



6

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

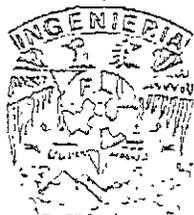
FACULTAD DE INGENIERÍA.

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA.

“DETERMINACIÓN DE ZONAS DE RIESGO
GEOLÓGICO-AMBIENTAL EN LA CUENCA DE
MÉXICO MEDIANTE SENSORES REMOTOS Y
RADAR DE PENETRACIÓN SOMERA”.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO
P R E S E N T A:
OSCAR DÍAZ MOLINA.

DIRECTOR DE TESIS:
DR. RENE E. CHAVEZ SEGURA
DR. ENRIQUE CABRAL CANO





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-1451

SR. OSCAR DIAZ MOLINA
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. René E. Chávez Segura y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

DETERMINACION DE ZONAS DE RIESGO GEOLOGICO-AMBIENTAL EN LA CUENCA DE MEXICO MEDIANTE SENSORES REMOTOS Y RADAR DE PENETRACION SOMERA

- I INTRODUCCION
- II CUENCA DE MEXICO
- III MAPA DE PELIGROS Y RIESGOS GEOLOGICO-AMBIENTALES
- IV PROCESAMIENTO DE IMAGENES DE SATELITE
- V GRAVIMETRIA DE LA CUENCA DE MEXICO
- VI LA DELEGACION IZTAPALAPA UN EJEMPLO DE RIESGO
- VII PERFILES DE RADAR DE PENETRACION TERRESTRE
- VIII CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

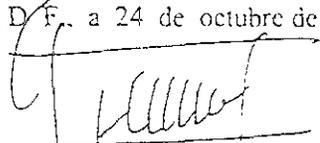
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D. F., a 24 de octubre de 2000

EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB-RI LR*gtg
1

In memoriam

José Anastacio Esteban Díaz Muñoz (Tacho)

La vida eterna solo se logra cuando nuestras acciones logran trascender después de morir, y cuando podemos seguir siendo parte de la vida de nuestros seres queridos.

Ahora me doy cuenta de que nuestro amor y unión radican, precisamente, en lo grande de nuestras diferencias.

Gracias por enseñarme a trabajar, por formar en mí a un hombre orgulloso de su familia y origen; con el carácter de enfrentar a la vida sin temores.

Por que mientras tu forma de hablar, tu forma de ser, tus dichos y el trabajo sean parte de mi vida, nunca dejaras de estar en mi corazón.

Dedicatoria.

A mi madre:

Yolanda Molina Chamorro

A quien presento este trabajo con todo mi amor y respeto, como resultado del amor, trabajo y ejemplo que me ha dado. Gracias por haberme dado, junto con mi padre, la mejor herencia que pudiese haber recibido, el estudio.

A mi hermano:

Federico Díaz Molina

Quien es para mi un ejemplo, y a quien le debo mucho de lo que he logrado. Gracias por todos aquellos momentos tan felices que compartimos.

Mi amor y cariño para ambos, quienes han soportado la lejanía de un ser querido.

Agradecimientos

Por medio de estas líneas quiero agradecer a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a la realización del presente trabajo, a mi formación profesional y personal.

Muy en especial a los Drs Enrique Cabral Cano y René E. Chávez Segura quienes tuvieron la amabilidad y confianza de dirigir esta tesis. Por su excepcional entrega y dedicación en la realización de este trabajo de investigación.

A mis sinodales el Ing. Alejandro Arroyo Carrasco, Dra. Leticia Flores Marquéz e Ing. Gerardo Cifuentes Nava por sus comentarios y tiempo dedicado en la revisión de este trabajo.

Al Departamento de Exploración y Geomagnetismo del Instituto de Geofísica, por los recursos prestados en la elaboración de este proyecto. Al personal del mismo, en especial al Ing. Francisco Corra Mora.

A mis compañeros de generación con quien he compartido algo más que cursos. A mis amigos Edgar, Misael, Guillermo, Ricardo y Enrique por brindarme su amistad y por el gran equipo que formamos durante la carrera.

Muy en especial al Sr. López y su familia, por abrirme las puertas de su hogar, que con su calidez y cariño hicieron sentirme parte de su familia.

A mis Abuelos, tíos y primos con quienes he compartido.

Es algo sorprenderte lo fácil que
resulta pasar por alto lo evidente.

Julio Arturo Newland.

Resumen	3
Capítulo I. Introducción.	4
Capítulo II. Cuenca de México.	6
II.1 Marco Geográfico Regional	6
II.2 Marco Geológico Regional	8
II.3 Geología Histórica	8
II.4 Tectónica	10
II.5 Estratigrafía	11
II.6 Zonificación Geotécnica	16
II.7 Sismicidad Local	18
II.8 Problemática de la Ciudad de México	19
II.8.1 Crecimiento Demográfico	19
II.8.2 Abastecimiento de Agua	23
Capítulo III. Mapa de Peligros y Riesgos Geológico-Ambientales.	25
III.1 Peligro Volcánico	27
III.2 Riesgo Sísmico	29
Capítulo IV. Procesamiento de Imágenes de Satélite.	33
IV.1 Espectro Electromagnético	33
IV.2 Curvas Espectrales	35
IV.3 Sensores Satelitales	36
IV.4 Características del Sistema Landsat Thematic Mapper (TM)	37
IV.5 Correcciones Geométrica y Atmosférica	38
IV.6 Composiciones de Falso Color y Color Real	40
IV.7 Cocientes de Banda e Índices de Vegetación	42
IV.8 Análisis Multivariado	43
IV.9 Clasificación No Supervisada	50
IV.10 Clasificación Supervisada	51
Capítulo V. Gravimetría de la Cuenca de México.	54
V.1 Antecedentes	54
V.2 Anomalía de Bouguer	54
V.3 Separación Regional Residual y Estimación del Basamento	56

Capítulo VI. La Delegación Iztapalapa un Ejemplo de Riesgo.	61
VI.1 Caracterización Geológica y Geográfica	61
VI.3 Caracterización de Zonas de Riesgo Geológico-Ambiental	64
VI.3.1 Mecanismos de Fracturamiento	64
VI.3.2 Urbanismo de Iztapalapa	66
Capítulo VII. Perfiles de Radar de Penetración Terrestre (GPR).	68
VII.1 Introducción	68
VII.2 Profundidad de Penetración, Transmisión y Reflexión de la Señal Electromagnética	69
VII.3 Levantamiento	70
VII.4 Procesamiento de Perfiles de GPR	72
VII.4.1 Corrección Estática	73
VII.4.2 Filtrado	74
VII.4.3 Migración	75
VII.5 Resultados	76
Capítulo VIII. Conclusiones.	81
Bibliografía	85
Anexo Láminas	89

Resumen

Mediante técnicas de sensores remotos aplicadas a imágenes de satélite Landsat Thematic Mapper TM (1985 y 1991), fue posible la obtención de una clasificación del uso de suelo de la Ciudad de México. Con el fin de determinar el incremento y velocidad de cambio del área urbana para el Distrito Federal (D.F.) en los periodos 1985-1991. Las imágenes TM (bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7) fueron pre-procesadas y procesadas para intensificar las respuestas espectrales de los diferentes usos de suelo. Los productos procesados que fueron obtenidos incluyen: composiciones en color real, composiciones de falso color, índice normalizado de vegetación y componentes principales. Por otra parte, mediante el método de ventanas propuesto por Dimitriadis (1987) para el cálculo del espectro de potencia radial, mediante una ventana cuadrada, fue posible la estimación y caracterización del basamento del sur de la Cuenca de México, para su correlación con los eventos sísmicos locales derivados de la red sísmica del Valle de México.

Además de la caracterización de las fracturas presentes, mapeadas mediante estudios anteriores, en el área del Peñón del Marqués y zonas aledañas; se realizaron una serie de perfiles de Radar de Penetración Terrestre (GPR) en la colonia Ejercito de Oriente, con el fin de localizar y caracterizar las fracturas superficiales que han causado daños en diversas obras de infraestructura.

A través de mapas de elementos Bajo Riesgo y Peligro por densidad de fracturamiento fue posible establecer un mapa de riesgo cualitativo, en el que se aprecia la clara diferencia entre los conceptos de Riesgo y Peligro Geológico-Ambiental. Estos mapas tienen el fin de determinar y encausar acciones para la mitigación de daños en las áreas con mayor Riesgo Geológico-Ambiental.

Capítulo I. Introducción

El acelerado crecimiento urbano provoca tremendas transformaciones ambientales, que contribuyen a aumentar la vulnerabilidad y generan las condiciones para la generación de desastres. Las zonas más vulnerables son aquellas que congregan elementos a riesgo: personas, viviendas e infraestructura; es decir asentamientos humanos en general y asentamientos económicamente débiles y altamente poblados. Es posible llegar a evaluar los costos-beneficios relacionados con el uso de suelo sujetos a riesgo. El buen conocimiento del medio, obtenido con estudios geológicos y geofísicos, constituye la premisa fundamental para evaluar el riesgo geológico.

Cabe mencionar que la población se muestra más preocupada por la ocurrencia de los fenómenos naturales que por el impacto de los eventos que pueden desencadenar desastres (Salazar, 1996). Esto posiblemente debido al desconocimiento del funcionamiento de los ecosistemas aprovechables, y por la seguridad de la población, en la falacia, de que en el espacio ocupado por las ciudades no han propiciado ningún cambio importante en el medio. Por el contrario, al realizar una evaluación de los impactos y peligros que se han originado por el cambio de uso de suelo, se muestra que en muchos casos el riesgo por fenómenos naturales o por las actividades antrópicas (Riesgos Geológico-Ambientales) es muy alto.

Es claro que los trabajos que se lleven a cabo para minimizar los riesgos de desastres urbanos, tienen que estar respaldados por una sólida administración del medio ambiente con programas de desarrollo. Por ejemplo, las evaluaciones de riesgo deben ser llevadas a cabo como parte del planteamiento de los proyectos de vivienda, transporte, energía, agricultura, etc.; en donde los elementos a riesgo puedan ser identificados y protegidos, mediante zonificaciones de uso de suelo, para poder reducir la vulnerabilidad de la sociedad ante los peligros. Lo anterior implica que la evaluación del cambio de uso de suelo es una importante herramienta en la planeación de programas de desarrollo.

Los desarrollos en sensores remotos permiten obtener una visión sinóptica de la evolución temporal del uso de suelo. Mediante procesos de clasificación supervisada y no supervisada, utilizando imágenes Landsat TM (1985 y 1991), se obtuvo el uso de suelo de la Ciudad de México; las imágenes TM (bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7) fueron procesadas para intensificar las respuestas espectrales de los diferentes usos de suelo.

Además, estas técnicas de sensores remotos fueron aplicadas en imágenes gravimétricas, para poder obtener una estimación del basamento de la parte sur de la Cuenca de México, con el fin de poder correlacionar esta información con los peligros geológicos-ambientales que ocurren en la Ciudad de México.

Con el fin de poder localizar fracturas en el área de estudio así como determinar la magnitud de algunas de ellas, que son visibles en superficie, se realizó un estudio de Radar de Penetración Terrestre (GPR). La técnica de GPR es un método que permite la evaluación del subsuelo sin la destrucción del medio, por lo que se traduce en una técnica segura y eficiente para el mapeo de fracturas superficiales. Lo anterior en virtud de que a finales de la década de 1960 en diversas zonas de la Delegación Iztapalapa y en otras partes de la Ciudad de México, se han reportado fracturas, las cuales afectan diversas obras de infraestructura, tales como áreas residenciales, escuelas, tuberías y vías de comunicación. Por esto es necesario contar con la mayor información posible sobre los mecanismos y eventos que dan origen a las fracturas, así como establecer estudios geofísicos que nos permitan su localización y caracterización. El estudio fue realizado con un equipo GSSI-SIR-2 con una antena de 200 MHz, con la que se realizaron 8 perfiles con una longitud total de 1945 m; mediante el cual fue posible la localización y caracterización de fracturas.

Capítulo III. Cuenca de México

III.1 Marco Geográfico Regional

La Cuenca de México se encuentra ubicada dentro de la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Mexicana (FVM), entre $98^{\circ} 30'$ - $99^{\circ}30'$ de longitud Oeste y, $19^{\circ}00'$ - $20^{\circ}15'$ de latitud Norte. La FVM es una cadena de montañas constituidas por lavas y materiales piroclásticos, que cruza transversalmente a la República Mexicana a la altura del paralelo 20° .

La Cuenca de México (Figura 2.1) es una altiplanicie que se encuentra limitada por sierras volcánicas entre las cuales destacan los volcanes Popocatepetl (5442 m) y el Iztaccíhuatl (5286 m), cubre una extensión aproximada de 9600 km^2 , que se distribuye en cinco estados (estado de México, Hidalgo, Distrito Federal, Tlaxcala y Puebla) y se ubica a una altitud de 2000 m s.n.m.(SARH, 1963).

La Cuenca de México se encuentra limitada en la parte sur por las Sierras del Ajusco y de Chichinautzin. La Sierra Nevada, donde sobresalen los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, forma el límite sureste; le sigue la Sierra de Río Frío, de Calpulalpan y la del Tepozán que forman el límite este; el norte lo forman las Sierras de Pachuca y de Tezontlalpan; por el noroeste se continúa con la Sierra de Tepotzotlán; a partir de esta se encuentran las Sierras de Monte Bajo y Monte Alto y la de las Cruces que forman el límite oeste y sudoeste respectivamente, con la que se cierra la Cuenca de México (Figura 2.1). Dentro de la Cuenca de México sobresalen las protuberancias de la Sierra Santa Catarina, el Peñón de los Baños, el Peñón del Marqués y el Cerro de la Estrella, la Cuenca se encuentra parcialmente separada por la Sierra de Guadalupe y de Patlachique.

En la Cuenca de México se presentan cuatro tipos de climas que son:

- a) Templado subhúmedo (C(w)), con lluvias en verano, temperatura media anual de 12° a 18° C, grado de humedad intermedio, temporada lluviosa en verano, precipitación total anual que va de menos de 600 mm en el noroeste a menos de 1500 mm en la porción Occidental, siendo muy propicio para el desarrollo de asentamientos humanos.
- b) Semifrío subhúmedo (C(E)(w)), con lluvias en verano, grado de humedad alto y temporada lluviosa en el verano, temperatura media anual entre 5° y 12° C y precipitación total anual entre 1200 a menos de 1500 mm.
- c) Semifrío húmedo (C(E)(m)), con abundantes lluvias en verano, grado de humedad alto temperatura media anual entre 5° y los 12° y precipitación total anual menor de 600 mm.

III.2 Marco Geológico Regional

La Faja Volcánica Mexicana está caracterizada por un gran número de fallas y fracturas, que han controlado la formación de fenómenos volcánicos, dando origen a los grandes volcanes del país y a pequeños aparatos volcánicos; una gran cantidad de estos aparatos volcánicos, de composición andesítico-basáltica, se distribuyen en la Cuenca de México, por lo que la geología superficial consiste básicamente de rocas volcánicas, originadas en el Terciario Medio, así como de sedimentos de origen lacustre y aluvial (Gonzalez-Moran, T. 1992).

Se encuentran afloramientos de andesitas, dacitas y riodacitas del Mioceno, en las sierras de las Cruces y Nevada y en el Ajusco; basaltos y andesitas del Plioceno, en la sierra de Santa Catarina y recientemente rocas de composición basáltica hasta riodacítica, con intercalaciones de material piroclástico en la Sierra de Chichinautzin (Gonzalez-Moran, T. 1992).

Los depósitos aluviales, que se depositaron en el cuaternario, se encuentran en las laderas y se adelgazan hacia las márgenes de las llanuras; estos depósitos se encuentran sobreyaciendo productos piroclásticos y subyacen a los depósitos lacustres que forman la altiplanicie de la Cuenca. En la parte sur de la Cuenca, por la actividad volcánica del Chichinautzin, los depósitos lacustres se encuentran interdigitados con piroclastos y material lacustre (Gonzalez-Moran, T. 1992).

III.3 Geología Histórica

En la Cuenca de México afloran rocas que comprenden los periodos Cuaternario (1.6 Ma.) y Terciario (65 Ma.); sin embargo la historia geológica de la Cuenca de México se remota hacia el Cretácico (100 Ma.). Durante este periodo se depositaron sedimentos marinos calcáreos que al inicio del Terciario fueron plegados.

Según Mooser (1978), los siguientes procesos de formación de la Cuenca de México se pueden establecer en 6 etapas o fases. La primera de ellas se manifiesta en el basamento volcánico del Terciario Medio de la Cuenca, representado por la formación Xochitepec, formada por rocas de composición riodacítica a andesítica. A finales del Mioceno se forman las Sierras de Pachuca, de Guadalupe, del Patlachique y del Tepozán, que consisten en estrato-volcánes menores y medianos de composición andesítica y dacítica así como de domos esencialmente dacíticos.

El conjunto de estas sierras constituye el Grupo de las Sierras Menores y que forman la segunda fase de formación.

La tercera fase se desarrolla en el Plioceno Inferior y la constituyen las denominadas Sierras Mayores, que se ubican al Oeste y al Este de la Cuenca, estas sierras la constituyen la de las Cruces y la Sierra Nevada respectivamente. Estas sierras, esencialmente de lavas porfidoandesíticas, son el producto de numerosos estratovolcanes. La formación Tarango, consistente en piroclásticos depositados a los pies de estas sierras, es testigo de dicha actividad explosiva. Ambas, la Sierra de las Cruces y la Sierra Nevada, constituyen alineamientos dirigidos al NNW.

Durante la cuarta fase continúan erupciones en las cumbres de las grandes sierras, formando a menudo domos andesíticos y dacíticos. Al mismo tiempo se desarrolla la red fluvial (Red de Valles del Plio-Cuaternario) que drena entre el espacio de las dos sierras elevadas (Sierras Mayores) comprendido hasta Pachuca. Destacan un primer antiguo valle extenso, originado en las barrancas septentrionales de las lomas y en la Sierra de Guadalupe, este se une con los drenajes provenientes de las antiguas barrancas de Tacubaya y Becerra, y un drenaje que proviene probablemente del área de Cuauhtepic. Los drenajes anteriores tienen una correspondencia en el sur al oeste del Cerro de la Estrella que reúne las barrancas de Mixcoac, del Muerto, San Angel y la Magdalena Contreras, formando un segundo Paleovalle, el de Culhuacán. Resaltan otros valles antiguos debajo de la planicie de Texcoco que forman un sólo cauce profundo, que pasa al pie oriental del Cerro de la Estrella y se reúne finalmente con la salida del Paleovalle de Culhuacán.

La quinta fase se desarrolla hacia fines del Plioceno con el cambio del régimen tectónico, que produce fracturas en dirección W-E. Uno de los primeros productos de este vulcanismo fue probablemente el Cerro del Ajusco; la alineación de las fracturas es característica de la Sierra de Santa Catarina, y se repite en numerosas hileras de conos de Tezontle en las cumbres de la Sierra de Chichinautzin. Este tectonismo dio origen primero a andesitas, enseguida a andesitas basálticas y finalmente en el Cuaternario Superior abrió paso a los grandes volúmenes de basalto que construyeron la Sierra de Chichinautzin, con un volumen aproximado de 1000 km³ de lava. Esta sierra, caracterizada en la superficie por más de 120 conos cineríticos, cerró la Cuenca de México.

La sexta y última fase consiste en el desarrollo de grandes abanicos aluviales, que fueron produciendo potentes espesores de gravas y arenas. Las partes centrales de la Cuenca, alejadas de los bordes, fueron eventualmente llenándose con depósitos

limoarenosos, los cuales se interestratificaron con suelos y capas de ceniza y pómez provenientes de las erupciones volcánicas originadas principalmente en el sur. A medida que se rellenaba más y más en la Cuenca fueron apareciendo lagos, principalmente en las partes centrales bajas y en el sur.

El.4 Tectónica

Dentro de la Cuenca de México se distribuyen fracturamientos en tres direcciones preferenciales: NW, NE y ENE; que tienen su origen desde el Eoceno hasta la actualidad (Mooser, 1978).

FALLAS DEL EOCENO-OLIOGCENO TEMPRANO.

Durante el Eoceno Tardío y hasta el Oligoceno Temprano se producen fallamientos normales con desplazamiento lateral derecho de direcciones conjugadas N35°E y S40°W. La falla que tiene un rumbo noreste, por una distancia de más de 35 km, se encuentra sepultada por aluvión y por capas del Grupo Balsas. Una segunda falla ubicada al suroeste de Yautepec, Morelos, mantiene un rumbo hacia el noroeste por una distancia cuando menos de 15 km, siguiendo esta misma dirección por una distancia desconocida por debajo de rocas terciarias (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

FALLAS DEL OLIGOCENO TARDIO-MIOCENO TEMPRANO.

Este periodo se manifiesta por un fallamiento normal con rumbo N45°W y por una ligera inclinación de las capas del grupo Balsas (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

FALLAS DEL PLIO-CUATERNARIO.

En las sierras occidentales y orientales de la porción meridional de la Cuenca de México, como son las Sierras Nevada, de Río Frío y Chichinautzin; así como en las sierras de Guadalupe, Tepoztlán y en el cerro Chimalhuacán, existe una serie de fallas normales de dirección preferentemente Oeste-Este, con presencia de un sistema conjugado de dirección promedio N55°E (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

La alineación de conos volcánicos, como los cerros de La Estrella, del Peñón Viejo y de Chimalhuacán se ubican sobre la traza de dos fallas inferidas, de orientación N50°E, que están asociadas con actividad sísmica reciente (De Cserna et al., 1988), por lo que se pudieran considerar como fallas activas.

De la misma forma el Cerro del Pino guarda una orientación semejante a la de la Sierra de Santa Catarina (De Cserna et al., 1988). La Sierra de Santa Catarina es un ejemplo clásico de un cizallamiento siniestral; otro esfuerzo de manera similar se produjo al sur con extraordinaria claridad, en la sierra del Chichinautzin, en donde las hileras de conos dirigidos en dirección ENE en sus cumbres (los Tenayos) son evidencia de ello a gran escala (Mooser, 1978).

La disposición estructural indica que el sistema de fallas del Plio-Cuaternario probablemente se originó por esfuerzos comprensivos en dirección S75°W, que a la vez proporcionaron esfuerzos de tensión en dirección N15°W.

II.5 Estratigrafía

Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) realizaron una revisión de las formaciones que constituyen la estratigrafía de la Cuenca de México; esta correlación estratigráfica que se muestra en la Lámina 1 y la Figura 2.2.

CRETACICO.

Durante el Cretácico, en la región central de México, en lo que actualmente es la Cuenca de México, existió un ámbito marino en el que se desarrollaron arrecifes y lagunas que fueron el hábitat de organismos bentónicos. Los restos de dichos organismos se acumularon y con el lapso del tiempo formaron rocas calcáreas que han sido muestreadas en las perforaciones profundas de la Cuenca, como son los pozos Mixhuca 1 y Tulyehualco 1 (Zamora-Millan, et al., 1996). Estas rocas calcáreas constituyen las Formaciones Xochicalco, Morelos, Doctor, Cuautla y Mexcala.

TERCIARIO

Durante el fin del Cretácico hasta el Eoceno Medio se emplaza el Granito de Colotepec, el cual se aflora en el extremo sudoccidental intrusionando a la Formación Xochicalco en el núcleo del anticlinal de Colotepec.

GRUPO BALSAS

Entre el Eoceno Tardío y el Oligoceno Temprano se deposita el Grupo Balsas. Esta formación se describe como lechos rojos continentales que comprenden en su base, conglomerados heterogéneos de clásticos calizos de la formación Mexcala y Cuautla, pedernal y fragmentos volcánicos; más arriba, limonitas arenosas rojas

con anhidrita, interestratificadas con tobas y brechas volcánicas y lavas de composición basáltica (Schlaepfer, 1968).

ROCAS VOLCÁNICAS DEL OLIGOCENO TARDÍO-MIOCENO TEMPRANO (Tomv).

Originalmente Schlaepfer (1968) describió a la Formación Tepoztlán, como rocas de composición riodacítica a andesítica, provenientes de centros eruptivos probablemente distintos, que afloran en la base de las sierras volcánicas del E y W de la Cuenca y en algunas otras localidades de la misma. Esta formación puede incluirse dentro de las Rocas Volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano, en la que se incluyen la formación Xochitepec (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

ROCAS EXTRUSIVAS DEL MIOCENO MEDIO Y TARDIO (Tmv).

Las Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío son las rocas volcánicas que difieren en composición litológica y posición stratigráfica con respecto a las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. Sus afloramientos se distribuyen a lo largo de la Cuenca en áreas pequeñas, en la mayoría de los casos por encontrarse cubiertas por los materiales volcánicos más recientes.

En la porción sur de la Cuenca afloran principalmente en los cerros El Elefante, El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños, La base de la Sierra de Guadalupe, La base de la Sierra de Las Cruces, el Cerro Patlachique y en algunos otros afloramientos en el norte de Texcoco (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Estas rocas fueron denominadas informalmente como Rocas Volcánicas del Terciario Medio por Schlaepfer (1968).

FORMACION LAS CRUCES (Tpc).

Schlaepfer (1968) designó como Formación Las Cruces a los productos volcánicos que forman la Sierra Volcánica Occidental, a excepción del macizo de Zempoala y del Ajusco. La parte inferior se encuentra constituida por brechas volcánicas con interestratificación de lavas andesíticas, y la parte superior, discordante, está formada por potentes derrames sobrepuestos de lavas dacíticas; interdigitada localmente con la Formación Tarango. Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), proponen el abandono de la unidad que se ha denominando como Formación Tarango; debido a que esta formación se puede extender a las secuencias piroclásticas de las formaciones Otomí, Tláloc y Llano Grande.

FORMACION ZEMPOALA (Tpz).

La Formación Zempoala es el conjunto de productos volcánicos de dos centros eruptivos alineados en dirección norte-sur, que se encuentran en la porción sudoccidental del área cartografiada y que de acuerdo con sus características morfológicas, posición estratigráfica y características litológicas, son posiblemente contemporáneos del volcanismo de la Formación Las Cruces, aunque se piensa que esta actividad 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 afáníticas-porfíricas, 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 que consisten en fragmentos mal clasificados, cuyos tamaños varían de lapilli a bloques, en matriz vítrea y cristalina con abundancia de líticos accidentales y juveniles, cuya composición varía de andesítica a riodacítica (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

DEPOSITOS PIROCLASTICOS Y CLASTICOS DEL PILOCENO (Tppc).

Constituyen depósitos no diferenciados relacionados con la actividad piroclástica y fluvial del Plioceno (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). De composición que varía desde riodacítica hasta basáltica, provenientes de distintos centros eruptivos (Schlaepfer, 1968).

CUATERNARIO.

FORMACION LLANO GRANDE.

Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) denominan así a las secuencias eruptivas de composición variable de andesítica a riodacítica que forman el volcán del mismo nombre, el cual es el ancestro del volcán Iztaccíhuatl y que aflora en la base noroccidental de la Sierra Nevada.

FORMACION EL PINO.

Agrupar rocas, principalmente máficas, que forman los cerros de la Estrella, el Pino, Chimalhuacán, Chiconautla y otros. Se caracteriza por composición basáltica, andesítica y traquítica, constituidas por coladas lávicas con intercalaciones de cenizas, lapilli y escoria de caída (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera 1989).

FORMACION TLALOC (Qt).

Schlaepfer (1968) designó como Formación Tláloc a las lavas que forman las distintas unidades de la Sierra de Río Frío. Su composición es, preferentemente, andesítica, latítica y dacítica.

FORMACION IZTACCIHUATL (Qi).

Lavas generalmente dacíticas que forman la masa principal de los volcanes Iztaccihuatl y Popocatepetl, exceptuando el "Pecho" del primero, el cono reciente de este último y los derrames lávicos que cubren su ladera sudoccidental (Schlaepfer, 1968).

FORMACION POPOCATEPETL (Qp).

Derrames lávicos juveniles que cubren la parte superior y la ladera sur-occidental del Volcán Popocatepetl; de composición dacítica a riodacítica, interdigitada localmente con la Formación Chichinautzin y con Depósitos Aluviales (Schlaepfer, 1968).

FORMACION CHICHINAUTZIN (Qc).

Corresponde a todo el vulcanismo monogenético principalmente estromboliano, la composición de esta formación varía de andesítica a basáltica, con intercalaciones de material piroclástico; esta unidad cubre discordantemente casi todas las unidades cretáceas y terciarias (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

DEPOSITOS ALUVIALES (Qal).

Se denomina de esta forma al material clástico fluvial acumulado contemporáneamente con sedimentos lacustres y depósitos volcánicos del Cuaternario, estos depósitos se encuentran en el centro de las depresiones y se adelgazan hacia las márgenes de la llanura, en el subsuelo descansan ampliamente, con discordancia sobre los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno y localmente en la misma forma, sobre rocas volcánicas más antiguas y sedimentarias del Cretácico (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

DEPOSITOS LACUSTRES (Qla).

Se agrupan en esta unidad los sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica del Popocatepetl y la Sierra Chichinautzin, los cuales se depositaron en un ambiente lacustre. Estos depósitos forman una gran altiplanicie lacustre, extendida con una altitud promedio de 2200 m, desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec. Los espesores varían entre 30 y 300 m, 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 (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

ERA	PERIODO	EPOCA	CUENCA DE MEXICO Y AREAS ADYACENTES	
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	LACUSTRE ☆ FM CHICHINAUTZIN ☆ FM POPOCATEPETL ☆	
		PLEISTOCENO	ALUVION	FORMACION IZTACCHUATL ☆
			FORMACION TLALOC ☆	
			FORMACION EL PINO ☆	
			FORMACION LLANO GRANDE ☆	
	TERCIARIO	NEOGENO	PLIOCENO	PIROCLASTOS Y CLASTOS NO DIFERENCIADOS ☆
				ROCAS VOLCANICAS MAFICAS
				ROLITA NAVAJAS
		MIOCENO	ROCAS EXTRUSIVAS ☆	
			FORMACION TEPOZTLAN ☆	
		PALEOGENO	OLIGOCENO	ROCAS VOLCANICAS ☆
				RIOLITA TILZAPOTLA
			EOCENO	GRUPO BALSAS
				GRUPO PACHUCA
PALEOCENO	GRANITO COLOTEPEC			
MESOZOICO	CRETACICO	TARDIO	FORMACION MEXCALA	
			FORMACION CUAUTLA	
	TEMPRANO	NEOCOMIANO	FM MORELOS	
			FM EL DOCTOR	
			FORMACION XOCHICALCO	

☆ FALTA DE DEPOSITO O EROSION
 ☆ FORMACIONES QUE AFLORAN EN EL AREA DE ESTUDIO

Figura 2.2. - Estratigrafía de la Cuenca de México (modificada de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

III.6 Zonificación Geotécnica

La Cuenca de México puede dividirse en tres zonas de acuerdo a sus características geotécnicas (Marsal y Mazari, 1959):

Zona Pétreo.- Esta zona fue originalmente descrita por Marsal y Mazari (1959) como zona de las Lomas, para referirse a las áreas de las faldas de la Sierra de las Cruces, en donde se incluyen los derrames de basalto del Pedregal; formadas por terrenos compactos, arenolimosos con alto contenido de grava y por tobas pumíticas bien cementadas, con una alta capacidad de carga y sin capas de arcilla compresibles que puedan ser causa de asentamientos diferenciales de gran magnitud. La zona pétreo incluye las faldas de la Sierra de Guadalupe, la Serranía de las Cruces y se le adicionan las partes altas de los cerros del Peñón de los Baños, Peñón del Marqués y el Cerro de la Estrella (Del Castillo, 1978).

En esta zona se han detectado varios tipos de suelo que se pueden clasificar en seis grupos atendiendo a los problemas de cimentación y se describen a continuación:

- o Tobas estables aún bajo la acción erosiva del agua, compuestas por mezclas de arena y grava en proporciones variables. En estas zonas se localizan las cavernas que una vez se explotaron para poder obtener materiales de construcción y que actualmente constituyen un peligro para construcciones de todo tipo.
- o Tobas inestables bajo la acción erosiva del agua. Estos suelos están compuestos en gran proporción por arcilla de plasticidad medida a alta con cimentación pobre.
- o Suelos pumíticos. Dentro de las formaciones características de la zona se encuentran espesores variables entre 1 y 3 m de arena pumítica limpia. Los estratos en que aparecen son sensiblemente horizontales y con gran frecuencia se ubica entre capas de mucho mas dureza.
- o Rellenos. Debido al intenso crecimiento urbano, se han tratado de aprovechar las barrancas rellenándolas con material mal compactado.
- o Suelos de origen eólico. Son depósitos de arena suelta, con espesores del orden de 4 m, que sufren hundimientos bruscos bajo cargas dinámicas.
- o Roca basáltica. En una gran parte de la zona Sur se tienen derrames de lava con distintos grados de fracturamiento, en los cuales se pueden apreciar estructuras columnares y vesiculares.

za Lacustre. - Esta zona fue originalmente descrita por Marsal y Mazari (1959) como zona del lago ubicada en el oriente y antiguamente ocupada por el lago de Texcoco, en la que se tienen depósitos lacustres blandos y compresibles a profundidades de 50 a 60 m, apoyados en suelos más duros y rígidos. Esta zona se puede clasificar en 5 grupos (Del Castillo, 1978):

Manto superficial. Compuesto por depósitos arenoarcillosos o limosos con abundancia de restos arqueológicos, o bien rellenos artificiales que en algunos puntos de la ciudad llegan hasta 10 m de profundidad.

Formación arcillosa Superior. Suelos que corresponden a la formación Tacubaya, formados por arrastres y sedimentación de ceniza volcánica; está constituida por la arcilla de alta compresibilidad y con un espesor de entre 15 y 32 m.

- o Capa Dura. Está constituida por suelos limoarenosos compactos y rígidos, cementados con carbonato de calcio; de unos 3 m de espesor.
- o Formación Arcillosa Inferior. Compuesta por arcilla volcánica semejante a la de la Formación Arcillosa Superior, pero más comprimida y resistente, en espesores de 4 a 14 m.
- o Depósitos Profundos. Depósitos de arena con grava separados por estratos de limo o arcilla arenosa.

