzin y Popocatepetl. Las edades isotópicas suplementadas con la magnetización normal (Mooser et al., 1974; Steele, 1971), sugieren que fueron extruídas en distintos períodos eruptivos dentro del intervalo de 0.6 a 0.8 Ma.

Formación Popocatepetl (Qp).

La Formación Popocatepetl (Carrasco, 1985) corresponde con un conjunto de rocas volcánicas que edificaron el estratovolcán Popocatepetl en el extremo suroriental de la cuenca. Conforman cuatro principales secuencias eruptivas, la primera es rica en cristales y líticos accidentales del tamaño de ceniza y lapilli; contienen además bloques lávicos imbricados no clasificados de composición heterogénea. La imbricación y la mayoría de las capas laminares sugieren un flujo laminar (Sheridan, 1979). La segunda secuencia es netamente efusiva y consiste en andesitas ricas en olivino, y piroxenos, andesitas y dacitas (Robin y Boudal, 1987, *op. cit.*). La tercera secuencia forma el volcán noroccidental El Fraile, la cual se inició con efusiones andesíticas y prosiguió con tres períodos explosivos (Robin y Boudal, 1987, *op. cit.*), los cuales principian con pómez y cenizas tipo pliniano, flujos no soldados de ceniza con bloques pumíticos de composición mixta andesítica y dacítica. El cuarto período eruptivo, aún activo, construyó el cono terminal durante 3,800 a 9,000 años (Robin y Boudal, 1987, *op. cit.*); inicialmente fue efusivo y posteriormente explosivo, con sucesiones piroclásticas parecidas a las del volcán El Fraile, pero con mayor contenido de derrames lávicos intercalados.

El espesor total de esta formación se desconoce, pero, con base en las altitudes de los afloramientos, se infiere un espesor máximo del orden de 3,500 m. Esta formación cubre discordantemente la porción meridional de la Formación Iztaccíhuatl y probablemente se interdigita hacia el poniente con la Formación Chichinautzin, ya que son contemporáneos; igualmente se interdigita con clastos fluviales hacia las llanuras aluviales de Cuautla, Amecameca y Distrito Federal.

Con base en fechamientos isotópicos reportados en la literatura y polaridad magnética normal (Mooser et al., 1974, *op. cit.*), se le asigna una edad del Pleistoceno Tardío-Holoceno.

Formación Chichinautzin (Qc).

Fue definida por Fries (1960) como Grupo Chichinautzin, posteriormente al ser estudiada con detalle por Bloomfield (1975) y Martin (1982), se le cambió el rango a formación, por haberse conseguido la separación de los miembros en la sierra del mismo nombre. Se aplica este nombre a todo el vulcanismo monogenético principalmente de tipo estromboliano con características y edades similares en la región de la Cuenca de México y sus alrededores. Los afloramientos más significativos se encuentran en la porción meridional de la

cuenca, en donde alcanzan los mayores espesores. Los derrames de esta unidad en general son muy extensos, vesiculares, masivos o lajados y son los productos volcánicos más abundantes de esta unidad. La composición de estas lavas es principalmente andesítico-basáltica y andesítica, de textura fina y media, porfiríticas-afaníticas-mesocráticas, con fenocristales coexistentes de olivino y piroxenos en matriz vítrea y microcristalina. Dentro de las andesitas se han reportado variedades de andesitas de hiperstena de textura afanítica-porfirítica, mesocristalina-panidiomórfica, con fenocristales e intercrecimientos glomeroporfídicos de labradorita y de hiperstena con pigeonita en menor cantidad, en una mesostasis traquítica formada por microlitos de andesina con lamprobolita, magnetita, apatito y sericita como accesorios; también contiene vidrio intersticial. Se han reportado afloramientos de andesitas basálticas de augita, basaltos, basaltos alcalinos y dacitas (Bloomfield, 1975, *op. cit.*; Martín, 1982, *op. cit.*).

El espesor máximo que se le ha asignado a esta unidad es de 1,800 m (Fries, 1960), y no es muy diferente del que se ha inferido en este trabajo a partir de la geología del subsuelo. Arnold y Libby (1951) fecharon con carbono-14 la colada lávica más reciente de esta unidad, la que se extiende en la esquina suroccidental de la Cuenca de México, proveniente del volcán Xitle, en $2,422 \pm 250$ años, con lo que la edad quedaría dentro del intervalo de tiempo que comprende la parte más tardía del Pleistoceno y el Holoceno. Esta unidad cubre discordantemente casi todas las unidades cretácicas y del Cenozoico; en algunos sitios cubre discordantemente la Formación El Pino y se encuentra interdigitada con depósitos lacustres y aluvión.

Cuaternario Sedimentario (Qs).

Esta unidad se compone de rocas sedimentarias continentales y comprende a los Depósitos aluviales (Qal) y Depósitos lacustres (Qla), los cuales se describen a continuación del más antiguo al más reciente. Se le asigna una edad del Pleistoceno al Holoceno (Tabla 2.1).

Depósitos aluviales (Qal).

Para el material clástico fluvial acumulado penecontemporáneamente con sedimentos lacustres y depósitos volcánicos del Cuaternario, Bryan (1948, *op. cit.*) y De Terra (1948) propusieron varias formaciones, sin cartografiar, dentro de este cuerpo aluvial, haciendo relación con períodos glaciares y postglaciares del Pleistoceno-Holoceno; no obstante, las características litológicas, posición estratigráfica y génesis de estos depósitos indican que se trata de una sola unidad sedimentaria, en tal caso, las “formaciones” corresponderían con miembros. Aflora formando llanuras aluviales al norte y sur de la cuenca y en los laboríos mineros de Pachuca, Hidalgo; presentan espesores de 210 m de aluvión (Fries, 1962); en el subsuelo de la porción meridional se encuentran extensamente distribuidos, rellenando amplios valles socavados en depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno (Tppc), así como depresiones tectónicas como el graben de Chalco.

Los espesores máximos, son de alrededor de 500 m, los que se encuentran en el centro de las depresiones y se adelgazan hacia las márgenes de la llanura. En las zonas norte y sur incluyen material poco consolidado compuesto por fragmentos con tamaño de grava, arena, limos y arcilla, conteniendo localmente marga, horizontes con diatomáceas, turba y travertino (Fries, 1962; Fries, 1960). Descansan por discordancia sobre los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno y localmente en la misma forma, sobre rocas volcánicas más antiguas y sobre sedimentarias del Cretácico al sur de la Cuenca de México; probablemente debido a su edad cuaternaria se interdigita con las formaciones volcánicas de la misma edad, siendo su contacto concordante e interdigitado con los sedimentos lacustres (Q1a) y piroclásticos. Con base en sus relaciones estratigráficas se propone que le corresponde una edad del Pleistoceno al Holoceno (Fries, 1962; Hibbard, 1955).

Depósitos lacustres (Q1a).

Se agrupan en esta unidad los sedimentos clásticos y producto de la erosión de las rocas piroclásticas relacionadas con la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin, los cuales se depositaron en ambiente lacustre. Estos depósitos forman una gran altiplanicie lacustre, extendida con una altitud promedio de 2,200 m, desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec. Los espesores varían de 30 a 300 metros, los mayores se presentan en los centros de las planicies de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco y disminuyen hacia las márgenes de las planicies.

Bryan (1948, op. cit.) describe la presencia de arcillas bentoníticas y montmorilloníticas, con carbonato de calcio, diatomeas, ostrácodos e interestratificaciones de ceniza y pómez. Las columnas estratigráficas de Tlapacoya (Lambert, 1986; Limbrey, 1986) muestran una secuencia piroclástica basáltica y andesítica de caída, con materia orgánica e intercalaciones de arena de playa, turba, suelos y horizontes con diatomáceas; los materiales piroclásticos están compuestos por cenizas vítreas, cristalinas y líticas, además de varios horizontes formados por lapillis angulosos, pumíticos y líticos.

Los cortes litológicos de pozos del DDF, ubicados en el borde norte de la Sierra Chichinautzin y alrededor de la Sierra de Santa Catarina, así como de los localizados en las márgenes de las planicies lacustres, muestran que los depósitos lacustres se encuentran interdigitados con la Formación Chichinautzin y con los depósitos aluviales. El rango de edades, obtenidas por el método de carbono-14, implica un tiempo de formación durante el Pleistoceno Tardío al Holoceno. Su origen está íntimamente relacionado con la obstrucción definitiva del desagüe de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra Chichinautzin.

2.2.1. Mapa geológico del Distrito Federal.

La Figura 2.3 representa el mapa geológico de la Ciudad de México, creado a partir de la Estratigrafía antes descrita.

Geología superficial

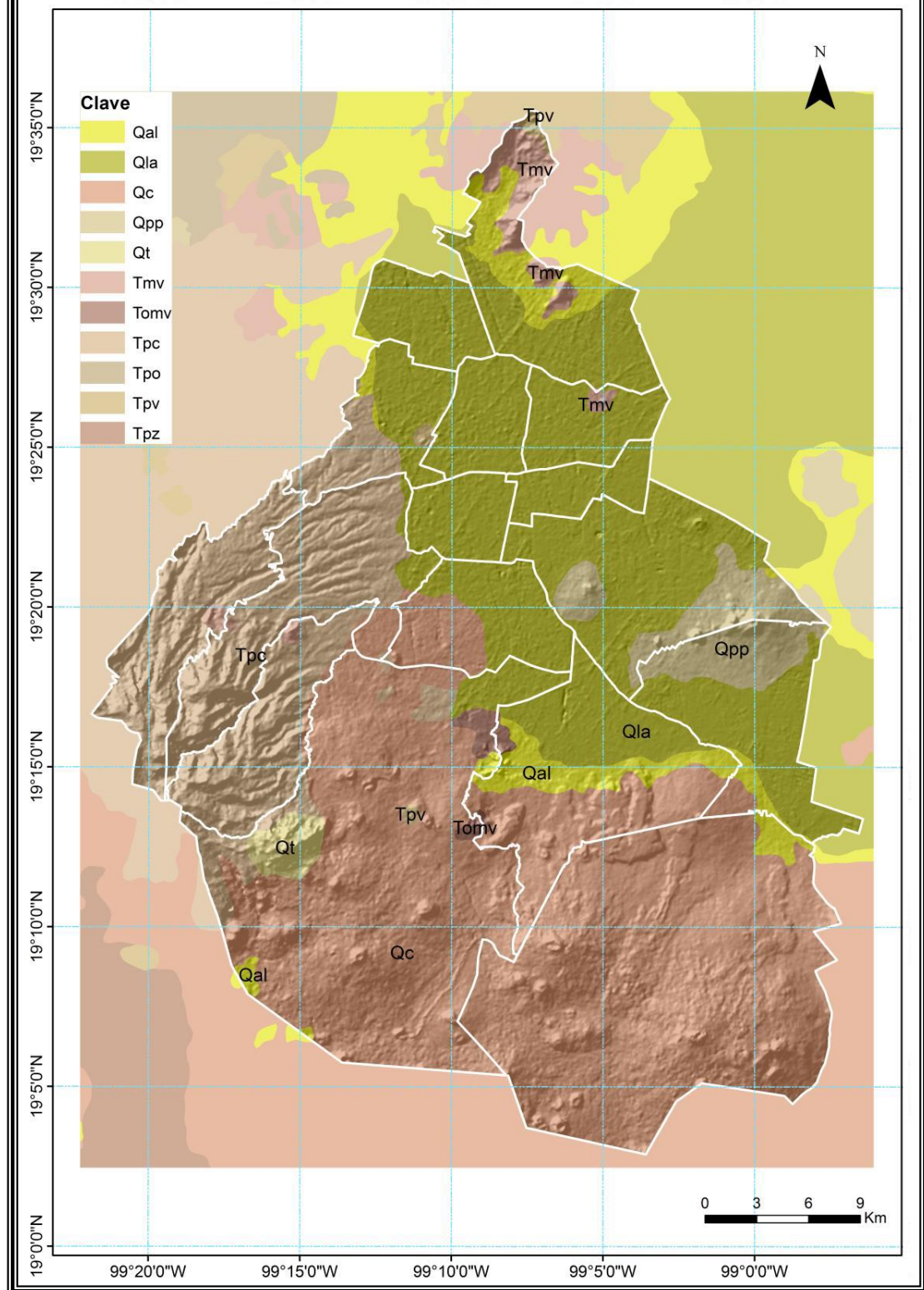


Figura 2.3. Mapa geológico del Distrito Federal. Tomado del proyecto 121128, patrocinado por el CONACYT - GDF.

2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.

Las características estructurales regionales que se encuentran en las rocas que afloran, están íntimamente relacionadas con la intensa actividad volcánica iniciada a principios del Cenozoico y desarrollada ampliamente durante el Pleistoceno Inferior, cuyos volcanes se alinean a través de los sistemas de fallas y fracturas que corresponden a discontinuidades estructurales regionales. El conjunto de estructuras que caracterizan al relieve de esta provincia evolucionaron sobre una paleogeografía constituida por secuencias mesozoicas plegadas, las cuales están en el subsuelo y se extienden a la Sierra Madre Oriental.

La evolución de los fenómenos volcánicos propició las condiciones para la formación de una cuenca endorreica que posteriormente fue rellenada con aportes de materiales clásticos y vulcanoclásticos, los cuales tienen características litológicas de rocas volcánicas depositadas en un medio lacustre y aparecen estratificados. Estos depósitos actualmente se encuentran en una etapa de estabilidad y están siendo erosionados, pero sus antiguos niveles quedan como relictos que se observan en formas planas como terrazas.

La cantidad y espesor del paquete volcánico formado por sucesivas coladas de lavas superpuestas intercaladas con materiales piroclásticos, es testimonio de la durabilidad del fenómeno durante un lapso grande de tiempo, que abarcó desde principios del Cenozoico hasta épocas recientes. En algunas áreas como en las sierras de Chichinautzin, Nevada y de Pachuca, se ha calculado que la suma de espesores de las formaciones volcánicas depositadas rebasan los 4,000 metros. En estas zonas se aprecia un conjunto de aparatos volcánicos complejos, algunos de los cuales son los más notables del país, como ocurre con el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl, El Ajusco y el Xitle, entre otros. Además existen varios sistemas de fracturas y fallas regionales, pero son tres los principales, el primero tiene dirección noroeste-sureste, que afectó previamente a las rocas mesozoicas y está asociado al patrón estructural de la Sierra Madre Oriental; los otros dos sistemas orientados norte-sur y este-suroeste están asociados a los esfuerzos que causaron tensión, estos afectaron a las rocas volcánicas del Mioceno. Los sistemas de fracturas y fallas en algunos casos están asociados a los procesos de mineralización que concentraron yacimientos económicos en los distritos mineros de la región de Pachuca, Hidalgo y el Oro, Michoacán.

En la literatura se encuentran las siguientes descripciones de las principales estructuras geológicas en el subsuelo de la Cuenca de México, que incluyen rocas del Mesozoico y Cenozoico.

Pliegues del Cretácico Superior-Eoceno Temprano.

Las estructuras más conspicuas son los pliegues producidos en las rocas jurásicas y cretácicas (Fries, 1960, 1962; Segerstrom, 1961). "Estos pliegues son asimétricos y recostados al oriente, los ejes son sinuosos y generalmente están orientados nor-noreste; las charnelas suben y bajan irregularmente. La

mayoría de los pliegues son relativamente cortos, de 2 ó 3 km de longitud, pero el Anticlinal Ticomán tiene más de 40 km de longitud” (Fries, 1960).

Los pliegues de la región se encuentran en rocas jurásicas y cretácicas y son producto de la Orogenia Laramide, cuyas estructuras más características se encuentran en la Sierra Madre Oriental, (Fries, 1960); se extienden en el subsuelo de la Cuenca de México como una continuidad de los afloramientos que se encuentran en los estados de Hidalgo al norte y Morelos al sur. Con base en la dirección preferencial de estos pliegues, se considera hipotéticamente que se formaron por esfuerzos compresivos que originaron además de plegamiento, fracturamiento y fallamiento inverso; estos esfuerzos son de dirección preferencial este-noreste y oeste-sureste. Se interpreta que la deformación ocurrió entre el Cretácico Superior y el Eoceno Temprano, lo que coincide con el intervalo de tiempo en que se desarrolló la Orogenia Laramide (Damon et al., 1981, op. cit.)

Fallas del Eoceno-Oligoceno Temprano.

Las fallas Jojutla y Cañón de Lobos se localizan en la porción centro meridional de la Faja Volcánica Transmexicana, son fallas normales con componente de desplazamiento lateral derecho (Fries, 1960).

“La primera tiene un rumbo noreste por una distancia de más de 35 km, se encuentra sepultada por aluvión y por capas del Grupo Balsas, su existencia, dirección y sentido de desplazamiento, se comprueba por la terminación abrupta de los pliegues de rocas cretácicas, que probablemente se desplazaron de 600 a 800 m al lado nororiental. La segunda falla ubicada al suroeste de Yautepec, Morelos, tiene un rumbo hacia el noroeste por una distancia cuando menos de 15 km, siguiendo con esta misma dirección por una distancia desconocida por debajo de rocas cenozoicas; su extremo noroccidental se ramifica en varias fallas normales divergentes, la naturaleza con desplazamiento vertical del orden de 1,500 m, son sustentados por el contacto abrupto entre las formaciones Mexcala y Morelos” (Fries, 1966, op. cit.).

En el subsuelo de la Ciudad de México, la gran diferencia en el valor de la cima de las rocas cretácicas, se manifiesta en los pozos Mixhuca-1 y Roma-1, lo que sugiere la presencia de un sistema de fallas normales con bloque hundido hacia el poniente, con desplazamiento vertical del orden de 1,500 m (Figura 2.4); estas fallas han sido inferidas con rumbo N15°W, con por lo menos 25 km de longitud, mediante la interpretación de líneas sísmicas de reflexión y gravimétricas (Perez,1987); las características citadas indican que posiblemente esta falla pertenece al sistema de fallas Jojutla-Cañón de Lobos.

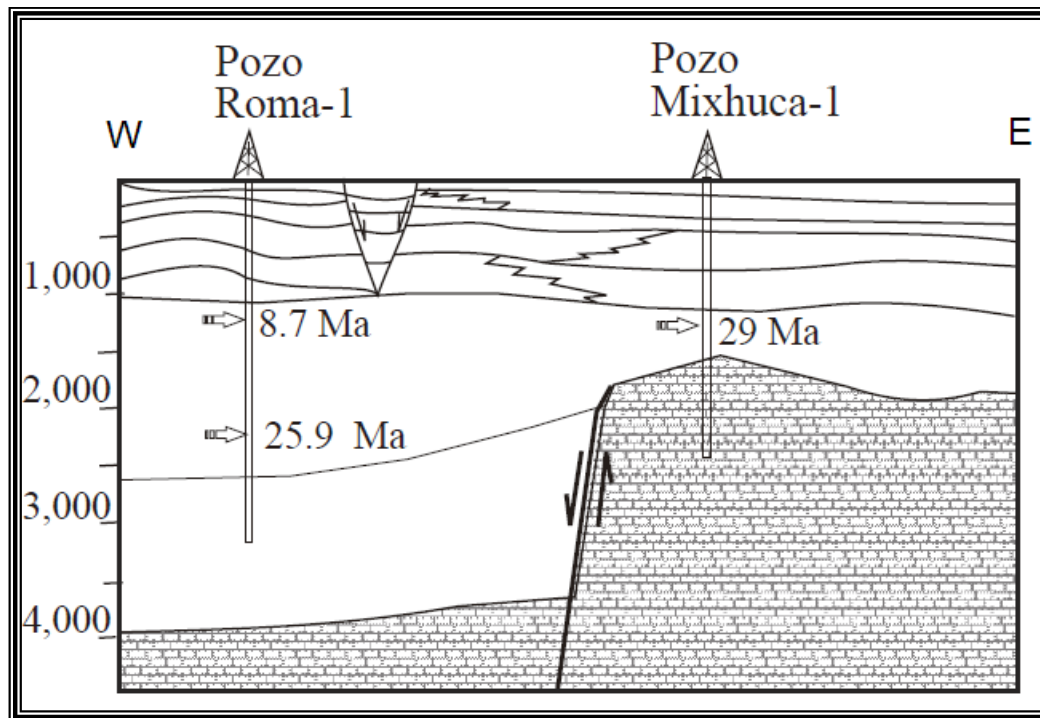


Figura 2.4. Sección geológica que muestra la gran diferencia en altitud de la cima de las rocas cretácicas. Modificado de Pérez (1988).

Fallas del Oligoceno Tardío-Eoceno Temprano.

Este sistema de fallas se considera no más antiguo que el Cenozoico, debido a que disloca al Grupo Balsas (Fries, 1960); se han podido reconocer únicamente en la zona más meridional, en donde aflora el Grupo Balsas. Según Fries (1960), “la falla normal localizada al noreste de Ticomán, tiene un rumbo N45°W cuando menos a lo largo de 15 km, su extremo noroccidental se ramifica en varias fallas normales con la misma dirección y de longitud promedio de 3 km, mientras que su extremo suroriental es sepultado por la Riolita Tilzapotla, del Oligoceno Tardío. Otra falla normal perteneciente a este sistema se localiza al oriente de Xalostoc, la cual tiene un rumbo al noreste y una longitud aproximada de 2 km”.

Fallas del Plio-Cuaternario.

En las sierras occidentales y orientales de la porción meridional de la Cuenca de México, así como en las sierras de Guadalupe, Tepoztlán y en el Cerro Chimalhuacán, existe una serie de fallas normales que cortan las formaciones volcánicas del Mioceno, Plioceno y Cuaternario; en consecuencia, se puede decir que su edad es plio-cuaternaria. Las fallas, presentan longitudes promedio de 4 km y desplazamientos de unos cuantos centímetros a varias decenas de metros; se inclinan en direcciones norte o sur y tienen ángulos de echado grande, que varía entre 60° y 80°; algunas fallas forman pequeños grabens, el rumbo preferencialmente es este-oeste, pero se observan fallas dirigidas tanto al noroeste como al noreste y en otras partes muestran arreglos conjugados. Las fallas normales, sepultadas, de este mismo sistema, han sido

reconocidas en bancos de material, como ocurre con las fallas normales que cortan rocas del Mioceno Medio-Tardío al suroeste de Cuajimalpa, la falla que disloca la Formación Las Cruces al sureste de Cuajimalpa; la falla normal que desplaza depósitos piroclásticos de la Formación Tláloc al oriente de San Vicente Chicoloapan y la falla que se encuentra en productos piroclásticos de la Formación El Pino en el flanco norte del cerro de Chiconautla.

Se infieren la presencia de otras fallas normales sepultadas, con base en claros alineamientos de conos cineríticos monogenéticos de las formaciones cuaternarias Chichinautzin y El Pino; tomando en cuenta también que este tipo de conos volcánicos es indicador de zonas con discontinuidades producto de tensión (Nakamura, 1977). Los conos cineríticos alineados más evidentes son los que constituyen los cerros La Estrella, Peñón del Marqués y Chimalhuache, los cuales se alinean en superficie; los de la Sierra Santa Catarina con el Volcán El Pino (Figura 2.5); el alineamiento al sur de Topilejo de conos cineríticos y rasgos de efusiones fisurales, con el cono de escoria del cerro Tehutli; los conos-anillo de toba y los conos de escoria al sur de Tlalmanalco; los numerosos conos de tefra y de lava de la Sierra Chichinautzin, que además regionalmente se alinean con la falla normal de Tenango (Bloomfield, 1975).

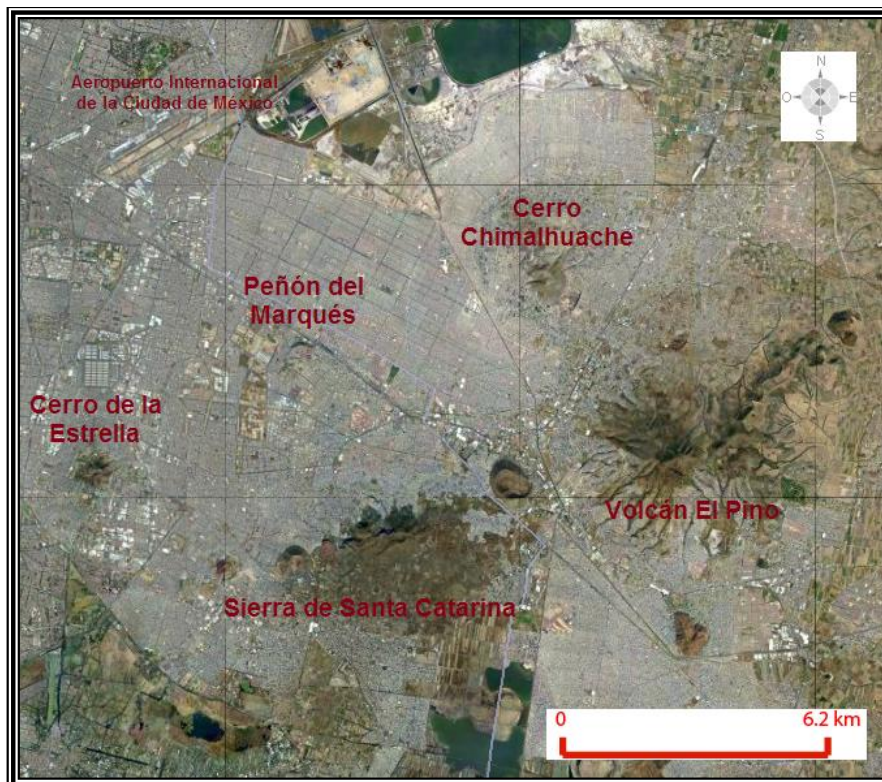


Figura 2.5. Imagen que muestra los alineamientos de los conos cineríticos en el SE de la Ciudad de México (Modificada de Google Earth).

Fries (1960) cartografió fallas normales con rumbo este-oeste por unos dos kilómetros de longitud, que cortan rocas cretácicas y fallas normales del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. En el valle de Puebla y Tlaxcala las fallas normales (Erffa y Hilger, 1975) tienen rumbo oeste-este a lo largo de una distancia de entre 10 y 25 km y se alinean regionalmente al poniente con los volcanes de la Sierra de Río Frío, Llano Grande e Iztacihuatl y al oriente con el estratovolcán La Malinche.

La falla de Tenango (Bloomfield, 1975, op.cit.), en el Estado de México, es una falla normal que corta rocas volcánicas del Mioceno Medio-Tardío, tiene desplazamiento al norte y arreglo escalonado, lo que indica zonas de transferencia a lo largo de una longitud aproximada de 15 km; hacia el oriente de ella se alinean numerosos conos cineríticos de la Formación Chichinautzin y el volcán meridional de la Sierra de Zempoala, al poniente se alinea al estratovolcán del Cuaternario, Nevado de Toluca (Bloomfield y Valastro, 1974); al sur de la falla Tenango se encuentran varias fallas normales de este mismo tipo.

Las fallas normales regionales del Distrito minero Pachuca-Real del Monte (Segerstrom, 1961, op. cit.; Fries, 1962; Geyne et al., 1963, op. cit.), se pueden incluir dentro del patrón estructural Chapala-Acambay, debido a su orientación principal oeste-este, con longitud en conjunto entre 10 y 20 km, y por estar cortando rocas volcánicas del Oligoceno al Plioceno Temprano del Grupo Pachuca.

En la subcuenca de Apan, Hidalgo, y áreas circunvecinas, se tienen fallas normales de dirección este-oeste y suroeste-noreste que cortan rocas volcánicas del Mioceno y Plioceno (Ledesma, 1987); igualmente la localización de conos cineríticos del Cuaternario en esta zona, está ligada a la traza de estas fallas.

2.4. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA.

Este trabajo sólo hace referencia a la evolución de la Cuenca a partir del Cretácico, en el que se interpreta la presencia de ambientes marinos.

Con base en los análisis estratigráficos y estructurales se ha definido la evolución geológica, desde el Cretácico. Las unidades estratigráficas indican que del Aptiano al Turoniano Tardío prevaleció la sedimentación calcárea, posteriormente cambió a turbiditas entre el Conaciano y Campaniano Temprano. Las secuencias se plegaron del Cretácico Superior al Eoceno Temprano debido a la Orogenia Laramide; en el Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano ocurrió un fallamiento normal con desplazamiento lateral derecho, contemporáneo con la sedimentación continental post-orogénica y con efusiones fisurales basálticas alcalinas.

Los eventos volcánicos que se asocian genéticamente con el Arco volcánico Transmexicano y con fallas normales del Plio-Cuaternario, el régimen endorreico de la Cuenca de México y la consecuente sedimentación lacustre del Pleistoceno-Holoceno, se originaron como consecuencia del intenso volcanismo que edificó la Sierra Chichinautzin.

La condición actual del relleno Cuaternario de la Cuenca de México es el resultado de procesos geológicos, volcánicos y tectónicos que se inician en el Cenozoico, a mediados del Oligoceno. Es entonces que, de acuerdo con los

conocimientos actuales, se puede interpretar la continuación de la subducción de la Placa de Cocos en el Pacífico, debajo de la masa continental meridional de México, que se encuentra en la Placa de Norteamérica, lo que dio origen al vulcanismo de la región.

El relleno Cuaternario de la Cuenca de México, se asocia con las erupciones de la Sierra de Chichinautzin, que se produjeron de acuerdo con las mediciones paleomagnéticas en los últimos 700,000 años. Una vez cerrado el espacio entre el Popocatepetl y la Sierra de Zempoala en el sur y las cabeceras del sistema hidrográfico por Pachuca en el norte, éste se fue azolvando rápidamente. Cada río que descendía de las sierras fue formando hacia las partes profundas de la cuenca un abanico aluvial que guardaba semejanza con un delta fluvial dado que los ríos desembocaban a los lagos. Así, es posible suponer que en el subsuelo del espacio de la Ciudad de México se tienen potentes abanicos aluviales constituidos de gravas y arenas formados por el Río Hondo, el Río Mixcoac, el Río Contreras y el río fósil del Ajusco (por estar sepultado por lavas), entre otros escurrimientos de menor magnitud.

En otras partes de la cuenca, la sedimentación estuvo controlada por el Río de las Avenidas de Pachuca, el Río de Cuautitlán, el Río de Teotihuacán y el Río de la Compañía, para no mencionar más que los mayores, los cuales formaron también deltas importantes. Las partes centrales de la cuenca alejadas de los bordes, eventualmente fueron llenándose con depósitos limo-arenosos, los cuales se interstratificaron con suelos y capas de cenizas y pómez provenientes de las erupciones volcánicas originadas principalmente en el sur. A medida que se rellenaba más y más la cuenca, fueron apareciendo lagos, principalmente en las partes centrales bajas y en el sur. Finalmente, debido a las lluvias abundantes pudieron formarse cuerpos de agua importantes, que a veces se unían en un solo gran lago.

En relación a los lagos pleistocénicos y recientes, puede establecerse una división en dos: a) Lagos formados en las partes bajas, que constituyeron vasos de evaporación y por ello fueron salobres; como los lagos de Xaltocan y Texcoco; b) Lagos que se formaron al pie de la Sierra de Chichinautzin, que fueron nutridos continuamente por manantiales de flujo local y que por ello fueron de agua dulce.

El antiguo Lago de Tenochtitlán (así como también el de Zumpango) representa un caso intermedio, habiendo sido casi siempre dulce, en el caso del primero, debido a los manantiales de Chapultepec y Tlalpan.

Mooser (1978) menciona que dependiendo de las condiciones climáticas (húmedas o secas), los lagos iban creciendo o reduciéndose. El origen de la división de los grandes lagos, se debe a que durante el proceso de relleno de los materiales lacustres de la Cuenca de México, se presentó una época de grandes lluvias torrenciales que causaron amplias inundaciones, después de la cual ocurrió un proceso de desecación, según se observa en la secuencia de la Figura 2.6.

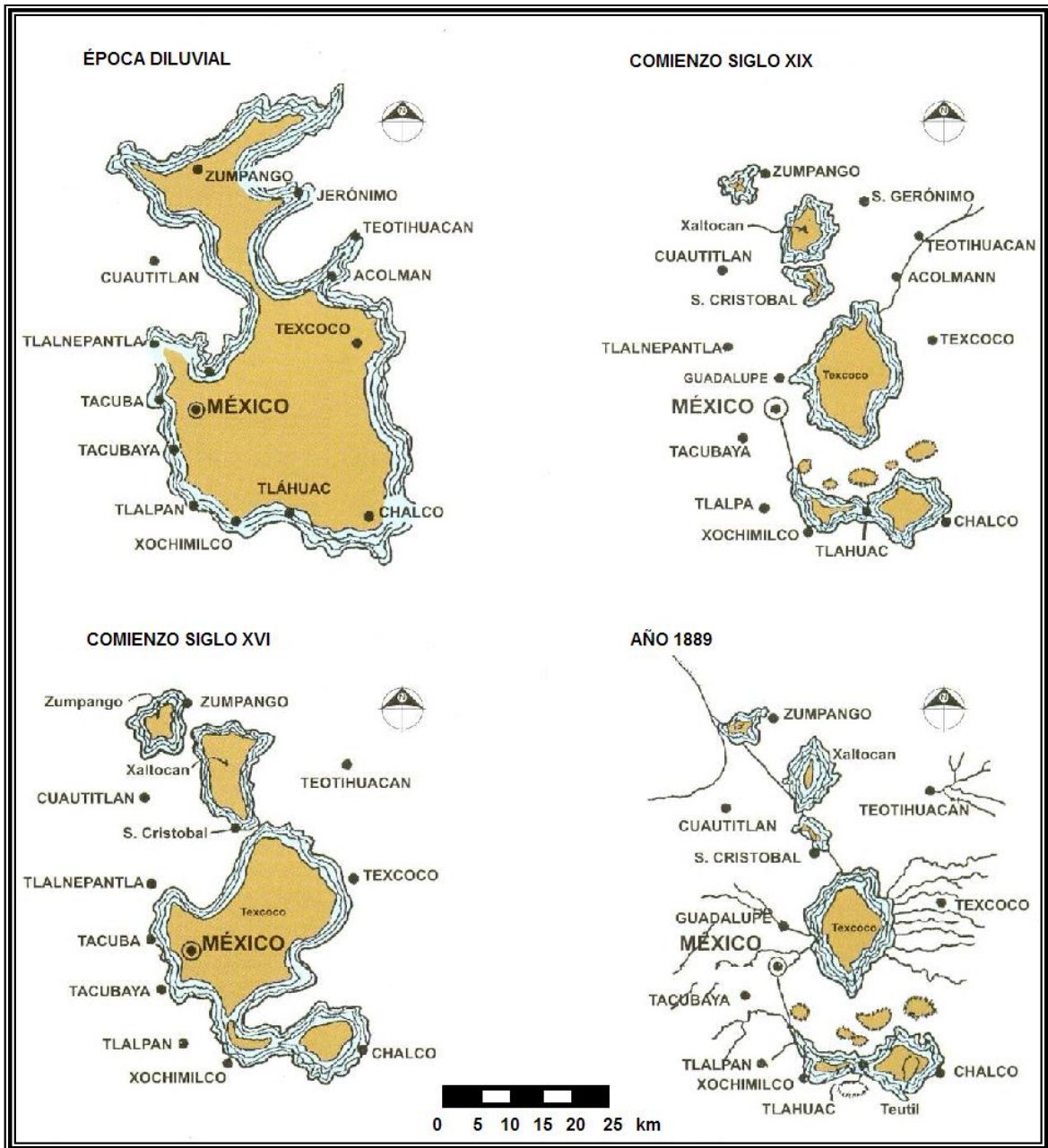


Figura 2.6. Secuencia de desarrollo de los lagos en la Cuenca de México. (Tomado de Mooser, 1978).

III. ANÁLISIS DEL FRACTURAMIENTO.

3.1. MARCO TEÓRICO.

3.1.1. Terminología.

A continuación se definen o describen los principales términos empleados para referirse al fenómeno del fracturamiento.

Diaclasa: Fractura de rocas o de materiales rocosos sin desplazamiento relativo de las partes separadas. Es una fractura o fisura de una roca, en la que el desplazamiento relativo entre los dos bloques es mínimo o nulo. Este término se utiliza preferentemente en Geología para referirse a procesos ocurridos en rocas; se denominan también fracturas o roturas.

Discontinuidad: El término denota a cualquier interrupción en la integridad mecánica de la roca, tales como una diaclasa, una grieta, una cavidad, una fractura o una fisura.

Falla: Es una estructura planar a través de la cual existe un desplazamiento en una dirección que es generalmente paralela al plano de fractura.

Fractura: Rotura o abertura producida por esfuerzos, a lo largo de la cual no ha habido ningún movimiento paralelo al plano de discontinuidad. Se emplea fundamentalmente en Geología para referirse a discontinuidades en rocas de cualquier tipo.

Fisura: Grieta que se produce en un objeto. Hendidura que se encuentra en una masa mineral.

Grieta: Fractura del terreno sin desplazamiento relativo de las partes separadas. Se utiliza sobre todo en la Ingeniería Civil para referirse a discontinuidades en el suelo o en construcciones civiles.

Junta: Una superficie de rotura, fisuras o separación dentro de una roca a lo largo de la cual no ha habido ningún movimiento paralelo al plano de la discontinuidad. Cuando las paredes de una fractura se han movido en dirección normal una con respecto a la otra, la fractura se llama junta. Se emplea en Geología para referirse a discontinuidades en rocas.

Para algunos autores el término diaclasa queda restringido a aquellas fracturas que son normales a la estratificación. También el término diaclasa, es sustituido por otros autores por el de "joint" (junta), que es el nombre en inglés de este tipo de discontinuidades. El querer matizar diferenciando fractura, junta o diaclasa carece de sentido en el enfoque que tiene este trabajo, por lo que pueden emplearse los términos de manera indistinta, e incluso rotura para denominar a este tipo de deformación.

Para los fines de este trabajo en las descripciones se utilizarán los términos fractura o discontinuidad indistintamente para referirse a una grieta, una fisura, una junta o una diaclasa. Para las definiciones empleadas en la Ingeniería Civil se respetan los términos utilizados en esta área del conocimiento.

3.1.2. Fracturamiento y fallamiento en rocas.

Todo cuerpo sólido responde a esfuerzos de diferentes dimensiones experimentando pequeñas o grandes deformaciones en el campo dúctil o fracturamiento en el campo frágil. El fracturamiento consiste en la pérdida de continuidad entre dos partes del cuerpo rocoso o de los suelos, esto implica la generación de una grieta y su propagación hasta que se presente la falla general o que se alcance un nuevo estado de equilibrio.

Las dislocaciones disyuntivas se dividen en dos grupos principales: fracturas sin desplazamiento (grietas) y fracturas con desplazamiento (fallas). Es necesario señalar que en la naturaleza no existen grietas que no tengan desplazamiento, aunque sea muy pequeño; ya sea en forma de la apertura de los bordes de la grieta o en forma del deslizamiento relativo de éstos paralelamente uno a otro. No obstante si tales desplazamientos son muy pequeños y no pueden ser registrados en la escala dada de prospección, se pueden omitir.

Las fracturas son de difusión extraordinariamente amplia en la corteza terrestre, se encuentran en casi todas las rocas, excepto en las más dúctiles y más saturadas, en las que las discontinuidades mayores no pueden conservarse. Las fracturas individuales se distinguen por su orientación, forma, continuidad, la dimensión de su longitud, abertura y espaciamiento.

La orientación de la fractura es la situación de la discontinuidad en el espacio y se expresa mediante el rumbo y el echado. Se define como rumbo al ángulo horizontal que se forma entre una línea horizontal contenida en un plano y el Norte o Sur geográficos. El echado es el ángulo vertical medido entre el horizonte (plano horizontal) y el plano de referencia (plano estructural).

Según su forma las fracturas pueden ser rectas, curvas o quebradas, y sus bordes pueden ser lisos, pulidos o ásperos y dentados.

Para cualquier estudio que se haga hay que prescindir de los casos especiales y suponer planos. La dificultad, de analizar la continuidad de las fracturas impide conocer cómo evoluciona la forma de la misma.

Tanto en superficie como en profundidad, la continuidad que presenta una fractura puede ser muy variable. La fractura puede desaparecer por la presencia de otra roca de calidad distinta a aquella en que está presente. Se trata de un parámetro de difícil definición. En la mayoría de los casos la persistencia de la fractura en profundidad es muy difícil de detectar.

Según su longitud, las fracturas son muy diversas. Algunas de ellas se observan en la extensión de algunos centímetros, pero se encuentran también otras que se extienden en decenas de metros o hasta algunos kilómetros. Por lo demás, las perturbaciones disyuntivas de mucha extensión raramente quedan como fracturas, es decir, como fracturas sin desplazamiento.

Generalmente, dichas discontinuidades se manifiestan en fracturas con desplazamiento, es decir son fallas. Las más fáciles de reconocer son las fracturas con longitud de metros y decenas de metros, estas componen la llamada fisuración de las rocas, de propagación universal.

Según la dimensión de la abertura se pueden distinguir fracturas ocultas, cerradas y abiertas. Las fracturas ocultas en la roca reciente no se ven, solamente llegan a manifestarse al quebrar esta última, que es cuando se descubre que se parte por ciertas direcciones preferenciales. Por fracturas cerradas se entienden aquellas que se ven a simple vista, pero que no tienen cavidad ya que no presentan abertura o se encuentran rellenas con algún material. Las fracturas abiertas, como su nombre lo menciona, tienen abertura parcial o total.

Para la comprensión de las condiciones de formación de las fracturas tienen importancia esencial las regularidades de su combinación mutua.

Generalmente las fracturas forman familias o sistemas, es decir, grupos de fracturas reunidas por particularidades en su disposición, longitud y orientación. Suelen ir ligadas a otro tipo de deformaciones como las fallas y los pliegues.

Las fracturas y fallas son estructuras resultantes de un comportamiento quebradizo, en el que bloques de roca son desplazados, uno con respecto a otro, a través de estrechas discontinuidades aproximadamente planares. Estas pueden ser llamadas juntas o diaclasas (ambas son sinónimos a las denominadas "fisuras"), si la componente de desplazamiento paralela al plano de discontinuidad es cero, o tan pequeña que es indistinguible a simple vista. Si la componente de desplazamiento paralela al plano de la discontinuidad es mayor que cero, o suficientemente grande para ser apreciada a simple vista, entonces se denomina a la estructura falla. Dicho de otra manera, si el movimiento entre los bloques adyacentes a la discontinuidad es perpendicular a ésta, se trata de una fractura, junta o diaclasa, pero si el movimiento es paralelo a la discontinuidad, entonces se trata de una falla, esta puede ser normal, inversa o lateral.

La mayoría de las fallas son iniciadas a partir de fracturas en las que se ha perdido la cohesión original de la roca. Después del fracturamiento inicial, muchas juntas y fallas pueden ser parcial o totalmente rellenas por minerales

secundarios, que al paso del tiempo se convierten en indicadores importantes de la historia de las estructuras.

Las juntas son el resultado de pérdida de volumen o de que la roca es sometida a un estado de esfuerzo compresional o tensional.

Las juntas causadas por una pérdida de volumen en la roca pueden asociarse a dos tipos de litologías: sedimentarias o ígneas. Las asociadas a rocas sedimentarias se conocen con el nombre de fracturas o grietas de desecación y se originan en diversos tipos de sedimentos, generalmente de grano fino, los cuales al ser expuestos a condiciones subaéreas después de haber sido depositados en agua, se deshidratan por evaporación e infiltración y pierden volumen, lo que produce contracciones mayores en la superficie y menores a profundidad, generando formas pentagonales.

Las juntas desarrolladas en rocas ígneas a causa de una pérdida de volumen por enfriamiento, tienden a formar prismas de forma hexagonal, más conocidos como juntas o prismas columnares. Éstas son más comunes en rocas volcánicas, pero también se desarrollan en diques y mantos. Las juntas que se desarrollan en cuerpos intrusivos y que también son causadas por pérdida de volumen debido a enfriamiento, se denominan diaclasas.

Por otro lado, las juntas que resultan de la aplicación de un estado de esfuerzo no están restringidas a algún tipo particular de roca, pero si están íntimamente ligadas a otras estructuras, como por ejemplo pliegues y fallas.

La abertura de la fractura depende del desplazamiento expresado hacia los lados de los bordes de la fractura con el aumento de la cavidad de esta última.

La abertura se caracteriza por la dimensión de su cavidad. Las aberturas vacías de cavidad grande no pueden existir mucho tiempo en la corteza terrestre ya que a causa de la fluencia plástica de las rocas se cierran o se rellenan, así por ejemplo, la cavidad puede rellenarse de material plástico de las capas vecinas.

Fallas.

Dependiendo de la disposición espacial, y de la dirección de desplazamiento, entre las fallas se distinguen: falla normal, falla inversa y falla transcurrente. En las fallas, el plano de ruptura por el que se desarrolla el deslizamiento se denomina plano de falla. Las rocas separadas por el plano de discontinuidad forman sus bloques de falla.

Falla normal. Si el movimiento ocurre conforme a la línea de máxima pendiente, la falla es normal; el desplazamiento es tal que el bloque de techo se desliza hacia abajo con relación al bloque de piso, a lo largo del plano inclinado de la falla (Figura 3.1).

Falla inversa. La falla es inversa cuando el movimiento ocurre en dirección de la línea de máxima pendiente y el bloque de techo se desliza hacia arriba con relación al bloque de piso, a lo largo del plano inclinado de la falla (Figura 3.1).

Falla lateral. Si el movimiento de los bloques se da en dirección del rumbo del plano de falla, corresponde a una falla de transurrencia o falla lateral, pudiendo ser lateral izquierda o lateral derecha. La falla es derecha cuando el observador identifica que el bloque de enfrente se desplaza en forma dextral, y es izquierda cuando dicho bloque se desplaza de manera sinestral (Figura 3.1).

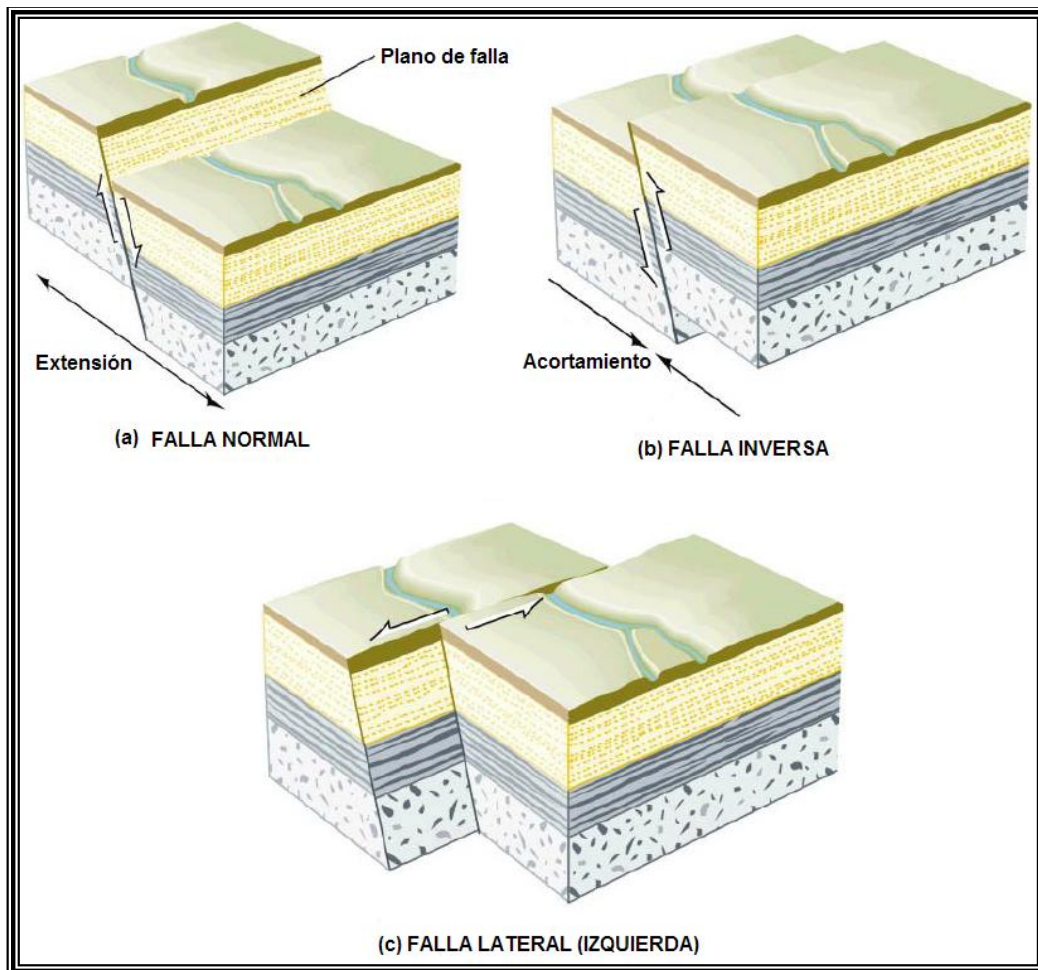


Figura 3.1. Tipos de fallas; a) Falla normal, b) Falla inversa, c) Falla lateral.

3.1.3. Modos de fracturamiento.

El frente de una grieta es el vértice que conecta los puntos adyacentes donde ocurren o pueden ocurrir separaciones subsecuentes. Durante un proceso de separación continua, esta línea se mueve a lo largo de un plano llamado superficie de fracturamiento. De acuerdo con Irwin (1957), existen tres modos básicos de desarrollo del agrietamiento (Figura 3.2):

- Modo I:** Se presenta una abertura simétrica, donde el desplazamiento relativo entre las caras correspondientes es perpendicular a la superficie de la fractura; en este caso las grietas se generan por tensión, separándose entre sí las caras de la grieta (Figura 3.2).
- Modo II:** La separación es asimétrica con desplazamientos tangenciales relativos perpendiculares al frente de la grieta; el agrietamiento se genera por esfuerzo cortante; las caras de las grietas se deslizan una sobre otra en dirección perpendicular al vértice (Figura 3.2).
- Modo III:** La separación es nuevamente asimétrica, con desplazamientos tangenciales relativos paralelos al frente de la grieta; bajo el efecto de esfuerzos inducidos por torsión, las superficies de las grietas se deslizan una sobre la otra, en dirección paralela al vértice (Figura 3.2).

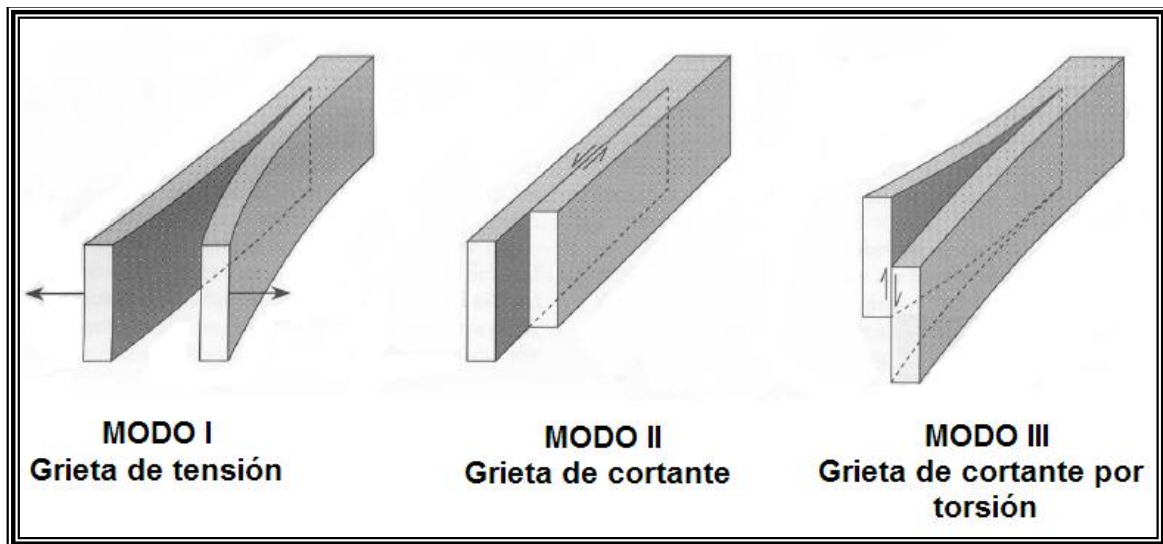


Figura 3.2. Modos de agrietamiento, Irwin (1957).

En general, en un cuerpo homogéneo, el agrietamiento puede ser descrito por alguno de estos modos o sus combinaciones. Sin embargo, el crecimiento de la grieta tiene usualmente lugar en el Modo I.

3.1.4. Mecanismos de fracturamiento en materiales arcillosos.

En México se ha destacado la aplicación de modelos cuantitativos para el estudio de los mecanismos de fracturamiento bajo los siguientes aspectos: (a) Mecánica de fracturas con un criterio de propagación basado en el "factor de intensidad de esfuerzos críticos" y realización de modelaciones de propagación bajo presión hidráulica aplicando el método del Elemento Finito (Auvinet y Arias, 1991); (b) Teoría de flujo unidimensional hacia una batería de pozos (Juárez y Figueroa, 1984 y Juárez, 1991); y (c) Cuantificación de las tensiones inducidas por el abatimiento del agua subterránea basada en la teoría de la

elasticidad incluyendo fuerzas de filtración (Figueroa, 1989; Alberro y Hernández, 1990).

A partir de un análisis de la literatura, Orozco y Figueroa (1991), señalan que las fracturas aparecen en zonas de fuertes hundimientos (la mayoría se inician a profundidad y se propagan hacia la superficie) y de transiciones estratigráficas laterales.

En la Figura 3.3 se muestra, de manera esquemática, la alta heterogeneidad de la secuencia estratigráfica en una cuenca fluvio-lacustre en zonas volcánicas relativamente recientes. La variabilidad lateral y en profundidad de la granulometría y permeabilidad del medio en este tipo de cuencas condiciona el comportamiento mecánico diferencial de los materiales y determina la distribución de gradientes hidráulicos críticos. Se puede establecer entonces que el fracturamiento de 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.

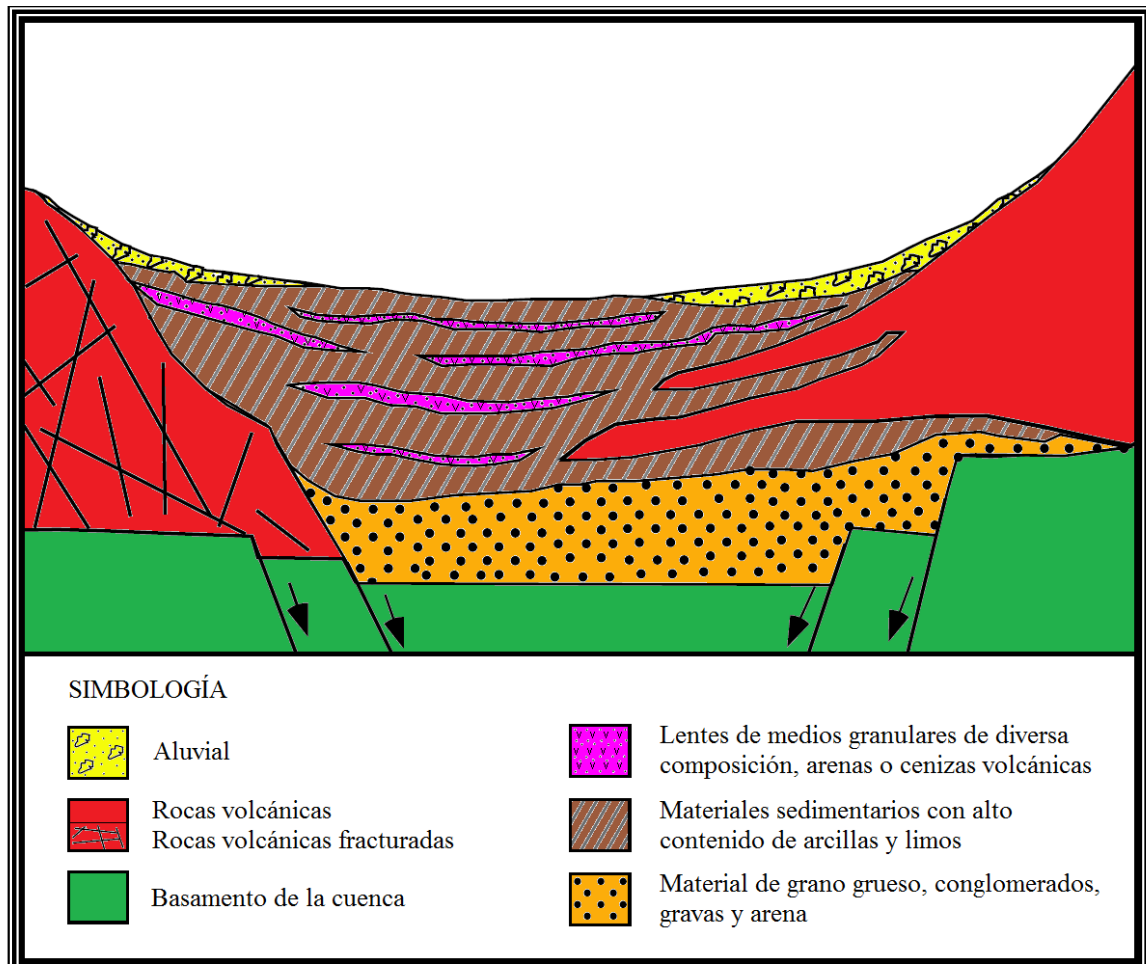


Figura 3.3. Esquema conceptual de sedimentación fluvio-lacustre en una cuenca cerrada de origen volcánico, con actividad contemporánea a la sedimentación, como es el caso de la Cuenca de México (Modificada de Carreón *et al.*, 2006).

3.1.5. Factores geológicos que determinan la susceptibilidad al fracturamiento.

Las características geológicas de una secuencia sedimentaria, como el ambiente de depósito y estructuras pre-existentes en el basamento, son heterogeneidades determinantes para la formación y propagación de fracturas. La historia de cargas y variaciones de humedad durante la deposición de estos materiales determina la geometría de las primeras fracturas (p. ej. agrietamiento por desecación) que pueden modificar el estado local de esfuerzos y controlar la evolución de las fracturas alrededor de ellas (Tuckwell *et al.*, 2003). Asimismo, la variación de la mineralogía del material arcilloso y de la permeabilidad de sedimentos y rocas se puede traducir en variaciones de compresibilidad y llevar al fracturamiento por deformación diferencial.

3.1.6. Variaciones mineralógicas en una secuencia lacustre.

Los minerales arcillosos se forman por una combinación de intemperismo, físico, químico y biológico, aunque en zonas volcánicas activas pueden originarse por alteración hidrotermal. De manera general, durante la alteración de rocas básicas, el sílice y el Mg son lixiviados, mientras que el Fe³⁺ y el Al se concentran en los horizontes superiores dando origen a la formación de suelos arcillosos residuales (Righi y Meunier, en Velde 1995).

La formación autigénica de arcillas y otros minerales secundarios en la secuencia sedimentaria depende entonces de las concentraciones iónicas en el sistema del suelo, condiciones de Eh (oxidación-reducción) y pH (acidez-alcalinidad) y la cinética de las reacciones (Velde, 1995). A su vez, la cinética de las reacciones se relaciona directamente con las variaciones climáticas durante la historia de depósito de los materiales.

La composición mineralógica de las arcillas de la Cuenca de México ha sido ampliamente documentada desde mediados del siglo pasado, debido principalmente a su heterogeneidad y a la complejidad de su comportamiento mecánico (fallamiento frágil en materiales plásticos, compresibles y con altos contenidos de agua). Los primeros trabajos reportaron composiciones contrastantes para los sedimentos de la Cuenca de México (Zeevaert, 1953; Marsal y Mazari, 1959; Mesri *et al.*, 1976). A partir de sus propios análisis Peralta y Fabi (1989), concluyen que la divergencia en los resultados reportados se debe a las variaciones de la mineralogía con la profundidad y describe una compleja estratificación con laminación y microestructuras en estos materiales, con una composición microscópica semejante a un gel, similar a un material amorfo. Considerando la anterior se han llevado a cabo estudios sobre la variación mineralógica de estos materiales con la profundidad (Díaz *et al.*, 1998, Mazari *et al.*, 2000).

Cabe agregar que en secuencias sedimentarias como las de la Cuenca de México, en donde la actividad volcánica es reciente y contemporánea a la depositación del relleno sedimentario, la rápida alteración de ceniza volcánica y pumicita genera suelos ricos en alofano e imogolita, minerales arcillosos de

bajo orden similares a geles (Carreón-Freyre *et al.*, 1998). Si las condiciones ambientales favorecen la deshidratación, estos materiales se transforman en gibbsita y halloysita (Righi y Meunier, en Velde, 1995). El alofano aunque amorfo a la Difracción de Rayos X, en microscopía electrónica (Wada, 1987) se presenta como partículas esféricas de aproximadamente 4 nm de diámetro, huecas e irregulares principalmente compuestas de sílice y aluminio. La imogolita tiene forma tubular, o de hilo, por lo que su frecuente asociación con el alofano da al suelo una estructura porosa abierta (Wesley, 2001), de ahí la elevada compresibilidad de estos materiales.

3.1.7. Propiedades hidráulicas y mecánicas de los materiales arcillosos.

Existen numerosos trabajos de investigación sobre el estudio de la relación entre la mineralogía de los materiales arcillosos y sus propiedades mecánicas, las cuales dependen principalmente del contenido de agua y están directamente relacionadas con su baja permeabilidad. Por ejemplo, Ohstubo *et al.* (1983) correlacionan los límites de consistencia (plasticidad) con la variación de la capacidad de retención de agua de las partículas de suelo en función de las características químicas de las arcillas y del agua intersticial. La relación entre la mineralogía de suelos arcillosos y el desplazamiento de agua durante el proceso de consolidación ha sido ampliamente discutida (Wesley, 2001; Saarenketo, 1998; Warren y Rudolph, 1997). Se pueden diferenciar tres tipos básicos de agua de poro en los materiales arcillosos: (a) el agua intermolecular que forma parte de la estructura del alofano, (b) el agua adsorbida fuertemente adherida a las partículas arcillosas principalmente esmectíticas, y (c) el agua libre que se desplaza más fácilmente entre los agregados, contactos intergranulares y/o microfracturas en la matriz arcillosa y que está relacionada con la consolidación primaria de estos materiales.