Zona de Transición.- En esta zona es donde las condiciones estratigráficas del subsuelo varían en forma extraordinaria de un punto a otro del área urbanizada. En la zona de transición se han reconocido tres condiciones típicas (Marsal, 1978):

- o Progresiva.- En esta formación rocosa aparece cubierta por depósitos de origen aluvial, a su vez subyacente a las capas más recientes de arcilla lacustre.
- o Interestratificada.- Esta es característica de regiones en las que las fases aluvial y lacustre se suceden en forma alternada, dando lugar a la intercalación de mantos blandos arcillosos con otros de matriz granular contaminadas por finos generalmente duros y más resistentes.
- o Abrupta.- Esta se distingue porque los depósitos lacustres están en contacto con la formación rocosa, tapizada por derrubios o suelo residual.

III.7 Sismicidad Local

Diversos estudios como los realizados por De Cserna et al. (1988) demuestran que la Cuenca de México, posee una actividad sísmica local que está relacionada con la estructura geológica de la Cuenca.

Mediante las estaciones sísmicas C.U. UNAM. (1967), las estaciones de Toluca (1969), México (1969) y Tepoztlán (1969) (fecha de las estaciones) así como las estaciones de la red sísmica del valle de México han suministrado datos sobre la actividad sísmica local de la Cuenca (Figura 2.3).

A pesar del funcionamiento de estas estaciones permanentes, debido a la baja magnitud de los sismos locales y la distribución de las estaciones, la localización precisa de los epicentros ha presentado muchas dificultades, por lo que algunos de estos eventos fueron referidos de acuerdo con el área donde fueron sentidos (De Cserna et al., 1988).

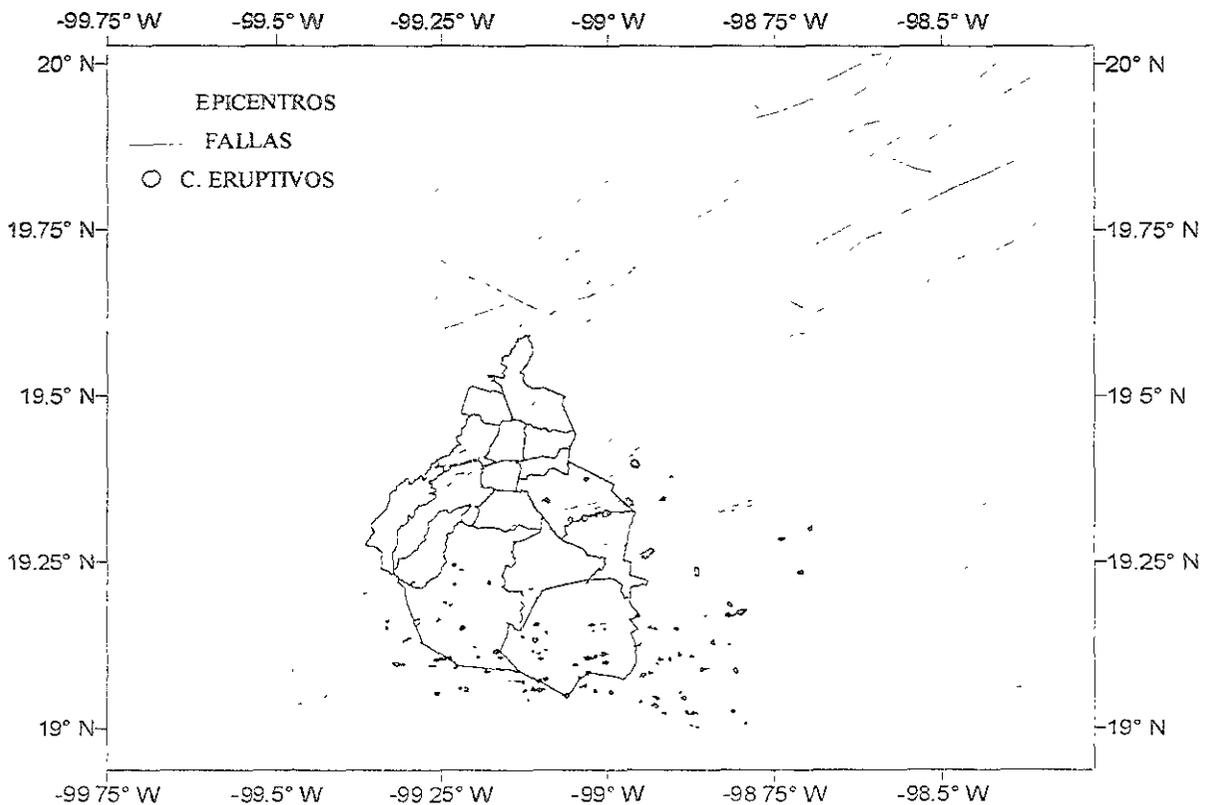


Figura 2.3.- Fallas geológicas potenciales activas y epicentros de eventos locales en la Cuenca de México (modificado de De Cserna et al., 1988), en el que se resalta la Delegación Iztapalapa.

gún De Cserna et al. (1988) la Cuenca de México está atravesada por 14 fallas mayores, con una orientación NE-SW; algunas de ellas pueden considerarse como tivas, debido a los desplazamientos recientes observados y a la Sismicidad asociada a ellas. La gran cantidad de volcanes monogenéticos, muchos de ellos ineados, pueden ser interpretados como anomalías estructurales: fracturas y fallas formadas durante la evolución de la parte central de la Cuenca (Figura 2.3).

Como es de apreciarse en la Figura 2.3 muchos de los centros eruptivos del sur de la Cuenca están alineados con las fallas descritas por De Cserna et al. (1988); mientras que es de notar que en la parte Oeste del Distrito Federal se localizan una gran cantidad de epicentros de eventos locales. Estos eventos se distribuyen principalmente entre los límites de las delegaciones de Miguel Hidalgo, Benito Juárez y Alvaro Obregón.

Esta información nos indica que además del Riesgo Sísmico dado por eventos que se generan en la Costa del Pacífico, la Ciudad de México presenta una actividad sísmica local que puede ser considerada como otro Peligro Geológico-Ambiental.

II.8 Problemática de la Ciudad de México

II.8.1 Crecimiento Demográfico

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) con una población de 17 millones de habitantes para el 2000, de los cuales el 50.5% es del Distrito Federal, se ubica como la segunda ciudad más poblada del mundo, siendo superada sólo por Tokio (Japón), cuya población es de aproximadamente 27 millones de habitantes (Figura 2.4). A estas urbes le siguen las de Sao Paulo (Brasil), Nueva York (Estados Unidos) y Shanghai (China), entre otras (CONAPO, 1998; INEGI, 2000).

El crecimiento demográfico de la ZMCM, descrito por INEGI (1991, 1996 y 1998) y CONAPO (1998), se divide en dos etapas: la primera de ellas ocurre entre 1940 y 1960, cuando la tasa media anual de crecimiento fue superior a 6% (mientras que el país lo hizo a menos de 3%) y su población era tres veces mayor que el conjunto de las tres ciudades que le seguían en tamaño (Guadalajara, Monterrey y Puebla). El crecimiento de esta primera etapa, es derivado de la diferencia de nacimientos y defunciones, pues debido al descenso de la mortalidad frente a una fecundidad constante y alta, y los cuantiosos flujos migratorios procedentes del interior del país, se originó un elevado crecimiento demográfico y

un marcado rejuvenecimiento de la distribución por edad de población. De esta forma, en 1970, 44% de los habitantes de la ZMCM era menor de 15 años de edad, 52% se encontraba en edades laborales (15-64 años), y 4% pertenecía a la tercera edad (mayores de 65 años).

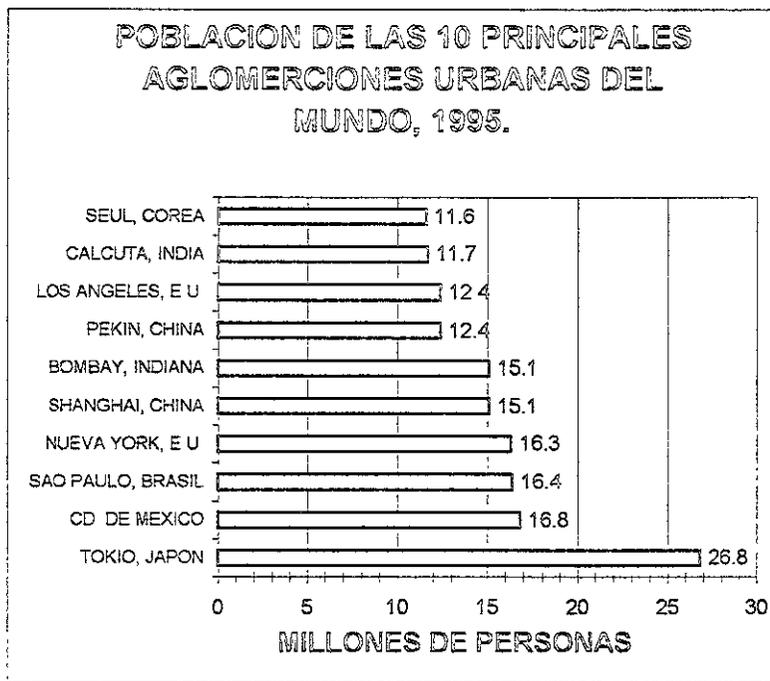


Figura 2.4. - Población de las 10 principales ciudades más pobladas del mundo (CONAPO, 1998).

En la segunda etapa, a partir de la década de los sesenta, la ZMCM empieza a disminuir su crecimiento (a la par de las ciudades de tamaño intermedio que crecen con mayor fuerza). Así en el quinquenio 1990 -1995 su tasa de crecimiento bajó al 1.8% (similar a la del país) y su tamaño ya sólo representaba el doble de esas metrópolis. En esta segunda etapa la mortalidad disminuyó, y la esperanza de vida al nacimiento aumento de 68.6 años en 1980-1985, a 73.2 años en 1990-1995; mientras tanto la fecundidad experimentó un descenso marcado, pues el promedio de hijos por mujer paso de 5.48 a 2.89, y a 2.48 entre los periodos de 1970-1975 (periodo en el que inició el programa nacional de planificación familiar), de 1985-1990 y de 1990-1995 respectivamente.

Por otro lado las tendencias migratorias cambiaron: la inmigración procedente del resto del país disminuyó y la emigración aumentó; este fenómeno propicia, desde 1980, una pérdida neta de población por migración.

De esta forma, la conjugación de las tendencias recientes de los tres factores del cambio demográfico (fecundidad, mortalidad y migración), desde 1970 ha originado un pronunciado descenso en la tasa de crecimiento: de 6.1% anual en 1945 y 4.3% en 1970, a 1.8% en 1995.

La dinámica demográfica de los últimos veinte años también ha traído como consecuencia profundas alteraciones en la distribución de edades: en 1995, 30% de la población era menor de 15 años de edad, 65% se encontraba en edades laborales (15-64 años) y 5% pertenecía a la tercera edad (mayores de 65 años); con lo que se observa una tendencia de envejecimiento de la población.

Como resultado de los anteriores factores se espera que en la ZMCM la tasa de crecimiento 1.8% (1995) se reduzca a 1.0% en el 2010. Asimismo, se prevé que continúe el desplazamiento de la vivienda del centro hacia la periferia en la ZMCM; por lo que las edificaciones habitacionales aumentarán de 3.8 millones en 1995, a 5.7 millones en 2010. Es decir, será necesario construir más de la mitad del inventario existente para satisfacer las necesidades esperadas dentro de diez años. Pero no sólo será necesario ampliar el parque inmobiliario habitacional, sino también dotarlo de infraestructura urbana básica (CONAPO, 1998).

Para explicar el comportamiento urbano, particularmente en lo relativo a la localización de la población, es necesario caracterizar y diferenciar los distintos espacios que conforman el gran espacio habitable del área urbana metropolitana. Por lo que, se construyó una terminología en la que se distinguen cinco tipos de poblamiento (CONAPO, 1998):

- a) Centro Histórico
- b) Pueblo Conurbado
- c) Colonia Popular
- d) Conjunto Habitacional
- e) Colonias Residenciales

Sólo se describirá el poblamiento dado por las Colonias Populares debido a que las colonias populares constituyen la modalidad de asentamiento de mayor importancia en la ZMCM. En ellas habita más de 60% de la población metropolitana, distribuida casi en partes iguales entre el Distrito Federal y los municipios conurbados. Forman un universo urbano complejo producido por intervenciones directas tanto de promotores públicos, como privados y sociales.

La función habitacional es dominante en las colonias populares, pero no es extraño encontrar mezclas heterogéneas en las cuales la vivienda coexiste con otros usos, como pueden ser los comerciales, de servicios y hasta industriales. Las colonias populares son generalmente asentamientos con densidades habitacionales muy altas, con superficies que varía entre 90 y 250 m², aunque existen casos en las colonias de origen ejidal con lotes mayores.

Las altas densidades alcanzadas son resultado de una transformación progresiva que sufre la vivienda unifamiliar, en su inicio, en vivienda multifamiliar, en función de las necesidades y capacidades económicas de la familia fundadora. En las colonias populares las viviendas se producen con la intervención directa de sus propios habitantes, construyendo ellos mismos y/o mediante un proceso mixto de autoconstrucción y contratación de trabajadores más o menos calificados.

En las colonias populares residían 9.6 millones de personas en 1990, de las cuales 5 millones se localizaban en el Distrito Federal. En ese año, el total de hogares ascendió a 1.9 millones, cifra que representaba 61% del total en la ZMCM; en el Distrito Federal se localizaban un millón y en los municipios conurbados 900 mil. El tamaño medio de los hogares de las colonias populares fue de 5 personas en la zona metropolitana, 4.7 para el Distrito Federal y 5.3 para los municipios conurbados.

De las viviendas ubicadas en las colonias populares 2.1% carecían, en 1990, de energía eléctrica (en el Distrito Federal 1% y 3% en los municipios conurbados), 21% de drenaje (17% en el Distrito Federal y 26% en los municipios conurbados) y 46% de agua entubada (en el Distrito Federal 37% y en los municipios conurbados 57%).

En particular, se propone que la generación de nuevas colonias populares ("de baja densidad" o "en proceso") sea sustituida por la producción planeada de fraccionamientos populares de vivienda progresiva, pues no es factible frenar la urbanización popular irregular a través de la multiplicación de conjuntos habitacionales de vivienda terminada de interés social, sino mediante una oferta regular de suelo urbanizado de bajo costo.

Si bien las tendencias recientes apuntan a un crecimiento moderado en los próximos años, en comparación al previsto hace tres lustros, el paulatino envejecimiento de la población y la expansión del área urbanizada se traducirán en retos de mediano y largo plazo, de diferente intensidad para el Distrito Federal y los municipios conurbados, como son la contaminación ambiental, inseguridad

pública, abastecimiento de agua, energía, servicios de educación y salud entre otros, que requieren enfrentarse desde ahora.

No obstante su disminución en el ritmo de crecimiento, la concentración en la ZMCM continúa. En 1995, su población ascendía a 18.4% de los habitantes del país en un territorio que representa 0.3% de la superficie nacional.

III.8.2 Abastecimiento de Agua

Debido al crecimiento de ZMCM, es indispensable ampliar el parque inmobiliario habitacional y el implementar nuevas acciones para satisfacer las necesidades de la infraestructura urbana básica como son la energía eléctrica, drenaje y el suministro de agua.

Actualmente la ZMCM consume 65 m³/s de agua potable, de los cuales el 71.1% proviene de su propio acuífero, 8.8% de la Cuenca del Lerma, 17.7% del Cutzamala y el 2% restante de manantiales. Como puede apreciarse, el abastecimiento de agua potable más importante para la población de la ZMCM proviene del acuífero de la Cuenca de México (INEGI, 1999).

Para abastecer de agua a 16.8 millones de habitantes, la ZMCM depende en gran medida de su agua subterránea, pues el 70% del agua potable proviene del bombeo. En el caso de la ZMCM, el mayor número de pozos profundos y volumen de extracción se localiza en el Distrito Federal (D.F.); en 1998 en la ZMCM contaba con 359 pozos, de los cuales 333 se ubican en el D.F., con un volumen promedio diario de extracción de 1'301,950 de m³/día. El bombeo excede entre 50 y 80% a su recarga natural, lo cual ha mermado la capacidad de almacenamiento de los acuíferos, la compactación del acuífero, el hundimiento del suelo y el deterioro estructural de las construcciones. Para superar las limitaciones de sus fuentes locales de abastecimiento, se requerirá cubrir un 28% de su demanda, trayendo agua de los ríos Lerma y Cutzamala (ubicados a 40 y 127 km respectivamente), y elevando este caudal a 1200 metros de altura, lo que implica un enorme costo de energía. El 2% restante del abasto total de ZMCM proviene de fuentes de abastecimiento superficiales como presas y manantiales, ubicados en la región poniente y sur de la Ciudad de México, cuyos niveles dependen de la precipitación o volumen de lluvias anuales (INEGI, 1999 e INEGI, 2000).

El caudal captado se transporta a través de 514 km de tubería de conducción a 279 tanques de almacenamiento con capacidad total de 1.7 km de longitud de red primaria y más de 10 000 m de red secundaria. Adicionalmente, se utilizan 227

plantas de bombeo para dotar de agua a los habitantes de las partes altas (Torres, 1996).

Para mantener la calidad adecuada en el suministro se utilizan 16 plantas potabilizadoras con capacidad conjunta de 1900 litros por segundo; 11 de estas plantas operan a pie de pozo; además, se tienen 356 dispositivos de cloración ubicados estratégicamente en las estructuras del sistema (Torres, 1996).

Torres (1996) señala que, para suministrar de agua potable a la población, se tiene que afrontar y resolver diversos problemas, dentro de los que destacan:

- El incremento incesante de la población y su consiguiente demanda de agua potable.
- Algunos componentes del sistema hidráulico se ubican en zonas de transición, donde los hundimientos diferenciales del subsuelo afectan su funcionamiento, lo que incrementa la complejidad de la operación.
- Se ha reducido el área de recarga del acuífero como consecuencia de la expansión de la mancha urbana, lo que además ha incrementado los caudales a desalojar por el sistema de drenaje.
- La zona oriente, por estar alejada de la entrada de agua a la ciudad de las fuentes externas de abastecimiento, requiere de mayor infraestructura para mover mayor caudal hacia ella e incrementar la eficiencia operativa.
- Hay poca conciencia en la población adulta sobre la importancia de utilizar eficientemente el agua.

Para resolver la problemática antes planteada se han definido y se están implantando las siguientes estrategias:

- Controlar el crecimiento urbano con base en la factibilidad de suministro de los servicios.
- Operar de manera continua con mayor eficiencia y eficacia los componentes del sistema hidráulico.
- Crear la infraestructura que permita suministrar los servicios a los habitantes que carecen de ellos, para lo cual la disponibilidad de recursos y el beneficio social son factores decisivos.
- Mejorar la administración de los servicios para que sean autofinanciables.
- Fomentar la investigación y desarrollo tecnológico
- Reforzar la implantación del reglamento del servicio de agua y drenaje para el Distrito Federal.
- Lograr que la población participe de manera más activa en el suministro de los servicios.

Capítulo III. Mapa de Peligros y Riesgos Geológico-Ambientales

Un desastre ocurre cuando un considerable número de personas experimenta una catástrofe y sufre daño serio y/o perturbación de su ecosistema, de tal manera que la recuperación resulta improbable sin ayuda externa. Los altos costos sociales y económicos relacionados con desastres naturales, han dado lugar a estudios geológicos y geofísicos para establecer una correcta evaluación de los riesgos potenciales, mediante el conocimiento del medio ambiente y del grado de vulnerabilidad del ecosistema natural.

En los últimos años algunos organismos internacionales (UNDRO, UNESCO) han elaborado una terminología unificada para el estudio y la administración de desastres naturales (Salazar, 1996 y Bellia et al., 1992):

- (D) Desastre es el evento que ocurre, en la mayoría de los casos, en forma repentina e inesperada, y causa alteraciones considerables sobre los elementos sometidos, representadas en la pérdida de la vida y la salud de la población, la destrucción o pérdida de los bienes de la comunidad, la desorganización de los patrones normales de vida y/o daños al medio ambiente.
- (P) Preparación es el conjunto de acciones encaminadas al aislamiento adecuado de la sociedad en general para afrontar un posible desastre y que conduzca a la reducción al máximo posible de la duración del periodo de emergencia posterior al desastre.
- (H) Amenaza o peligro es la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante un cierto periodo de tiempo en un sitio dado.
- (E) Elementos bajo riesgo corresponden a la población, las edificaciones y obras civiles, las actividades socioeconómicas, los servicios públicos y, en general, la infraestructura expuesta en un área determinada.
- (R) Riesgo es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento perturbador y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.
- (Rt) Riesgo total es el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un evento desastroso; en otras palabras, es el resultado de un riesgo específico y de los elementos bajo riesgo.
- (V) Vulnerabilidad es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, como resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, y que se expresa en una escala que va de 0 (sin daño) a 1 (con pérdida total).

El análisis de parámetros anteriores se relacionan entre sí de la forma siguiente:

$$R_t = (E)(R) = (E)(H*V)$$

Los peligros naturales se producen de interacciones entre los diversos ambientes naturales (litosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera) y grupos sociales y económicos, que provocan altos costos. Esto hace que el conocimiento y evaluación de los riesgos geológicos (p. ej. sísmicos, volcánicos e hidrogeológico) sean necesarios para establecer una correcta evaluación de los riesgos potenciales (Bellia et al., 1992).

Los riesgos que se pueden presentar en la Cuenca de México se han dividido en geológicos y antrópicos (Tabla 3.1). Como se puede apreciar, existen riesgos que se pueden clasificar como naturales y antrópicos (subsistencia, erosión), así como también algunos se relacionan entre sí; por lo que es conveniente llamarlos riesgos geológicos-ambientales.

GEOLOGICOS	ANTROPICOS
SISMICIDAD	CONTAMINACION DE AGUA, AIRE Y SUELOS
VULCANISMO	INCENDIOS Y EXPLOSIONES
INUNDACIONES	SUBSIDENCIA
MOVIMIENTOS DE TIERRA	EROSIÓN
AGRIETAMIENTOS	DESFORESTACION
FALLAMIENTO ACTIVO	INESTABILIDAD DE TALUDES
EROSION	
SUBSIDENCIA	

Tabla 3.1. - Clasificación de los riesgos posibles en la Cuenca de México (Salazar, 1996).

Con el fin de poder diferenciar entre mapas de Peligro y Riesgos Geológico-Ambientales, a continuación se muestra un mapa de Peligro Volcánico y un mapa de Riesgo Sísmico para la Ciudad de México (Figura 3.1. y 3.3).

III.1 Peligro Volcánico

La Faja Volcánica Mexicana (FVM) es el resultado de la dinámica de la litosfera del sur de la Placa Norteamericana, que corresponde a la zona volcánica comúnmente asociada a un límite compresivo. Su orientación con respecto a la Fosa de Acapulco diverge en 15° , y muestra su actividad de subducción entre la Placa de Cocos y la Placa Norteamericana (Córdoba-Méndez, 1988).

Dentro del FVM se ubican los grandes estratovolcanes de México que son: en su parte central Popocatepetl, Iztaccíhuatl, el nevado de Toluca y la Malintzi; el Nevado de Colima en el área occidental y por último en su parte oriental el Pico de Orizaba-Cofre de Perote. En general la mayor parte de los estratovolcanes en México, se encuentran en una fase fumarólica que puede representar la etapa final de su actividad o bien el principio de una nueva fase. Mientras que en algunos de ellos su actividad es prácticamente nula, pues su última manifestación ocurrió hace más de 12000 años, como es el caso de la Malintzi y el Cofre de Perote (Córdoba-Méndez, 1988).

Para el cálculo de la probabilidad de una erupción en un volcán en particular, se tiene como base el modelo de desarrollo de dicha estructura. Entre los más conocidos destaca el cuya base se apoya en el registro histórico de las erupciones y periodos de reposo del volcán. Scandone (1979) muestra las relaciones de erupción para el Popocatepetl de 2.4×10^{-2} erupciones por año (años^{-1}), Colima de 5×10^{-2} años^{-1} y en general para toda la FVM de 7×10^{-2} años^{-1} . Para la Sierra de Chichinautzin se tiene una relación de 0.3×10^{-3} años^{-1} .

Recientemente se han elaborado trabajos para la realización de un mapa de peligros del volcán Popocatepetl (Vázquez et al., 1997), esto debido a que la ciudad de México se encuentra dentro de la región de una estructura volcánica activa, el volcán Popocatepetl.

Para poder determinar un mapa de peligros Vázquez et al. (1997) se basa en los depósitos originados por erupciones volcánicas pasadas; en las que se determinaron los límites de tres diferentes magnitudes, con base en el alcance máximo de los productos originados por estas erupciones y en las distancias máximas de los flujos modelados por computadora.

Para Vázquez et al. (1997), en caso de una erupción del Popocatepetl, los tres posibles tipos de peligro serían:

- Flujos calientes de material volcánico: viajan a alta velocidad, descienden del volcán en sólo algunos minutos y destruyen todo a su paso.
- Flujos de lodo e inundaciones: se concentran esencialmente en las barrancas y en los arroyos y les toma de 10 a 30 minutos descender del volcán.
- Caída o lluvia de material volcánico: es peligrosa, especialmente si el peso del depósito excede la resistencia de los techos de las casas, ya que ello puede ocasionar que se colapsen. En algunos casos, la acumulación de más de 10 centímetros de material puede producir el derrumbe del techo, sobre todo si el material se encuentra húmedo (Figura 3.1).

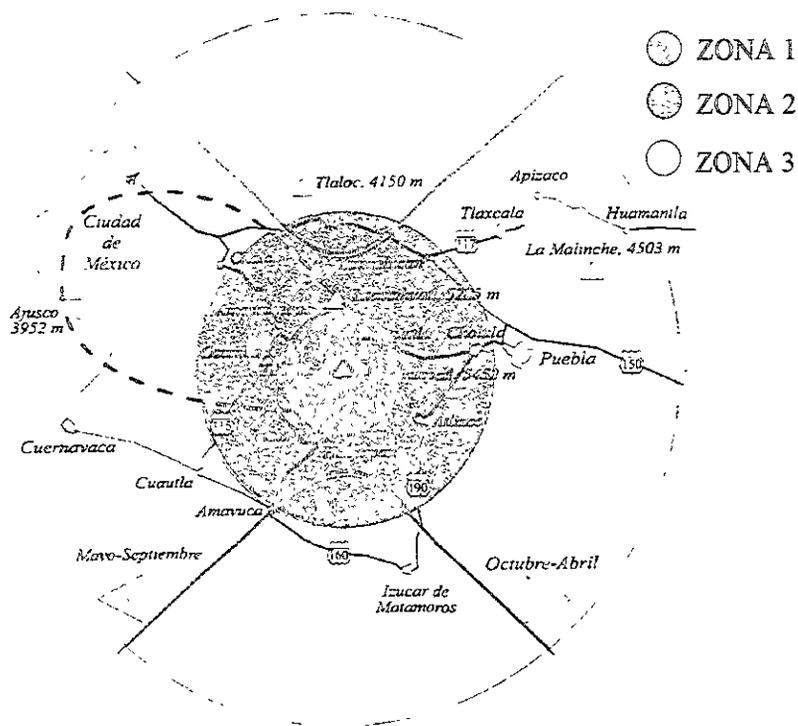


Figura 3.1. – Zonas de peligro por caída de materiales volcánicos (modificada de Vázquez et al., 1997).

Debido a que en la Ciudad de México el Peligro más latente es la caída de materiales volcánicos (Figura 3.1), se muestran a continuación las diferentes zonas que pueden ser afectadas por este tipo de Peligro:

Zona 1. - Podría ser afectada por la caída de cantidades importantes de arena volcánica y pómez cuyas acumulaciones alcanzarían varios centímetros, en el caso de erupciones pequeñas, y hasta varios metros con bloques de hasta 30 m, en erupciones muy grandes.

Zona 2. - Podría ser afectada por la caída moderada de arena volcánica y pómez cuyo espesor puede variar desde 1mm o menos (ligera cobertura de polvo fino) en erupciones pequeñas hasta un metro en erupciones muy grandes.

Zona 3. - Sería menos afectada por la caída de arena volcánica y pómez. No habría caída durante erupciones pequeñas aunque pueden acumularse de decenas de centímetros durante erupciones muy grandes.

Los vientos sobre el Popocatepetl generalmente soplan en dirección este-oeste. La dirección dominante de los vientos de octubre a abril es hacia el poniente. De esta manera es mayor la probabilidad que se acumule más arena volcánica y pómez en una región comprendida entre las dos líneas del mapa (Figura 3.1).

III.2 Riesgo Sísmico

La gran cantidad de sismos a la que ha estado sujeta la Cuenca de México tiene su origen en la Costa del Pacífico mexicano; de los cuales destacan los eventos de 1907, 1911, 1957, 1979 y 1985 (con magnitudes entre 7.5 y 8.1). Estos eventos han ocasionado diferentes niveles de daño, que van desde daños a estructuras hasta enormes pérdidas en vidas y económicas.

Las causas de los intensos movimientos en la Cuenca de México, que tienen su origen a más de 250 km, son por lo menos dos:

- Las grandes amplificaciones las ondas sísmicas en los estratos blandos de la zona del lago – un fenómeno bien documentado desde hace casi 40 años.
- Una amplificación regional que implica que aún en la base de los depósitos blandos, el movimiento del suelo es mayor que el que se esperaría en sitios de terreno realmente firme a distancias epicentrales similares (Ordaz et al., 1996).

A partir de los eventos sísmicos de 1985, se han realizado numerables estudios con el fin de evaluar y entender las diferentes causas de los daños provocados por los temblores, y poder determinar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras localizadas en la ciudad.

Recientemente Ordaz et al. (1996) diseñó un modelo que permite estimar las intensidades sísmicas y pérdidas económicas en la ciudad de México por efectos de terremotos de gran magnitud que se generan en la Costa del Pacífico. El tipo de información que procesa el modelo consiste en: cantidad de construcción en el D.F., propiedades de los suelos, intensidades sísmicas esperadas durante un temblor costero, y daños esperados a las construcciones de la ciudad.

Para este modelo el área urbana fue dividida en diferentes celdas, que en su mayoría están definidas por límites como calles y avenidas, en las que se identifican y dividen edificios en 14 clases estructurales; estas clases tienen en cuenta la respuesta sísmica y en la vulnerabilidad. Un aspecto importante en esta clasificación es la definición del periodo fundamental de vibración de los edificios. En este modelo, la intensidad sísmica está caracterizada por un sólo parámetro: la ordenada del espectro de respuesta, S (pseudoaceleración, 5% del amortiguamiento crítico), medida a cierto periodo estructural representativo de los edificios de determinada clase (Figura 3.2).

Si se postula la ocurrencia de un sismo y se estima el movimiento del terreno en cada celda, las pérdidas esperadas en las estructuras clase i situadas en la celda j están dadas por:

$$P_{ij} = K_i S^\alpha A_{ij}$$

En donde S es la aceleración espectral que tuvo lugar en la celda j asociada a estructuras de la clase i , y K y α son parámetros que definen la vulnerabilidad de las estructuras de la clase i . A es el área total cubierta por la clase de estructuras i en la celda j . Por lo que la pérdida esperada en la celda j para todas las clases, puede calcularse mediante la suma de las pérdidas de todas las clases:

$$P_{ij} = \sum_i L_{ij}$$

Por lo que es posible generar mapas que muestren la distribución geográfica del daño esperado (Figura 3.3).

Como es de observarse, para los Riesgos Geológicos que ocurren en la Ciudad de México, puede determinarse el área de ocurrencia en la que los peligros naturales interaccionan con los diversos ambientes naturales.

Las Figuras 3.2 y 3.3 muestran el mejor ejemplo para poder diferenciar los términos de Peligro y Riesgo Geológico-Ambiental. En la Figura 3.3 se muestra la distribución de la pérdida esperada (L), en km^2 , para todas las clases de estructuras, durante un sismo como el del 19 de septiembre de 1985. Es de notar que las pérdidas de los elementos bajo riesgo (zona urbana) no necesariamente coinciden con la distribución de las máximas pseudoaceleraciones del mismo evento sísmico (Peligro Sísmico) que se muestra en la Figura 3.2. Esto nos da una mejor idea de la diferencia entre un Peligro y Riesgo Geológico-Ambiental



Figura 3.2. – Distribución de la pseudoaceleración máxima, S_a , en Gal, sin importar el periodo en el que ocurra, en la dirección EW, para un temblor como el del 19 de Septiembre de 1985 (Modificado de Ordaz et al., 1996).

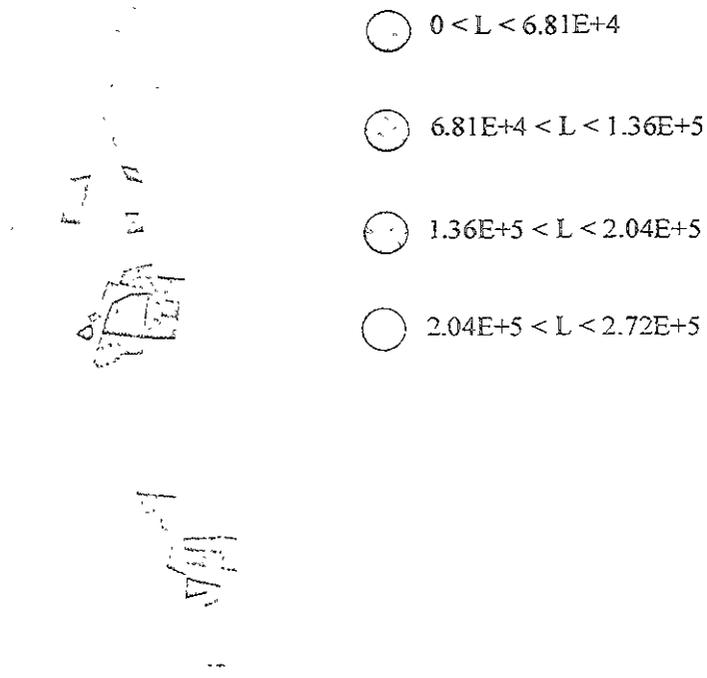


Figura 3.3. – Distribución de la pérdida esperada, L , en km^2 , para todas las clases de estructuras, durante un temblor como el del 19 de septiembre de 1985 (Modificado de Ordaz et al., 1996).