En los materiales lacustres de la Cuenca de México, se ha estudiado la influencia de la mineralogía en su plasticidad y compresibilidad (Mesri *et al.*, 1976) y en su resistencia (Díaz y Santamarina, 2001). También se ha caracterizado la mineralogía de secuencias arcillosas para estimar su comportamiento mecánico (Gutiérrez *et al.*, 2005). Actualmente se reconoce que, así como la mineralogía obedece a variaciones en las condiciones climáticas y depósito, la variación del comportamiento mecánico en una secuencia arcillosa obedece además a la búsqueda de equilibrio del sistema ante la influencia antropogénica. Sin embargo, existen pocos estudios que relacionen las condiciones geológicas con las variaciones mineralógicas, hidráulicas y mecánicas de secuencias arcillosas lacustres (Carreón, 2005), y por lo tanto se conoce poco sobre la respuesta de estos sistemas y los mecanismos de propagación de las fracturas.

3.1.8. Factores disparadores de fracturas.

El principal factor disparador de fracturas en sedimentos fluvio-lacustres es el desequilibrio mecánico, ya que las propiedades de estos sistemas pueden variar en tiempos muy cortos. Existen fenómenos naturales que actúan como

mecanismos disparadores de fracturas, como son la actividad sísmica y las inundaciones causadas por lluvias torrenciales; sin embargo, los mecanismos más importantes son de origen antropogénico. El desequilibrio mecánico inducido por sobrecarga estática (capacidad de carga para construcción) y dinámica (fatiga de los materiales en vías terrestres) y la despresurización del medio geológico debido a la extracción de los recursos naturales del subsuelo, ya sea agua, petróleo o gas, son los factores disparadores más importantes del fracturamiento en zonas urbanas.

Específicamente para el caso de la extracción de agua subterránea de acuíferos granulares, el decaimiento de la presión de poro propicia la compactación creando importantes esfuerzos de tensión verticales y horizontales (Carrillo, 1947; Holzer and Davis, 1976; Holzer, 1984; Figueroa, 1989). Es importante remarcar que las variaciones espaciales y temporales en el descenso piezométrico dentro de una cuenca fluvio-lacustre pueden ser causadas por heterogeneidades a diferentes escalas: mineralógicas, estratigráficas o estructurales y las asociaciones de los diferentes factores determina la formación, el tipo y la propagación de las fracturas.

3.1.9. Tipos generales de fracturas en secuencias fluvio-lacustres.

Los sistemas de fracturamiento se pueden estudiar de acuerdo a su tamaño y a la asociación de factores que les dan origen. Los conceptos regional y local son relativos, ya que dependen de la escala y del tipo de estudio, en estos casos se pueden asumir los siguientes criterios:

1. Las estructuras regionales son de dimensiones mayores que la zona urbana afectada. La irregularidad del basamento fracturado que subyace a las secuencias sedimentarias determina en gran medida la ubicación del fracturamiento que se propaga desde profundidad hacia las secuencias sedimentarias someras retomando planos de debilidad preexistentes, como es el caso de Morelia o de Querétaro (Rojas *et al.*, 2002, Carreón *et al.*, 2005a).

En zonas urbanas afectadas por sistemas de falla regionales se debe considerar la asociación espacial de las mismas con variaciones estratigráficas, de manera que una falla pueden actuar como canal preferencial o como barrera de flujo formando gradientes piezométricos importantes (Kreitler, 1977, Carreón *et al.*, 2005b).

2. Como escala intermedia se considera a los sistemas de fracturamiento que afectan principalmente la parte superior de la secuencia sedimentaria fluvio-lacustre frecuentemente interestratificada con materiales piroclásticos y volcánicos. En las cuencas del centro del país, como ocurre en la Cuenca de México, los espesores totales de estas secuencias alcanzan más de 500 metros, pero se considera solamente la parte superior (los primeros 200 m) porque es la profundidad actual promedio de los niveles de extracción de agua

subterránea. En ésta escala uno de los principales mecanismos de fracturamiento es la compactación diferencial, ya que los materiales presentan una distribución heterogénea de propiedades hidráulicas y mecánicas (Zeevaert, 1953; Ellstein, 1978; Orozco y Figueroa, 1991, Carreón *et al.*, 2003).

Considerar que el fracturamiento es sólo debido al abatimiento de los niveles piezométricos del agua subterránea implica una simplificación del fenómeno, ya que los abatimientos mayores no se relacionan de manera directa con los desplazamientos verticales en las zonas de fracturamiento.

Para una adecuada evaluación de las condiciones de propagación del fracturamiento en ésta escala, se debe estudiar las variaciones verticales de las propiedades hidráulicas del sistema acuífero y las variaciones laterales de la compresibilidad de los materiales (Figueroa, 1989; Carreón *et al.*, 2005a).

3. La escala local se refiere al fracturamiento en zonas restringidas y puede variar de unos cuantos centímetros a algunas decenas de metros (se puede medir de manera directa las propiedades de los materiales); ésta es la escala en la que se lleva a cabo la mayor parte de los estudios de mecánica de suelos.

Como ejemplos de fracturamiento local se tiene: (a) las fracturas anulares de tensión que se generan en las zonas transicionales de los piedemontes de lomeríos (Lugo *et al.*, 1991) y que se relacionan con deslizamientos gravitacionales; (b) las grietas superficiales generadas por evaporación-deseccación en extensiones planas arcillosas, generadas por los cambios en las condiciones climáticas y en la presión de poro de las capas sedimentarias inferiores; y (c) las fracturas por tensión que se generan por las fuerzas de filtración ocasionadas por el bombeo localizado (Juárez, 1962; Alberro y Hernández, 1990).

3.1.10. Criterios de generación de grietas en la Ingeniería Civil.

Existen diversas teorías o criterios (Singer, 1980), que tienen por objeto predecir, con base en el comportamiento del material en los ensayos de tensión o de compresión simple, las condiciones en que se produce el agrietamiento bajo cualquier combinación de esfuerzos. Los criterios más comúnmente usados son los siguientes:

a) Teoría de Rankine.

La teoría del esfuerzo máximo, propuesta por Rankine, es la más antigua y la más sencilla de todas. Se basa en la hipótesis de que la falla tiene lugar cuando el mayor de los esfuerzos principales alcanza un valor límite, que puede ser el punto de fluencia determinado en un ensayo de tensión simple, o el esfuerzo último si el material es frágil.

b) Teoría de Saint Venant.

La teoría de la deformación máxima, atribuida a Saint Venant, establece que la falla empieza cuando la deformación principal máxima alcanza el valor necesario para que empiece la fluencia en el ensayo de tensión simple.

c) Teoría de Griffith.

Es conocido que los materiales tienen una resistencia muy inferior a la que cabría esperar de la magnitud de las fuerzas moleculares. Griffith (Jaeger, 1956) explica lo anterior por la presencia de un gran número de grietas pequeñas (microfisuras); en los vértices de estas fisuras se presenta una elevada concentración de esfuerzos que puede conducir al desarrollo de una grieta mayor.

La teoría considera que el material contiene un gran número de grietas incipientes orientadas casualmente y que la falla se presenta cuando al esfuerzo local mayor en la fisura más grande y de orientación más peligrosa alcanza un valor crítico.

3.1.11. Clasificación de los agrietamientos en suelos y sedimentos.

Con el fin de explicar los casos en que se reporta fracturamiento en materiales no cohesivos se tiene una clasificación que toma en cuenta las causas externas que inciden en su aparición, teniendo seis tipos principales:

1. Fracturamiento por variación del contenido de agua.
2. Fracturas hidrodinámicas.
3. Fracturamiento asociado al asentamiento diferencial por hundimiento regional.
4. Variación rápida de esfuerzos horizontales.
5. Fracturas tectónicas.
6. Fracturas por el efecto de raíces y drenaje.

➤ Fracturamiento por variación del contenido de agua.

Se producen al cambiar en forma rápida del estado de esfuerzos en las formaciones arcillosas superficiales, debido a la variación del contenido de agua, lo que ocasiona fuerzas de tensión producidas por la evaporación. Muchas fracturas pueden tener este origen, sin embargo existen otros factores capaces de generar fisuras en los suelos arcillosos.

En superficies expuestas a la evaporación, se desarrollan esfuerzos por capilaridad, los que causan algunas de las grietas que afectan los suelos arcillosos del Valle de México. Se considera principalmente que existen dos tipos de fracturas, las primeras son originadas por el primer ciclo de secado del suelo, lo que provoca grietas muy cercanas entre sí, con un patrón equidistante y el segundo caso corresponde con agrietamiento que presenta separaciones mayores e irregulares ocasionado por ciclos posteriores al secado, que es favorecido por el humedecimiento heterogéneo de las superficie por lluvias; además también se puede presentar un agrietamiento secundario normal a las grietas principales.

➤ Fracturas hidrodinámicas.

Este tipo de grieta (Figura 3.4), se desarrolla por procesos de filtración y carga hidráulica, el agua llena las grietas preexistentes y al incrementarse la carga hidráulica en el fondo de la grieta se incrementa la presión hacia las paredes lo cual provoca el ensanchamiento de estas.

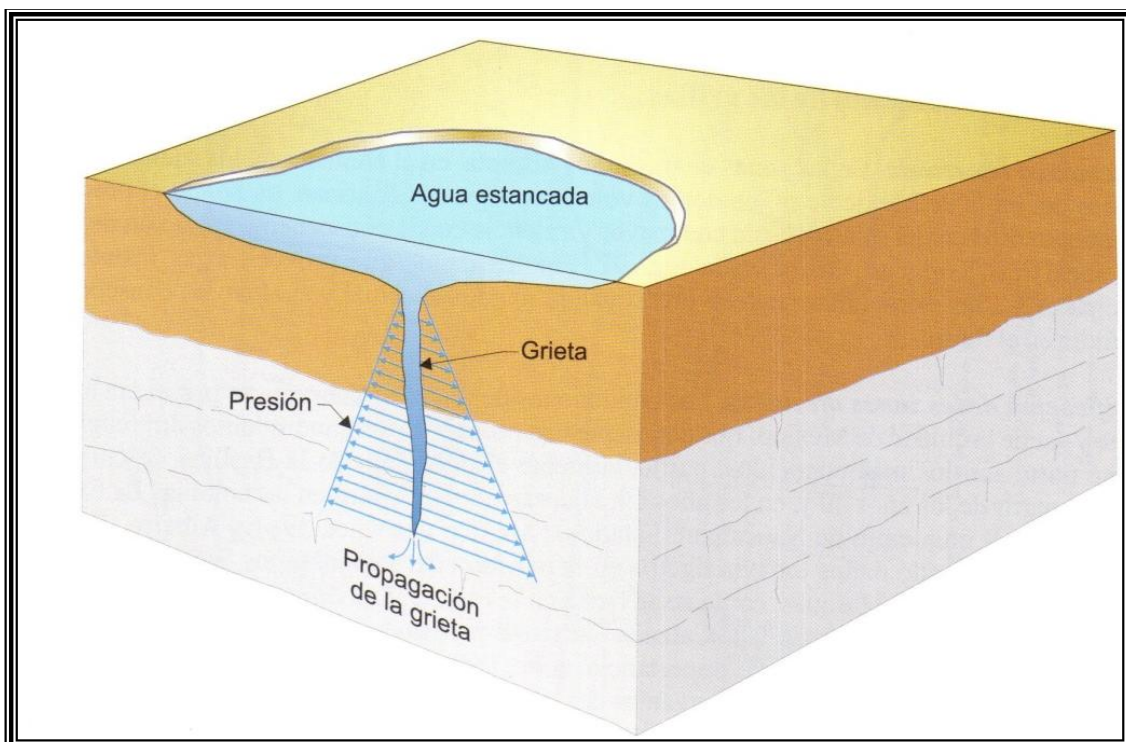


Figura 3.4. Ejemplo de propagación de grieta de origen hidrodinámico (Tomada de Santoyo, 2005).

Se producen al inicio de la temporada de lluvias, generalmente tienen una dirección preferencial; su abertura inicial es de unos centímetros a medio metro, la que disminuye hacia los extremos ya que no existe desnivel entre sus límites.

En ocasiones se observa agua en su interior, cerca de la superficie y alcanzan superficies de varios cientos de metros; su aparición es repentina y se azolvan en pocos meses con materiales arcillosos y limosos transportados por el viento y los escurrimientos de agua. En unos cuantos días, puede ocurrir que sus extremos se erosionan y desprenden material que contribuye a su relleno.

Cuando son amplias en su parte central, se generan pequeñas grietas paralelas que se atribuyen a la pérdida de confinamiento lateral del terreno.

En las Figuras 3.5 y 3.6, se ilustra el comportamiento de los agrietamientos en la mayoría de los suelos blandos antes y después de las primeras lluvias torrenciales de la temporada o después de alguna sacudida sísmica.



Figura 3.5. Fractura aislada, antes (izq.) y después (der.) de lluvia o de un sismo (Romero, 2011).

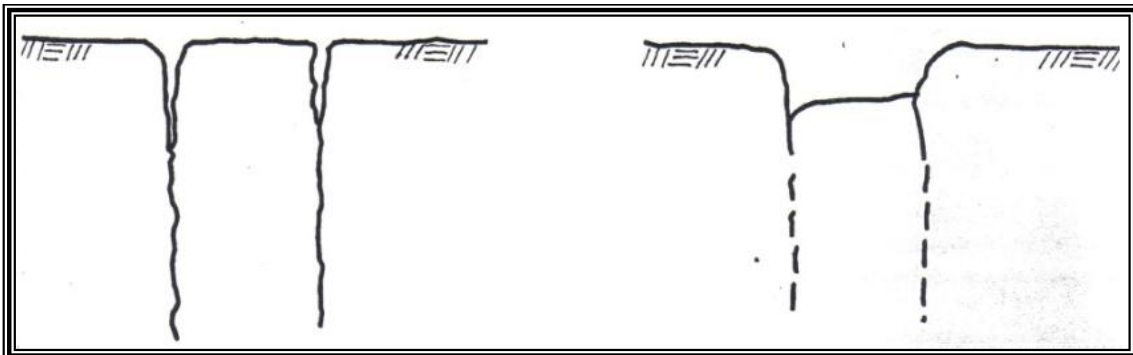


Figura 3.6. Par de fracturas, antes (izq.) y después (der.) de lluvia o de un sismo (Romero, 2011).

Estos agrietamientos se originan como eventos rápidos que ocurren cuando se acumula agua en la superficie y bruscamente se abre una fisura por la cual se filtra súbitamente.

- Fracturamiento asociado al asentamiento diferencial por hundimiento regional.

Al producirse el hundimiento regional, hacia las fronteras de la zona lacustre se manifiestan este tipo de grietas por tensión (Murillo, 1990), las que por lo común siguen trayectorias semejantes de formaciones subterráneas de mayor rigidez que las formaciones arcillosas. Presentan también, en general, una longitud superior a 100 m, por lo general con un desnivel entre sus extremos quedando más alto hacia la zona en que aumenta la elevación del terreno. Las lluvias favorecen su aparición, pero pueden presentarse sin su intervención. En ocasiones se manifiestan periódicamente en la misma zona, con cambios de posición subsecuentes hacia el centro de la zona lacustre.

Este tipo de fracturas se generan como respuesta a la descompensación en la capacidad de carga de los suelos blandos que se encuentran sobreyaciendo el perímetro de estructuras compuestas de materiales más rígidos. En las Figuras 3.7 y 3.8, se ilustran algunos mecanismos que generan fracturas de tensión en suelos blandos que descansan sobre estructuras de litología rígida.

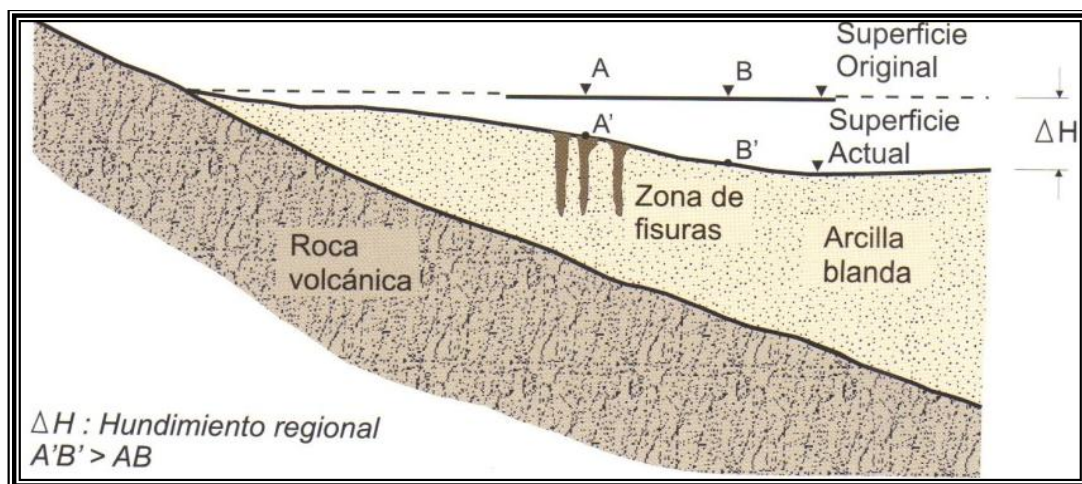


Figura 3.7. Mecanismos de fracturamiento a la orilla del lago (Santoyo, 2005).

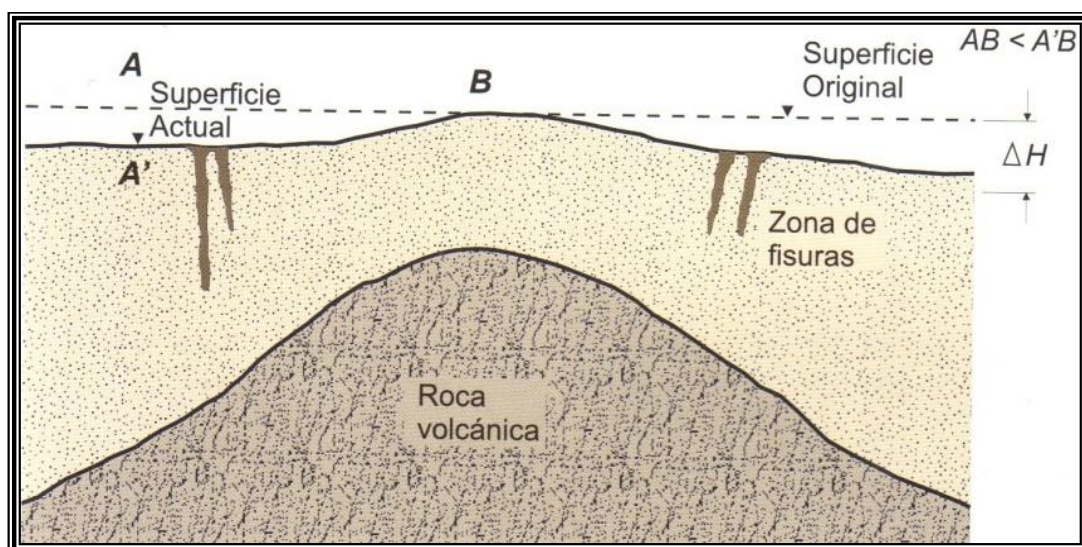


Figura 3.8. Mecanismos de fracturamiento sobre un domo o secuencia de rocas rígidas cubiertas (Santoyo, 2005).

También se genera este tipo de fracturamiento en suelos transicionales en contacto con la zona de lomas, en lugares donde existe cambio de pendiente con respecto a los suelos o rocas que subyacen y en suelos lacustres que se encuentran dentro del área perimetral de los conos de abatimiento generados hacia la superficie (Figura 3.9).

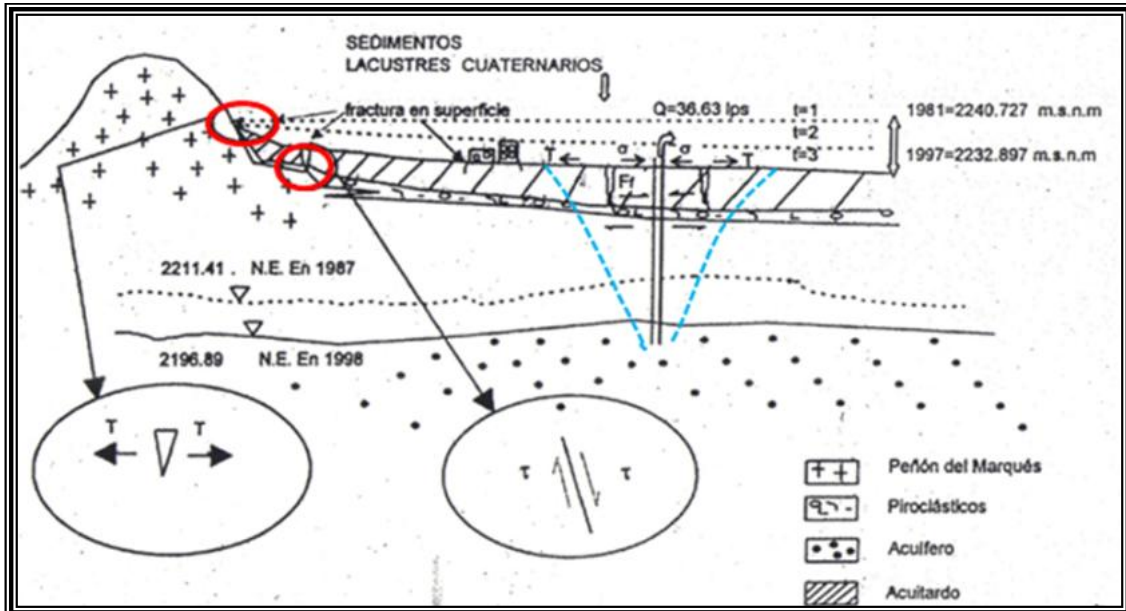


Figura 3.9. Mecanismos de agrietamiento en zonas de transición de la cuenca de México (Cabral C., Lugo H., 2008).

➤ Fracturamiento por variación rápida de esfuerzos horizontales.

Una variación rápida en los esfuerzos horizontales por excavación o por aplicación de cargas horizontales produce el agrietamiento superficial de los suelos lacustres superficiales del Valle de México.

○ Perforación de pozos.

Al inicio de la perforación de pozos de agua, puede ocurrir la aparición espontánea de fracturas que parten de la perforación y se extienden unas decenas de metros. Su aparición es muy rápida, tan solo en 2 a 3 segundos, con abertura de 2 a 3 mm. Este tipo de fracturamiento ha sido reportado por Marsal y Mazari (1959) en pruebas de carga.

○ Hincado de pilotes.

De forma similar al caso de la perforación de pozos, durante el hincado de pilotes se registra la generación de fracturas radiales a estos, de unos pocos milímetros de abertura. Este tipo de fracturas por lo general no amplía su abertura de manera importante.

➤ Fracturas asociadas a actividad tectónica.

Son originadas por la reactivación de antiguas fallas y/o fracturas presentes en la Cuenca de México antes de que ocurriera el relleno lacustre; estas discontinuidades corresponden principalmente con fallas normales que afectan las secuencias que constituyen el basamento (Figura 3.10). La interacción de los sistemas de fallamiento normal provocó levantamientos, hundimientos, escalonamiento y basculamiento de bloques en las secuencias rocosas más antiguas de la Cuenca de México. Si dicho arreglo se extrapola al basamento granular de la Ciudad de México estaría conformado de igual forma por una serie de bloques levantados, hundidos y basculados. Lo anterior trae como consecuencia que el relleno vulcano-sedimentario de la Cuenca de México en esta zona no sea uniforme tanto en distribución, espesor, granulometría y comportamiento mecánico e hidráulico. Posiblemente exista un control estructural antiguo que origine la presencia de grietas en los bordes de los bloques que conforman el basamento y en las zonas que experimentan compactación del subsuelo causado por la extracción de agua potable, originándose nuevas fracturas en superficie que se orientan de acuerdo con el fracturamiento antiguo.

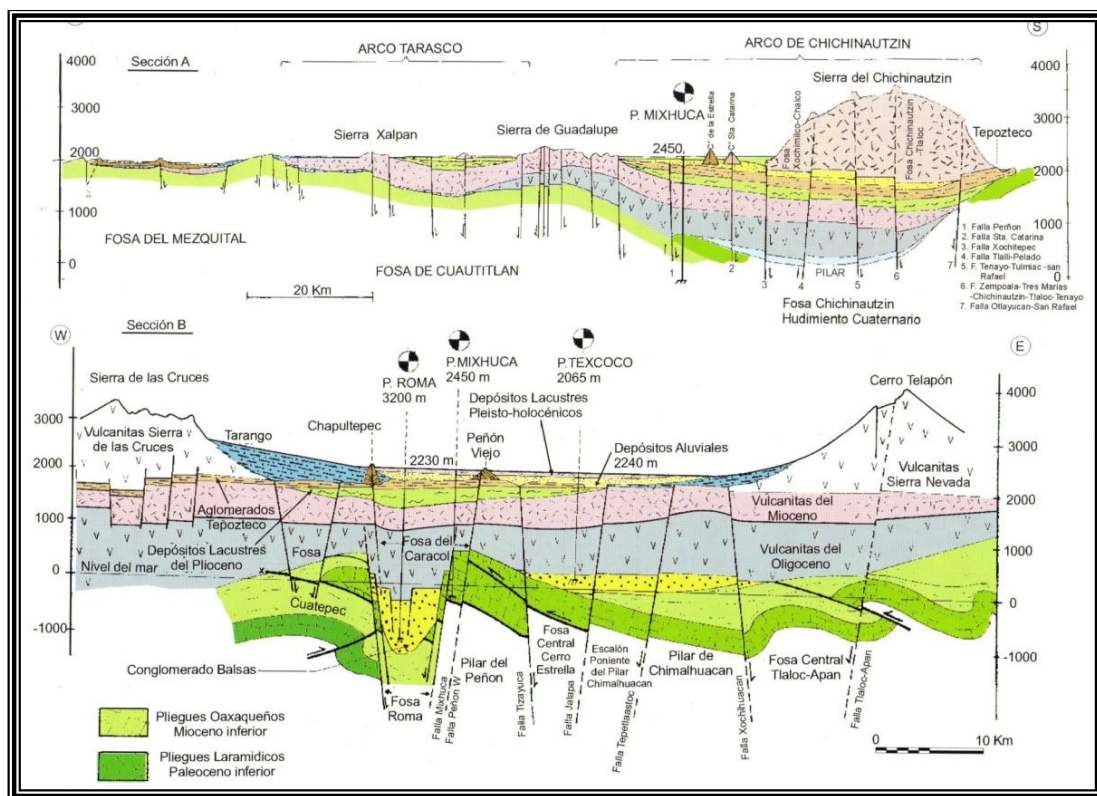


Figura 3.10. Secciones geológicas de la cuenca de México (Tomada de Santoyo, 2005).

➤ Fracturas ocasionadas por el efecto de raíces y drenaje.

Se ha reportado que el crecimiento de raíces de árboles induce el fracturamiento de las arcillas. Los sistemas radiales, además del volumen de suelo que desplazan, succionan agua del terreno por ósmosis lo que causa la generación de fuerzas capilares. Cuando el suelo superficial se satura, se

generan agrietamientos que siguen patrones de desarrollo semejantes al sistema radial. Un efecto similar se ha observado en los sistemas de drenaje mal sellados, que provocan un flujo permanente de agua freática hacia las conducciones de agua potable o residual, lo que favorece la generación de zonas de tensión en los estratos superficiales y produce agrietamiento y asentamientos de carácter local (Figura 3.11).



Figura 3.11. Fractura y levantamiento ocasionado por el efecto de raíces.

3.1.12. Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México.

Las particulares características geológicas de la Cuenca de México se reflejan en el errático comportamiento mecánico de suelo en la superficie de determinadas zonas de la cuenca, lo cual, dentro del estudio de la Geotecnia, condujo a delimitar zonas o áreas que responden mecánicamente diferente, con respecto a las cargas estáticas y dinámicas. Estas características permiten realizar una Zonificación Geotécnica de la Cuenca de México (Figura 3.12), la cual se divide en tres zonas, de acuerdo a como lo define el artículo 170 del capítulo VIII del título sexto del reglamento de construcción en el Distrito Federal. Las zonas presentan las siguientes características generales:

- Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivo relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados para explotar minas de arena y de rellenos no controlados.
- Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos

metros. Esta zona puede subdividirse en transición abrupta, baja y alta. Para fines de este trabajo se considera una zona de transición general.

- Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m. Esta zona puede subdividirse en lago virgen, lago centro I y lago centro II. Para fines de este trabajo se considera una zona de lago general.

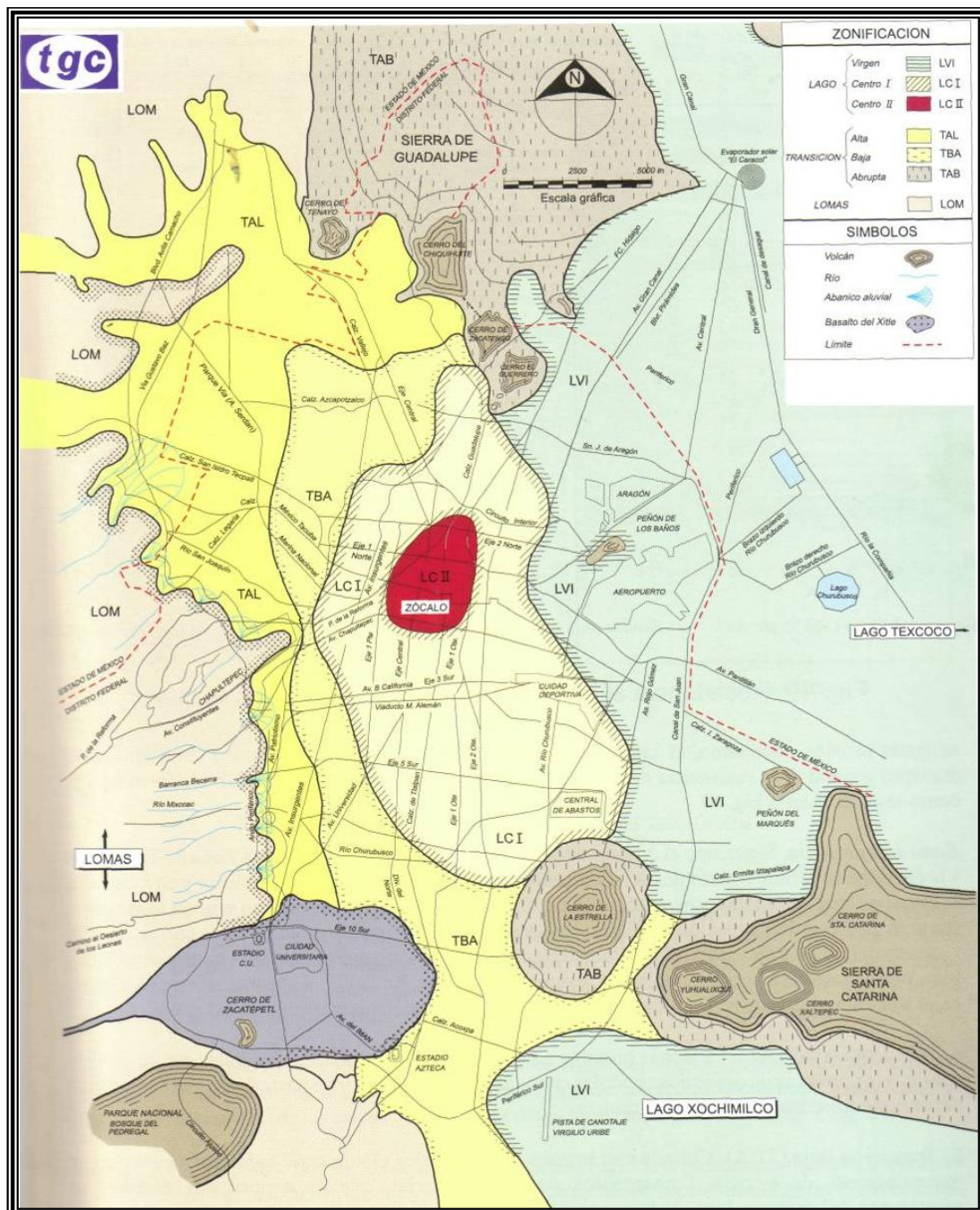


Figura 3.12. Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México (Tomado de Santoyo, 2005).

3.2. DESCRIPCIÓN DEL FRACTURAMIENTO.

La descripción del fracturamiento que se presenta a continuación se realizó por zonas agrupadas de acuerdo con las delegaciones políticas del Distrito Federal. Se describen a continuación cada uno de los sitios que se visitaron para la recolección de datos estructurales (fracturas y/o fallas), indicando la ubicación del sitio, el número de datos recolectados, las características generales de los mismos, así como los daños visibles en el lugar. Los datos recolectados se presentan en tablas, se añaden fotografías que muestren los daños existentes en cada sitio e imágenes de Google Earth que ofrecen una vista en planta del sitio estudiado.

3.2.1. Delegación Iztapalapa.

En esta delegación se estudiaron varios sitios en donde se realizaron las descripciones y mediciones correspondientes, pues es la delegación política más afectada por fracturamiento en el Distrito Federal. En cada uno de estos puntos se observaron fuertes daños en las viviendas, calles, en las banquetas y el pavimento. Se visitaron y tomo información de los siguientes ocho sitios.

- SITIO 1. Unidad Concordia Zaragoza.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	499145	2141469	2229

El recorrido se realizó en el interior y el exterior de la Unidad Habitacional Concordia Zaragoza. Al exterior se recolectaron datos estructurales en la Calzada Ignacio Zaragoza, en la Prolongación Octavio Paz, en la calle Pinos y en la Plaza El Salado. Todo esto entre las estaciones Acatitla y Peñón Viejo del STC metro.

En estos sitios, se realizó la recolección de veintidós datos estructurales, de los cuales veinte datos corresponden con fracturas y los dos restantes corresponden con fallas de tipo normal.

La Tabla 3.1 muestra los datos recolectados en las calles antes mencionadas, en un área aproximada de 1.03 km². La orientación preferencial que se aprecia en el sitio es NW–SE. La longitud máxima y mínima son 566 y 33 metros respectivamente, la abertura varía entre 3 y 10 cm.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Salto [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	72	SW	396	0.05	-9999	499358	2141334	2233	SI
2	45	SW	39	0.03	-9999	499207	2141429	2231	SI
3	41	NW	298	0.05	-9999	499207	2141429	2231	SI

4	60	NW	229	0.05	-9999	499474	2141348	2230	SI
5	50	NW	195	0.04	-9999	499458	2141346	2230	SI
6	60	NW	119	0.03	-9999	499456	2141340	2231	SI
7	60	NW	115	0.03	-9999	499453	2141335	2230	SI
8	46	NW	125	-9999	-9999	499230	2141451	2226	SI
9	62	NW	57	-9999	-9999	499223	2141438	2230	SI
10	40	NW	260	-9999	-9999	499126	2141521	2228	SI
11	75	NW	33	0.03	-9999	498961	2141667	2234	SI
12	55	NW	35	0.05	-9999	498972	2141683	2233	SI
13	78	NW	37	0.1	-9999	498976	2141687	2234	SI
14	50	NW	51	0.04	-9999	498989	2141706	2232	SI
15	38	NW	52	0.05	-9999	498993	2141713	2233	SI
16	55	NW	54	0.05	-9999	499003	2141725	2230	SI
17	45	SW	41	0.03	-9999	499207	2141429	2231	SI
18	45	SW	50	0.04	-9999	499207	2141429	2231	SI
19	41	NW	150	0.05	-9999	499207	2141429	2231	SI
20	89°	NE	180	0.1	0.22	498847	2141744	2245	SI
21	28°	NW	278	0.1	0.5	498877	2141772	2239	SI
22	89°	SW	566	0.1	.1	498690	2141841	2246	SI

Tabla 3.1. Tabla representativa con los datos recolectados en la Unidad Concordia Zaragoza.

La Unidad Habitacional Concordia Zaragoza presenta graves daños. El día que se realizó la visita se realizaban trabajos de re nivelación de algunos de los edificios de la Unidad Habitacional, que son afectados por fracturas que causan riesgo a sus habitantes (Figura 3.13). Al interior de dicha unidad se recolectaron 3 datos estructurales que corresponden con fracturas.



Figura 3.13. Imagen que muestra la separación entre los edificios de la Unidad Concordia Zaragoza.

Frente a las puertas de acceso a la Unidad Habitacional, sobre la Calzada Ignacio Zaragoza se recolectaron 5 datos estructurales. Dichos elementos afectan el pavimento de la calzada causando irregularidades en el terreno.

En la calle Pinos, que limita al Noroeste la Unidad Habitacional se recolectaron 6 datos estructurales que corresponden con fracturas. Afectan el pavimento y las banquetas de la misma.

Por otro lado, en la Plaza El Salado se realizó un recorrido en el que se recolectaron 4 datos estructurales que corresponden con fracturas. Estos elementos afectan el pavimento del estacionamiento de la plaza y las paredes de una sucursal bancaria existente en dicha plaza (Figura 3.14).



Figura 3.14. Imagen que muestra las fracturas en el estacionamiento de la plaza comercial El Salado, Concordia Zaragoza.

Los datos número 20, 21 y 22 corresponden con discontinuidades que se encuentran aproximadamente a 300 metros al NW de la Unidad Habitacional Concordia Zaragoza. Se realizó el recorrido en las calles Cedros, Gabriel González Mier, Emilio P. Campa y Calzada Ignacio Zaragoza. En estos sitios se recolectaron datos que corresponden con tres fallas normales.

El dato número veinte de la tabla corresponde con una fractura con orientación preferencial $NE89^\circ$, con longitud máxima de 180 metros y abertura máxima de 10 cm, y presenta un salto de 22 cm. El echado de la falla se inclina hacia el SE. Este elemento se presenta en el cruce de la calle Cedros con la Calzada Ignacio Zaragoza, en donde se encuentra el Faro de Oriente; cruza de forma oblicua dichas calles con la dirección antes mencionada. Ocasiona daños en el pavimento de las calles y en las paredes de las viviendas (Figuras 3.15 y 3.16).

El penúltimo dato estructural corresponde con una falla normal, que tiene una orientación preferencial $NW28^\circ$, con longitud de 278 metros, abertura máxima de 10 cm y un salto de 50 cm. El echado de la falla se inclina hacia el NE. Esta

falla daña el pavimento de las calles Cedros y Gabriel González Mier, siendo más evidente el daño en la primera, además de importantes fracturas en las bardas de las casas que se encuentran en la dirección del rumbo de la falla (Figura 3.17).



Figura 3.15. Imagen que muestra una de las fallas en calle Cedros, colonia Concordia Zaragoza.

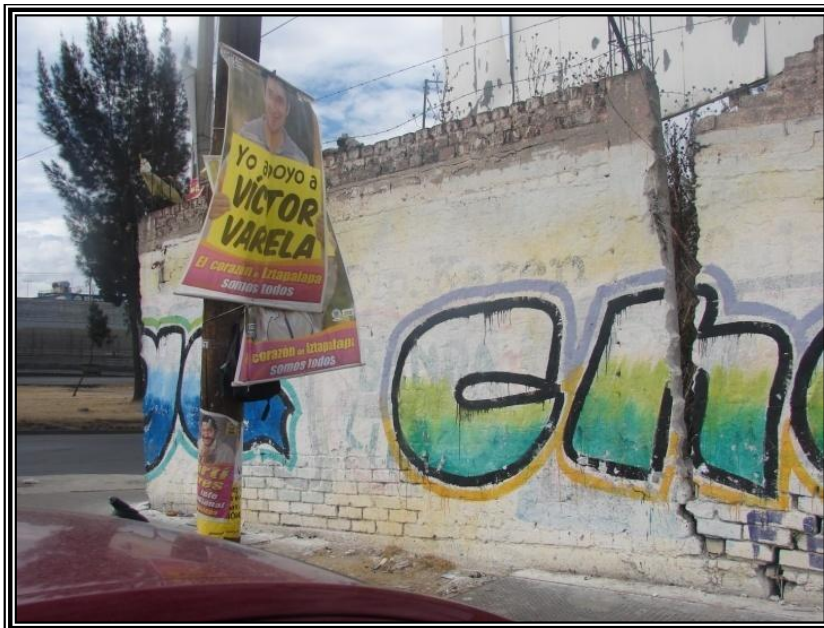


Figura 3.16. Imagen que muestra los daños en la barda de una construcción en la calle Cedros, colonia Concordia Zaragoza.

El último dato estructural corresponde con una falla normal con orientación preferencial SW89°, con longitud máxima de 566 metros, una abertura máxima de 10 cm y un salto de 10 cm; el echado de la falla se inclina al NW. Este elemento se presenta en el cruce de la calle Emilio P. Campa con la Calzada Ignacio Zaragoza y se extiende hacia el SW hasta llegar a la calle Joaquín Clausell. Esta fractura daña el pavimento de las calles mencionadas, en

especial el de la Calzada I. Zaragoza, lo que se hace evidente al observar la forma irregular de la superficie del terreno. Además causa daño en algunas de las bardas de las construcciones que se encuentran en la dirección del rumbo de la falla.



Figura 3.17. Imagen que muestra una falla en calle Cedros, colonia Concordia Zaragoza.

En la Figura 3.18 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas y fallas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo y verde respectivamente, en una imagen de satélite de Google Earth.



Figura 3.18. Imagen que muestra las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la Unidad Concordia Zaragoza.

- SITIO 2. Colonia Popular Ermita Zaragoza.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	500207	2140958	2236

El recorrido se realizó en los alrededores de la colonia Popular Ermita Zaragoza. La recolección de datos se realizó en el espacio comprendido entre las estaciones Santa Marta y Acatitla del STC metro, y en la calle Ecatepec de dicha colonia.

En este sitio se realizó la recolección de 17 datos estructurales, 16 de ellos corresponden con fracturas y el restante corresponde con una falla geológica de tipo normal (Tabla 3.2).

Para cada uno de los datos se tomó la orientación preferencial en las calles en las que se observó la discontinuidad y posteriormente se realizó un recorrido por las calles aledañas para seguir la dirección de las fracturas a través de las mismas, en un área aproximada de 0.3 km².

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Salto [m]	x	y	z	Traza
1	40	SW	110	0.05	-9999	500446	2140973	2237	SI
2	38	SW	138	0.05	-9999	500433	2140971	2231	SI
3	48	SW	58	0.05	-9999	500428	2140975	2234	SI
4	35	SE	83	0.05	-9999	500428	2140975	2234	SI
5	60	SW	50	0.02	-9999	500390	2140931	2230	SI
6	85	SW	57	0.04	-9999	500385	2140929	2235	SI
7	68	SW	45	0.04	-9999	500385	2140924	2235	SI
8	62	SW	66	0.05	-9999	500385	2140918	2234	SI
9	63	SE	267	0.05	-9999	500207	2140958	2236	SI
10	49	SE	56	0.04	-9999	500207	2140958	2236	SI
11	62	SE	324	0.06	0.23	500205	2140943	2233	SI
12	46	SW	65	0.03	-9999	500210	2140749	2235	SI
13	74	SW	181	0.04	-9999	500385	2140868	2236	SI
14	56	NW	272	0.04	-9999	500380	2140775	2235	SI
15	80	SE	215	0.05	-9999	500353	2140733	2235	SI
16	70	SW	131	0.04	-9999	499826	2141069	2230	SI
17	52	NW	132	0.03	-9999	499826	2141069	2230	SI

Tabla 3.2. Tabla representativa con los datos recolectados en la colonia Popular Ermita Zaragoza.

En este sitio se observan dos direcciones preferenciales de fracturamiento, NE - SW y NW - SE. La longitud máxima de los datos es de 324 metros y la mínima es de 45 metros. La abertura máxima y mínima corresponde con 6 cm y 2 cm respectivamente.

A lo largo de la calle Niño Artillero se observan 10 fracturas principales que corresponden con los datos números 2, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14 y 15. Al final de la misma calle existe una zona designada como estacionamiento para los autos, la cual presenta daño en el pavimento ocasionado por las fracturas presentes. Se trata de 4 fracturas, que corresponden con los datos números 1, 2, 3 y 4. El dato número 2 presenta continuidad en dichos lugares. Estos elementos causan daños en el pavimento de las calles, en las banquetas y en las paredes de algunas de las casas habitación de dichas calles (Figura 3.19).



Figura 3.19. Imagen que muestra daños en una casa ubicada en la calle Niño Artillero, colonia Popular Ermita Zaragoza.

El dato numero 11 de la tabla corresponde con una falla de tipo normal. Presenta orientación general SE62°, longitud máxima de 324 metros, abertura de 6 cm y un salto estructural de 23 cm. El echado de la falla se inclina hacia el NE. Esta estructura ocasiona daños en el pavimento de la calle Andador Niño Artillero, los cuales intentaron remediarse rellenando la cavidad existente y repavimentando (Figura 3.20). Además, se observan dos casas abandonadas y con daños severos ocasionados por la falla (Figuras 3.21).



Figura 3.20. Imagen que muestra una falla en calle José Pagola, colonia Popular Ermita Zaragoza.

Dos fracturas más pueden observarse en la calle Ecatepec, las cuales ocasionan daños en el pavimento y en las paredes de las casas habitación que están en la dirección del fracturamiento.



Figura 3.21. Imagen que muestra dos casas con severos daños estructurales en la colonia Popular Ermita Zaragoza.

En la Figura 3.22 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas y fallas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo y verde respectivamente, en una imagen de satélite de Google Earth.

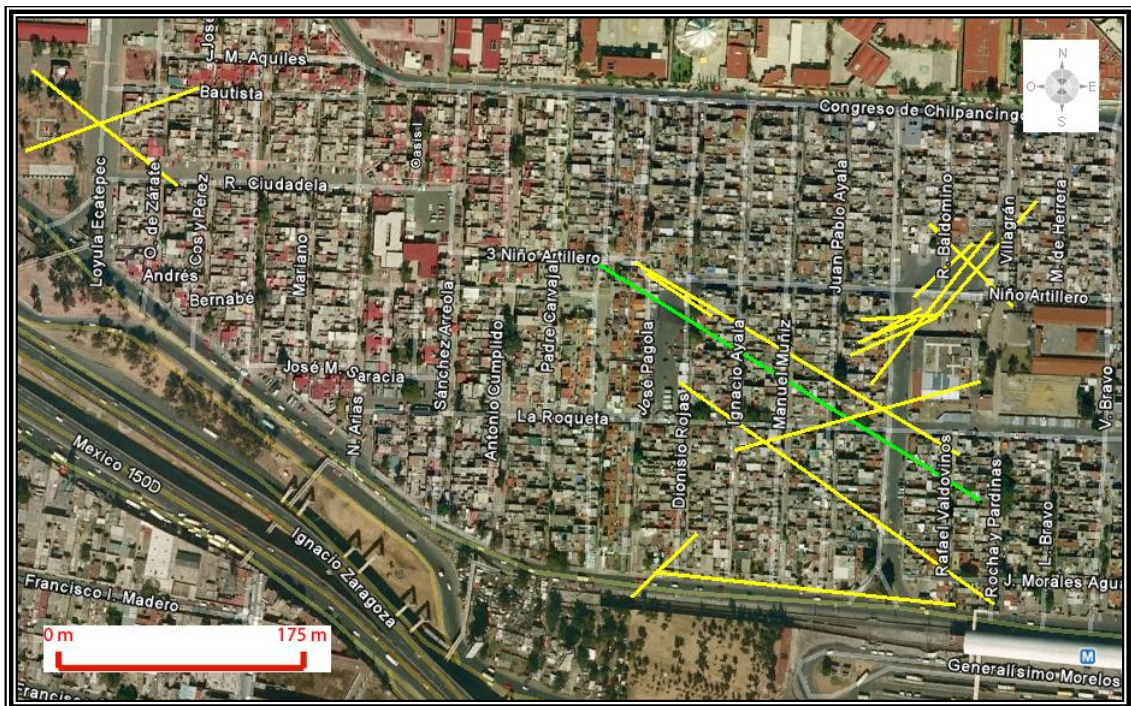


Figura 3.22. Imagen que muestra las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Popular Ermita Zaragoza.

- SITIO 3. Colonias El Edén y Santa Marta Acatitla, Iztapalapa.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	498570	2141165	2248

El recorrido se realizó en las calles de la colonia El Edén, con especial atención en las calles María Isabel, Victoria, Carlota, Laura y María Eugenia; de las cuales se tenía reporte previo de daños causados por fracturamiento. En este sitio se realizaron dos mediciones distintas. Una consta de 12 datos estructurales que corresponden con fracturas de gran longitud (más de cien de metros). La otra medición consta de 159 datos estructurales que corresponden con fracturas de corta longitud (centímetros y metros) y que fueron recolectados para realizar un tratamiento estadístico; al ser numerosos estos datos, se adjuntan al final de la tesis, en el apéndice denominado “Datos del Fracturamiento”. Para los datos que presentan gran longitud se tomó la orientación preferencial en las calles en las que se observó la discontinuidad y posteriormente se realizó un recorrido por las calles aledañas para seguir la dirección de las fracturas a través de las mismas.

La Tabla 3.3 muestra los datos recolectados en las calles antes mencionadas. La orientación preferencial es NW – SE, la longitud máxima de los elementos es de 313 metros y la mínima de 94 metros. La abertura varía entre 4 y 8 cm.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	x	y	z	Traza
1	80	NW	158	0.06	498570	2141147	2250	SI
2	80	NW	155	0.05	498570	2141163	2248	SI
3	67	SW	112	0.05	498485	2141145	2253	SI
4	16	NW	123	0.04	498444	2141109	2250	SI
5	9	NW	116	0.05	498406	2141108	2246	SI
6	80	SW	103	0.04	498412	2141138	2246	SI
7	35	NW	94	0.05	498417	2141155	2243	SI
8	78	NW	110	0.07	498449	2141149	2250	SI
9	77	NW	313	0.06	498837	2140957	2257	SI
10	45	NW	238	0.05	498922	2140966	2243	SI
11	35	NE	190	0.05	499060	2140925	2239	SI
12	8	SE	255	0.08	499063	2140878	2249	SI

Tabla 3.3. Tabla representativa con los datos recolectados en la colonia El Edén.

Los primeros ocho datos de la tabla corresponden con fracturas observadas en la colonia el Edén. Cruzan de forma oblicua las calles antes mencionadas y se extienden a lo largo de varias cuadras. Estas fracturas ocasionan daños visibles en el pavimento de las calles, banquetas y guarniciones, así como deterioro estructural en las paredes de las casas (Figuras 3.23, 3.24 y 3.25).



Figura 3.23. Imagen que muestra el daño existente en una banqueta de la calle María Isabel, en la colonia El Edén.



Figura 3.24. Imagen que muestra daños estructurales en una casa ubicada en la calle María Eugenia, colonia El Edén.



Figura 3.25. Imagen que muestra la separación entre casas, en la calle Carlota, en la colonia El Edén.

Los últimos cuatro datos de la Tabla se tomaron en el límite de las colonias El Edén y Santa Martha Acatitla, por lo que se consideran dentro del mismo sitio. Para la recolección de estos datos se realizaron recorridos por las calles Felipe Neri, Everardo González, Benito Juárez, Porfirio Díaz, Francisco I. Madero y Venustiano Carranza. En estos sitios se recolectaron 4 datos estructurales que corresponden con fracturas, con más de 100 metros de longitud. Estos elementos causan daños en el pavimento de las calles y en las paredes de algunas de las casas habitación de dichas calles.

En la Figura 3.26 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.



Figura 3.26. Imagen que muestra las fracturas recolectadas en las colonias El Edén y Santa Martha Acatitla.

- SITIO 4. Colonia Lomas San Lorenzo.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	492899	2136171	2251

El recorrido se realizó en las calles Vista Hermosa, Guadalupe Victoria, Reforma y Avenida de las Torres. Se recolectaron seis datos estructurales, 5 de ellos corresponden con fracturas y el restante con una falla normal.

La Tabla 3.4 muestra los datos recolectados en las calles antes mencionadas. La orientación preferencial es NE – SW, la longitud máxima de los elementos es de 251 metros y la mínima de 40 metros. La abertura varía entre 5 y 7 cm. Estos elementos causan daños en el pavimento de las calles y en las paredes de algunas de las casas habitación de dichas calles.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Salto [m]	x	y	z	Traza
1	82	SW	213	0.05	-9999	492998	2136181	2251	SI
2	78	SW	83	0.07	0.11	493001	2136170	2252	SI
3	82	SW	251	0.05	-9999	493041	2136170	2255	SI
4	71	NE	195	0.06	-9999	492998	2136181	2251	SI
5	63	NE	40	0.07	-9999	493001	2136170	2252	SI
6	58	NE	85	0.05	-9999	493041	2136170	2255	SI

Tabla 3.4. Tabla representativa con los datos recolectados en la colonia Lomas San Lorenzo.

En la calle Vista Hermosa esquina con Guadalupe Victoria se encuentra una construcción que se rentaba como salón de fiestas, en su interior se recolectaron datos estructurales que corresponden con fracturas (Figura 3.27). Al exterior del inmueble se presentó hace unos años un hundimiento, lo que ocasionó la muerte de una persona al colapsarse la calle y caer en el hueco dentro de su automóvil.

El dato número 2 de la tabla corresponde con una falla de tipo normal que tiene orientación preferencial SW78°, longitud máxima de 83 metros, apertura de 7 cm y un salto estructural de 11 cm. Este elemento se presenta en el cruce de las calles Vista Hermosa y Guadalupe Victoria y tiene continuidad hacia el interior del estacionamiento del salón de fiestas (Figura 3.30). Ocasionó daños en el pavimento, en la banqueta de la calle Guadalupe Victoria y en las paredes de las casas que se encuentran en la dirección de la discontinuidad (Figuras 3.28 y 3.29).



Figura 3.27. Imagen que muestra el daño dentro del salón de fiestas, en la calle Vista Hermosa, colonia Lomas de San Lorenzo.



Figura 3.28. Imagen que muestra el daño en el pavimento de la calle Guadalupe Victoria, en la colonia Lomas de San Lorenzo.

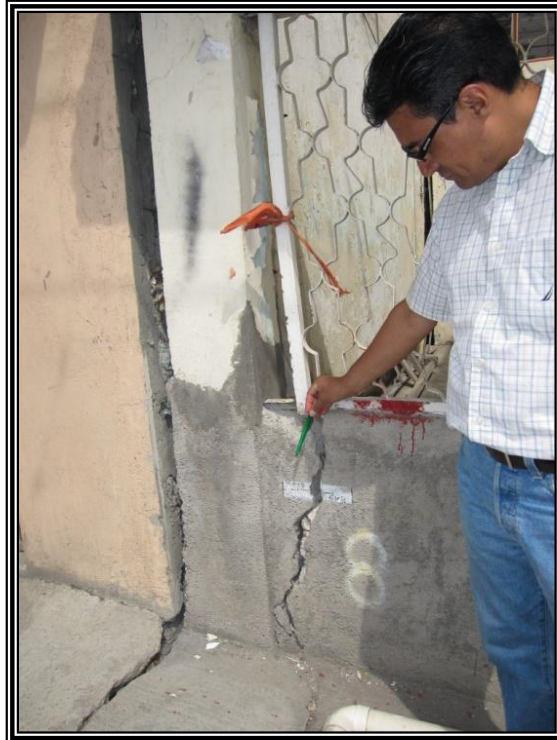


Figura 3.29. Imagen que muestra el daño en la pared de una casa en la calle Guadalupe Victoria, en la colonia Lomas de San Lorenzo.



Figura 3.30. Imagen que muestra el daño en el pavimento del estacionamiento en calle Vista Hermosa, en la colonia Lomas de San Lorenzo.

En la Avenida de las Torres se presentan dos fracturas de dimensiones considerables. Dichos elementos corresponden con los datos número 1 y 3 de la Tabla 3.4 y son visiblemente paralelos. La orientación preferencial de las mismas es SW82°, con 213 metros y 251 metros respectivamente. Las fracturas ocasionan daño en las paredes de las casas que se encuentran en la dirección del fracturamiento. En esta calle hay bloques de adoquín y no hay pavimento, a pesar de esto se aprecia el daño en la dirección del fracturamiento (Figuras 3.31 y 3.32). La dirección de estas fracturas se

interseca con la dirección de los ductos de gas de PEMEX que se extienden a lo largo del camellón de Avenida de las Torres.



Figura 3.31. Imagen que muestra el daño en la pared de una casa en Avenida de las Torres, en la colonia Lomas de San Lorenzo.



Figura 3.32. Imagen que muestra el daño en el adoquín de Avenida de las Torres, en la colonia Lomas de San Lorenzo.

Los datos número 4 y 6 de la tabla corresponden con dos fracturas visibles en la calle Reforma, en contra esquina con el Reclusorio Oriente. Presentan orientación preferencial $NE71^\circ$ y $NE58^\circ$ respectivamente. Ocasionan daños

apenas visibles en el pavimento de dicha calle, pero se hace evidente al observar una barda afectada. Dicha barda se ha reconstruido varias veces, para mitigar el daño ocasionado (Figura 3.33).



Figura 3.33. Imagen que muestra el daño en una pared en calle Reforma, en la colonia Lomas de San Lorenzo.

En la Figura 3.34 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas y las fallas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo y verde respectivamente, en una imagen de satélite de Google Earth.

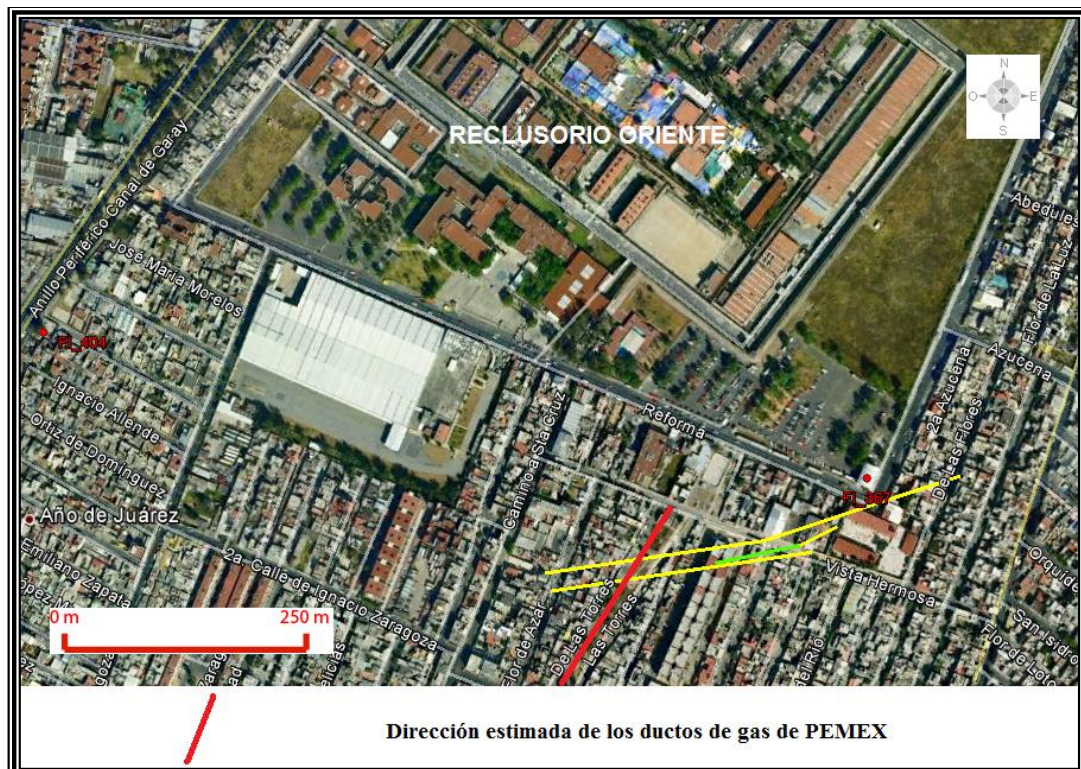


Figura 3.34. Imagen que muestra las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la Colonia Lomas de San Lorenzo.

- SITIO 5. Colonia Guelatao de Juárez.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	495268	2143603	2237

La Tabla 3.5 muestra los datos recolectados en la colonia Guelatao de Juárez. Se recolectaron siete datos estructurales de los cuales dos corresponden con fallas normales y los cinco restantes con fracturas. Indican una dirección de orientación preferencial NE - SW, la longitud mínima de las fracturas observadas en el sitio es de 35 m y la máxima es de 210 m. En cuanto a la abertura mínima y máxima se tienen 2 cm y 8 cm respectivamente.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Salto [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	72°	SW	172	0.8	0.6	495268	2143603	2237	SI
2	85°	NE	210	0.6	1	495235	2143630	2237	SI
3	72°	SW	91	0.03	-9999	494944	2143559	2237	SI
4	85°	SW	61	0.02	-9999	494994	2143628	2238	SI
5	85°	SW	98	0.05	-9999	494649	2143506	2239	SI
6	90°	W	77	0.02	-9999	494602	2143513	2239	SI
7	83°	NW	35	0.02	-9999	494589	2143491	2239	SI

Tabla 3.5. Tabla representativa con los datos recolectados en la colonia Guelatao de Juárez.