Peligro (H) es la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante un cierto periodo de tiempo en un sitio dado. Como se describió en la sección III.1, el mapa de peligros del volcán Popocatepetl (Vázquez et al., 1997) muestra los posibles eventos potencialmente desastrosos, que pueden ocurrir en un cierto periodo en la Ciudad de México; pero en este mapa no se mencionan pérdidas esperadas (vidas humanas y/o propiedades) por la ocurrencia de dicho evento en la Ciudad de México.

Los riesgos geológicos-ambientales pueden dividirse en dos: Riesgo específico (R) y Riesgo Total (R_t). En ambos el factor común es la pérdida de los Elementos Bajo Riesgo (E) bajo la ocurrencia de un evento desastroso. Como se describió en la sección III.2, el mapa de riesgo Sísmico permite estimar el grado y/o número de pérdidas de los Elementos Bajo Riesgo (zona urbana).

Es claro que para pasar de un mapa de Peligro a Riesgo Geológico-Ambiental es necesario determinar los elementos Bajo Riesgo de la zona de estudio así como los parámetros que puedan definir la vulnerabilidad de dichos elementos ante un Peligro Geológico-Ambiental. Retomando la ecuación de Riesgo Total, para poder determinar esta variable, es necesario conjugar la información de Peligro volcánico y/o sísmico con la información de uso de suelo del D. F.; pero además es necesario definir la vulnerabilidad de los elementos Bajo Riesgo (uso de suelo) ante cada Peligro, para poder determinar la variable de Riesgo ante cada amenaza.

Capítulo IV. Procesamiento de Imágenes de Satélite

Durante el presente capítulo se mostrarán las diferentes técnicas de procesamiento para las imágenes multiespectrales, con el fin de obtener una evolución del uso de suelo de la Ciudad de México. Como se describió en el Capítulo III, un elemento de la ecuación de Riesgo Total (R_t) son los Elementos Bajo Riesgo (E), por lo que la evaluación del cambio de uso de suelo es una excelente herramienta para determinar la evolución de los elementos bajo riesgos.

Las técnicas de Sensores Remotos son referidas al grupo de métodos para la colección de información de cierta propiedad física, como son la reflectancia espectral, gravedad, magnetismo, etc., de un cuerpo y sus alrededores que se encuentran a cierta distancia del instrumento de medición. Los Sensores Remotos pueden clasificarse, de acuerdo a su naturaleza, en pasivos y activos, donde este último sensor se caracteriza por la emisión de una señal que produce la excitación de la propiedad física a medir, mientras que los sensores pasivos miden cierta propiedad física sin la necesidad de ninguna excitación.

La información obtenida por los sensores remotos normalmente se presenta en forma de imágenes, que mediante diferentes técnicas de procesamiento e interpretación generan datos útiles para la agricultura, arqueología, geografía, geología, geofísica, etc. Debido a la naturaleza de la información, las imágenes pueden clasificarse como: Imágenes Multiespectrales (también llamadas Imágenes Espectrales) e Imágenes Espaciales.

Las técnicas de procesamiento para las imágenes espaciales se mostrarán en el siguiente capítulo, en donde la naturaleza de la información de las imágenes espaciales será de tipo geofísico. La información geofísica está dada por un levantamiento gravimétrico de la Cuenca de México (Hernández-Moedano y Grauel, 1954), con la que se tratará de obtener información del basamento de la Cuenca de México.

IV.1 Espectro Electromagnético

La radiación electromagnética es energía que se propaga a través del espacio entre un campo eléctrico y magnético. La luz visible es sólo una de las diferentes formas de la energía electromagnética, pero además de ésta existen otras formas como son los rayos cósmicos, gamma, X, ultravioleta, infrarrojos, microondas y

ondas de radio. Todas estas formas de radiación están sujetas a la teoría de energía electromagnética, que las describe como una onda armónica senoidal que viaja a la velocidad de la luz (c). Este movimiento está descrito por la siguiente ecuación:

$$C = f\lambda$$

en donde la velocidad de la luz para fines prácticos es $C = 3 \times 10^8$ m/s, la longitud de onda (λ) es la distancia entre picos de onda sucesivos y la frecuencia de onda (f) es el número de ciclos por segundo.

El espectro electromagnético se extiende desde los rayos cósmicos hasta las ondas de radio y televisión (Figura 4.1). Dado que las imágenes multispectrales contienen información entre la región de luz visible e infrarrojo, las ondas de longitud larga son las de mayor importancia. Es importante notar que la región de luz visible es extremadamente pequeña (0.4-0.7 μm), siendo la parte del espectro electromagnético a la que el ojo humano es sensible (Lillesand, 1994). La región del infrarrojo se puede dividir en tres regiones como infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo térmico.

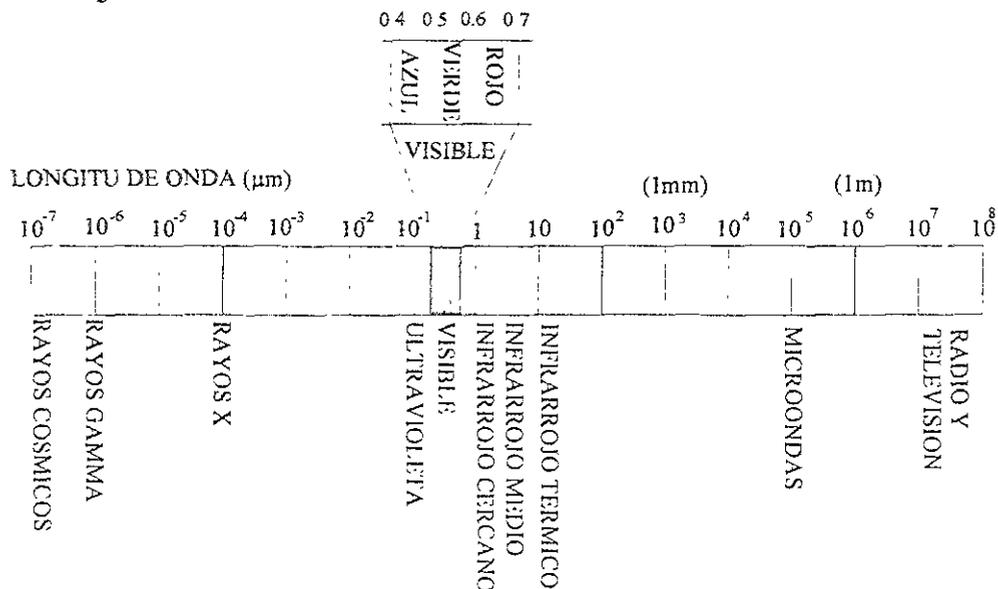


Figura 4.1. –Espectro electromagnético, expandido en la región del visible (Modificado de Lillesand, 1994)

Durante las interacciones de la energía electromagnética con la materia se producen efectos como difusión, reflexión y emisión que son producto de las propiedades superficiales de la materia; otros efectos como transmisión y absorción son producto de las características internas de la materia. Estas interacciones con la materia pueden ser grabadas en imágenes digitales de tipo RASTER (Floyd, 1996).

IV.2 Curvas Espectrales

La energía que es reflejada por los cuerpos depende de la superficie en la que la radiación electromagnética incide, por lo que ésta energía varía de un cuerpo a otro, por lo que el color, brillo e intensidad de la energía reflejada puede ayudarnos a distinguir un cuerpo de otro. La intensidad de esta energía puede ser medida si se compara esta medida con la intensidad de la radiación solar, y si además se hace en una pequeña porción del espectro, es posible construir una curva de reflectancia espectral (Figura 4.2).

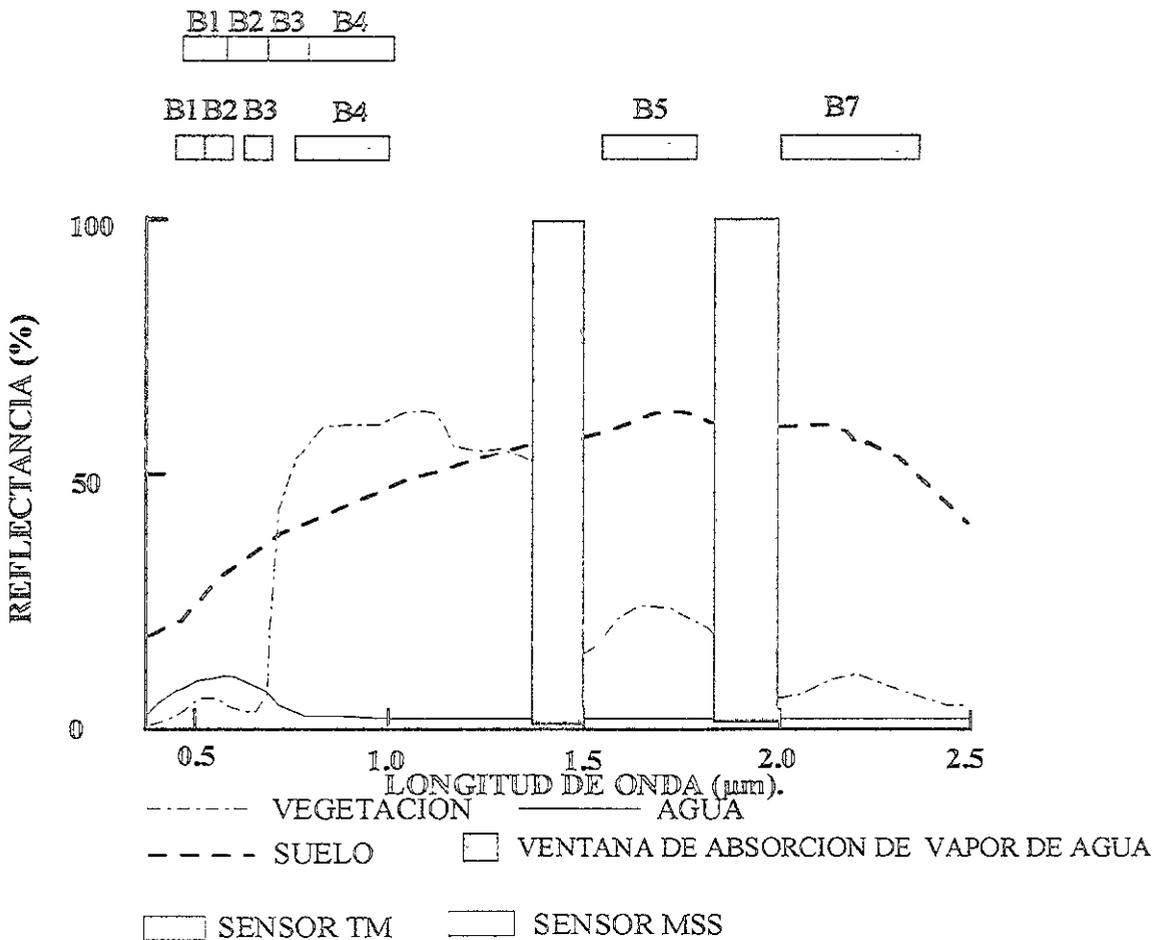


Figura 4.2. – Curvas de reflectancia espectral (modificado de Cabral-Cano et al, 1997).

Los cuerpos de agua tienen un espectro que presenta una absorción de 100% a partir del infrarrojo cercano. Como se observa la mayor parte de la energía solar es absorbida y sólo una pequeña parte de esta es reflejada (Figura 4.2). El espectro del suelo presenta una alta reflectancia en la parte visible del espectro, alcanzando su máximo en la parte del infrarrojo medio e infrarrojo lejano.

Posiblemente la curva espectral de la vegetación sea la más importante en cuanto a las ventanas de absorción que presenta. La vegetación presenta en la región visible una ventana de absorción característica. Esta ventana se encuentra en la parte del espectro que corresponde al color verde, siguiendo la curva espectral de la vegetación se tiene un bajo en la parte que corresponde al color rojo, mientras que su más alta reflectancia se encuentra en la parte del infrarrojo cercano. Este tipo de comportamiento en la vegetación está determinada por la clorofila, que es el pigmento verde de la vegetación, que desempeña un papel esencial en el proceso de la fotosíntesis. Debido a que los diferentes tipos de vegetación contienen diferentes cantidades de clorofila es posible distinguirlos por medio de su reflectancia.

IV.3 Sensores Satelitales

En 1960 el Departamento del Interior de los Estados Unidos y la Administración Nacional de Espacio y Aeronáutica (NASA) inicia el desarrollo de un sistema satelital con el fin de detectar los recursos naturales de la Tierra. Como parte de los resultados de estos experimentos fue desarrollado el sistema Earth Resources Technology Satellite ERTS y su lanzamiento se realiza el 6 de enero de 1972. A partir de algunas imágenes de México, obtenidas por el ERTS, se realizaron estudios geológicos de la Cuenca de México (Chávez, 1974; Del Río, 1974).

Debido al éxito del sistema en enero 22 de 1975 es lanzado el segundo de esta serie de satélites (ERTS-B), posteriormente este fue renombrado como Landsat 2; adicionalmente se lanzaron en 1978, 1982 y 1984 los satélites Landsat 3, 4 y 5 respectivamente.

La serie de satélites Landsat provee información importante sobre la superficie terrestre de Tierra; los cambios y las características importantes de la superficie del planeta pueden ser detectados, medidos y analizados. Los efectos de desertificación, deforestación, contaminación, actividad volcánica así como eventos antrópicos pueden ser examinados usando datos adquiridos desde los satélites Landsat.

Para poder realizar el tipo de estudios mencionados con anterioridad, el satélite Landsat posee dos sensores, el Multispectral Scanner (MSS) que hasta principios de la década del 90 se mantuvo activo, y Thematic Mapper (TM) que se puso en funcionamiento en 1982 y que sigue en activo.

IV.4 Características del Sistema Landsat Thematic Mapper (TM)

La órbita que sigue el sistema Landsat se ubica a una altura de 705 km, con un ángulo de inclinación con el ecuador de 98.2° y cruza el ecuador de norte a sur aproximadamente a las 9:45 a.m., recorre 14.5 órbitas por día y realiza un ciclo de 16 días; con una superposición de envergadura que varía desde 7% al Ecuador y 84% a 81° norte, teniendo una envergadura de 185 km, este sistema provee cobertura global entre 81° latitud norte y 81° latitud sur.

Los sensores MSS y TM detectan radiación reflejada desde la superficie de la Tierra en longitudes de onda en la región del visible e infrarrojo cercano, pero el sistema TM con sus 7 bandas provee más información espectral que el sistema MSS con sus 4 bandas (Figura 4.2), además de que la sensibilidad espectral es superior pues el sensor MSS usa 6 detectores por cada banda, para 4 bandas. En cambio el sistema TM utiliza 16 detectores para las bandas no térmicas, y 4 detectores para la banda del infrarrojo térmico, lo que da un total de 100 detectores. Las imágenes TM son ecualizadas con 256 niveles contra los 64 niveles para las imágenes MSS (8 bits contra 6 bits de ecualización).

Los sistemas TM presentan una resolución espacial (Tabla 4.1) de 30×30 m (900 m²) para las bandas 1 a 5 y 7, mientras que para la banda 6 TM es de 120×120 m (14400 m²). Las imágenes TM dividen al espectro electromagnético en 7 bandas (Tabla 4.1) que cubren el espectro electromagnético de 0.45-12.5 μ m.

La banda 1 TM que cubre la región que corresponde al color azul de la porción del espectro visible, es usada para poder discriminar los cuerpos de agua del suelo y vegetación. La banda 2 TM detecta color verde de la región del visible y puede usarse para poder determinar la vegetación saludable. La banda 3 TM detecta el color rojo en la que la clorofila de la vegetación presenta una ventana de absorción.

La banda 4 TM que cubre la región que corresponde al infrarrojo cercano y en el que la reflectancia de la vegetación tiene su máximo, por lo que es ideal para discriminar los tipos de vegetación y delimitar los cuerpos de agua. La banda 5 TM que corresponde al infrarrojo medio en el que puede distinguirse suelos con contenido de agua.

La banda 6 TM cubre la región del infrarrojo térmico además de ayudar al mapeo térmico puede ser usada para estudios de vegetación y suelos con contenido de agua. La banda 7 TM que cubre la región del infrarrojo lejano es usada para poder discriminar tipos de roca y tipos de arcilla.

Banda	Resolución espectral (μm)	Resolución espacial (m)
1	0.45-0.52	30
2	0.52-0.6	30
3	0.63-0.69	30
4	0.76-0.9	30
5	1.55-1.75	30
6	10.4-12.5*	120
7	2.08-2.35	30

*Esta banda no se cuenta para el estudio realizado.

Tabla.4.1. –Características espectrales y espaciales de cada banda TM.

Las imágenes Landsat TM de la Cuenca de México que se utilizaron para este estudio, comprenden el periodo de 1985-1991. Las primeras fueron adquiridas el 31 de junio de 1985; las siguientes imágenes fueron adquiridas el 15 de octubre de 1991. Las imágenes de 1985 cubren el espacio entre las latitudes de 19° N y 19°45' N, y las longitudes 99°30' W y 98°40' W; mientras que las imágenes que corresponden a 1991 sólo cubren el área comprendida por el Distrito Federal (D.F.). En el presente estudio no se utilizó la banda 6 TM, que corresponde a la región del infrarrojo térmico.

IV.5 Correcciones Geométrica y Atmosférica

Entre la radiación electromagnético y la atmósfera se producen fenómenos como el albedo y la dispersión, siendo este último un factor determinante dentro de las correcciones a realizar. La dispersión es el resultado de la interacción de la radiación electromagnética con gases y partículas de la atmósfera, la intensidad de la dispersión depende de la longitud de onda de la radiación; para longitudes de onda pequeña la dispersión es mayor que para longitudes de onda larga, por lo que para rayos UV y la parte azul del espectro visible, la dispersión es mayor que para longitudes de onda del rojo e infrarrojo. La dispersión produce un exceso de reflectancia en las diferentes bandas Landsat TM que es necesario corregir antes de hacer cualquier análisis de las bandas.

Para corregir el efecto atmosférico en las imágenes es posible usar dos métodos, en donde el primero de estos consiste en substraer el mínimo valor de reflectancia, usando el histograma de frecuencia (Figura 4.3), en donde se debe comparar los histogramas de cada banda con la banda 7 TM (Jensen, 1996), que como se indicó anteriormente esta banda contiene la menor distorsión atmosférica.

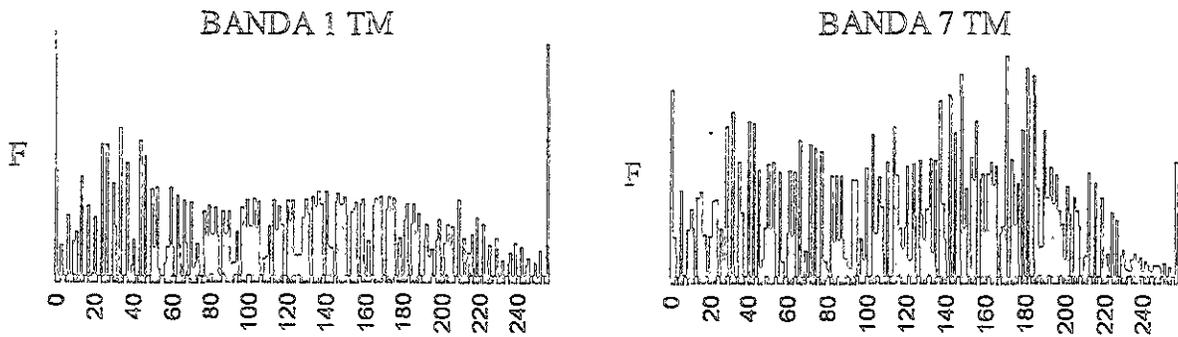


Figura 4.3. - Método para determinar el factor de corrección atmosférica por medio de los histogramas de frecuencia.

El segundo método consiste en determinar el factor de corrección atmosférica graficando cada pixel de la banda 7 TM contra la banda 1 TM (Figura 4.4). Se traza una línea usando mínimos cuadrados, en donde el factor de corrección atmosférica es el valor en el que la línea intercepta a la banda 1 TM, este valor se sustrae de la banda 1 TM. Este procedimiento se repite con las demás bandas (Floyd, 1996).

Además de las irregularidades atmosféricas, las imágenes TM contienen diferentes irregularidades geométricas cuando son adquiridas, estas distorsiones se clasifican como sistemáticas y no sistemáticas; las primeras son distorsiones geométricas que tienen efectos constantes y que pueden predecirse, mientras que las distorsiones no sistemáticas no son predecibles. Las distorsiones sistemáticas se deben a las variaciones de velocidad del escáner, mientras que las no sistemáticas son causadas por variaciones en la altitud y velocidad del sensor, este tipo de distorsiones son evaluadas tomando puntos de control que son utilizados para determinar las transformaciones requeridas para restaurar la imagen corregida (Floyd, 1996).

Dentro de las correcciones geométricas se encuentra el de usar una proyección geográfica para las imágenes adquiridas, de esta forma las imágenes pueden ser rotadas y alineadas de acuerdo a la planimetría del terreno.

Para las imágenes TM de la Cuenca de México estas correcciones se hicieron durante su adquisición. Para las imágenes de 1985 se colectaron de 20 a 30 puntos de control para cada escena, ecualizando los histogramas para cada imagen en 256 niveles, y se utilizó la proyección Geográfica para georreferenciar las imágenes. Mientras que para las imágenes de 1991 se le aplicó la corrección atmosférica.

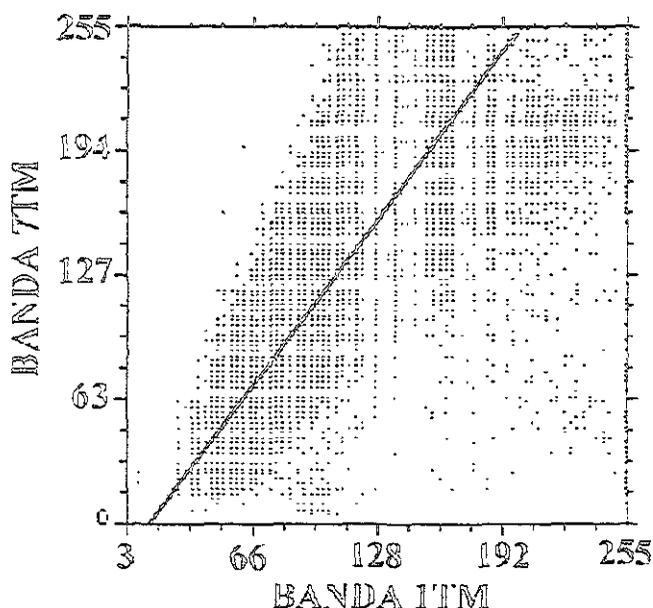


Figura 4.4. – Gráfica de la banda 7 TM contra la banda 1 TM, el factor de corrección atmosférica es el punto de intersección con la banda 1 TM.

IV.6 Composiciones de Falso Color y Color Real

Dentro de las técnicas de los Sensores Remotos se encuentran las composiciones de falso y color real, este tipo de imágenes son utilizadas para hacer un análisis visual con el fin de poder discriminar los diferentes usos de suelo. Puesto que el procesamiento de imágenes multiespectrales es la manipulación de una base de datos de N dimensiones, es necesario poder desplegar estos datos en una forma tridimensional (color total) o unidimensional (blanco y negro).

El ojo humano puede distinguir únicamente la región del visible que corresponde a los colores de rojo, verde y azul; cualquier otro color puede ser producido por la combinación de varias cantidades de esos tres colores, por lo que estos colores se conocen como colores primarios (RVA). Existen dos sistemas primarios, los sistemas de adición de color y sustracción de color; el segundo de ellos es el más común porque esa es la forma en que el ojo humano distingue los colores de los objetos.

Para poder desplegar una base de datos en forma tridimensional es necesario definir un espacio de color tridimensional por tres ejes ortogonales, en donde cada eje representa a una componente del sistema primario. Lo anterior es ilustrado por

el cubo de color RVA (Figura 4.5), cada pixel en la combinación de color es representado por un vector; el vector que se extiende del origen a la esquina opuesta del cubo representa varios tonos de grises y es llamada línea gris, los pixeles sobre esta línea tienen igual valor en las tres componentes espectrales (Showengerdt, 1983).

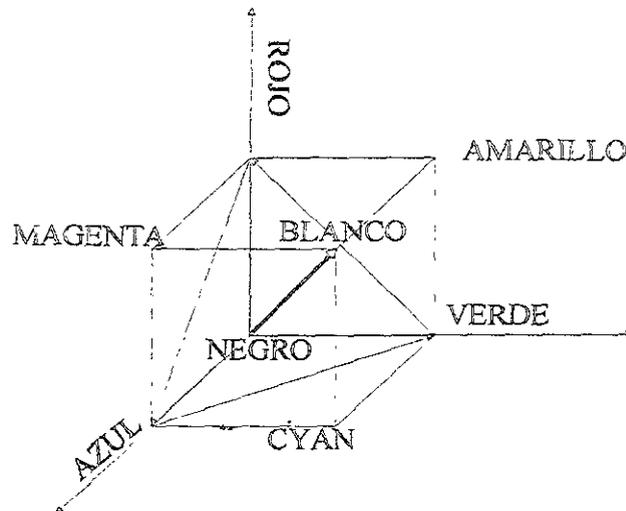


Figura 4.5. - Cubo de color RVA, modificado de (Showengerdt, 1983).

De esta forma es posible obtener composiciones de imágenes de color real, cuando se emplean las bandas que corresponden a los colores rojo, verde y azul, es decir las bandas 3, 2 y 1 TM respectivamente (Lámina 2). Debido a que las bases de datos multispectrales nos brindan información del espectro invisible es necesario utilizar las composiciones de falso color para poder desplegar esta información. Estas composiciones nos proveen información para poder discriminar la presencia de los diversos materiales que nos ayuden a identificar los diferentes usos de suelo.

Dentro de las composiciones de color que se realizaron se encuentran la composición de color real 321 (Lámina 2) en la que destaca la zona urbana con tonos grises claros a blancos en zonas de máxima reflectancia en las tres bandas, las áreas de vegetación saludable se muestran en tonos verdes entre las que destacan las zonas agrícolas.

La composición 432 (Lámina 3) muestra una mayor definición de la vegetación que aparece en tonos rojos, los rojos más fuertes muestran la vegetación más saludable que corresponde a áreas agrícolas y zonas de bosques de pino. Los cuerpos agua se muestran en color azul, en donde agua clara o profunda presenta un color azul oscuro a negro, y aquellos cuerpos de agua con sedimento aparece

en tonos más claros. El área urbana aparece en color azul con tonos grises, e incluso se muestran áreas en las que el color es blanco pues se muestra una máxima reflectancia en las tres bandas TM.

IV.7 Cocientes de Banda e Índices de Vegetación

El cociente de bandas es un método que consiste en la división de una banda espectral con otra. Debido a que existen ventanas de absorción en las firmas espectrales (Figura 4.2), es posible usar estas ventanas para poder ensanchar la información espectral con ayuda del cociente de bandas, para lo cual se selecciona una banda que se encuentra dentro del área espectral y otra fuera de esta, es decir el máximo y el mínimo de la curva espectral.

INDICES DE VEGETACION.

Para tener una mejor definición del tipo de vegetación que se encuentra en el área de estudio se calcularon dos tipos de Índice de Vegetación (IV), el Índice de Vegetación por Cociente (IVC) y el Índice de Vegetación Normalizado (IVN). Estos índices de vegetación se utilizan para separar la vegetación del suelo y se basan en la pendiente de la curva espectral de la vegetación y se utilizan combinaciones de bandas en la región del visible rojo y del infrarrojo cercano.

El Índice de Vegetación por Cociente consiste en obtener el cociente de la banda del infrarrojo cercano con la banda del visible rojo:

$$IVC = B4/B3$$

Este índice de vegetación presenta valores muy bajos y valores muy altos por lo que presenta problemas de iluminación. En algunas ocasiones se presentan problemas por la división entre cero, por lo que este índice de vegetación no presenta mucha información sobre la vegetación del área de estudio.

El Índice de Vegetación Normalizado es el índice más común que se utiliza para separar la vegetación del suelo, y difiere del IVC en la normalización por medio de la suma de las bandas:

$$IVN = (B4 - B3) / (B3 + B4)$$

Donde B3 y B4 son las bandas 3 y 4 TM respectivamente; este índice presenta la ventaja de la eliminación de divisiones entre cero y los valores son normalizados

con un rango entre -1 y 1 , en donde los valores negativos son representativos de superficies sin vegetación. Para la Cuenca de México se calculó el IVN (Lámina 4).

Sobre la base de los resultados del IVN fue posible hacer una reclasificación de los diferentes valores de reflectancia de la vegetación presente en el área de estudio (Lámina 5). En esta clasificación se presentan 5 tipos de vegetación que corresponden a diferentes cantidades de clorofila, que como se describió anteriormente determina el comportamiento de la curva espectral de la vegetación.

En la Lámina 5 se muestran cinco clases de vegetación de acuerdo al nivel de reflectancia que presenta en el área de estudio y según la clasificación de INEGI (mapa uso de suelo y vegetación 1:250 000, Ciudad de México E14-2); la clase que corresponde al nivel 0 es para aquellas áreas en las que casi no existe vegetación; la clase 1 corresponde a zonas de bosque de oyamel, la clase 2 corresponde en a zonas de pastizal, la clase 3 corresponde a zonas de bosque mixto, mientras que las clases 4 y 5 corresponden a zonas de bosque de pino y zonas agrícolas, que son las clases con mayor nivel de reflectancia.

Es importante notar que las clases fueron hechas de acuerdo con el nivel de reflectancia que se obtuvo por medio del IVN, e indicar que las relaciones entre los tipos de uso de suelo y las clases obtenidas sólo son preliminares pues no se cuenta con una verificación de campo minuciosa, pues en esta etapa del estudio se trata de discriminar los diferentes usos de suelo. Como se puede notar en la Lámina 5 no existe un claro límite entre unidades, en especial para zonas de agricultura y pastizales. Como se aprecia los índices de vegetación son una buena forma para determinar tipos de vegetación pero no suficiente para hacer una clasificación final.

IV.8 Análisis Multivariado

Debido a que los datos de las imágenes digitales están ordenados en forma de matrices; es posible analizar la información de dos o más bandas simultáneamente por medio de un análisis estadístico. Antes de hacer un análisis Multivariado (Componentes Principales) es conveniente realizar un análisis Univariado de las bandas TM (Tabla 4.2), con el fin de conocer la información individual de las bandas.

Dentro de las variables estadísticas usadas para conocer la información de las imágenes se encuentra la covarianza; esta es una medida de la forma en la que dos variables varían conjuntamente, es decir nos permite conocer, para una misma imagen tomada en diferentes bandas, las que contienen información similar ($C > 0$) y las que no ($C < 0$); de esta forma es posible evitar información redundante. Para las bandas TM de la Cuenca de México se calculó la matriz de covarianza (Tabla 4.3).

BANDA	1	2	3	4	5	7
µm	0.45-0.52	0.52-0.60	0.63-0.69	0.76-0.90	1.55-1.75	2.08-2.35
Media	119.1591	123.0446	117.7949	124.0448	120.5299	121.1625
Varianza	4575.6025	3912.3774	4411.8953	3274.4145	3779.3477	4175.4083
Desviación Estándar	67.6432	62.5490	66.4221	57.2225	61.4764	64.6174
Mínimo	0	0	0	0	0	0
Máximo	255	255	255	255	255	255

Tabla 4.2. – Análisis Univariado de las bandas TM de 1985.

La correlación es otra medida estadística que nos permite conocer el grado de asociación y/o dependencia semejante entre dos variables y este toma valores entre $[-1,0)$ y $(0,1]$. Para las imágenes Landsat TM de la Cuenca de México se calculó la matriz de correlación, en la que se aprecia la alta correlación que existe entre las bandas 1, 2 y 3 TM así como entre las bandas 5 y 7 TM (Tabla 4.4).

Si se compara la información de cada banda individualmente con otra, notaremos una estrecha similitud; las áreas que son claras o oscuras en una banda serán claras o oscuras en otra banda (Figura 4.6). Una buena forma de observar estas relaciones es graficar en un sistema de ejes coordenados, los valores digitales asignados a cada pixel de dos bandas diferentes. De esta forma la información queda relacionada en una región muy estrecha, esta correlación está dada por una redundancia en la información, si se reduce esta redundancia de información, resultará que los datos para describir una imagen pueden comprimirse (Floyd, 1996).

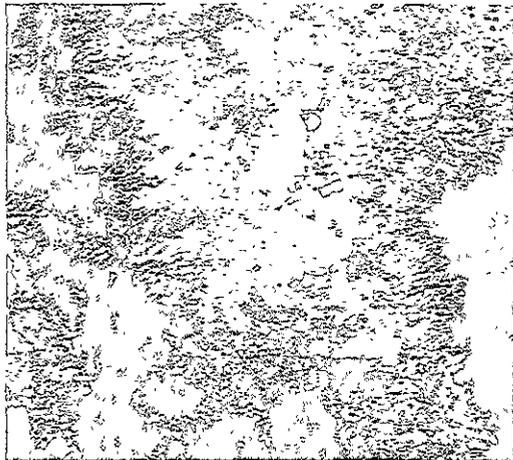
VAR/COVAR	B1	B2	B3	B4	B5	B7
B1	45745.57	4108.34	4245.09	2272.14	3122.78	3658.97
B2		3912.15	4061.91	2451.53	3132.28	3583.34
B3			4411.85	2634.41	3569.81	3987.36
B4				3274.41	2771.42	2563.02
B5					3779.35	3774.10
B7						4175.19

Tabla 4.3. – Matriz de covarianza de las bandas TM (1985) de la Ciudad de México.