El dato numero uno de la tabla anterior corresponde con una falla normal, presenta orientación preferencial SW72°; longitud y abertura máximas de 172 m y 8 cm respectivamente. El echado de la falla se inclina al NW, y tiene un salto estructural de 60 cm (Figura 3.35).

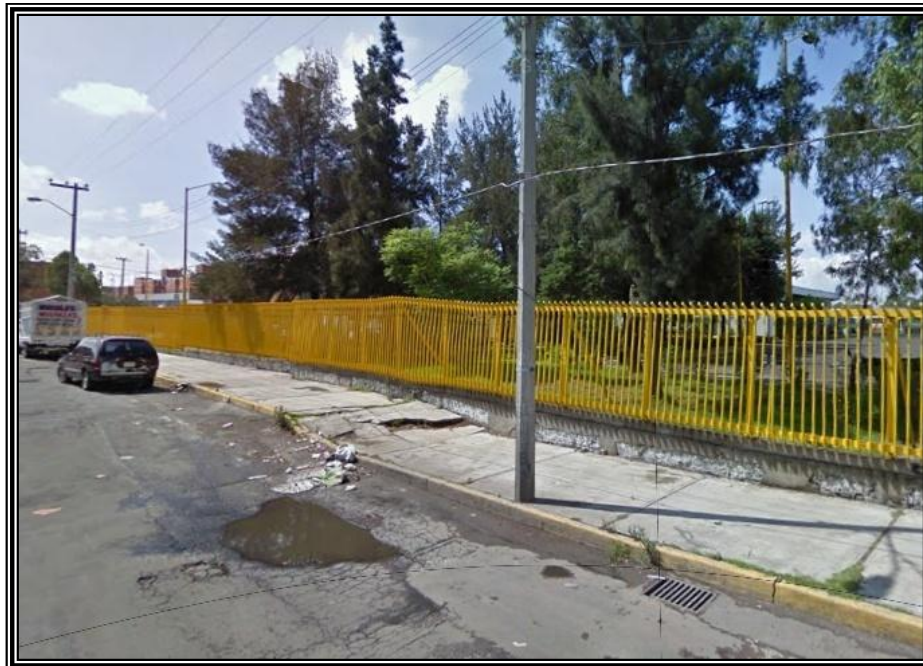


Figura 3.35. Imagen que muestra el daño en el pavimento de la calle Emilio Contel, colonia Guelatao de Juárez.

El dato número dos, corresponde con una falla normal, presenta orientación preferencial NE85°, longitud y abertura máximas de 210 m y 6 cm

respectivamente. El echado de la falla se inclina al NW, y tiene un salto estructural de un metro (Figura 3.36).

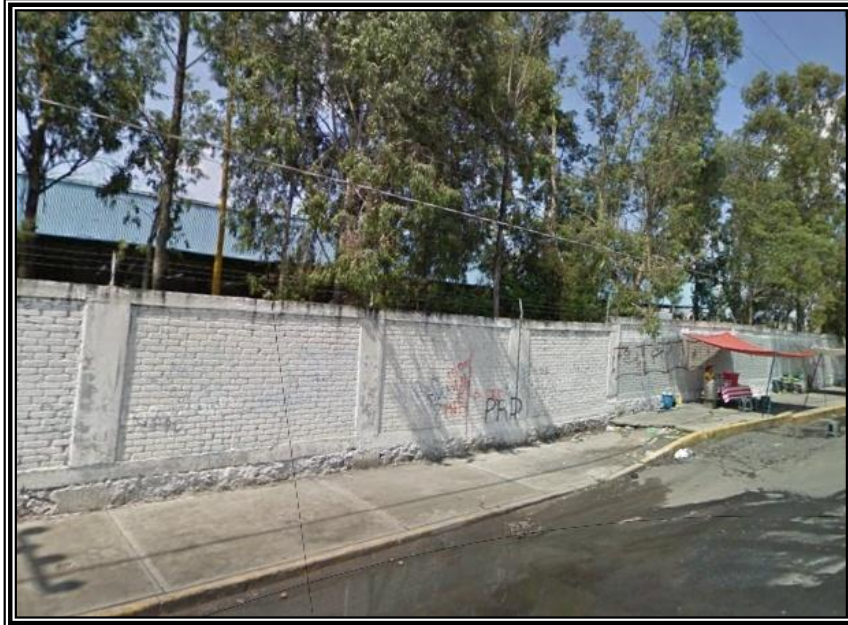


Figura 3.36. Imagen que muestra el daño ocasionado por una falla normal en el pavimento de la calle Emilio Contel, colonia Guelatao de Juárez.

Dichas fallas ocasionan daños en el pavimento de la calle Emilio Contel, de la colonia Guelatao de Juárez, lo que se hace evidente al observar la forma irregular de la superficie del terreno. Además, las banquetas y las guarniciones sufren afectaciones. Cuando llueve en la zona se produce acumulación de agua, lo que eventualmente origina infiltración a través de las discontinuidades (Figura 3.37).

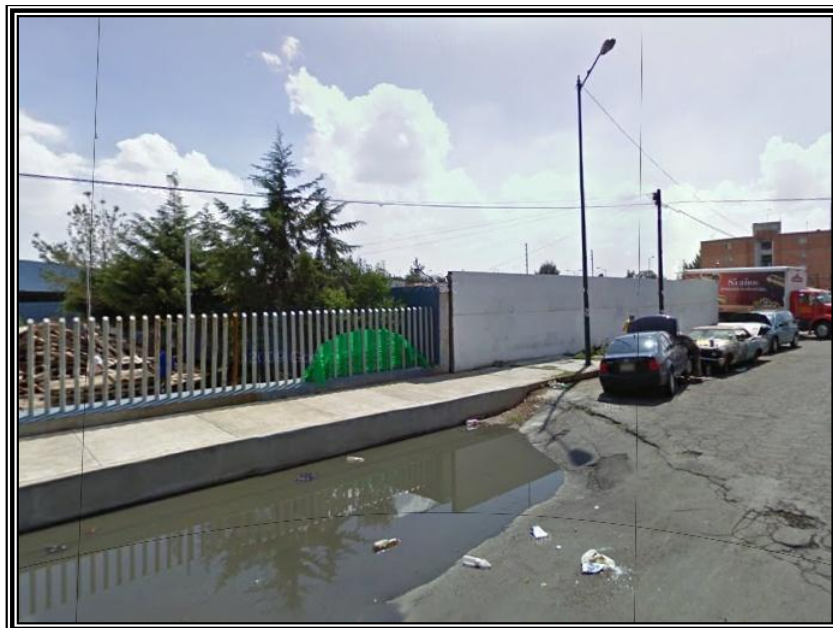


Figura 3.37. Imagen que muestra el daño en el pavimento de la calle Emilio Contel, colonia Guelatao de Juárez.

Las fracturas ocasionan daños en el pavimento de la Av. Telecomunicaciones y de la calle General Antonio de Loyola (Figura 3.38).

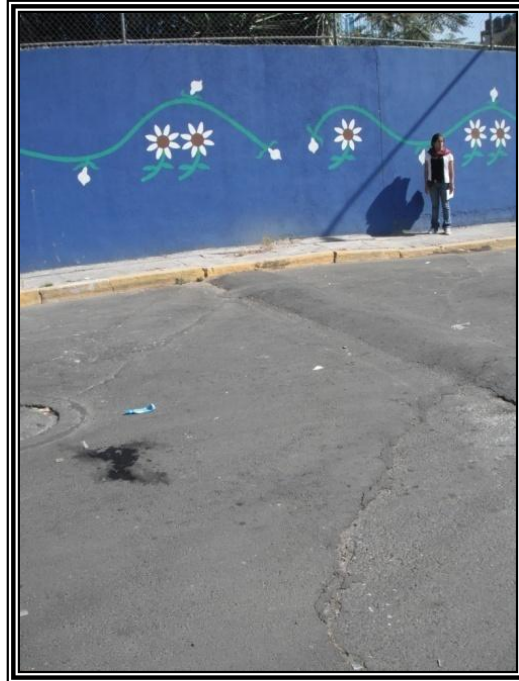


Figura 3.38. Imagen que muestra el daño en el pavimento de la Av. Telecomunicaciones, colonia Guelatao de Juárez.

En la Figura 3.39 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas y las fallas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo y verde respectivamente, en una imagen de satélite de Google Earth.



Figura 3.39. Imagen que muestra las fracturas y las fallas, en color amarillo y verde respectivamente, representadas en una imagen de Google Earth, en la Colonia Guelatao de Juárez.

- SITIO 6. Colonias Reforma Educativa y Tepalcates.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	494314	2143568	2240

La Tabla 3.6 muestra los datos recolectados en las colonias Reforma Educativa y Tepalcates. Se recolectaron seis datos estructurales que corresponden con fracturas. Indican una dirección de orientación preferencial NW – SE; la longitud mínima de las fracturas observadas en el sitio es de 41 m y la máxima es de 71 m. En cuanto a la abertura mínima y máxima se tienen 1 cm y 3 cm respectivamente.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	65	NW	71	0,02	494314	2143568	2240	SI
2	78	NW	75	0,03	494163	2143621	2239	SI
3	75	NW	54	0,02	494050	2143584	2238	SI
4	80	NW	53	0,02	493891	2143647	2237	SI
5	83	NW	41	0,01	493700	2143699	2240	SI
6	82	NW	57	0,01	493858	2144629	2236	SI

Tabla 3.6. Tabla representativa con los datos recolectados en las colonias Reforma Educativa y Tepalcates.

Estos elementos ocasionan daños visibles en el pavimento de la Avenida Constitución de Apatzingán, y en el pavimento de los andadores de la colonia Reforma Educativa. También se observan daños en las paredes de las casas que se encuentran en la dirección del fracturamiento (Figuras 3.40 y 3.41).

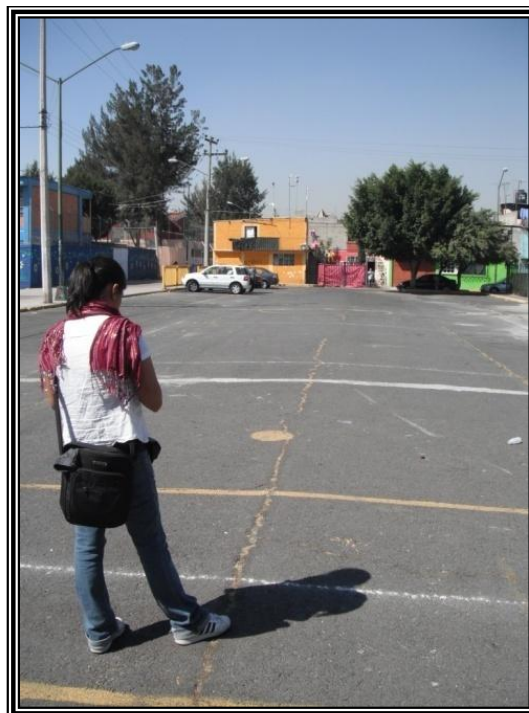


Figura 3.40. Imagen que muestra el daño en el pavimento de un estacionamiento, ubicado en la colonia Reforma Educativa.



Figura 3.41. Imagen que muestra el daño en las construcciones de la colonia Tepalcates.

En la Figura 3.39 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.



Figura 3.42. Imagen que muestra las fracturas, representadas en una imagen de Google Earth, en las colonias Reforma Educativa y Tepalcates.

- SITIO 7. Colonia Santa Cruz Meyehualco.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	496440	2138928	2259

En este sitio se realizaron dos mediciones distintas. Una consta de 3 datos estructurales que corresponden con fracturas de gran longitud (cientos de metros). La otra medición consta de 190 datos estructurales que corresponden con fracturas de corta longitud (centímetros y metros) y que fueron recolectados para realizar un tratamiento estadístico. La tabla que contiene 190 datos se presenta en el apéndice denominado “Datos del Fracturamiento”.

Para los datos que presentan gran longitud se tomó la orientación preferencial cerca de la Calzada Ermita – Iztapalapa y posteriormente se realizó un recorrido por las calles aledañas para seguir la dirección de las fracturas a través de las mismas.

La Tabla 3.7 muestra los datos recolectados en la Colonia Santa Cruz Meyehualco. Se recolectaron tres datos estructurales de las fracturas de mayor longitud que indican una dirección de orientación preferencial NE - SW, la longitud mínima de las fracturas observadas en el sitio es de 240 m y la máxima es de 375 m. En cuanto a la abertura mínima y máxima se tienen 5 cm y 8 cm respectivamente. En este sitio no fue posible tomar el dato de separación entre fracturas debido al constante flujo de vehículos que presenta la calzada.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	20	SW	375	0.07	496041	2138868	2246	SI
2	22	NE	240	0.05	496041	2138868	2246	SI
3	30	SW	371	0.08	496440	2138928	2259	SI

Tabla 3.7. Tabla representativa con los datos recolectados en la colonia Santa Cruz Meyehualco.

Los daños se presentan en el pavimento de las calles y de la Calzada Ermita-Iztapalapa. En esta última se observan irregularidades en la superficie del terreno ocasionadas por las fracturas (Figura 3.43). Por otro lado, el dato estructural que corresponde en la tabla anterior con el número 1 tiene una dirección preferencial que se dirige a una estación de servicio de venta de gasolina de PEMEX y pasa a un costado de dicha estación. Esta estación corresponde con la ES3990 Servicios Santa Cruz, S.A. de C.V, con dirección en Calzada Ermita – Iztapalapa No. 2710, esquina con Emiliano Zapata en la colonia Santa Cruz Meyehualco (Figuras 3.44 y 3.45).



Figura 3.43. Fotografía que muestra la forma irregular del terreno en la Calzada Ermita-Iztapalapa, en la colonia Santa Cruz Meyehualco.



Figura 3.44. Fotografía que muestra la estación de servicio en la dirección del fracturamiento, en la Calzada Ermita-Iztapalapa, en la colonia Santa Cruz Meyehualco.



Figura 3.45. Fotografía que muestra el anuncio independiente de la Estación de Servicio 3990, en la colonia Santa Cruz Meyehualco.

Al recorrer las calles aledañas se pudo observar el grave daño ocasionado por las fracturas en las paredes de las viviendas que se encuentran en la dirección del fracturamiento (Figura 3.46).



Figura 3.46. Fotografía que muestra los daños ocasionados en una vivienda de la calle Javier Mina, en la colonia Santa Cruz Meyehualco.

La recolección de datos estructurales que se emplearon para el tratamiento estadístico se realizó en las calles 5 y 7 de la Unidad Santa Cruz Meyehuelaco (Figura 3.47).



Figura 3.47. Recolección de datos para el tratamiento estadístico, en las calles 5 y 7, de la colonia Santa Cruz Meyehualco.

En la Figura 3.48 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.



Figura 3.48. Imagen que muestra las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en Santa Cruz Meyehualco.

- SITIO 8. Colonia Jacarandas.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	494641	2139316	2239

En este sitio se realizaron dos mediciones distintas. Una consta de un dato estructural que corresponde con una discontinuidad de gran longitud (cientos de metros). La otra medición consta de 136 datos estructurales que corresponden con fracturas de corta longitud (centímetros y metros) y que fueron recolectados para realizar un tratamiento estadístico (Figura 3.49). La tabla que contiene 136 datos se presenta en el apéndice denominado “Datos del Fracturamiento”.

Para el dato que presenta gran longitud se tomó la orientación preferencial en la calle Leandro Valle y posteriormente se realizó un recorrido por las calles aledañas para seguir la dirección de la discontinuidad a través de las mismas.

La Tabla 3.8 muestra el dato recolectado en la colonia Jacarandas. Se recolectó un dato estructural que indica una dirección de orientación preferencial SW43°, la longitud máxima es de 422 m. En cuanto a la abertura máxima se observan 15 cm.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Salto [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	43°	SW	422	0.15	0.65	494641	2139316	2239	SI

Tabla 3.8. Tabla representativa con los datos recolectados en la colonia Jacarandas.

Dicho elemento corresponde con una falla normal, que presenta salto estructural de 65 cm, y el echado de la misma se inclina hacia el NW. Ocasiona daños en el pavimento de la calle Leandro Valle y se extiende hacia otras calles (Figura 3.50).

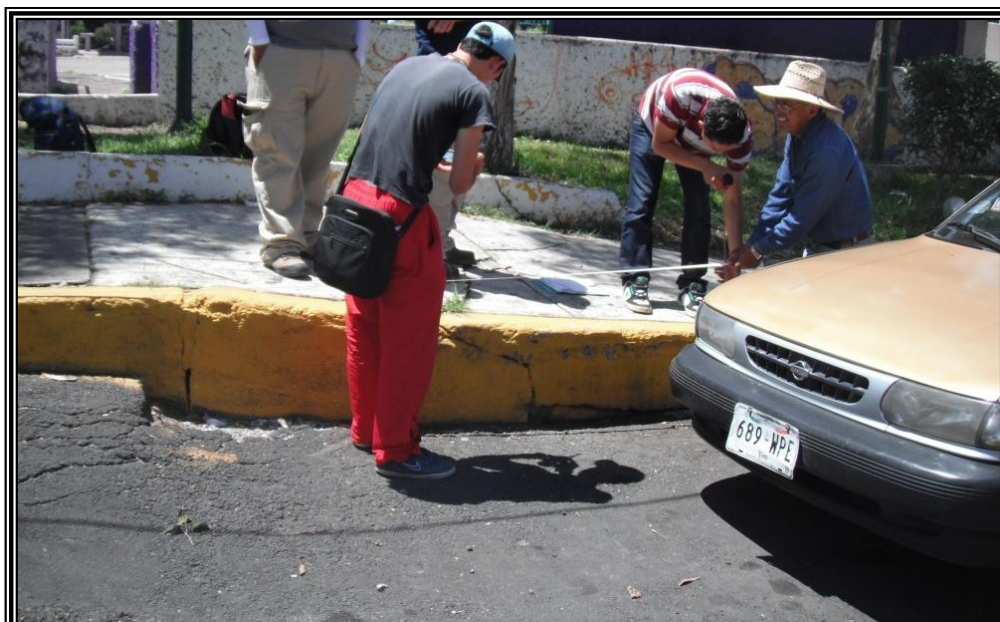


Figura 3.49. Recolección de datos para el tratamiento estadístico, en la calle Leandro Valle de la colonia Jacarandas.



Figura 3.50. Se observan los daños ocasionados en el pavimento de la calle Leandro Valle, en la colonia Jacarandas.

En la Figura 3.51 se muestra una imagen con la ubicación de la falla, la cual está representada con una línea de color verde, en una imagen de satélite de Google Earth.



Figura 3.51. Imagen que muestra las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Jacarandas.

3.2.2. Delegación Gustavo A. Madero.

Se visitaron varios sitios dentro de esta delegación, la cual presenta varias zonas afectadas, resaltando como las más evidentes, las del Instituto Mexicano del Petróleo, el Bosque de Aragón y el Deportivo Los Galeana.

- SITIO 9. Inmediaciones del Bosque de Aragón.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486778	2135599	2230

En este sitio se realizaron dos mediciones distintas. Una consta de 17 datos estructurales que corresponden con discontinuidades de gran longitud (cientos de metros). La otra medición consta de 117 datos estructurales que corresponden con fracturas de corta longitud (centímetros y metros) y que fueron recolectados para realizar un tratamiento estadístico. La tabla que contiene 117 datos se presenta en el apéndice denominado “Datos del Fracturamiento”. Al recorrer este sitio se aprecia que el daño se presenta en el pavimento de las calzadas internas del Bosque de Aragón, así como en el pavimento de la Avenida José Loreto Fabela.

En la Tabla 3.9 se muestra los datos recolectados en las inmediaciones del Bosque de Aragón. Se recolectaron diecisiete datos estructurales que indican dos direcciones de orientación preferencial, NE – SW y SE – NW; la longitud mínima de las fracturas observadas en el sitio es de 21 m y la máxima es de 239 m. En cuanto a la abertura mínima y máxima se tienen 2 cm y 20 cm respectivamente; la separación entre fracturas varía entre 3 y 4 m en los casos en los que se pudo obtener esta información.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Separación [m]	Salto [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]
1	4°	SE	179	0.1	-9999	0.2	491530	2151593	2227
2	5°	SE	56	0.05	4	-9999	491570	2151495	2221
3	0°	N	21	0.05	4	-9999	491580	2151454	2226
4	4°	SE	43	0.05	-9999	-9999	491569	2151535	2234
5	50°	NE	162	0.08	-9999	-9999	491935	2151694	2229
6	40°	SE	226	0.06	-9999	-9999	492005	2151743	2224
7	60°	SE	51	0.1	-9999	-9999	492195	2151552	2223
8	60°	NW	86	0.08	-9999	-9999	492316	2151453	2228
9	58°	NE	239	0.04	3	-9999	492539	2151618	2228
10	55°	NE	213	0.05	3	-9999	492539	2151617	2225
11	55°	NE	202	0.05	3	-9999	492537	2151622	2226
12	55°	NE	230	0.05	3	-9999	492535	2151624	2231
13	42°	NW	83	0.2	-9999	-9999	492787	2151717	2223
14	65°	SE	53	0.05	-9999	0.4	492683	2151793	2223
15	29°	SE	105	0.02	-9999	-9999	492095	2152240	2225

16	10°	NE	138	0.06	3	-9999	491972	2152536	2229
17	10°	NE	122	0.04	3	-9999	491976	2152538	2231

Tabla 3.9. Tabla representativa con los datos recolectados en el Bosque de Aragón.

En este recorrido no se observó daño en los inmuebles de la zona, pero el pavimento de las calzadas internas del bosque es fuertemente afectado por las fracturas, así como el carril de extrema derecha de la Avenida José Loreto Fabela, donde se tienen múltiples irregularidades.

Al interior del Bosque de Aragón se observan fracturas en las calzadas que recorren los peatones y visitantes del lugar (Figura 3.52). Durante el recorrido se apreció que se han realizado labores de reparación en las calzadas afectadas por dichos problemas. El dato que ocasiona el mayor deterioro corresponde con el número trece de la Tabla. Corresponde con una falla de tipo normal que presenta un salto estructural de hasta 40 cm. Este elemento se ubica en una zona en la que hay una feria con juegos mecánicos aptos para niños (Figura 3.53).



Figura 3.52. Imagen que muestra los daños en el pavimento de las calzadas del Bosque de Aragón, en Gustavo A. Madero.



Figura 3.53. Imagen que muestra los daños ocasionados en el pavimento por una falla normal, en el Bosque de Aragón.

En la calle José Loreto Fabela se aprecia deterioro en el carril de baja velocidad, lo que ocasiona que los vehículos eviten el tránsito en el mismo. Se observa un salto estructural de hasta 20 cm en algunos puntos de la discontinuidad (Figura 3.54).



Figura 3.54. Imagen que muestra los daños ocasionados en el pavimento de José Loreto Fabela, en Gustavo A. Madero.

En la Figura 3.55 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas y fallas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo y verde respectivamente, en una imagen de satélite de Google Earth.

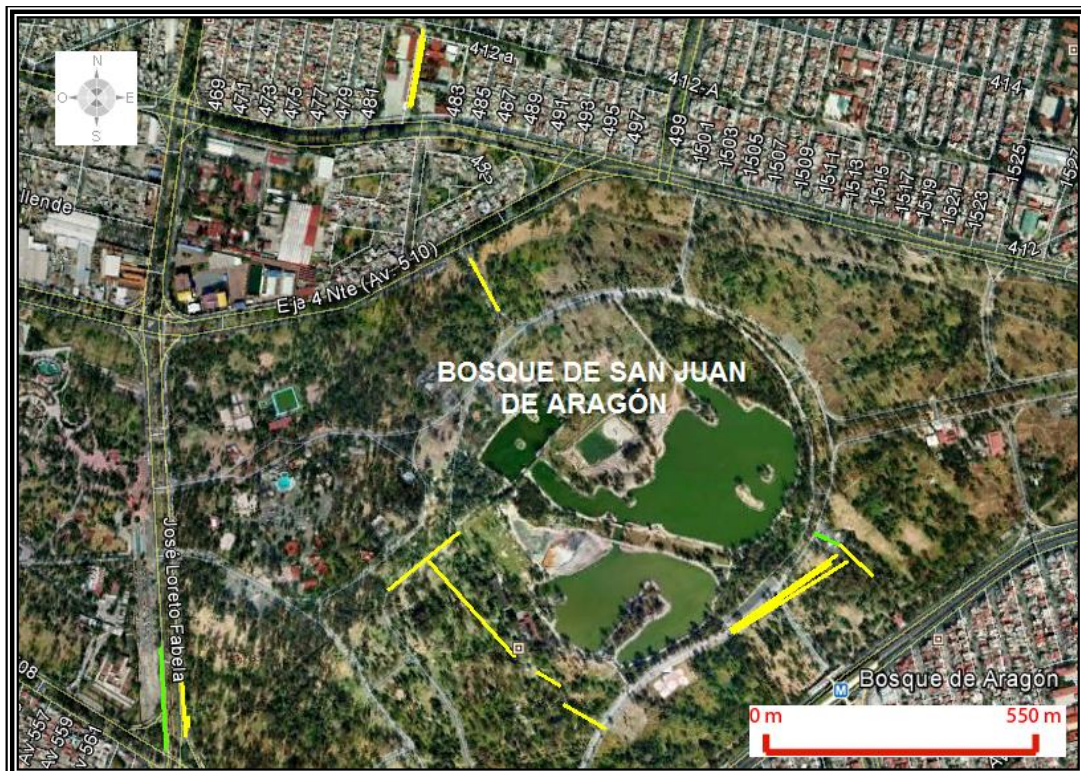


Figura 3.55. Imagen que muestra las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en el Bosque de Aragón.

- SITIO 10. Inmediaciones del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	484693	2155109	2239

Se realizó un recorrido en las inmediaciones del IMP, debido a que se tenían referencias previas de importantes daños en el lugar.

La Tabla 3.10 muestra los datos recolectados en las inmediaciones del Instituto Mexicano del Petróleo. Se recolectaron quince datos estructurales que indican una dirección de orientación preferencial NW – SE, la longitud mínima de las fracturas observadas en el sitio es de 2 m y la máxima es de 445 m. En cuanto a la abertura mínima y máxima se tienen 5 cm y 20 cm respectivamente, y la separación entre fracturas varía entre 5 cm y 2.54 m en los casos en los que se pudo obtener esta información. Tres de los datos recolectados corresponden con fallas normales que presentan un salto de falla de 30, 50 y 12 cm respectivamente.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Separación [m]	Salto [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	65°	SE	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NO
2	77°	SE	136	0.15	-9999	0.3	484101	2154934	2233	SI
3	79°	NW	445	0.2	-9999	0.5	484693	2155109	2239	SI
4	270°	W	251	0.1	-9999	-9999	484271	2155198	2241	SI
5	84°	SE	2	0.1	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NO
6	77°	NW	2	0.1	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NO
7	65°	NW	2	0.05	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NO
8	71°	SW	122	0.06	0.06	-9999	485065	2154551	2238	SI
9	88°	NW	94	0.1	0.05	-9999	485007	2154590	2238	SI
10	67°	NW	100	0.1	0.05	-9999	484832	2155066	2226	SI
11	64°	SE	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	NO
12	72°	SE	43	0.11	2.5	-9999	484748	2155084	2234	SI
13	75°	SE	36	0.11	2.5	-9999	484736	2155112	2230	SI
14	40°	SW	34	0.1	0.92	-9999	484744	2155144	2229	SI
15	20°	SW	32	0.12	0.92	0.12	484738	2155151	2232	SI

Tabla 3.10. Tabla representativa con los datos recolectados en las inmediaciones del IMP.

En el recorrido se pudo constatar el evidente daño que existe en la banquetta de la calle Poniente 134, la cual presenta un desnivel ocasionado por una falla de tipo normal; ésta corresponde con el dato número 3 que se muestra en la Tabla 3.9. Su orientación preferencial es NW79°, con una longitud de 445 metros, 20 cm de abertura y el salto estructural es de 50 cm (Figura 3.56). El echado de dicha falla se inclina al SW.

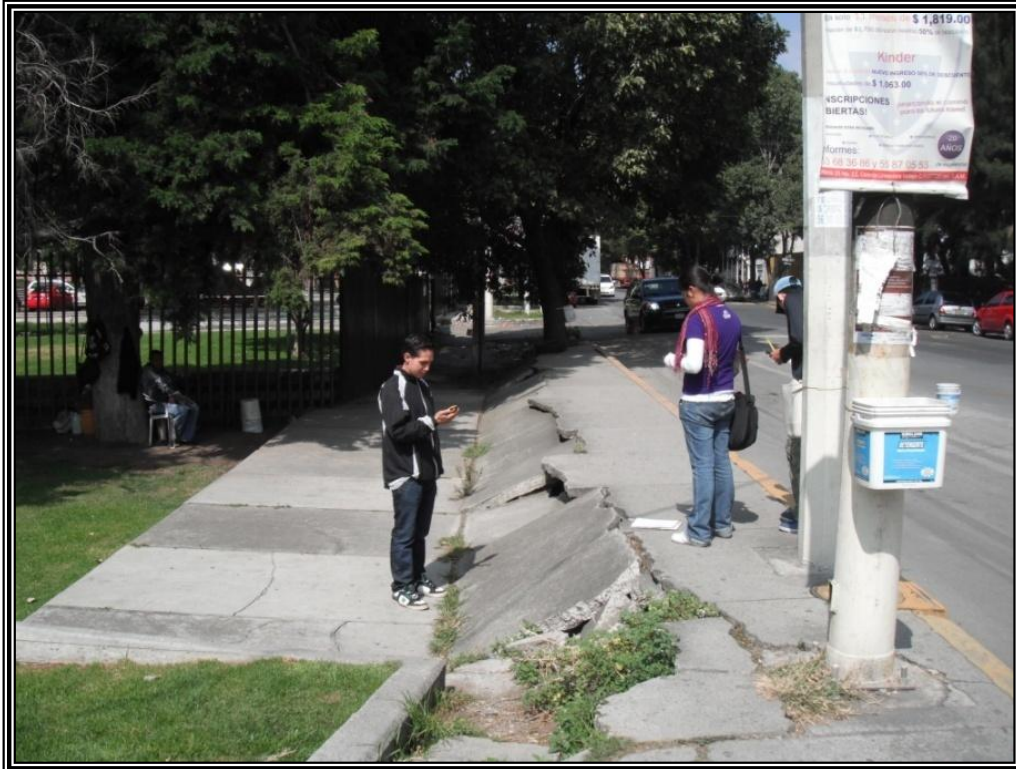


Figura 3.56. Fotografía que muestra el salto estructural de una falla normal en la calle Poniente 134, en la colonia Nueva Vallejo.

Otra falla normal está presente en la calle Poniente 128, la que ha ocasionado daños en el concreto de la banqueta. Tiene una orientación preferencial SE77°, 136 metros de longitud, 15 cm de abertura máxima y un salto estructural de 30 cm (Figura 3.57). El echado de la falla se inclina al SW.



Figura 3.57. Fotografía que muestra el salto estructural de una falla normal en la calle Poniente 128, en la colonia Nueva Vallejo.

La tercera falla normal se localiza en un estacionamiento que se encuentra a un costado de la estación Instituto del Petróleo del STC Metro. Dicha falla ocasiona daños en el pavimento del estacionamiento. Tiene una orientación preferencial SW20°, de 32 metros de longitud, 12 cm de abertura y un salto de 12 cm (Figura 3.58). El echado de la falla se inclina al SE.

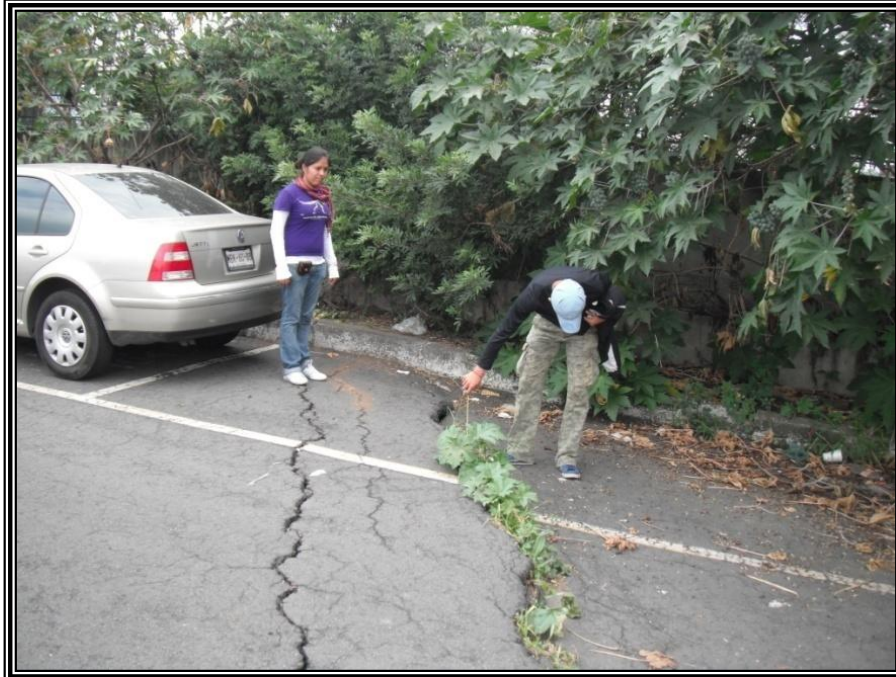


Figura 3.58. Fotografía que muestra dos fracturas y una falla de tipo normal en el interior de un estacionamiento que se encuentra a un costado del Eje Central Lázaro Cárdenas, en la colonia Nueva Vallejo.

Incluso se pueden notar la superficie irregular del terreno en el Eje Central Lázaro Cárdenas y daños en las bardas que delimitan las vías del STC metro (Figuras 3.59 y 3.60).



Figura 3.59. Fotografía que muestra la forma irregular del terreno en el Eje Central Lázaro Cárdenas, en la colonia Valle del Tepeyac.



Figura 3.60. Fotografía que muestra el daño en las bardas del ST metro y la forma irregular del terreno, en el Eje Central Lázaro Cárdenas, en la colonia Valle del Tepeyac.

Lo anterior es ocasionado porque las fracturas cruzan el Eje Central con dirección NW – SE, provocando daños a la construcción e irregularidades en el terreno.

En la Figura 3.61 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas y fallas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo y verde respectivamente; en una imagen de satélite de Google Earth. Se puede apreciar que en general los datos de las fracturas recolectadas en este sitio presentan una orientación preferencial.



Figura 3.61. Imagen que muestra las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en las inmediaciones del IMP, en la colonia Nueva Vallejo.

- SITIO 11. Colonia Lindavista, calles Colector 13 y Ricarte.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486225	2154739	2265

Se realizó un recorrido en las calles Ricarte y Colector 13, en las cuales se tenía referencia previa de daños en el pavimento.

En la Tabla 3.11 se muestran los datos recolectados en la calles Ricarte y Colector 13. Se obtuvieron nueve datos estructurales que indican una dirección preferencial de fracturamiento SE – NW, longitud mínima de 144 m y máxima de 269 m. En cuanto a la abertura mínima y máxima se tienen 3 cm y 13 cm respectivamente; la separación entre fracturas es de 2 m en los casos en los que se pudo obtener este dato.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Separación [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	56°	NW	183	0.03	2	486188	2154921	2232	SI
2	30°	NE	-9999	0.03	2	486188	2154921	2232	NO
3	35°	SW	157	0.04	-9999	486226	2154975	2229	SI
4	70°	SE	207	0.05	-9999	486226	2154975	2229	SI
5	60°	SE	-9999	-9999	-9999	486225	2154739	2265	NO
6	66°	SE	144	0.1	-9999	486228	2154731	2256	SI
7	65°	SE	269	0.13	-9999	486289	2154713	2235	SI
8	59°	SE	-9999	-9999	-9999	486281	2154701	2222	NO
9	64°	SE	-9999	-9999	-9999	486333	2154672	2227	NO

Tabla 3.11. Tabla representativa con los datos recolectados en la colonia Lindavista.

Existe daño en el pavimento de la calle Chiclayo de la colonia Lindavista. Se extiende a lo largo de dicha calle desde su cruce con la Avenida Montevideo y hasta el cruce con la calle Ricarte. En este caso, algunas de las casas que se encuentran en dicha calle también están afectadas en menor medida por las discontinuidades; algunas de ellas presentan fracturas en las bardas del inmueble.

En este sitio se recolectaron dos datos estructurales más, que indican la presencia de dos fracturas comprendidas entre las calles Cienfuegos y Lima de la misma colonia.

Una de las dos zonas con daño mayor está presente entre las calles Lima y Coquimbo. Se aprecia en el pavimento a lo largo de la calle Colector 13 y se extiende hasta la calle Ricarte, en la colonia Lindavista (Figura 3.62).



Figura 3.62. Fotografía que muestra daños en el pavimento de la calle Colector 13, en la colonia Lindavista.

En la Figura 3.63 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.

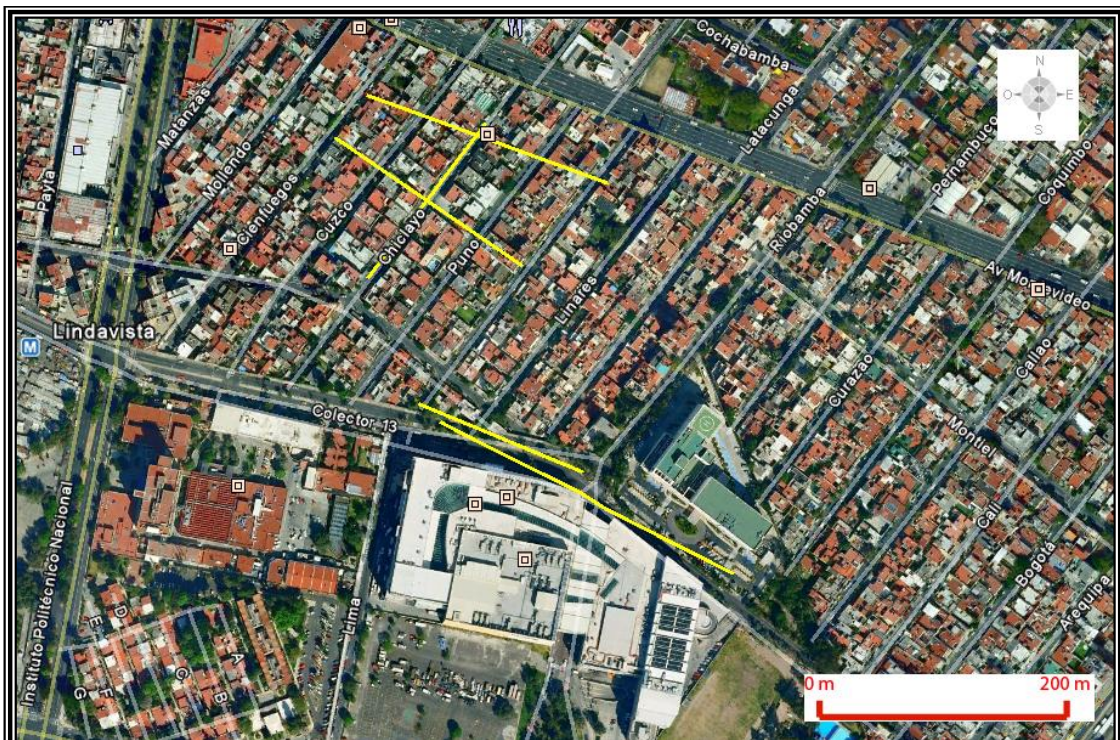


Figura 3.63. Imagen que muestra las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Lindavista.

- SITIO 12. Inmediaciones del Campus de Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	485121	2155818	2127

Se recorrieron las calles aledañas a las instalaciones del IPN Campus Zacatenco, donde se observó daño en el pavimento de las calles y en las construcciones. Algunos datos recolectados son de fracturas que cruzan los ductos de gas de PEMEX ubicados sobre la calle Juan de Dios Bátiz.

La Tabla 3.12 muestra los datos recolectados en las inmediaciones del Campus de Zacatenco, son seis datos estructurales que indican una dirección de orientación preferencial SE-NW, la longitud mínima de las fracturas observadas en el sitio es de 100 m y la máxima es de 375 m. En cuanto a la abertura mínima y máxima se tienen 5 cm y 10 cm respectivamente; la separación entre fracturas es de 4 m en los casos en los que se pudo obtener esta información.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Separación [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	65°	NW	375	0.06	-9999	485121	2155818	2127	SI
2	65°	NW	100	0.05	-9999	484516	2156280	2122	SI
3	65°	SE	123	-9999	-9999	484632	2156809	2123	SI
4	28°	SW	148	0.1	-9999	484995	2156837	2132	SI
5	65°	SE	105	0.08	4	484886	2156741	2131	SI
6	60°	SE	104	0.06	4	484877	2156741	2124	SI

Tabla 3.12. Tabla representativa con los datos recolectados en las inmediaciones del Campus del IPN.

El dato número uno de la tabla anterior corresponde con una fractura que ocasiona datos en el pavimento de la calle Wilfrido Massieu, tiene una longitud máxima de 375 metros, con abertura máxima de 6 cm.

Los datos número cinco y seis, presentan una dirección que interseca de forma oblicua los ductos de gas de PEMEX, ubicados en a lo largo de la calle Juan de Dios Bátiz (Figura 3.64).

En la Figura 3.65 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.

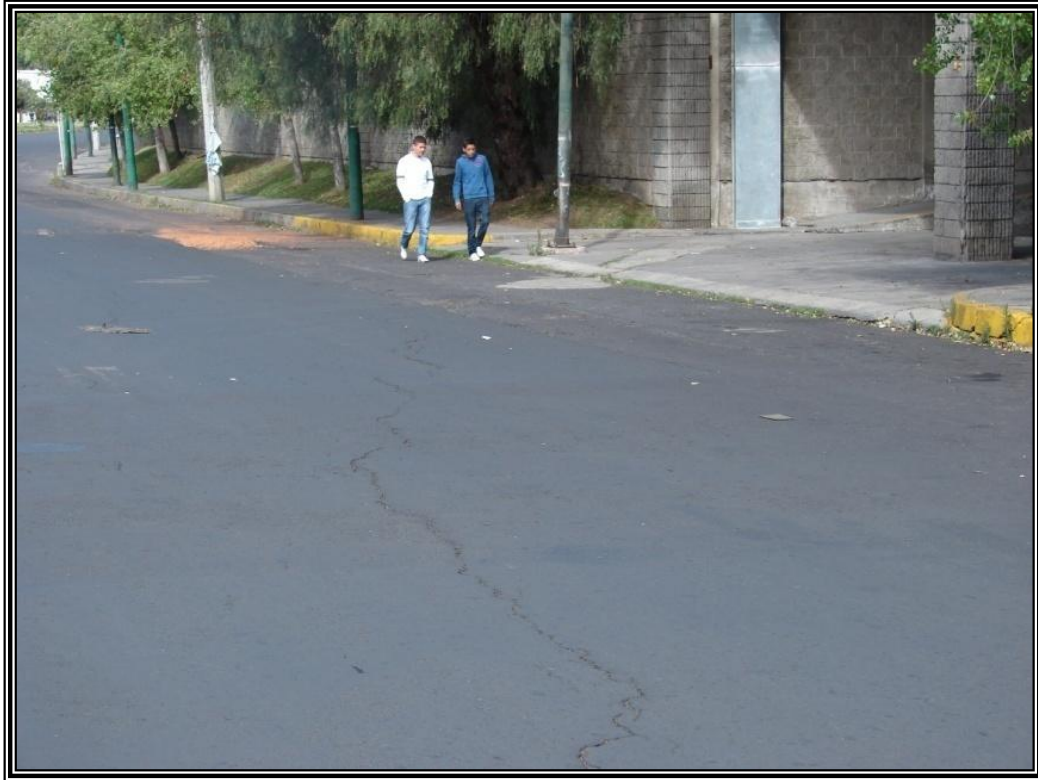


Figura 3.64. Fotografía que muestra daños en el pavimento de la calle Wilfrido Massieu, en la colonia.



Figura 3.65. Imagen que muestra las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en las inmediaciones del Campus del IPN.

- SITIO 13. Deportivo Los Galeana.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486225	2154739	2265

El recorrido se realizó por la Avenida José Loreto Fabela, en la cual se tenían referencias previas de daño en el pavimento.

La Tabla 3.13 muestra los datos recolectados en las inmediaciones del Deportivo Los Galeana. Se recolectaron cinco datos estructurales que indican una dirección de orientación preferencial SW-NE, cuya longitud mínima es de 114 m y la máxima es de 311 m. En cuanto a la abertura mínima y máxima se tienen 3 cm y 8 cm respectivamente. En este sitio no fue posible recolectar datos de separación entre fracturas debido a que el flujo de vehículos en la avenida es constante.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Separación [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	20°	NE	149	0.08	-9999	491869	2153881	2221	SI
2	20°	NE	127	0.05	-9999	491869	2153881	2221	SI
3	20°	SW	311	0.05	-9999	491825	2153798	2238	SI
4	20°	SW	196	0.03	-9999	491772	2153669	2239	SI
5	4°	SW	114	0.05	-9999	491704	2153462	2223	SI

Tabla 3.13. Tabla representativa con los datos recolectados en las inmediaciones del Deportivo Los Galeana.

La presencia de las discontinuidades se tiene en el pavimento, a lo largo de la Avenida José Loreto Fabela desde su cruce con la Avenida Francisco Morazán y hasta el cruce con la Av. 416 (Figuras 3.66 y 3.67). En este sitio no se observó daño en los inmuebles de la zona, solo se ve afectado el pavimento.



Figura 3.66. Fotografía que muestra daños en el pavimento de la calle José Loreto Fabela, en la colonia Ampliación Casas Alemán.



Figura 3.67. Fotografía que muestra una fractura en el pavimento de la calle José Loreto Fabela, en la colonia Ampliación Casas Alemán.

En la Figura 3.68 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.



Figura 3.68. Imagen que muestra las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en las inmediaciones del Deportivo Los Galeana, en la colonia Ampliación Casas Alemán.

3.2.3. Delegación Coyoacán.

En esta delegación se visitaron 3 sitios. El primero está ubicado en Avenida Canal de Miramontes casi esquina con Calzada de La Virgen. Sobre Canal de Miramontes en los carriles con sentido al sur se observan daños en el pavimento.

El segundo sitio se encuentra en la colonia Jardines de Coyoacán, en donde se realizaron mediciones de datos estructurales; se observan daños en el pavimento y en las casas habitación. Dentro de esta colonia se recorrieron dos calles que son las que presentan las mayores evidencias de la afectación.

El tercer sitio se ubica en Avenida Canal de Miramontes esquina con Calzada de las Bombas. A lo largo de Canal de Miramontes en los carriles con sentido al sur se observan daños en el pavimento.

- SITIO 14. Avenida Canal de Miramontes esquina con Calzada de La Virgen.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	485616	2137027	2237

En la Tabla 3.14 se muestran los datos recolectados en el sitio. En el lugar se presenta daño sobre el pavimento de la avenida, en el cual se tomaron tres datos estructurales que corresponden con fracturas que se extienden a lo largo de la avenida Canal de Miramontes, presentan rumbo preferencial de S - N, SE22° y SE36°; con de 67 m, 74 m y 336 m de longitud respectivamente, se observan 10 cm de abertura máxima en los primeros dos casos y 5 cm para el tercer caso (Figura 3.69).

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	180°	S	67	0.10	485616	2137027	2237	SI
2	22°	SE	74	0.10	485616	2136954	2245	SI
3	36°	SE	336	0.05	485644	2136886	2245	SI

Tabla 3.14. Tabla representativa con los datos recolectados en Canal de Miramontes.

En la Figura 3.70 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.

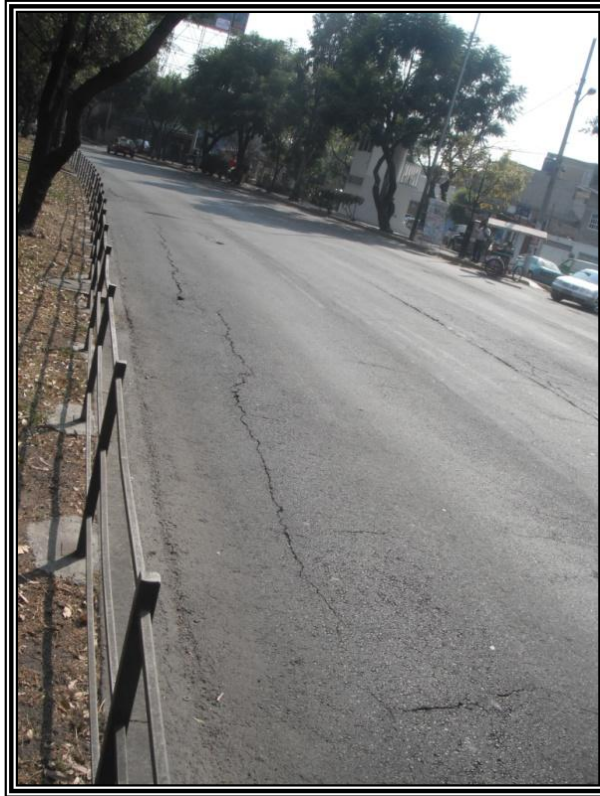


Figura 3.69. Fractura en el pavimento de Canal de Miramontes, en la colonia Avante.

El daño se observó en el pavimento de dicha avenida, sin embargo, frecuentemente se realizan trabajos de repavimentación en el lugar lo que impide observar el deterioro.



Figura 3.70. Imagen que muestra el lugar en el cual se recolectaron los datos estructurales en Canal de Miramontes, colonia Avante.

- SITIO 15. Avenida Canal de Miramontes esquina con Calzada de Las Bombas.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486965	2135244	2215

En la Tabla 3.15 se muestran los datos recolectados. En este sitio se observa daño sobre el pavimento de la avenida, del cual se recolectaron datos estructurales que corresponden con dos fracturas que se extienden a lo largo de la Avenida Canal de Miramontes, desde su cruce con Calzada de las Bombas. Presentan rumbo preferencial de SW05° y SW04°, con de 760 m y 399 m de longitud máxima respectivamente y 11 cm y 10 cm de abertura máxima para cada una. Se aprecia una sola dirección de fracturamiento (Figuras 3.72 y 3.73).

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	5°	SW	760	0.11	486965	2135244	2115	SI
2	4°	SW	399	0.10	486965	2135244	2115	SI

Tabla 3.15. Tabla representativa con los datos recolectados en Canal de Miramontes esquina con Calzada de las Bombas, colonia Los Girasoles.

En la Figura 3.71 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.

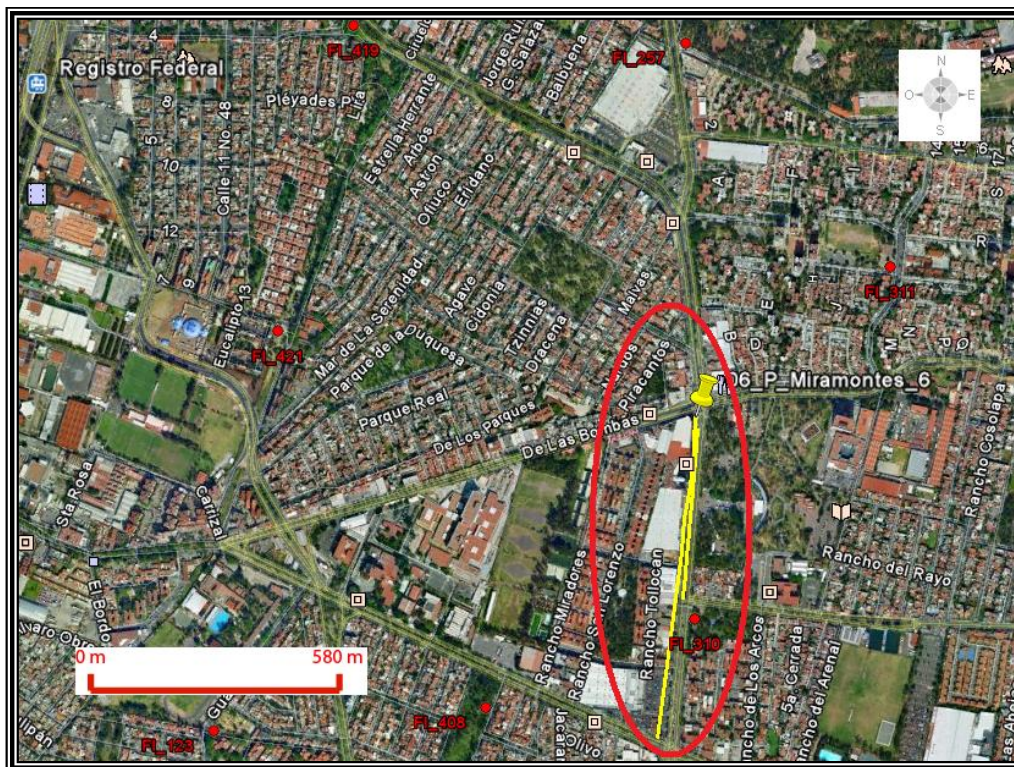


Figura 3.71. Imagen que muestra el lugar en el cual se recolectaron los datos estructurales en Canal de Miramontes esquina con Calzada de las Bombas, colonia Los Girasoles.

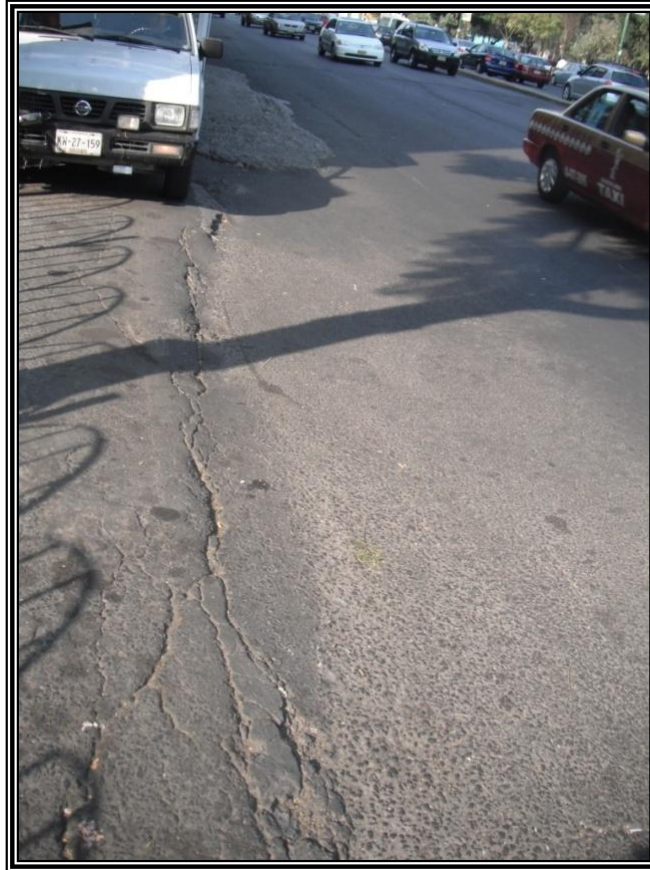


Figura 3.72. Fracturas en el pavimento en la Avenida Canal de Miramontes, en la colonia Los Girasoles.



Figura 3.73. Imagen que muestra los daños en la banqueta de la Avenida Canal de Miramontes, colonia Los Girasoles.

- SITIO 16. Avenida de Tzinnias y Avenida de las Dalias, Colonia Jardines de Coyoacán.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486696	2135661	2234

Este sitio presenta daño sobre el pavimento de las calles, del cual se recolectaron datos estructurales que corresponden con fracturas que se extienden a lo largo de la Avenida de Tzinnias, desde su cruce con Avenida de las Dalias y hasta el cruce con Canal de Miramontes. Tiene rumbo preferencial de NE33°, con de 173 m de longitud máxima y 10 cm de abertura máxima (Figura 3.75). Además se tomó un dato estructural que corresponde con una fractura que se extiende a lo largo de la Avenida de las Dalias, desde su cruce con Avenida de Tzinnias y hasta el cruce con la calle Iris. Tiene rumbo preferencial de NW53°, con de 102 m de longitud y 8 cm de abertura máxima (Figura 3.76). Los datos medidos se presentan en la Tabla 3.16.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	33°	NE	175	0.10	486778	2135599	2230	SI
2	53°	NW	104	0.08	486696	2135661	2234	SI

Tabla 3.16. Tabla representativa con los datos recolectados en Avenida de Tzinnias y Avenida de las Dalias.

En la Figura 3.74 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.

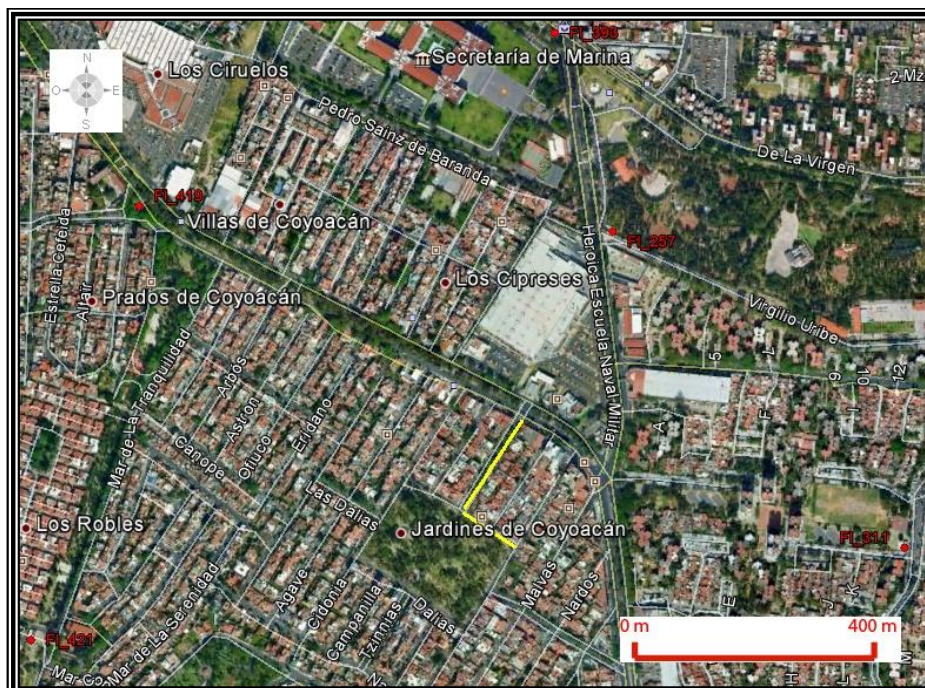


Figura 3.74. Imagen que muestra el lugar en el cual se recolectaron los datos estructurales en las calles Av. De Tzinnias y Av. de las Dalias, colonia Jardines de Coyoacán.



Figura 3.75. Fracturas en el pavimento de Avenida de Tzinnias, colonia Jardines de Coyoacán.



Figura 3.76. Fractura en el pavimento de Avenida de las Dalias, colonia Jardines de Coyoacán.

3.2.4. Delegación Xochimilco.

Se realizaron mediciones frente a las instalaciones de Red de Transportes de Pasajeros (RTP) ubicadas sobre Avenida México en el Barrio de San Marcos. Otro sitio en el que se realizó recolección de datos estructurales es la Unidad Habitacional FOVISSSTE Rinconada del Sur, ubicada en la colonia Huichapan. Se visitaron los siguientes sitios.

- SITIO 17. Avenida México, Pueblo de Xochimilco.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	488191	2130104	2234

En este sitio se realizaron dos mediciones distintas. Una consta de 2 datos estructurales que corresponden con fracturas de gran longitud (cientos de metros). La otra medición consta de 145 datos estructurales que corresponden con fracturas de corta longitud (centímetros y metros) y que fueron recolectados para realizar un tratamiento estadístico (Figura 3.77 y 3.78).

Para los datos que presentan gran longitud se tomó la orientación preferencial y posteriormente se realizó un recorrido por las calles aledañas para seguir la dirección de las fracturas a través de las mismas. Los dos datos recolectados se muestran en la Tabla 3.17, y los más numerosos en el apéndice denominado "Datos del Fracturamiento".

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Separación [m]	x	y	z	Traza
1	25	NW	493	0.01	8.0	488191	2130104	2234	SI
2	25	NW	294	0.01	8.0	488191	2130104	2234	SI

Tabla 3.17. Tabla representativa con los datos recolectados en Avenida México, Barrio San Marcos.

Los datos estructurales indican una dirección de orientación preferencial NW-SE, ya que ambas fracturas se extienden con dirección preferencial NW25°. La primera de ellas tiene una longitud máxima de 493 metros, abertura de 1 cm y separación con respecto a otra fractura de 8 metros. La segunda fractura presenta 294 metros de longitud máxima y abertura máxima de 10 cm.

Estas discontinuidades ocasionan daños en el pavimento y en las guarniciones de las banquetas, además de separación entre algunas casas habitación de dicha calle. También se observan daños en algunas calles aledañas que se encuentran en la dirección del fracturamiento.



Figura 3.77. Imagen que muestra la recolección de datos en Av. México, barrio de San Marcos, con los que se realizó el tratamiento estadístico.



Figura 3.78. Imagen que muestra el daño en el pavimento y en las guarniciones de las banquetas en Av. México, barrio de San Marcos.

En la Figura 3.79 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.

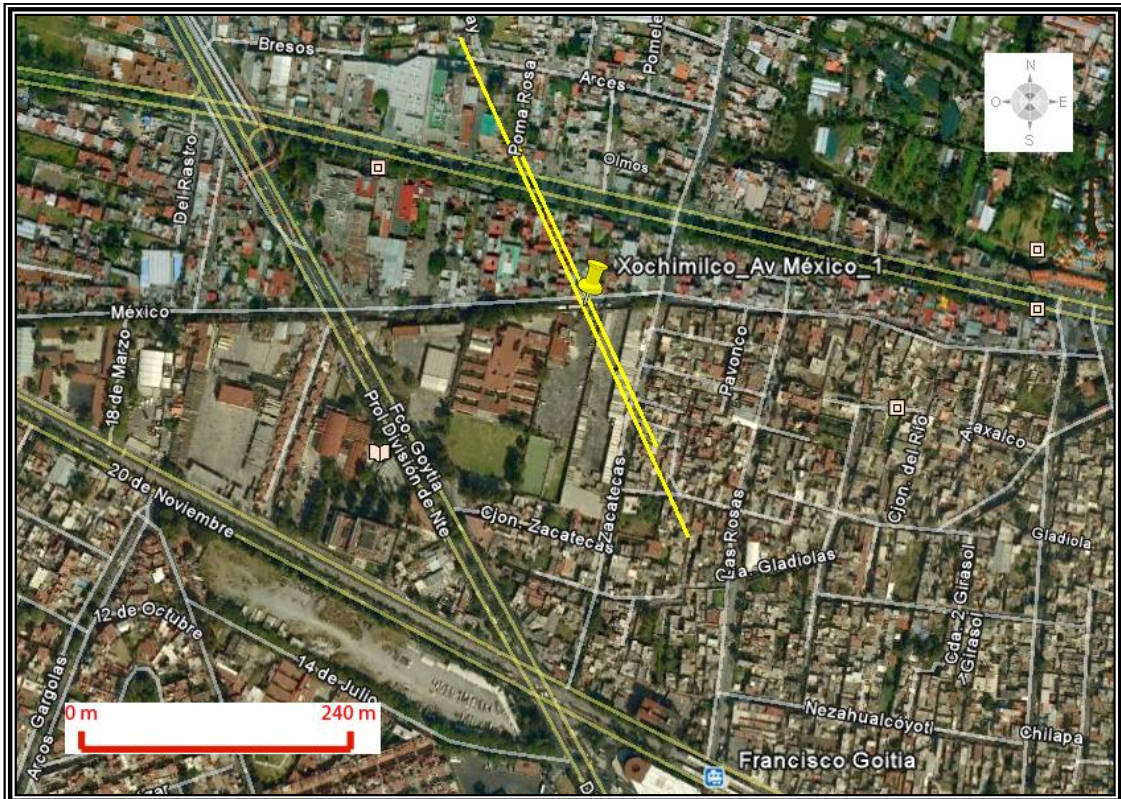


Figura 3.79. Imagen que muestra el lugar en el cual se recolectaron los datos estructurales en Avenida México, barrio de San Marcos.

- SITIO 18. Unidad Habitacional Rinconada del Sur, colonia Huichapan.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	487380	2129811	2257

Para la recolección de los datos se tomó la orientación preferencial y posteriormente se realizó un recorrido por las calles para seguir la dirección de las fracturas a través de las mismas. Los datos recolectados se muestran en la Tabla 3.18.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Salto [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]
1	20	SW	79	0.15	-9999	487409	2129892	2252
2	20	SW	82	0.15	-9999	487408	2129892	2252
3	20	SE	44	0.04	-9999	487380	2129811	2257
4	22	SE	40	0.02	-9999	487378	2129811	2257
5	62	SW	35	0.03	-9999	487340	2129690	2259
6	82	SW	32	0.02	-9999	487340	2129694	2259
7	62	SW	52	0.03	-9999	487327	2129664	2257
8	82	SW	40	0.05	-9999	487334	2129676	2258
9	77	SW	52	0.02	-9999	487276	2129527	2253
10	17	SW	55	0.1	-9999	487372	2129504	2253
11	58	SW	33	0.05	0.17	487362	2129469	2253

12	30	NE	86	0.03	-9999	487345	2129432	2253
13	35	NE	54	0.02	-9999	487369	2129490	2253
14	32	SE	81	0.08	-9999	487424	2129671	2254
15	84	SE	68	0.04	-9999	487456	2129749	2253
16	84	SE	58	0.02	-9999	487457	2129753	2253
17	84	SE	65	0.02	-9999	487455	2129744	2253
18	62	NW	55	0.02	-9999	487527	2129710	2249

Tabla 3.18. Tabla representativa con los datos recolectados en la U. H. Rinconada del Sur, en la colonia Huichapan.

En este sitio se recolectaron 18 datos estructurales, que indican dos direcciones de orientación preferencial, NW-SE 82° y NE-SW 60°.

La longitud mínima de las fracturas observadas en el sitio es de 32 m y la máxima es de 86 m. En cuanto a la abertura mínima y máxima se tienen 2 cm y 15 cm respectivamente; la separación entre fracturas no pudo obtenerse en este sitio (Figura 3.80).



Figura 3.80. Imagen que muestra la medición de las dimensiones de las fracturas recolectadas en la U. H. Rinconada del Sur.

Los datos uno y dos de dicha tabla, corresponden con dos fracturas ubicadas en la entrada a la Unidad Habitacional de la calle Mártires de Río Blanco. Dichas discontinuidades se presentan paralelas a la dirección de la calle y ocasionan daños en el pavimento de la calle antes mencionada (Figura 3.81).

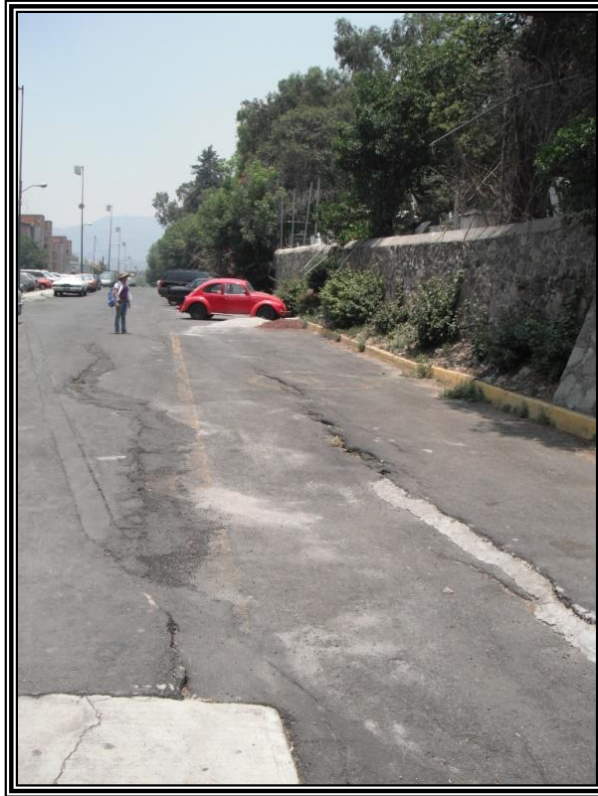


Figura 3.81. Imagen que muestra el daño en el pavimento en Mártires de Río Blanco, U. H. Rinconada del Sur.

Los datos números 3 a 9 corresponden con fracturas oblicuas a la dirección de la calle Mártires de Río Blanco, ocasionan daños en el pavimento y probablemente al drenaje de dicha calle (Figura 3.82).



Figura 3.82. Imagen que muestra el daño en el pavimento en Mártires de Río Blanco, U. H. Rinconada del Sur.

En la calle Retorno 1 de dicha unidad, se recolectaron cuatro datos estructurales. Tres de ellos corresponden con fracturas y el restante con una

falla normal. Estos elementos se ubican de forma casi paralela a la calle mencionada. El dato numero 11 de la tabla anterior corresponde con una falla normal (Figura 3.83). Este elemento tiene una orientación preferencial SW58°, longitud máxima de 33 metros y 5 cm de abertura. Presenta un salto estructural de 17 cm y el echado de la falla se inclina hacia el NW (Figura 3.84).



Figura 3.83. Imagen que muestra el daño en el pavimento de la calle Retorno 1, ocasionado por fracturas.

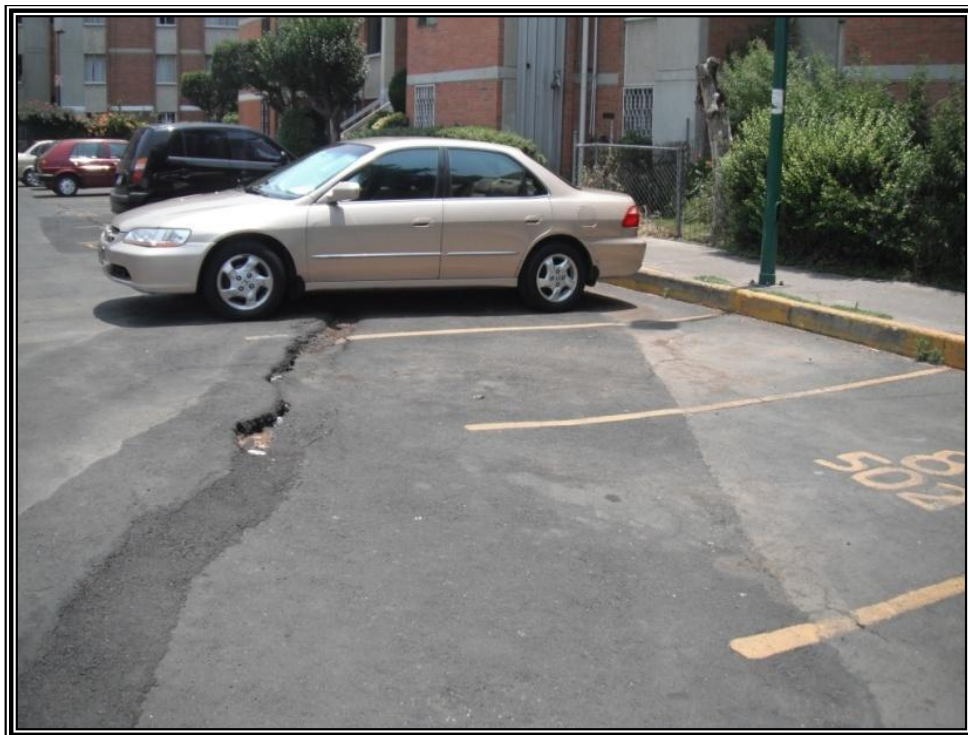


Figura 3.84. Imagen que muestra el daño en el pavimento de la calle Retorno 1, ocasionado por una falla normal.

En las calles Retorno 2 y Retorno 3, se recolectaron cuatro datos estructurales que ocasionan daños en el pavimento de dichas calles. Además en la calle Dinteles se recolecto otro dato que corresponde con una fractura. (Figura 3.85)



Figura 3.85. Imagen que muestra el daño en el pavimento de la calle Retorno 3, ocasionado por fracturas.

En la Figura 3.86 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas y las fallas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo y verde respectivamente, en una imagen de satélite de Google Earth.



Figura 3.86. Imagen que muestra el lugar en el cual se recolectaron los datos estructurales en la colonia Huichapan.

3.2.5. Delegación Azcapotzalco.

En esta delegación se visitó la Alameda Norte, la cual es un área verde en donde las personas realizan actividad física, también cuenta con un estacionamiento en el interior del parque recreativo.

Este sitio se localiza en la colonia Pueblo Santa Bárbara al noreste del Distrito Federal, entre el Eje 5 Norte y la Calzada Real de San Martín; es un área aproximada de 0.232 km².

- SITIO 19. Alameda Norte.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	481474	2156286	2203

El recorrido se realizó a lo largo de las calles destinadas para el tránsito de los vehículos y los peatones, en las que se observan daños en el pavimento de las calles y del estacionamiento; incluso se observan fracturas en la pista de corredores y en el suelo de los jardines del lugar. Los datos recolectados se presentan en la Tabla 3.19.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Separación [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]	Traza
1	62°	NW	180	0.1	0.15	481474	2156286	2203	SI
2	84°	NW	162	0.08	0.1	481309	2156363	2202	SI
3	15°	SW	108	0.05	0.1	481153	2156299	2238	SI
4	25°	SE	122	0.05	0.1	481096	2155968	2232	SI
5	70°	SE	208	0.17	1.8	481155	2155881	2241	SI
6	17°	NE	394	0.1	0.15	481332	2155828	2247	SI
7	72°	NE	117	0.2	0.1	481386	2156243	2248	SI
8	60°	SE	89	0.22	0.08	481390	2156254	2232	SI
9	72°	SE	76	0.2	0.1	481393	2156268	2233	SI
10	78°	SE	80	0.2	0.1	481399	2156283	2234	SI
11	22°	SW	80	-9999	-9999	481347	2156357	2233	SI
12	74°	SE	102	-9999	-9999	481298	2156297	2232	SI
13	16°	NE	147	-9999	-9999	481247	2156023	2235	SI
14	72°	NW	132	-9999	-9999	481365	2155988	2231	SI

Tabla 3.19. Tabla representativa con los datos recolectados en la Alameda Norte.

Se midieron catorce datos estructurales que indican dos direcciones de orientación preferencial de fracturamiento NE-SW y NW-SE. La longitud mínima de las fracturas observadas en el sitio es de 76 m y la máxima es de 394 m. En cuanto a la abertura mínima y máxima se tienen 5 cm y 22 cm

respectivamente; la separación entre fracturas varía entre 8 cm y 1.8 m (Figura 3.87).



Figura 3.87. Imagen que muestra los daños en el pavimento de la Alameda Norte, Pueblo Santa Bárbara.

Dentro del estacionamiento se recolectaron 4 datos estructurales que corresponden con fracturas y afectan notablemente al pavimento. A pesar del daño que se observa los automóviles se estacionan en los espacios designados sin importar el peligro que existe (Figura 3.88 y 3.89).



Figura 3.88. Imagen que muestra el daño ocasionado en el pavimento del estacionamiento de la Alameda Norte, Pueblo Santa Bárbara.



Figura 3.89. Los automóviles se estacionan a pesar del riesgo que existe, en el estacionamiento de la Alameda Norte.

Como se mencionó anteriormente, incluso en la pista de corredores y en el suelo de las áreas verdes del lugar se observan discontinuidades que corresponden con fracturas (Figura 3.90 y 3.91). Además, el terreno tiene una forma irregular ocasionada por dichas discontinuidades (Figura 3.92).



Figura 3.90. Fotografía que muestra la forma irregular del terreno en la Alameda Norte, Pueblo Santa Bárbara.



Figura 3.91. Fotografía que muestra las fracturas en la pista de corredores en la Alameda Norte, Pueblo Santa Bárbara.



Figura 3.92. Fotografía que muestra una discontinuidad en el suelo de las áreas verdes en la Alameda Norte, Pueblo Santa Bárbara.

En la Figura 3.93 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo, en una imagen de satélite de Google Earth.



Figura 3.93. Imagen que muestra el lugar en el cual se recolectaron los datos estructurales en la Alameda Norte, Pueblo Santa Bárbara.

3.2.6. Delegación Tláhuac.

En San Andrés Mixquic se visitó la zona del tianguis y el panteón, ubicados en el centro de la comunidad, además de la calle Emiliano Zapata. Se realizaron mediciones en los siguientes sitios.

- SITIO 20. Pueblo San Andrés Mixquic.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	503669	2125789	2234

Se recorrieron las calles Emiliano Zapata, Plutarco Elías Calles, Medellín, Independencia y Nuevo México. En esta delegación se realizaron dos mediciones con diferentes características. Una consta de 5 datos estructurales, 4 de ellos corresponden con fracturas y el restante con una falla de tipo normal. La segunda medición consta de 68 datos estructurales que corresponden con

fracturas de corta longitud (centímetros y metros) y que fueron recolectados para realizar un tratamiento estadístico; al ser numerosos estos datos se presentan en el apéndice denominado “Datos del Fracturamiento”.

Para los datos que presentan gran longitud se tomó la orientación preferencial y posteriormente se realizó un recorrido por las calles aledañas para seguir la dirección de las fracturas a través de las mismas.

La Tabla 3.20 muestra los datos recolectados en las calles antes mencionadas. La orientación preferencial es NE – SW, la longitud máxima de los elementos es de 291 metros y la mínima de 155 metros. La abertura varía entre 2 y 12 cm. Estos elementos causan daños en el pavimento de las calles y en las paredes de algunas de las casas habitación de dichas calles.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Salto [m]	x	y	z	Traza
1	54	SW	291	0.05	0.36	503669	2125789	2234	SI
2	78	SE	265	0.02	-9999	503733	2125816	2244	SI
3	35	SW	191	0.12	-9999	503523	2125427	2240	SI
4	48	SW	155	0.1	-9999	503422	2125279	2240	SI
5	62	SW	255	0.1	-9999	503313	2125182	2242	SI

Tabla 3.20. Tabla representativa con los datos recolectados en San Andrés Mixquic.

El dato numero 1 de la tabla corresponde con una falla de tipo normal que puede caracterizarse con facilidad en la calle Medellín, enfrente de la puerta de acceso a la iglesia principal del pueblo. Este elemento tiene una orientación preferencial SW54°, longitud máxima de 291 metros y 5 cm de abertura. Presenta un salto estructural de 36 cm y el echado de la falla se inclina hacia el NW (Figura 3.94).



Figura 3.94. Imagen que muestra el daño en la calle Medellín, ocasionado por la falla normal en San Andrés Mixquic.

En dicha calle se coloca, algunos días de la semana, un tianguis para vender productos diversos. La falla ha ocasionado graves daños en el pavimento de las calles Medellín e Independencia, y también en la barda que delimita el terreno de la iglesia (Figura 3.95).



Figura 3.95. Imagen que muestra el daño en la barda de la iglesia principal de San Andrés Mixquic.

En la calle Plutarco Elías Calles se recolecto un dato que corresponde con una fractura (Figura 3.96). Este elemento corresponde con el dato número 2 de la tabla. Tiene una orientación preferencial $SE78^\circ$, 265 metros de longitud máxima y 2 cm de abertura.



Figura 3.96. Imagen que muestra el daño en la calle Plutarco E. Calles, a un costado de la iglesia de San Andrés Mixquic.

En la calle Emiliano Zapata se recolectaron 3 datos estructurales. Dichos elementos son los datos números 3, 4 y 5 de la tabla, y corresponden con fracturas. Estos ocasionan daños a lo largo del pavimento de dicha calle, creando irregularidades que afectan el tránsito local (Figura 3.97).



Figura 3.97. Imagen que muestra el daño en la calle Emiliano Zapata, en el Pueblo San Andrés Mixquic.

En la Figura 3.98 se muestra una imagen con la ubicación de las fracturas y las fallas, las cuales están representadas con líneas de color amarillo y verde respectivamente, en una imagen de satélite de Google Earth.



Figura 3.98. Imagen que muestra el lugar en el cual se recolectaron los datos estructurales en San Andrés Mixquic.

3.2.7. Delegación Álvaro Obregón.

- SITIO 21. Calle Despertador Americano, colonia Barrio Norte.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	477820	2142618	2353

Este sitio se encuentra en la zona de barrancas de la delegación Álvaro Obregón. El dato estructural se recolectó en la calle Despertador Americano, que se encuentra entre las calles El Correo del Sur y Escalante, en la colonia Barrio Norte de dicha delegación. Aparentemente este lugar no presenta un daño grave, pero se tomó información estructural que corresponde con una fractura que cruza la calle Despertador Americano en dirección SE-NW y que se extiende aproximadamente 90 metros. El dato obtenido se muestra en la Tabla 3.21.

Dato	ID	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	x [mE]	y [mN]	z [m]
1	01_F_Álvaro Obregón_1	45°	SE	95	0.05	477822	2142609	2353

Tabla 3.21. Tabla representativa con los datos recolectados en la calle Despertador Americano.

El daño mayor se observa en el pavimento de dicha calle y en las casas habitación que se encuentran en la dirección del fracturamiento (Figuras 3.99 y 3.100). Sobre el pavimento se tiene la fractura con rumbo preferencial de 45° SE, con de 90 m de longitud máxima y 5 cm de abertura máxima.



Figura 3.99. Imagen que muestra el daño en el pavimento de la calle Despertador Americano, en la colonia Barrio Norte.



Figura 3.100. Imagen que muestra el daño en la pared de una casa en calle Despertador Americano, en la colonia Barrio Norte.

En la Figura 3.101 se muestra una imagen con la ubicación de la fractura, la cual está representada con la línea amarilla, en una imagen de satélite de Google Earth.

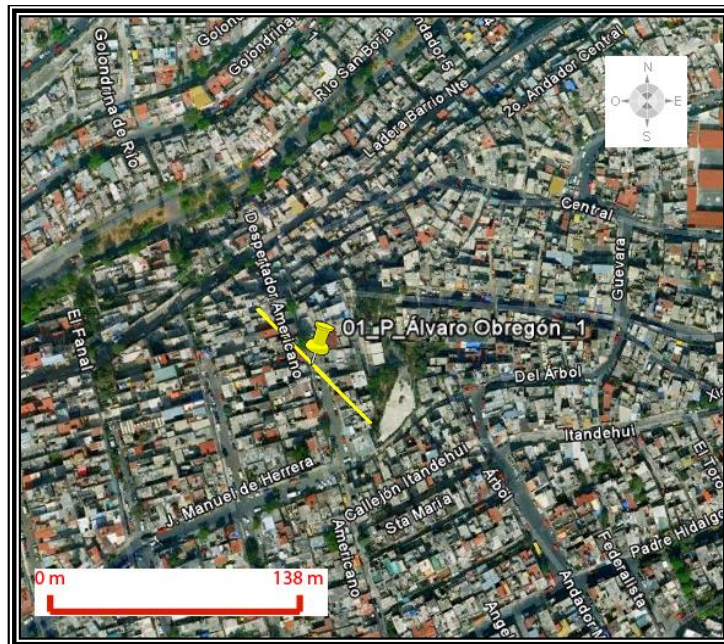


Figura 3.101. Imagen que muestra el lugar en el cual se recolectaron los datos estructurales en la colonia Barrio Norte.

3.2.8. Mapa de fracturamiento del Distrito Federal.

La Figura 3.102 muestra el mapa de fracturamiento del Distrito Federal, realizado con los datos recolectados en los sitios estudiados. Las líneas amarillas corresponden con fracturas y las verdes con fallas. En la imagen se observa que las discontinuidades se presentan en su mayoría en zonas de lagos antiguos y en zonas de transición. Esto se debe entre otras cosas al tipo

de suelo presente en los lagos, y al contraste litológico en las zonas de transición. La concentración de los elementos se observa en el norte, el oriente y el centro-sur de la Ciudad de México.

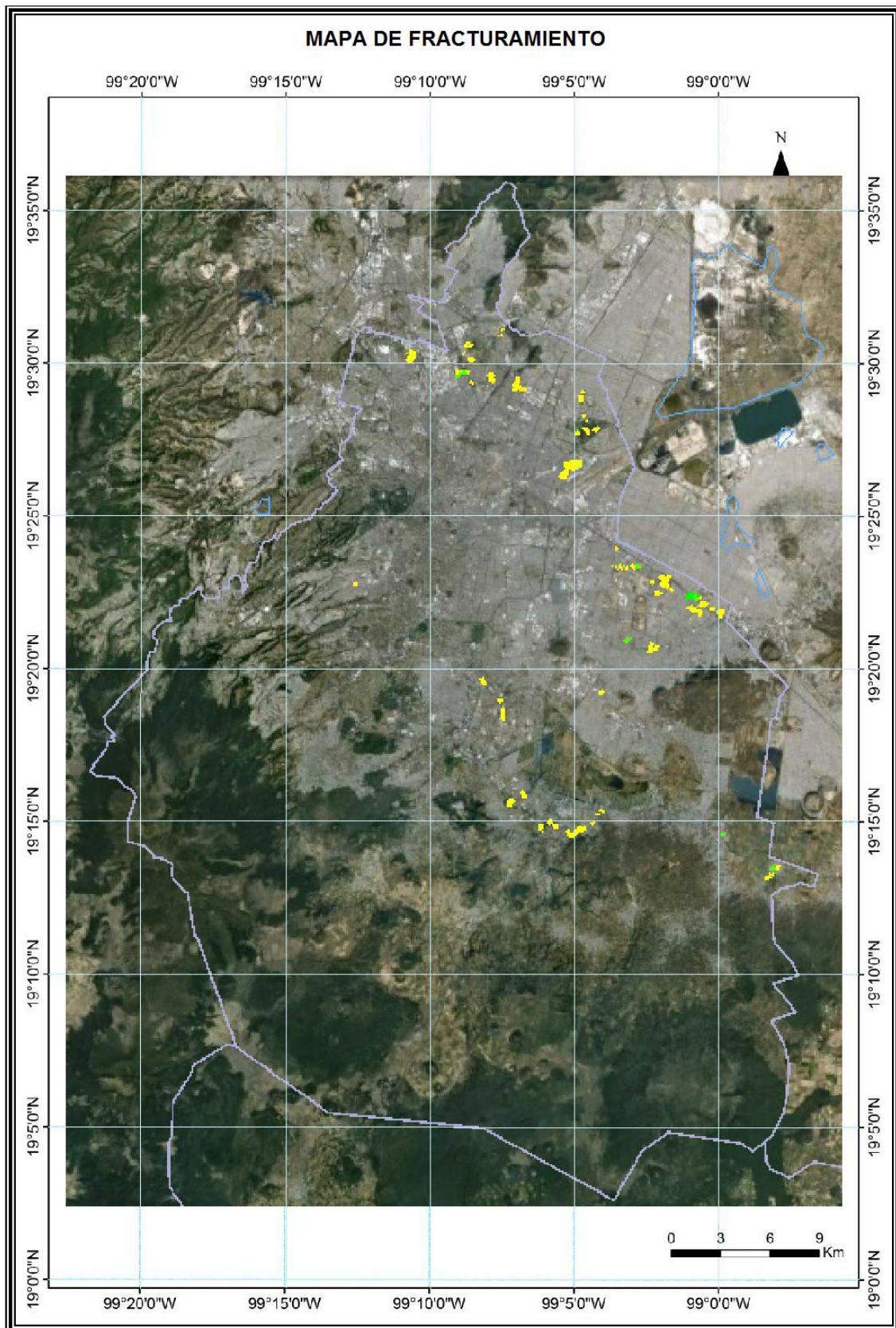


Figura 3.102. Mapa de fracturamiento del Distrito Federal.

IV. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DEL FRACTURAMIENTO.

En este capítulo se presenta el tratamiento estadístico que se dio a los datos de rumbo y echado de las fracturas en los sitios estudiados; para su procesamiento se utilizó el programa StereoNet con el que se obtuvieron rosetas de rumbos, considerando que se tienen mayoritariamente rumbos que corresponden con fracturas verticales. En esta parte del trabajo únicamente se describen los resultados mostrados con las rosetas, los cuales indican las direcciones preferenciales de fracturamiento y fallamiento, según corresponda. La descripción de las imágenes se realiza por zonas, agrupadas de acuerdo con las delegaciones políticas del Distrito Federal.

4.1. Delegación Iztapalapa.

- SITIO 1. Unidad Concordia Zaragoza.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	499145	2141469	2229

En este sitio se midieron veintidós datos estructurales, que presentan dos direcciones preferenciales de fracturamiento, NW–SE 53° y NE–SW 47° , que forman entre ellas un ángulo de 80° , lo cual se observa en las Figuras 4.1 y 4.2.

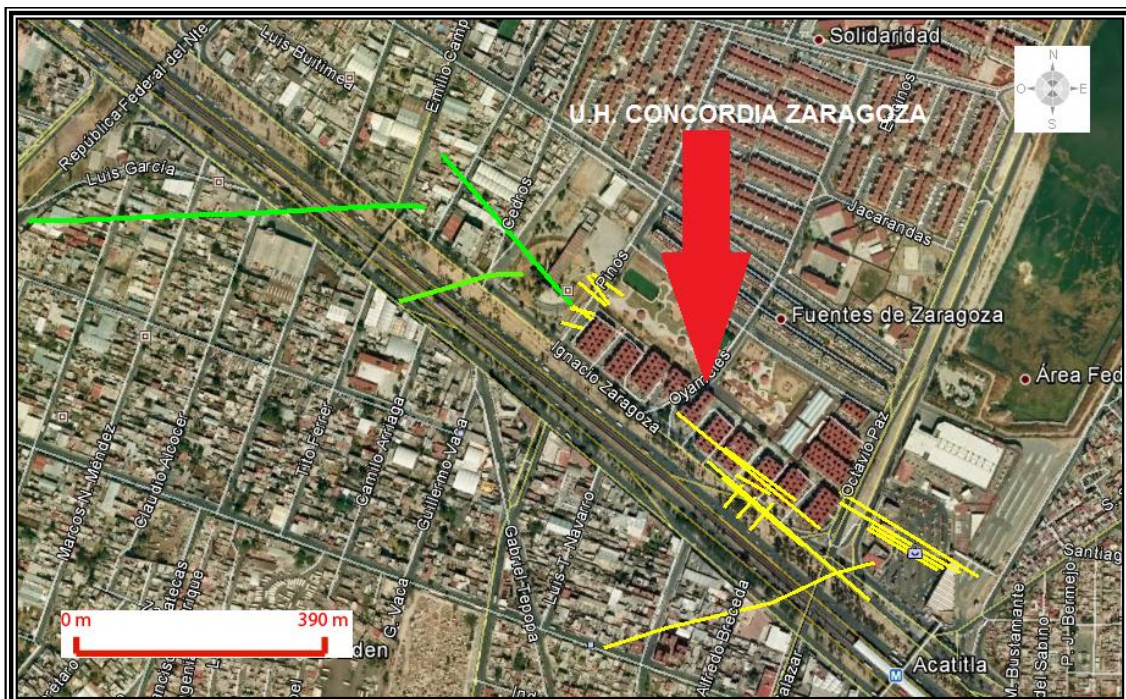


Figura 4.1. Ubicación de las fracturas y fallas representadas en una imagen de Google Earth, en la Unidad Concordia Zaragoza. Las líneas amarillas corresponden con fracturas y las verdes con fallas.

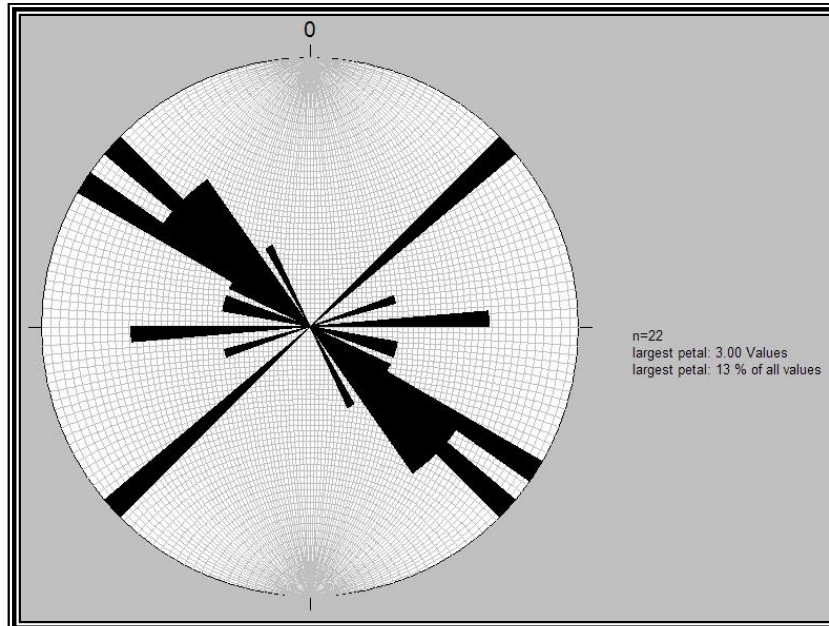


Figura 4.2. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la Unidad Concordia Zaragoza.

- SITIO 2. Colonia Popular Ermita Zaragoza.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	500207	2140958	2236

En este sitio se midieron diecisiete datos estructurales, que presentan dos direcciones preferenciales de fracturamiento, NE–SW 63° y NW–SE 62° , que forman entre ellas un ángulo de 55° . Esto se observa en las Figuras 4.3 y 4.4.



Figura 4.3. Ubicación de las fracturas y fallas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia P. Ermita Zaragoza. Las líneas amarillas corresponden con fracturas y las verdes con fallas.

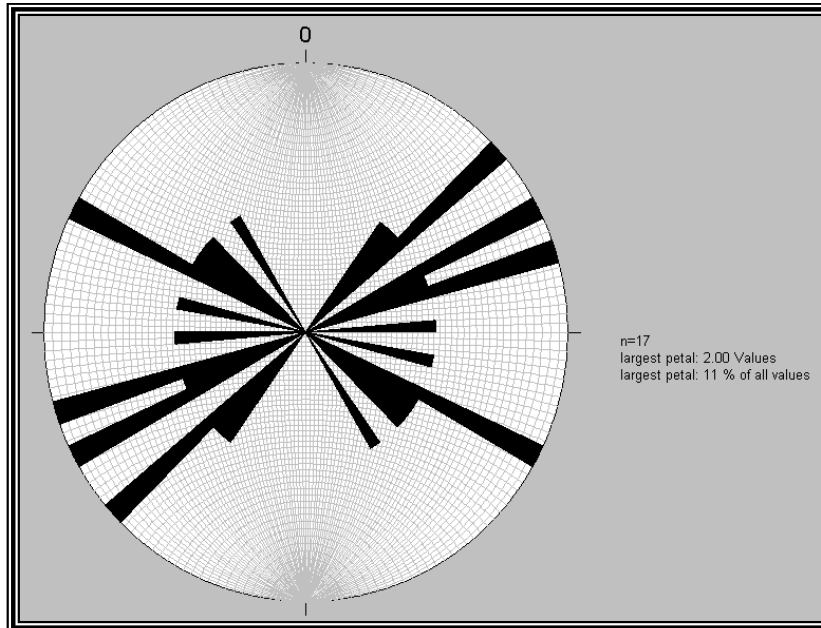


Figura 4.4. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia Popular Ermita Zaragoza.

- SITIO 3. Colonia El Edén.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	498570	2141165	2248

En este sitio se midieron doce datos estructurales, que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NW–SE 78°, lo cual se observa en las Figuras 4.5 y 4.6.



Figura 4.5. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia El Edén.

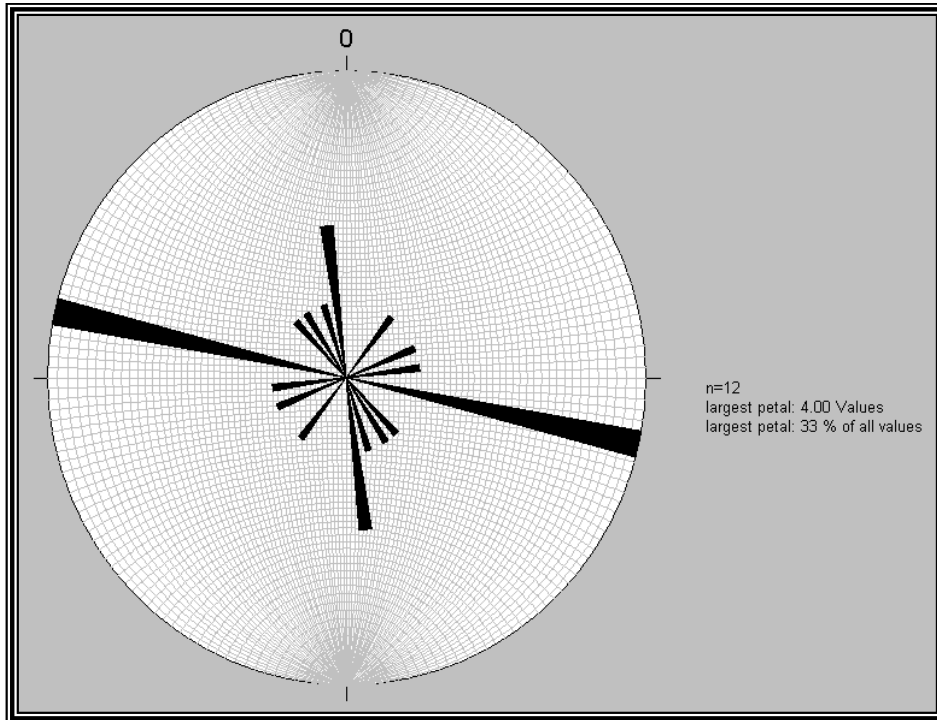


Figura 4.6. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia El Edén.

La Figura 4.7 representa la roseta de rumbos de fracturas obtenida con los 159 datos de corta longitud recolectados en la colonia El Edén. Se aprecia que la orientación preferencial de las fracturas de grandes dimensiones presenta similitud con las de corta longitud. Por otro lado, el histograma de la Figura 4.8 comprueba que la mayor cantidad de datos tienen orientación preferencial NW-SE entre 51° y 90° , mientras que al NE-SW varían entre 61° y 90° .

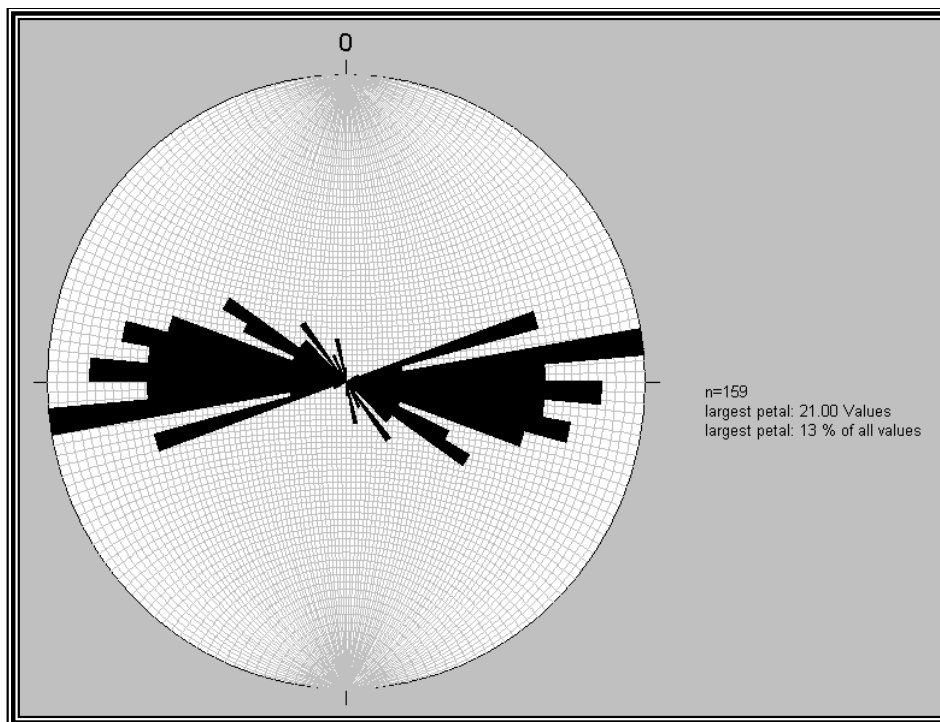


Figura 4.7. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con datos de corta longitud, recolectados en la colonia El Edén.

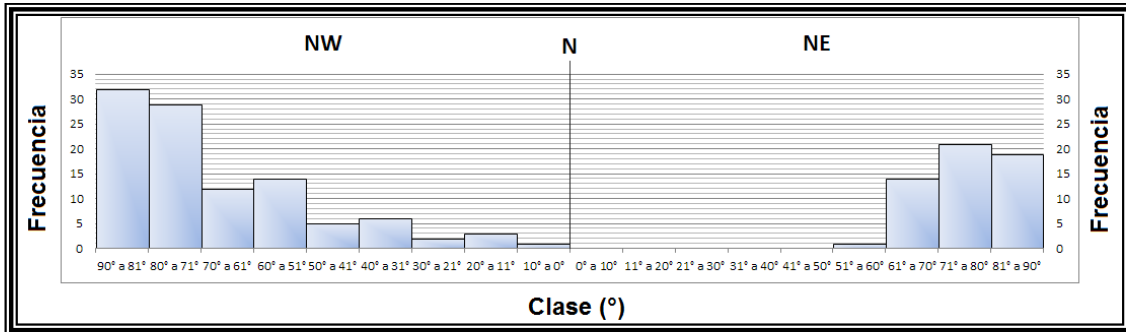


Figura 4.8. Imagen de un histograma que indica la frecuencia de datos para cada orientación preferencial. Elaborado con los datos recolectados en la colonia El Edén.

- SITIO 4. Colonia Lomas de San Lorenzo, calle Vista Hermosa.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	492899	2136171	2251

En este sitio se midieron seis datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NE–SW 80°, lo cual se observa en las Figuras 4.9 y 4.10.



Figura 4.9. Ubicación de las fracturas y fallas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Lomas de San Lorenzo. Las líneas amarillas corresponden con fracturas y las verdes con fallas.

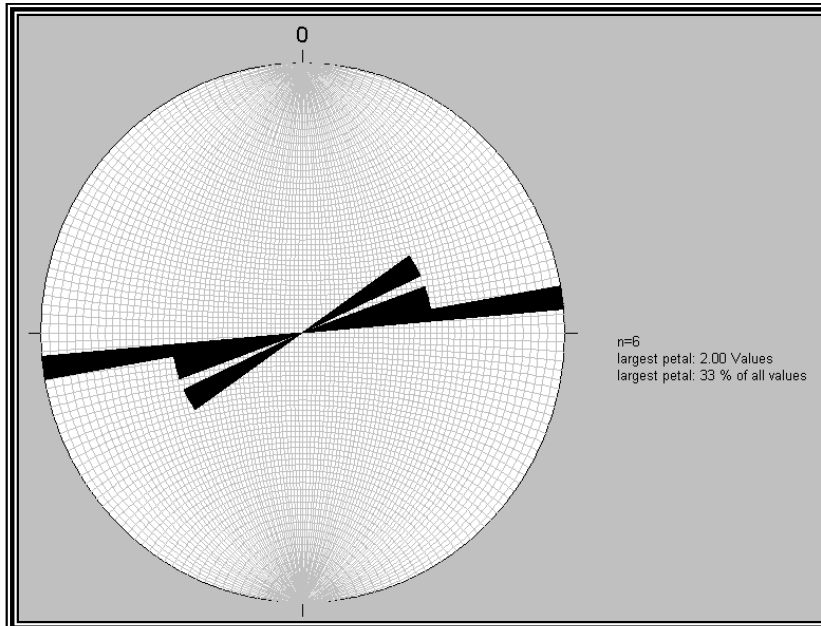


Figura 4.10. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia Lomas de San Lorenzo.

- SITIO 5. Colonia Guelatao de Juárez.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	495268	2143603	2237

En este sitio se midieron siete datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NE–SW 80°, lo cual se observa en las Figuras 4.11 y 4.12.



Figura 4.11. Imagen que muestra las fracturas y las fallas, en color amarillo y verde respectivamente, representadas en una imagen de Google Earth, en la Colonia Guelatao de Juárez.

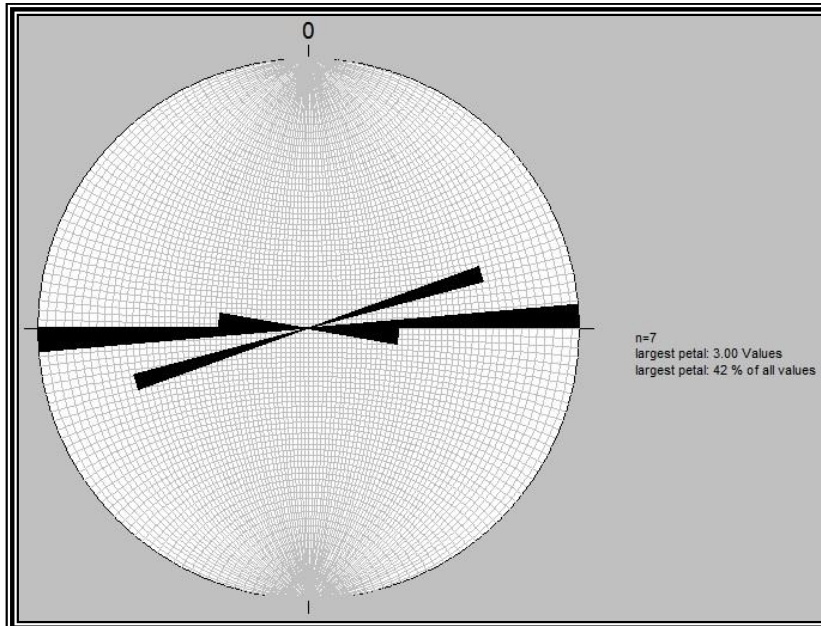


Figura 4.12. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia Guelatao de Juárez.

- SITIO 6. Colonias Reforma Educativa y Tepalcates.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	494314	2143568	2240

En este sitio se midieron seis datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NW–SE 74°, lo cual se observa en las Figuras 4.13 y 4.14.



Figura 4.13. Imagen que muestra las fracturas, representadas en una imagen de Google Earth, en las colonias Reforma Educativa y Tepalcates.

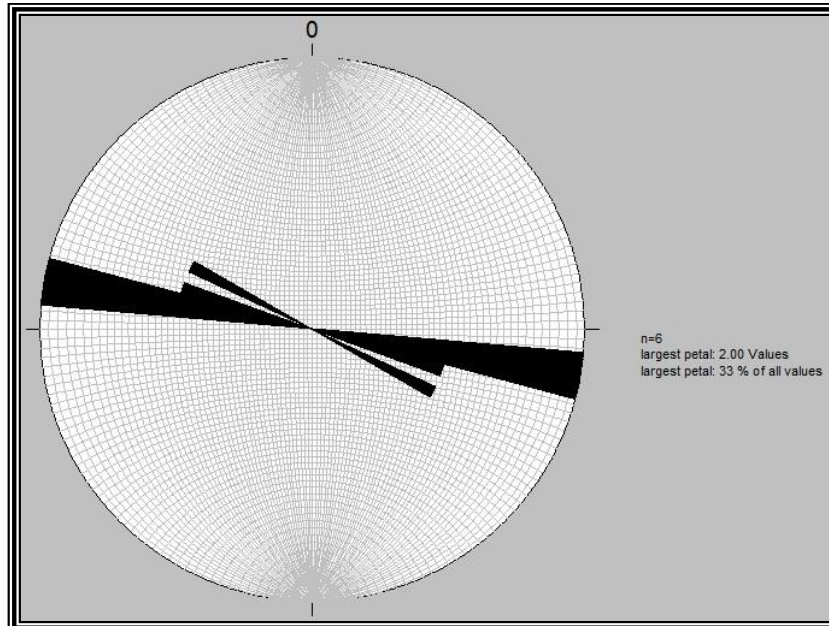


Figura 4.14. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en las colonias Reforma Educativa y Tepalcates.

- SITIO 7. Colonia Santa Cruz Meyehualco.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	496440	2138928	2259

En este sitio se midieron tres datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NE–SW 26° , lo que se representa en las Figuras 4.15 y 4.16.



Figura 4.15. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Santa Cruz Meyehualco.

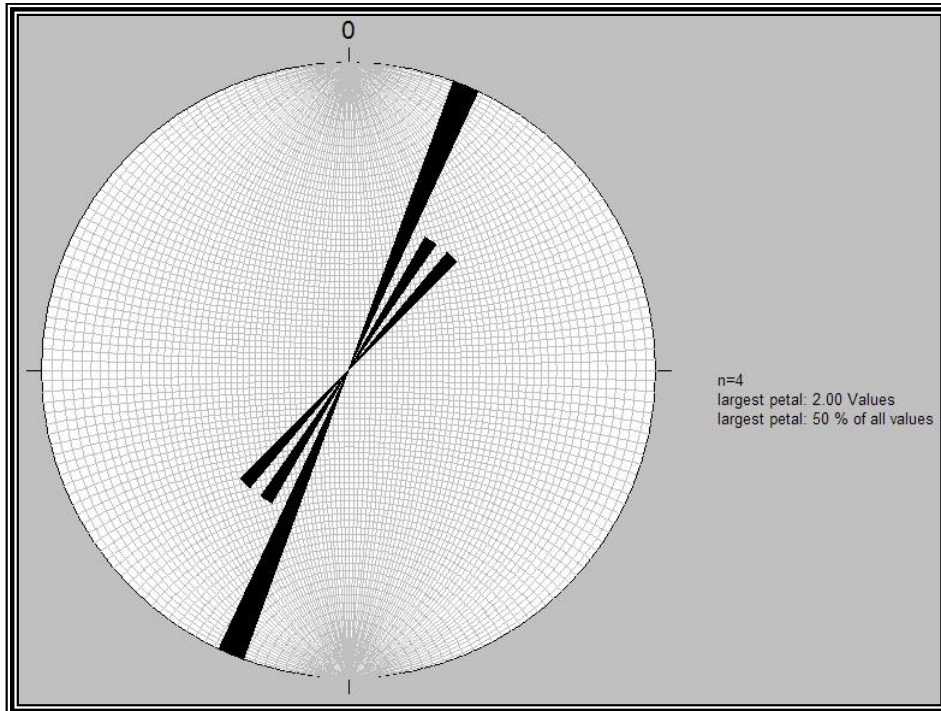


Figura 4.16. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia Santa Cruz Meyehualco.

La Figura 4.17 representa la roseta de rumbos de fracturas obtenida con los 190 datos de corta longitud recolectados en la colonia Santa Cruz Meyehualco. Se aprecia que la orientación preferencial de las fracturas de grandes dimensiones presenta similitud con las de corta longitud, aunque de manera subordinada. Por otro lado, el histograma de la Figura 4.18 comprueba que la mayor cantidad de datos tienen orientación preferencial NW-SE entre 0° y 50° , mientras que al NE-SW varían entre 0° y 30° .

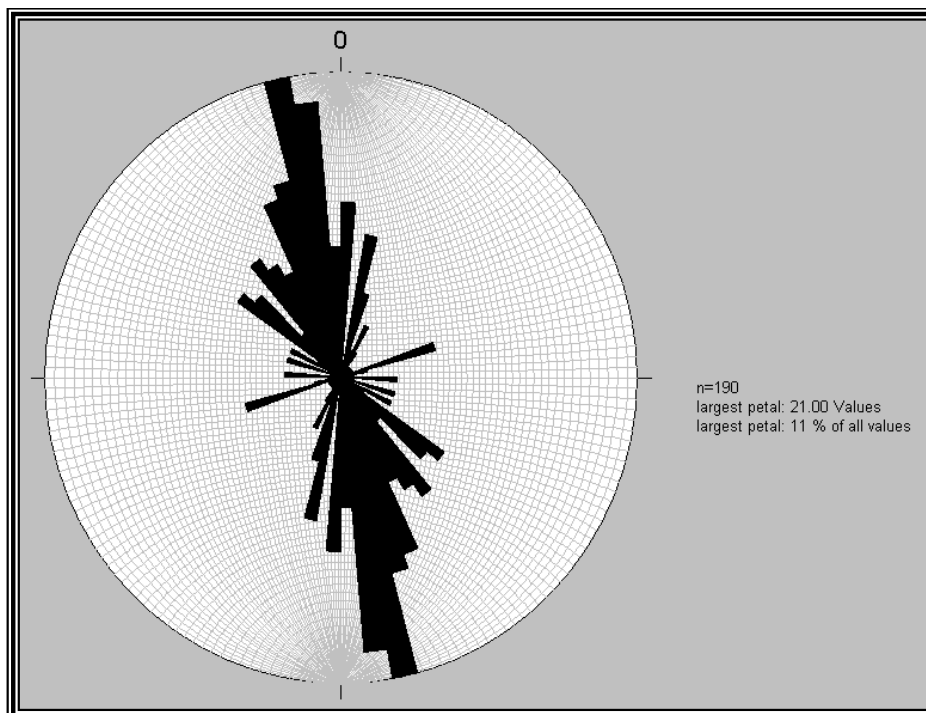


Figura 4.17. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con datos de corta longitud, recolectados en la colonia Santa Cruz Meyehualco.

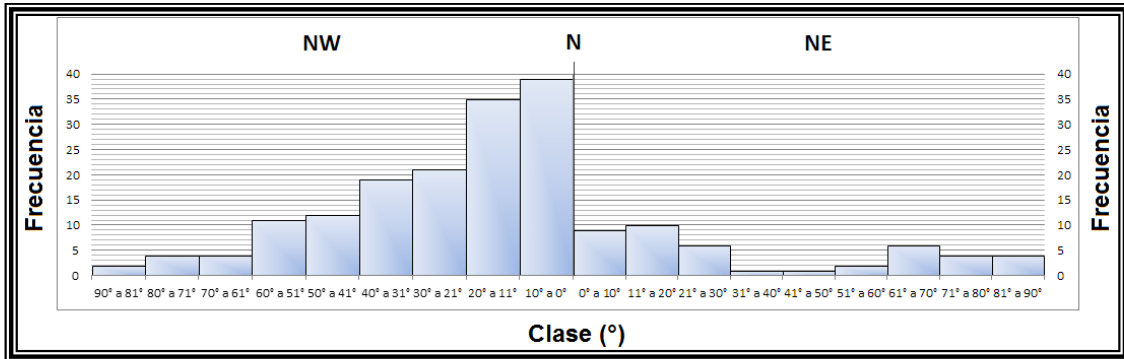


Figura 4.18. Imagen de un histograma que indica la frecuencia de datos para cada orientación preferencial. Elaborado con los datos recolectados en la colonia Santa Cruz Meyehualco.

- SITIO 8. Colonias Jacarandas.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	494641	2139316	2239

En este sitio se midieron un dato estructural que presenta una dirección preferencial de fracturamiento NE–SW 43°, lo cual se observa en las figuras 4.19 y 4.20.



Figura 4.19. Imagen que muestra la falla representada en una imagen de Google Earth, en la colonia Jacarandas.

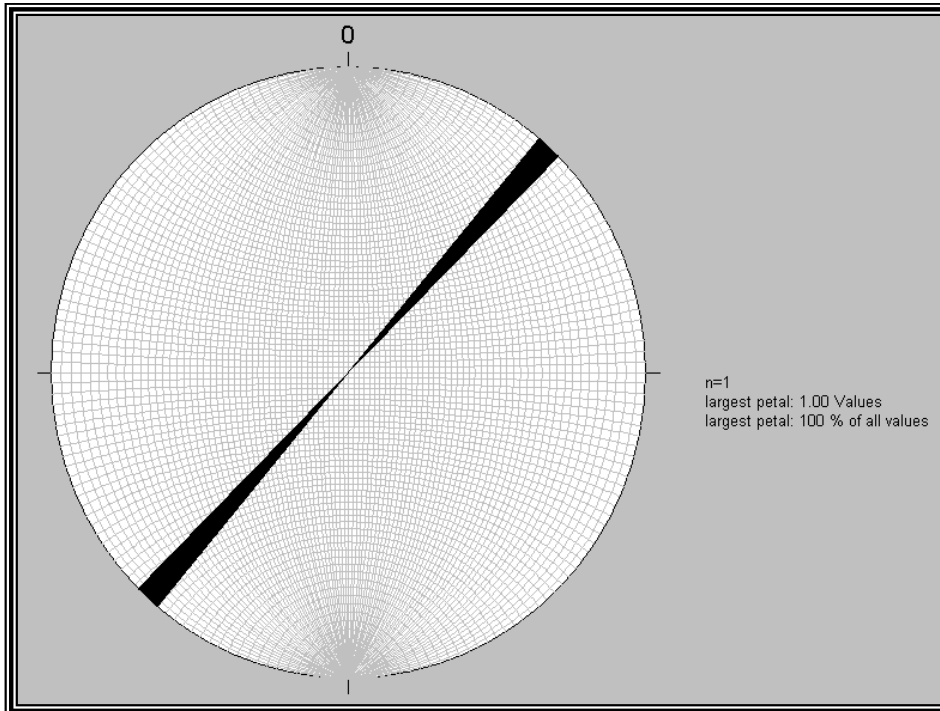


Figura 4.20. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia Jacarandas.

La Figura 4.21 representa la roseta de rumbos de fracturas obtenida con los 136 datos de corta longitud recolectados en la colonia Jacarandas. Se aprecia que la orientación preferencial de las fracturas de grandes dimensiones presenta similitud con las de corta longitud. Por otro lado, el histograma de la Figura 4.22 comprueba que la mayor cantidad de datos tienen orientación preferencial NE-SW entre 31° y 90° .

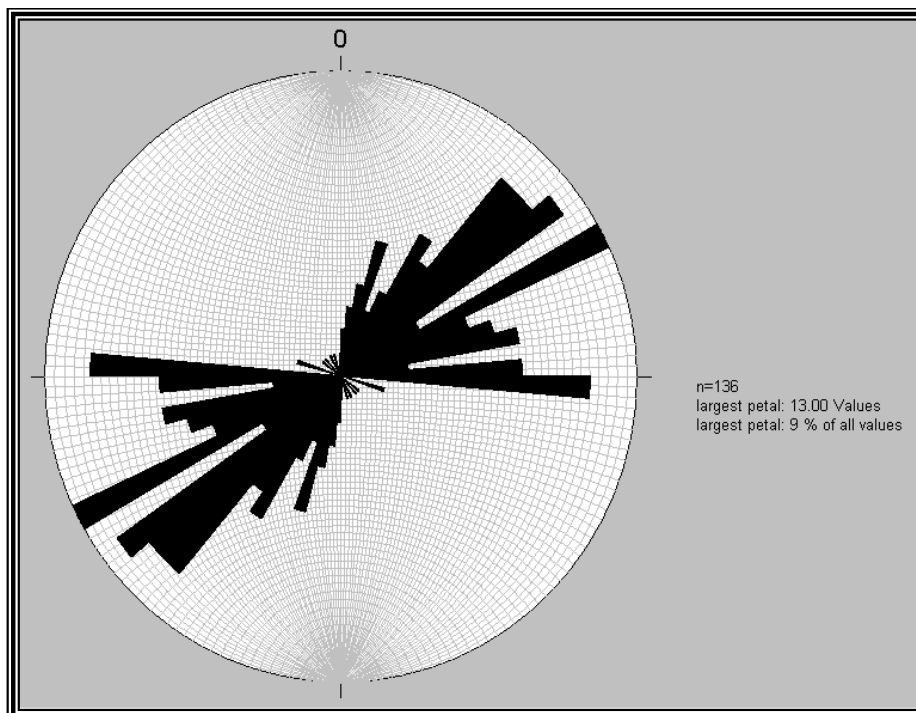


Figura 4.21. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con datos de corta longitud, recolectados en la colonia Jacarandas.

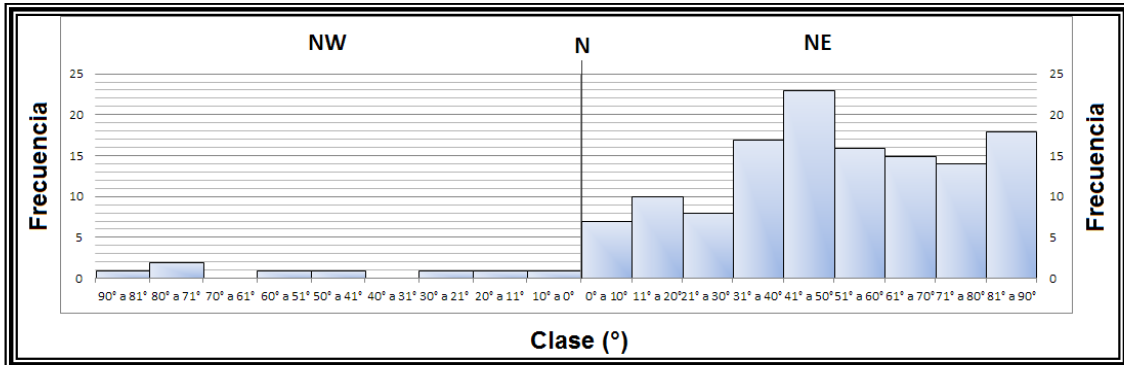


Figura 4.22. Imagen de un histograma que indica la frecuencia de datos para cada orientación preferencial. Elaborado con los datos recolectados en la colonia Jacarandas.

4.2. Delegación Gustavo A. Madero.

- SITIO 9. Inmediaciones del Bosque de Aragón.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486778	2135599	2230

En este sitio se midieron diecisiete datos estructurales que presentan dos direcciones preferenciales de fracturamiento, NE–SW 58° y NW–SE 03° , que forman entre ellas un ángulo de 60° . Esto puede apreciarse en las Figuras 4.23 y 4.24.

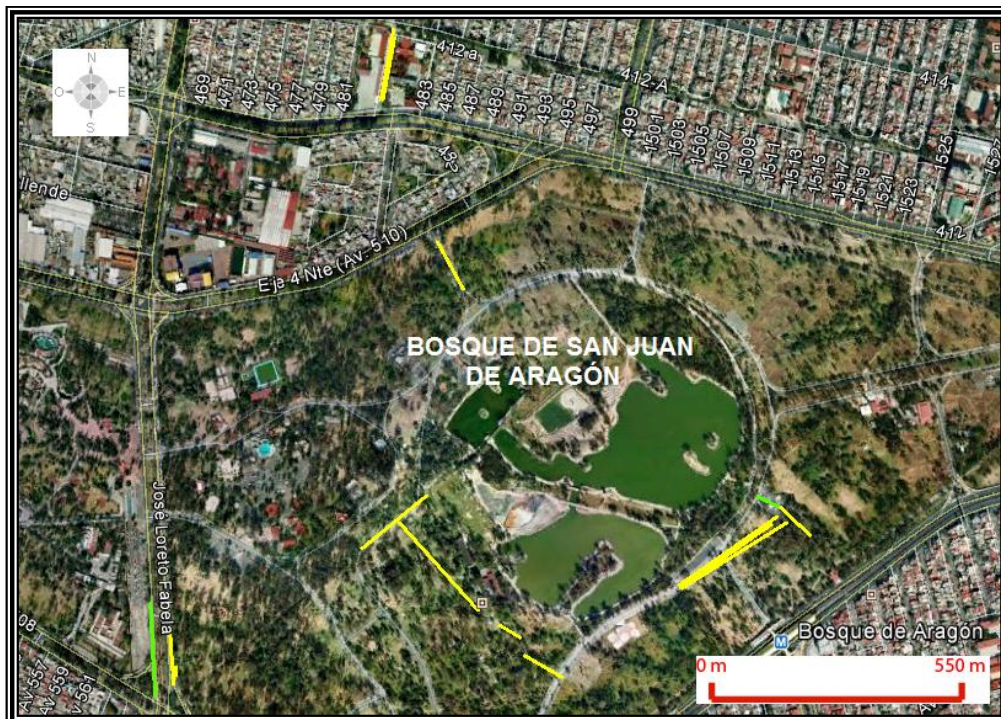


Figura 4.23. Ubicación de las fracturas y fallas representadas en una imagen de Google Earth, en el Bosque de Aragón. Las líneas amarillas corresponden con fracturas y las verdes con fallas.