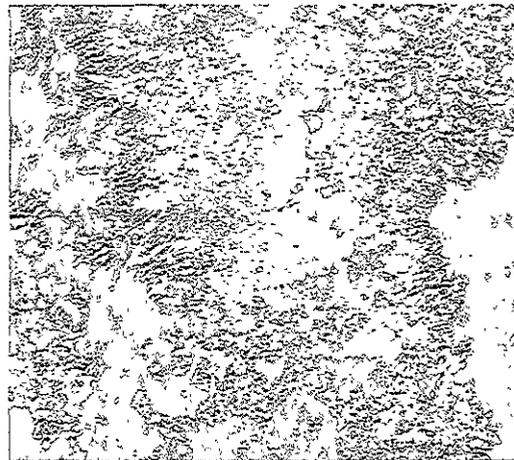
MATRIZ COR	B1	B2	B3	B4	B5	B7
B1	1	.971037	.944830	.587011	.750950	.837139
B2		1	.977718	.684957	.814599	.886629
B3			1	.693116	.874233	.929045
B4				1	.787820	.693181
B5					1	.950096
B7						1

Tabla 4.4 – Matriz de correlación de las bandas TM (1985) de la Cuenca de México.

El concepto de Componentes Principales (CP) fue desarrollado para transformar variables discretas en coeficientes no correlacionados. Este tipo de transformación establece un nuevo sistema de coordenadas en el que el origen es el centroide de la población y cuyos ejes están en la dirección de los eigenvectores (vectores característicos de la transformación), que son las direcciones en las que se encuentra la mayor información (Figura 4.7); la alineación es precisamente el mecanismo que decorrelaciona los datos.



BANDA 1TM



BANDA 2TM



BANDA 3TM



BANDA 4TM



BANDA 5TM



BANDA 7TM

Figura 4.6. --6 bandas de Landsat Thematic Mapper de la Cuenca de México (.985) en paleta de grises.

La operación matemática hecha es una combinación lineal de los valores de los píxeles del sistema coordenado original, que resultan en un nuevo sistema coordenado:

$$Y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2$$

$$y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2$$

donde

(x_1, x_2) = coordenadas del píxel en el sistema original

(y_1, y_2) = coordenadas en el nuevo sistema

a_{11}, a_{12}, a_{22} = constantes

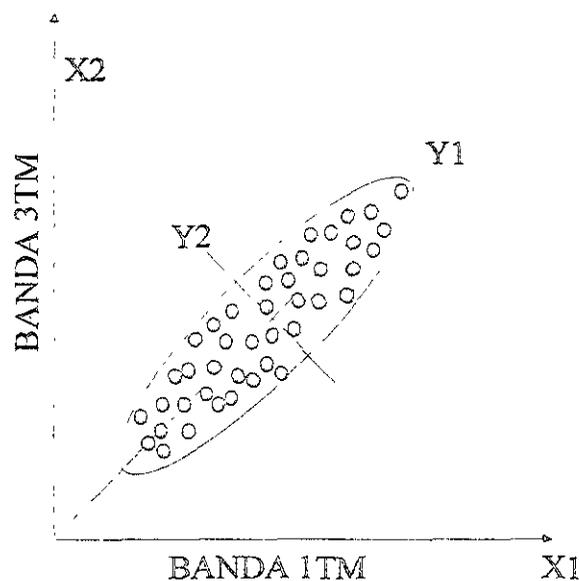


Figura 4.7. - Gráfica de los valores digitales asignados a los píxeles de dos bandas diferentes (x_1, x_2). La transformación de las Componentes Principales usado para generar un nuevo sistema de coordenadas (y_1, y_2).

Para añadir una nueva banda se agrega un nuevo sistema de coordenadas; en donde cada nuevo sistema de coordenadas es orientado perpendicularmente a todas las direcciones previas y en la dirección de la máxima densidad de puntos. Para cada píxel es determinado un nuevo valor en el nuevo sistema de coordenadas, esos valores son usados para generar una nueva imagen (Floyd, 1996).

De esta forma se obtiene una composición, que contenga la información de cualquier número de bandas, con el mayor contraste posible; de la cual CP1 mostrará el mayor contraste, pues este tendrá la mayor varianza, y las CP posteriores a la primera irán mostrando una disminución en el contraste (Tabla

4.5) como se observa en la en las CP calculadas para las imágenes TM de la Cuenca de México (Figura 4.8).

Como puede apreciarse, CP1 tiene el 85.82% de la varianza y CP2 posee el 8.83%, por lo que entre estas dos componentes acumulan el 94.65% de la varianza de toda la base de datos multiespectrales, consecuentemente la tercera CP acumula un 4.2% del brillo para un total de 98.85% y así sucesivamente.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Eigenvec.	5.15	0.53	0.25	0.03	0.03	0.01
%VAR	85.82	8.83	4.2	0.54	0.43	0.18
%Acum	85.82	94.65	98.85	99.39	99.82	100
Eigenvec.	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	.406440	-.453077	-.319342	-.605797	.295928	-.270159
2	.425054	-.278503	-.280350	.277673	-.046705	.764124
3	.431795	-.206965	-.027535	.388496	-.604300	-.503838
4	.348200	.763590	-.511878	.049152	.136187	-.112723
5	.410638	.302046	.529496	-.516469	-.367259	.241163
6	.421690	.004697	.525625	.368541	.625812	-.135684

Tabla 4.5. - Eigenvectores obtenidos en la transformación CP y que muestra el porcentaje de varianza en cada una de estas.

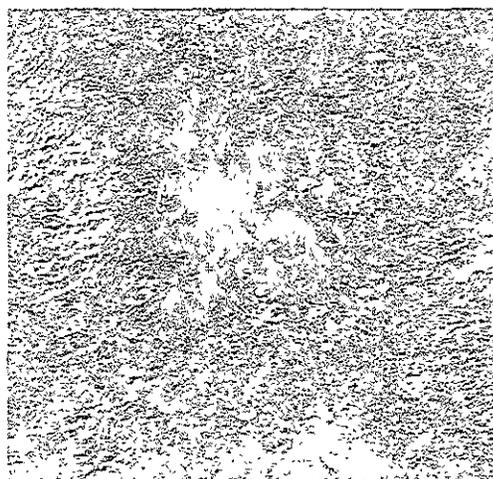
Para calcular la correlación entre cada banda y CP se calculó la matriz de correlación (Tabla 4.6), en donde CP1 tiene una alta correlación con B3, B2 y B7, CP2 tiene una alta correlación con B4 por lo que esta componente contiene la vegetación. Es de notar que el resto de las CP provee muy poca información y contiene mucho ruido, estas acumulan muy poca varianza, por lo que estas componentes no se utilizan.

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
B1	.922308	-.329810	-.160270	-.108894	.047595	-.027838
B2	.9645548	-.202732	-.140701	.049913	-.007512	.078737
B3	.979845	-.150657	-.013819	.069834	-.097192	-.051916
B4	.790147	.555843	-.256900	.008835	.021903	-.011615
B5	.931835	.219869	.265742	-.092837	-.059068	.024850
B7	.956915	.003419	.263799	.066247	.100651	-.013981

Tabla 4.6. -Matriz de correlación de las componentes principales con las bandas originales.



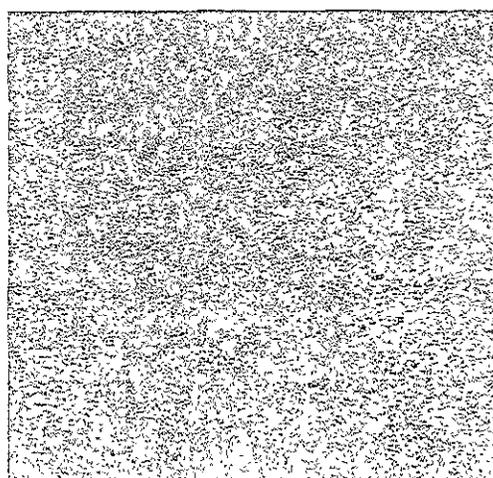
CP1



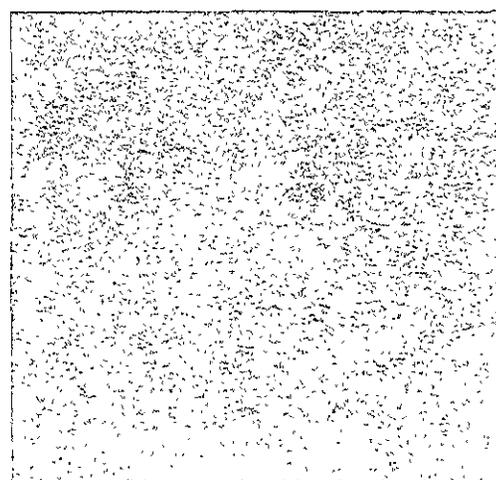
CP2



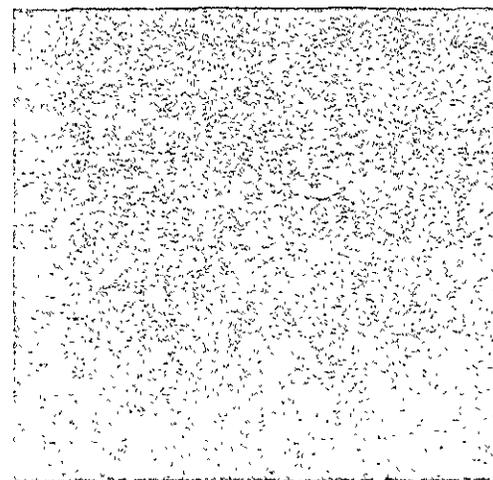
CP3



CP4



CP5



CP6

Figura 4.3. – 6 Componentes Principales resultado del Análisis Multivariado.

IV.9 Clasificación No Supervisada

Para poder agrupar píxeles con un valor de reflectancia similar en las diferentes bandas se usaron dos métodos: clasificación supervisada y no supervisada.

La clasificación no supervisada se utiliza para poder determinar diferentes usos de suelo en clases o clusters basándose en los datos estadísticos, sin el conocimiento previo de lo que existe. Para poder clasificar una imagen en clases o clusters es necesario utilizar un histograma de reflectancia, en donde se mostraran cierto número de picos, estos picos representan clusters de mayor frecuencia que están asociados a diferentes usos de suelo; para el caso de dos bandas los picos se mostraran como colinas y para el caso de tres bandas serán esferas (Figura 4.9).

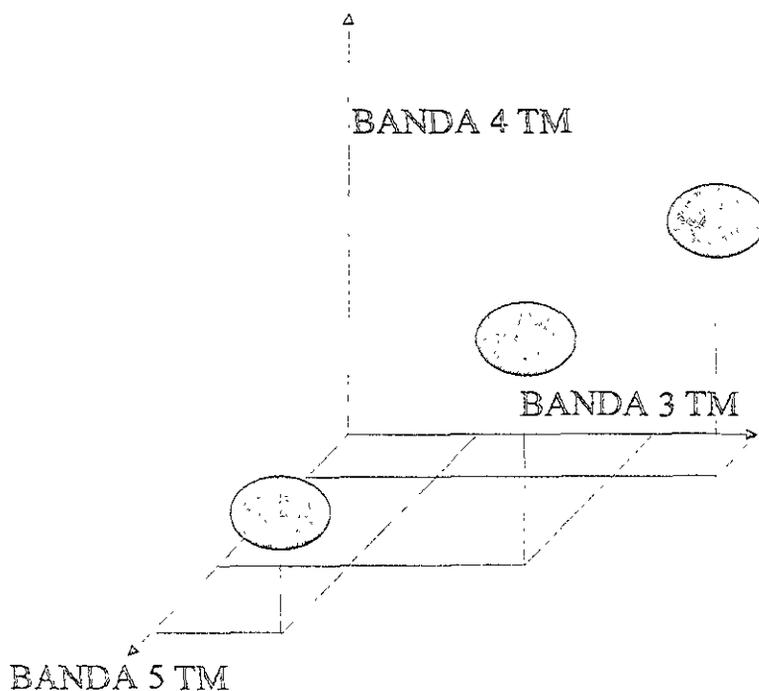


Figura 4.9. – Forma en que los píxeles se agrupan en Clusters.

Para la clasificación no supervisada se utilizó una composición de falso color 435, en la que primero se realizó una clasificación no supervisada en donde se trató de determinar la mayor cantidad de clusters posibles; el número de clusters que se obtuvo fue de 25, se utilizó esta primera clasificación no supervisada para determinar con ayuda del histograma de frecuencia los clusters más abundantes (Figura 4.10) y por lo tanto de terminar el número de clusters correcto con el cual hacer una nueva clasificación no supervisada.

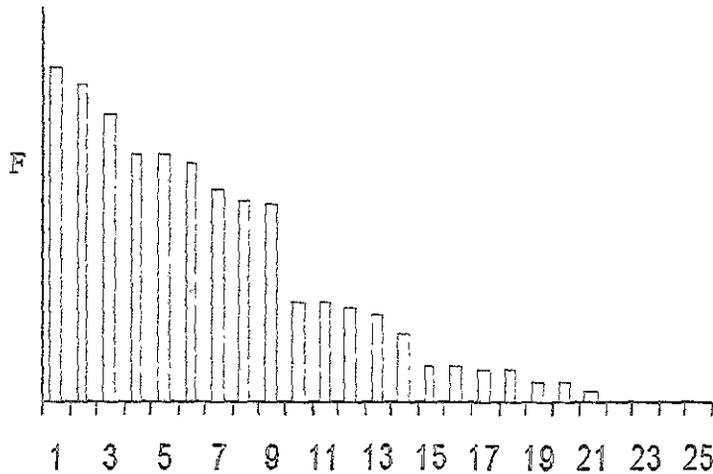


Figura 4.10. – Histograma de frecuencia obtenido de la primera clasificación no supervisada.

En el histograma de frecuencia se aprecia que es posible agrupar en 9 grupos de clusters que dominan la imagen en donde los tres primeros son los más dominantes, el cuarto grupo cubre hasta el cluster 6, continúa el quinto grupo hasta el cluster 9, el sexto grupo abarca del cluster 10 al 14, los grupos 7, 8, y 9 tienen como límites a los clusters 18, 21 y 25 respectivamente. Con base a lo anterior se realizó una segunda clasificación no supervisada con 9 clusters (Lámina 6), la cual presenta una mejor definición que la clasificación anterior; a pesar de esto, se presentan clusters mezclados y en algunos casos no se presenta un apropiado límite entre los diferentes usos de suelo que pueden apreciarse visualmente en las áreas urbana y agrícola.

IV.10 Clasificación Supervisada

En una clasificación supervisada la identidad y localización de algunos tipos de uso de suelo se conocen previamente, como son: el uso de suelo urbano, agrícola, cuerpos de agua, etc. A través de la combinación de trabajo de campo, análisis de fotografías aéreas, mapas y experiencias personales (Mausel et al., 1990).

Por medio de los métodos antes descritos, se determinaron los diferentes usos de suelo presentes en el área de estudio, por lo que se crearon polígonos que contienen estos diferentes usos de suelo; estos polígonos fueron digitalizados en composiciones de color de las bandas originales o de las componentes principales obtenidas con anterioridad, y de las reclasificaciones de IVN.

El siguiente paso fue crear las curvas espectrales de cada uso de suelo, es decir, las curvas espectrales son determinadas evaluando los valores de reflectancia por cada clase de uso de suelo; las características estadísticas como máximo, mínimo y valor medio son obtenidas para cada una de las bandas originales (Figura 4.11).

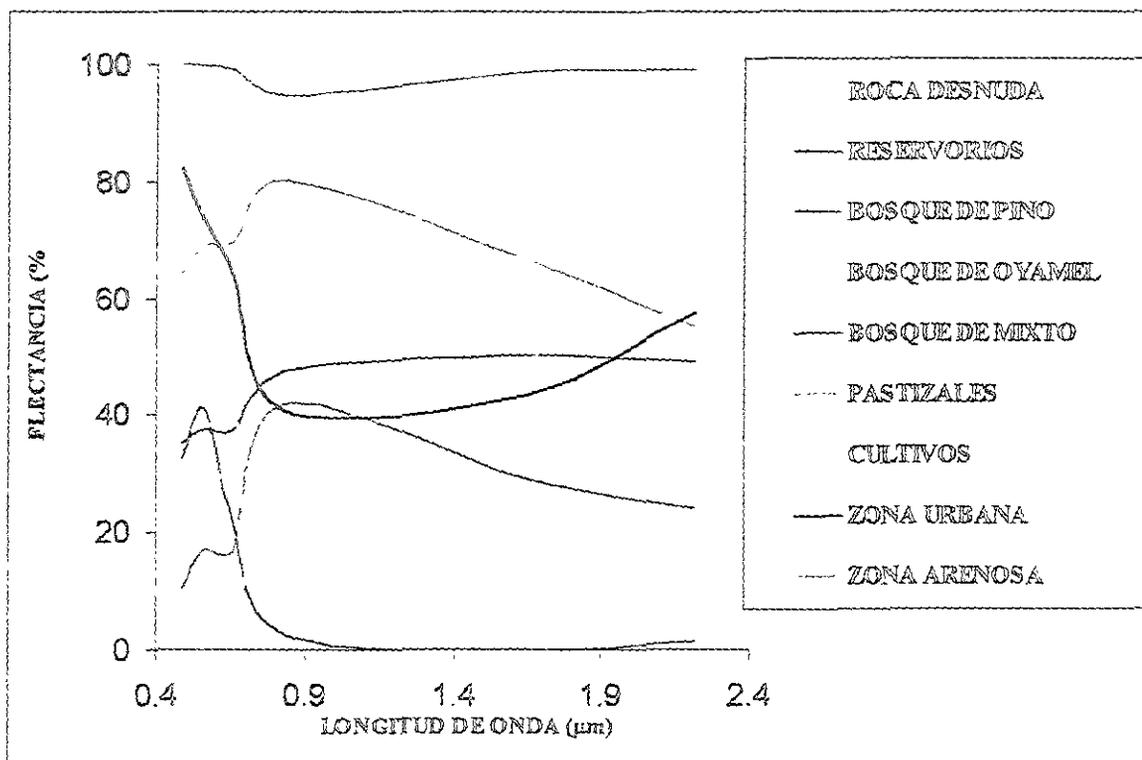


Figura 4.11. – Curvas espectrales obtenidas para cada clase de uso de suelo.

La clasificación supervisada fue obtenida usando el algoritmo de Máxima Probabilidad, este método usa los valores medio y varianza/covarianza de las curvas espectrales y asume que cada clase se distribuye normalmente en cada banda. Este método produce una zona elíptica con características similares para cada clase, en la que se determina la probabilidad de que un pixel pertenezca a una clase.

El método fue aplicado a las 6 bandas TM, para ambas imágenes (1985 y 1991), en el que se obtuvo una imagen para cada fecha de adquisición (1985 y 1991) que muestran una clara diferencia entre clases; en estas imágenes se obtuvieron 9 clases de uso de suelo son: Roca Desnuda, Reservorios, Cultivo, Pastizal, Bosque de Pino, Bosque de Oyamel, Bosque Mixto, Zonas Arenosas y Zona Urbana (Lámina 7 y Lámina 8).

Las áreas de cada uso de suelo del Distrito Federal se muestran en la Tabla 4.7, en donde se muestra claramente que el uso de suelo más abundante es el que corresponde al área urbana con un 38.12%, en donde le sigue el bosque mixto con 27.7% (hasta 1991).

CLASES	1985(%)	1991(%)	VARIACION (%)
ZONAS ARENOSAS	0.60		-0.60
CULTIVO	7.88	10.13	2.25
MIXTO	24.47	27.70	3.23
BOSQUE DE OYAMEL	3.31	11.37	8.06
PASTIZAL	13.88	10.02	-3.86
BOSQUE DE PINO	5.97	2.12	-3.85
RESERVORIOS	0.48	0.12	-0.35
ROCA DESNUDA	7.56	0.42	-7.14
URBANO	35.85	38.12	2.27
TOTAL (1493.85 km ²)	100	100	0

Tabla 4.7. – Área obtenida para cada uso de suelo del Distrito Federal.

La anterior tabla nos muestra que el uso de suelo con mayor cambio lo presentan las zonas de bosques, entre las que destaca las zonas de Bosque de Oyamel. En conjunto las áreas de bosque presentan un incremento de más del 7%, en su mayoría este incremento esta dado por las áreas de Roca Desnuda que fueron utilizadas para la inducción de bosques.

Por otro lado las zonas de cultivo (incluyendo las zonas de Pastizales) se vieron reducidas en un poco más del 1.5%, esto como se indica en la Tabla 4.7, el Cultivo incremento casi el mismo porcentaje que el Pastizal perdió.

Los cambios que corresponden al uso Urbano del D. F., muestran que este uso de suelo se incremento en más del 2%. Este incremento esta dado por las áreas en donde el Cultivo y las Zonas Arenosas disminuyeron.

Como se observa las Técnicas de Sensores Remotos son una excelente herramienta para evaluar el uso de suelo, con el fin de poder determinar los Elementos Bajo Riesgo.

Capítulo V. Gravimetría de la Cuenca de México

V.1 Antecedentes

La obtención de datos gravimétricos y magnéticos, por sensores terrestres y aéreos, a lo largo de líneas paralelas o en puntos equiespaciados bien puede analizarse como una imagen espacial, geofísica en este caso, las cuales son tradicionalmente usadas para crear mapas de contornos, mediante métodos de interpolación, para determinar la intensidad del campo magnético o gravimétrico para puntos entre los datos obtenidos. Los mapas de contornos resultantes de gravedad y campo magnético, son difícilmente interpretados visualmente, por lo que usualmente se requiere la asistencia de un geofísico experimentado para su interpretación.

Al igual que las imágenes espectrales, las imágenes geofísicas pueden ser representadas por mallas de tipo raster, en donde cada elemento de la malla es calculado de los datos originales mediante interpolación. Para poder desplegar las imágenes geofísicas, al igual que las espectrales, se hace uso de una escala de grises o de color como: blanco-negro, rojo-azul, etc.; con la diferencia de que los máximos y mínimos de datos geofísicos no están asociados a niveles de reflectancia, sino a valores de campo gravitacional o magnético. De esta forma se reemplazan los contornos de niveles por una escala de color, que facilita su procesamiento e interpretación.

V.2 Anomalía de Bouguer

En 1953 se realizó un levantamiento gravimétrico en la Cuenca de México con objeto de definir el basamento y la tectónica de la Cuenca (Hernández-Moedano y Grauel, 1954). Del mapa original se digitalizaron los valores de las estaciones, y por medio de una interpolación de tipo Kriging se calculó una malla de tipo raster, para poder así generar una imagen geofísica de gravedad.

El mapa original contiene 2191 muestras en un área de 3002 km², con una densidad de 0.7 lecturas por km², por lo que se determinó un espaciado de 1 km, para la malla de tipo raster. Por último la imagen geofísica se desplegó en una escala de color (Lámina 9).

Las correcciones gravimétricas incluyen correcciones por aire libre y Bouguer. Con el fin de que no aparecieran anomalías negativas de gran magnitud, debido a la elevación de la zona (nivel del ex-lago de Texcoco) en que se desarrolló el trabajo, se sumó una constante de 10 mGal, a fin de obtener anomalías positivas. Una densidad de Bouguer de 1.7 g/cm^3 fue usada por Hernández-Moedano and Grauel (1954) para determinar la anomalía de Bouguer, así mismo utilizaron un método de malla para calcular las correcciones topográficas. Hernández-Moedano and Grauel (1954) calcularon un rango de 2.5 mGal para la zona pétrea (regiones cercanas a las sierras) a 0.2 mGal en las zonas lacustres para las correcciones topográficas.

La anomalía de Bouguer, desplegada en una escala de color (Lámina 9), muestra 3 regiones representativas que se distribuyen en dirección Norte a Sur. Los valores más altos (300-400 mGal) corresponden a la región norte que se extiende hasta el Cerro de Chiconautla, la Sierra de Guadalupe y el Cerro del Chiquihuite.

La segunda región se ubica en la parte sur del área de estudio, en donde se muestran los valores de 170-300 mGal. Esta región se distribuye dentro de la zona pétrea y de transición (véase sección II.6), que presenta una serie de máximos relativos que corresponden al Cerro de la Estrella, Peñón del Marqués, Sierra de Santa Catarina, Xico, Tlapacoya, Chimalhuacán y el Pino. Dentro de esta región se observan alineamientos entre el Cerro de la estrella y el Peñón de Marqués y la más marcada de ellas entre el Cerro de Chimalhuacán, el Pino y Tlapacoya.

La última región (100-170 mGal) se ubica en la parte meridional de la Cuenca y se muestra como un cinturón que corta en dos partes la porción sur de la Cuenca, y que comprende la zona lacustre (véase sección II.6), en la que se ubican el exlago de la Ciudad de México y las subcuencas de Xochimilco y Chalco.

Este cinturón en particular se muestra con una clara continuidad entre la región del exlago de Ciudad de México y la subcuenca de Xochimilco. Esta continuidad se ve truncada en su parte oriente, en donde se ubica la subcuenca de Chalco, y en la que se muestra un ligero desplazamiento NE-SW. Por lo que se infiere la probable existencia de una estructura geológica que divide a las cuencas de Xochimilco y Chalco, y que coincide con la alineación entre el Cerro de Chimalhuacán, el Pino y Tlapacoya.

Las anomalías que se observan en la Lámina 9, indican variaciones laterales importantes en la densidad de las rocas del subsuelo; en los que sin duda sobresalen los mínimos que comprenden la tercera región, descrita anteriormente, y que puede extenderse hasta la zona en la que se ubica el exlago de Texcoco

rodeando al Peñón del Marqués. En general esta región se encuentra rodeando a la segunda (zona pétreo y de transición) en la que se ubican los principales centros eruptivos de la parte meridional de la Cuenca de México (Lámina 9). Es decir la segunda región corresponde con los depósitos relacionados con la actividad piroclástica y fluvial del Plioceno (Tppc), la parte norte de la formación Chichinautzin (Qc) y los depósitos aluviales del Cuaternario (Qal) (descritos en la sección II.5), que conforman la Zona pétreo y de Transición. Mientras que la tercera región corresponde con los depósitos lacustres (Qla); por lo que los mínimos que se presentan en la Lámina 9 corresponden con los mayores espesores de sedimentos lacustres.

La primera región, en la que ubican los valores más altos, parece no estar relacionada con el depósito de sedimentos lacustres o aluviales, por lo que es posible la existencia una estructura geológica que se extiende desde la Sierra de Guadalupe hacia el Este de la Cuenca. Sin embargo es importante aclarar que la cantidad de datos en la Imagen gravimétrica disminuye en su parte norte, por lo que debe tomarse con reserva.

V.3 Separación Regional Residual y Estimación del Basamento

Una manera de definir el concepto de regional gravimétrico, es involucrar estructuras de amplitud y profundidad relativamente más grandes que los eventos geológicos someros (efectos residuales). Una señal residual contiene armónicos de alta frecuencia, de la misma manera que una señal regional contiene armónicos de baja frecuencia. La idea de la separación regional-residual es para aislar una anomalía de interés, y una forma de intentarlo es filtrar (remover) las componentes de un rango de frecuencias. Esto se basa en el hecho de que las anomalías de altas frecuencias se deben a fuentes someras, mientras que frecuencias bajas se deben tanto a fuentes someras como profundas.

A partir del análisis espectral es posible estimar una profundidad media de las fuentes gravimétricas, y puede usarse para cartografiar estructuras geológicas a partir de datos gravimétricos o magnéticos en superficie (Spector, 1970). Debido a esto el tipo de relaciones entre la profundidad de la fuente y sus componentes armónicos ha sido extensamente usado en una gran cantidad de trabajos para interpretar anomalías gravimétricas y magnéticas, particularmente en trabajos de continuación descendente y estimación de la profundidad de la fuente (Pal et al., 1979; Campos et al., 1997; Chávez et al., 1989, 1995, 1999).

Para poder determinar la profundidad (d) de un cuerpo prismático, se puede estimar el espectro de potencia de su anomalía asociada, aplicando:

$$E(\lambda, 0) = E(0, 0) e^{-(2\pi d/N - m)\lambda}$$

En donde λ , m y N son el número de onda, la pendiente del promedio del espectro radial de potencia y número de datos gravimétricos, la profundidad (d) a la cima del basamento puede fácilmente calcularse, igualando a cero el gradiente de $[2\pi d/N - m]$ (Pal et al., 1979).

Basado en el espectro de potencia bidimensional de la imagen gravimétrica, y con una ventana cuadrada propuesta por Dimitriadis et al. (1987), fue posible diseñar un filtro para estimar la profundidad del basamento. Para poder disminuir el error de tipo *aliasing*, producido por la digitalización de las anomalías, fue necesario hacer diversas pruebas con distintas dimensiones del filtro. Esto es de suma importancia debido a que el error, en la estimación de la profundidad del basamento, está relacionado con las dimensiones del filtro.

Basado en el algoritmo de Dimitriadis et al. (1987) para el cálculo del espectro de potencia radial, mediante una ventana cuadrada, fue posible la estimación del basamento. Mediante el análisis previo del espectro radial de potencia, se determinó la frecuencia de corte, para separar la anomalía regional de la residual (Figura 5.1).

La pendiente, de la Figura 5.1, en la zona de bajas frecuencias de la curva representa la componente regional del campo; mientras que la pendiente que corresponde a la alta frecuencia representa la componente residual provocada por cuerpos superficiales. La separación y el cálculo de profundidad de la anomalía es aproximada debido al número de limitaciones del método.

El contenido de frecuencia de una anomalía no solo se debe a la profundidad del cuerpo sino también a su geometría. Cuerpos grandes producirán información de baja frecuencia y por tanto darán pendientes más inclinadas en la gráfica del espectro de energía radial.

Un problema se presenta al identificar aquellas secciones que poseen diferentes pendientes en la gráfica, haciendo difícil diseñar un filtro. Una vez que ambas componentes han sido identificadas, como se muestra en la figura anterior puede diseñarse el filtro de transferencia.

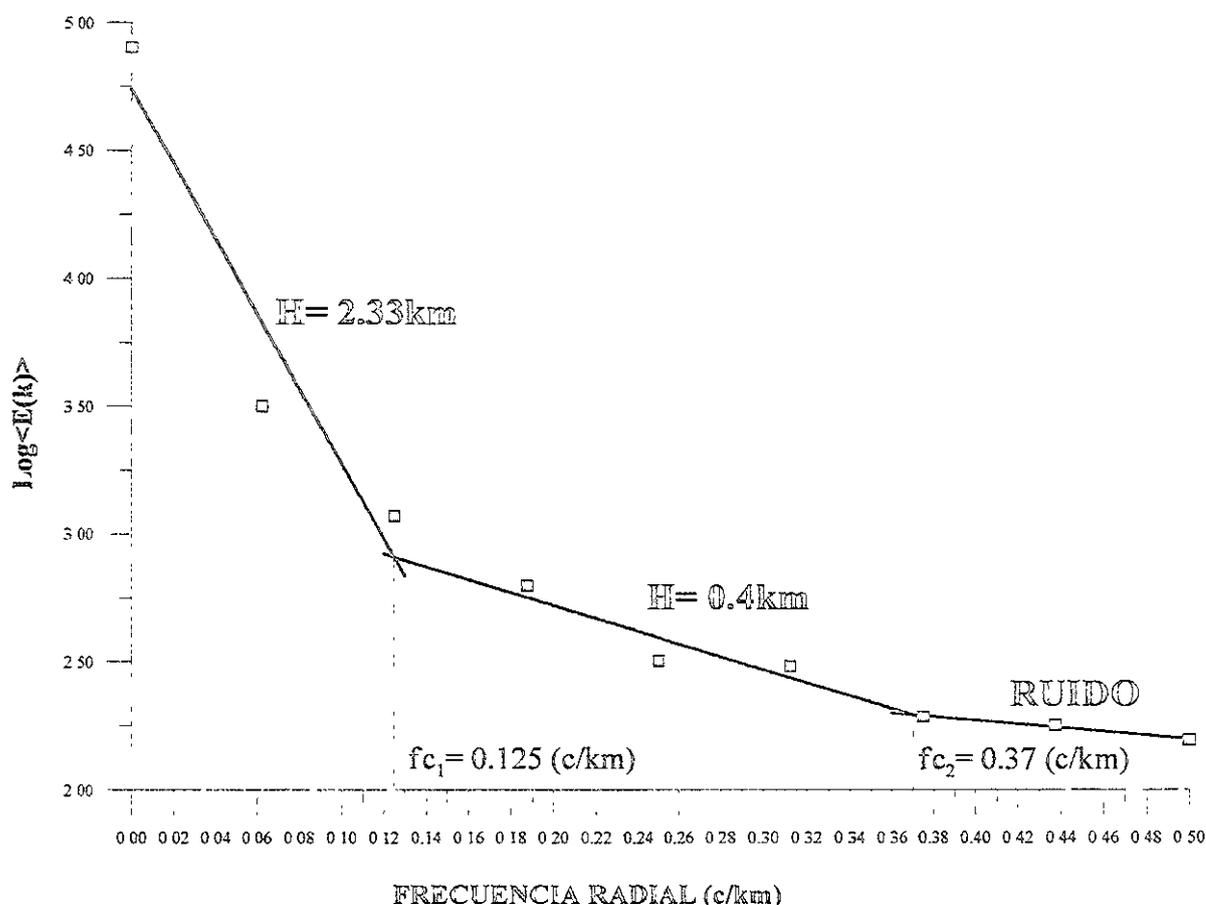


Figura 5.1. - Espectro radial de potencia de la anomalía de Bouguer (Lámina 9). La frecuencia de corte $fc_1=0.125(c/km.)$ la cual separa la anomalía regional de la residual; así como $fc_2=0.37(c/km.)$ separa la anomalía residual del ruido. Se presentan las profundidades estimadas para cada componente.

Mediante el análisis anterior se obtiene que la frecuencia de corte fc_1 , la cual separa la anomalía regional de la residual, es de aproximadamente 0.125 c/km y la estimación de la profundidad, de la fuente regional, es aproximadamente de 2.33 km . Así como fc_2 , que separa la anomalía residual del ruido, es aproximadamente 0.37 c/km y con una estimación de la profundidad de aproximadamente 0.4 km ; muy similar a la obtenida por Chávez R. E. and Flores E. L. (1989) para la subcuenca de Xochimilco-Chalco. Es importante notar que la tercera recta, que representa el ruido, tiene una pendiente casi horizontal; esto se debe a que las componentes de altas frecuencia ($>0.37 \text{ c/km}$) son asociadas con el error de digitalización (Gupta and Ramani, 1980).

Antes de calcular la anomalía regional, la imagen fue preprocesada filtrando el ruido, usando los resultados del espectro radial de potencia (Figura 5.1). Para

calcular la anomalía regional, se utilizó un filtro Butterworth, de orden 10, con la frecuencia de corte de 0.37 c/km (definida con anterioridad). En la imagen de la anomalía regional se muestra con mayor claridad la relación que guardan las subcuencas de Xochimilco y Chalco con el exlago de la Cuenca de México. Además se aprecia con mayor claridad la extensión del exlago de Texcoco hacia el este descrito con anterioridad (Lámina 10).

Los datos gravimétricos cubren una superficie de 3002 km², que mediante la interpolación, produjeron una imagen espacial de 46x76 celdas, con un espaciamiento, como se mencionó anteriormente, de 1km. Un filtro de 16x16 celdas fue seleccionado, después de diferentes pruebas con filtros de 8x8 y 32x32 celdas, para obtener la topografía del basamento mediante el algoritmo de Dimitriadis et al. (1987) (Lámina 11).

La cordillera del basamento se muestra con las máximas elevaciones (mínimas profundidades) distribuyéndose en una alineación con dirección este-oeste y en las que se ubican las laderas de la Sierra de Guadalupe, Cerro de Chiconautla y el exlago de Texcoco; además presenta una pequeña extensión en el Peñón de los Baños. Esta cordillera continua distribuyéndose hacia el norte en dos segmentos con una dirección sur-norte, que corresponden a la ubicación de las Sierras de Tepotzotlán y Tezontlalpan. El parteaguas de esta cordillera puede considerarse como la estructura que, desde la imagen de Anomalía de Bouguer, se encuentra asociada a la primera región (sección V.2).

Como se menciona en la sección anterior, debido a la cantidad de datos al norte de esta área, el error en la estimación del basamento es más alto que en el resto del a imagen Gravimétrica. Por lo que las depresiones que se mapean al norte de esta cordillera deben tomarse con reservas.

El basamento estimado presenta en la zona meridional de la Cuenca (sur de la imagen gravimétrica) las mayores depresiones en la que se ubican el exlago de la Ciudad de México y las subcuencas de Chalco y Xochimilco. Estas depresiones se distribuyen en una dirección este-oeste predominantemente.

La mayor depresión se ubica en la parte Oeste de la zona meridional de la Cuenca, que corresponde al exlago de la Ciudad de México y la subcuenca de Xochimilco. Esta depresión se muestra limitada por posibles fallas normales con una dirección este-oeste, que constituyen las paredes de un posible graben.

Esta estructura puede estar asociada al fracturamiento profundo descrito por Mooser (1978), que se encuentra debajo de la Cuenca (véase sección II.4):

dirigida en la misma dirección del graben. Por lo que esta estructura puede haberse formado durante el Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Capítulo II)

Lo anterior puede confirmarse correlacionando las profundidades estimadas en la Lámina 10, con algunos de los estudios sísmicos de reflexión realizados en la Ciudad de México por Pérez-Cruz (1988). Las profundidades estimadas coinciden con la interface que separa la secuencia de basalto y andesitas Mioceno-Oligoceno, con las intercalaciones de tobas y brechas volcánicas. Esta secuencia es definida por Pérez-Cruz como la secuencia VI con una densidad de entre 2.2 y 2.45 gr/cm.

Es importante notar que la discontinuidad entre las subcuencas de Xochimilco y Chalco está dada por una barrera geológica, presumiblemente una falla, como ya podía inferirse a partir de las imágenes de anomalía de Bouger y Regional (Láminas 9 y 10); con una dirección NW-SE. Al igual que en el posible graben, esta falla está asociado al segundo grupo de fracturamiento (del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano), pues en este grupo se presentan fallas normales con rumbo N45°W (véase Capítulo II).

Capítulo VI. La Delegación Iztapalapa un Ejemplo de Riesgo

Desde finales de la década de 1960 en diversas zonas de la Delegación Iztapalapa y en otras partes de la Ciudad de Ciudad de México, se ha reportado la presencia de fracturas, las cuales afectan diversas obras de infraestructura, tales como áreas residenciales, escuelas, tuberías y vías de comunicación. Por lo que es necesario contar con información sobre los mecanismos y eventos que dan origen a las fracturas, así como establecer estudios geofísicos que nos permitan su localización y caracterización de estas.

Con el fin de poder extender las investigaciones en la evaluación de riesgos y en la implementación de programas de desarrollo en la Delegación Iztapalapa, particularmente en la Unidad Habitacional Ejército de Oriente, se han realizado diversos estudios encaminados a localizar y caracterizar fracturas en el Cerro Peñón del Marqués y zonas continuas. Como parte de estos estudios se realizaron diversos perfiles de GPR, que se mostraran en el siguiente capítulo.

VI.1 Caracterización Geológica y Geográfica

La delegación de Iztapalapa se ubica al este del Distrito Federal entre $19^{\circ}24'$ - $19^{\circ}17'$ de latitud Norte y $98^{\circ}58'$ - $99^{\circ}06'$ de longitud Oeste, con una altura promedio de 2240 m s.n.m y cubriendo una extensión que representa el 7.5% de la superficie del distrito federal

La Delegación Iztapalapa colinda al norte con la delegación Iztacalco y el municipio de Nezahualcóyotl del estado de México; el este con los municipios de La Paz y Valle de Chalco Solidaridad del Estado de México y la delegación Tláhuac; al sur con las delegaciones Tláhuac y Xochimilco; al oeste con las delegaciones Coyoacán y Benito Juárez.

Dentro de la delegación se encuentran varios rasgos topográficos (Figura 6.1) como la Sierra de Santa Catarina, el Cerro de la Estrella (2460 m) y el Peñón de Marqués (2400 m); dentro de la Sierra de Santa Catarina sobresalen el Volcán Guadalupe (2820 m), el Cerro Tecuautzi (2640 m), el Cerro Tetecón (2480 m), el Volcán Yuhualixqui (2420 m) y Volcán Xaltepec (2500 m).

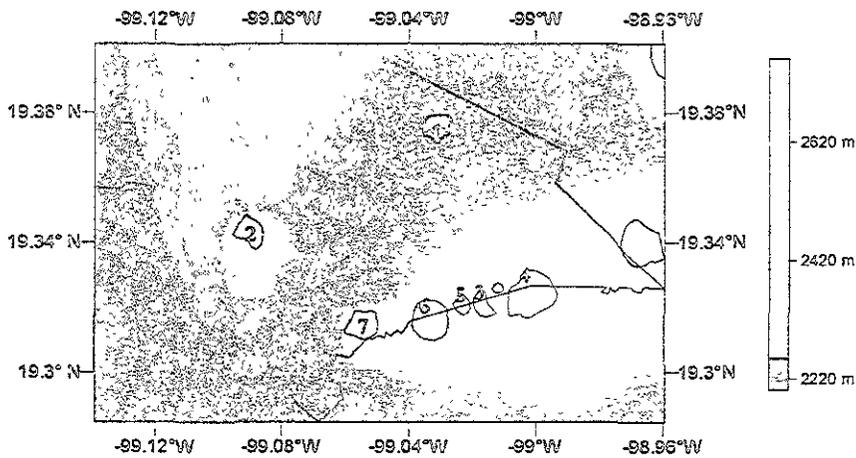


Figura 6.1.- Rasgos topográficos de la Delegación Iztapalapa: 1-C. Peñón del Marqués, 2-C la Estrella, 3-C. Tecuautzi, 4-V. Guadalupe, 5-C. Tetcón, 6-V. Xaltepec y 7-V. Yuhualixqui.

Los tipos de clima presentes en la delegación son dos: Templado subhúmedo con lluvias en verano y Semiseco templado. Con una precipitación anual promedio de 607 mm anuales, teniendo en los meses de junio, julio, agosto y septiembre el periodo de mayor precipitación en el año.

De acuerdo a la zonificación geotécnica dada por Marsal y Mazari (1959) (véase sección II.6), dentro de la Delegación Iztapalapa se encuentran las tres zonas geotécnicas; la Unidad Habitacional Ejercito de Oriente se encuentra ubicada sobre los sedimentos lacustres y parte de la zona de transición abrupta (Figura 6.2).

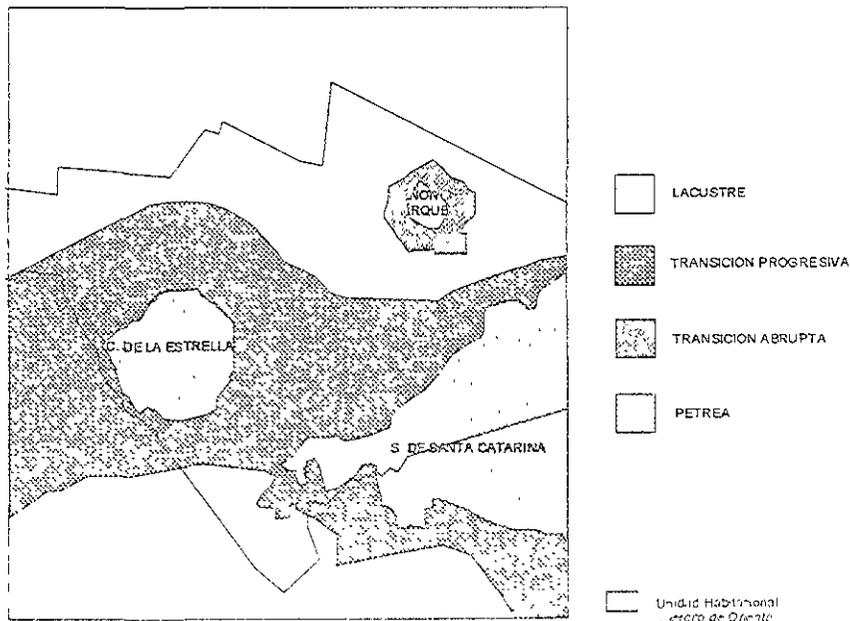


Figura 6.2. – Zonificación geotécnica en la zona del Peñón del Marqués (Modificado de Marsal y Mazari, 1959)

El crestón llamado Peñón del Marqués o Peñón Viejo está compuesto por dos cuerpos extrusivos. El cuerpo norte es la más reciente y pertenece al grupo Chichinautzin; superficialmente y en cortes que se han hecho para extraer materiales, se observan capas de tezontle. El cuerpo sur siendo el más viejo presenta estratos de tezontle. Al pie del peñón y en torno a él se encuentran en abundancia arenas volcánicas negras. Una de las características más significativas de esta zona es que no existe transición gradual entre los depósitos lacustres y la roca ígnea que forma el cerro. Esto es a tal grado crítico en algunos puntos que los problemas de cimentación por hundimiento diferenciales son muy delicados (Del Castillo, 1978).

En las exploraciones analizadas por Del Castillo (1978), mediante sondeos eléctricos verticales (Figura 6.3), se observó que superficialmente se encuentran arenas limosas de compacidad media a alta con contenidos de agua menores de 100%. A continuación se tienen arcillas de alta compresibilidad con contenidos de agua variables entre 100 y 400%, estratificadas con arenas limosas de baja compresibilidad en espesores muy variables. Finalmente aparecen capas de arena y grava de tezontle con los contenidos de agua más bajos (Figura 6.4). La zona de transición donde se presentan estas condiciones estratigráficas no se puede delimitar con precisión en vista de la escasez de sondeos y de las irregularidades topográficas del sitio; sin embargo, se considera que en un radio de 600 a 1 000 m alrededor del cerro es probable encontrar tales condiciones (Del Castillo, 1978).

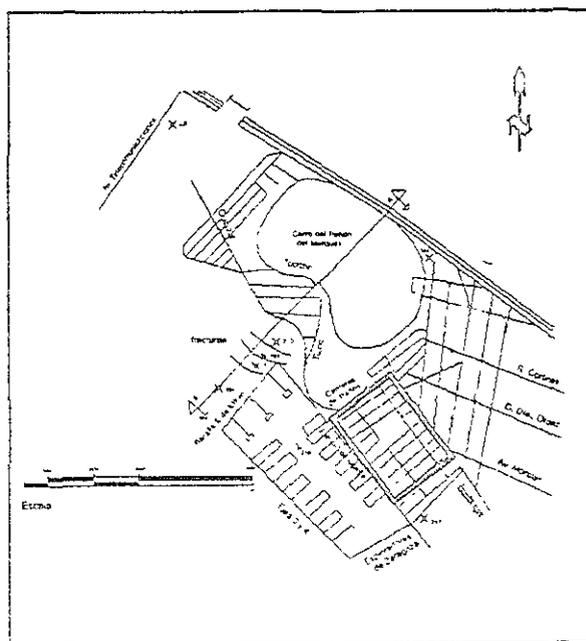


Figura 6.3.- Ubicación de los sondeos analizados por Del Castillo (1978) en la zona del Peñón del Marqués y zonas aledañas.

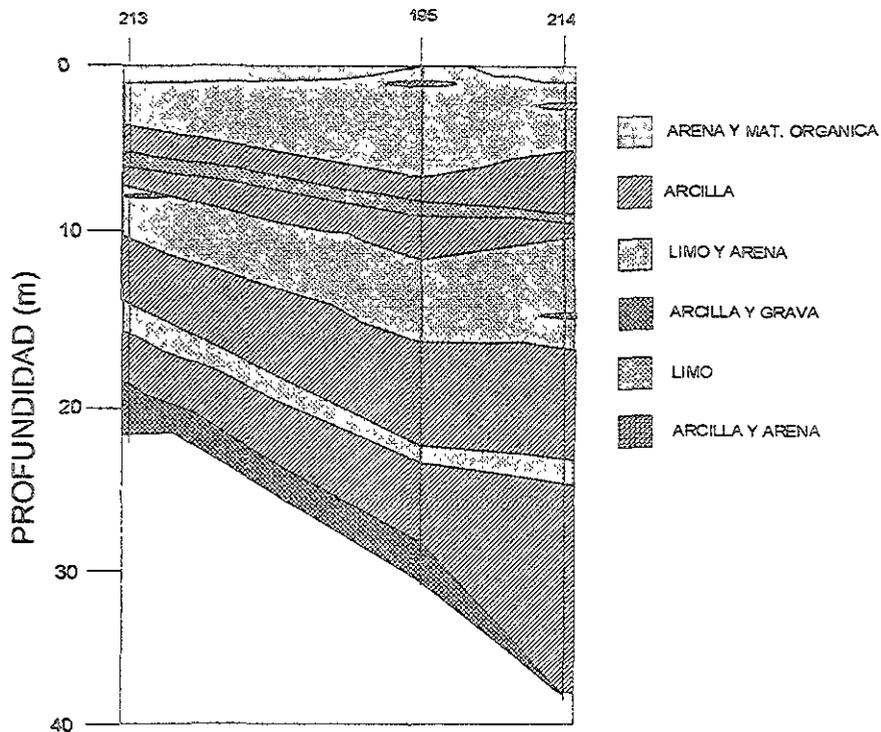


Figura 6.4. – Detalle del corte A-A' de la Figura 6.3. Perfil estratigráfico (Modificado de Del Castillo, 1978).

VI.3 Caracterización de Zonas de Riesgo Geológico-Ambiental

VI.3.1 Mecanismos de Fracturamiento.

En la Delegación Iztapalapa las fracturas presentes son de tipo hidrodinámico y por esfuerzos debidos a estructuras civiles. Las de tipo hidrodinámico pueden ser ocasionadas por varios mecanismos, los cuales se mencionan a continuación (Cabral-Cano et al., 2000):

1. Grietas de secado. Estas grietas están relacionadas con la época de lluvias y tienden a formar patrones poligonales en la superficie. Estas grietas se producen al cambiar en forma repentina el estado de esfuerzos en las formaciones arcillosas superficiales, debido a la variación del contenido de agua, que ocasionan fuerzas de tensión producidas por la evaporación.
2. Fracturas ocasionadas por tensión debidas a fuerzas horizontales de filtración en acuíferos confinados. En este tipo de mecanismo en la primera etapa se aprecian sólo hundimientos del terreno, posteriormente se presentan fallas de colapso y en la tercera se forman dos grietas paralelas al dren de extracción.

3. Fracturas ocasionadas por tensión generada por la contracción horizontal que se presenta en la zona afectada por abatimientos piezométricos. Al extraer agua subterránea por medio de un pozo tiende a formarse un cono de abatimiento, en los bordes de dicho cono se presentan cambios bruscos de gradientes hidráulicos y en estas zonas tienden a formarse grietas.
4. Fracturas ocasionadas por la geometría irregular en los basamentos rocosos. Si el basamento rocoso que subyace a un acuífero presenta geometría irregular y se producen abatimientos del nivel piezométrico, se inducen esfuerzos cortantes verticales que pueden ocasionar grietas.
5. Fracturas ocasionadas por el colapso de un estrato pumítico de muy baja resistencia. En áreas donde se tienen estratos de arenas-gravas pumíticas y si estas se someten a esfuerzos de tensión por ejemplo, tienden a formarse grietas debido a la baja resistencia de estos materiales.
6. Hundimiento de un bloque por separación de los bloques vecinos. Este tipo de fracturamiento se produce por esfuerzos de tensión
7. Flexión transversal de rellenos de cauce sepultado, debida al abatimiento piezométrico del acuífero y a la inclinación de las paredes del cauce.
8. En la zona de estudio se considera que los tipos de fracturas hidrodinámicas que pueden estar presentes son: fracturas de tensión debidas a fuerzas horizontales de filtración en acuíferos confinados, fracturas de tensión asociadas a abatimientos piezométricos; fracturas ocasionadas por la geometría irregular en los basamentos rocosos y fracturas ocasionadas por colapso de estratos de baja resistencia a fuerzas de tensión.

En la Delegación Iztapalapa (zona del Peñón) se han realizado diferentes trabajos para mapear fracturas en superficie (Cabral-Cano et al., 2000; Lugo et al, 1996; Sirda, 1998), estas se presentan en cuanto a rumbo y dirección los siguientes grupos (Lámina 12):

- Fracturas con rumbos paralelos a las curvas de nivel del Cerro Peñón del Marqués. La longitud de estas fracturas oscila de 200 a 500 m, y normalmente forman grupos de fracturas paralelas entre sí, con espaciamientos de 20 a 50 m. Los desplazamientos verticales máximos medidos en campo son de 0.70 m y horizontales de hasta 0.10 m. Se considera que este grupo de fracturas puede ser de los tipos de fracturas ocasionadas por la geometría irregular en los basamentos rocosos u ocasionadas por colapso de estratos de baja resistencia a esfuerzos de tensión.
- Fracturas con rumbos NW-SE. Estas fracturas afloran principalmente en la parte nororiente del área de estudio, desde Ejército de Oriente hasta Escuadrón Trujano. Estas fracturas tienen longitudes desde 20 m hasta 350 m. El rumbo

preferencial es NW-SE 30° - 45° . Los desplazamientos verticales medidos en campo oscilan entre 0.02 hasta 5.0 cm, los horizontales desde 0.20 hasta 10 cm. Se considera que este grupo de fracturas puede ser de los tipos de fracturas de tensión debidas a fuerzas horizontales de filtración en acuíferos confinados; fracturas de tensión asociadas a abatimientos piezométricos y fracturas ocasionadas por la geometría irregular en los basamentos rocosos.

- Fracturas con rumbos NE-SW. Estas fracturas son menos predominantes que las anteriores y en general en la zona de estudio tienen longitudes de 20-50 m. Los rumbos preferenciales son NE-SW 5° - 42° . Los desplazamientos verticales oscilan de 0.20 cm hasta 5.0 cm, y los horizontales de 2.0 cm hasta 6.0 cm. Se considera que este grupo de fracturas puede ser de los tipos de fracturas ocasionadas por esfuerzos debidos a estructuras civiles; de fracturas de tensión debidas a fuerzas horizontales de filtración en acuíferos confinados y fracturas de tensión asociadas a abatimientos piezométricos.

Mediante la cartografía de estas fracturas (Lámina 12), es posible hacer una zonificación de Peligro para la zona del Peñón. Esta zonificación puede realizarse si se considera el mapa de fracturamiento como una imagen espacial, que se construye digitalizando las fracturas, asignando un valor constante a cada fractura. Una vez que se tiene la imagen de tipo Raster es posible determinar las regiones de mayor densidad de fracturamiento, mediante un filtro de densidad.

A partir de esta zonificación se establecieron cuatro zonas de Peligro por densidad de fracturamiento (fracturas/área): Alta, Media, Baja y Nula densidad de fracturamiento (Lámina 13).

Es de notar que la alta densidad de fracturamiento se ubica en la parte central del Peñón del Marqués, siendo rodeada por las zonas de Media y Baja densidad de fracturamiento. Es importante aclarar que la zona de nula densidad de fracturamiento no debe tomarse como zonas sin la existencia de fracturas, sino como zonas sin información sobre fracturamiento.

VI.3.2 Urbanismo de Iztapalapa

Con base a los mapas de uso de suelo, generados por medio de las técnicas de sensores remotos, se obtiene que para la Delegación Iztapalapa el uso de suelo que más cambió es el urbano con más del 8% (Lámina 14 y Tabla 6.1).

El porcentaje que aumento el área urbana de la delegación Iztapalapa, en su mayoría corresponde a las Zonas Arenosas que entre 1985-1991 pasaron a ser unidades habitacionales y colonias populares (véase sección II.8.1); es decir se incrementaron los Elementos Bajo Riesgo en la Delegación Iztapalapa, pero más importante aun es que estos elementos Bajo Riesgo son de un grado de vulnerabilidad muy alto, como son las colonias populares, ante peligros como el de Densidad de Fracturamiento.

El siguiente uso de suelo que incremento es el que corresponde a Pastizales, que en su mayoría ocupo el espacio de Roca Desnuda, debido a la implementación de los programas de inducción de pastizales en la Sierra de Santa Catarina.

CLASES	1985(%)	1991(%)	VARIACION
ZONAS ARENOSAS	4.88		-4.88
CULTIVO	3.29	2.86	-0.43
MIXTO	0.23	0.50	0.26
PASTIZAL	5.88	7.39	1.50
RESERVORIOS	0.07	0.17	0.10
ROCA DESNUDA	5.08	0.16	-4.92
URBANO	80.56	88.93	8.37
TOTAL	100.00	100.00	0.00

Tabla 6.1.- Cambio de uso de suelo del periodo 1985-1991 para la delegación Iztapalapa.

Capítulo VII. Perfiles de Radar de Penetración Terrestre (GPR)

VII.1 Introducción

El Radar de Penetración Terrestre (GPR), es una técnica de prospección geofísica basado en la emisión de impulsos electromagnéticos, que se transmiten en el subsuelo mediante una antena transmisora en la superficie. La forma en el que las ondas electromagnéticas se transmiten por el medio está regida por la ecuación de onda de Maxwell, que determina los efectos de transmisión, reflexión, atenuación y dispersión. Los parámetros eléctricos (constante dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad) de los materiales del medio a investigar son los que controlan la propagación de la señal.

El impulso electromagnético es reflejado y dispersado por las estructuras geológicas, y por las características anómalas presentes en el subsuelo. Las reflexiones son adquiridas por una antena receptora (en un sistema mono- estático una sola antena transmite y registra), y generan a partir de estas adquisiciones una serie de registros espacio- tiempo de características similares a los registros sísmicos. Al desplazar la(s) antena(s) sobre la superficie se registra el conjunto de reflexiones producidas, con lo que se obtiene una imagen bidimensional de las reflexiones bajo la línea de prospección.

Los impulsos electromagnéticos empleados en la técnica GPR se encuentran en el intervalo de frecuencia de 10M Hz a 2 G Hz (Annan, 1996). A mayor frecuencia aplicada, la profundidad de penetración de la señal es menor con respecto a las bajas frecuencias, alcanzando profundidades desde algunos centímetros hasta decenas de metros. Es importante mencionar que a menos frecuencia aplicada la resolución de los objetivos a investigar será menor y viceversa.

El método de georadar inicia su aplicación en los años 70, con el fin de determinar espesores de hielo y glaciares (Annan and Davis, 1976). La técnica de GPR puede ser aplicada en la exploración de minerales conductivos y definir la geología alrededor de estructuras de carácter económico (Annan, 1996; Ulriksen, 1982). En arqueología es posible detectar construcciones y estructuras de interés arqueológico, para el incremento en la eficiencia de las excavaciones (Butler et al., 1994).

En ingeniería civil algunos de los objetivos pueden ser evaluación de fracturas, cavidades, localización de tuberías, cables subterráneos y espesores de muros; esta técnica es sumamente útil pues se evita la destrucción de las estructuras existentes (Ulriksen, 1982).

Debido a la sensibilidad de la técnica de GPR a la presencia de agua, esta técnica puede ser aplicada en geohidrología; para determinar mantos freáticos y efectuar estudios en la distribución y contaminación de fluidos (Brewster and Annan, 1994). En geología estructural permite la localización y continuidad de fallas, y correlacionar formaciones estratigráficas (Doolittle and Asmussen, 1992; Fisher et al., 1992; Stevens et al., 1995). La técnica de GPR puede aplicarse la detección de cavidades y túneles; así mismo en la evaluación y monitoreo de sitios ambientales, detección de fluidos de lixiviados, plumas contaminantes y rellenos.

VII.2 Profundidad de Penetración, Transmisión y Reflexión de la Señal Electromagnética

La atenuación de una onda electromagnética ($e^{-\alpha z}$) define que la profundidad de penetración (δ) o distancia a la cual el impulso electromagnético se atenúa mediante un factor de $1/e$, decreciendo exponencialmente de su amplitud original conforme aumenta la profundidad.

$$\delta = 1/\alpha \quad (1)$$

en donde α es llamada constante de atenuación; por lo que para frecuencias muy altas la energía del radar se propaga con una velocidad independiente de la frecuencia:

$$\delta = (2/\sigma) * (\epsilon / \mu)^{1/2} \quad (2)$$

donde:

ϵ = Constante dieléctrica o permitividad eléctrica (Faraday/m)

μ = Permeabilidad magnética (Henry/m)

σ = Conductividad eléctrica (Siemens)

esta ecuación es aplicable a medios de baja conductividad. Tomando en cuenta la frecuencia, se tiene que a mayores frecuencias la profundidad de penetración (también conocido como Skin Depth) decrece y viceversa:

$$\delta = 1/\sqrt{f\pi \mu \sigma} \quad (3)$$

además se aprecia que la profundidad de penetración dependerá en gran medida de constante dieléctrica del medio.

Cuando la energía emitida al terreno encuentra una anomalía en las propiedades eléctricas del medio de propagación, parte de la energía se refleja y es detectada en superficie por la antena del radar y parte es transmitida hacia el interior del medio. La reflexión requiere de un contraste de una o más de las tres propiedades electromagnéticas del medio a través de una interface. Los coeficientes de reflexión (R) y transmisión (T) se definen por:

$$R = \frac{\sqrt{k_1} - \sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}} \quad (4)$$

$$T = 1 - R \quad (5)$$

en donde k es la constante dieléctrica del medio a prospectar.

VIII.3 Levantamiento

La instrumentación utilizada para esta prospección, consistió en un sistema mono-estático (una sola antena transmite y registra) SIR 2 de Geophysical Survey System Inc. y una antena con frecuencia central de 200 MHz, modelo 5106 (Figura 7.1).

La frecuencia de operación es uno de los factores que determinan la resolución, de los objetivos a investigar, en un estudio de GPR. La ecuación (3) ($\delta = 1/\sqrt{f\epsilon\mu\sigma}$) establece que mientras mayor es la profundidad (δ) del objetivo de estudio, la frecuencia (f) utilizada debe ser menor y viceversa. La antena utilizada, tiene una resolución media con una profundidad de penetración de hasta 15 m (Tabla 7.1), dependiendo de las propiedades del medio y de los parámetros de transmisión. La Tabla 7.1 muestra algunas frecuencias centrales recomendadas para algunas profundidades.

PROFUNDIDAD (m)	FRECUENCIA CENTRAL (MHz)	RESOLUCION
1.5	900	ALTA
4.5	500	ALTA
9	300	MEDIA
15	200	MEDIA
25	80	BAJA

Tabla 7.1. -Frecuencias recomendadas para algunas profundidades.

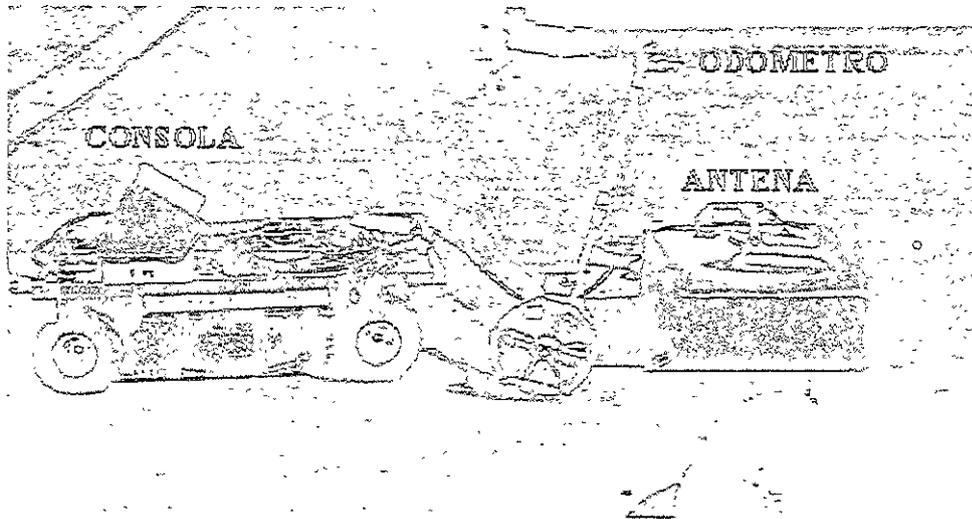


Figura 7.1.- GPR SIR 2 de Geophysical Survey System Inc.

La operación del sistema SIR 2 consiste en colocar una consola sobre una carretilla, que se desplaza sobre la línea de estudio, y se lleva arrastrando la antena, a una velocidad constante con el fin de poder tener un número uniforme de escaneos (Figura 7.2). Mediante un odómetro se ubican marcas, que durante el procesamiento ayudan a establecer una escala horizontal (Figura 7.1 y 7.2). En el área de estudio se realizaron 8 perfiles, con una longitud total de 1945 m; mediante el cual fue posible la localización y caracterización de fracturas (Lámina 15). Nótese que existe un gran número de escuelas en esta zona, lo que hace necesario contar con información sobre la ubicación de fracturas.

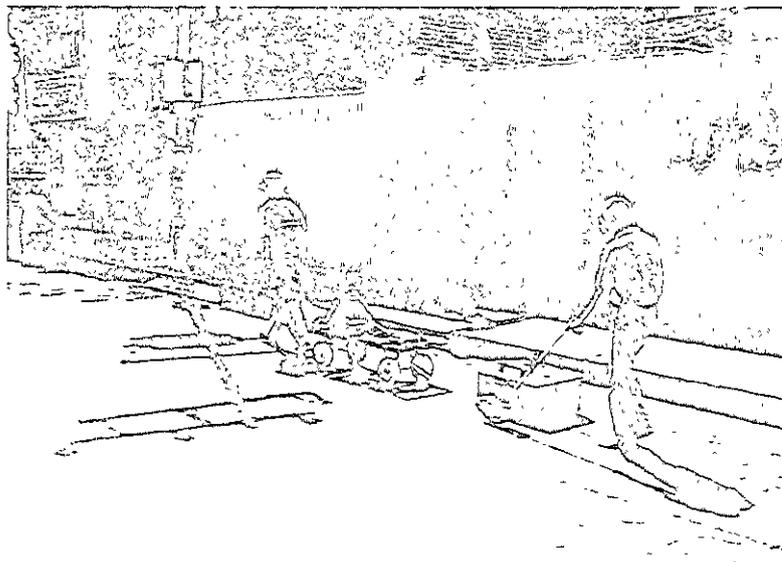


Figura 7.2.- Modo de operación del sistema SIR 2.

VII.4 Procesamiento de Perfiles de GPR

La propagación de la señal electromagnética está determinada por el contraste de las propiedades eléctricas del subsuelo, controlando las reflexiones, transmisión y atenuación de la señal. Pero además existen otros factores relacionados con las características físicas, como la geometría del medio, inclinación, rugosidad de los reflectores, etc. Que afectan la transmisión de la señal. Entre los efectos más comunes destacan:

- **DIFRACCION.**- Este efecto se aprecia en una sección cuando la señal incide en anomalías con un cambio brusco de pendiente y cuando el radio de curvatura de la anomalía es comparable o más pequeña que la longitud de onda de la señal. El ejemplo clásico de su manifestación, es una U invertida en algún punto del radargrama (Figura 7.3).
- **DIFUSION.** – El fenómeno de difusión se caracteriza por la formación de pequeñas ondas que propagan la energía en todas direcciones. Esta se produce cuando el impulso electromagnético choca con objetos pequeños comparados con su longitud de onda, que puede considerarse como ruido dentro de una sección.
- **MULTIPLE.**- Cuando la señal electromagnética encuentra un contraste de impedancias eléctricas entre dos superficies, parte de la energía se refleja varias veces dentro del medio hasta atenuarse. Si el contraste de las impedancias entre dos reflectores cercanos es muy intenso, parte de la energía reflejada dentro de las interfaces puede llegar al receptor por más de una ocasión, originando eventos repetidos a lo largo del sondeo (Figura 7.3).