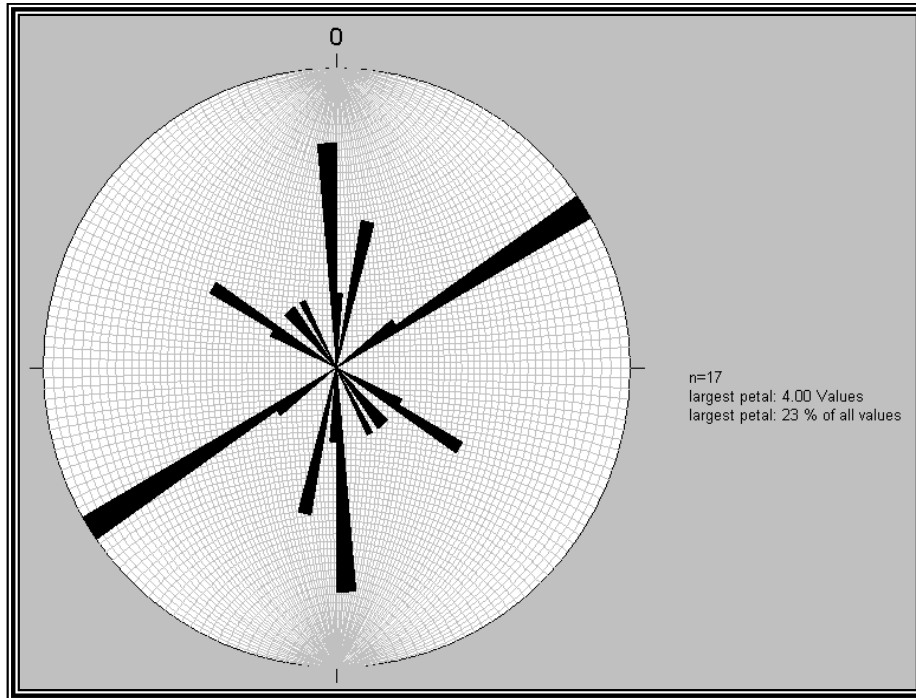


Figura 4.24. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en el Bosque de Aragón.

La Figura 4.25 representa la roseta de rumbos de fracturas obtenida con los 117 datos de corta longitud recolectados en las inmediaciones del Bosque de Aragón. Se aprecia que la orientación preferencial de las fracturas de grandes dimensiones presenta similitud con las de corta longitud. Por otro lado, el histograma de la Figura 4.26 comprueba que la mayor cantidad de datos tienen orientación preferencial NW-SE entre 0° y 40° , mientras que al NE-SW varían entre 11° y 80° .

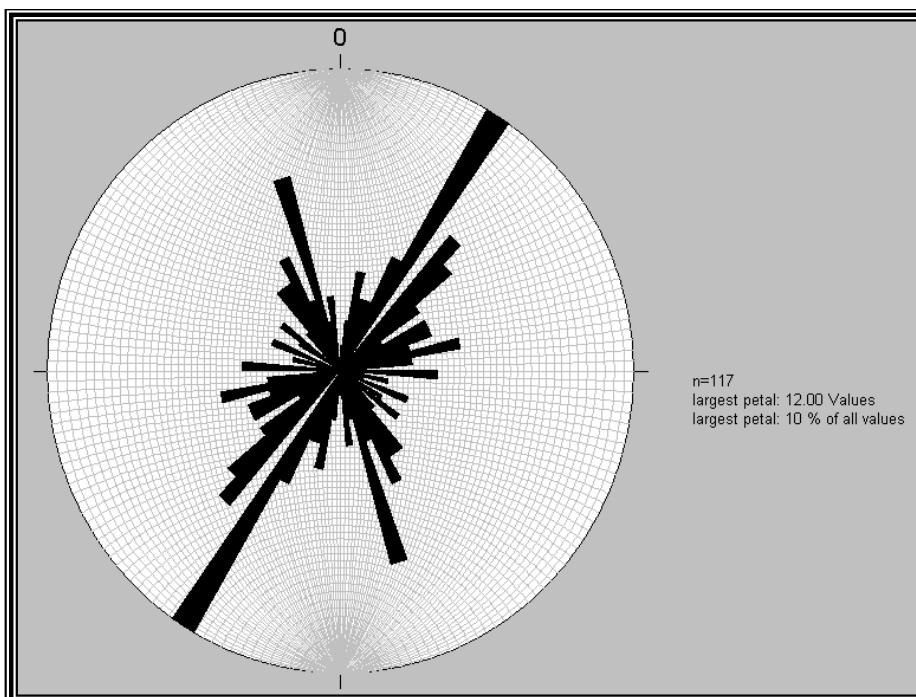


Figura 4.25. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con datos de corta longitud, recolectados en las inmediaciones del Bosque de Aragón.

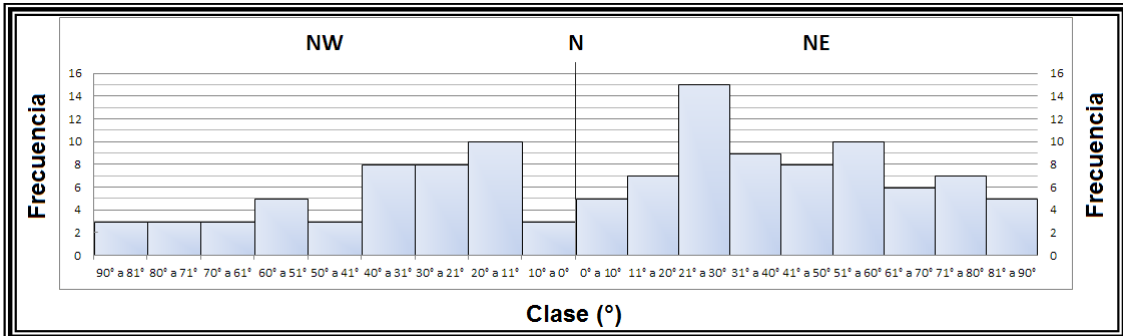


Figura 4.26. Imagen de un histograma que indica la frecuencia de datos para cada orientación preferencial. Elaborado con los datos recolectados en las inmediaciones del Bosque de Aragón.

- SITIO 10. Inmediaciones del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	484693	2155109	2239

En este sitio se midieron quince datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento, NW–SE 70°, lo cual se observa en las Figuras 4.27 y 4.28.



Figura 4.27. Ubicación de las fracturas y fallas representadas en una imagen de Google Earth, en las inmediaciones del IMP. Las líneas amarillas corresponden con fracturas y las verdes con fallas.

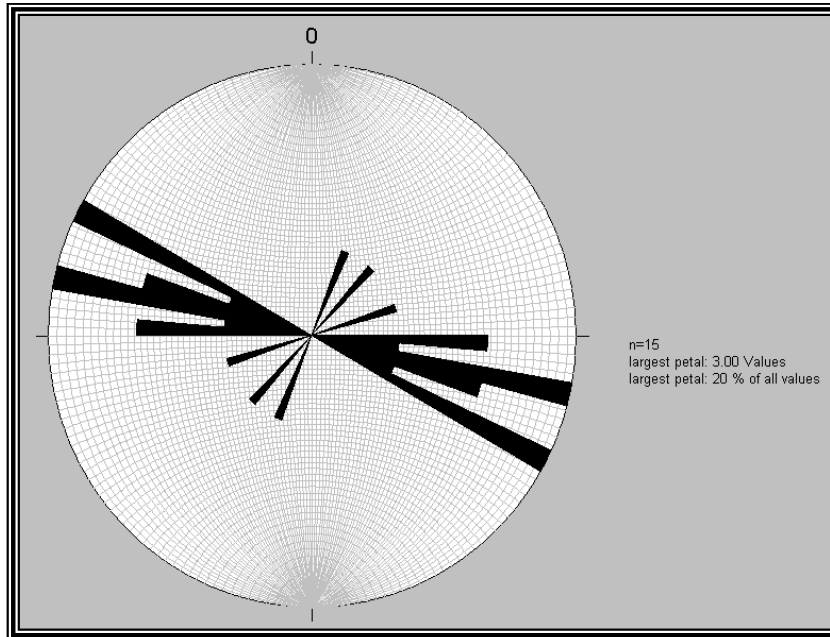


Figura 4.28. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en las inmediaciones del IMP.

- SITIO 11. Colonia Lindavista, calles Colector 13 y Ricarte.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486225	2154739	2265

En este sitio se midieron nueve datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NW–SE 58°. Esto puede apreciarse en las Figuras 4.29 y 4.30.

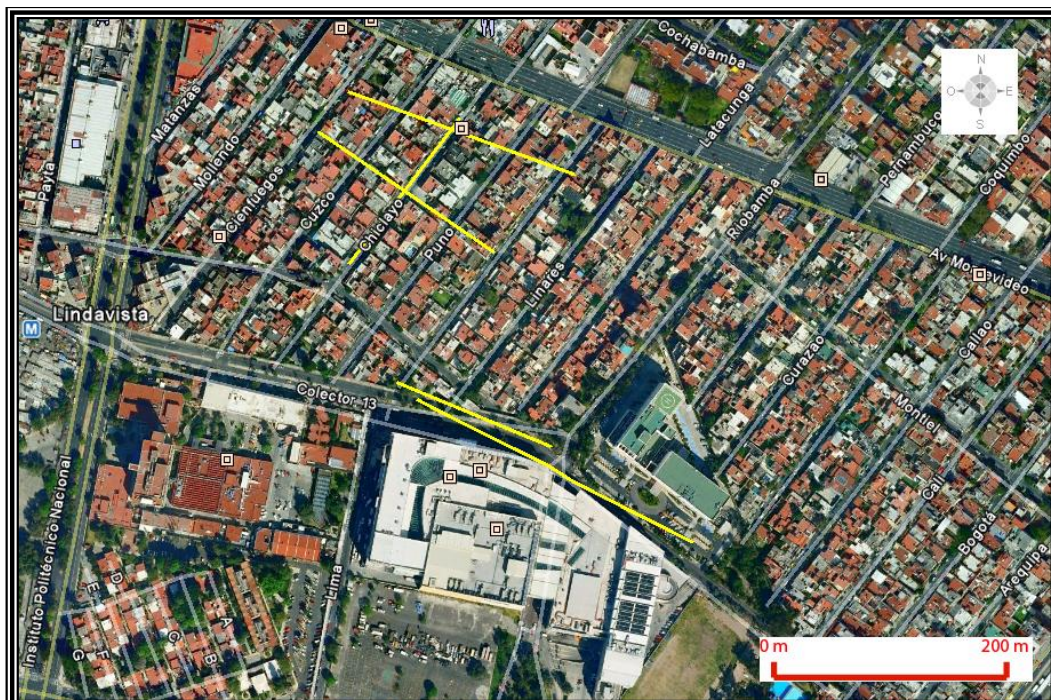


Figura 4.29. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Lindavista.

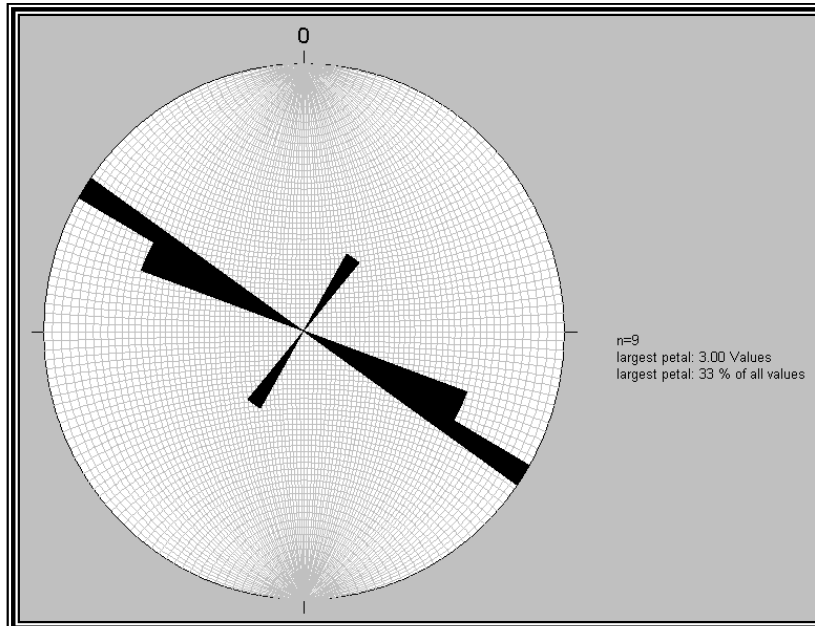


Figura 4.30. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia Lindavista.

- SITIO 12. Inmediaciones del Campus de Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	485121	2155818	2127

En este sitio se midieron seis datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NW–SE 63° , lo que se observa en las Figuras 4.31 y 4.32.



Figura 4.31. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en las inmediaciones del IPN.

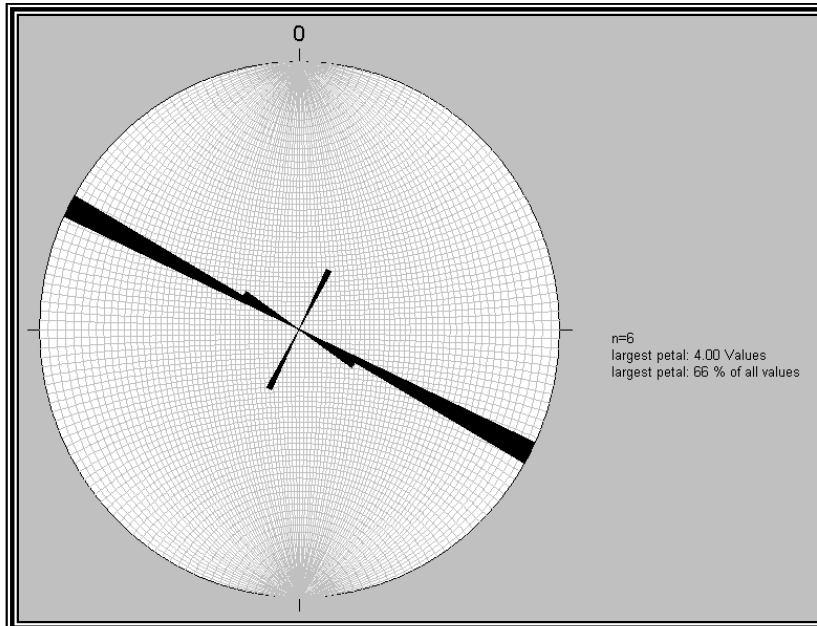


Figura 4.32. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en las inmediaciones del IPN.

- SITIO 13. Inmediaciones del Deportivo Los Galeana, colonia Ampliación Casas Alemán.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486225	2154739	2265

En este sitio se recolectaron cinco datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NE–SW 22° . Esto se aprecia en las Figuras 4.33 y 4.34.



Figura 4.33. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Ampliación Casas Alemán.

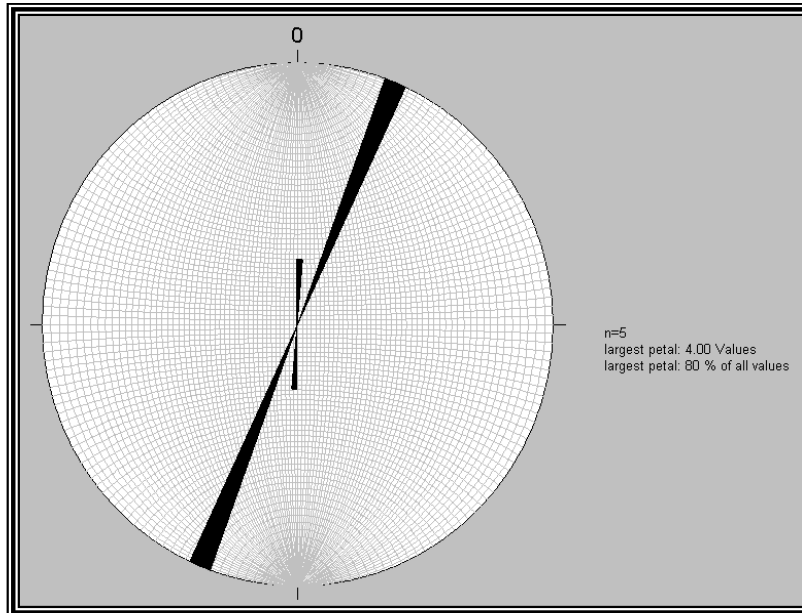


Figura 4.34. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados afuera del Deportivo Los Galeana.

4.3. Delegación Coyoacán.

- SITIO 14. Avenida Canal de Miramontes esquina con Calzada de La Virgen, colonia Avante.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	485616	2137027	2237

En este sitio se recolectaron tres datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NW–SE 30° , lo cual puede apreciarse en las Figuras 4.35 y 4.36.



Figura 4.35. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Avante.

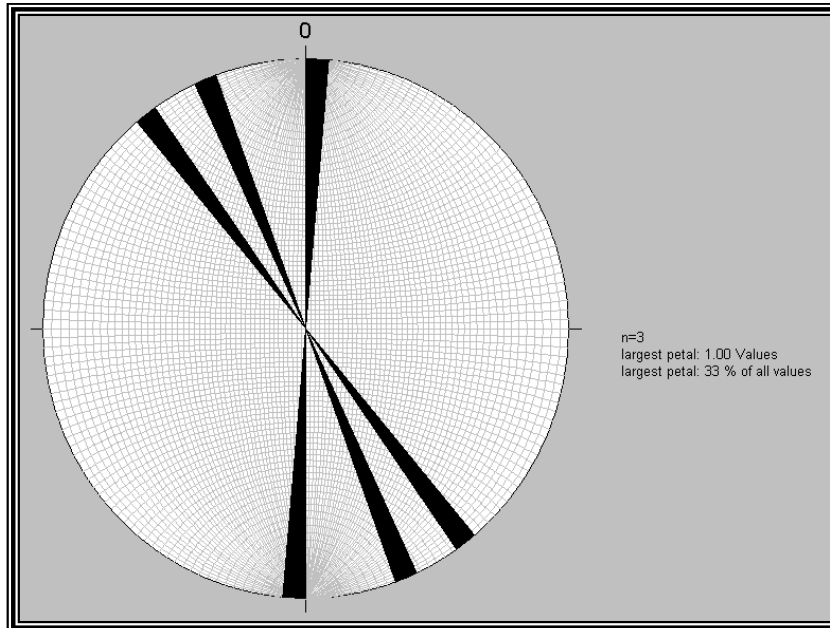


Figura 4.36. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia Avante.

- SITIO 15. Avenida Canal de Miramontes esquina con Calzada de Las Bombas, colonia Los Girasoles.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486965	2135244	2215

En este sitio se recolectaron dos datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NE–SW 05°. Esto puede apreciarse en las Figuras 4.37 y 4.38.

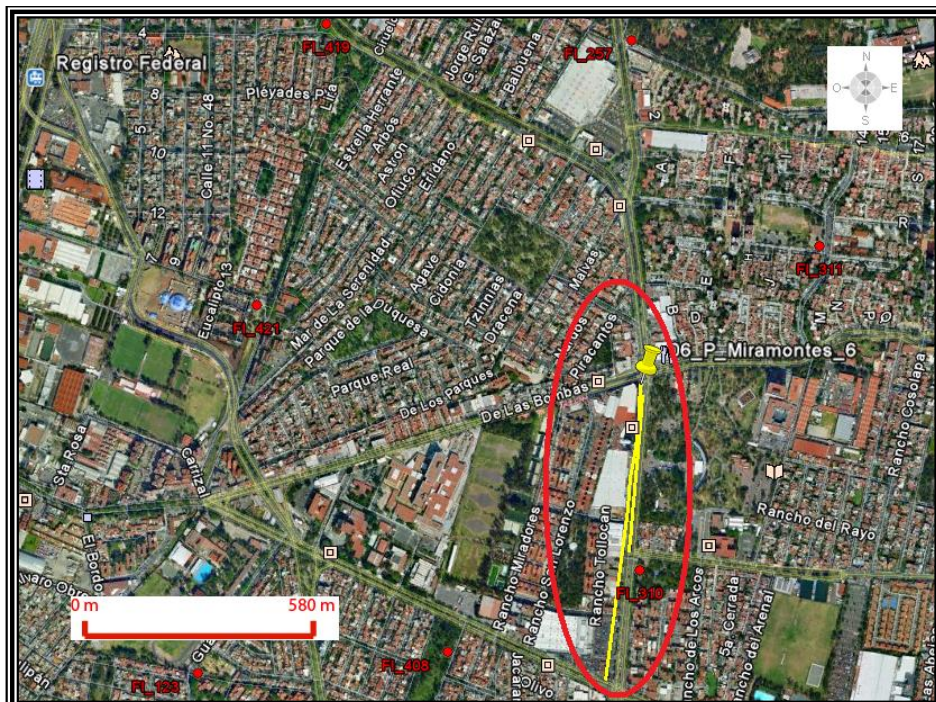


Figura 4.37. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Los Girasoles.

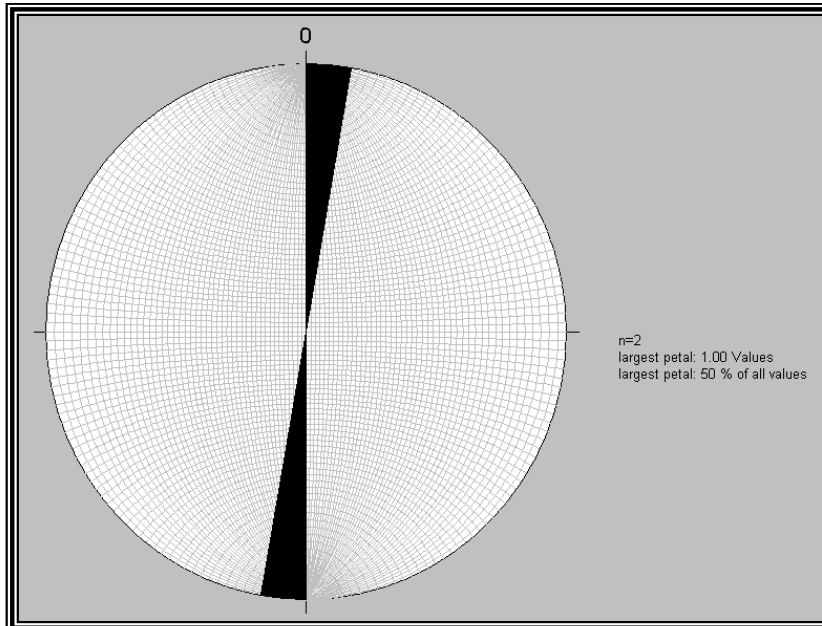


Figura 4.38. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia Los Girasoles.

- SITIO 16. Avenida de Tzinnias y Avenida de las Dalias, Colonia Jardines de Coyoacán.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	486696	2135661	2234

En este sitio se recolectaron dos datos estructurales que presentan dos direcciones preferenciales de fracturamiento, NW–SE 52° y NE–SW 32° , que forman entre ellas un ángulo de 84° . Esto puede apreciarse en las Figuras 4.39 y 4.40.



Figura 4.39. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la Colonia Jardines de Coyoacán.

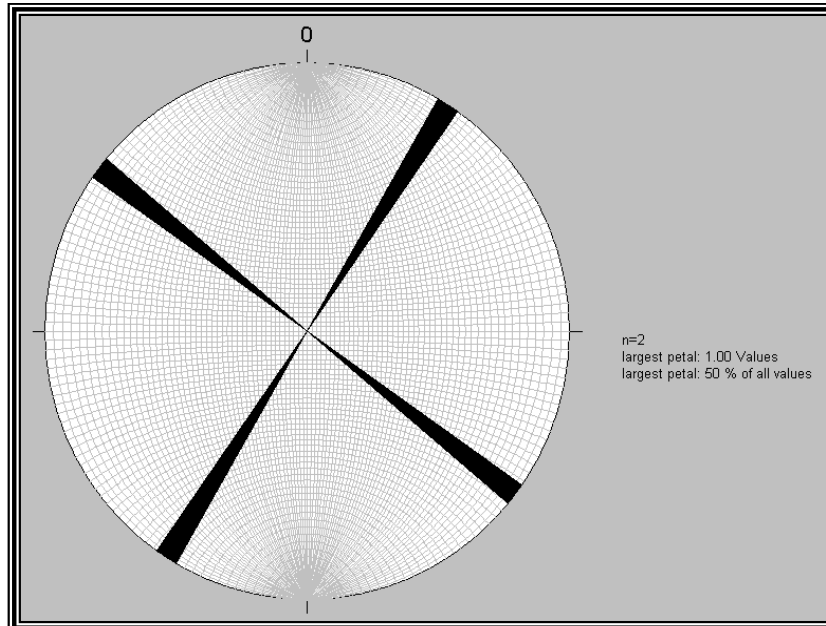


Figura 4.40. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la Colonia Jardines de Coyoacán.

4.4. Delegación Xochimilco.

- SITIO 17. Av. México, Pueblo de Xochimilco.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	488191	2130104	2234

En este sitio se recolectaron dos datos estructurales que presentan una dirección preferencial de fracturamiento NW – SE 25° , lo que puede apreciarse en las Figuras 4.41 y 4.42.



Figura 4.41. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en Av. México, en Xochimilco.

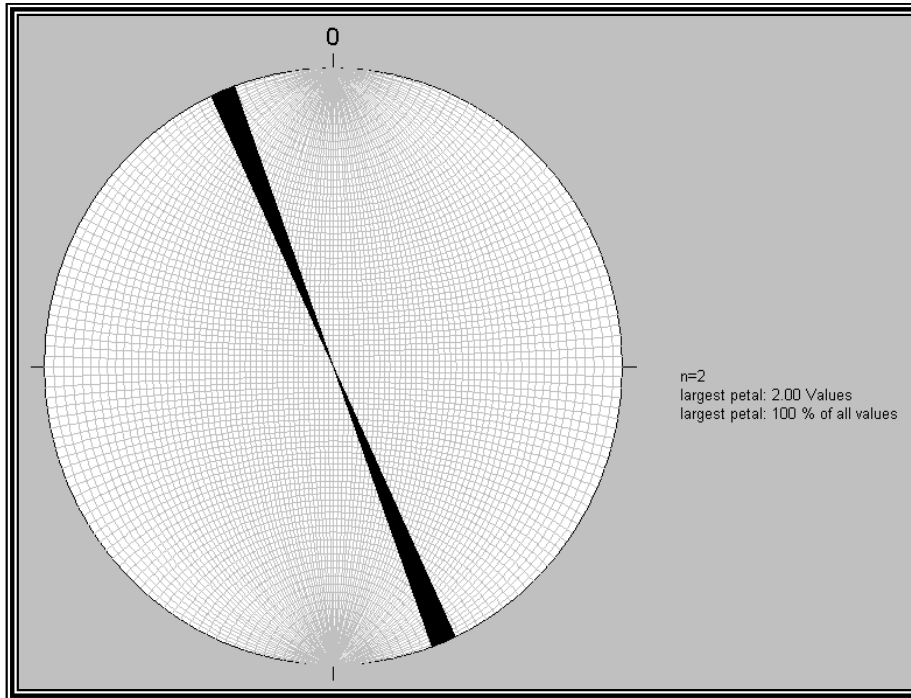


Figura 4.42. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en Av. México, en Xochimilco.

La Figura 4.43 representa la roseta de rumbos de fracturas obtenida con los 145 datos de corta longitud recolectados en el barrio de San Marcos. Se aprecia que la orientación preferencial de las fracturas de grandes dimensiones presenta similitud con las de corta longitud. Por otro lado, el histograma de la Figura 4.44 comprueba que la mayor cantidad de datos tienen orientación preferencial NW-SE entre 0° y 30° , mientras que al NE-SW varían entre 0° y 20° .

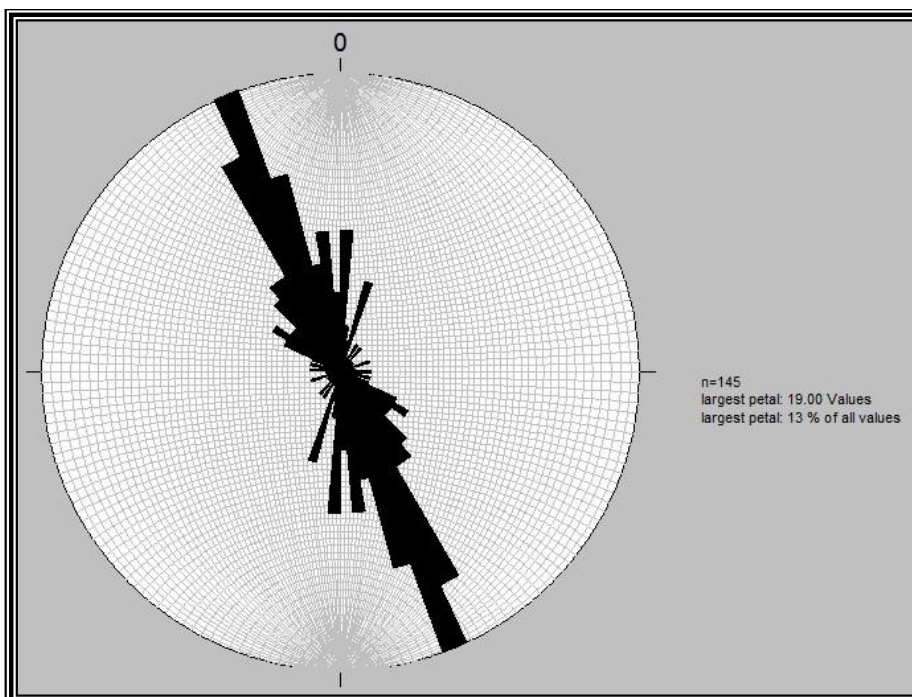


Figura 4.43. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con datos de corta longitud, recolectados en el barrio de San Marcos, en Xochimilco.

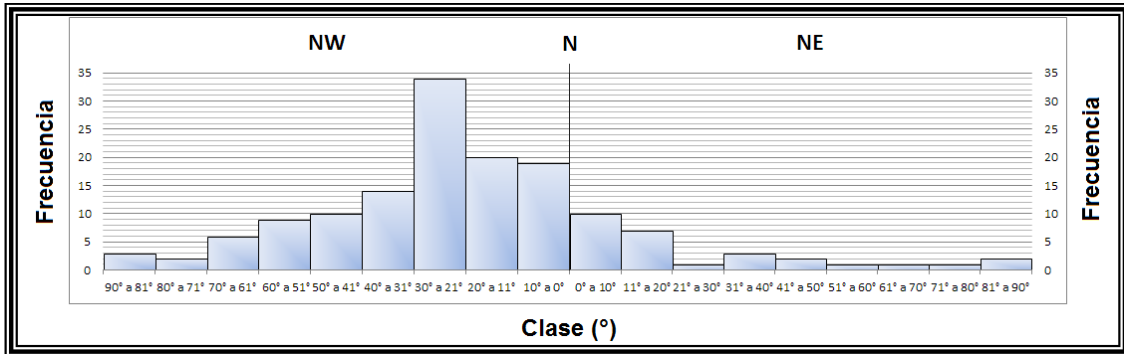


Figura 4.44. Imagen de un histograma que indica la frecuencia de datos para cada orientación preferencial. Elaborado con los datos recolectados en el barrio de San Marcos, en Xochimilco.

- SITIO 18. Unidad Habitacional Rinconada del Sur, colonia Huichapan.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	487380	2129811	2257

En este sitio se recolectaron 18 datos estructurales que presentan dos direcciones preferenciales de fracturamiento, NW-SE 82° y NE-SW 60° , que forman entre ellas un ángulo de 38° . Esto puede apreciarse en las Figuras 4.45 y 4.46.



Figura 4.45. Ubicación de las fracturas y fallas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Huichapan. Las líneas amarillas corresponden con fracturas y las verdes con fallas.

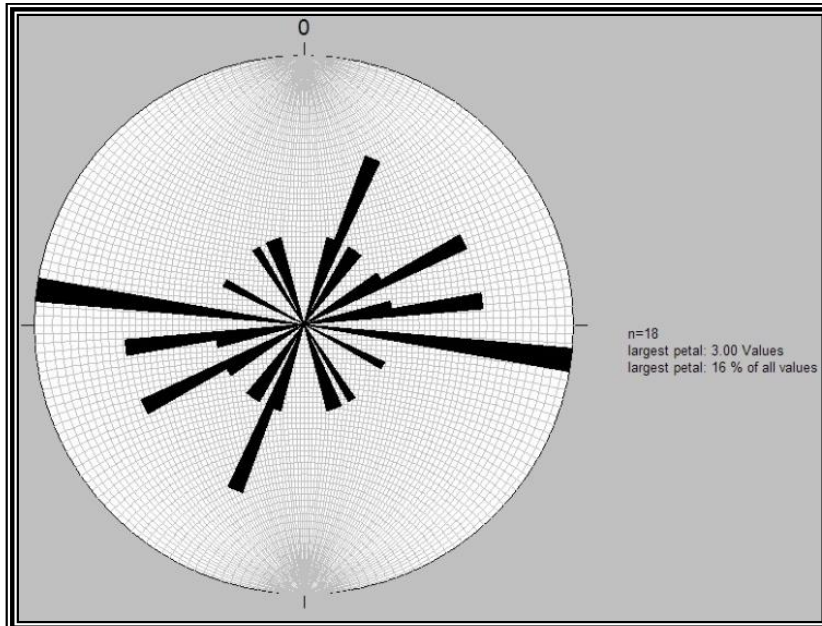


Figura 4.46. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia Huichapan.

4.5. Delegación Azcapotzalco.

- SITIO 19. Alameda Norte.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	481474	2156286	2203

En este sitio se recolectaron 14 datos estructurales que presentan dos direcciones preferenciales de fracturamiento, NW–SE 72° y NE–SW 18° , que forman entre ellas un ángulo de 90° . Esto puede apreciarse en las Figuras 4.47 y 4.48.



Figura 4.47. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la Alameda Norte.

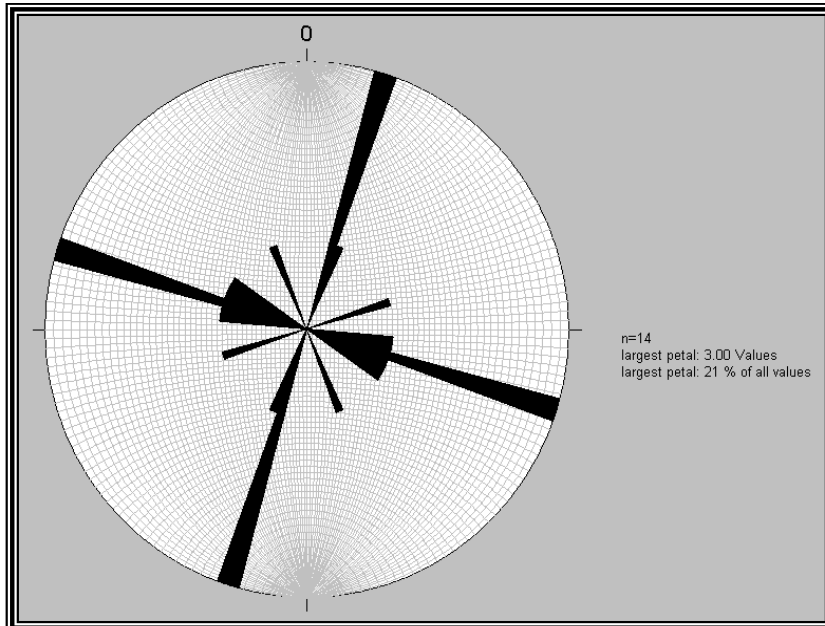


Figura 4.48. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la Alameda Norte.

4.6. Delegación Tláhuac.

- SITIO 20. Pueblo San Andrés Mixquic.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	503669	2125789	2234

En este sitio se recolectaron cinco datos estructurales que presentan dos direcciones preferenciales de fracturamiento, NE–SW 50° y NW–SE 78° , que forman entre ellas un ángulo de 52° . Esto se observa en las Figuras 4.49 y 4.50.



Figura 4.49. Ubicación de las fracturas y fallas representadas en una imagen de Google Earth, en el Pueblo San Andrés Mixquic. Las líneas amarillas corresponden con fracturas y las verdes con fallas.

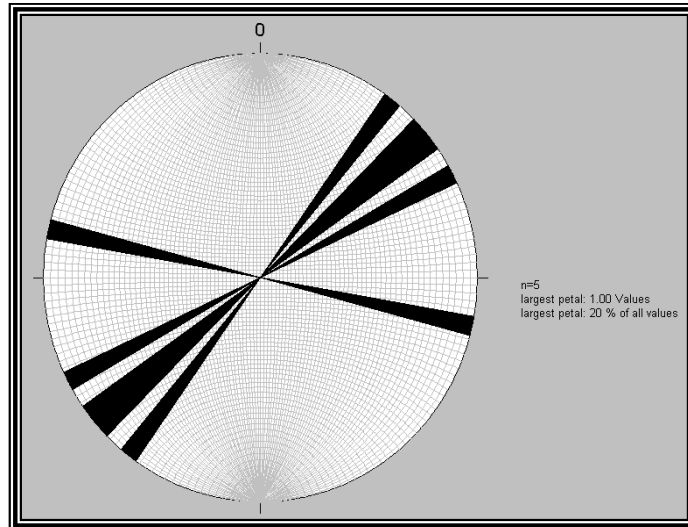


Figura 4.50. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en San Andrés Mixquic.

La Figura 4.51 representa la roseta de rumbos de fracturas obtenida con los 68 datos de corta longitud recolectados en San Andrés Mixquic. Se aprecia que la orientación preferencial de las fracturas de grandes dimensiones presenta similitud con las de corta longitud. Por otro lado, el histograma de la Figura 4.52 comprueba que la mayor cantidad de datos tienen orientación preferencial NW-SE entre 61° y 90° , mientras que al NE-SW varían entre 41° y 90° .

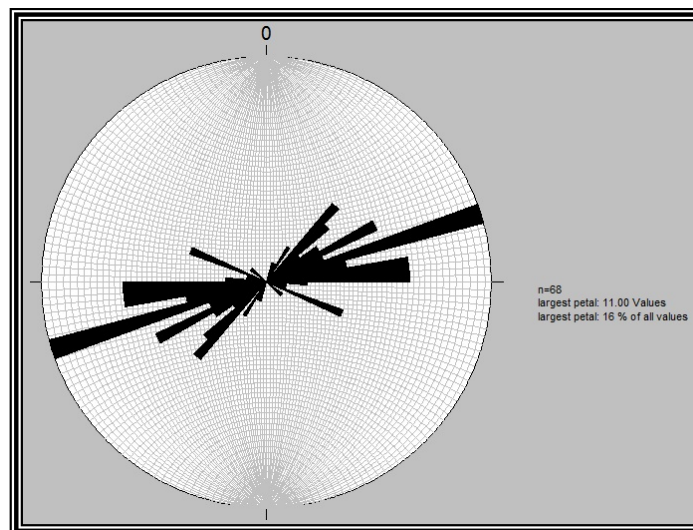


Figura 4.51. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con datos de corta longitud, recolectados en el pueblo San Andrés Mixquic.

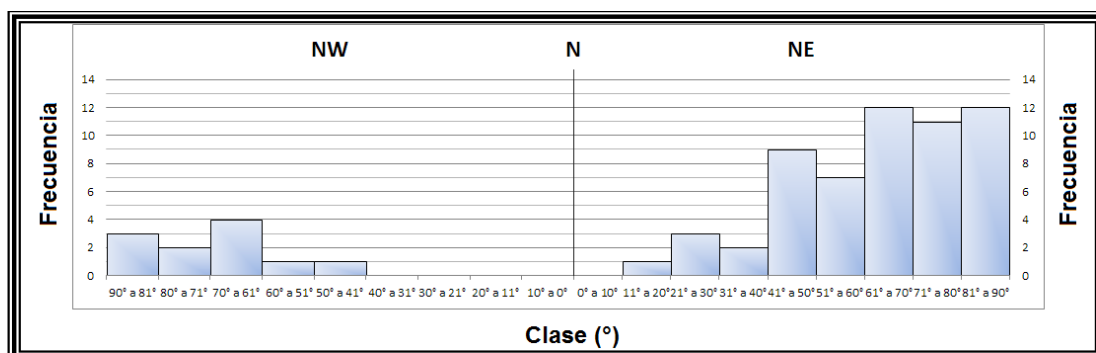


Figura 4.52. Imagen de un histograma que indica la frecuencia de datos para cada orientación preferencial. Elaborado con los datos recolectados en el pueblo San Andrés Mixquic.

4.7. Delegación Álvaro Obregón.

- SITIO 21. Colonia Barrio Norte, calle Despertador Americano.

Sistema	x [mE]	y [mN]	z [m]
WGS 84	477820	2142618	2353

En este sitio se recolectó un solo dato estructural que presenta una dirección preferencial de fracturamiento NW–SE 45° , lo cual puede apreciarse en las Figuras 4.53 y 4.54.

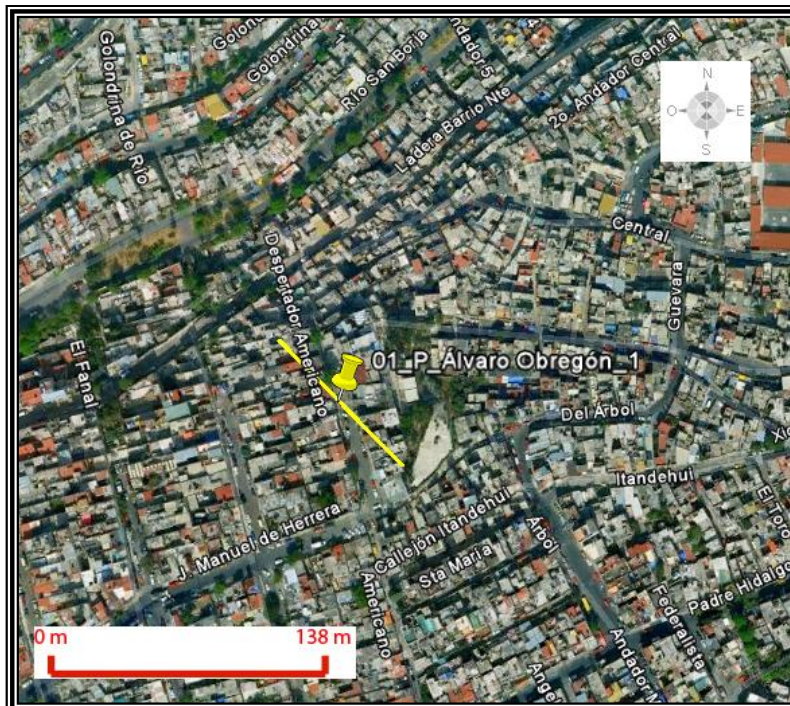


Figura 4.53. Ubicación de las fracturas representadas en una imagen de Google Earth, en la colonia Barrio Norte, Álvaro Obregón.

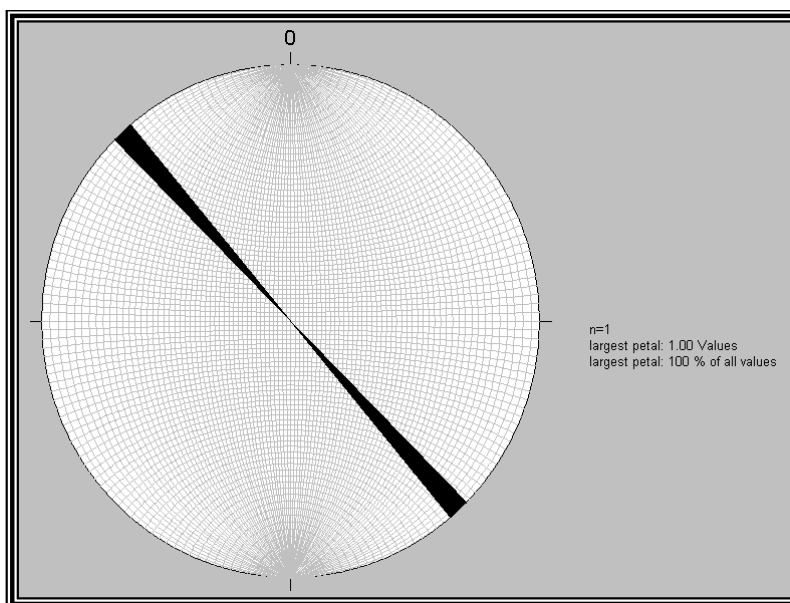


Figura 4.54. Imagen de una roseta de rumbos de fracturas obtenida con los datos recolectados en la colonia Barrio Norte.

V. INTERPRETACIÓN.

En este capítulo se propone una interpretación sobre la génesis de los elementos estructurales estudiados (fracturas y/o fallas), en las delegaciones afectadas en el Distrito Federal.

Dicha interpretación se realizó con base en el análisis estadístico obtenido de las rosetas de rumbos de las fracturas, las cuales indican la(s) orientación(es) preferenciales en cada sitio estudiado. Así mismo, se tomaron como base las teorías de fracturamiento descritas en el Capítulo III del presente trabajo. Además, se utilizó la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México para establecer la zona en que se ubica cada uno de los sitios de estudio y conocer las características geológicas generales presentes en el lugar.

5.1. Delegación Iztapalapa.

5.1.1. Zona de Lago.

Las siguientes siete colonias se ubican en la delegación Iztapalapa, dentro de la antigua zona de lago (Tabla 5.1).

Sitio	Nombre (Ubicación)
1	Unidad Concordia Zaragoza
2	Colonia Popular Ermita Zaragoza
3	Colonia El Edén
4	Colonia Guelatao de Juárez
5	Colonias Reforma Educativa y Tepalcates
6	Colonia Santa Cruz Meyehualco
7	Colonia Jacarandas

Tabla 5.1. Muestra los sitios visitados en la delegación Iztapalapa que corresponden a la zona de lago.

Las colonias antes mencionadas se encuentran dentro de la Zona Geotécnica de Lago (Zona III) (Figura 3.12), y la mayoría de éstas se ubican cerca del Peñón del Marqués (Peñón Viejo).

El Peñón del Marqués está situado en el oriente de la Ciudad de México, a un costado de la Calzada I. Zaragoza (Figura 5.1), y es un cono compuesto o estratovolcán con un radio aproximado de 1 km, el cual está constituido por coladas de lava de 2 a 5 m de espesor de tipo andesítica-basáltica y depósitos piroclásticos representados por la alternancia entre capas de ceniza de 1 a 3 m y capas gruesas de escoria de hasta 15 m.

Según Del Castillo (1978), el Peñón se compone de dos estructuras sobrepuestas, la mayor y más joven se sitúa al norte y la más antigua y menor al sur. Ambas están separadas por una depresión o banco de materiales.

Este volcán estuvo algún tiempo circundado por el extinto lago de Texcoco en la Cuenca de México, circunstancia que generó que en su periferia próxima se fuesen depositando sedimentos de tipo pie de monte en una planicie inclinada con un ángulo aproximado de 6°, en su contacto con la ladera del Cerro de aproximadamente 20° lo que define el limite preciso entre ambos relieves; en su periferia próxima y llana hay depósitos aluviales y lacustres de granulometría mucho más fina correspondiente con las zonas lacustres.

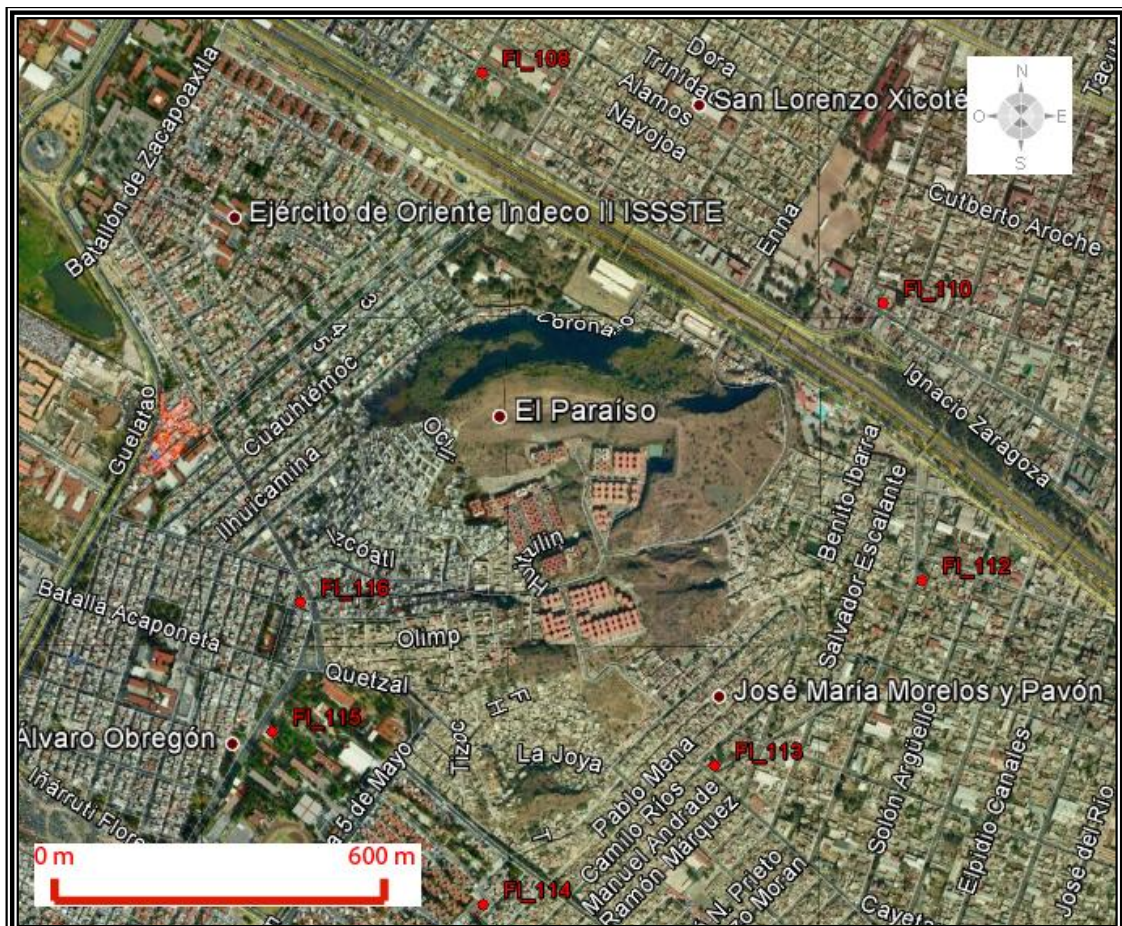


Figura 5.1. Ubicación del Peñón del Marqués y de 7 pozos de bombeo del Departamento del Distrito Federal.

En las zonas circundantes al Peñón del Marqués se distinguen tres formas de relieve, las laderas, una franja periférica de pie de monte y la planicie lacustre. Las cuales han sido urbanizadas irregularmente y en algunos sectores se tienen fracturas que generan daños importantes a la infraestructura civil.

La zona de pie de monte es una franja de terreno circundante a las laderas del cono, con una inclinación aproximada de 5 a 7 grados, extendiéndose y disminuyendo su pendiente hacia las planicies lacustres, con un radio de 0.5 a 1 km; está constituida principalmente por material tipo volcánico areno-limoso y limo arcilloso. De acuerdo con Del Castillo (1978), a estas secuencias piroclásticas le subyacen arcillas de alta compresibilidad alcanzando la profundidad de 77 m, por lo que las capas de material volcánico están en contacto con capas de material compresible con una inclinación de 10 %.

Las arenas-limosas de la superficie periférica, son de compresibilidad media a alta, con contenido de agua en los poros de hasta 100%, a profundidad se tienen arcillas de alta compresibilidad con un contenido variable de agua del 100 al 400%, estratificadas con arenas limosas de baja compresibilidad y grosor variable. Finalmente se presentan capas de arena y grava con escoria, las cuales se distribuyen en un radio de 600 a 1000 m a partir de la periferia del cerro.

Existen antecedentes que indican que desde la década de los años sesenta del siglo pasado, hubo desarrollo de fracturamiento anular en la periferia del cono, el cual fue atribuido al fenómeno de extracción de agua, lo cual generó una consolidación diferencial que dio lugar a una expansión de la superficie del terreno, lo que generó áreas de tensión y agrietamiento.

Se han realizado varias mediciones sobre el hundimiento del terreno en la periferia del Peñón. Murillo (1990), señala que entre 1978 y 1979 el hundimiento alcanzó los 15.4 cm/año; la Gerencia de Aguas del Valle de México menciona que entre 1977 y 1985 el hundimiento promedio fue de 10 y 25 cm/año, lo cual arroja hasta 2 m de desnivel en las zonas más críticas en menos de diez años.

El hundimiento de la planicie lacustre provoca un desequilibrio en la planicie de pie de monte, la que aparentemente se desliza a partir de su contacto con la ladera volcánica de mayor pendiente (Figura 5.2). Este proceso complejo de hundimiento y deslizamiento, produce en consecuencia grietas de tensión en la periferia del cerro, dispuestas en distinta altitud en escalonamientos de hasta cuatro niveles, en dirección a la pendiente del terreno.

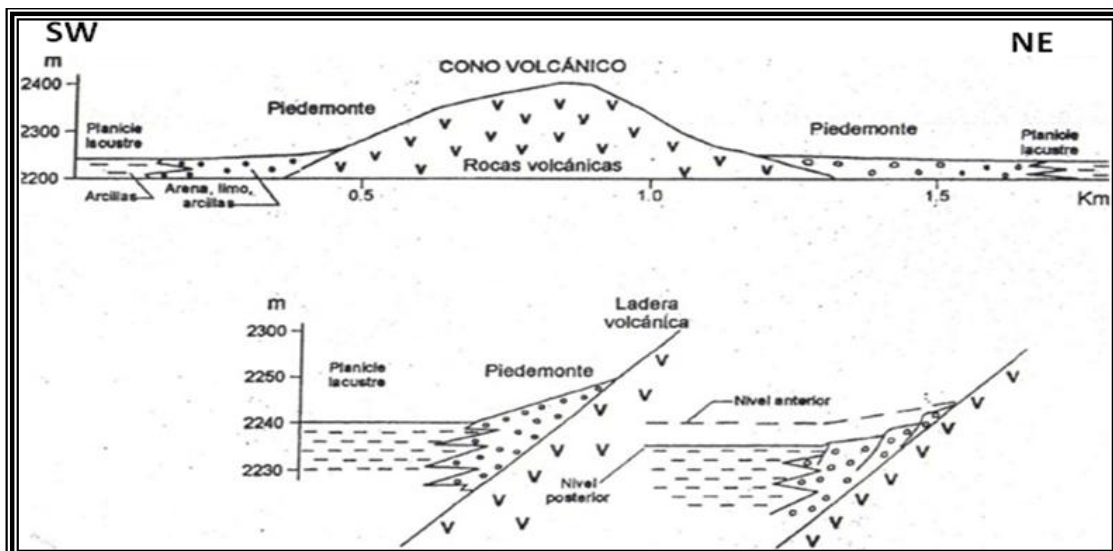


Figura 5.2. Proceso de agrietamiento en la zona de pie de monte, de forma paralela a la estructura rígida del volcán y generadas por el hundimiento de la zona lacustre (Tomada de Cabral C. y Lugo H., 2008).

La planicie lacustre circundante corresponde con una superficie plana originalmente horizontal que resultó de la desecación paulatina del Lago de Texcoco.

En la zona circundante al Peñón del Marqués (Figura 5.1), se perforaron baterías de pozos de extracción de agua, los cuales a la fecha continúan extrayendo un importante caudal, circunstancia que explica parte de los profundos abatimientos del nivel freático de esta zona periférica. Se sabe que hasta las décadas de los cincuentas y sesentas del siglo pasado, las manifestaciones hidrotermales que emanaban del volcán eran abundantes, e incluso se construyeron balnearios termales próximos al volcán; se puede deducir que estas emanaciones han desaparecido por el descenso del nivel freático.

A partir de la década de los cuarenta del siglo pasado, se comenzó a extraer material destinado a la construcción, lo cual trajo como consecuencia la reducción de aproximadamente un 40% del volumen original de la estructura volcánica, generando un cambio en su morfología, circunstancia que facilitó el desplante de una gran cantidad de viviendas en las laderas de su periferia, e incluso en el área interna del cráter existen colonias y tres unidades habitacionales (Figura 5.1).

La consolidación diferencial generada por los cambios litológicos y de la pendiente, produce la extensión de la superficie del terreno, creando áreas de tensión con su correspondiente agrietamiento, los que se manifiestan en las zonas de mayor debilidad y donde el cambio de pendiente en el subsuelo de los materiales incompresibles es más brusco (Murillo, 1978).

Estas características contribuyen a la inestabilidad del terreno, además de la problemática ocasionada por la carga cíclica o dinámica provocada por el transporte pesado que circula en las avenidas próximas y a la carga estática de las edificaciones de gran tonelaje (Zepeda, 1992; y Marsal, 1992); también influyeron la construcción del metro y el drenaje profundo, entre otros factores relevantes.

Se puede establecer que los hundimientos y la afectación de los inmuebles en estas zonas, tienen su origen en factores tales como la variación de la propia composición mineralógica, granulométrica, y orgánica; además de la paleo topografía, la irregular distribución de los depósitos dentro de la cuenca y la reactivación de fallas y fracturas más antiguas.

Considerando las características geológicas y la disposición del fracturamiento, se tiene que en el subsuelo de la zona circundante al Peñón del Marqués ha ocurrido una descompensación por la pérdida de volumen de los acuíferos cercanos y se está experimentando una compactación del subsuelo, en gran parte debido a un reajuste de volumen de sedimentos que se marca hacia el centro de las cuencas lacustres, lo cual está generando fuerzas de tensión que se incrementan y detonan en las zonas de debilidad periféricas situadas en las franjas de cambio de pendiente próximas a los aparatos volcánicos, generándose múltiples fracturas en las zonas de discontinuidad litológica, así como en las zonas de planicie del antiguo lago.

El sitio numero uno de la Tabla 5.1, presenta fracturas con dos direcciones de fracturamiento que forman un ángulo de 80° , lo cual indica que son dos familias de fracturas independientes entre sí (Figura 5.3).

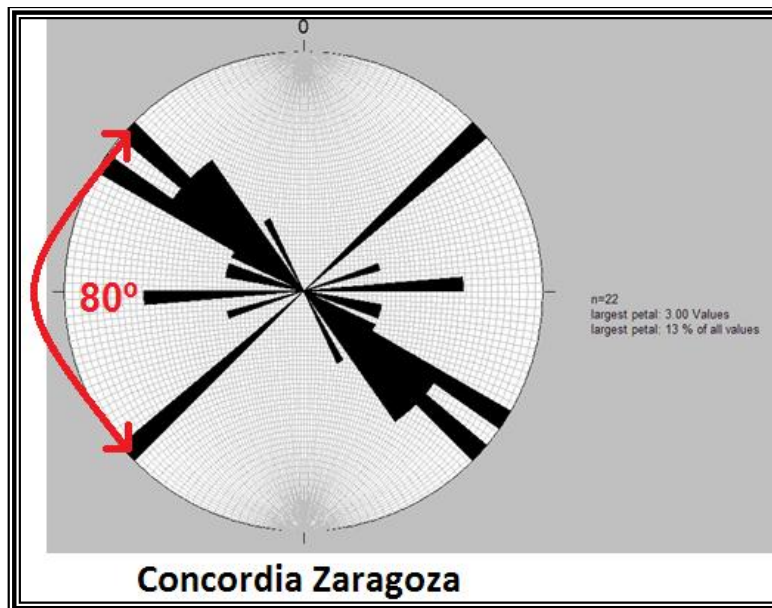


Figura 5.3. Roseta de rumbos de fracturas que muestra dos direcciones de fracturamiento preferenciales, en la unidad Concordia Zaragoza.

Las fracturas en este sitio pueden estar controladas por el fracturamiento por variación del contenido de agua, el cual se produce al cambiar en forma rápida el estado de esfuerzos en las formaciones arcillosas superficiales, debido a la variación del contenido de agua, lo que ocasiona fuerzas de tensión producidas por la evaporación en los suelos arcillosos.

Por otro lado, el sitio número 2 de la misma tabla, presenta fracturas que forman un par conjugado de 55° (Figura 5.4).