Las técnicas de procesamiento para realzar o suprimir ciertas características, como las anteriores, se describen a continuación:

EDITADO. – El editado se realiza antes y después del sondeo. Antes del sondeo se determina el número de muestras por registro (M/R), para los sondeos realizados se usaron las cantidades de 1024 y 512 (M/R), es importante señalar que estas cantidades controlan la frecuencia de Nyquist; el número de Bits por muestra (B/M), se utilizó una cantidad de 16 (B/M). Para el número de registros por segundo que la consola adquirirá (R/s), se utilizó una cantidad de 32 (R/s) y para el rango de registro ó ventana de tiempo para la grabación y despliegue de datos, se utilizó una cantidad de 150 (ns).

Después del sondeo se determinan parámetros como el número de registros por metro (R/m) y la distancia entre cada marca (m/Marca); estas dos cantidades varían para cada sondeo (GSSI, 1997).

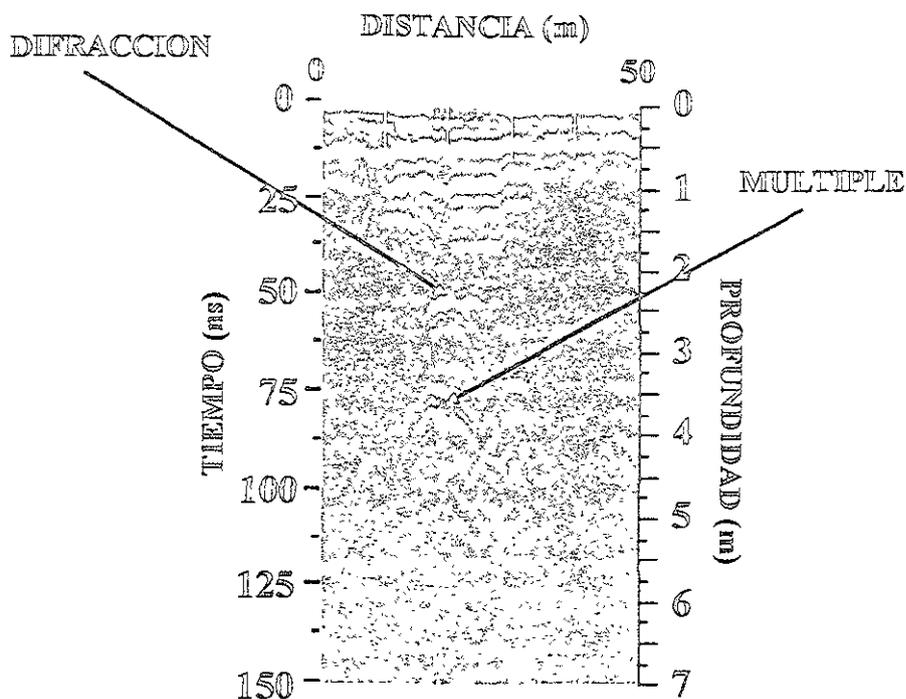


Figura 7.3. – Ejemplo del efecto de difracción y eventos múltiples.

El valor de la constante dieléctrica k , seleccionado para determinar la profundidad de investigación, de acuerdo con lo discutido en la sección 7.1, fue de 10. Mientras que la ganancia aplicada a los datos fue de 15, 76, 77, 80 dB. Parte del procesamiento consistió en aplicar un apilamiento de 4 trazas a una, con lo que se busco reducir la relación señal a ruido. Se estableció una escala vertical y horizontal para los sondeos mediante la constante dieléctrica y los parámetros de registros por metro (R/m) y la distancia entre cada marca (m/Marca).

VII.4.1 Corrección Estática

Las correcciones estáticas se utilizan para compensar variaciones en la elevación, así como para eliminar cambios de fase de la señal y ruido de alta frecuencia. El proceso de corrección estática asume que una capa horizontal debe mostrarse como continua, por lo que si aparecen discontinuidades es por que existen problemas en el acoplamiento de la antena, problemas de primer arribo o tiempo cero, o por problemas en zonas de cambio de velocidad (GSSI, 1997).

Algunos de los problemas de tiempo cero se deben a que durante la adquisición de datos los elementos del equipo de radar sufren cambios de temperatura, provocando que los primeros arribos tengan variaciones unos con otros con respecto al tiempo de llegada, originando que las trazas de los radargramas presente discontinuidades (GSSI, 1997).

El proceso de correcciones estáticas consiste en corregir tales discontinuidades mediante el desplazamiento de los primeros arribos de las trazas a una línea de tiempo cero.

VIII.4.2 Filtrado

Los filtros son funciones que realzan o disminuyen características de una función, mediante la remoción de cierto intervalo de frecuencias. Para la adquisición de los datos se aplicaron dos filtros, un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 30 MHz y un filtro pasa altas de 400 MHz; los cuales fueron aplicados al adquirir los datos en todos los sondeos realizados (Figura 7.4).

Los filtros pueden aplicarse en dos direcciones diferentes, horizontal y vertical; por lo que se llaman filtros temporales y espaciales, pues los filtros temporales aplican en dirección del eje del tiempo, mientras que los espaciales en dirección del eje de distancia horizontal (GSSI, 1997).

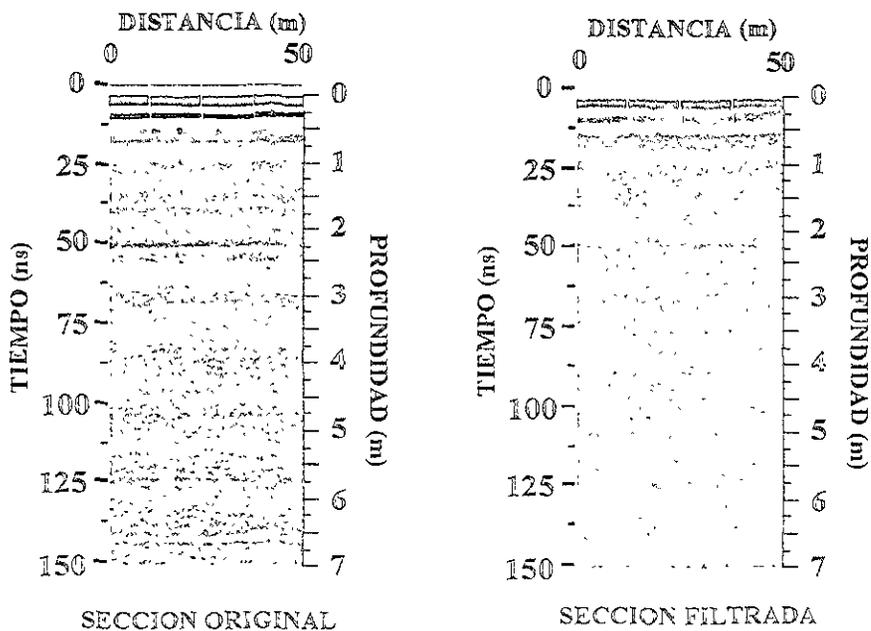


Figura 7.4. - Ejemplo de sección filtrada.

Para los filtros aplicados a los sondeos las frecuencias de corte varían para algunos sondeos, pues algunos presentan diferentes frecuencias de Nyquist.

VII.4.3 Migración

La migración es un proceso mediante el cual es posible eliminar los efectos de la difracción, distorsión e interferencia que se observan en los radargramas. El propósito de la migración es enfocar la energía dispersa de los reflectores y difractores de su posición original, determinando su forma y localización en el subsuelo (GSSI, 1997).

Debido a que la información de tiempo registrado no toma en cuenta el desplazamiento lateral de los reflectores a profundidad, causando el efecto de difracción, la migración calcula el desplazamiento vertical (señal registrada) al plano normal (posición real) del elemento reflejante, para poder reconstruir el campo de onda original en el espacio; con el fin de localizar la profundidad de forma de los reflectores (Figura 7.5).

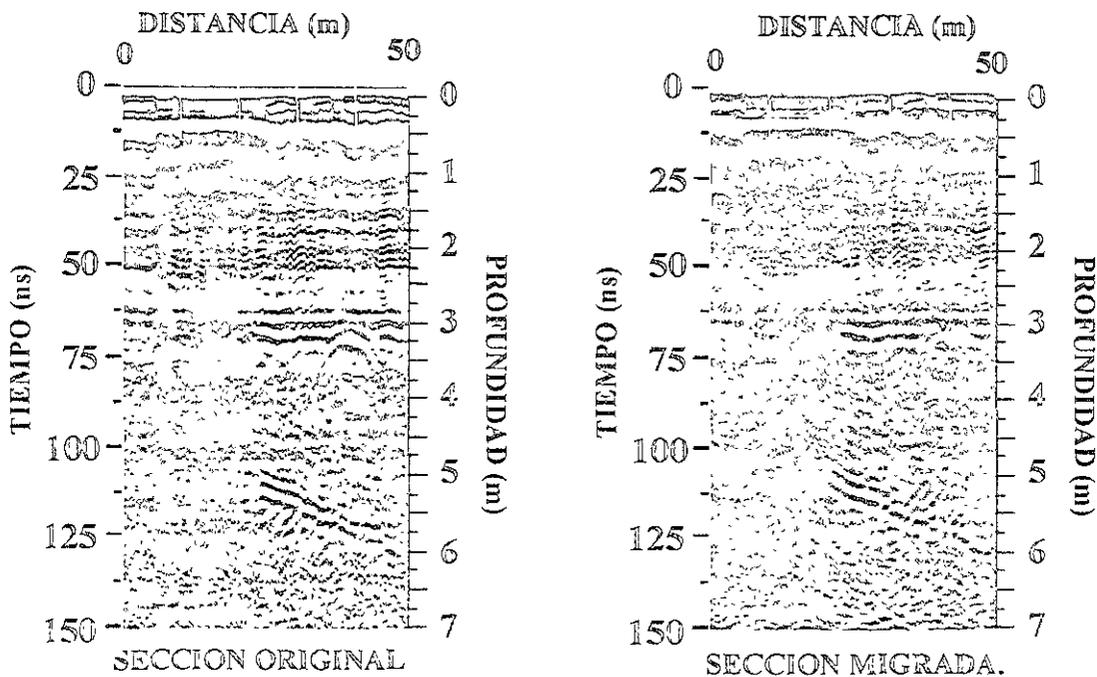


Figura 7.5. – Ejemplo de sección migrada.

VII.5 Resultados

Sólo se mostrarán 3 de los 7 sondeos (Lámina 15), en los que se señalan los primeros reflectores que son producto de la onda de aire y de la primera capa del terreno que corresponde al asfalto; además se señalan las diferentes difracciones que son producto de tuberías, así como los efectos que producen los topes en la carpeta asfáltica.

PERFIL JJ^o.- Realizado en la Calle Carlos Pacheco con una dirección NE-SW y una longitud de 300 m con las siguientes características de adquisición (Figura 7.6 y Lámina 16):

A una distancia de 30, 90 y 115 m se registran tres fracturas a una profundidad de 3.5 m; estas fracturas presentan pequeños desplazamientos que no se manifiestan en superficie y tienen una potencia de 50 cm de profundidad. Entre estas fracturas a una distancia de 57 m se registra una serie de difracciones que son producto de tubería que se encuentran a una profundidad más o menos constante de 1.5 m.

Se presenta otra serie de fracturas hacia el centro del perfil con profundidad de 2.25 m y en una posición de 137, 150 y 160 m; estas fracturas se presentan con pequeños desplazamientos verticales, y a diferencia de las descritas en el párrafo anterior los reflectores superiores presentan pequeños pliegues. A una distancia de 187, 203 y 234 m se registran fracturas a una profundidad de 2.5, 3 y 3.5 m respectivamente; estas fracturas han provocado desplazamientos verticales de las capas superiores de varios centímetros.

Se registran dos zonas de fracturas a los 265 y 290 m; la primera de ellas cubre una longitud aproximada de 15 m y con un salto de 6m, en la que se presentan desplazamientos verticales de 25-30 cm, que han provocado hundimientos. La segunda zona de fractura cubre una longitud de 2 m y con una potencia de un poco más de medio metro; en esta se presenta un desplazamiento vertical de aproximadamente 25 cm. Ambas fracturas se manifiestan en la superficie (Figura 7.6).

Con el fin de delimitar las fracturas anteriores, se realizó un perfil gravimétrico, con un muestreo de 2 m, en los últimos 50 m del sondeo. La primera fractura (265 m), se muestra como un mínimo que abarca de los 266 a 270 m, y que corresponde a la parte en el que los dislocamientos verticales son más pronunciados. Debido a la dimensión de la segunda fractura (localizada a los 290 m), de aproximadamente 2 m, no es posible observar el efecto gravimétrico que esta fractura produce. Será necesario para detectar esta fractura un muestreo de mayor resolución.

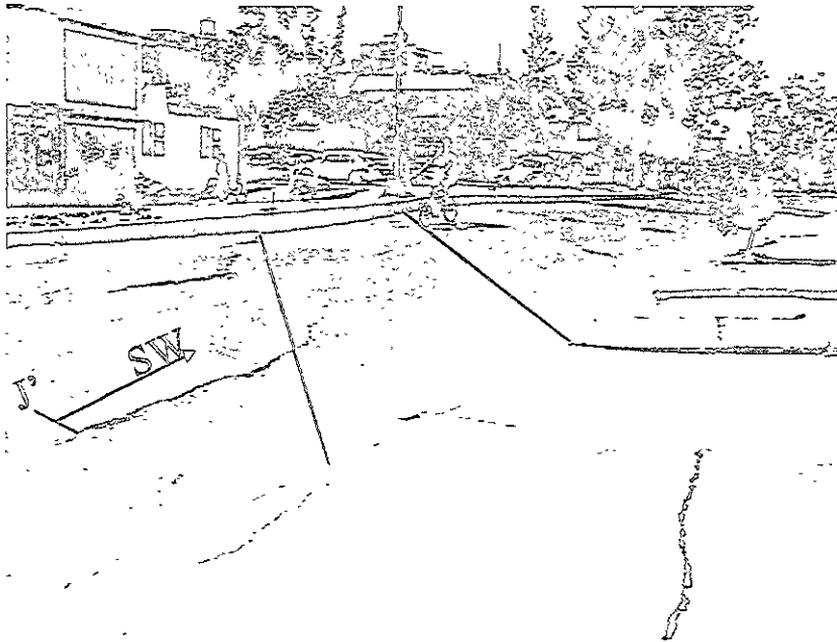


Figura 7.6. - Calle Carlos Pacheco. En esta se marcan dos fracturas superficiales; nótese el hundimiento entre estas, así como el intenso fracturamiento de la banquetta.

PERFIL BB'.- Este perfil se realizó en la Avenida Exploradores Ejercito de Oriente con una dirección NW-SE y una longitud de 415 m con las siguientes características de adquisición (Figura 7.7 y Lámina 17):

A una distancia de 15 y 35 m se registran difracciones que son producto de tuberías. Estas se detectan a una profundidad de 2 m. La segunda de estas difracciones se muestra con múltiples que se extienden hasta el fin del registro.

Se registra una zona de fractura, la más grande de las registradas en la zona de estudio, a los 75 m. Esta tiene una longitud de aproximadamente 30 m y una potencia de hasta 6 m, en la que se presentan desplazamientos verticales de más de 30 cm, que han provocado hundimientos. Esta fractura puede dividirse en tres fracturas más pequeñas que se distribuyen a 65, 78 y 86 m de distancia.

Con el fin de delimitar la fractura anterior, se realizó un levantamiento a detalle a lo largo de este perfil de gradiente gravimétrico, con un muestreo de 2 m, con una longitud de 44 m. La fractura muestra dos mínimos, a los 69 y 75 m, que corresponden con los desplazamientos verticales más pronunciados, y que pueden considerarse como zonas de hundimiento o de colapso.

Se observan 2 fracturas más, que desplazan a un bloque, a los 189 y 206 m; este desplazamiento no es mayor de 10 cm y presentan una potencia de 1 m. A una distancia de 243, 258, 270 y 280 m se registran fracturas que se manifiestan entre .5 y 3 m de profundidad, estas fracturas presentan desplazamientos verticales de un poco mas de 15 cm (Figura 7.7).



Figura 7.7. – Avenida Exploradores Ejercito de Oriente. Se marcan dos fracturas superficiales; nótese el hundimiento que se muestra en la guarnición.

Se registran a una distancia de 314 y 360 m, dos fracturas que se muestran como desplazamientos verticales de hasta 25 cm; estas fracturas se registran con una potencia de mas de 6m; la primera de estas fracturas se muestra como un hundimiento de las capas superiores de por lo menos 1.5 m. Por un último a una distancia de 396 m se presenta una fractura en la que se muestra un desplazamiento vertical de más de 20 cm y una potencia de aproximadamente 4 m.

Entre las fracturas anteriores se registran tres tuberías a 223, 307 y 360 m de distancia, estas tuberías se ubican aproximadamente a 2 m de profundidad. A una distancia de 185 m se registra un efecto en los reflectores, que se manifiesta como una aguja, que resalta en el radargrama, y que puede ser producto de la atenuación de la onda electromagnética por algún material de alta conductividad.

PERFIL DD'. - Realizado en la Calle Brigada Alvarez con una dirección SE-W y una longitud de 250 m con las siguientes características de adquisición (Figura 7.8 y Lámina 18):

A una distancia de 15 y 107 m se registran difracciones que son producto de tuberías que se ubican a 2 m de profundidad.

Se registra una fractura a los 60 m de distancia; la cual se localiza a una profundidad de 2 m; en esta fractura se presentan desplazamientos de más de 20 cm y con una potencia de 2.5 m. A una distancia de 92 m desde el inicio de la sección, se localiza otra fractura, que a diferencia de la anterior se manifiesta en la superficie, esta fractura posee una longitud de aproximadamente 3m y una potencia de aproximadamente 3.5 m; en esta fractura se presenta un dislocamiento horizontal y vertical de 80 y 10 cm respectivamente.

Enseguida, a los 112 m de distancia, se localiza una fractura que se ubica a 1.5 m de profundidad y que empieza a provocar un pequeño hundimiento de las capas superiores. A cuarenta metros de distancia (152 m) se encuentra una fractura que muestra desplazamientos verticales de no más de 20 cm y con una potencia de mas de 3.5 m.

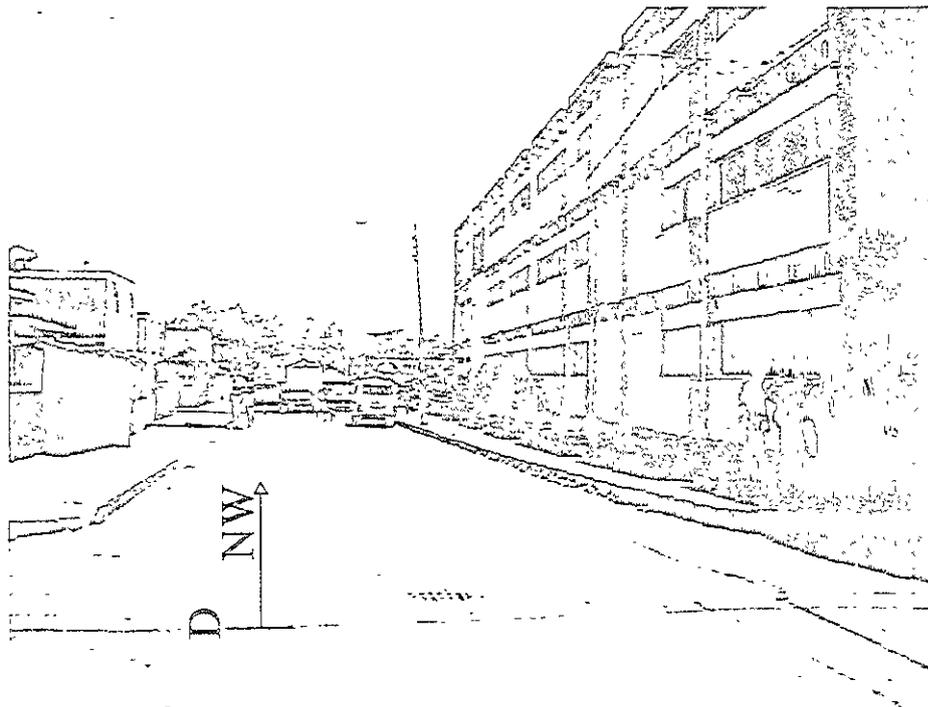


Figura 7.8. - Calle Brigada Alvarez. El edificio de la derecha es una de las escuelas de la Unidad Habitacional Ejercito de Oriente.

Las últimas fracturas, que se registran en este sondeo, se ubican a 189 y 218 m de distancia; la primera de ellas, que se manifiestan en superficie, tiene una longitud de aproximadamente 7 m; esta misma distancia (189 m), pero a partir de una profundidad de 1.5 m, se observa un hundimiento de las capas que subyacen a esta fractura; este hundimiento se muestra con una potencia de más de 5 m. La segunda fractura se manifiesta a 2.5 m de profundidad, y se empieza a manifestar un ligero hundimiento de hasta 20 cm de las capas superiores.

Los resultados de este estudio nos muestran fracturas que son relativamente someras. Además de que algunas de las fracturas parecen ser de carácter regional, pues siguen cierto patrón que puede correlacionarse con las fracturas y fracturas mapeadas en superficie (Lámina 19).

VIII. Conclusiones

Las Técnicas de Sensores Remotos se muestran como un recurso eficiente y rápido de evaluación de los elementos Bajo Riesgo, que como se demostró en los capítulos IV y VI, es de gran utilidad para determinar la distribución espacial de estos elementos para diferentes épocas. Parte de los resultados obtenidos muestran que el D.F. creció en términos urbanos a una velocidad de $5.7 \text{ km}^2/\text{año}$ durante los periodos 1985-1991, sin embargo la Delegación de Iztapalapa lo hizo a una velocidad de $9.5 \text{ km}^2/\text{año}$. Estos datos muestran el acelerado crecimiento que ha tenido la Delegación Iztapalapa en ese periodo de seis años. Este incremento se produjo principalmente en colonias populares y unidades habitacionales de interés social que se asentaron en zonas de mayor vulnerabilidad desde el punto de vista geológico-estructural. Por lo tanto los elementos Bajo Riesgo que se han incrementado en la Delegación Iztapalapa, son los elementos de mayor vulnerabilidad ante los peligros Geológico-Ambientales.

Como es de observarse el conjunto de Técnicas de Sensores Remotos, son excelentes para poder conocer las características regionales y locales de un lugar en particular (Delegación Iztapalapa en este caso) de una forma cuantitativa, con el fin de contar con información que nos ayude a evaluar las condiciones pasadas y/o actuales del área en estudio.

Los resultados obtenidos por las Imágenes Gravimétricas nos muestran que los mayores espesores de sedimentos lacustres coinciden con la mayor concentración de Elementos Bajo Riesgo. Como se describió en la sección III.2 Además de que los eventos sísmicos mostrados inicialmente en la Figura 2.3, se correlacionan con las mayores depresiones del basamento estimado en el capítulo V (Lámina 22).

El registro de parte de los eventos sísmicos dentro de la Cuenca de México (De Cserna et al., 1988) no cuentan con datos de magnitud y/o profundidad, por lo que no es posible evaluar de una manera cuantitativa los resultados obtenidos en la estimación del basamento. Sin embargo, es importante hacer notar que existen 3 eventos que se ubican dentro del rango de profundidades obtenidas y que coinciden con las zonas de mayor espesor de sedimentos lacustres, por lo que estas profundidades pueden considerarse cualitativamente correctas. Esto sugiere que estas estructuras pueden estar asociadas a los fenómenos de subsidencia producto de la extracción de agua de los mantos acuíferos. Sin embargo no es posible descartar un posible origen tectónico.

Otra región también interesante, es la del exlago de Texcoco. Es importante hacer notar que este no se ubica dentro de una Cuenca, si no por el contrario se ubica dentro de la cordillera que separa la parte sur de la Cuenca de México (Lezcano, et al., 1987), mostrada en la Lámina 11. Los eventos sísmicos ubicados en esta región son los más profundos (8-10 km), por lo que, a diferencia de los que se ubican en la parte Oeste de la imagen, son de diferente naturaleza.

Esta información nos indica que además del Riesgo Sísmico dado por eventos que se generan en la Costa del Pacífico, la Ciudad de México presenta una actividad sísmica local que puede ser considerada como un Peligro Geológico-Ambiental. Los resultados del Capítulo V, nos confirman que la Cuenca de México esta constituida por diferentes estructuras tectónicas, que han determinado su configuración actual, y que no puede dejar de considerarse su posible activación.

En forma general las fracturas registradas mediante los perfiles de GPR se presentan de dos formas, la primera de ellas se ubican a profundidad sin manifestarse en superficie, mientras que las segundas se manifiestan en superficie. En la Lámina 19 se presenta la correlación que existe entre las fracturas mapeadas por medio de los perfiles de GPR y las mapeadas en superficie (Lámina 12); puede observarse que existe una alta correlación entre las fracturas superficiales, pero además algunas de las fracturas a profundidad pueden correlacionarse perfectamente; por lo que si se amplían las prospecciones, en la Unidad Habitacional Ejercito de Oriente, es posible extender de las fracturas mostradas en la Lámina 12.

Algunas de las fracturas que no se manifiestan en superficie, han empezado a provocar pequeños hundimientos y desplazamientos en las capas superiores a las fracturas; por lo que en un futuro inmediato estas empezaran a manifestarse en superficie en forma de hundimientos o desplazamientos de la carpeta asfáltica o construcciones aledañas, es decir son potencialmente más peligrosas. Las fracturas mapeadas se presentan entre 2 y 3 m de profundidad, con una potencia que va desde algunas decenas de centímetros hasta varios metros. Debido a que algunas fracturas presentan desplazamientos verticales, es posible usar el concepto de falla para estas estructuras, además de que algunas pueden considerarse de carácter regional.

Los resultados obtenidos en el Capítulo VII nos muestran a la Técnica de GPR, como un método rápido y eficiente para el mapeo de fracturas en áreas urbanas. Esto debido a la sencillez de operación, pero sobretodo a que es un método no destructivo del medio a prospectar y que nos brinda una buena resolución para prospecciones someras

Como se mencionó anteriormente, un mapa de riesgo requiere la correlación entre los elementos Bajo Riesgo y los Peligros Geológicos-Ambientales. Por lo tanto es necesario establecer los parámetros de vulnerabilidad de dichos elementos ante tales peligros. Para esto es necesario en primer termino establecer una mejor clasificación del Area Urbana (en este caso Iztapalapa), pues el uso de suelo que se muestra la Lámina 14 es insuficiente para ese propósito.

Para determinar de una manera cualitativa el mapa de riesgo por fracturamiento, se estableció una zonificación cualitativa de uso de suelo en cinco zonas en las que se estableció un grado de vulnerabilidad (Lámina 20):

- Zona 1. - Este tipo de suelo dado por zonas de parques y conjuntos deportivos en los que no se tienen construcciones que sean vulnerables ante las fracturas (sin vulnerabilidad).
- Zona 2. - Compuesta por unidades habitacionales en buen estado, en donde existe un buen aprovechamiento del suelo, así como zonas comerciales e industriales (baja vulnerabilidad).
- Zona 3. - Esta zona está compuesta por en general por colonias populares (véase capítulo 7) (media vulnerabilidad).
- Zona 4. - Compuesta por unidades habitacionales que en su mayoría se han transformando en colonias populares, pues estas se desarrollaron como unidades habitacionales, en su mayoría de una planta, que se ha ido transformando en colonias populares así como escuelas y hospitales (alta vulnerabilidad).
- Zona 5. - Compuesta por colonias populares formadas por asentamientos humanos irregulares y constituidas por materiales de alta vulnerabilidad como son cartón y madera (muy alta vulnerabilidad).

Con base a la anterior zonificación de vulnerabilidad (de una forma cualitativa) es posible correlacionarla con el mapa de peligros de fracturas presentado en el capítulo VI (Lámina 13), para así poder determinar un mapa cualitativo de riesgo por fracturamiento (Lámina 21).

En la Lámina 21 se muestran 4 zonas de riesgo cualitativo:

- Zona 1 (sin riesgo cualitativo).- Zona que se distribuye en la parte oeste de la zona de estudio y en donde no se presentan daños a los Elementos Bajo riesgo, pues es de notar que no se tiene peligro por fracturas en estas zonas (Lámina 13).

- Zona 2 (bajo riesgo cualitativo).- Zona de bajo riesgo cualitativo que se distribuye principalmente en la parte sur de la zona de estudio y en la que se tiene este resultado debido a que en esta región se distribuyen la segunda zona de Peligro por fracturamiento, que corresponde a la zona de bajo nivel de densidad de fracturamiento (Lámina 13).
- Zona 3 (medio riesgo cualitativo).- Zona en la que se presentan riesgos de nivel medio, que están relacionados a daños que van de bajos a altos. Esta zona se distribuye principalmente en la parte norte del área de estudio en la que el corresponde principalmente a colonias populares ó zona 3 de la Lámina 20.
- Zona 4 (alto riesgo cualitativo).- Zona en la que se presentan grandes riesgos cualitativos y que corresponde a la zona del Peñón del Marqués, en la que se ubican los mayores Peligros por fracturamiento (Lámina 13). Se tienen dos zonas que se ubican en la parte este y oeste de la zona de estudio en las que se ubican las densidades medias de fracturamiento, que a su vez coinciden con la cuarta y quinta zonificación de vulnerabilidad.

Es claro que el mapa de riesgo por fracturamiento, esta determinado por la zonificación de la zona urbana, por lo que es necesario definir las funciones de vulnerabilidad de cada uso de suelo ante el fracturamiento que se presenta en la zona de estudio.

El mapa de riesgo que se presenta en la Lámina 21 tiene que estar enfocado en la toma de decisiones de protección civil, así como en la implementación de programas de desarrollo urbano en la delegación Iztapalapa.

Esta metodología permite establecer programas de contingencia en las zonas más afectadas con el fin de mitigar los efectos de los peligros por fracturamiento y subsidencia.

Los programas de protección civil tienen que estar enfocados a la normatividad de las construcciones a realizar en el área de estudio además de proveer información sobre las acciones a realizar en las construcciones que posiblemente estén afectadas por el fracturamiento.

Bibliografía

- Annan A. P. And Davis J., 1976. Impulse Radar Sounding in Permafros, *Radio Sci.*, vol 11; pp. 383-394.
- Annan, 1996. Ground Penetrating Radar, Workshop Notes, Sensor and Software
- Bellia, S.; Cusimano, G.; Giunta, G.; González, M.T. Rodríguez, C. R 1992. Consideraciones Preliminares Sobre los Riesgos Geológicos y Análisis Hidrogeológico de la Cuenca de Chalco. Instituto Italo-Latino Americano. pp.275.
- Brewster, M. L. and Annan A. P., 1994. Ground Penetrating Radar Monitoring of a Controlled DNAPL Release; 200 MHz Radar, *Geophysics*. Vol. 59, No. 8, pp.1211-1221.
- Butler, D. K., Simms, J. E. And Cook D, S., 1994, Archaeological Geophysics Investigations of the Wright Brothers 1910 Hangar Site, *Geoarchaeology, An International Journal* , vol. 9, No 6, pp.437-466.
- Cabral-Cano, Enrique, Harold R. Lang y Abrams Michel. 1997. La Percepción Remota. *Geo-unam*. Vol. 4, No. 1. pp. 3-9.
- Cabral-Cano, E.; Lugo-Hubp, J.; Ortega Adrian; Duran-Carmona, V. 2000. Analisis de Fallas y Fracturas en la Delegación Iztapalapa. Reporte Preliminar. UNAM. pp. 47.
- Campos-Enriquez J. O., Delgado- Rodriguez O., Chávez-Segura R., Gomez-Contreras P., Flores-Márquez E. L. and F. S. Birch. 1997. The Subsurface Structure of the Chalco Sub-Basin (Mexico City) Inferred From the Geophysical Data. *Geophysics*, Vol. 62, No. 1. pp. 23-35.
- Chávez, R. E. 1974. Caracteres Regionales en Base a Información Orbital. Tesis de Licenciatura en Física. Facultad de Ciencias. UNAM. pp. 75.
- Chávez R.E. and Flores E. L. 1989. Interpretation of Gravity Data From the Xochimilco-Chalco Basin, Mexico (Preliminar Results). *Revista Geofísica* No.30. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. pp.125-135.
- Chávez R.E., Hernández M. C., Herrera J. and Flores E. L. 1995. A Magnetic Survey Over La Maja, an Arqueological Site in Norther Spain. *Archaeometry* vol.37. No. 1. pp. 171-184.
- Chávez R.E., Lazaro-Mancilla O., Campos-Enriquez J. O. and Flores E. L. 1999. Basement Topography of Mexicali Valley From Spectral and Ideal Body Analysis of Gravity Data. *Journal of South American Earth Sciences* No. 12. pp. 579-587.
- CONAPO. 1998. Escenarios Demográficos y Urbanos de la ZMCM, 1990-2010. Situación Demográfica de México. México. pp. 4-10.
- Córdoba-Méndez, Diego A. 1988. Riesgo Sísmico y Volcánico en la Porción Central de la República Mexicana. *Alternativas Tecnológicas* No. 21. pp 17-26.