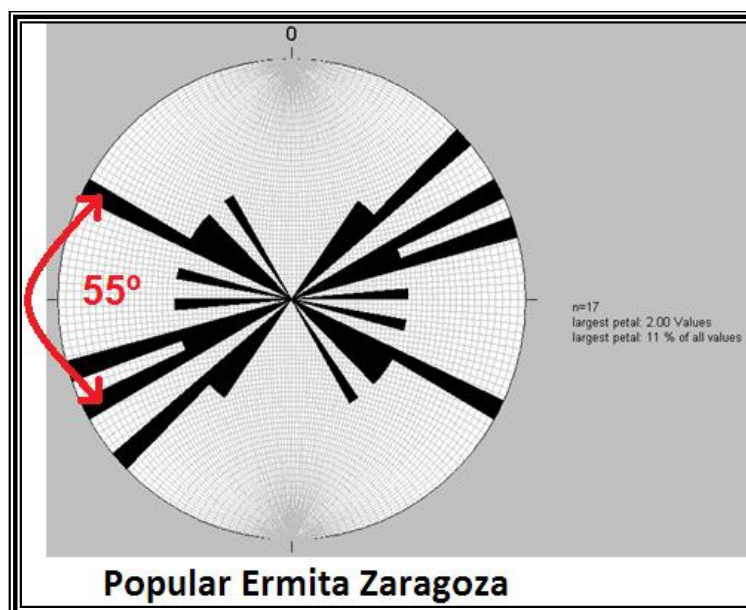


Figura 5.4. Rosetas de rumbos de fracturas que muestran un par conjugado de fracturamiento, en la colonia Popular Ermita Zaragoza.

Dicho fenómeno puede corresponder con fracturamiento asociado al asentamiento diferencial por hundimiento regional, el cual se genera como respuesta a la descompensación en la capacidad de carga de los suelos blandos que se encuentran sobre yaciendo el perímetro de estructuras compuestas de materiales más rígidos, como el Peñón del Marqués, en este caso (Figura 5.5).

Estas fracturas también pudieron generarse por tratarse de lugares donde existe cambio de pendiente con respecto a los suelos o rocas que subyacen y suelos lacustres que se encuentran dentro del área perimetral de los conos de abatimiento generados hacia la superficie (Figura 5.6).

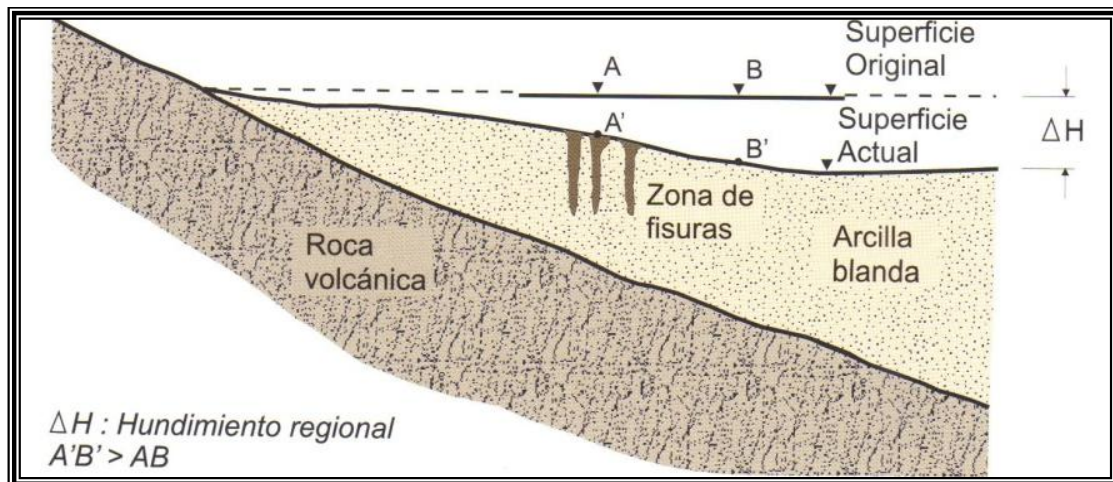


Figura 5.5. Mecanismos de fracturamiento a la orilla del lago (Tomada de Santoyo, 2005).

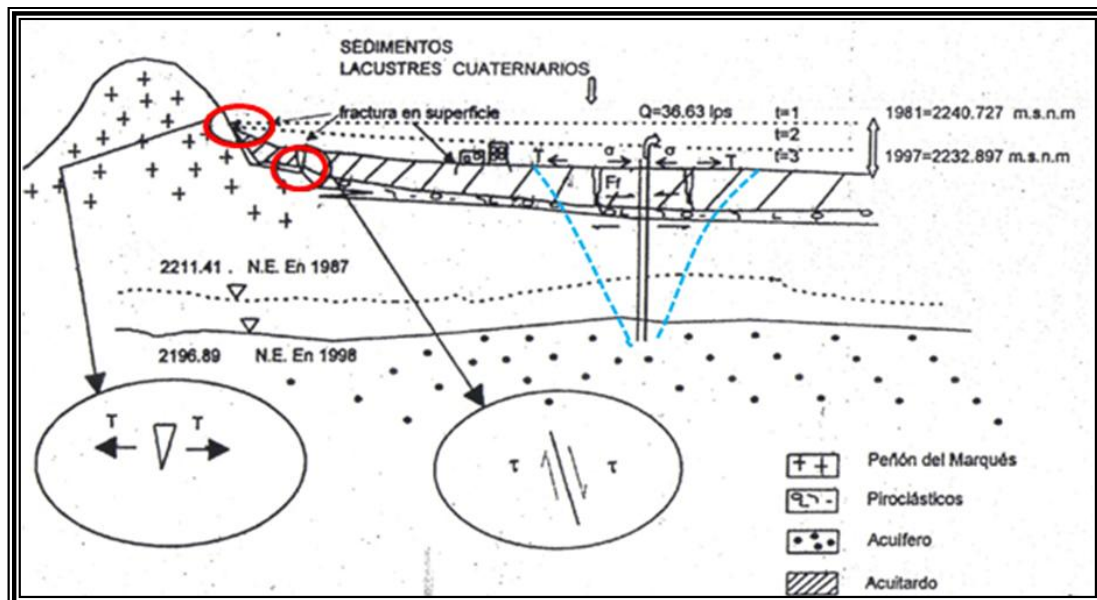


Figura 5.6. Mecanismos de agrietamiento más factibles en la zona oriente de la cuenca de México (Tomada de Cabral C., Lugo H., 2008).

Incluso, el fracturamiento podría verse influenciado por reactivación de fracturas antiguas asociadas a la complejidad estructural del basamento, caracterizado por intensa deformación y presencia de fallas y estructuras de

fosas y pilares que afectan el basamento, las cuales muy probablemente tienen proyección a superficie (Figura 5.7).

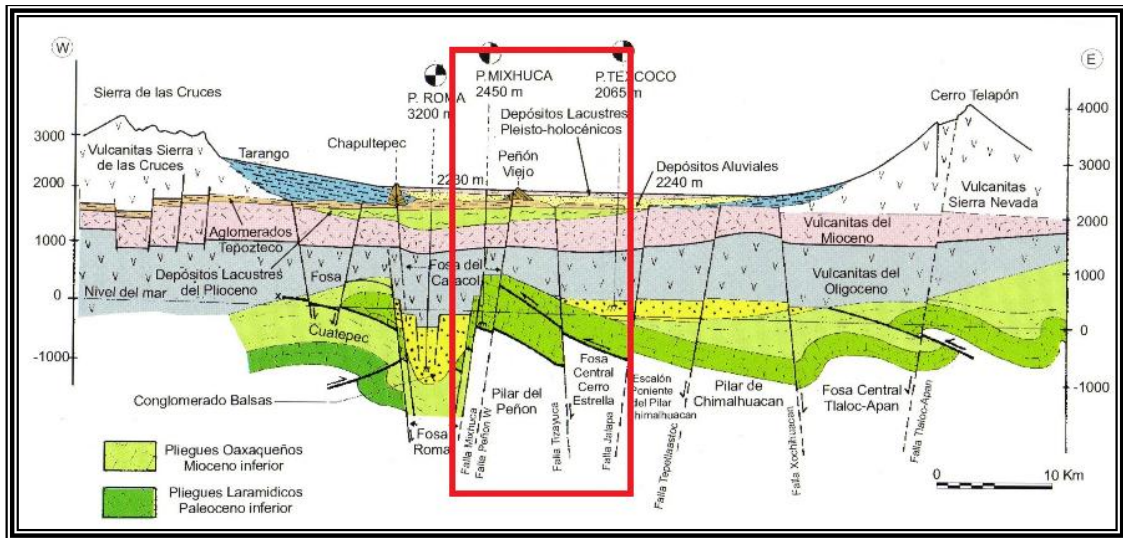


Figura 5.7. Sección geológica de la Cuenca de México, muestra la complejidad del basamento (Tomada de Santoyo, 2005).

Los sitios números 3, 4, 5, 6 y 7 de la Tabla 5.1, presentan una sola dirección de fracturamiento, y pueden asociarse a las fracturas hidrodinámicas (Figuras 5.8, 5.9 y 5.10), que se desarrollan por procesos de filtración y carga hidráulica. El agua llena las fracturas preexistentes y al incrementarse la carga hidráulica en el fondo de la misma se incrementa la presión hacia las paredes lo cual provoca el ensanchamiento de las mismas. Estos agrietamientos se originan como eventos rápidos que ocurren cuando se acumula agua en la superficie y bruscamente se abre una fisura por la cual se filtra súbitamente. Las fallas presentes en el sitio número 4 podrían ser resultado del asentamiento diferencial por hundimiento regional.

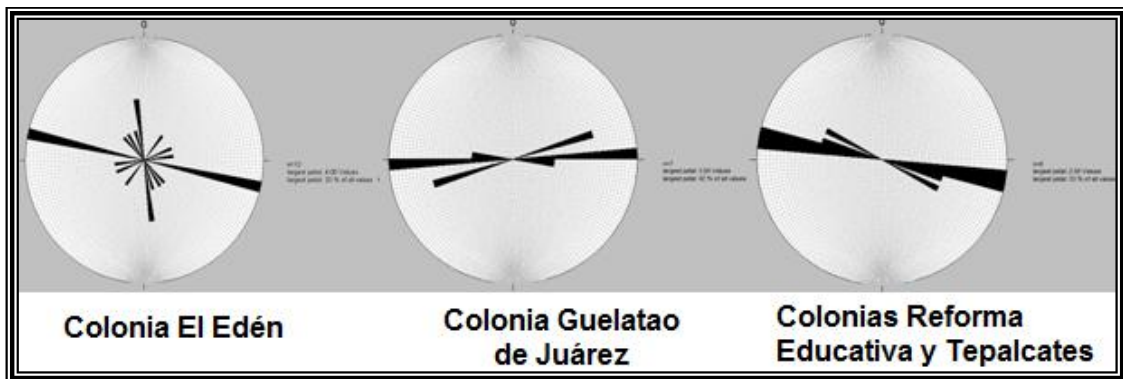


Figura 5.8. Rosetas de rumbos de fracturas que muestran una sola dirección de fracturamiento en cada caso.

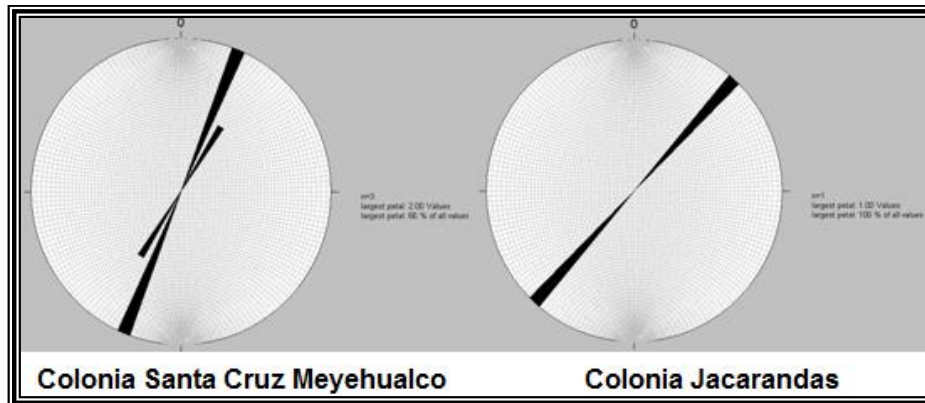


Figura 5.9. Rosetas de rumbos de fracturas que muestran una sola dirección de fracturamiento en cada caso.

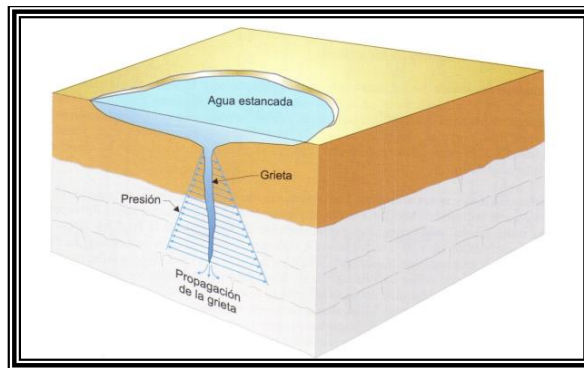


Figura 5.10. Ejemplo de cómo ocurre la propagación de grieta de origen hidrodinámico (Tomada de Santoyo, 2005).

En la Figura 5.11 se muestran las fracturas y fallas recolectadas en las antiguas zonas de lago de la delegación Iztapalapa, en colores amarillo y verde respectivamente. Además, en color rojo, se muestran los pozos de extracción de agua potable que se encuentran a menos de 2 km de los sitios.

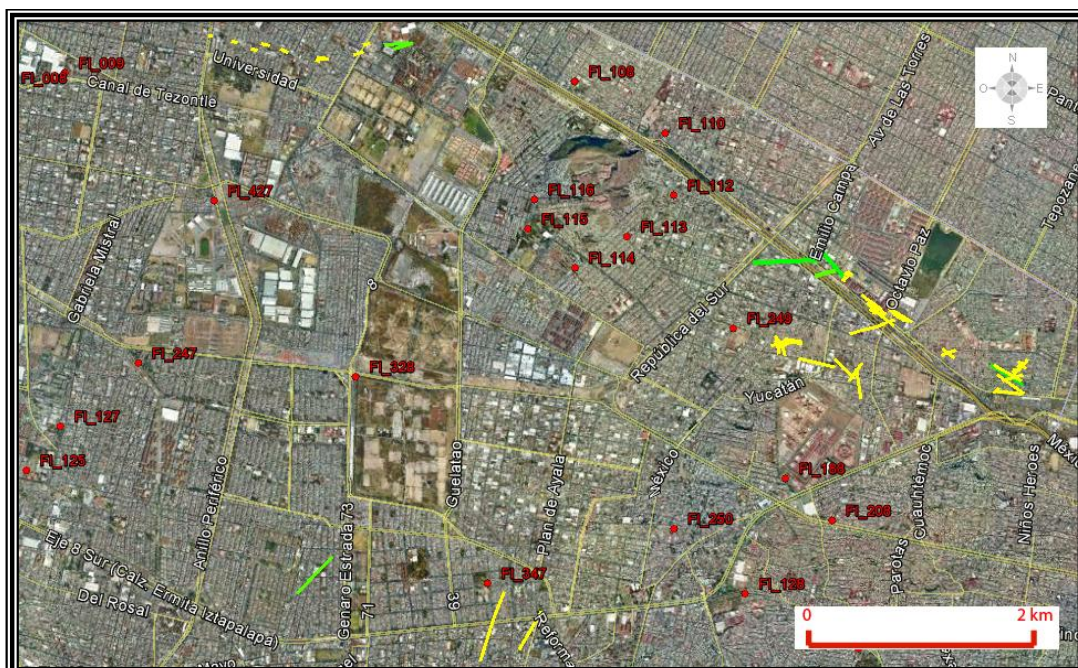


Figura 5.11. Ubicación de las fracturas y las fallas, en líneas amarillas y verdes respectivamente, representadas en una imagen de Google Earth, en la delegación Iztapalapa.

5.1.2. Zona de Transición.

La siguiente colonia donde se tienen abundante fracturamiento se encuentra en la delegación Iztapalapa, dentro de la zona de transición (Tabla 5.2).

Sitio	Nombre (Ubicación)
1	Colonia Lomas de San Lorenzo

Tabla 5.2. Muestra los sitios visitados en la delegación Iztapalapa que corresponden a la zona de transición.

Esta colonia se localiza en la proximidad de la ladera poniente del volcán Yuhualixqui (Figura 5.12), que de acuerdo con la zonificación geotécnica corresponde a la zona II de transición, la cual es de tipo abrupta hacia la ladera y gradual hacia la parte llana.

El volcán Yuhualixqui, está constituido predominantemente por material piroclástico, la pendiente de sus laderas periféricas cambia, en la proximidad al cono las laderas próximas son mayores a los 40° y en la base de estas cambia de 15° descendiendo hasta integrarse a la zona llana o lacustre. A partir de este último cambio de pendiente en el terreno comienza la zona urbana.

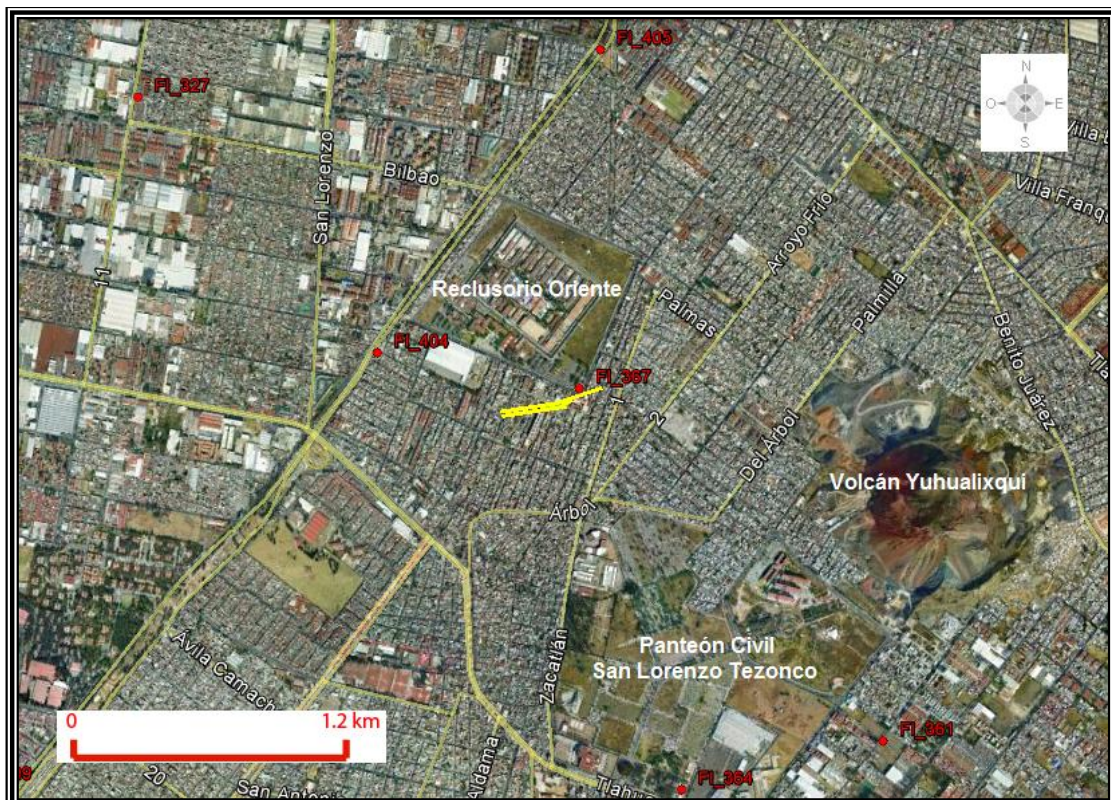


Figura 5.12. Ubicación de las fracturas y las fallas, en líneas de color amarillo y verde respectivamente, y los pozos de extracción de agua en color rojo.

Dicho volcán forma parte de la Sierra de Santa Catarina, la cual durante un cierto tiempo en el pasado constituyó una isla dentro del antiguo lago. Este cono volcánico predominantemente está constituido por materiales piroclásticos como cenizas, lapilli y lavas, los cuales son materiales de alta permeabilidad por lo cual tienen gran capacidad para absorber y conducir el agua a profundidad bajo la planicie lacustre.

Este sitio es uno de los más representativos y problemáticos en cuanto al fenómeno del hundimiento y consecuentemente fracturamiento del suelo y obras civiles; cuenta con el antecedente de dos hundimientos del terreno de grandes dimensiones en la calle Vista Hermosa, los días 7 de junio del 2007 y el día 20 de junio del 2009, de los cuales en el primero se presentó un hundimiento de aproximadamente 300 m³, en el cual fueron alcanzados una persona y un automóvil. El más reciente ocurrió en los predios de la Mz.62 lotes 4 y 5, que sufrieron otro hundimiento de aproximadamente 100 m³, que afectó totalmente un taller industrial y una vivienda.

Después de estos eventos se ha desarrollado sobre la calle Vista Hermosa fracturamiento y fallamiento que afectan la carpeta asfáltica, las guarniciones de las banquetas y las paredes de algunos inmuebles.

La calle Vista Hermosa está trazada en forma paralela a la pendiente y en su trazo conecta varias calles que al igual tienen pendientes descendientes, y sobre las cuales se capta y fluye el agua pluvial que se canaliza desde la Calle Vista Hermosa, hasta Av. las Torres.

Se tiene la presencia de 6 pozos de extracción de agua a una distancia menor de 2 km del sitio en el que se tienen los principales sitios fracturados (Figura 5.12).

Si se considera que las discontinuidades se forman por una combinación de los siguientes factores: a) descenso del nivel freático de los acuíferos circundantes de este sitio; b) cambio de pendiente originada por las diferencias litológicas y por ende mecánicas e hidráulicas de los materiales del subsuelo; c) hundimientos mayores se han detonado con las primeras lluvias intensas de la temporada y probablemente por el escurrimiento de agua pluvial que fluye sobre la calle Vista Hermosa y se filtra al subsuelo en la zona plana en el cruce con la Av. de las Torres, lo cual genera descompensación, arrastre y socavación del subsuelo.

El trazo de las fracturas, por lo observado en campo, coincide con un cambio de pendiente marcado tenuemente a partir de la Av. Reforma en la colindancia con el predio del Reclusorio Oriente al poniente y las colonias El Tesoro (INFONAVIT) y Lomas de San Lorenzo al oriente.

Por otro lado este sitio presenta una dirección de fracturamiento (Figura 5.13), y puede asociarse a las fracturas hidrodinámicas (Figura 5.10), que se desarrollan por procesos de filtración y carga hidráulica. El agua llena las fracturas preexistentes y al incrementarse la carga hidráulica en el fondo de la

grieta se incrementa la presión hacia las paredes lo cual provoca el ensanchamiento de las mismas.

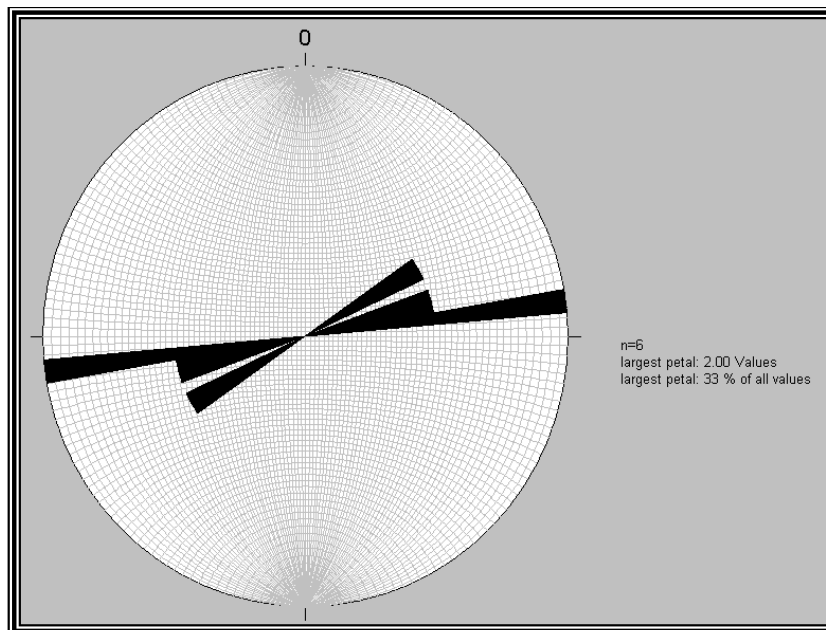


Figura 5.13. Roseta de rumbos de fracturas que muestra una dirección de fracturamiento. Colonia Lomas de San Lorenzo.

5.2. Delegación Gustavo A. Madero.

5.2.1. Zona de Lago.

Los siguientes dos sitios se estudiaron en conjunto ya que se encuentran muy próximos en la delegación Gustavo A. Madero, dentro de la antigua zona de lago (Tabla 5.3).

Sitio	Nombre (Ubicación)
1	Inmediaciones del Bosque de Aragón
2	Inmediaciones del Deportivo Los Galeana

Tabla 5.3. Muestra los sitios visitados en la delegación Gustavo A. Madero que corresponden a la zona de lago.

Estos sitios se localizan aproximadamente a una distancia de entre 1.5 y 3 km al norte del Aeropuerto y del Peñón de los Baños, se encuentran dentro de la Zona Geotécnica de lago (Zona III).

Son sitios ubicados en la planicie lacustre, que corresponde a una superficie originalmente horizontal, resultado de la desecación paulatina del Lago de Texcoco.

El Lago de Texcoco originalmente era colector y regulador natural de las aguas del Valle de México, por lo que su superficie es prácticamente plana y solo

acusa algunas depresiones en la zona de explotación de salmueras (Sosa Texcoco) y en la zona del suroeste donde desemboca el Río Churubusco.

El Lago de Texcoco está situado en el centro de la faja volcánica que atraviesa la República Mexicana, zona que ha estado sujeta a grandes esfuerzos tectónicos y a diferentes eventos volcánicos desde principios del Cenozoico hasta épocas recientes. En el período Cuaternario se inició un ciclo de vulcanismo que aún persiste y que permitió la formación de los volcanes Cerro Gordo, Chimalhuache, Estrella y Chiconautla; posteriormente se formó la Sierra Chichinautzin, entre la Sierras Nevada y de las Cruces. Las circunstancias anteriores permitieron el relleno de la Cuenca con materiales de acarreo y cenizas volcánicas transportadas por aire o por corrientes de agua hacia las partes bajas, formando la planicie del fondo del Lago.

De acuerdo con el estudio geofísico de resistividad realizado en la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco, Estado de México (Lesser y Asociados, S.A de C.V. 1998), las rocas y materiales que constituyen el subsuelo del vaso del Ex lago de Texcoco corresponden a rocas ígneas; dentro del lago se encuentran arcillas lacustres y entre el lago y las elevaciones topográficas depósitos de talud. Bajo las arcillas se encuentra una secuencia de materiales aluviales y margas, tobas y basaltos que se encuentran sobrepuestos a secuencias de anhidritas y sedimentos calcáreos marinos del Mesozoico.

De acuerdo con los cortes litológicos de los pozos pertenecientes al Ramal Texcoco (Pozos 1 y 14), el material predominante dentro del lago está constituido por arcillas en los primeros 40 metros de profundidad, subyace a este material intercalaciones de arenas, tobas y gravas hasta la profundidad de 200 metros.

Se sabe que en la primera mitad del siglo pasado, las manifestaciones hidrotermales que emanaban en las proximidades del Peñón de los Baños eran abundantes, incluso hoy en día existe un lugar en el cual se puede hacer uso de las instalaciones de baños termales, con la salvedad de que el agua que se utiliza se extrae mediante bombeo y no por el efecto de un manantial como ocurría anteriormente. Se puede deducir que estas emanaciones han desaparecido por el descenso del nivel freático y por el alto nivel de fracturamiento que se tiene en el área.

La consolidación diferencial generada por los cambios litológicos produce áreas de tensión y fracturamiento que se manifiestan en las zonas de mayor debilidad y donde el cambio de pendiente en el subsuelo de los materiales incompresibles es más brusco (R. F. Murillo 1978).

Considerando las características geológicas del entorno de los sitios estudiados, se puede considerar que el subsuelo de la zona circundante al Peñón de los Baños ha sufrido una descompensación por la pérdida de volumen de los acuíferos cercanos y se está experimentando una compactación del subsuelo debido a un reajuste de volumen que se marca hacia el centro de las cuencas lacustres, lo cual está generando fuerzas de tensión y ocurre fracturamiento en las zonas de discontinuidad litológica.

Por otro lado, considerando la disposición del fracturamiento, en el caso de las fracturas reconocidas en las inmediaciones del Bosque de Aragón, se observa que se distribuyen claramente en la periferia del lago artificial de dicho bosque; por ello se puede asumir que el fracturamiento se produce por el cambio de materiales, aunado a la gradual desecación del lago.

La Figura 5.15 muestra las rosetas de rumbos obtenidas en estos sitios. La roseta de los datos recolectados en el Bosque de Aragón indica dos direcciones preferenciales de fracturamiento, mientras que la roseta de los datos recolectados afuera del Deportivo Los Galeana indica una sola dirección de fracturamiento.

Las fracturas de estos sitios pueden relacionarse con el fracturamiento por variación del contenido de agua, este fenómeno se produce al cambiar en forma rápida del estado de esfuerzos en las formaciones arcillosas superficiales, debido a la variación del contenido de agua, lo que ocasiona fuerzas de tensión producidas por la evaporación. Lo anterior puede comprobarse fácilmente si se observa la Figura 5.14, la cual muestra una bomba que fue utilizada en el pasado para extracción de agua potable, y que debería estar al nivel del piso, pero por el contrario se encuentra a una altura aproximada de 8 metros. Esto indica que en el suelo del lugar se ha producido compactación y hundimiento, lo que ha generado fracturamiento en superficie.



Figura 5.14. Imagen que muestra un equipo de bombeo a una altura aproximada de 8 metros, y que debería estar a nivel del piso.

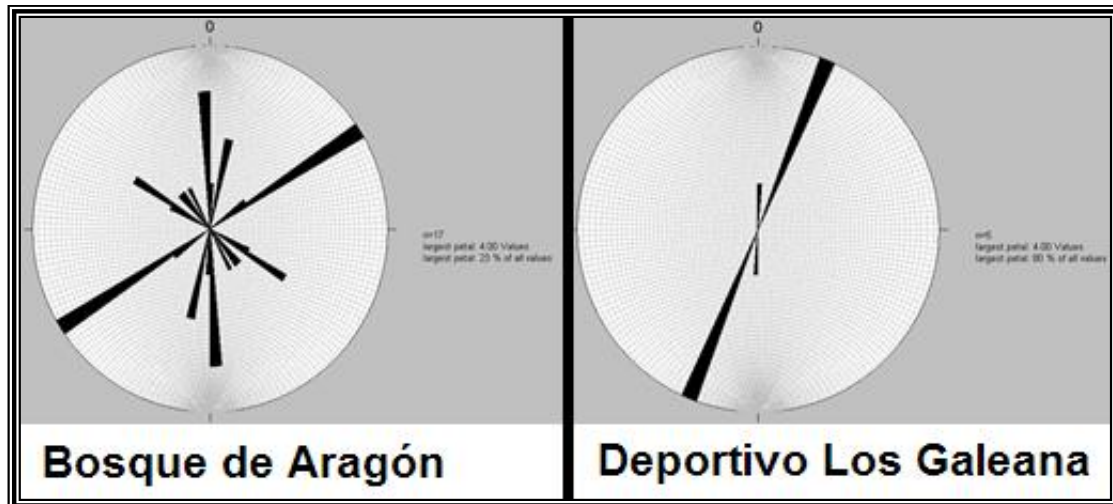


Figura 5.15. Rosetas de rumbos de fracturas, donde se aprecian dos y una direcciones de fracturamiento respectivamente, de los sitios ubicados en el Bosque de Aragón y el Deportivo Los Galeana.

La Figura 5.16 muestra las fracturas y fallas recolectadas en la zona de lago dentro de la delegación Gustavo A. Madero, representadas en una imagen de Google Earth.



Figura 5.16. Ubicación de las fracturas y fallas en color amarillo y verde respectivamente. Los pozos de extracción de agua corresponden con los puntos en color rojo.

5.2.2. Zona de Transición.

Los siguientes tres sitios se estudiaron de forma conjunta por ubicarse en localidades próximas dentro de la delegación Gustavo A. Madero, en la zona de transición (Tabla 5.4).

Sitio	Nombre (Ubicación)
1	Inmediaciones del Instituto Mexicano del Petróleo
2	Colonia Lindavista
3	Inmediaciones del Campus Zacatenco del IPN

Tabla 5.4. Sitios visitados en la delegación Gustavo A. Madero que corresponden a la zona de transición.

Los lugares estudiados se localizan en la proximidad de la ladera oeste y suroeste del Cerro Zacatenco, que de acuerdo con la zonificación geotécnica corresponde a la zona II de transición, la cual es de tipo abrupta hacia la ladera y gradual hacia la parte plana.

Dicho cerro forma parte de la Sierra de Guadalupe, la cual se conforma de un conjunto de elevaciones volcánicas independientes y sobrepuestas, formada a partir del Mioceno (Mooser *et al.*, 1992). Vista en planta, es de forma casi circular, con un diámetro aproximado de 17 km. Los tipos de roca de esta Sierra han sido descritos por algunos autores, y se trata de andesita con alto contenido de sílice (dacita), frecuentemente con feldespato (Ordoñez, 1895).

El estudio de Campa-Uranga (1965) indica que las rocas que constituyen la Sierra de Guadalupe son principalmente andesita, y en cantidades menores, riolita y dacita. Lozano-Barraza (1968) consideran que predominan las andesitas, lo que incluye brechas, pórfidos y vitrófidos. Esta sierra se formó esencialmente por dos tipos de actividad volcánica, una en que los procesos explosivos fueron de gran intensidad y que culminó con procesos extrusivos. El otro tipo fue de derrames de lava esporádicos (procesos efusivos) y de corta duración.

El cerro de Zacatenco es un volcán compuesto, originado por poderosas erupciones explosivas, que culminaron con actividad extrusiva y efusiva (Lugo-Hubp y Salinas-Montes, 1996); está constituido por andesitas y piroclastos.

El límite de la planicie lacustre se localiza entre los 2,240 y 2,250 msnm y de ahí hasta la base de las laderas volcánicas se extiende una planicie inclinada de 1 a 6°, en toda la margen de la sierra (el piedemonte) generalmente hasta los 2,400 msnm; tiene una anchura que varía de algunos cientos de metros a dos kilómetros. La red fluvial está controlada esencialmente por las fracturas de las rocas, fenómeno favorecido por la casi total ausencia de una capa superficial gruesa de material no consolidado (Lugo-Hubp y Salinas-Montes, 1996).

El piedemonte es la superficie de inclinación menor que 8°, constituye la base de la sierra casi en su totalidad y se compone de clastos provenientes de material volcánico; se tienen también algunos derrames de lava y piroclastos. En menor proporción, hay depósitos producidos por agentes. En la parte baja predomina el material lacustre, cuyos espesores son mayores al alejarse de las zonas de topografía elevada.

Desde la época prehispánica, la actividad humana ha influido en la modificación del relieve de esta zona, consecuentemente originó cambios en la Sierra de Guadalupe. El efecto fue la erosión del suelo, la fuerte remoción de material en las laderas, la formación de barrancos y el incremento general de la erosión fluvial. La erosión del suelo ha traído consigo un mayor escurrimiento superficial en un terreno de muy baja permeabilidad, lo que ha incrementado la disección, tanto en valles antiguos, como en la formación de barrancos producidos por los arroyos. Resulta una menor retención del agua de lluvia por la menor vegetación y un mayor escurrimiento hacia la base de la sierra.

Durante el Plioceno, los procesos volcánicos extrusivos fueron los dominantes en la Sierra de Guadalupe (Mooser *et al.*, 1992), de acuerdo con este autor, dichos eventos se produjeron a lo largo de fracturas orientadas al NNE, NW y aproximadamente E-W.

Considerando lo anterior, se presenta una gran heterogeneidad de materiales litológicos, los materiales que forman rocas bien consolidadas se encuentran en la base y los depósitos fluviales y lacustres en la cima de la columna estratigráfica. La conjunción de estos procesos originó problemas de fracturamiento por la diferencia de densidad de los materiales, por la distribución del relleno lacustre y por la paleo topografía sepultada.

Si se consideran las orientaciones de las antiguas fracturas, a lo largo de las cuales existieron procesos volcánicos extrusivos, se puede observar en la Figura 5.17, que el fracturamiento reciente que se aprecia en el pavimento de las calles corresponde con tales direcciones generales (NE, NW y E-W).

Tomando en cuenta que las rocas de la Sierra de Guadalupe presentan baja permeabilidad, se puede decir que la recarga natural de los acuíferos no es adecuada. No obstante, se observan cuando menos 7 pozos de extracción de agua potable ubicados a menos de 2 km de distancia de los sitios afectados.

Se concluye que el fracturamiento y fallamiento en la zona se genera por diferencias litológicas y por ende mecánicas e hidráulicas de los materiales del subsuelo, lo cual genera descompensación del mismo justo en la franja de debilidad, que está representada por el cambio de pendiente donde se tienen materiales de comportamiento plástico que sobreyacen otros más rígidos (Figura 5.5).

Lo anterior se suma al proceso de extracción de agua, que origina reacomodo de los materiales a profundidad, como consecuencia de la disminución de presión de poro. Además, con base en las orientaciones de fracturas antiguas, el fracturamiento actual puede ser producto de la reactivación de dichas fallas

y/o fracturas, que originan un reacomodo de los materiales en superficie, generando fracturamiento y fallamiento en las zonas de mayor debilidad.

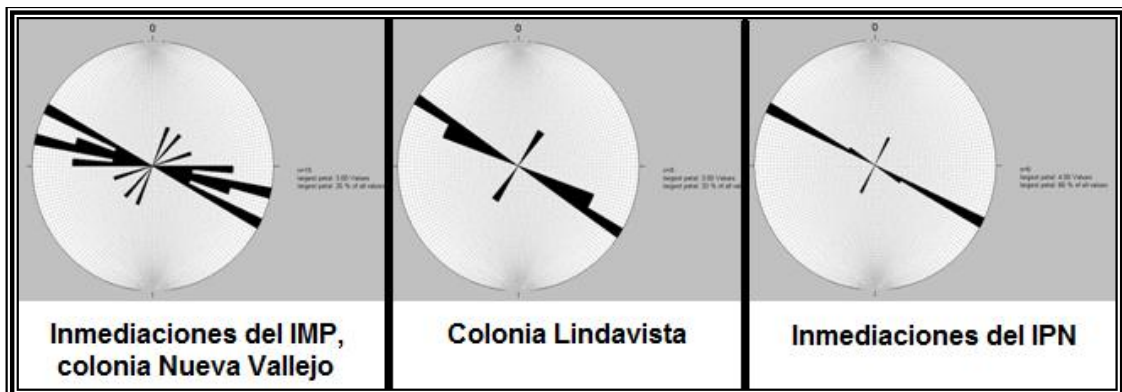


Figura 5.17. Roseta de rumbos de fracturas que muestra una dirección de fracturamiento. Colonia Lomas de San Lorenzo.

La Figura 5.18 muestra las fracturas y fallas, que corresponden con líneas de color amarillo y verde respectivamente, que fueron recolectadas en la zona de lago dentro de la delegación Gustavo A. Madero, representadas en una imagen de Google Earth.



Figura 5.18. Imagen de Google Earth en la que se muestran las direcciones de fracturamiento al oeste y suroeste del Cerro Zacatenco.

5.3. Delegación Coyoacán.

5.3.1. Zona de Transición.

Los siguientes sitios se ubican dentro de la zona de transición en la Delegación Coyoacán (Tabla 5.5).

Sitio	Nombre (Ubicación)
1	Av. Canal de Miramontes esquina con Calzada de La Virgen
2	Colonia Jardines de Coyoacán
3	Av. Canal de Miramontes esquina con Calzada de Las Bombas

Tabla 5.5. Muestra los sitios visitados en la delegación Coyoacán que corresponden a la zona de transición.

Estos sitios se localizan al suroeste del Cerro de la Estrella, que de acuerdo con la zonificación geotécnica corresponde a la zona II, de transición, la cual es de tipo abrupta hacia la ladera y gradual hacia la parte llana. Sin embargo, las mediciones de las fracturas se realizaron en una zona de topografía baja y relativamente plana.

En estos sitios se observaron fracturas que presentan una sola dirección preferencial de fracturamiento (Figura 5.19), las que pueden interpretarse como 2 familias de fracturas independientes entre sí, con orientaciones generales NW-SE y NE-SW respectivamente.

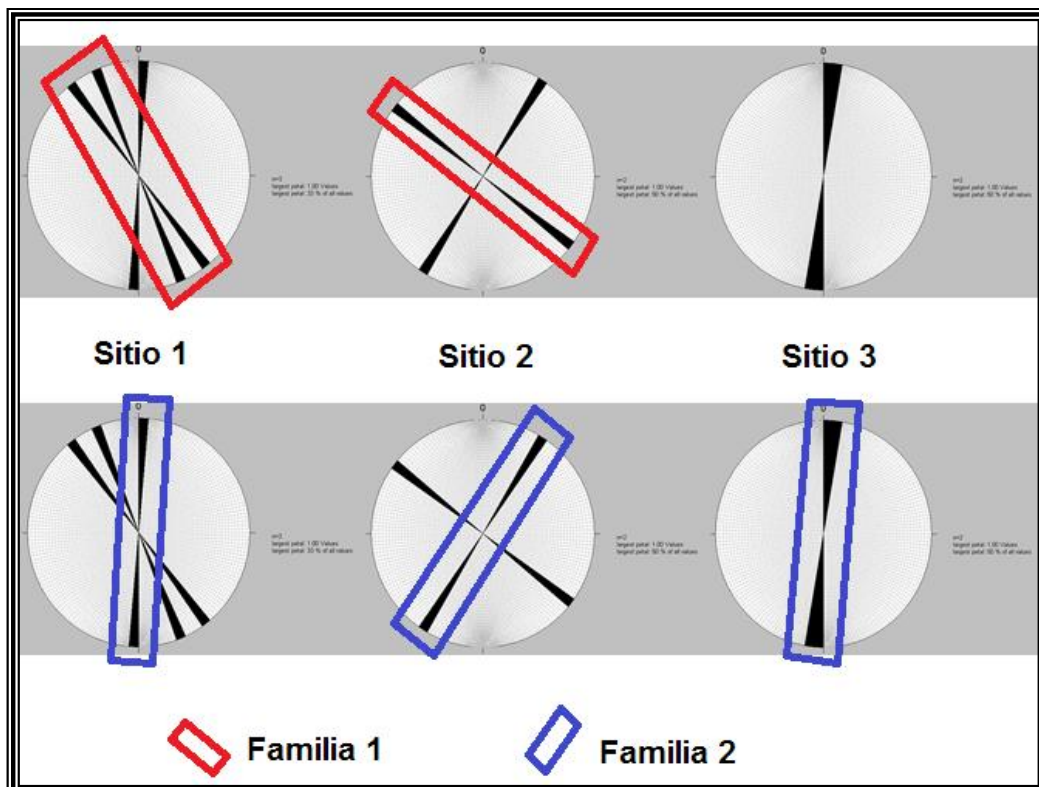


Figura 5.19. Rosetas de rumbos de fracturas que muestran las dos familias presentes en los sitios visitados en la delegación Coyoacán.

En la Figura 5.20 se ubican las fracturas recolectadas en la delegación Coyoacán y los pozos de extracción de agua potable, estos elementos corresponden con líneas de color amarillo y puntos de color rojo respectivamente. Se tienen 21 pozos de extracción de agua potable que se ubican a menos de 2 km de distancia de los sitios visitados. La Avenida Canal de Miramontes es transitada por vehículos de todo tipo, incluidos los transportes de carga pesada y camiones de pasajeros.



Figura 5.20. Imagen de Google Earth en la que se ubican las fracturas estudiadas en la delegación Coyoacán; los puntos en rojo corresponden con pozos de extracción de agua potable.

Las fracturas de estos sitios pueden relacionarse con el fracturamiento por variación del contenido de agua, el cual se produce al cambiar en forma rápida el estado de esfuerzos en las formaciones arcillosas superficiales, debido a la variación del contenido de agua, lo que ocasiona fuerzas de tensión producidas por la evaporación. Por lo observado en los sitios, tomando en cuenta la cantidad de pozos de extracción de agua potable y que además existe una dirección preferencial de fracturamiento, se puede concluir que estas discontinuidades se presentan en el pavimento por la abundante extracción de agua en la zona, lo que ocasiona un cambio en la presión de poro y causa la compactación del suelo, generando que las fracturas se propaguen hasta la superficie.

5.4. Delegación Xochimilco.

5.4.1. Zona de Lago.

Los siguientes sitios se distinguen por encontrarse dentro de la zona de lago en la Delegación Xochimilco (Tabla 5.6).

Sitio	Nombre (Ubicación)
1	Barrio San Marcos, calle Avenida México
2	Unidad Habitacional Rinconada del Sur

Tabla 5.6. Muestra los sitios visitados en la delegación Xochimilco que corresponden a la zona de lago.

Estos sitios se localizan al norte de la Sierra Chichinautzin, y de acuerdo con la zonificación geotécnica se ubican dentro de la zona III, de lago; las mediciones de las fracturas se realizaron en una zona de topografía baja y relativamente plana. No obstante se debe mencionar que dadas la definición y las referencias presentes en el esquema de la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México, publicado por Santoyo V. E. en 2005, dichos sitios se pueden ubicar en la franja límite entre las zonas de lago y de transición ubicadas en el sur de la Ciudad de México.

La Sierra Chichinautzin limita al norte con el valle de México, al sur con el valle de Cuernavaca, al oeste con las sierras de las Cruces y Zempoala y al este con la Sierra Nevada. Adicionalmente, en los extremos este-oeste de dicha sierra se sitúan dos grandes estratovolcanes activos durante el Cuaternario: el Nevado de Toluca (Bloomfield y Valastro, 1974; Cantagrel *et al.*, 1981) y el Popocatepetl (Robin, 1984; Robin y Boudal, 1987; Boudal y Robin, 1988). El primer informe geológico de la Sierra Chichinautzin fue presentado por Humboldt (1849), quien señaló la presencia de una serie de volcanes alineados en una dirección este-oeste entre los 18°59'N y 19°12'N, cuyo origen fue relacionado a una fisura que atravesaría de costa a costa el centro de México.

Márquez *et al.* (1999c) señalaron que el estudio de la tectónica en la Sierra Chichinautzin se dificulta, debido a la actividad volcánica reciente y la abundante vegetación, lo cual complica la identificación de las estructuras geológicas. No obstante, en las zonas aledañas a dicha sierra se encuentran evidencias de la actividad tectónica. Por ejemplo, Johnson y Harrison (1990), con base en el estudio de imágenes de satélite, reportaron la presencia de fallas normales y laterales, con una orientación este-oeste y N60°E, en el límite norte de la misma. Algunas de estas fallas, por ejemplo el sistema Acambay, se consideran sísmicamente activas (Suter *et al.*, 1995). En el límite oeste de la Sierra Chichinautzin, área de Tenango, se identificaron sistemas de fallas normales este-oeste con arreglo en echelón, cuya morfología es similar a la que muestran las fallas Venta de Bravo y Pastores (García *et al.*, 1996). Fries (1960) reportó la presencia de fallas normales en el valle de Cuernavaca, las cuales afectaron depósitos cuaternarios.

Nakamura (1977) propone un modelo en donde los conos volcánicos en una región activa aparecerán alineados de manera perpendicular al esfuerzo mínimo horizontal (σ_3). En la literatura, varios autores han señalado que los conos volcánicos en la Sierra Chichinautzin se encuentran alineados preferencialmente en una orientación este-oeste (Fries, 1966; Bloomfield, 1975; Martín del Pozzo, 1982; Márquez *et al.*, 1997, 1999c), aunque otros mencionan una dirección preferencial N60°E (Demant, 1981; De Cserna *et al.*, 1988; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Este régimen extensional en la zona y el consecuente rompimiento cortical facilitaron indudablemente la erupción por los volcanes monogenéticos.

Los cortes litológicos de los pozos de bombeo con clave FI_224, FI_227, FI_368 (La Noria N-1) y FI_371 (La Noria N-4) muestran que en la zona la capa más superficial está compuesta por arcilla o intercalaciones de arena y grava (Figura 5.21), que sobreyacen sobre roca volcánica más rígida.

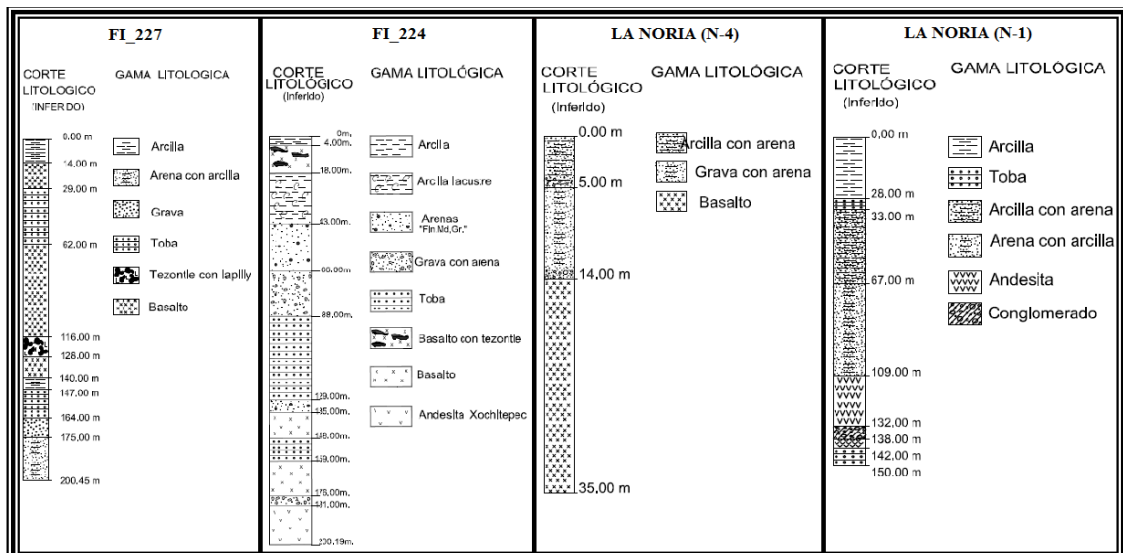


Figura 5.21. Cortes litológicos de los pozos FI_224, FI_227, FI_368 (La Noria N-1), FI_371 (La Noria N-4), muestran que la capa más superficial se compone de arcillas e intercalaciones de arena con arcilla y arena con grava.

La Figura 5.22 es una comparación entre la roseta de rumbos que representa los datos obtenidos en el barrio de San Marcos y la roseta que obtuvieron Márquez *et al.* (1999c). En ambas se aprecian direcciones preferenciales aproximadas de NW-SE 25°. Las líneas rojas ilustran la semejanza en la orientación.

La Figura 5.23 es una comparación entre la roseta de rumbos que representa los datos obtenidos en la U.H. Rinconada del Sur y la roseta que obtuvieron Márquez *et al.* (1999c). La roseta de rumbos obtenida con los datos recolectados en esta colonia presenta dos direcciones preferenciales de fracturamiento, NW-SE 82° y NE-SW 60°. Las líneas rojas ilustran la semejanza en la orientación.

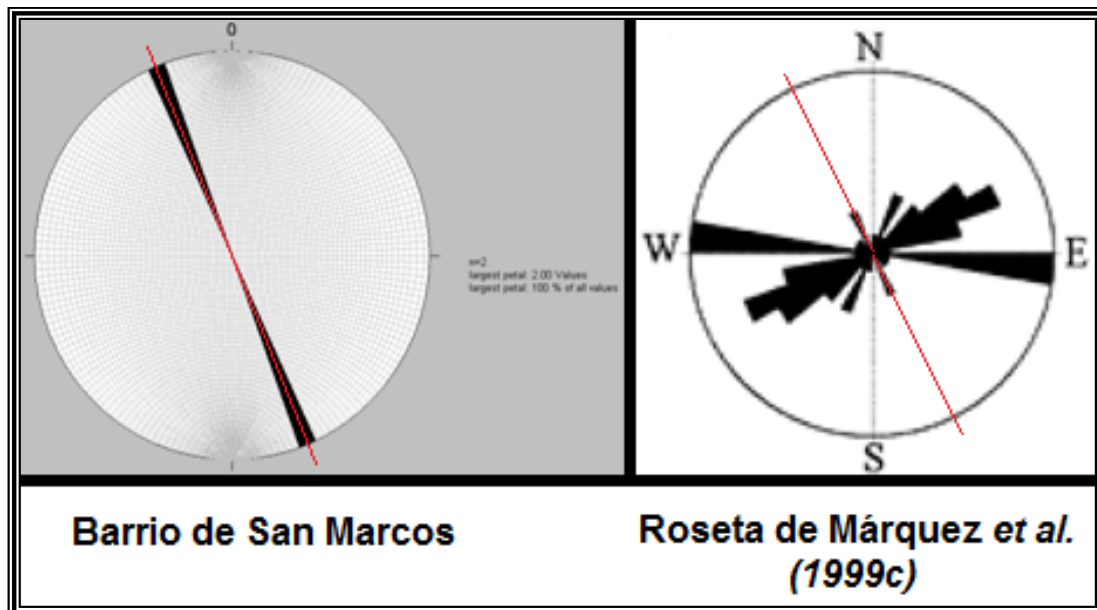


Figura 5.22. Roseta de rumbos de fracturas obtenidas con los datos recolectados en el barrio San Marcos, en Xochimilco.

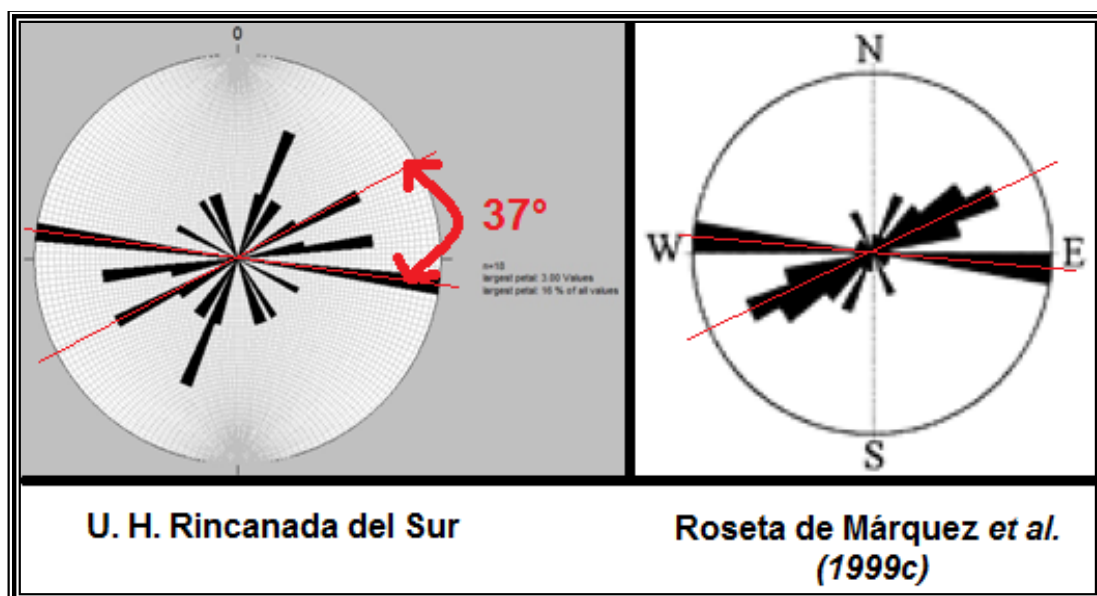


Figura 5.23. Roseta de rumbos de fracturas obtenidas con los datos recolectados en la U. H. Rinconada del Sur.

Dadas las condiciones mencionadas, se puede concluir que el fracturamiento de estos sitios está relacionado con el fracturamiento asociado al asentamiento diferencial por hundimiento regional, el cual se manifiesta en las fronteras de la zona lacustre, las que por lo común siguen trayectorias semejantes de formaciones subterráneas de mayor rigidez que las formaciones arcillosas. Este tipo de fracturas se generan como respuesta a la descompensación en la capacidad de carga de los suelos blandos que se encuentran sobreyaciendo el perímetro de estructuras compuestas de materiales más rígidos (Figura 5.5).

Además, la orientación de las fracturas en superficie podría estar controlada por la reactivación o propagación hacia la superficie de fallas y fracturas

antiguas a través de las cuales se produjo el flujo de material volcánico en el pasado.

En la Figura 5.24 se ubican las fracturas y fallas recolectadas en la delegación Xochimilco, las cuales corresponden con líneas de color amarillo y verde respectivamente.



Figura 5.24. Imagen de Google Earth en la que se ubican las fracturas estudiadas en la delegación Xochimilco.

5.5. Delegación Azcapotzalco.

5.5.1. Zona de Transición.

El siguiente sitio se encuentra dentro de la zona de transición en la Delegación Azcapotzalco (Tabla 5.7).

Sitio	Nombre (Ubicación)
1	Alameda Norte

Tabla 5.7. Muestra el sitio visitado en la delegación Azcapotzalco que corresponde a la zona de transición.

Este sitio se localiza aproximadamente a 6 km al oriente de la Sierra de las Cruces, que de acuerdo con la zonificación geotécnica corresponde a la zona II, de transición, la cual progresivamente es de tipo abrupta hacia la ladera y gradual hacia la parte plana. La alameda Norte se encuentra al oriente del Bloque Centro de dicha Sierra.

La Sierra de Las Cruces está delimitada por las coordenadas 18°59'–19°43' N y 99°00'–99°40'W, y constituye el límite occidental de la Cuenca de México. Tiene una longitud de 110 km y un ancho de 47 km a 27 km en la parte norte y sur respectivamente. Está conformada por ocho estratovolcanes traslapados, que de sur a norte son: Zempoala, La Corona, San Miguel, Salazar, Chimalpa, Iturbide, La Bufa, La Catedral y otros de menor dimensión como el volcán Ajusco. La actividad volcánica de dicha sierra abarca desde el Plioceno Tardío hasta el Pleistoceno (Mooser *et al.*, 1974; Mora-Álvarez *et al.*, 1991; Romero-Terán, 2001; Osete *et al.*, 2000), y se caracteriza por la emisión de derrames de lava, extrusión de domos, emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de detritos y lodo, así como depósitos de avalanchas de escombros (Gunn y Mooser, 1970).

El origen y emplazamiento de la sierra ha sido materia de discusión por diferentes geocientíficos, sin embargo se considera que sus productos se emplazaron a través de sistemas de fallas de dirección N-S (Mooser, 1972; Demant, 1978; Alaniz-Álvarez *et al.*, 1998).

En el Bloque Centro, el drenaje está controlado por la dirección de fracturamiento y fallamiento antiguo. Las direcciones principales observadas en dicho bloque corresponden con N10°E a N20°E y de manera subordinada de N30°E a N40°E, NE-SW, E-W y N40°W (García-Palomo *et al.*, 2008).

Observando los datos de la Tabla 3.19, del Capítulo III del presente trabajo, y la roseta de rumbos obtenida con los datos recolectados en este sitio (Figura 5.25), se aprecia que los rumbos de las fracturas coinciden con las direcciones de fracturamiento antiguo antes mencionadas.

En la figura 5.26 se aprecia que existen tres pozos de extracción de agua potable a una distancia menor de 2 km de la Alameda Norte. Los cortes litológicos obtenidos en dichos pozos (FI_143, FI_234, FI_239) muestran que el subsuelo de la zona está constituido por al menos 300 m de intercalaciones de arcillas lacustres, arena, arena con grava y conglomerados; siendo las arcillas la capa más superficial en todos los casos.

La interacción de los sistemas de fracturamiento provocó levantamientos, hundimientos, escalonamiento y basculamiento de bloques en las secuencias rocosas más antiguas de la Sierra de las Cruces. Si dicho arreglo se extrapola al basamento granular de la Cuenca de México, al menos en su parte oeste, estaría conformado de igual forma por una serie de bloques levantados, hundidos y basculados. Lo anterior trae como consecuencia que el relleno vulcano-sedimentario de la Cuenca de México en esta zona no sea uniforme tanto en distribución, espesor, granulometría y comportamiento mecánico e hidráulico. Si se asume que esto es cierto, las implicaciones para el riesgo geológico serían importantes; en el caso del hundimiento, se tienen problemas de asentamientos diferenciales del terreno, asociados entre otros factores a la diferencia de espesores de los estratos arcillosos; para el caso del agrietamiento, posiblemente exista un control estructural antiguo que origine la presencia de grietas en los bordes de los bloques que conforman el basamento y en las zonas que experimentan compactación del subsuelo causado por la

extracción de agua potable, originándose fracturas en superficie que se orientan de acuerdo al fracturamiento antiguo.

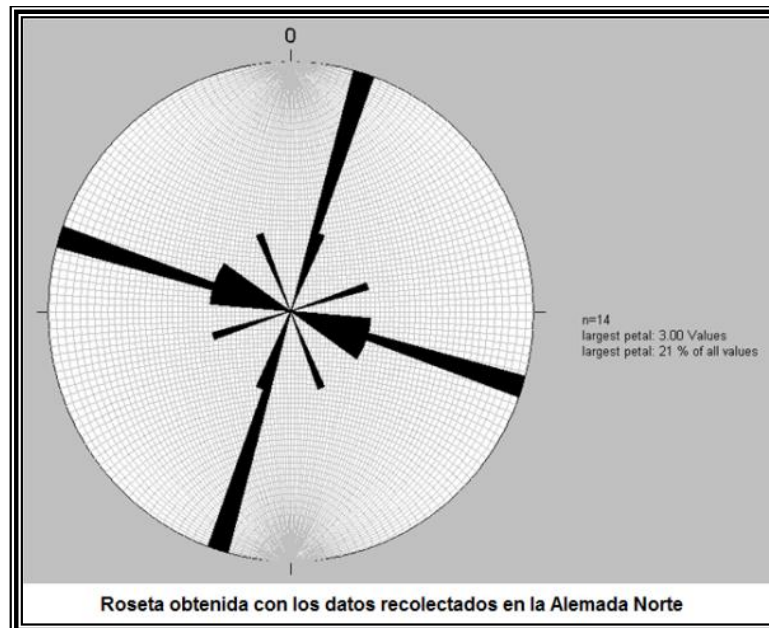


Figura 5.25. Roseta de rumbos de fracturas obtenidas con los datos recolectados en la Alameda Norte, Azcapotzalco.

En la Figura 5.26 se ubican las fracturas recolectadas en la delegación Azcapotzalco, las cuales corresponden con líneas de color amarillo. Los puntos rojos corresponden con pozos de extracción de agua.



Figura 5.26. Imagen de Google Earth con la ubicación de las fracturas estudiadas en la Alameda Norte y los pozos de extracción de agua.

5.6. Delegación Tláhuac.

5.6.1. Zona de Lago.

El siguiente sitio se encuentra dentro de la antigua zona de lago en la Delegación Tláhuac (Tabla 5.8).

Sitio	Nombre (Ubicación)
1	Pueblo San Andrés Mixquic

Tabla 5.8. Muestra el sitio visitado en la delegación Tláhuac que corresponde a la zona de lago.

Este sitio se presenta afectado por hundimiento y fracturamiento del suelo, principalmente en el centro de San Andrés Mixquic, los barrios de San Agustín y Tepantitlamilco. Dichos fenómenos afectan viviendas, la iglesia y el panteón localizados en las calles Medellín, Hidalgo, Plutarco Elías Calles y la avenida Emiliano Zapata.

En este sitio el hundimiento y fracturamiento es particular y un buen ejemplo de un proceso de agrietamiento característico, condicionado por la ubicación del antiguo basamento del islote prehispánico del pueblo de Mixquic, el cual por el proceso de desecación del lago y la expansión urbana ha sido cubierto en la periferia por materiales heterogéneos, condiciones que han generado una zona de transición local entre el basamento y los sedimentos lacustres.

El fracturamiento se localiza limitando al antiguo islote del Lago de Chalco, y por las circunstancias de descenso de los niveles freáticos y consecuente hundimiento regional del suelo lacustre, se está generando el asentamiento diferencial causante de las fuerzas de tensión en el suelo de la zona de transición lo que originó como consecuencia el fracturamiento que se encuentra en donde se tienen los cambios litológicos y de pendiente topográfica.

Para este sitio se puede concluir que el agrietamiento de suelos se está desarrollando en una zona de transición local, en la periferia del antiguo basamento que constituía el islote del pueblo de Mixquic y se están detonando por la subsidencia regional en la subcuenca del Lago de Chalco.

Para el caso de la fractura que se extiende a lo largo de la avenida Emiliano Zapata, se interpreta que se generó debido al desecamiento que existe en el canal que se encuentra paralelo a dicha calle.

La Figura 5.27 muestra la roseta de rumbos obtenida con los datos recolectados en el pueblo San Andrés Mixquic. Se observa que presenta una dirección preferencial de fracturamiento NE–SW 50° y de manera subordinada NW–SE 78°, que forman entre ellas un ángulo de 52°.

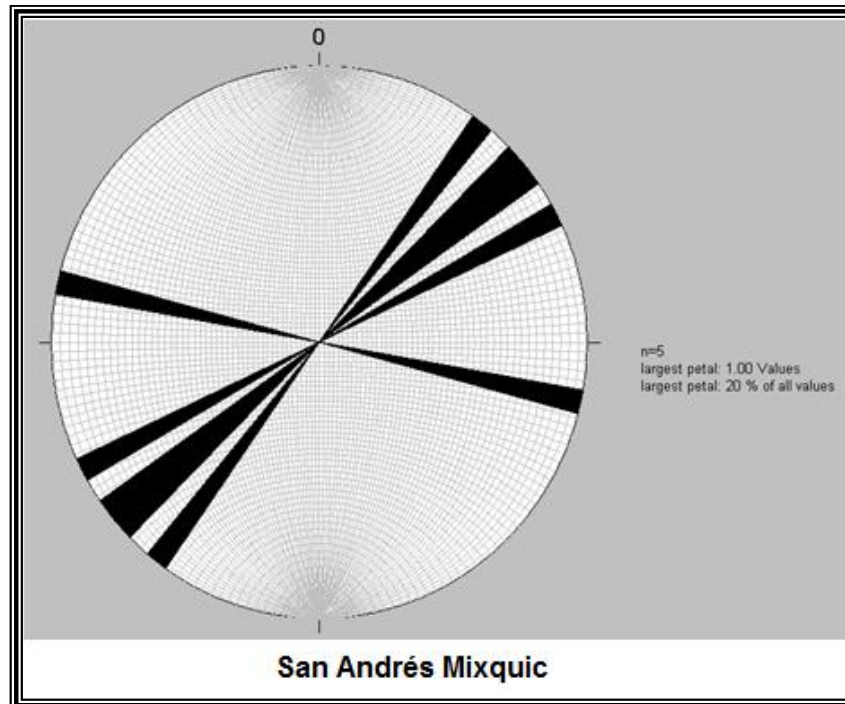


Figura 5.27. Roseta de rumbos de fracturas obtenidas con los datos recolectados en San Andrés Mixquic.

En la Figura 5.28 se ubican las fracturas y fallas recolectadas en la delegación Tláhuac, las cuales corresponden con líneas de color amarillo y verde respectivamente.



Figura 5.28. Imagen de Google Earth en donde se aprecian las fracturas y fallas recolectadas en Mixquic, las que se indican con líneas de color amarillo y verde respectivamente.

5.7. Delegación Álvaro Obregón.

5.7.1. Zona de Lomas.

El sitio siguiente se encuentra dentro de la zona de lomas en la Delegación Álvaro Obregón (Tabla 5.9).

Sitio	Nombre (Ubicación)
1	Colonia Barrio Norte, calle Despertador Americano

Tabla 5.9. Muestra el sitio visitado en la delegación Álvaro Obregón que corresponde a la zona de lomas.

Este sitio se ubica al oriente de la Sierra de las Cruces por lo que de acuerdo con la zonificación geotécnica corresponde a la zona I (de Lomas), la cual es de tipo abrupta.

Se trata de una zona con barrancas generadas por el patrón de drenaje de la Sierra de la cruces y por antiguos bloques sepultados a profundidad. En la parte alta de las barrancas se ha realizado construcción de casas habitación en el límite de un talud casi vertical de decenas de metros. Por otro lado, en esta zona se ha reportado la existencia de antiguas minas de arena que han sido rellenadas parcialmente con materiales heterogéneos.

Por las características del relieve (Figura 5.19) y lo mencionado anteriormente se concluye que esta discontinuidad es ocasionada por un sistema de fracturas subparalelas que afectan a las secuencias aflorantes, además de la inestabilidad que existe en el talud de la zona de barrancas. Además en esta zona, existe la presencia de las antiguas minas de arena, lo que incrementa el nivel de riesgo a la comunidad.

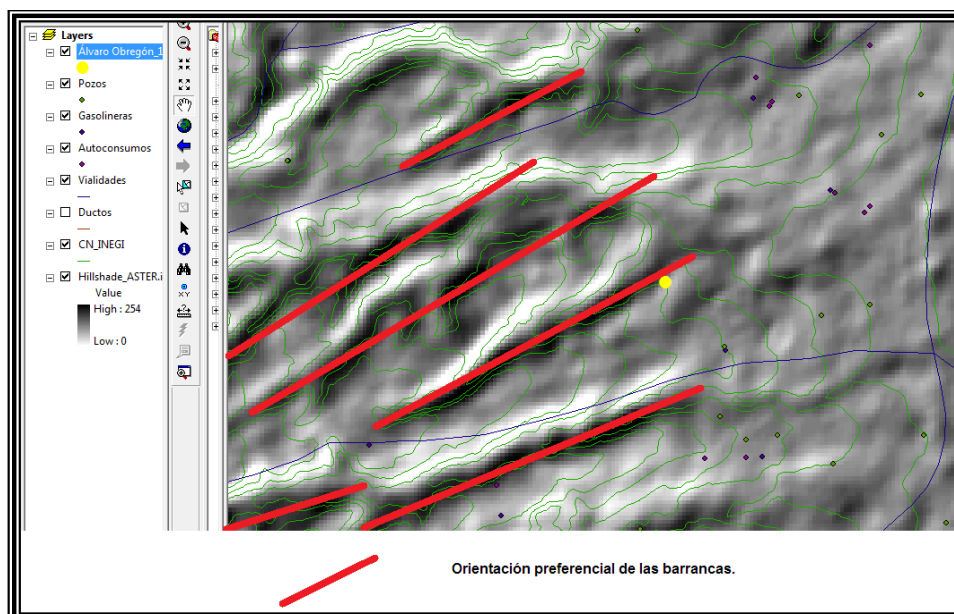


Figura 5.29. Imagen que muestra las partes altas y bajas, y la orientación de las barrancas, en la zona en que se recolectó el dato estructural.

Agrupando los sitios visitados en tres grandes divisiones consideradas por la distribución y concentración de los elementos estructurales dentro del Distrito Federal, se clasifican como sigue:

1. Zona Norte.

Agrupando a todos los elementos que se encuentran dentro de las delegaciones Azcapotzalco y Gustavo A. Madero se tiene una amplia zona afectada por fracturamiento (Figura 5.30). Los sitios visitados dentro de estas delegaciones son: a) Alamenda Norte en Azcapotzalco; a) Colonia Lindavista, b) Inmediaciones del Bosque de San Juan de Aragón, c) Inmediaciones del Deportivo Los Galeana, d) Inmediaciones del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y e) Inmediaciones del Instituto Politécnico Nacional (IPN) Campus Zacatenco, dentro de la delegación Gustavo A. Madero.



Figura 5.30. Imagen que muestra la totalidad de los datos estructurales recolectados en la Zona Norte. Las líneas en color amarillo y verde corresponden con fracturas y con fallas respectivamente.

La Figura 5.31 muestra la roseta de rumbos obtenida con la totalidad de datos recolectados dentro de la Zona Norte. Se observa una dirección preferencial de fracturamiento que corresponde con NW – SE 63° , y una dirección subordinada que corresponde con NE – SW 23° , que forman entre ellas un ángulo de 94° .

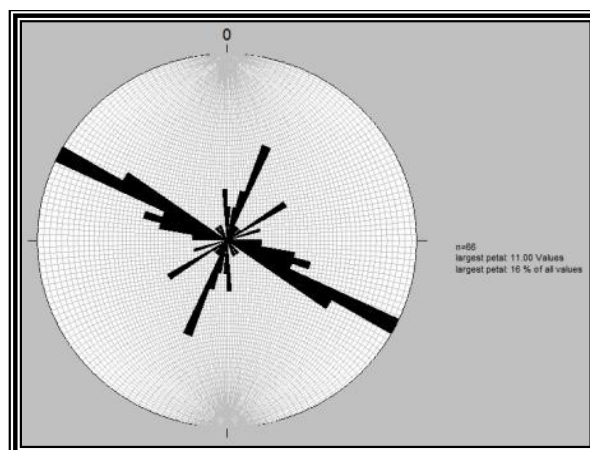


Figura 5.31. Roseta de rumbos de fracturas obtenidas con los datos recolectados en la Zona Norte.

2. Zona Centro Oriente.

En la Figura 5.32 se indica la ubicación de los sitios afectados por fracturamiento en la delegación Iztapalapa. Los sitios donde se tomaron datos dentro de esta son: a) Colonia El Edén, b) Colonia Guelatao de Juárez, c) Colonia Jacarandas, d) Colonia Lomas de San Lorenzo, e) Colonia Popular Ermita – Zaragoza, f) Colonias Reforma Educativa y Tepalcates, g) Colonia Santa Cruz Meyehualco y h) Unidad Concordia Zaragoza.



Figura 5.32. Imagen que muestra la totalidad de los datos estructurales recolectados en la Zona Centro Oriente. Las líneas en color amarillo y verde corresponden con fracturas y con fallas respectivamente.

La Figura 5.33 muestra la roseta de rumbos obtenida con la totalidad de datos recolectados dentro de la Zona Centro Oriente. Se observan cuatro direcciones preferenciales de fracturamiento, donde los dos extremos corresponden con NW – SE 77° , y NE – SW 47° , los que forman entre ellas un ángulo de 56° .

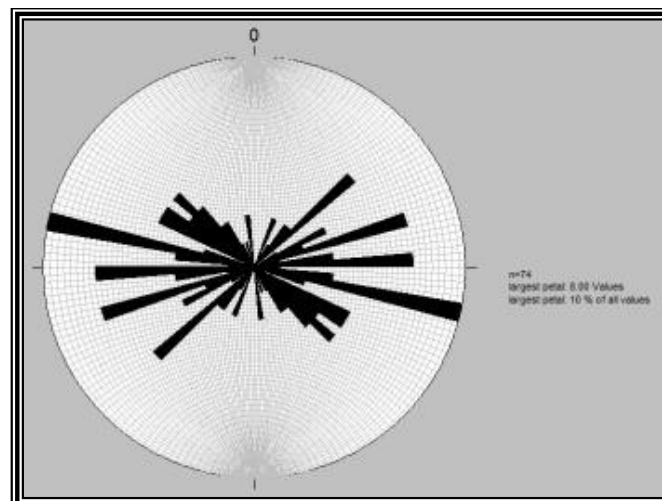


Figura 5.33. Roseta de rumbos de fracturas obtenidas con los datos recolectados en la Zona Centro Oriente.

3. Zona Sur.

Dentro de esta zona se agrupan todos los elementos que se encuentran dentro de las delegaciones Coyoacán, Tláhuac y Xochimilco (Figura 5.34). Los sitios donde se tomó información dentro de estas delegaciones son: a) Colonia Avante, b) Colonia Jardines de Coyoacán y c) Colonia Los Girasoles, en la delegación Coyoacán; a) Pueblo San Andrés Mixquic en la delegación Tláhuac; a) Barrio San Marcos y b) Unidad Habitacional Rinconada del Sur, en la delegación Xochimilco.



Figura 5.34. Imagen que muestra la totalidad de los datos estructurales recolectados en la Zona Sur. Las líneas en color amarillo y verde corresponden con fracturas y con fallas respectivamente.

La Figura 5.35 muestra la roseta de rumbos obtenida con la totalidad de datos recolectados dentro de la Zona Centro Oriente. Se observan tres direcciones preferenciales de fracturamiento que corresponden con NW – SE 25°, NE – SW 36° y NW – SE 84°, los extremos forman entre ellas un ángulo de 60°.

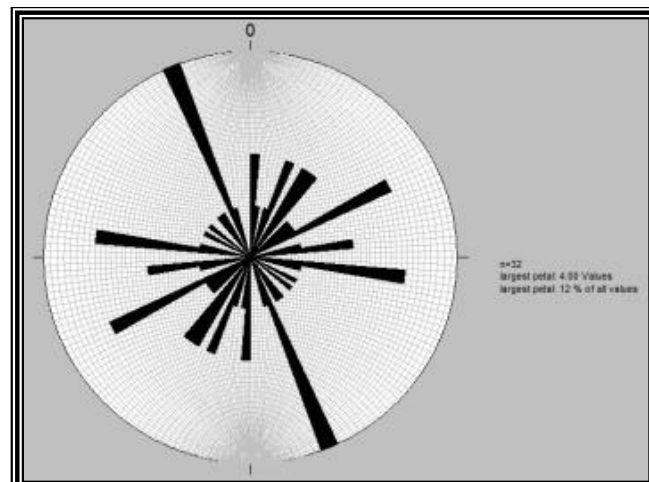


Figura 5.35. Roseta de rumbos de fracturas obtenidas con los datos recolectados en la Zona Sur.

VI. ÁREAS VULNERABLES A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.

En este capítulo se describen las características que originan vulnerabilidad en los sitios afectados por el fracturamiento y fallamiento en el Distrito Federal. La descripción se realiza agrupando los sitios dentro de dos grandes divisiones a considerar:

1. Vulnerabilidad por daños estructurales a:

- Construcciones (Viviendas, escuelas, edificios).
- Pavimento.
- Baquetas y guarniciones.

2. Vulnerabilidad por contaminación de agua potable y/o suelos, causada por:

- Hidrocarburos.
- Aguas residuales.

6.1. Concepto de Vulnerabilidad.

Se define como la propensión de un grupo de personas, sistemas ecológicos u otros receptores de sufrir daño debido a perturbaciones o agentes productores de estrés; involucra la sensibilidad a la exposición y medidas adaptativas para anticipar o reducir daños futuros.

6.2. Vulnerabilidad por daños estructurales.

Los sitios que presentan vulnerabilidad por daños estructurales, son numerosos y se describen a continuación:

6.2.1. Delegación Iztapalapa.

- Unidad Concordia Zaragoza.

En la Unidad Concordia Zaragoza los daños más graves se observaron en los edificios que constituyen la Unidad Habitacional, así como en el piso de concreto y adoquín afectados por las fracturas. Los edificios presentan inclinación evidente con respecto a la vertical original por lo que se realizan obras de nivelación de los mismos (Figura 6.1).

Por otro lado, al observar de cerca las excavaciones realizadas para efectuar la nivelación, se apreció acumulación de agua en el subsuelo, originada según reporte de los habitantes, por la ruptura de las tuberías de suministro de agua potable y por la infiltración de agua de lluvia a través de las fracturas en el piso de la unidad. Este proceso de infiltración origina socavamiento del suelo, lo que a su vez afecta a la estabilidad de las estructuras en superficie.



Figura 6.1. a) Ejemplo de los daños estructurales en la Unidad Concordia Zaragoza, b) aun con la nivelación es un sitio vulnerable.

Este lugar es vulnerable debido a las afectaciones estructurales que constantemente sufren los edificios como consecuencia de la presencia de fracturas, lo que ocasiona deterioro prematuro a las viviendas y constituye riesgo para las personas que en ellos habitan. Así mismo, al presentar fracturas en el piso del lugar, existe riesgo de infiltración de contaminantes al suelo y el agua subterránea.

Adicionalmente, 3 datos que se recolectaron a 300 metros al NW de dicha unidad habitacional, corresponden con fracturas que han ocasionado daños en el pavimento de la calle Cedros y de la Calzada Ignacio Zaragoza, que la convierten en una zona vulnerable. El pavimento afectado pierde su horizontalidad y forma irregularidades en el terreno, que generan desniveles de hasta 50 cm. En este caso, también las paredes de las casas sufren afectaciones. Las fallas y fracturas cruzan dichas calles de manera oblicua, lo que afecta al sistema de drenaje ocasionando fugas de agua. Lo descrito anteriormente constituye riesgo para los automovilistas que circulan por las calles antes mencionadas, de la misma forma existe riesgo por el socavamiento que produce la infiltración de agua a través de las fallas y fracturas, así como infiltración de contaminantes que pueden llegar al suelo y agua subterránea.

- Colonia Popular Ermita Zaragoza.

En esta colonia los daños más graves se observaron en el pavimento de las calles que están afectadas por la presencia de fracturas y/o fallas, que se extienden y dañan las paredes y la estructura de las casas habitación (Figura 6.2). Las fallas y fracturas cruzan dichas de calles de manera oblicua, lo que afecta al sistema de drenaje ocasionando fugas de agua, según reporte de los vecinos.

El dato número once de la Tabla 3.2, que corresponde con una falla normal, ocasiona daños en el pavimento de la calle José Pagola; genera un desnivel en el terreno de 23 cm, lo que genera riesgo para los automovilistas que circulan por dicha calle. Los daños son mitigados mediante el relleno y la repavimentación frecuentes, a pesar de ello se generan fracturas paralelas que paulatinamente dejan al descubierto la fractura principal mayor.

También existe riesgo por el socavamiento que produce la infiltración de agua a través de las fallas y fracturas, así como infiltración de contaminantes que pueden llegar al suelo y al agua subterránea.



Figura 6.2. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Popular Ermita Zaragoza.

- Colonia El Edén.

En este sitio los daños más graves se observaron en el pavimento de las calles recorridas, en las paredes de las casas habitación y en las banquetas, lo que afecta la estabilidad estructural de las viviendas y se convierte en un riesgo para las personas. Las fallas y fracturas cruzan las calles oblicuamente, lo que afecta al sistema de drenaje ocasionando fugas de agua (Figura 6.3).



Figura 6.3. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia El Edén.

○ Colonia Lomas de San Lorenzo.

El sitio más vulnerable es un salón de fiestas ubicado en la calle Vista Hermosa (Figura 6.4). Afuera de esta construcción ocurrieron dos hundimientos, uno en el año 2007 que ocasionó la muerte de una persona y una fractura de 15 m de longitud y 8 m de profundidad, con abertura de 5 m; y el segundo en 2009. Después de estos eventos se ha desarrollado sobre la calle Vista Hermosa fracturamiento y fallamiento observados en la carpeta asfáltica, guarniciones de las banquetas y en las paredes de algunos inmuebles, lo que ocasiona inestabilidad estructural.

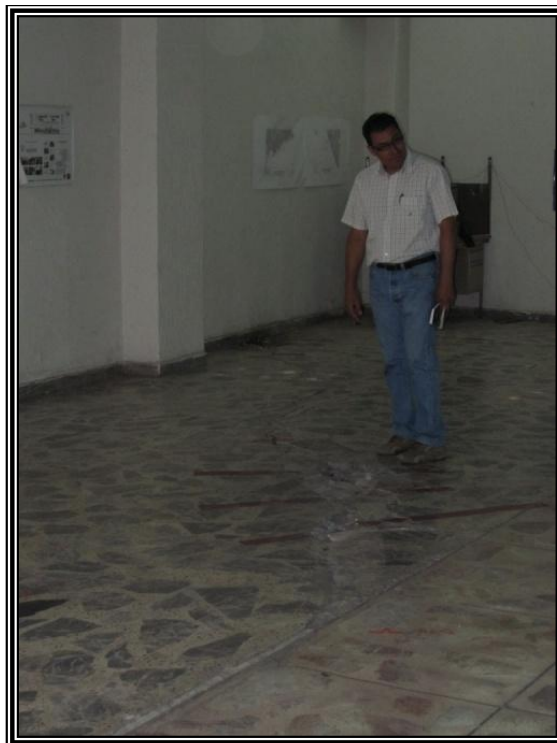


Figura 6.4. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Lomas de San Lorenzo.

- Colonia Guelatao de Juárez.

En esta colonia se observan daños estructurales en el pavimento de la calle Emilio Contel, el cual presenta dos desniveles ocasionados por fallas normales (Figura 6.5). Dichos elementos se extienden al interior del Hospital Regional ISSSTE “Ignacio Zaragoza”, y al interior de un predio en el que se observan autobuses de transporte de pasajeros. También se observan fracturas sobre el pavimento de la Av. Telecomunicaciones y la calle General Antonio de Loyola.

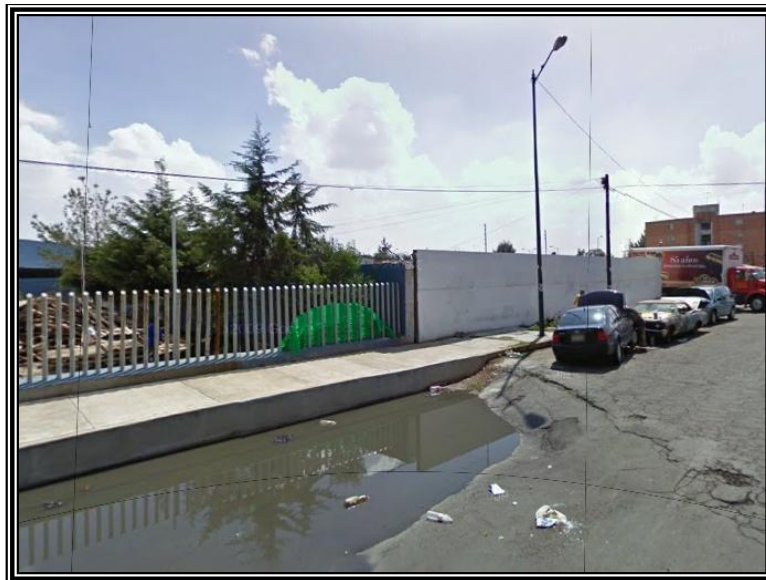


Figura 6.5. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Guelatao de Juárez.

- Colonias Reforma Educativa y Tepalcates.

Los daños estructurales observados en esta colonia corresponden con fracturas en el pavimento de las calles afectadas y en algunas paredes de las construcciones que se encuentran en la dirección del fracturamiento (Figura 6.6).



Figura 6.6. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Reforma Educativa.

- Colonia Santa Cruz Meyehualco.

En esta colonia se observan daños estructurales en el pavimento de las calles 5 y 7, así como en las paredes de las casas afectadas (Figura 6.7). Las discontinuidades también ocasionan daños en la Calzada Ermita-Iztapalapa, lo que representa riesgo para los automóviles que circulan en ella.



Figura 6.7. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Santa Cruz Meyehualco.

- Colonia Jacarandas.

En esta colonia la vulnerabilidad se presenta porque existe una falla de tipo normal, la cual ocasiona daños en el pavimento de las calles Leandro Valle e Ing. González Camarena (Figura 6.8). Ocasiona daños en el pavimento, desnivel en el terreno y daños a la red del drenaje presente en dichas calles. También presentan fracturas las paredes de la Escuela Primaria “República de Madagascar”, ocasionadas por dicha falla.



Figura 6.8. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Jacarandas.

6.2.2. Delegación Gustavo A. Madero.

- Bosque de Aragón.

Los daños se presentan en el pavimento de las calzadas en el interior del Bosque de Aragón, y en el pavimento de la Av. José Loreto Fabela. En la Av. José Loreto Fabela hay una falla de tipo normal en el carril de baja velocidad, lo que la convierte en una zona vulnerable y constituye riesgo para los automóviles que circulan en dicha avenida (Figura 6.9).



Figura 6.9. Ejemplo de los daños estructurales en la calle José Loreto Fabela, inmediaciones del Bosque de Aragón.

- Colonia Lindavista.

En este sitio se observan daños estructurales en el pavimento de las calles recorridas, así como en las bardas de algunas casas afectadas. El sitio más vulnerable se localiza sobre la calle Colector 13, en la cual se aprecian fracturas que ocasionan serios daños al pavimento de dicha calle. Las discontinuidades se localizan a las afueras de una plaza comercial (Figura 6.10).



Figura 6.10. Ejemplo de los daños estructurales en la calle Colector 13, colonia Lindavista.

- Colonia Ampliación Casas Alemán. Deportivo Los Galeana.

Se observan daños estructurales en el pavimento de la Av. José Loreto Fabela, desde su cruce con Av. Francisco Morazán y hasta el cruce con la Av. 416 (Figura 6.11).



Figura 6.11. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Ampliación Casas Alemán.

- Inmediaciones del Campus Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

Los daños estructurales se observan en el pavimento de las calles recorridas (Figura 6.12). De las seis discontinuidades observadas, dos presentan orientación preferencial oblicua al sentido de la calle en que se recolectaron, lo que puede ocasionar deterioro en la red de drenaje de agua potable y aguas residuales.



Figura 6.12. Ejemplo de los daños estructurales en la calle Wilfrido Massieu, en las inmediaciones del IPN.

- Inmediaciones del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), colonia Nueva Vallejo.

En esta colonia se observan daños estructurales en el pavimento de las calles recorridas y en las banquetas, además de irregularidades en la superficie del terreno. A lo largo de las banquetas ubicadas al norte y sur del I.M.P., se observan daños severos ocasionados por fallas de tipo normal, cuyo echado se inclina al SW en ambos casos (Figura 6.13). Incluso se observaron fracturas en el pavimento de un estacionamiento y en las bardas que delimitan las instalaciones de dicha institución.

En el interior de un estacionamiento que se ubica a un costado de la estación Instituto del Petróleo de la línea 5 del STC Metro, se observó daño estructural en el pavimento, ocasionado por tres facturas y una falla de tipo normal cuyo echado se inclina al SE. Si dichos elementos tienen continuidad podrían ocasionar daños y deterioro prematuro a las vías de dicha estación del metro.

Las irregularidades en el terreno son ocasionadas por fracturas que cruzan de manera oblicua el Eje Central Lázaro Cárdenas en el cruce con la calle Ricarte, lo que constituye riesgo para los automóviles que circulan en dicha calle.

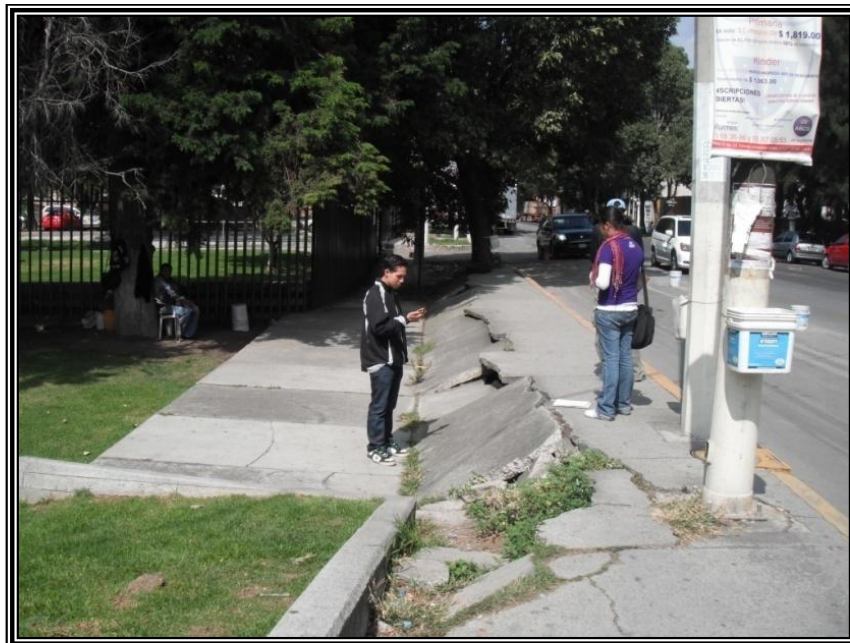


Figura 6.13. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Nueva Vallejo, a un costado del edificio del IMP.

6.2.3. Delegación Coyoacán.

- Colonia Avante.

Los daños estructurales en este sitio son visibles en el pavimento de la avenida Canal de Miramontes, y se extienden a lo largo de la misma por aproximadamente 470 metros, por lo que constantemente se realizan trabajos

de pavimentación (Figura 6.14). Esta avenida es transitada por vehículos de todos tipos, desde autos particulares y transporte de pasajeros, hasta camiones de carga pesada, lo que origina daños mayores.

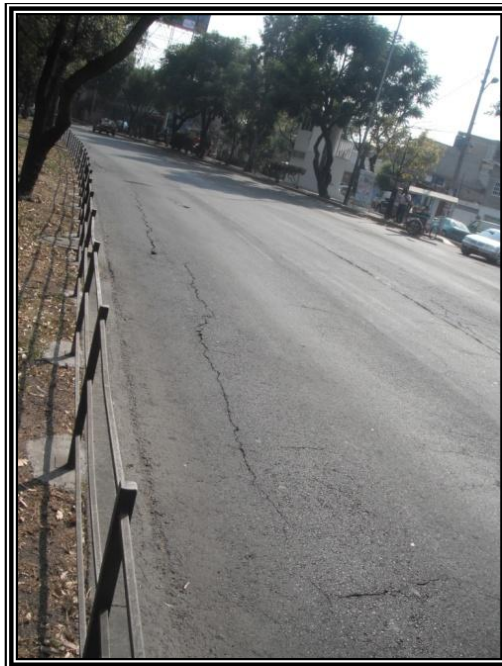


Figura 6.14. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Avante.

- Colonia Jardines de Coyoacán.

Las mayores afectaciones estructurales son visibles en el pavimento de las calles Avenida de Tzinnias y Avenida de las Dalias, ocasionados por fracturas que se extienden a lo largo de dichas calles (Figura 6.15). Adicionalmente se observaron daños en paredes de algunas viviendas.



Figura 6.15. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Jardines de Coyoacán.

- Colonia Los Girasoles.

En esta colonia se observan daños estructurales sobre el pavimento de la avenida Canal de Miramontes. Los daños son originados por dos fracturas que se extienden a lo largo de la avenida antes mencionada y causan daños en dos carriles del sentido sur de dicha avenida (Figura 6.16).

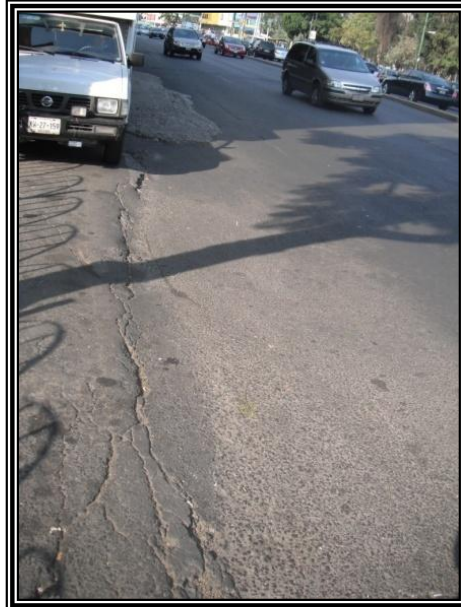


Figura 6.16. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Los Girasoles.

6.2.4. Delegación Xochimilco.

- Barrio San Marcos.

En este sitio se aprecian daños estructurales en el pavimento de las calles Avenida México y Av. Guadalupe I. Ramírez, además en las guarniciones de las banquetas de dichas calles y en las paredes de algunas casas (Figura 6.17). Las fracturas cruzan la calle de forma oblicua, lo que puede originar daños en el drenaje de agua residual y agua potable, ocasionando fugas.

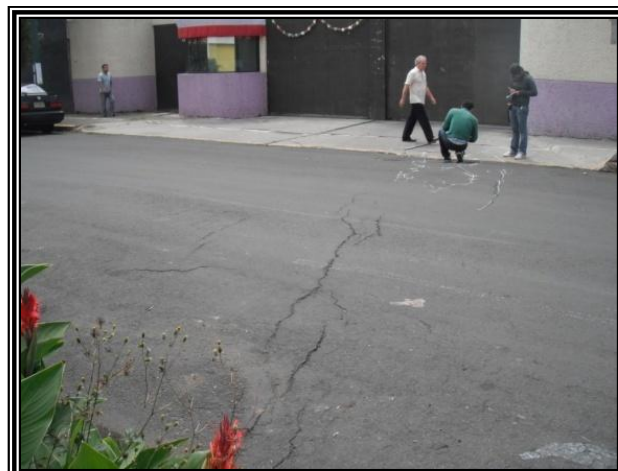


Figura 6.17. Ejemplo de los daños estructurales en Barrio San Marcos.

- Colonia Huichapan.

En esta colonia se aprecian graves daños estructurales en el pavimento de las calles internas de la Unidad Habitacional Rinconada del Sur (Figura 6.18). Como antecedente, algunos edificios de esta unidad habitacional fueron renivelados puesto que presentaron daños severos que afectaron la estabilidad estructural y la vertical original. Por lo anterior, este sitio es una zona vulnerable y con riesgo para las personas que en ella habitan.



Figura 6.18. Ejemplo de los daños estructurales en la U.H. Rinconada del Sur, en la colonia Huichapan.

6.2.5. Delegación Azcapotzalco.

- Alameda Norte.

Los daños estructurales observados en este sitio se presentan en el pavimento de las calles internas de la Alameda Norte. En algunos sectores los daños son más severos, destacando la zona del estacionamiento interno, en la cual los automóviles se estacionan justo por encima de las zonas fracturadas (Figura 6.19). Esto convierte a la Alameda del Norte en una zona vulnerable y representa riesgo para las personas que realizan actividades físicas y para los automovilistas.



Figura 6.19. Ejemplo de los daños estructurales en la Alameda del Norte, Pueblo Santa Bárbara.

6.2.6. Delegación Tláhuac.

- Pueblo San Andrés Mixquic.

Los daños estructurales corresponden con fracturas en el pavimento de las calles recorridas, en las bardas de la iglesia y de algunas casas. Los mayores daños se observan sobre las calles Medellín, Independencia y Emiliano Zapata. A lo largo de estas calles existe riesgo para las personas que transitan a pie o en cualquier vehículo. En la calle Medellín se coloca un tianguis, lo que constituye riesgo para los comerciantes y las personas que compran productos, puesto que en esa calle existe una falla normal que ocasiona daños en el pavimento e irregularidades en el terreno (Figura 6.20).



Figura 6.20. Ejemplo de los daños estructurales en el Pueblo San Andrés Mixquic.

6.2.7. Delegación Álvaro Obregón.

- Colonia Barrio Norte.

En este sitio se observaron daños estructurales sobre el pavimento de la calle Despertador Americano, lo que ocasiona fracturas e irregularidades en la superficie del terreno (Figura 6.21).



Figura 6.21. Ejemplo de los daños estructurales en la colonia Barrio Norte.

En todos los sitios antes mencionados se observa deterioro estructural, ya sea en las paredes de las viviendas, escuelas y/o edificios; además daños en el pavimento, irregularidades en el terreno, daños en las banquetas y las guarniciones de las mismas, por presencia de fracturas y/o fallas, lo cual los convierte en zonas vulnerables y que representan riesgo para las personas que interactúan en dichos lugares.

6.3. Vulnerabilidad por contaminación de agua potable y/o suelos.

Todos los sitios fracturados son susceptibles a sufrir infiltración de algún tipo de contaminante hacia el subsuelo, desde aguas negras hasta contaminantes potencialmente peligrosos. En este subcapítulo se describirán los sitios que son vulnerables a contaminación por hidrocarburos. Los sitios que presentan vulnerabilidad por este concepto son los que se describen a continuación:

6.3.1. Delegación Iztapalapa.

- Colonia Santa Cruz Meyehualco.

En la colonia Santa Cruz Meyehualco se recolectaron dos datos estructurales que corresponden con fracturas, cuya orientación preferencial se ubica a un costado de estaciones de servicio (gasolineras), destacando la de la fractura que se dirige hacia la ES3990 (Figura 6.22). Esta situación podría ocasionar averías o fugas en los tanques de almacenamiento y distribución del combustible, con lo cual existiría contaminación del suelo y el agua subterránea, y convierte a este sitio en un área vulnerable. La Figura 6.23 muestra los datos representados en un SIG.



Figura 6.22. Imagen que muestra la Estación de Servicio ES3990, hacia la cual se dirigen las fracturas.

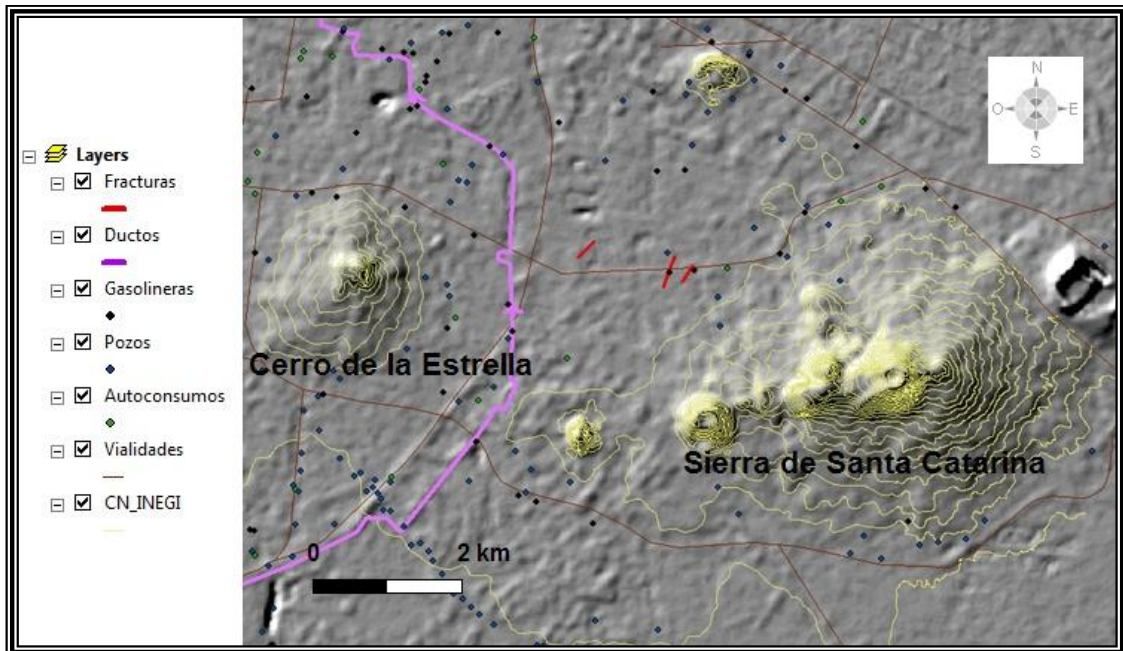


Figura 6.23. Se muestran las fracturas en una imagen de SIG. Se observa que las fracturas se dirigen hacia la ES3990.

- Colonia Lomas de San Lorenzo.

En esta colonia, la orientación preferencial de las fracturas cruza de forma oblicua la dirección de ductos de PEMEX que distribuyen gas (Figura 6.24). Dicha situación puede ocasionar daños y fugas en tales ductos, lo que constituye riesgo para los habitantes del lugar y podría ocasionar contaminación en el suelo. La Figura 6.25 muestra los datos representados en un SIG.

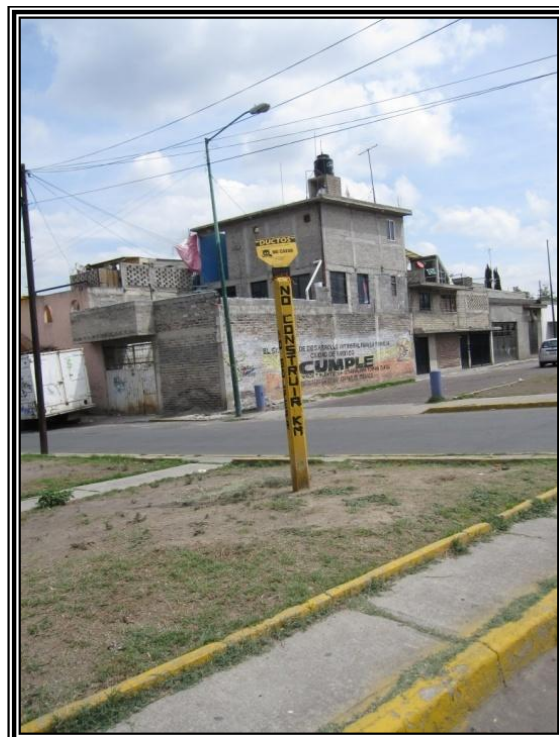


Figura 6.24. Ductos de gas de PEMEX en la colonia Lomas de San Lorenzo, donde las fracturas cruzan de forma oblicua la dirección de los ductos.

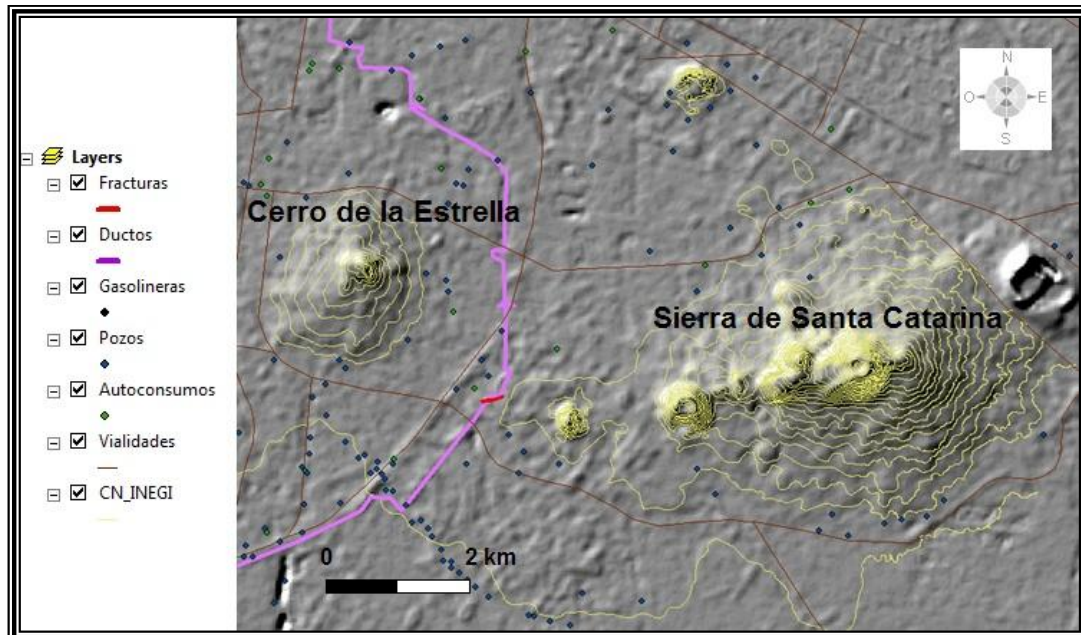


Figura 6.25. Se muestran las fracturas en una imagen de SIG. Se observa que las fracturas cruzan la dirección de los ductos de gas de PEMEX.

6.3.2. Delegación Gustavo A. Madero.

- Inmediaciones del Campus Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

En la calle Juan de Dios Bátiz se recolectaron dos datos estructurales que corresponden con fracturas. Dichos elementos pueden cruzar de forma oblicua la dirección de ductos de PEMEX que distribuyen gas (Figura 6.26). Tal situación puede ocasionar daños en los ductos y posteriores fugas, lo que constituye riesgo para las personas que circulan por el lugar y contaminar el suelo. La Figura 6.27 muestra los datos representados en un SIG.



Figura 6.26. Ductos de gas de PEMEX en las inmediaciones de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Campus Zacatenco del IPN; las fracturas cruzan de forma oblicua los ductos.

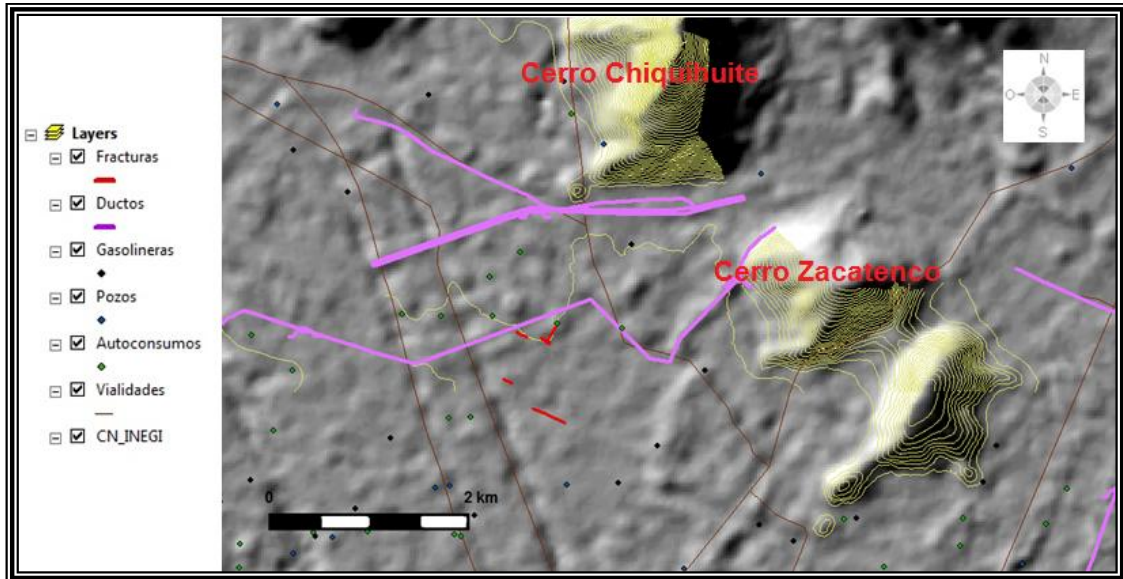


Figura 6.27. Se muestran las fracturas en una imagen de SIG. Se observa que las fracturas pueden cruzar la dirección de los ductos de gas de PEMEX.

6.3.3. Delegación Coyoacán.

- Colonia Jardines del Sur.

En esta colonia, las fracturas ubicadas sobre Avenida de Tzinnias podrían extenderse hacia la estación de servicio ES5285 Inmobiliaria LIRCA S.A. de C.V., con dirección en Canal de Miramontes No. 2762, esquina con Avenida de Tzinnias, en la colonia Jardines de Coyoacán (Figura 6.28). Dicha situación podría ocasionar averías o fugas en los tanques de almacenamiento y distribución del combustible, con lo cual existiría contaminación del suelo y el agua subterránea, y convierte a este sitio en un área vulnerable. La Figura 6.29 muestra los datos representados en un SIG.



Figura 6.28. La orientación de las fracturas se dirige hacia la ES5285, lo que lo convierte en un sitio vulnerable.

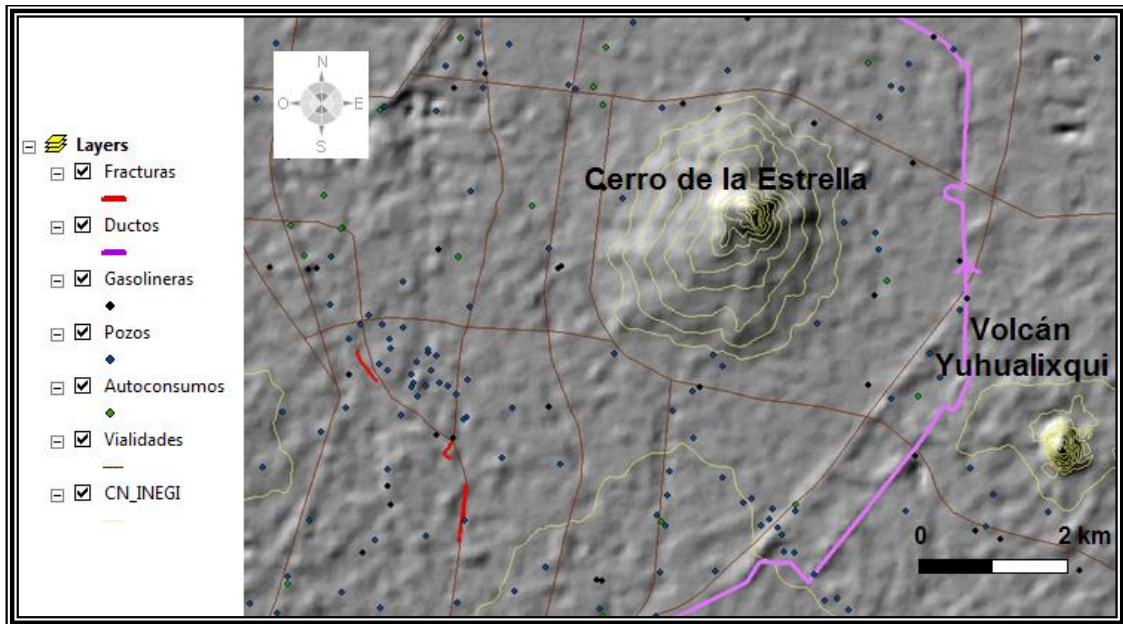


Figura 6.29. Se muestran las fracturas en una imagen de SIG. Se observa que las fracturas se dirigen hacia la ES5285.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES.

1. El basamento de la Cuenca de México fue afectado por sistemas de esfuerzos que originaron deformación frágil en las rocas del basamento y en el relleno sedimentario.
2. Existen varios sistemas de fracturas y fallas regionales, pero son tres los principales; el primero tiene dirección noroeste-sureste, que afectó previamente a las rocas mesozoicas y está asociado al patrón estructural de la Sierra Madre Oriental. Los otros dos sistemas orientados norte-sur y este-suroeste están asociados a los esfuerzos que causaron tensión, estos afectaron a las rocas volcánicas del Mioceno.
3. La estratigrafía regional de la Cuenca de México comprende un total de 23 formaciones, divididas en 6 unidades generales, las cuales son: Unidad Sedimentaria Marina, Grupo Balsas, Unidad Volcánica Inferior, Unidad Volcánica Superior (Grupo Tarango), Cuaternario Volcánico y Cuaternario Sedimentario.
4. Las zonas estudiadas dentro de este trabajo y que son afectadas por los problemas de fracturamiento y/o fallamiento en el Distrito Federal, se ubican en su mayoría dentro de las antiguas zonas de lago presentes en la ciudad, y en menor cantidad en las zonas de transición; se localizan dentro de las siguientes delegaciones políticas del Distrito Federal: a) Álvaro Obregón, b) Azcapotzalco, c) Coyoacán, d) Gustavo A. Madero, e) Iztapalapa, f) Tláhuac, y g) Xochimilco.
5. Tanto en la zona de lago como en la zona de transición se presentan los sistemas de fracturas que han originado graves daños estructurales en el pavimento, banquetas, guarniciones, drenaje y edificaciones.
6. Las zonas vulnerables por daños estructurales en las construcciones representan riesgo para la población y la infraestructura urbana. Los daños se originan por una caracterización nula o inadecuada de las zonas que se utilizan para la construcción de obras civiles.
7. Las zonas vulnerables a la contaminación del agua subterránea y el suelo mediante aguas residuales e hidrocarburos a través de las fracturas o por efecto de las mismas, se convierten en focos rojos, ya

que los daños pueden ser tan severos que ocasionen contaminación extensa e incluso explosiones originadas por fugas en los ductos de gas o tanques almacenadores de combustible.

8. En los sitios estudiados, el problema del fracturamiento y/o fallamiento puede explicarse de acuerdo con las siguientes teorías: a) fracturamiento por variación del contenido de agua, b) fracturas hidrodinámicas, c) fracturamiento asociado al asentamiento diferencial por hundimiento regional, d) fracturas tectónicas. Los mecanismos más comunes son el fracturamiento asociado a la subsidencia por la extracción de agua potable y las que se forman por compactación diferencial donde hay cambios litológicos contrastantes.
9. El presente trabajo representa un esfuerzo en la recolección, clasificación, descripción e interpretación de algunas zonas con problemas de fracturamiento y/o fallamiento en la Ciudad de México, esperando que se genere conciencia política, social, científica, y una cultura de investigación a nivel gubernamental e institucional sobre estos problemas.
10. La aplicación de una caracterización adecuada en el estudio y monitoreo de los sitios afectados por fracturas permite definir las zonas urbanas más vulnerables al fracturamiento y con ello poder realizar acciones de concientización social y mitigación de las afectaciones, así como una mejor planeación de obras civiles y crecimiento de la mancha urbana en el Distrito Federal.

RECOMENDACIONES.

- a) Las bases de datos existentes de pozos de extracción de agua potable presentan graves deficiencias, puesto que la información contenida es escasa, está incompleta o no coincide con datos reales. Por lo anterior, es recomendable realizar una base de datos que contenga aspectos mínimos indispensables, tales como las coordenadas geográficas correctas de los pozos, una clave homogenizada para asignar nombres a los mismos, y la descripción adecuada de la columna estratigráfica durante la perforación.
- b) Se recomienda realizar una campaña de investigación más extensa, con recursos económicos, tecnológicos y humanos adecuados, de otras zonas afectadas por fracturamiento en el Distrito Federal y zonas conurbadas.

- c) Se recomienda elaborar mapas locales a escala más grande, que muestren los patrones de fracturamiento, fallamiento y/o hundimiento en la Ciudad de México, con la finalidad de tener una idea más precisa del comportamiento de estos fenómenos y con ello poder definir las regiones con mayor vulnerabilidad.

- d) Es recomendable monitorear periódicamente y reglamentar el uso de suelo en las zonas urbanas que manifiesten inestabilidad del subsuelo reflejado por el fracturamiento del terreno. Se recomienda elaborar un reglamento que especifique los estudios necesarios que deben realizarse de forma obligada cuando se presenten solicitudes para la construcción de cualquier obra de tipo civil, con el fin de evitar futuros daños estructurales, pérdidas humanas y gastos innecesarios en mitigación de daños.

- e) Se debe concientizar a las personas acerca del riesgo que existe al establecerse en zonas afectadas por el fracturamiento para que no realicen construcciones bajo esas condiciones desfavorables.

- f) Es importante que exista un subsidio o programa social que beneficie a las personas que tienen afectaciones en sus construcciones o que sufren averías en sus vehículos, ocasionados por el fracturamiento.

APÉNDICE A.

DATOS DEL FRACTURAMIENTO.