- De Cserna, Z., M. De la Fuente-Duch, M. Palacios-Nieto, L. Triay, L. M. Mitre-Salazar y R. Mota-Palomino, 1987 (1988). Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regionales de la Cuenca de México. Bol. 104 Inst. Geol., UNAM, México, D. F. pp 71.
- Del Castillo, Rodolfo. 1978. Ciudad de México. El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Area Urbana del Valle de México. Soc. Mex. De Mec. De Suelos, pp. 15-50.
- Del Río, Luyando L. 1974. Relación entre Bandas Espectrales Empleadas en Percepción Remota y la Porción de NW del Eje Volcánico. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. U.N.A.M.
- Dimitriadis K., Tselentis G.A. and Thanassoulas K. 1987. A Basic Program for 2-D Spectral Analysis of Gravity Data and Source-Depth Estimation. Computers & Geosciences vol. 13. No. 5. pp. 549-560.
- Doolittle, J. A. And Asmussen, L. E, 1992. Ten year of Applications of Ground Penetrating Radar by the United States Department of Agriculture. Pro IV Int. Conf. Gground Penetrating Radar, June 8-13, 1992.
- Fisher, E., Mc. Mecham, G. A and Annan, A. P., 1992, Adqisiton and Procesing of Wide-Aperture Ground Penetrating Radar Data. Geophysics, vol 57; pp. 495-504.
- Floyd f. Sabines, 1996. Remote Sensing Principles and Interpretation. Freeman and Fompany.
- Gonzalez-Moran, T. 1992. Estudio Hidrogeofisico de la Subcuenca de Chalco; Evaluación de Impacto Ambiental del Basurero de Santa Catarina. Tesis Doctoral. Unidad de los Ciclos Profesionales y de Posgrado, Colegio de Ciencias y Humanidades.
- GSSI. 1997. Radan for Windows. Geophysical Survey System. Inc. pp 122.
- Gupta, V. K and Ramani, N. 1980. Some Aspects of Regional Residual Separation of Gravity Anomalies in Precambrian Terrain. Geophysics vol. 45. pp.1412-1426.
- Hernández-Moedano, G. And Grauel. 1954. Levantamiento Gravimétrico en el Valle de México. Informe Técnico para el INIC. pp 30.
- INEGI. 1991. XI Censo General de Población y Vivienda 1990. México. INEGI. pp 320.
- INEGI. 1996. Conteo de Población y Vivienda 1995. México. INEGI. pp 345.
- INEGI. 1998. Anuario Estadístico del Distrito Federal. México. INEGI. pp 366.
- INEGI. 1999. Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 1999. INEGI. pp 275.
- INEGI. 2000. Cuaderno Estadístico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. México. INEGI. pp 254.

- INEGI. 2000. XII Censo General de Población y Vivienda 2000 (Resultados Preliminares). México. INEGI. pp 95-155.
- Jensen, R. John. , 1996. Introductory Digital Image Processing a Remote Sensing Perspective. Simon & Schuster/A Viacomn Company. pp 365.
- Lezcano, M. L., González, J., y Chávez, R. E., 1987. Análisis de las Anomalías de Campo Potencial de la Región del Exlago de Texcoco, México: Revista Geofísica, 27, 43-73.
- Lillesand, Thomas M., 1994. "Remote Sensing & Image Interpretation". Jhon Wiley & Son, Inc.
- Lugo-Hubp, Jose I., Zermeño-Ortiz, V., Zamorano-Orozco, J., Ortega-Gerrero, A., Mondragón-Yáñez, D., Salas-García, O. Y Gonzáles-Espinosa, Y. 1996. Mapa de Grietas Activas en el Extremo Norte de la Delegación Iztapalapa. Instituto de Geografía. UNAM.
- Marsal, R. y Mazari, Marcos. 1959. El subsuelo de la Ciudad de México. Facultad de Ingeniería. UNAM. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. pp 263.
- Marsal, R. 1978. La Estratigrafía y sus Implicaciones. El subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Area Urbana del Valle de México. Soc. Mex. De Mec. De Suelos, pp.1-8.
- Mausel, P. W., W. J. Kamber, and J. K. Lee. 1990, "Optimum Band Selection for Supervised Classification of Multispectral Data", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 56(1). pp.55-60
- Mooser, Federico. 1978. Geología del Relleno Cuaternario de la Cuenca de México. El subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Area Urbana del Valle de México. Soc. Mex. De Mec. de Suelos, pp. 9-13.
- Ordaz M., Meli R., Montoya-Dulché C., Sánchez L. y Pérez-Rocha L. E. 1996. Sismicidad en la Ciudad de México. Ambientales para la Salud en la Ciudad de México. Programa Universitario de Medio Ambiente. pp 285-318.
- Pal, P. C., Khurana, K. K., Unnikrishana, P., 1979. Two Examples os Spectral Aproach to Source Depth Determination in Gravity and Magnetics. Pure and Applied Geophysics 117, pp 772-783.
- Perez-Cruz, Guillermo A. (1988). Estudio Sismológico de Reflexión del Subsuelo de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. División de Estudios Superiores de Posgrado de la F.I. UNAM. pp 83.
- Salazar, Mitre Luis Miguel.1996. Geología y Riesgos Asociados en el Valle de México. Riesgos Ambientales para la Salud en la Ciudad de México. Programa Universitario de Medio Ambiente. pp. 405-410.
- SARH, Comisión Hidrológica de Aguas del Valle de México, 1963. Hidrología de la Cuenca de México.

- Scandone, R. 1979. Preliminary Evaluation of the Volcanic Hazard in the Southern Valley of Mexico: *Geof. Int.*, vol. 18. pp.21-35.
- Schlaepfer, J. C., 1968. Resumen de la Geología de la Hoja México, Distrito Federal y Estados de México y Morelos. Hoja México 14 Q-h (5), Esc 1 :250000. Inst. Geol., UNAM, México, D. F.
- Showengerdt, R. A., 1983. Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing. Academic Press, 29 pp.
- Sirda. 1998. Mapa de Fracturas de la Zona Norte Delegación Iztapalapa. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota. UAM.
- Spector, A., Grant, F. S., 1970. Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data. *Geophysics* 35, pp. 293-302.
- Stevens, K. M., Lodha, A. L. and Soonawala, N. M., 1995. The Application of Ground Penetrating Radar for Mapping Fractures in Plutonic Rocks Within the Whiteshell Research Area, Pinawa Manitoba, Canada, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33, pp.125-141.
- Torres, Bezaury Jesús A. 1996. Plan Maestro de Agua Potable en la Ciudad de México. Riesgos Ambientales para la Salud en la Ciudad de México. Programa Universitario de Medio Ambiente. pp. 405-410
- Ulriksen, C.P., 1982, Application of Impulse Radar to Civil Engineering; Ph. D. Thesis, Department of Engineering Geology, Lund University of Technology, pp. 175
- Vázquez, L., Carrasco, G., Delgado, H., Martín del Pozzo, A. L., Siebe, C., Hoblitt, R., Sheridan, M. Y Tilling, R. 1997. Mapa de Peligros del Volcan Popocatepetl. Instituto de Geofísica. UNAM.
- Vázquez-Sánchez, E Y R. Jaimes-Palomera, 1989. Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*. v28, n 2, pp. 133-190.
- Zamora-Millan, F., Torres-Salcido, R. y Couttolenc-Echeverría, R. 1996. El Fantasma de la Delegación Alvaro Obregón. Delegación Alvaro Obregón D.F. pp.113.

Anexo Láminas.

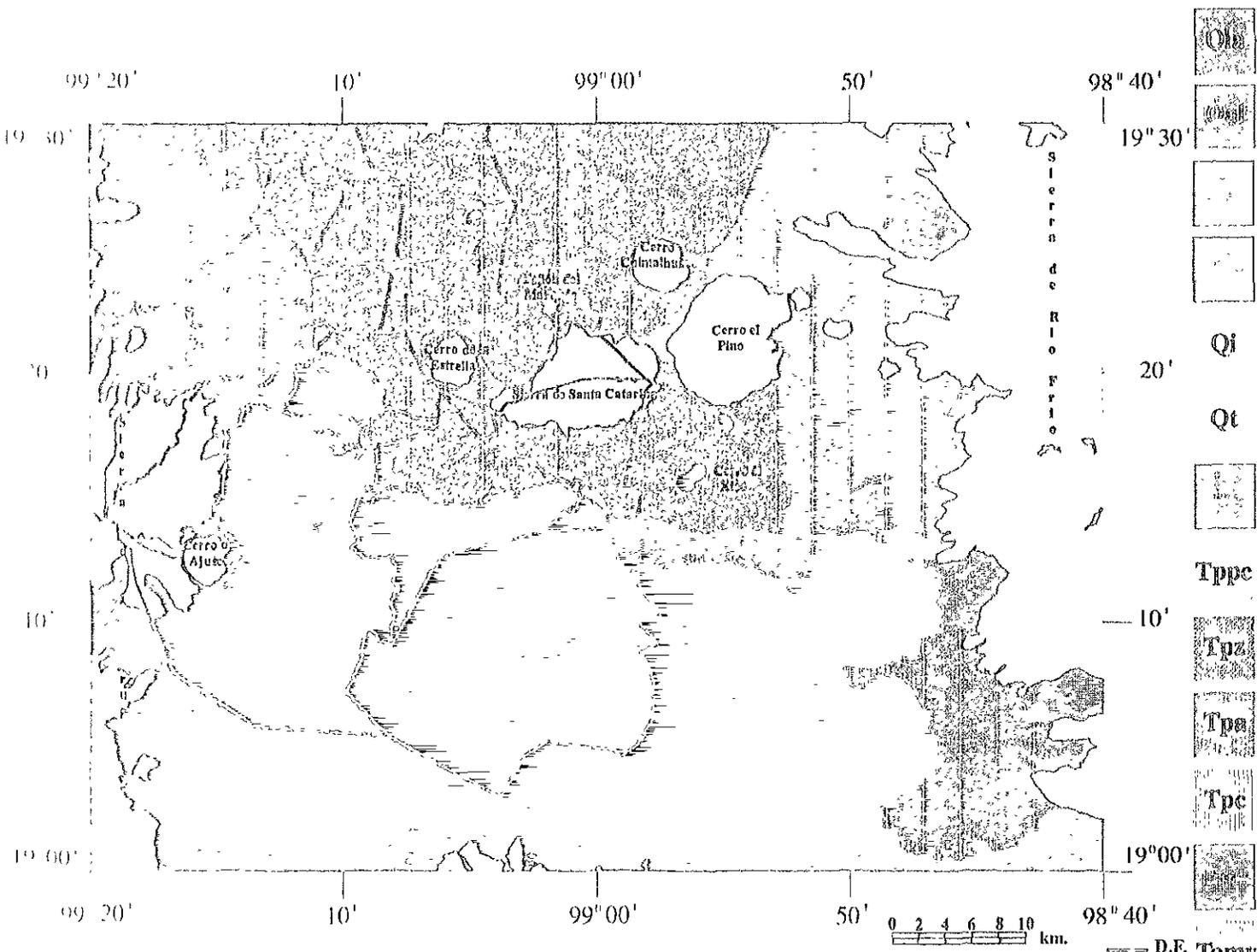
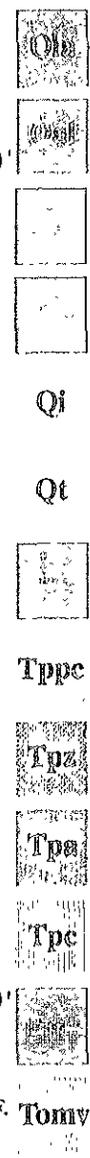


Lámina 1. - Geología Regional de la Cuenca de México.

- DEPOSITOS LACUSTRES**
Sedimentos lacustres depositados durante el Cuaternario en el área ocupada por el Lago de Texcoco incluyendo las Cuencas de Chalco, Xochimilco, y Chalchicomula de las Abasco con contenido variable de arena e intercalación de Aluviales, los frentes y playas con composición de los fangos, arenas, arcillas y arenas y arenas, al con el perfil cubierto. En las margenes de la cuenca se encuentra interdigitada con Q1
- DEPOSITOS ALUVIALES**
Con intercalación de cenizas volcánicas, originadas en las margenes de la cuenca y talas de los cerros, los antiguos ríos Tacubaya, Decreta y Noche Buena. Localmente interdigitada con Qe
- FORMACION CHICHINAUTZIN**
Derrame de lava basáltica hasta riolita, álfica con material piroclástico asociado. Localmente interdigitada con Qp
- FORMACION POPOCATEPETL**
Derrame lavas de basáltica que cubren la parte superior y la ladera NW occidental del Mx en Popocatepetl de composición álfica a ríolita. Interdigitada localmente con Qe y Q1
- FORMACION IZTACCIHUATI**
Lavas generalmente álficas que forman la roca principal de los Mx en Iztacchuatl y Popocatepetl exceptando el pedregal de la primera. El cono reciente de este último y los derrames lavas
- FORMACION TLALOC**
La forman las diatemas andinos de la Sierra de Río Frio, de composición ríolítica. Localmente interdigitada con las formaciones Otzol y Llano Grande.
- FORMACION TARANGO**
En su parte inferior, depósitos de aluviales derivados de las Sierras Mx Orientales y Occidentales, asociados con piroclastos. En la parte superior, separado por una diaclasis regional, principalmente lavas de cenizas y puzos. Esta formación puede extenderse a las secuencias piroclásticas de las formaciones Otzol, Tlaloc y Llano Grande (Vázquez, Sánchez y Juárez Palomera, 1989).
- DEPOSITOS PIROCLASTICOS Y CLASTICOS**
De composición que varía desde ríolita hasta basáltica proveniente de distintos centros eruptivos. Constituyen depósitos no diferenciados relacionados con la actividad piroclástica y flujos del Plioceno. Originalmente Schiapfer (1958) le nombra como Rocas Volcánicas No Diferenciadas.
- FORMACION ZEMPOALA**
Derrames de lava con intercalación de material piroclástico y lavas de composición intermedia de ríolita a basáltica.
- FORMACION AJUSCO**
Originalmente descrita por Schiapfer (1958) para describir a los derrames de lava andesítica que forman la parte superior del cerro del Ajusco.
- ROCAS VOLCANICAS DEL TERCARIO MEDIO**
Comprende los puzos los volcánicos que forman la sierra volcánica occidental a excepción del macizo de Zempoala y del Ajusco, que derivan de centros volcánicos y otros a lo largo del eje de la sierra, congeñados en su parte inferior por frentes volcánicos con intercalación de lavas andesíticas, en su parte superior, diatemas, esta formada por potentes diatemas superpuestos de lavas ríolitas.
- FORMACION LAS CRUCES**
Capas volcánicas formadas predominantemente por lavas. Sus afloramientos se distribuyen por toda la cuenca en áreas pequeñas, en la mayoría de los casos por cañoneras cubiertas por los taludtes a volcánicos más recientes.
- FORMACION TEPOZTLAN**
Incluyen la Formación Neotípica y otras rocas antiguas de composición ríolita, ríolita andesítica proveniente de los centros eruptivos prehistóricos de diatemas que aflora en la base de las Sierras volcánicas del E y W de la cuenca y en algunas localidades de la misma.



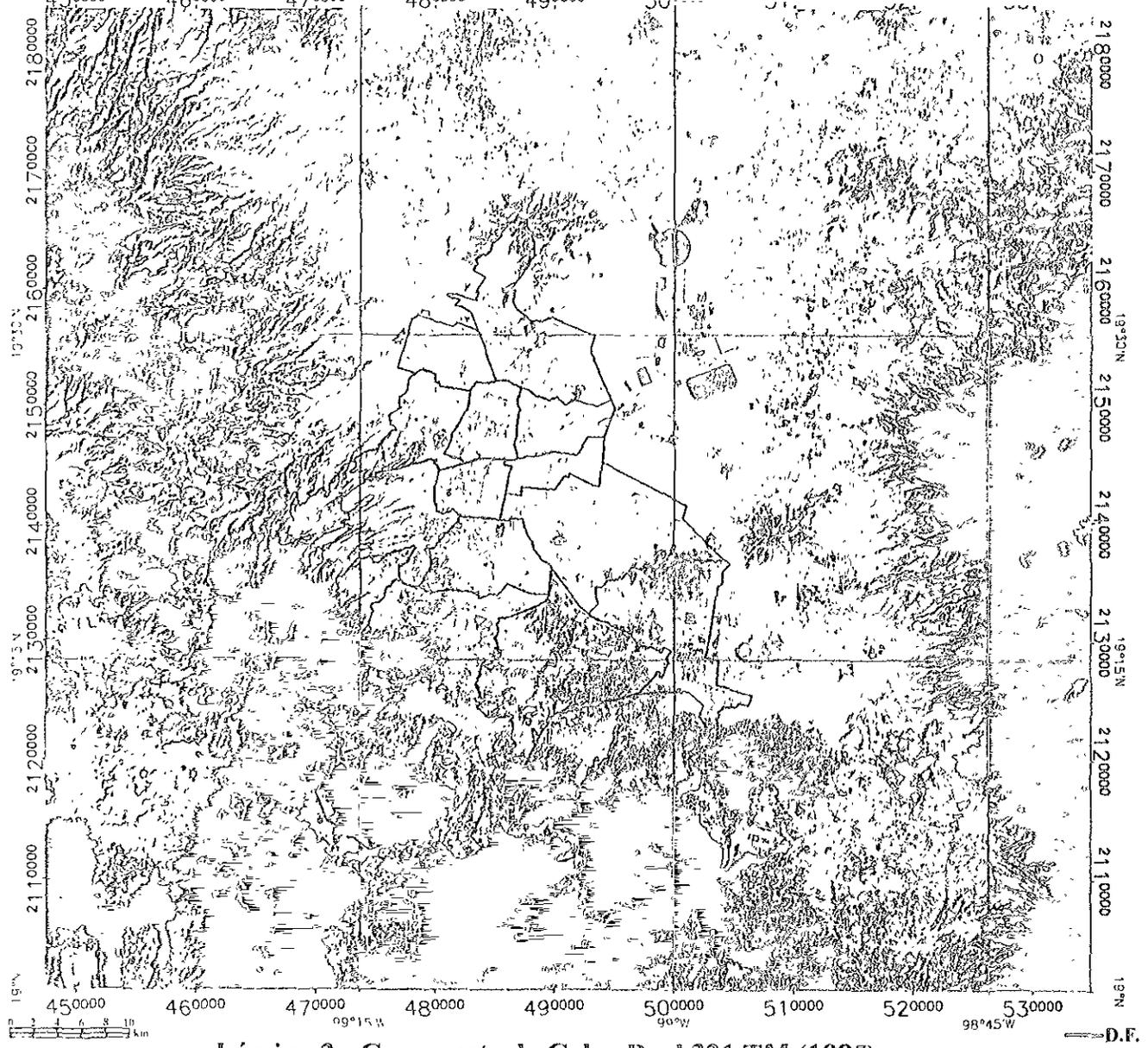
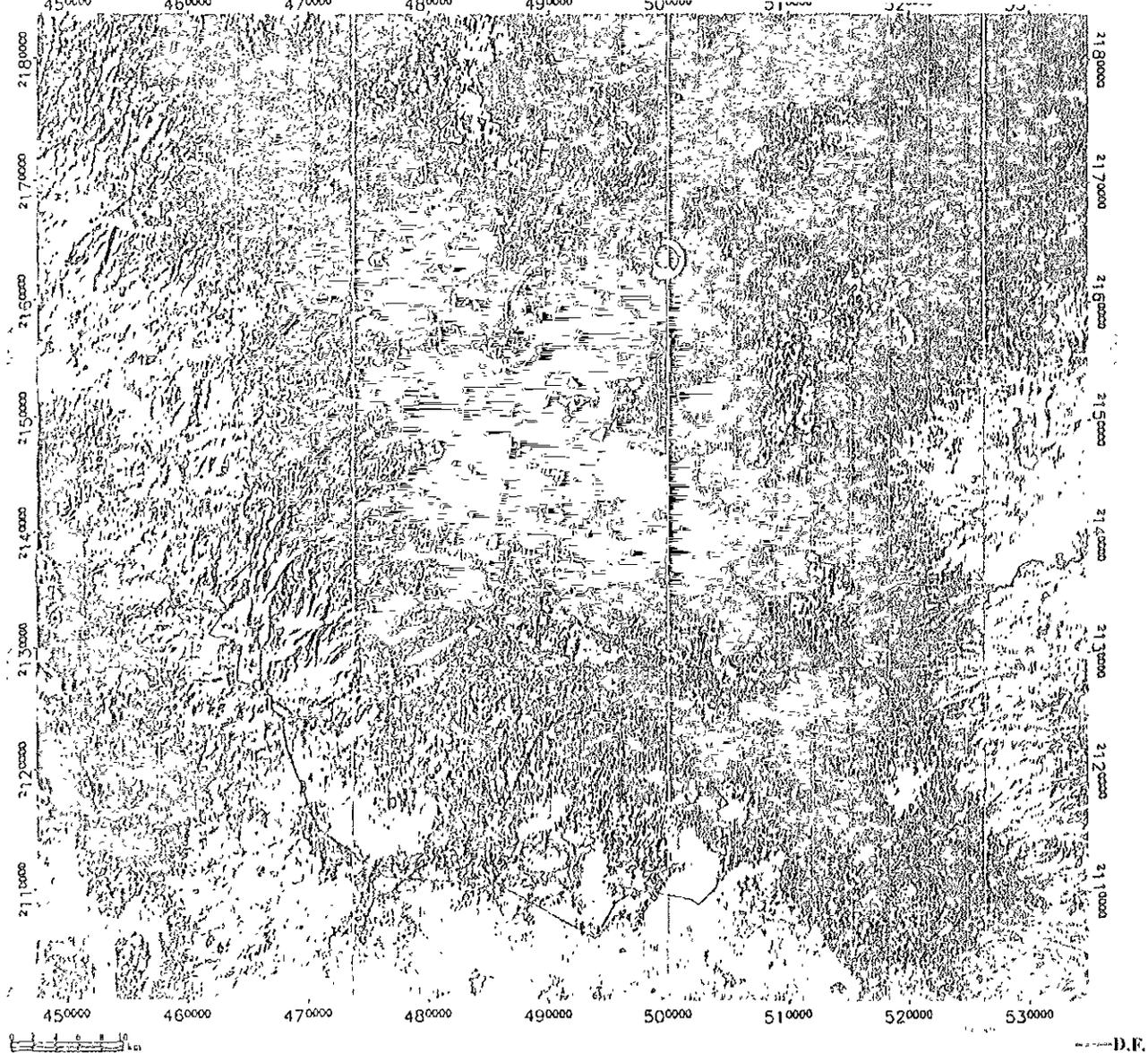


Lámina 2.- Compuesto de Color Real 321 TM (1985).



Lámina 3.- Compuesto de Falso Color 432 TM (1985).



D.F.

Lámina 4.- Índice de Vegetación Normalizado (IVN).

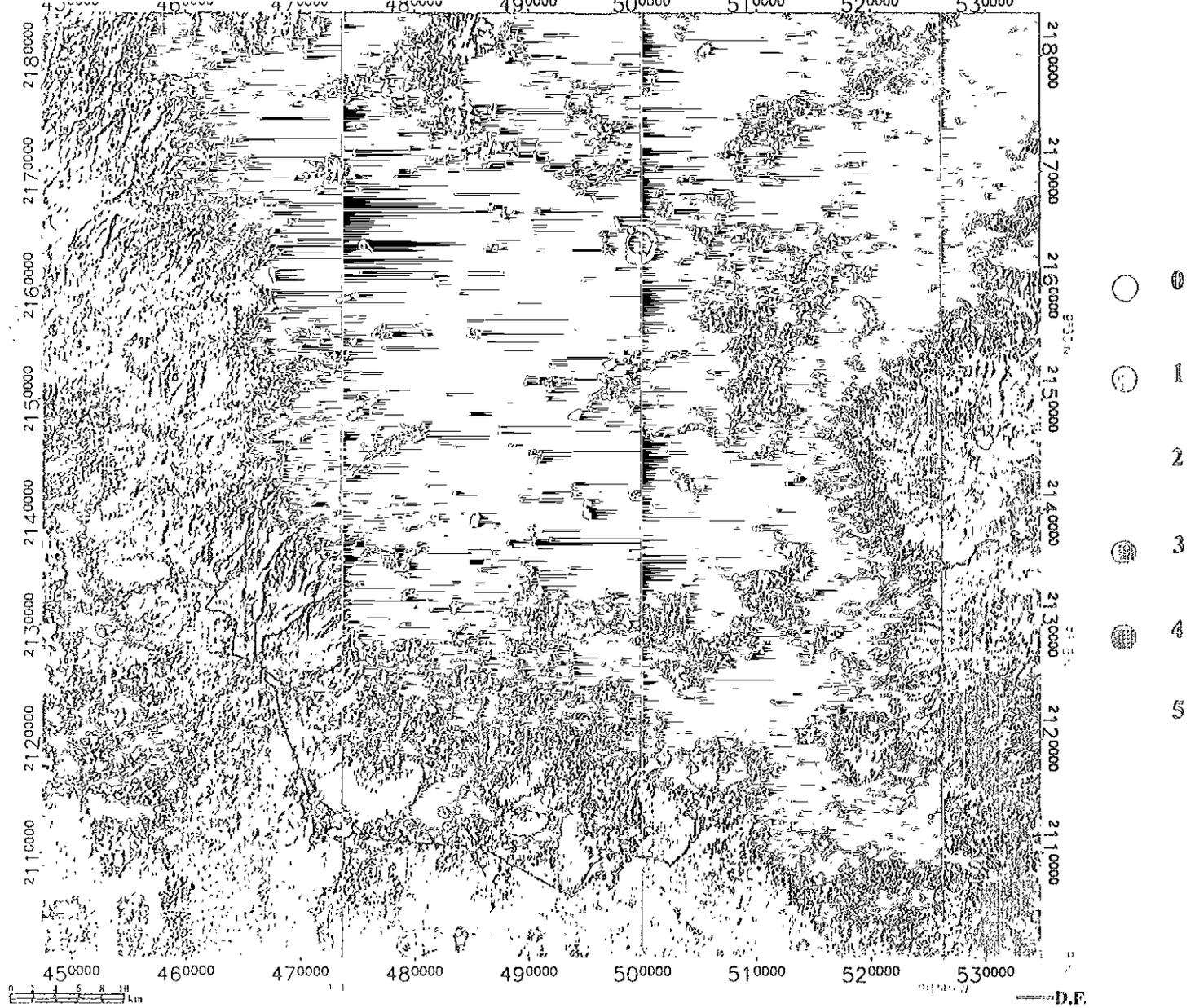


Lámina 5.- Reclasificación de la Vegetación (1985).

D.F.

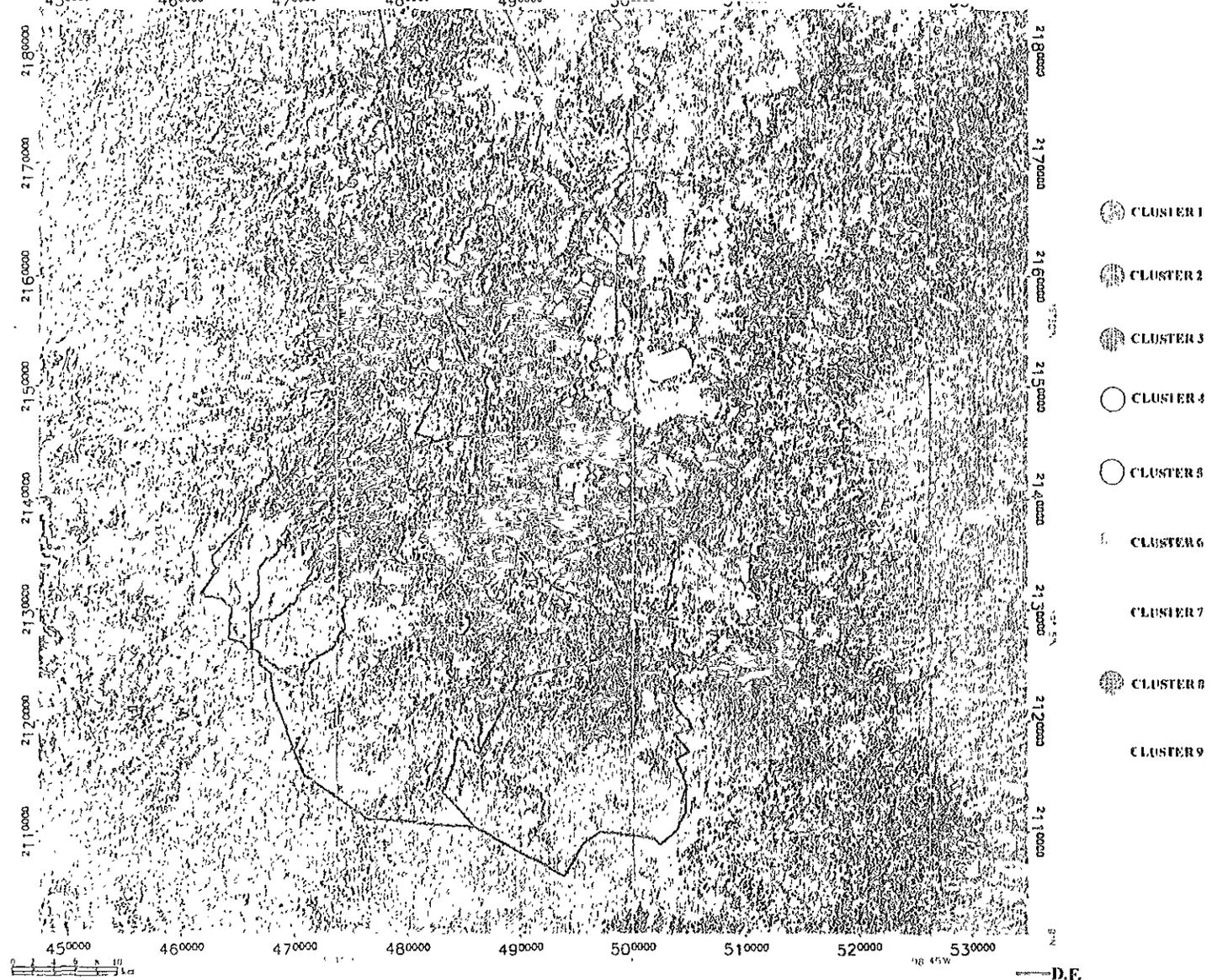


Lámina 6.- Clasificación No supervisada (1985).

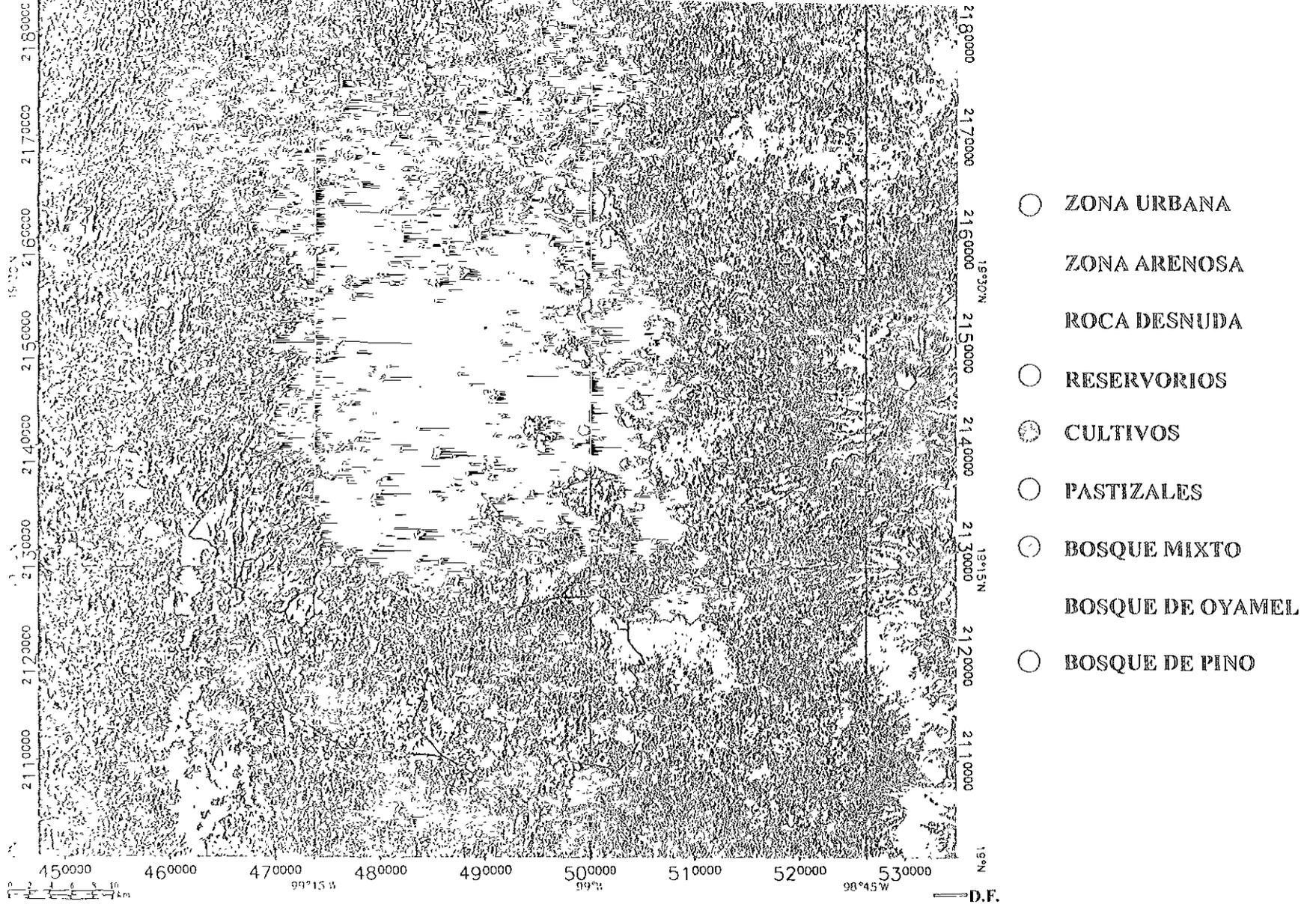


Lámina 7.- Uso de Suelo de la Cuenca de México (1985).