➤ Colonia El Edén, delegación Iztapalapa.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Separación [m]
1	75	NW	0.94	0.01	0.5
2	40	NW	0.54	0.025	0.5
3	46	NW	0.7	0.04	0.1
4	52	NW	0.88	0.02	0.05
5	12	NW	0.54	0.01	0.3
6	12	NW	0.26	0.01	0.08
7	14	NW	0.3	0.015	0.15
8	35	NW	0.59	0.015	0.15
9	38	NW	0.5	0.015	0.23
10	60	NW	0.27	0.04	0.32
11	82	NW	3.2	0.03	1
12	68	NW	0.8	0.02	0.1
13	80	NW	2.1	0.08	0.4
14	70	NW	0.72	0.03	2
15	74	NW	0.35	0.01	0.05
16	68	NW	0.4	0.01	0.05
17	72	NW	0.37	0.01	0.05
18	50	NW	0.47	0.01	0.5
19	40	NW	0.37	0.01	0.2
20	30	NW	0.57	0.01	0.1
21	55	NW	0.3	0.015	0.2
22	44	NW	0.43	0.01	0.18
23	30	NW	0.3	0.01	0.1
24	40	NW	0.55	0.02	0.18
25	60	NW	0.9	0.06	0.15
26	75	NW	0.4	0.02	0.3
27	72	NW	0.4	0.01	0.11
28	73	NW	1.14	0.04	0.05
29	72	NW	0.8	0.04	0.05
30	60	NW	0.25	0.03	0.03
31	84	SW	0.23	0.01	0.15
32	75	SW	0.18	0.01	0.1
33	80	SW	0.24	0.007	0.04
34	60	NE	0.23	0.01	0.1
35	70	NE	0.2	0.01	0.2
36	270	W	0.33	0.005	0.13
37	85	NE	0.7	0.02	0.1
38	85	NE	0.83	0.03	0.1
39	270	W	0.4	0.002	0.47
40	85	SW	0.3	0.004	0.3
41	80	SW	0.47	0.004	0.06
42	80	NW	0.46	0.003	0.1

43	65	NW	0.22	0.01	0.05
44	65	NW	1.83	0.01	0.14
45	64	NW	0.46	0.001	0.5
46	62	NW	0.3	0.003	0.25
47	48	NW	0.26	0.003	0.07
48	50	NW	0.42	0.005	0.1
49	52	NW	0.31	0.004	0.15
50	62	NW	0.27	0.003	0.1
51	60	NW	0.32	0.004	0.09
52	58	NW	0.45	0.007	0.17
53	5	NW	0.21	0.002	0.17
54	80	SW	0.5	0.005	0.06
55	83	SW	0.47	0.002	0.05
56	75	SW	0.4	0.003	0.05
57	85	SW	0.15	0.002	0.07
58	270	W	0.21	0.006	0.04
59	75	NW	0.76	0.005	0.36
60	80	NW	0.63	0.01	0.06
61	270	W	0.45	0.01	0.06
62	85	SW	0.35	0.01	0.1
63	85	SW	0.42	0.005	0.06
64	80	SW	0.4	0.004	0.07
65	85	NW	0.2	0.003	0.08
66	40	NW	0.3	0.005	0.09
67	70	SW	0.2	0.05	0.08
68	70	NW	0.4	0.05	0.08
69	72	NW	1	0.05	0.2
70	72	NW	0.5	0.02	0.15
71	78	NW	0.43	0.05	0.08
72	72	SW	0.36	0.02	0.1
73	64	NW	0.36	0.06	0.23
74	60	NW	0.32	0.08	0.15
75	83	NW	0.42	0.01	0.03
76	82	NW	0.59	0.01	0.1
77	78	NW	0.67	0.01	0.15
78	79	NW	0.5	0.02	0.3
79	78	NW	0.61	0.015	0.1
80	83	NW	0.65	0.01	0.2
81	82	NW	1.3	0.05	0.1
82	81	NW	0.2	0.01	0.05
83	88	NW	0.21	0.01	0.2
84	83	NW	0.48	0.02	0.11
85	88	NW	0.63	0.01	0.08
86	83	SW	0.4	0.01	0.1
87	86	NW	0.32	0.02	0.6

88	80	SW	0.35	0.01	0.2
89	60	NW	0.6	0.01	0.3
90	80	NW	0.5	0.05	0.05
91	80	SW	0.6	0.02	0.4
92	83	SW	0.5	0.02	0.3
93	60	NW	0.3	0.02	0.05
94	70	SW	0.53	0.01	0.03
95	75	NW	0.46	0.01	0.15
96	70	SW	0.43	0.02	0.02
97	88	SW	0.42	0.01	0.02
98	85	SW	0.5	0.02	0.15
99	80	SW	0.5	0.03	0.02
100	70	SW	0.52	0.02	0.1
101	70	SW	0.58	0.05	0.12
102	80	SW	1.7	0.03	0.02
103	80	NW	0.49	0.02	0.1
104	70	SW	0.3	0.01	0.05
105	80	SW	0.3	0.03	0.2
106	80	NW	2.3	0.05	0.2
107	80	NW	0.35	0.01	0.11
108	60	NW	0.31	0.01	0.1
109	65	NW	0.35	0.01	0.13
110	55	NW	0.24	0.01	0.08
111	60	NW	0.22	0.01	0.05
112	70	SW	0.3	0.01	0.15
113	85	SW	0.12	0.01	0.03
114	82	SW	0.1	0.01	0.05
115	80	SW	0.13	0.015	0.09
116	85	NW	0.14	0.01	0.04
117	87	NW	0.32	0.02	0.04
118	270	W	0.62	0.01	0.07
119	270	W	0.52	0.01	0.09
120	80	SW	1.21	0.02	0.07
121	270	W	0.82	0.025	0.005
122	70	SW	0.72	0.02	0.1
123	80	SW	0.71	0.025	0.07
124	80	SW	0.18	0.005	0.12
125	65	SW	0.93	0.015	0.07
126	85	SW	0.42	0.015	0.04
127	75	NW	0.23	0.015	0.2
128	85	SW	0.61	0.01	0.2
129	85	NW	0.56	0.015	0.1
130	75	SW	0.53	0.01	0.14
131	270	W	0.39	0.005	0.14
132	80	SW	0.5	0.015	0.005

133	85	NW	0.34	0.01	0.005
134	80	NW	0.19	0.005	0.04
135	80	NW	0.7	0.015	0.05
136	75	NW	0.19	0.01	0.005
137	87	NW	0.29	0.005	0.04
138	85	SW	0.85	0.01	0.3
139	85	NW	1.1	0.025	0.06
140	85	NW	0.73	0.015	0.065
141	70	SW	0.66	0.015	0.09
142	270	W	0.46	0.01	0.04
143	70	SW	0.28	0.015	0.07
144	70	SW	0.34	0.01	0.06
145	270	W	0.32	0.005	0.05
146	270	W	0.34	0.005	0.08
147	80	SW	0.33	0.005	0.08
148	80	SW	0.38	0.01	0.09
149	85	NW	0.25	0.015	0.16
150	65	NW	0.15	0.01	0.07
151	270	W	0.7	0.015	0.05
152	75	SW	0.39	0.015	0.05
153	70	SW	0.35	0.01	0.06
154	80	NW	0.44	0.005	0.1
155	270	W	0.22	0.01	0.1
156	80	NW	0.8	0.01	0.14
157	80	NW	0.37	0.005	0.13
158	85	SW	0.19	0.01	0.02
159	85	SW	0.27	0.005	0.05

➤ Colonia Santa Cruz Meyehualco, delegación Iztapalapa.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]
1	64	SE	0.99	0.025
2	20	SE	0.59	0.015
3	40	SE	0.26	0.015
4	24	SE	0.75	0.015
5	5	SE	0.23	0.005
6	5	SE	0.18	0.005
7	14	SE	0.82	0.01
8	13	SE	1.69	0.01
9	60	SE	0.17	0.005
10	32	SE	0.23	0.005
11	15	SE	0.44	0.01
12	25	SE	0.45	0.01
13	10	SE	0.69	0.01
14	63	SE	0.23	0.005
15	14	SE	0.54	0.025
16	22	SE	0.47	0.01

17	20	SE	0.19	0.02
18	50	SE	1.42	0.025
19	180	S	0.21	0.01
20	180	S	0.29	0.005
21	25	SE	0.14	0.005
22	22	SE	0.2	0.005
23	55	SE	0.19	0.02
24	19	SE	0.13	0.015
25	48	SE	0.17	0.02
26	55	SE	0.24	0.01
27	11	SE	0.16	0.015
28	88	SE	0.18	0.01
29	28	SE	0.18	0.01
30	46	SE	0.18	0.015
31	38	SE	0.15	0.02
32	9	NW	1.25	0.025
33	14	NW	0.4	0.02
34	25	NW	0.025	0.005
35	17	NW	0.23	0.01
36	2	NE	0.94	0.03
37	11	NW	0.47	0.01
38	20	NW	0.24	0.01
39	16	NW	0.26	0.007
40	25	NW	0.2	0.008
41	14	NW	0.2	0.01
42	10	NW	0.43	0.015
43	10	NW	0.19	0.01
44	11	NW	0.22	0.005
45	49	NW	0.16	0.01
46	22	NW	0.23	0.01
47	39	NW	0.5	0.015
48	43	NW	0.37	0.015
49	10	NW	0.2	0.005
50	9	NW	0.13	0.005
51	30	NW	0.11	0.005
52	55	NW	0.8	0.005
53	40	NW	0.075	0.002
54	29	NW	0.14	0.002
55	40	NW	0.33	0.015
56	39	NW	0.28	0.01
57	14	NW	0.3	0.01
58	13	NW	0.27	0.005
59	27	NW	0.21	0.01
60	23	NW	0.27	0.08
61	15	NW	0.19	0.05
62	40	NW	0.24	0.015
63	81	SW	0.19	0.01
64	46	SE	0.28	0.005
65	55	SE	0.32	0.015
66	90	E	0.4	0.01
67	72	SE	0.4	0.02
68	40	SE	0.27	0.008

69	52	SE	0.17	0.005
70	20	SE	0.14	0.06
71	48	SE	0.16	0.003
72	25	SE	0.14	0.03
73	72	SE	0.15	0.003
74	33	SE	0.18	0.003
75	22	SE	0.19	0.002
76	35	SE	0.17	0.01
77	10	SW	0.08	0.03
78	9	SE	0.28	0.02
79	39	SE	0.29	0.04
80	12	SE	0.49	0.045
81	15	SE	0.3	0.02
82	9	SE	0.18	0
83	3	SE	1.25	0.01
84	5	SE	0.4	0.02
85	10	SE	0.54	0.03
86	43	SE	0.47	0.005
87	13	SE	0.47	0.025
88	180	S	1	0.015
89	180	S	0.29	0.005
90	33	SE	0.4	0.01
91	180	S	1.27	0.01
92	28	SE	0.41	0.005
93	9	SE	0.38	0.01
94	55	SE	0.79	0.025
95	45	SE	0.73	0.02
96	47	SE	0.3	0.025
97	25	SE	0.28	0.01
98	180	S	0.49	0.02
99	9	SE	0.58	0.015
100	34	SE	0.15	0.02
101	52	SE	0.26	0.015
102	50	SE	0.36	0.02
103	54	SE	0.22	0.01
104	32	SE	0.28	0.01
105	70	NE	0.15	0.005
106	78	NE	0.23	0.006
107	72	NE	0.15	0.01
108	58	NE	0.19	0.005
109	53	SE	0.24	0.006
110	45	NE	0.14	0.02
111	11	SW	0.88	0.02
112	5	SE	0.39	0.005
113	72	NE	0.46	0.03
114	72	SE	0.21	0.015
115	60	SE	0.26	0.002
116	12	SW	0.49	0.04
117	8	SE	0.48	0.03
118	25	SE	0.67	0.025
119	11	SE	0.25	0.025
120	32	SE	0.34	0.03

121	8	SE	0.33	0.02
122	70	NE	0.15	0.005
123	90	E	0.3	0.015
124	61	SE	0.3	0.03
125	62	SE	0.32	0.025
126	33	SE	0.39	0.035
127	43	SE	0.64	0.025
128	3	SE	0.56	0.035
129	75	NE	0.37	0.015
130	70	NE	0.25	0.01
131	66	NE	0.36	0.03
132	40	SE	0.28	0.005
133	30	NE	0.48	0.03
134	180	S	2.02	0.03
135	15	NE	0.42	0.025
136	35	NE	1.03	0.03
137	15	NE	0.5	0.03
138	25	NE	0.59	0.035
139	25	NE	0.62	0.03
140	15	NE	0.69	0.04
141	30	NE	0.86	0.05
142	20	NE	0.37	0.03
143	25	NE	0.26	0.01
144	10	NE	1.6	0.025
145	90	E	0.19	0.002
146	85	SE	0.48	0.01
147	10	NE	1.27	0.05
148	180	S	1.44	0.04
149	10	NW	0.34	0.01
150	180	S	0.52	0.01
151	20	SE	0.27	0.003
152	10	SE	0.28	0.001
153	30	SE	0.23	0.005
154	10	SE	0.23	0.004
155	10	NE	0.53	0.01
156	180	S	0.33	0.01
157	10	NW	0.3	0.005
158	10	NE	0.71	0.015
159	20	NE	0.48	0.025
160	10	NE	0.57	0.02
161	5	NW	0.98	0.035
162	10	NW	1.54	0.06
163	15	SW	0.2	0.005
164	10	NE	0.27	0.005
165	16	NE	0.69	0.02
166	15	NE	0.47	0.015
167	25	NE	0.26	0.01
168	70	NE	0.47	0.01
169	70	NE	0.38	0.02
170	60	NE	0.24	0.01
171	15	SE	0.33	0.01
172	35	SE	0.23	0.005

173	20	SE	0.26	0.006
174	5	SE	0.15	0.01
175	17	SE	1.18	0.02
176	17	SE	0.25	0.005
177	26	SE	0.33	0.005
178	75	SE	0.18	0.001
179	16	SE	0.22	0.005
180	20	SE	0.57	0.015
181	30	SE	0.57	0.025
182	15	SE	0.34	0.01
183	15	SE	0.96	0.02
184	19	SE	0.22	0.001
185	10	SE	0.69	0.015
186	180	S	0.67	0.01
187	5	SE	0.29	0.001
188	15	SE	0.31	0.01
189	15	SE	0.26	0.01
190	10	SW	0.35	0.01

➤ Colonia Jacarandas, delegación Iztapalapa.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]
1	25	SW	0.43	0.03
2	40	SW	0.71	0.04
3	60	SW	0.38	0.025
4	65	SW	0.36	0.02
5	65	SW	0.22	0.02
6	68	SW	0.4	0.015
7	50	SW	0.73	0.03
8	74	SW	0.97	0.03
9	56	SW	0.58	0.03
10	270	W	0.56	0.025
11	88	SW	0.445	0.02
12	74	SW	0.67	0.025
13	63	SW	0.36	0.03
14	5	SW	1.4	0.15
15	30	SW	0.21	0.03
16	44	SW	0.47	0.015
17	33	SW	0.35	0.015
18	50	SW	0.35	0.025
19	60	SW	0.4	0.015
20	85	SW	0.56	0.02
21	85	SW	0.39	0.015
22	73	SW	0.4	0.005
23	45	SW	1	0.01
24	75	NW	0.91	0.02
25	43	NW	0.7	0.01
26	70	SW	0.3	0.03
27	75	SW	0.31	0.02
28	75	SW	0.57	0.03
29	90	E	0.4	0.02

30	61	SW	0.26	0.025
31	12	SW	0.61	0.04
32	5	SW	0.86	0.04
33	90	E	0.85	0.04
34	35	SW	0.38	0.06
35	90	E	0.62	0.04
36	60	SW	0.56	0.01
37	45	SW	0.6	0.03
38	90	E	0.75	0.03
39	90	E	0.58	0.025
40	50	SW	0.29	0.025
41	45	SW	0.38	0.01
42	80	SW	1.8	0.1
43	55	SW	0.37	0.02
44	15	SW	0.47	0.01
45	12	SW	0.54	0.02
46	79	SW	0.5	0.005
47	33	SW	0.54	0.005
48	51	SW	0.79	0.025
49	90	E	0.7	0.02
50	52	NW	1.22	0.03
51	18	SW	0.54	0.025
52	22	SW	0.78	0.045
53	10	SW	0.62	0.015
54	60	SW	2.4	0.1
55	55	SW	1.08	0.1
56	85	SW	0.18	0.007
57	85	SW	0.09	0.007
58	78	SW	0.37	0.025
59	40	SW	3.6	0.04
60	40	SW	1.89	0.03
61	85	SW	0.36	0.03
62	90	E	0.73	0.04
63	80	SW	0.4	0.01
64	60	SW	0.54	0.02
65	40	SW	1.5	0.05
66	50	SW	0.64	0.01
67	75	SE	0.26	0.005
68	30	SE	0.32	0.002
69	45	SW	0.69	0.02
70	38	SW	0.58	0.02
71	15	SW	0.68	0.01
72	70	SW	0.49	0.03
73	25	SW	0.49	0.03
74	25	SW	1.15	0.02
75	90	E	0.39	0.01
76	70	SW	0.34	0.02
77	20	SW	0.36	0.03
78	63	SW	0.5	0.04
79	68	SW	0.6	0.03
80	60	SW	0.52	0.02
81	50	SW	1.04	0.04

82	90	E	0.62	0.04
83	60	SW	0.57	0.03
84	55	SW	0.66	0.03
85	80	NE	0.48	0.02
86	75	SW	0.6	0.01
87	85	SW	0.26	0.01
88	65	SW	0.4	0.015
89	45	SW	0.93	0.03
90	75	SW	0.3	0.05
91	33	SW	0.26	0.005
92	45	SW	0.25	0.01
93	90	E	0.36	0.01
94	75	SW	0.58	0.02
95	50	SW	0.44	0.25
96	52	SW	0.43	0.02
97	6	SW	0.97	0.01
98	44	SW	1.25	0.03
99	18	SW	0.42	0.005
100	180	S	0.6	0.005
101	3	SE	0.49	0.02
102	53	SW	2.15	0.05
103	51	SW	0.36	0.01
104	45	SW	0.25	0.005
105	50	SW	0.25	0.005
106	48	SW	0.21	0.01
107	20	SW	0.4	0.005
108	48	SW	0.3	0.005
109	40	SW	0.17	0.005
110	43	SW	0.33	0.002
111	40	SW	0.25	0.002
112	30	SW	0.43	0.003
113	30	SW	0.5	0.01
114	15	SW	0.5	0.02
115	180	S	0.46	0.03
116	20	SE	0.49	0.01
117	33	SW	0.37	0.05
118	25	SW	0.6	0.01
119	15	SW	0.62	0.005
120	40	SW	0.6	0.003
121	35	SW	0.8	0.01
122	35	SW	0.61	0.01
123	85	SW	0.63	0.02
124	38	SW	0.71	0.03
125	70	SW	0.26	0.02
126	41	SW	0.7	0.03
127	10	SW	0.39	0.02
128	75	SW	0.42	0.02
129	60	SW	0.94	0.01
130	61	SW	0.82	0.03
131	68	SW	0.62	0.03
132	63	SW	0.71	0.03
133	50	SW	0.38	0.01

134	47	SW	0.63	0.02
135	45	SW	0.61	0.02
136	38	SW	1.38	0.02

➤ Inmediaciones del Bosque de Aragón, delegación Gustavo A. Madero.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]
1	45	SW	0.57	0.015
2	82	SW	0.3	0.02
3	30	SW	0.37	0.018
4	14	SW	0.56	0.015
5	54	SW	1.23	0.02
6	30	SE	0.51	0.011
7	75	NE	0.38	0.015
8	65	NE	0.41	0.013
9	25	NE	0.26	0.02
10	14	SE	0.65	0.02
11	75	SW	2.66	0.03
12	84	SW	1.26	0.023
13	18	SW	0.19	0.008
14	42	SE	0.82	0.015
15	72	SW	1.25	0.025
16	65	SW	0.25	0.005
17	86	NW	0.72	0.025
18	70	SW	0.56	0.04
19	20	SE	0.5	0.02
20	33	SW	0.21	0.01
21	90	E	0.36	0.04
22	25	SE	1.46	0.05
23	46	SW	0.18	0.005
24	54	SW	0.68	0.01
25	24	SE	1.74	0.03
26	15	SE	0.98	0.02
27	5	SW	0.31	0.02
28	54	SW	0.23	0.035
29	60	SW	0.26	0.02
30	26	SW	0.52	0.03
31	53	SW	0.8	0.02
32	25	SW	0.23	0.025
33	15	SW	0.07	0.015
34	30	SW	0.23	0.005
35	58	SE	0.47	0.025
36	23	SW	1.02	0.045
37	55	SE	0.49	0.05
38	40	SE	0.46	0.015
39	80	SE	0.41	0.03
40	52	SE	0.56	0.03
41	30	NE	0.66	0.035
42	55	SE	1.05	0.05
43	90	E	0.54	0.02
44	30	NE	0.66	0.04

45	2	SW	0.67	0.008
46	35	SE	0.64	0.01
47	69	NE	0.52	0.025
48	42	NE	0.34	0.02
49	70	NE	0.36	0.018
50	34	NE	0.26	0.015
51	25	NE	0.29	0.005
52	75	NW	0.41	0.02
53	85	SW	0.35	0.01
54	46	NE	0.42	0.015
55	45	NE	0.39	0.005
56	30	NE	1.03	0.025
57	84	SE	0.5	0.02
58	17	NW	0.17	0.025
59	43	NW	0.31	0.005
60	10	NE	0.51	0.02
61	80	NE	0.55	0.02
62	46	NE	0.43	0.02
63	15	NE	0.37	0.03
64	60	NE	0.17	0.01
65	58	NE	1.64	0.04
66	10	NW	0.68	0.025
67	35	SE	2.93	0.1
68	40	NE	0.3	0.05
69	20	NW	0.36	0.005
70	10	NW	0.3	0.003
71	60	SW	0.18	0.004
72	18	NW	0.34	0.02
73	40	NE	0.34	0.01
74	50	NW	0.24	0.05
75	75	NE	0.45	0.03
76	30	NE	0.62	0.06
77	40	NE	0.4	0.03
78	45	NE	0.52	0.09
79	10	NE	0.63	0.08
80	25	NE	0.24	0.03
81	77	NE	0.68	0.09
82	80	SE	0.3	0.03
83	78	NE	0.22	0.02
84	8	SW	0.36	0.03
85	35	SE	0.3	0.06
86	68	NE	0.5	0.03
87	60	NE	1.06	0.08
88	58	NE	0.44	0.02
89	30	NE	0.37	0.04
90	42	NE	0.38	0.04
91	40	NE	0.48	0.08
92	20	NW	0.56	0.006
93	28	NW	0.2	0.005
94	40	NE	1.5	0.05
95	30	NW	6.5	0.06
96	25	NW	0.37	0.005

97	32	NW	0.6	0.006
98	26	NW	0.7	0.01
99	70	NW	0.33	0.006
100	32	NE	1.6	0.035
101	30	NE	0.5	0.03
102	32	NE	0.6	0.01
103	12	NE	0.74	0.01
104	10	SE	0.2	0.006
105	37	NW	0.5	0.01
106	40	NW	0.9	0.03
107	24	NE	0.87	0.04
108	26	NW	0.4	0.02
109	70	SE	0.6	0.02
110	70	SE	0.6	0.03
111	20	SE	1.28	0.05
112	86	NW	0.82	0.01
113	20	SE	0.8	0.01
114	20	SE	0.6	0.01
115	60	NW	0.22	0.005
116	20	NE	0.37	0.004
117	40	NW	0.25	0.003

➤ Avenida México, barrio de San Marcos, delegación Xochimilco.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]
1	30	SW	0.45	0.02
2	63	SW	0.28	0.03
3	72	SW	0.38	0.02
4	8	SE	1.14	0.06
5	20	SE	0.45	0.05
6	22	SE	0.34	0.05
7	32	SW	0.96	0.04
8	3	SW	1.12	0.03
9	38	SW	0.50	0.02
10	17	SW	1.14	0.01
11	37	SE	0.65	0.01
12	49	SE	0.60	0.01
13	45	SE	0.23	0.01
14	64	SE	3.44	0.01
15	32	SE	0.10	0.01
16	2	SW	0.38	0.01
17	33	SE	0.45	0.01
18	5	SW	0.20	0.02
19	42	SW	0.50	0.05
20	80	NW	0.64	0.02
21	30	SE	0.55	0.02
22	40	SW	0.20	0.02
23	42	SE	0.45	0.02
24	58	SE	0.33	0.02
25	60	SE	0.43	0.04
26	42	SE	0.45	0.02

27	13	SE	0.18	0.01
28	36	SE	0.28	0.01
29	35	SE	0.14	0.01
30	8	SE	0.99	0.04
31	28	SE	0.30	0.01
32	22	SE	0.46	0.01
33	2	SW	0.16	0.02
34	15	SW	0.19	0.01
35	19	SW	0.14	0.01
36	18	SE	0.22	0.02
37	6	SE	0.30	0.01
38	5	SE	0.20	0.01
39	9	SE	0.27	0.01
40	26	SE	0.30	0.05
41	16	SE	0.13	0.01
42	59	NW	0.22	0.01
43	20	NW	0.21	0.01
44	83	SW	0.20	0.01
45	49	SW	0.17	0.01
46	5	SW	0.18	0.01
47	180	S	0.24	0.01
48	33	NW	0.90	0.02
49	25	NW	0.80	0.02
50	35	NW	0.26	0.01
51	20	NW	0.23	0.01
52	18	NW	0.26	0.01
53	15	NE	0.19	0.01
54	20	NW	1.75	0.05
55	3	NW	0.31	0.01
56	45	NW	0.20	0.01
57	180	S	0.37	0.01
58	18	NW	0.22	0.01
59	23	NW	0.21	0.01
60	18	NW	0.17	0.01
61	26	NW	0.19	0.01
62	27	NW	0.20	0.01
63	23	NW	0.27	0.01
64	22	NW	0.17	0.01
65	23	NW	0.27	0.01
66	23	NW	0.23	0.01
67	25	NW	0.12	0.01
68	10	NE	0.27	0.01
69	5	NW	0.20	0.01
70	28	NW	0.20	0.01
71	22	NW	0.89	0.02
72	30	NW	0.31	0.01
73	22	NW	0.32	0.02
74	38	NW	0.14	0.01
75	5	NE	0.34	0.01
76	8	NW	0.29	0.01
77	2	NE	0.14	0.01
78	50	NW	0.13	0.01

79	24	NW	0.46	0.02
80	28	NW	0.30	0.03
81	48	NW	0.51	0.03
82	24	NW	0.22	0.01
83	30	SE	0.60	0.02
84	25	SE	0.70	0.03
85	23	SE	0.91	0.03
86	30	SE	0.17	0.01
87	22	SE	0.14	0.01
88	30	SE	0.14	0.01
89	52	SE	0.45	0.02
90	26	SE	0.16	0.01
91	32	SE	0.18	0.01
92	55	SE	0.26	0.01
93	65	SE	0.14	0.01
94	22	SE	2.28	0.05
95	87	SE	0.22	0.01
96	89	SE	0.36	0.01
97	49	SE	0.20	0.01
98	10	SE	0.53	0.01
99	12	SE	0.90	0.02
100	20	SE	0.54	0.01
101	52	SW	0.92	0.04
102	66	SE	0.15	0.01
103	15	SE	0.31	0.01
104	12	SE	0.29	0.01
105	9	SE	0.11	0.01
106	55	SE	0.22	0.02
107	20	SE	0.23	0.01
108	62	SE	0.29	0.01
109	20	SW	0.27	0.01
110	180	S	0.30	0.01
111	17	SE	0.20	0.01
112	12	SE	0.36	0.01
113	36	SE	0.17	0.01
114	15	SW	0.36	0.01
115	9	SE	0.29	0.01
116	29	SE	0.17	0.01
117	42	SE	0.54	0.02
118	12	SE	0.57	0.02
119	45	SE	0.54	0.01
120	32	SE	0.46	0.01
121	22	SE	0.71	0.02
122	30	SE	0.35	0.01
123	15	SE	2.62	0.02
124	18	SE	0.24	0.01
125	36	SE	0.67	0.02
126	23	SE	0.43	0.01
127	30	SE	1.40	0.01
128	5	NW	0.79	0.02
129	10	NW	0.24	0.01
130	180	S	0.52	0.01

131	15	NE	0.60	0.03
132	3	NE	0.75	0.03
133	38	NW	0.20	0.01
134	40	NW	0.46	0.02
135	65	NW	0.22	0.01
136	55	NW	0.29	0.01
137	57	NW	0.18	0.01
138	60	NW	0.36	0.01
139	82	NW	0.23	0.01
140	66	NW	0.26	0.01
141	88	SW	2.27	0.02
142	80	NW	0.82	0.02
143	10	SW	0.16	0.02
144	8	SE	0.37	0.01
145	5	NW	0.24	0.01

➤ Pueblo San Andrés Mixquic, delegación Tláhuac.

Dato	Rumbo	Cuadrante	Longitud [m]	Abertura [m]	Separación [m]
1	65	SW	0.43	0.03	0.12
2	73	SW	0.55	0.02	0.12
3	70	SW	1.00	0.03	0.10
4	58	SW	1.57	0.04	0.19
5	71	SW	1.78	0.05	0.09
6	60	SW	0.63	0.04	0.12
7	42	SW	1.30	0.02	0.06
8	82	SW	1.03	0.03	0.11
9	84	SW	0.64	0.01	0.04
10	85	SW	0.48	0.03	0.09
11	85	SW	0.56	0.03	0.13
12	65	SW	0.43	0.03	0.12
13	73	SW	0.55	0.02	0.12
14	70	SW	1.00	0.03	0.10
15	85	SW	1.57	0.04	0.19
16	71	SW	1.78	0.05	0.09
17	60	SW	0.63	0.04	0.12
18	42	SW	1.30	0.02	0.06
19	82	SW	1.03	0.03	0.11
20	84	SW	0.64	0.01	0.04
21	85	SW	0.48	0.03	0.09
22	85	SW	0.56	0.03	0.13
23	75	SW	0.60	0.03	0.09
24	78	SW	0.56	,02	0.12
25	71	SW	0.68	0.02	0.27
26	45	SW	0.33	0.01	0.16
27	48	SW	0.51	0.01	0.49
28	53	SW	2.80	0.05	0.11

29	49	SW	0.90	0.02	0.15
30	46	SW	0.75	0.01	0.03
31	80	SW	0.56	0.02	0.02
32	56	SW	0.49	0.02	0.01
33	85	SW	0.40	0.01	0.01
34	70	SW	0.45	0.01	0.05
35	70	SW	4.04	0.03	0.05
36	63	SW	0.52	0.02	0.20
37	34	SW	0.51	0.03	0.04
38	57	SW	1.14	0.02	0.17
39	60	SW	2.80	0.03	0.11
40	68	SW	0.90	0.02	0.15
41	70	SW	0.75	0.01	0.03
42	80	SW	0.67	0.02	0.30
43	30	SW	0.56	0.02	0.30
44	64	SW	0.41	0.01	0.25
45	42	SW	0.45	0.01	0.10
46	270	SW	0.58	0.01	0.05
47	50	SW	0.46	0.01	0.05
48	40	SW	0.38	0.01	0.47
49	41	SW	0.28	0.01	0.20
50	61	SW	0.79	0.01	0.30
51	15	NE	3.20	0.03	2.00
52	28	SW	0.88	0.01	0.50
53	22	SW	0.67	0.04	2.50
54	85	SE	1.05	0.03	0.03
55	75	SE	0.67	0.03	0.02
56	85	NE	0.41	0.02	0.01
57	70	NE	0.33	0.03	0.10
58	75	NE	0.37	0.01	0.16
59	78	NE	0.18	0.01	0.07
60	55	SE	0.77	0.02	0.12
61	50	SE	0.31	0.03	0.05
62	80	SE	0.66	0.02	0.13
63	88	SE	0.61	0.02	0.06
64	81	NE	0.63	0.01	0.05
65	70	SE	0.62	0.02	0.26
66	70	SE	0.95	0.02	0.06
67	68	SE	0.44	0.02	0.28
68	70	SE	0.50	0.03	0.06

BIBLIOGRAFÍA.

Acevedo-Sandoval, O., Cruz-Sánchez, M., Cruz-Chávez, E., 2002. Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico: *Agrociencia*, 36(4), 401-409.

Aguirre-Díaz, G., Nelson, S., Ferrari, L., López, M., 1997. Ignimbrites of the central Mexican Volcanic Belt, Amealco and Huichapan calderas (Querétaro-Hidalgo), *en* Aguirre-Díaz, G., Aranda-Gómez, J., Carrasco-Núñez, G., Ferrari, L. (eds.), *Magmatism and tectonics in the central and northwestern Mexico—a selection of the 1997 IAVCEI General Assembly excursions: México*, DF, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Excursión 1, 1-39.

Aguirre-Díaz, G., McDowell, F., 2000. Volcanic evolution of the Amealco caldera, central Mexico, *en* Delgado-Granados, H., Stock, J., Aguirre-Díaz, G. (eds.), *Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper*, 334, 167-178.

Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., 2001. The Amazcala caldera, Querétaro, central Mexican Volcanic Belt, México. *Geology and geochronology: Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 111, 203-218.

Alaniz-Álvarez, S., Nieto-Samaniego, A.F., Ferrari, L., 1998. Effects of strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geology*, 26, 591-594.

Alberro J. & Hernández, R. (1990). “*Fuerzas de filtración y fracturamiento hidráulico*”, Series del Instituto de Ingeniería, N0 528, UNAM, México, D.F.

Alva-Valdivia, L., Goguitchaichvili, A., Rosas-Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J., Ferrari, L., Zamorano, J., 2000. Paleomagnetic data from the trans-Mexican Volcanic Belt: implications for tectonics and volcanic stratigraphy: *Earth, Planets and Space*, 52, 467-478.

Álvarez Jr. M., 1958. Provincias fisiográficas de la República Mexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 14.

Álvarez-Manilla Aceves., A., 2000. Modelo del mecanismo de agrietamiento en el Valle y zona metropolitana de Querétaro. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.

Arellano, A.R.V., 1951 (1953). *Estratigrafía de la Cuenca de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Congreso Científico Mexicano, México, D.F., 1951, Memorias*, v. 3, p. 172-186.

Arnold, J. R., W. F. Libby, 1951. Radiocarbon Dates. *Science*, 113, 2927, 111-120.

Ashley, G.H., Cheney, M.G., Galloway, J.J., Gould, C.N., Hares, C.J., Howell, B.F., Levorsen, A.I., Miser, H.D., Moore, R.C., Reeside, Jr. J.B., Rubey, W.W., Stanton, T.W., Stose, G.W., Twenhofel, W.H., 1933. Classification and nomenclature of rock units: *Bulletin of the Geological Society of America*, 44, 423-459.

Auvinet, G. & Arias, A. (1991). “*Propagación de grietas*”, Memoria, Simposio sobre agrietamiento de suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., pp. 21-32

Ban, M., Hasenaka, T., Delgado-Granados, H., Takaoka, N., 1992. K-Ar ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico: *Geofísica Internacional*, 31, 467-473.

Bloomfield, K., 1975. A late-Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico: *Geologische Rundschau*, 64, 476-497.

Bloomfield, K., y S. Valastro, 1974. Late Pleistocene Eruptive History of Nevado de Toluca Volcano, Central Mexico. *Bull Geol. Soc. Amer.*, 85, 901-906.

Bohnenberger, T. O., 1955. Bosquejo Geológico a lo largo de la carretera Iguala-Chilpancingo, Estado de Guerrero, UNAM. Tesis Profesional inédita, 61 pp.

Boudal, C., Robin, C., 1989. Volcán Popocatepetl: recent eruptive history, and potential hazards and risks in future eruptions, *en* Latter, J.H. (ed.), *Volcanic Hazards, IAVCEI Proceedings in Volcanology: Berlin, Springer Verlag*, 1, 110-128.

Bryan, K., 1948. Los Suelos Complejos y Fósiles de la Altiplanicie de México en Relación con los Cambios Climáticos. *Bol. Soc. Geol. Méx.*, XIII, 1-20.

Cabral Cano E., Lugo Hubp J., Ortega A., Duran V., (Mayo de 2008). Análisis de fallas y fracturas en la Delegación Iztapalapa; Reporte preliminar. Instituto de Geofísica UNAM, 47 p.

Campa-Uranga, M. F., 1965. Breve análisis petrográfico de la Sierra de Guadalupe: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Tesis Profesional, 61 p. (Inédita).

Cantagrel, J., Robin, C., 1979. K-Ar dating on eastern Mexican Volcanic rocks-relations between the andesitic and the alkaline provinces: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5, 99-114.

Cantagrel, J.M., Robin, C., Vincent, P., 1981. Les grandes etapes d'évolution d'un volcan andésitique composite: Exemple du Nevado de Toluca: *Bulletin Volcanologique*, 44, 177- 188.

Capra, L., Macías, J., Garduño, V., 1997. The Zitácuaro Volcanic Complex, Michoacán, México: magmatic and eruptive history of a resurgent caldera: *Geofísica Internacional*, 36(3), 161-179.

Carmichael, I., Lange, R., Luhr, J., 1996. Quaternary minettes and associated volcanic rocks of Mascota, western Mexico: a consequence of plate extension above a subduction modified mantle wedge: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 124, 302-333.

Carrasco-Núñez, G., 1985. Estudio Geológico del Volcán Popocatepetl. Tesis de Ing. Geol., Fac. Ing., UNAM (inédita).

Carrasco-Núñez, G., Milán, M., Verma, S., 1989. Geología del volcán El Zamorano, estado de Querétaro: *Revista Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 8, 194-201.

Carrasco-Núñez, G., Ban, M., 1994. Geologic map and structure sections of the summit area of Citlaltepetl volcano, México with summary of the geology of the Citlaltepetl volcano summit area: *Mexico D. F. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas y Mineras*, (9), 1 mapa, texto explicativo.

Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A., Lozano-Velázquez, L., 1997. Geologic map of Cerro Grande volcano and surrounding area, central Mexico: Boulder, CO, Geological Society of America, Map and Chart Serie MCH081, 1 mapa, texto 10 p.

Carreón-Freyre, D. C., 2005. Importancia de la caracterización de arcillas en laboratorio para la adecuada evaluación de sus propiedades mecánicas, pp. 273-282. En Bucio, L., *Cristalografía: Fundamentos Técnicas y Aplicaciones*, Sociedad Mexicana de Cristalografía. A. C., ISBN 970-9888-07-2, 528 p.

Carreón-Freyre, D.C., Gama-Castro, J., Palacios-Mayorga, S., Garnica-Anguas, P., 1998. Propiedades y clasificación de los suelos residuales de México. *Memorias de la XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, 75-80.

Carreón-Freyre., D.C., Cerca M., Hernández-Marín, M., 2003. Correlation of near-surface stratigraphy and physical properties of clayey sediments from Chalco Basin, Mexico, using Ground Penetrating Radar. *Journal of Applied Geophysics* 53: 121-136.

Carreón-Freyre., D., Cerca Martínez, M. y Hernández Marín, M., 2005a. Propagation of fracturing related to land subsidence in the Valley of Queretaro, Mexico. *Proceedings of the 7th International Symposium on Land Subsidence SISOLS 2005*, Shanghai, P.R. China. ISBN 7-5323-8209-5. Vol. I: 155-164.

Carreón-Freyre., D., Cerca M., Luna-González, L., Gámez-González, F. J., 2005b. Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22(1): 1-18.

Carreón-Freyre, D., Cerca, M. 2006. Delineating the near-surface geometry of the fracture system affecting the valley of Queretaro, Mexico: Correlation of GPR signatures and physical properties of sediments. *Near Surface Geophysics, EAGE (European Assoc. Of Geoscientists and Engineers)*. 4(1): 49-55.

Carreón-Freyre, D., Hidalgo-Moreno, C. M., Hernández-Marín, M., 2006. Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Número Especial de Geología Urbana Tomo LVII, núm. 2*, 2006, p. 237-250.

Carrillo, N., 1947. Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City, en Volumen Nabor Carrillo "El hundimiento de la Ciudad de México y el Proyecto Texcoco". Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica Anuario 47: 7-14.

Castillo-Cerón, J., Cabral-Perdomo, M.A., Carranza-Castañeda, O., 1996. Vertebrados fósiles del Estado de Hidalgo, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 68 p.

Cervantes-Medel, A. Armienta, M.A., 2004. Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, Mexico: *Geofísica Internacional*, 43(3), 477-493.

Damon, E. P., M. Shafiqullah y F. K. Clark, 1981. Evolución de los Arcos Magmáticos en México y su Relación con la Metalogénesis. *Rev. Inst. Geol.*, UNAM, 5, 2, 223-238.

De Cserna, Z., 1958. Notes on the tectonics of Southern Mexico: *American Association of Petroleum Geologists*, 86, 523-532.

De Cserna, Z., de la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L.M., Mota-Palomino, R., 1988. Estructura geológica, gravimétrica, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 104, 71 p., 4 mapas.

De Pablo-Galán, L., De Pablo, J.J., Chávez-García, M.L., 2001. Diagenesis and shear rheology of a Recent Pleistocene volcanogenic sequence, Mexican Basin. Implications to swelling and stability: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(2), 175-185.

De Terra, H., 1948. Historia del Valle de México en las Postrimerías del Cuaternario con el Hombre Prehistórico. *Soc. Geol. Mex., Bol. V13, Ej. 2*. Inst. Geol.

Del Castillo, R. (1978). El subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México. Simposio SMMS.

Demant, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Revista Instituto de Geología*, 2, 172-187.

Demant, A., 1981. Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano: *Revista Instituto de Geología*, Universidad Nacional Autónoma de México, 5, 217-222.

Díaz-Rodríguez, A., and Santamarina, J.C., 2001. Mexico City soil behavior at different strains: Observations and physical interpretation. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127 (9), 783-789.

Díaz-Rodríguez, A., Lozano-Santacruz, R., Dávila-Alcocer, V.M., Vallejo, E and Girón, P., 1998. Physical, chemical, and mineralogical properties of México City sediments: a geotechnical perspectiva. *Can. Geotech.J.* 35, 600-610.

Ellstein, A. 1978. Teoría sobre el mecanismo de falla. El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del valle de México, SMMS, 177-181.

Erffa, A. Von y W. Hilger, 1975. Geologische Karte des Bagietes von Puebla-Tlaxcala. Das Mexiki-Projekt der Deutschen Forschungs-Gemeinschaft, 1 / 2,000,000.

Ezcurra, E., M. Mazari, I. Pisanty y Aguilar, A. G., (2006). La cuenca de México. Aspectos ambientales críticos y sustentabilidad, Fondo de Cultura Económica, México.

Ferrari, L., 2004. Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico: *Geology*, 32(1), 77-80.

Ferrari, L., Garduño, V., Pasquaré, G., Tibaldi, A., 1991. Geology of Los Azufres caldera, Mexico, and its relations with regional tectonics: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 47, 129-148.

Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Carrasco-Núñez, G., 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican volcanic belt: *Geology*, 27, 303-306.

Ferrari, L., Pasquaré, G., Venegas, S., Romero, F., 2000a. Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block, *en* Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J. (eds.), *Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico*: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, 334, 65-84.

Ferrari, L., Vaggelli, G., Petrone, C., Manetti, P., Conticelli, S., 2000b. Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, 318, 161-185.

Ferrari, L., López-Martínez, M., González-Cervantes, N., Jacobo-Albarrán, J., Hernández-Bernal, M. S., 2003a. Volcanic record and age of formation of the Mexico city basin, *en* Reunión Annual 2003, Resúmenes: GEOS, 23(2), 120.

Ferrari, L., Petrone, C., Francalanci, L., Tagami, T., Eguchi, M., Conticelli, S., Manetti, P., Venegas-Salgado, S., 2003b. Geology of the San Pedro-Ceboruco graben, western Trans-Mexican Volcanic Belt: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20, 165-181.

Ferrari, L., Rosas-Elguera, J., Orozco-Esquivel, M., Carrasco-Núñez, G., Norato-Cortez, T., 2005a. Digital geologic cartography of the Trans-Mexican Volcanic Belt and adjoining areas: *Digital Geosciences*, Universidad Nacional Autónoma de México, 1 mapa, 2 p. texto.

Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, M. T., Petrone, C., Jacobo-Albarrán, J., López-Martínez, M., 2005b. Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: the Eastern Alkaline Province revisited: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 146, 284-306.

Figuroa Vega, G.E., 1989. Mecanismos de producción de grietas inducidos por la explotación del agua subterránea. *Academia Mexicana de Ingeniería. Alternativas Tecnológicas* 29, 371-378.

Frey, H., Lange, R., Hall, C., Delgado-Granados, H., 2004. Magma eruption rates constrained by ⁴⁰Ar/³⁹Ar chronology and GIS for the Ceboruco-San Pedro volcanic field, western Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 116, 259-276.

Fries, C., Jr., 1960. Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 60, 236 p.

Fries, C., Jr., 1962. Resumen de la Geología de la Hoja Pachuca, Estados de Hidalgo y México. Hoja Pachuca 14 Q-c (11) Esc. 1:100 000. Inst. Geol., UNAM, México, D.F.

Fries, C., Jr., 1966. Resumen de la Geología de Cuernavaca, Estado de Morelos, Hoja Cuernavaca 14 Q-h (8), Esc. 1:100 000. Inst. Geol. UNAM, México, D.F.

García, A., Macías, J.L., Saldaña, J.L., Espíndola, J.M., 1996. Marco geológico estructural de la región del Nevado de Toluca, Estado de México: *Actas INAGEQ*, v. 2, p. 115-120.

García-Palomo, A., Macías, J., Tolson, G., Valdez, R., Mora-Chaparro, J., 2002. Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Transmexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional*, 41, 133-150.

García-Palomo, A., Zamorano, J.J., Lopez-Miguel, C., Galván-García, A., Ortega, R., Macías, J.L., 2008. El arreglo morfoestructural de la Sierra de las Cruces, México Central, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, año/vol. 25, número 001 Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 158-178.

Gastil, G., Jensky, W., 1973. Evidence of strike-slip displacement beneath the Trans-Mexican Volcanic Belt, *en* Kovach, R. L., Nur, A. (eds.), *Proceedings of the Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Fault System*: Stanford, CA, Stanford University Publications, Geological Sciences, 13, 171-180.

Geyne, R. V., C. Fries, Jr., K. Segerstrom, F. R. Black y F. I. Wilson, 1963. Geología y Yacimientos Minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, Méx., CRNR, México, D.F.

Gilbert, C., Mahood, G., Carmichael, I., 1985. Volcanic stratigraphy of the Guadalajara area, Mexico: *Geofísica Internacional*, 24, 169-191.

Gómez-Tuena, A., Carrasco-Núñez, G., 2000. Cerro Grande Volcano: The evolution of a Miocene stratocone in the Early Transmexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, 318, 249-280.

Gómez-Tuena, A., LaGatta, A., Langmuir, C., Goldstein, S., Ortega-Gutiérrez, F., Carrasco-Núñez, G., 2003. Temporal control of subduction magmatism in the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: mantle sources, slab contributions and crustal contamination: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(8), doi:10.1029/2003GC000524, 1-33. Disponible en línea.

Gunn, B.M., Mooser, F., 1970. Geochemistry of the volcanics of Central Mexico: Bulletin of Volcanology, 34, 577-616.

Gutiérrez Castorena, M. del C., Stoops, G., Ortiz Solorio, C. A., López Avila, G. L., 2005. Amorphous silica materials in soils and sediments of the Ex-Lago de Texcoco, México: An explanation for its subsidence. Catena 60: 205-226.

Hasenaka, T., Carmichael, I., 1985. The cinder cones at Michoacan-Guanajuato, central Mexico: their age, volume, and distribution, and magma discharge rate: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 25, 105-124.

Hibbard, C. W., 1955. Pleistocene Vertebrates from the Upper Becerra Formation, Valley of Tequexquiac, México, with notes on other Pleistocene forms. Univ. Michigan. Contr. Mus. Paleontology, 12, 5, 47-96.

Hiriart, F., Marsal, R. J., Cruickshank, G. y Key, F., 1952. Contribución de la comisión Federal de Electricidad a la solución del problema de abastecimiento de agua a la Ciudad de México. Comisión Federal de Electricidad.

Holzer, T. L., 1984. Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment. Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology VI: 67-105.

Holzer, T. L. and Davis, S. N., 1976. Earth fissures associated with watertable declines (abs.). Geological Society of America: 8(6):923-924.

Humboldt, A.v., 1849. Cosmos: Londres, Henry G. Bohn Ltd., v. 1, 390 p.

Irwin, G.R. (1957). "*Fracture mechanics*", Journal of Applied Physics, 24, p. 361.

Jacobo-Albarrán, J., 1986. Estudio petrogenético de las rocas ígneas de la porción central del Eje Neovolcánico: México, D. F., Instituto Mexicano del Petróleo, Subdirección de Tecnología de Exploración, Reporte Interno, 47 p.

Jaeger, J. (1956). "Elasticity, fracture and flow with engineering and geological applications", John Wiley and Sons, Inc. New York, USA.

Johnson, C., Harrison, C., 1989. Neotectonics in central Mexico: Physics of the Earth and Planetary Interiors, 64, 187-210.

Johnson, C.A., y Harrison, C.G.A., 1990. Neotectonics in central Mexico: Physics of Earth and Planetary Interiors, v. 64, p. 187 -210.

Juárez Badillo, E., 1962. Mecanismos de grietas de tensión en el Valle de México. Tesis doctoral, UNAM. México.

Juárez Badillo, E. (1991). "*Grietas por fuerzas de filtración*", Memoria, Simposio sobre agrietamiento de suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., pp. 39-42.

Juárez Badillo., E. y Figueroa Vega, G. E., 1984. Stresses and displacements in an aquifer due to seepage forces (one dimensional case). Journal of Hydrology 73: 259-288.

Juárez Luna, G., Rangel Núñez, J. L., Ayala Milán A. G., Romo Organista, M. P., 2002. Modelado del fracturamiento en las arcillas del Valle de México. Memorias de la XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos 1: 183-192. ISBN 968-5350-09-04.

Kreitler, Ch. W., 1976. Faulting and land subsidence from groundwater and hydrocarbon production, Houston-Galveston, Texas, U.S.A. Second IASH, California. No. 121, 435.

Kreitler, C. W., 1977. Fault control of subsidence, Houston, Texas. Ground Water 15 (3): 203-214.

Lambert, W., 1986. Descripción preliminar de los Estratos de Tefra de Tlapacoya, En: J. L. Lorenzo y L. Mirambell, 35 000 años de Historia del Lago de Chalco. INAH. SEP.

Lange, R., Carmichael, I., 1990. Hydrous basaltic andesites associated with minette and related lavas in western Mexico: Journal of Petrology, 31, 1225-1259.

Lange, R., Carmichael, I., 1991. A potassic volcanic front in western Mexico: the lamprophyric and related lavas of San Sebastian: Geological Society of America Bulletin, 103, 928-940.

Larson, M. K., 1984. Potential for subsidence fissuring in the Phoenix Arizona USA area. Third IAHS. Venice, Italy. No. 151: 291-299.

Ledesma-Guerrero, O., 1987. Resumen de la Geología de Calpulapan, Estados de Hidalgo, México y Tlaxcala. Hoja Calpulapan 14 Q-h (3), Esc. 1 : 100 000. Inst. Geol., UNAM, México, D.F.

Lesser I., J.M.; Cortés P., M.A.; 1998. El hundimiento del terreno de la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema drenaje. *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XIII, n. 3, 13–18 p.

Limbrey, S., 1986. Análisis de Suelos y Sedimentos. *En*: J. L. Lorenzo y L. Mirambell, 35 000 años de Historia del Lago de Chalco, INAH, SEP.

Loeblich and Tappan, 1964. *En*: R. C. Moore, Treatise of Invertebrate Paleontology, Part C, Protista 2, Sarcadina. *Geol. Soc. Am. Y Univ. Kansas Press*, 1 y 2, 900 pp.

Lozano-Barraza, L., 1968. Geología de la Sierra de Guadalupe, México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Tesis Profesional, 39 p. (Inédita).

Lugo Hubp J., Pérez Vega A., Rojas Salas M., 1991. Formación de grietas en la margen del antiguo lago al oriente de la cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 30 (2): 87-95.

Lugo Hubp, J., y Salinas Mntes, A., 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*, volumen 13, número 2, 1996, p. 240-251.

Marín-Córdova S. et al. (1986). Sistemas mayores de fallamiento en la Cuenca de México y su relación con la sismicidad. Resúmenes de la VIII Convención Geológica Nacional; México, D. F. p. 209-211.

Márquez, A., Verma, S.P., y Anguita, F., 1997. Tectonics and volcanism of Sierra de Chichinautzin—a rift-related volcanic-field at the front of the central Trans-mexican volcanic belt, in Abstract volume. Volcanic activity and the environment. General Assembly IAVCEI: Puerto Vallarta, Jalisco: Guadalajara, Jalisco, Gobierno del Estado de Jalisco, Unidad Editorial IAVCEI Abstract Programs, p. 143.

Márquez, A., Verma, S., Anguita, F., Oyarzun, R., Brandle, J., 1999c. Tectonics and volcanism of Sierra Chichinautzin: extension at the front of the central transmexican volcanic belt: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 93, 125-150.

Marsal, R.J., 1992. El Hundimiento de la Ciudad de México. El Colegio Nacional, México, 71 p.

Marsal, R. J. y Mazari, M. 1959. El subsuelo de la Ciudad de México. Instituto de Ingeniería. U.N.A.M.

Martín-Del Pozzo, A., 1982. Monogenetic volcanism in Sierra Chichinautzin, Mexico: *Bulletin of Volcanology*, 45, 9-24.

Mazari-Hiriart, M, Hernández-Eugenio, C., Rojo-Callejas, F., Lozano-Santacruz, R., 2000. Vertical variability of PCE sorption in the lacustrine clays of Mexico City. *Environmental Geology* 39(6), 595-602.

Mesri G., Rokhse A. y Bonor B. F., 1976. Compositive and compressibility of typical samples of Mexico City, *Geotechnique* 25(3), 527-554.

Moore, G., Marone, C., Carmichael, I., Renne, P., 1994. Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, 106, 383-394.

Mooser, F., 1963. Historia tectónica de la Cuenca de México: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 15, 239-45.

Mooser, F., 1972. The mexican volcanic belt structure and tectonics: *Geofísica Internacional*, 12, 55-70.

Mooser, F., 1975. Historia Geológica de la Cuenca de México, *en Memoria de las Obras de Drenaje Profundo del Distrito Federal: México D.F., Departamento del Distrito Federal*, 38 p.

Mooser F., 1978. Geología del Relleno Cuaternario de La Cuenca de México. *In: Simposio. El subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el área Urbana del Valle de México*. Valdes-Llamas, P. (Editora). Sociedad mexicana de mecánica de suelos, pp 9-13.

Mooser, F., Nairn, A. E. M., Negendank, J. F.W., 1974. Palaeomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks; VIII. A palaeomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico: *Geologische Rundschau*, 63, 451-483.

Mooser, F., Montiel A., y Zúñiga A., 1992. Nuevo Mapa geológico del sur-poniente del Valle de México: Simposio Experiencias geotécnicas en la zona poniente del Valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas, p. 5-15.

Mooser, F., Montiel, A., Zúñiga A., 1996. Nuevo mapa geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla: estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos: México, Comisión Federal de Electricidad. México, 27 p.

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 Mexico? -a preliminary K-Ar dating and palaeomagnetic study: *Geofísica Internacional*, 30, 61-70.

Murillo, R. 1978. Ex Lago de Texcoco. En: El subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el área Urbana del Valle de México, Simposio. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos México, p.51-82.

Murillo-Fernández, R., 1990. Sobreexplotación del acuífero de la cuenca del Valle de México: efectos y alternativas: En: El subsuelo de la cuenca del Valle de México y su relación con la Ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, p.109-118.

Nakamura, K., 1977. Volcanoes as Possible Indicator of Tectonic Stress Orientation Principle and Proposal. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* (Holanda) 2, 1-16.

Nieto-Obregón, J., Delgado-Argote, L., Damon, P., 1981. Relaciones petrológicas y geocronológicas del magmatismo de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico en Nayarit, Jalisco y Zacatecas, *en XIV Convención Nacional, Memoria Técnica*, México, Asociación Ingenieros Mineros, Metalúrgicos y Geólogos de México, 327-361.

Nixon, G. T., 1989. The geology of Iztaccíhuatl Volcano and adjacent areas of The Sierra Nevada and Valley of Mexico: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, (219), 58 p., 1 mapa.

Nixon, T. G., A. Demant, R. L. Armstrong, J. E. Harakal, 1987. K-Ar and Geologic Data Bearing on the Age and Evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt, Part 3ª (Ed. S. P. Verma), Vol. 26, 1, 109-158.

Ohtsubo, M., Takayama, M. y Egashira, K., 1983. Relationships of consistency limits and activity to some physical and chemical properties of Ariake marine Clays. *Soils and foundations*. 23 (1): 38-46.

Ordoñez, E., 1985. Las rocas eruptivas del Suroeste de la Cuenca de México: Instituto Geológico de México, Boletín 2, 46 p.

Orozco, J. M. y Figueroa V., G., 1991. Descripción cronológica del desarrollo de los conocimientos sobre el agrietamiento de terrenos. *Agrietamiento de suelos, Soc. Mex. Mec. de Suelos*, 1-12.

Osete, M., Ruiz-Martínez, V., Caballero, C., Galindo, C., Urrutia-Fucugauchi, J., Tarling, D., 2000. Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de las Cruces, Mexico: paleomagnetic and radiometric evidence: *Tectonophysics*, 318, 201-215.

Pardo, M., Suárez, G., 1993. Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco Block in western Mexico: *Geophysical Research Letters*, 20, 2391-2394.

Pardo, M., Suárez, G., 1995. Shape of the subducted Rivera and Cocos plate in southern Mexico: Seismic and tectonic implications: *Journal of Geophysical Research*, 100, 12357-12373.

Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V., Tibaldi, A., Vezzoli, L., 1991. Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan: Boulder, CO, Geological Society of America, Map and Chart Series MCH072, 1 mapa con texto, 22 p.

PEMEX, 1988. Cortes Litológicos y registros geofísicos de los pozos profundos exploratorios Roma-1, Mixhuca-1, Tulyehualco-1 y Coipilco-1. Información Consultada en la Fundación J. Barros Sierra, A.C., México, D.F.

Peralta y Fabi, R., 1989. Sobre el origen de algunas propiedades mecánicas de la formación arcillosa superior del Valle de México. Simposio sobre Tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México.

- Pérez-Cruz, G., 1988. Estudio Sismológico de Reflexión del Subsuelo de la Ciudad de México. Tesis de M.I. Inédita. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Pérez-Venzor, J. A., Aranda-Gómez, J. J., McDowell, F. W., Solorio Munguía, J. G., 1996. Geología del Volcán Palo Huérfano, Guanajuato, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(2), 174-183.
- Poland, J. F., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal. UNESCO. 304 p.
- Pradal, E., Robin, C., 1994. Long-lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, 201-215.
- Righi, D. and Meunier, A., (en Velde, B., 1995). Origin of Clays by rock weathering and soil formation, 43-157.
- Richter, K., Carmichael, I., 1992. Hawaiiites and related lavas in the Atenguillo graben, western Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, 104, 1592-1607.
- Richter, K., Carmichael, I., Becker, T., Renne, R., 1995. Pliocene to Quaternary volcanism and tectonics at the intersection of the Mexican Volcanic Belt and the Gulf of California: *Geological Society of America Bulletin*, 107, 612-626.
- Robin, C., 1984. Le volcan Popocatepetl (Mexique): structure, évolution pétrologique et risques: *Bulletin of Volcanology*, 47, 1-23.
- Robin, C., Cantagrel, J., 1982. Le Pico de Orizaba (Mexique). Structure et evolution d' un grand volcan andésitique complexe: *Bulletin of Volcanology*, 45, 299-315.
- Robin, C., C. Boudal, 1987. A Gigantic Bezymianny-Type Event at the Beginning of Modern Volcano Popocatepetl. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 31, 115-130.
- Robin, C., Mossand, C., Camus, G., Cantagrel, J., Gourgaud, A., Vincent, P., 1987. Eruptive history of the Colima volcanic complex: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31, 99-114.
- Rojas González, E., Arzate Flores, J., Arroyo, M., 2002. A method to predict the group fissuring and faulting caused by regional groundwater decline. *Engineering Geology*, 65, 245-260.
- Romero Miranda E. L., 2011. Importancia de las fracturas en diferentes aplicaciones de la Geología. Tesis de Licenciatura. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Romero-Terán, E, 2001. Geología del Complejo Volcánico San Miguel al sur-poniente de la Cuenca de México: México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México Posgrado en Ciencias de la Tierra, tesis de maestría, 63 p.
- Rosas-Elguera, J., Alva-Valdivia, L., Goguitchaichvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Ortega-Rivera, M. A., Archibald, D., 2003. Counterclockwise rotation of the Michoacan block: implications for the tectonics of western Mexico: *International Geology Review*, 45, 814-826.
- Rossotti, A., Ferrari, L., López-Martínez, M., Rosas-Elguera, J., 2002. Geology of the boundary between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt in the Guadalajara region, western Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19, 1-15.
- Saarenketo, T., 1998. Electrical properties of water in clay and silty soils. *J. of Applied Geophysics* 40: 73-88.
- Sandoval, J. P., and Bartlett, S.R., 1991. Land subsidence and earth fissuring on the central Arizona Project. IAHS. Houston, Texas. No. 200: 249-260.
- Santoyo V. E., (2005). Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México, TGC.
- Schlaepfer, C.J., 1968. Hoja México 14Q-h(5), con resumen de la geología de la hoja México, Distrito Federal, Estado de México y Morelos: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, Serie de 1:100,000, 1 mapa con texto al reverso.
- Schumann, H.H., and Poland, J. F., 1969. Land Subsidence, Earth Fissures and Groundwater withdrawal in South-Central Arizona, U.S.A.. First Symposium IASH-UNESCO, Tokio, 295-302.

- Segerstrom, K., 1961. Geología del SW del Estado de Hidalgo y del NE del Estado de México. *Bol. Asoc. Méx. Geol. Petrol.* XIII, 3 y 4.
- Segerstrom, K., 1962. Geology of south-central Hidalgo and northeastern Mexico: United States Geological Survey Bulletin, 1104-C, 87–162.
- Sheridan, F. M., 1979. Emplacement of Pyroclastic Flow: A Review. *Geol. Soc. Amer.*, Special Paper 180, 125-136.
- Sheridan, F. M., H. K. Wholetz, 1983. Hydrovolcanism: Basic Considerations and Review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 17, 1-29.
- Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., Abrams, M., 2004b. Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: implications for archaeology and future hazards: *Bulletin of Volcanology*, 66, 203-225.
- Siebert, L., Carrasco-Núñez, G., 2002. Late-Pleistocene to precolumbian behind-the-arc mafic volcanism in the eastern Mexican Volcanic Belt; implications for future hazards: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, 179-205.
- Singer F. & Pytel, A. (1980). "*Strength of materials*" Harper and Row Publishers Inc. , USA
- Steele, K. W., 1971. Paleomagnetic Directions from the Iztaccihuatl Volcano. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 11, 211-218. North Holland Publishing Co.
- Suter, M., Quintero, O., López, M., Aguirre, G., y Farrar, E., 1995. The Acambay graben–active intra-arc extension in the Trans-Mexican volcanic belt, Mexico: *Tectonics*, v. 14, p. 1,245-1,262.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M., López-Martínez, M., Farrar, E., 1995a. The Aljibes half-graben - Active extension at the boundary between the trans-Mexican volcanic belt and the Basin and Range Province, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 107(6), 627-641.
- Suter, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., Carrillo-Martínez, M., 2001. Quaternary intra-arc extensión in the central Trans-Mexican volcanic belt: *Geological Society of America Bulletin*, 113(6), 693-703.
- Trejo M., A. y Bani M., A., 1991. Agrietamiento de suelos en la zona de Querétaro. En "Agrietamiento de Suelos". *SMMS*, 67-74.
- Trujillo-Candelaria, J.A., 1977. Posibilidades acuíferas en sedimentos continentales terciarios de la República Mexicana: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 38(2), 34-51.
- Trujillo Candelaria, J. A., 1989. Fallamiento de terrenos en Celaya, Gto. *Academia Mexicana de Ingeniería. Alternativas Tecnológicas* 29, 367-369.
- Tuckwell, G. W., Lonergan, L, and Jolly, R. J., 2003. The control of stress history and flaw distribution on the evolution of polygonal fracture networks. *J. of Structural geology* 25: 1241-1250.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Del Castillo, L., 1977. Un modelo del Eje Volcánico Mexicano: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 38, 18-28.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Böhnel, H., 1987. Tectonic interpretation of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, 138, 319-323.
- Valdez-Moreno, G., Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., 1998. El Volcán La Joya, Edos. de Querétaro y Guanajuato. Un estratovolcán antiguo del cinturón volcánico mexicano: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15(2), 181-197.
- Vázquez-Sánchez, E., y Jaimes-Palomera, R., 1989. Geología de la Cuenca de México: *Geofísica Internacional*, v. 28, p. 133-189.
- Velde, B., 1995. Origin and Mineralogy of Clays. *Clays and the environment*. Springer-Verlag.
- Venegas, S., Herrera, F., Maciel, R., 1985. Algunas características de la Faja Volcánica Mexicana y sus recursos geotérmicos: *Geofísica Internacional*, 24, 97-157.

Verma, S., López-Martínez, M., Terrell, D., 1985. Geochemistry of Tertiary igneous rocks from Arandas-Atotonilco area, northeast Jalisco, Mexico: *Geofísica Internacional*, 24, 31-45.

Verma, S., Carrasco-Núñez, G., 2003. Reappraisal of the geology and geochemistry of Volcán Zamorano, central Mexico: implications for discriminating the Sierra Madre Occidental and Mexican Volcanic Belt provinces: *International Geology Review*, 45, 724-752.

Von Humboldt, A., 1808. *Essai politique sur le Royaume de la Nouvelle Espagne*: Paris, F. Shoell, 904 p.

Wada, K., 1987. Minerals formed and mineral formation from volcanic ash by weathering. *Chemical Geology* 60, 17-28.

Wallace, P., Carmichael, I., 1989. Minette lavas and associated leucitites from the western front of the Mexican Volcanic Belt: petrology, chemistry and origin: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103, 470-492.

Warren, C.J., and Rudolph, D.L., 1997. Clay minerals in basin of Mexico lacustrine sediments and their influence on ion mobility in groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology* 27, 177-198.

Wesley, L.D., 2001. Consolidation behaviour of allophane clays. *Géotechnique* 51(10), 901-904.

White, S. E., 1956. Probable Substages of Glaciation on Iztaccíhuatl, México. *J. Geol.* 64, 289-295.

Zeevaert, L., 1953. Estratigrafía y problemas de ingeniería en los depósitos de arcilla lacustre de la Ciudad de México. *Memoria del Congreso Científico Mexicano Vol. 5*: 58-70.

Zepeda-Garrido J.A. 1992. Naturaleza de los Suelos Expansivos. *In: Curso internacional de mecánica de suelos arcillosos*. Zepeda-Garrido A. (Editor). Universidad Autónoma de Querétaro y Universidad Laval de Canadá, pp 11-19.