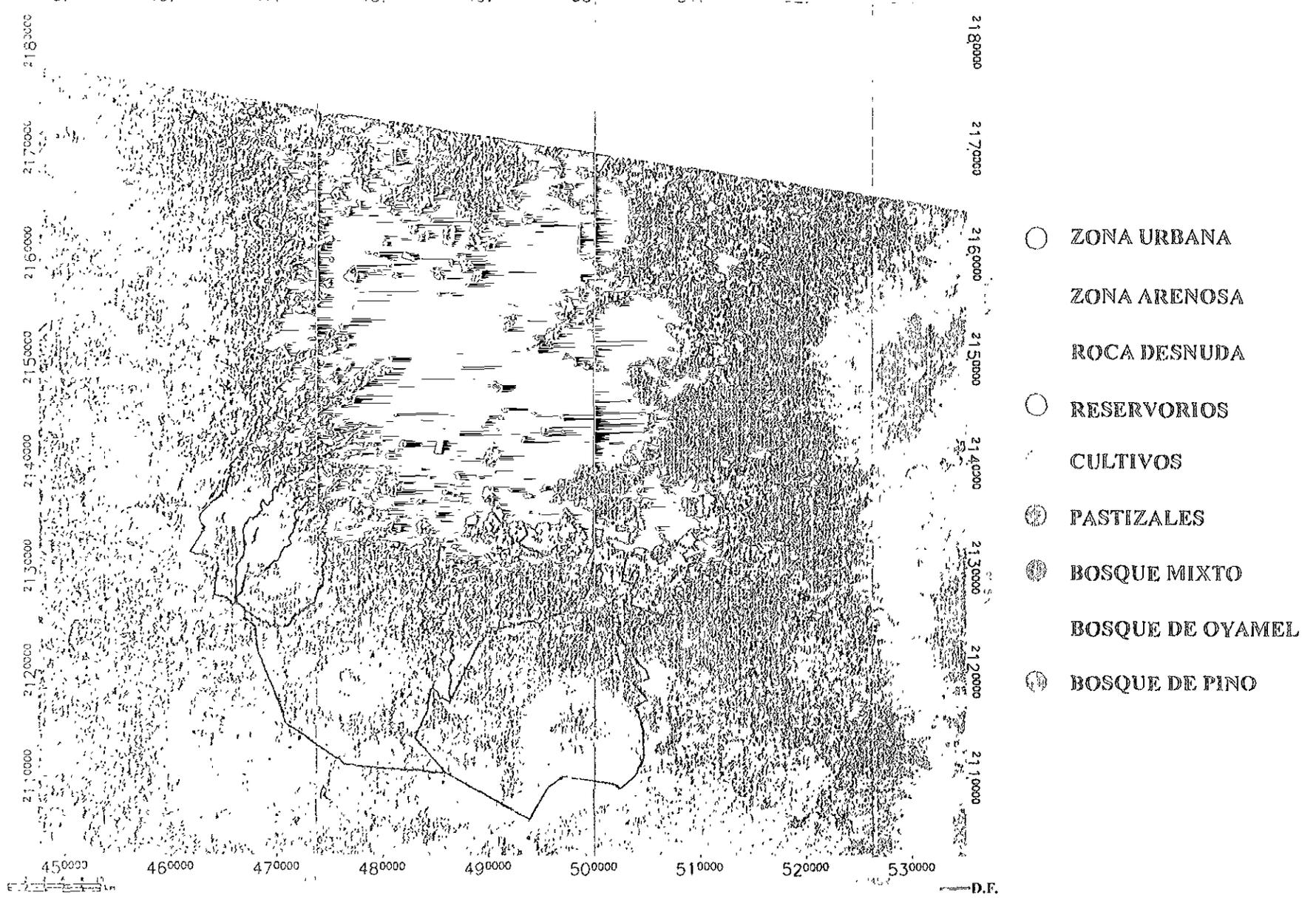


Lámina 8.- Uso de Suelo de la Cuenca de México (1991).

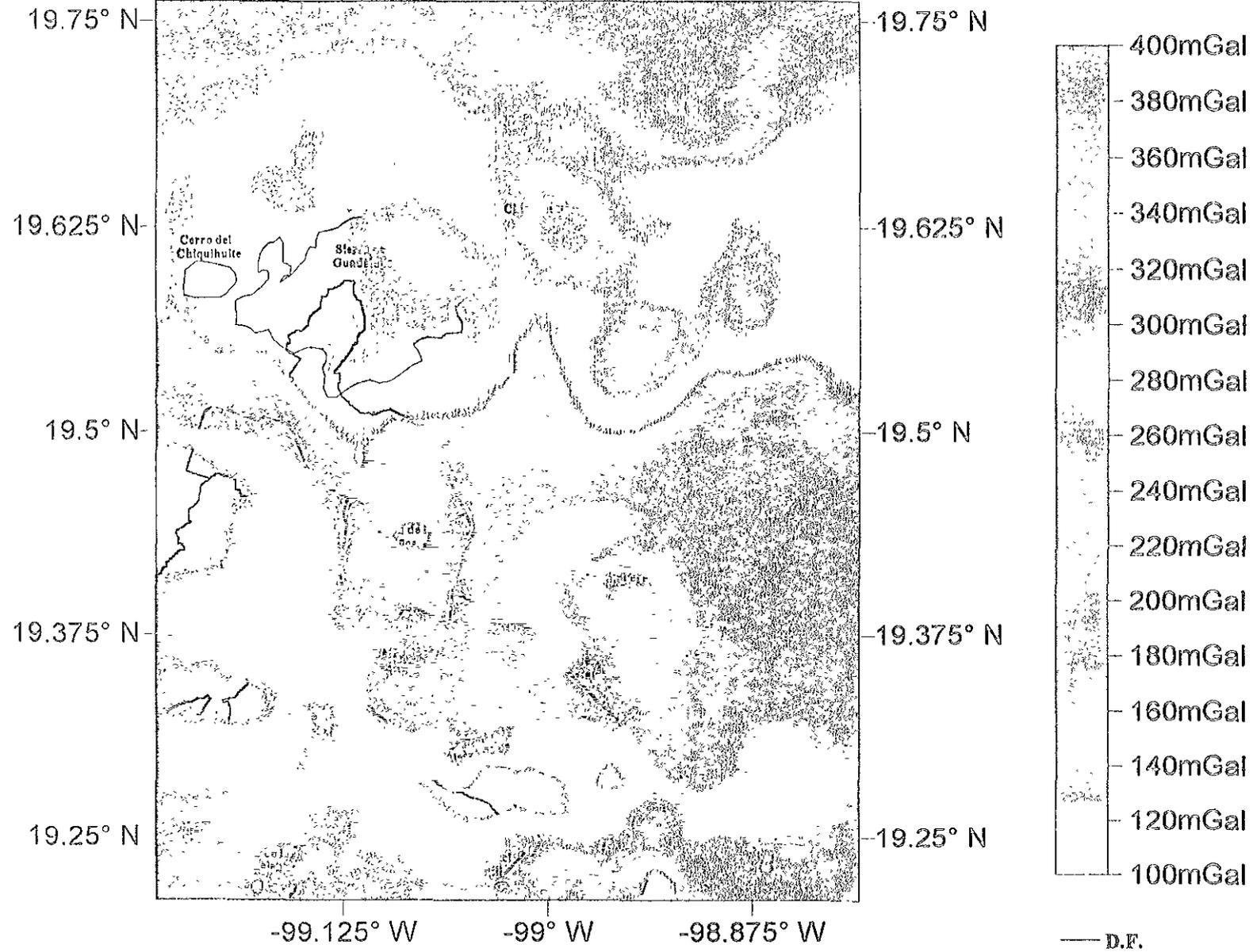


Lámina 9. - Imagen Gravimétrica de Anomalia de Bouguer.

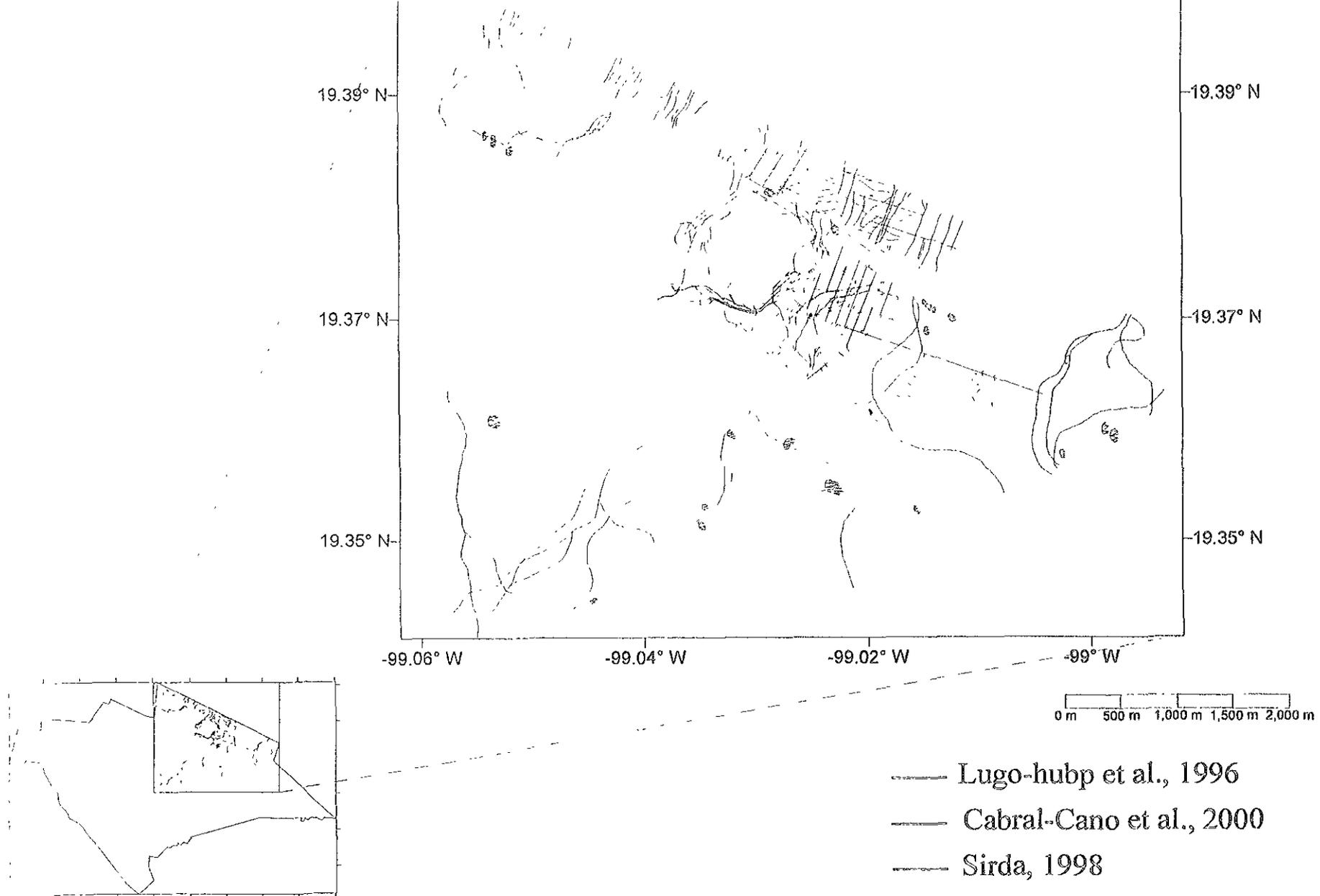


Lámina 12. - Fracturas Mapeadas en la Zona del Peñón.

- ALTA
- MEDIA
- BAJA
- NULA

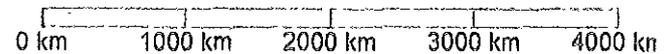
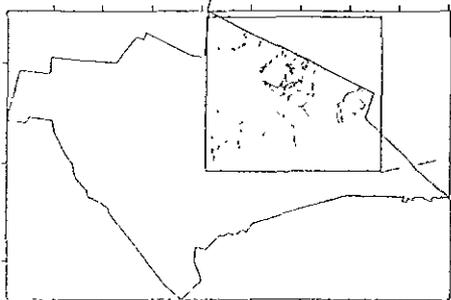
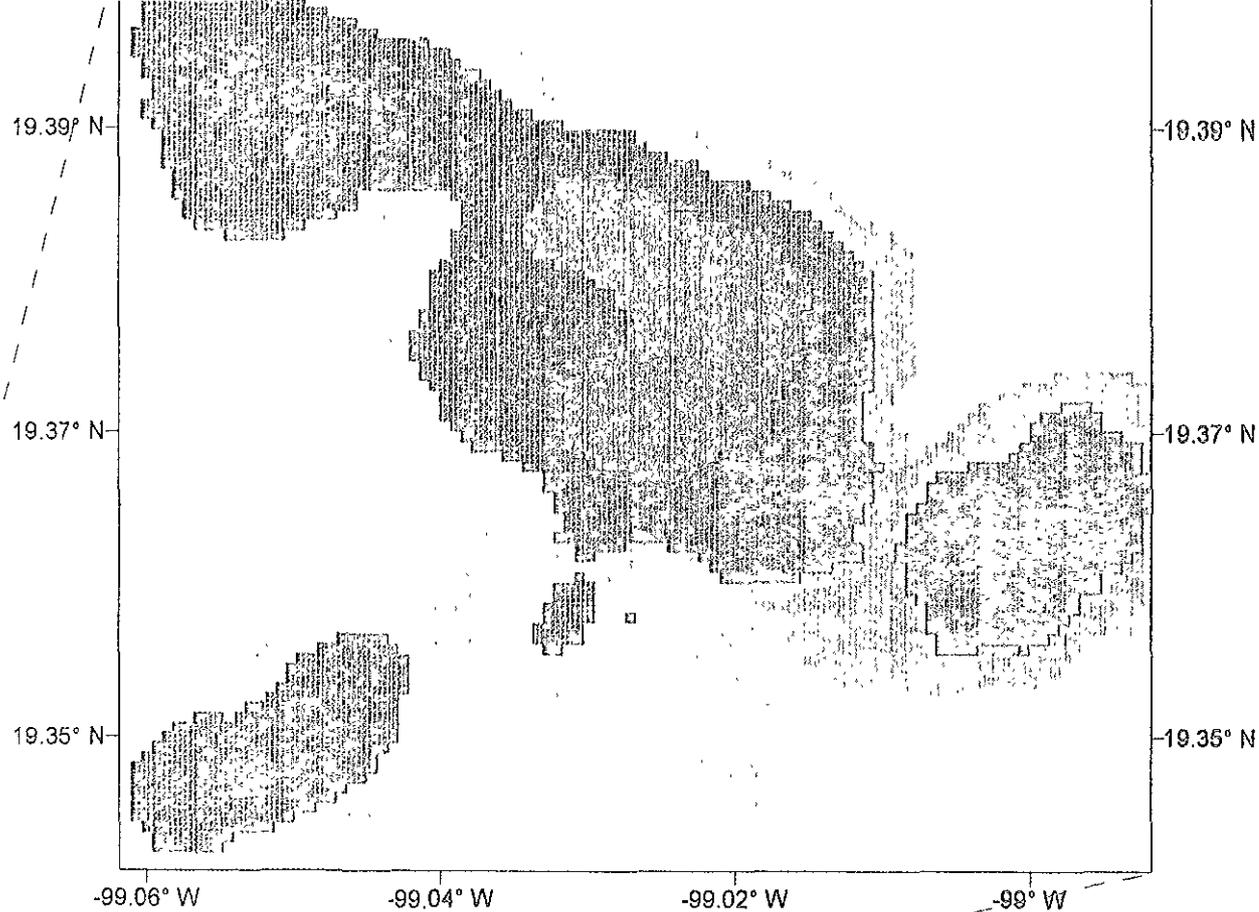
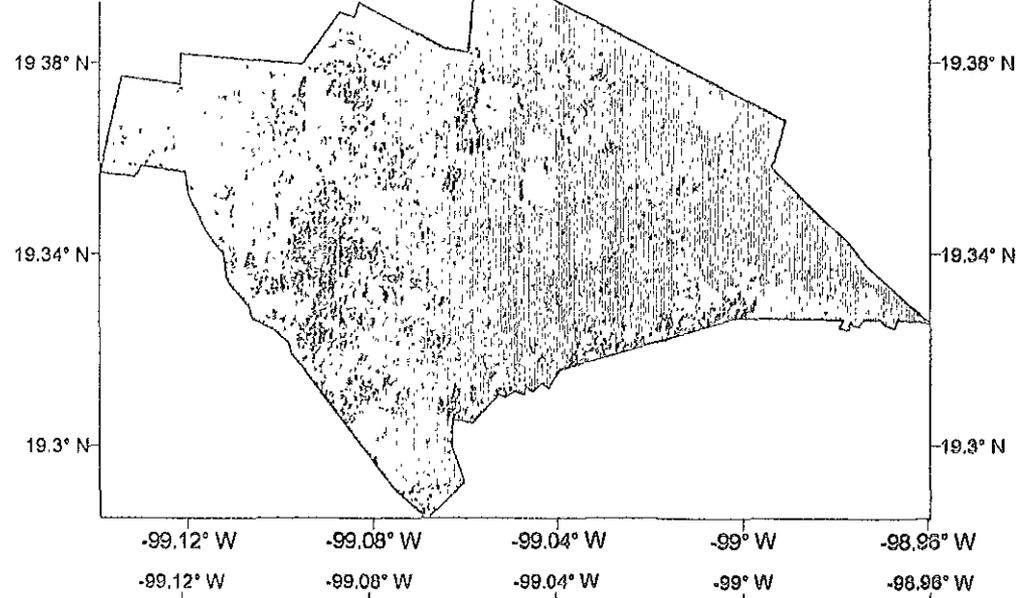


Lámina 13.- Peligro por Densidad de Fracturamiento.

1985



-  ZONA URBANA
-  ZONA ARENOSA
-  ROCA DESNUDA
-  RESERVORIOS
-  CULTIVOS
-  PASTIZALES
-  BOSQUE MIXTO

1991

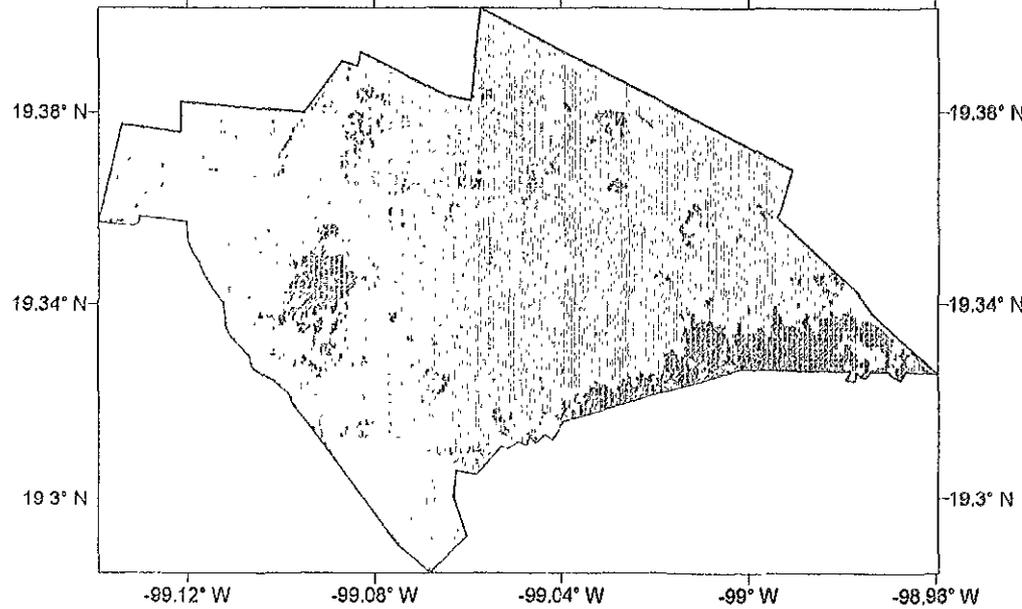
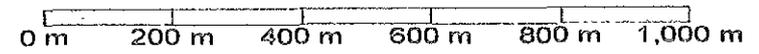
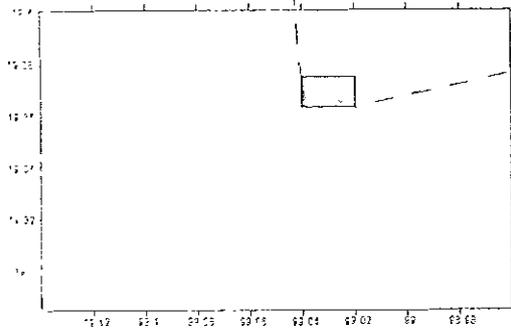
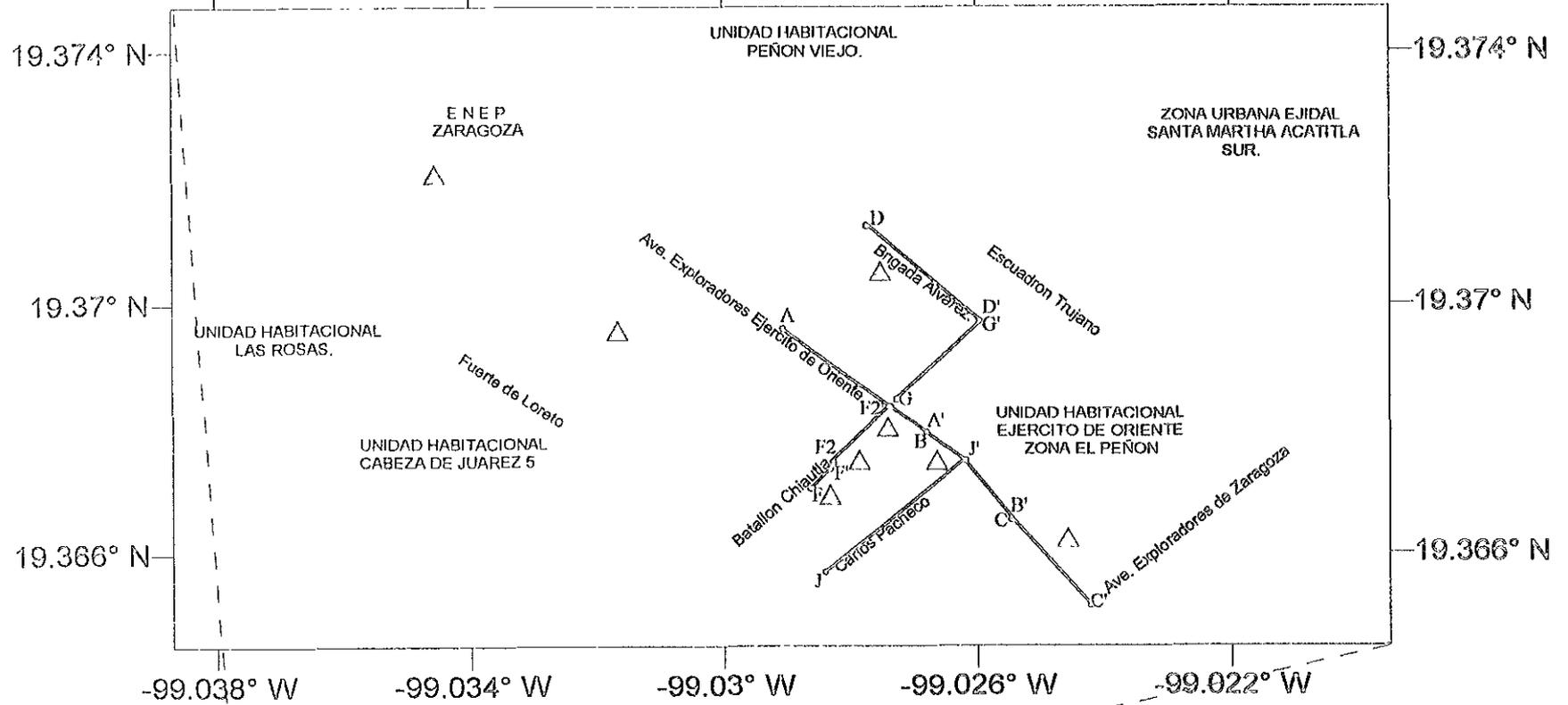


Lámina 14.- Uso de Suelo de Iztapalapa para los Años 1985 y 1991.



△ ESCUELAS

Lámina 15. Ubicación de los perfiles de GPR en la Unidad Habitacional Ejército de Oriente, Zona del Peñón.

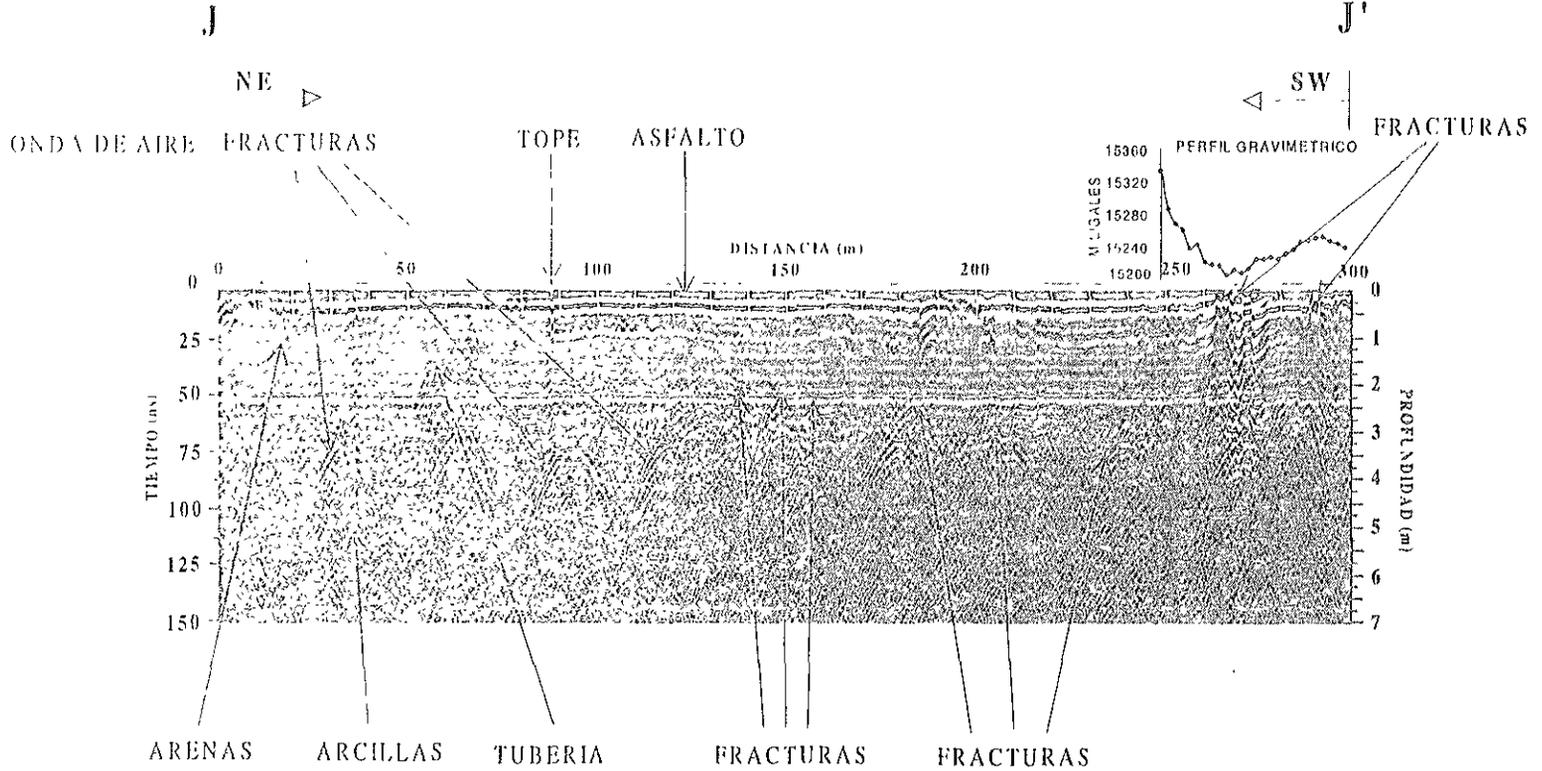


Lámina 16.- Perfil de Radar de Penetración Terrestre JJ'.

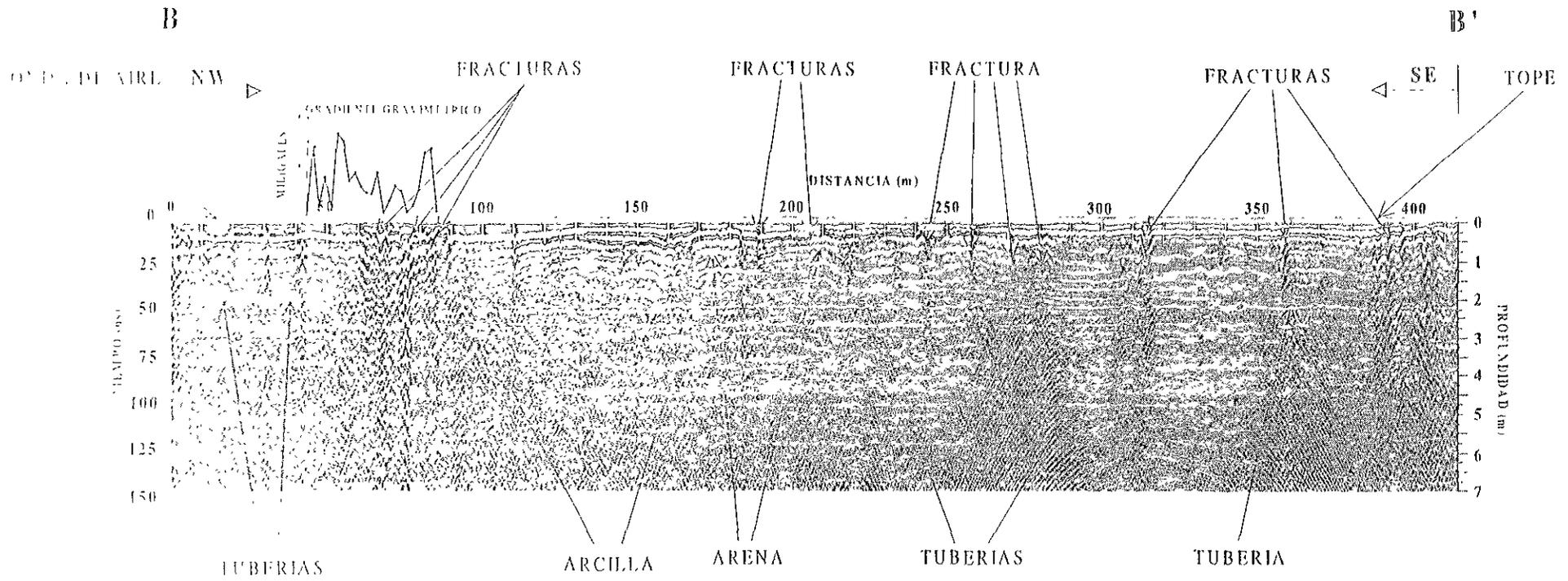


Lámina 17.- Perfil de Radar de Penetración Terrestre BB'.

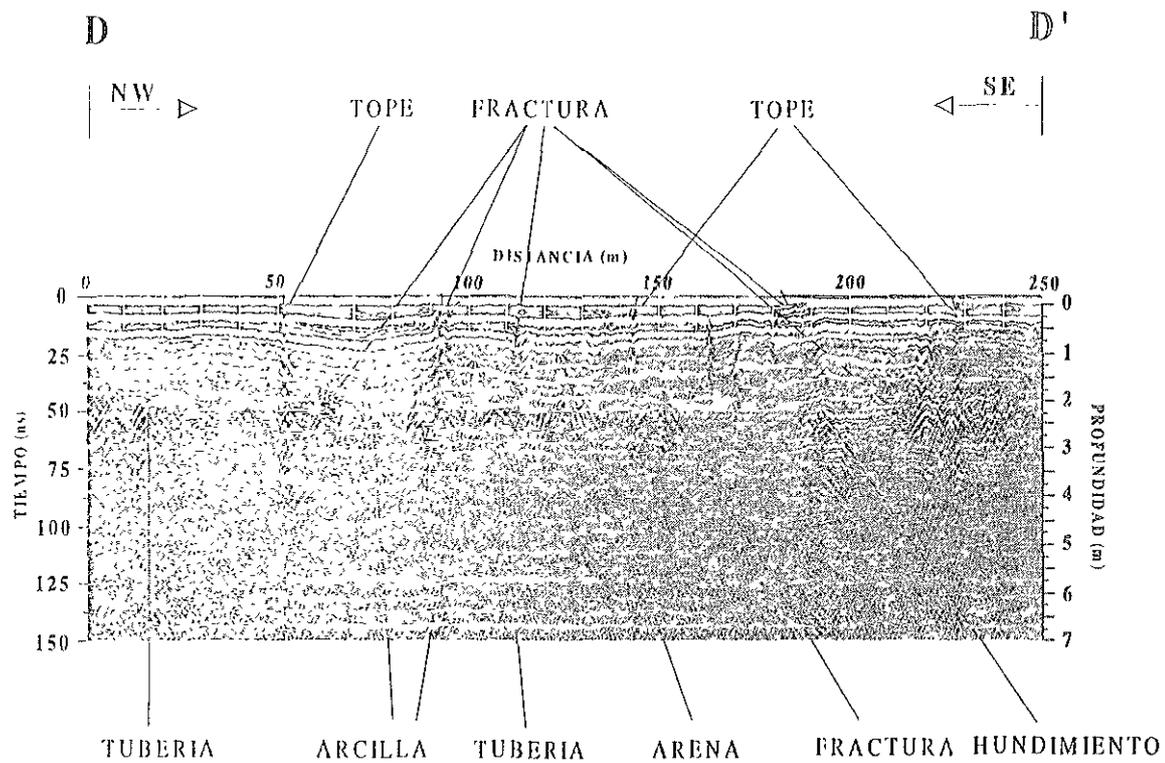


Lámina 18.- Perfil de Radar de Penetración Terrestre DD'.

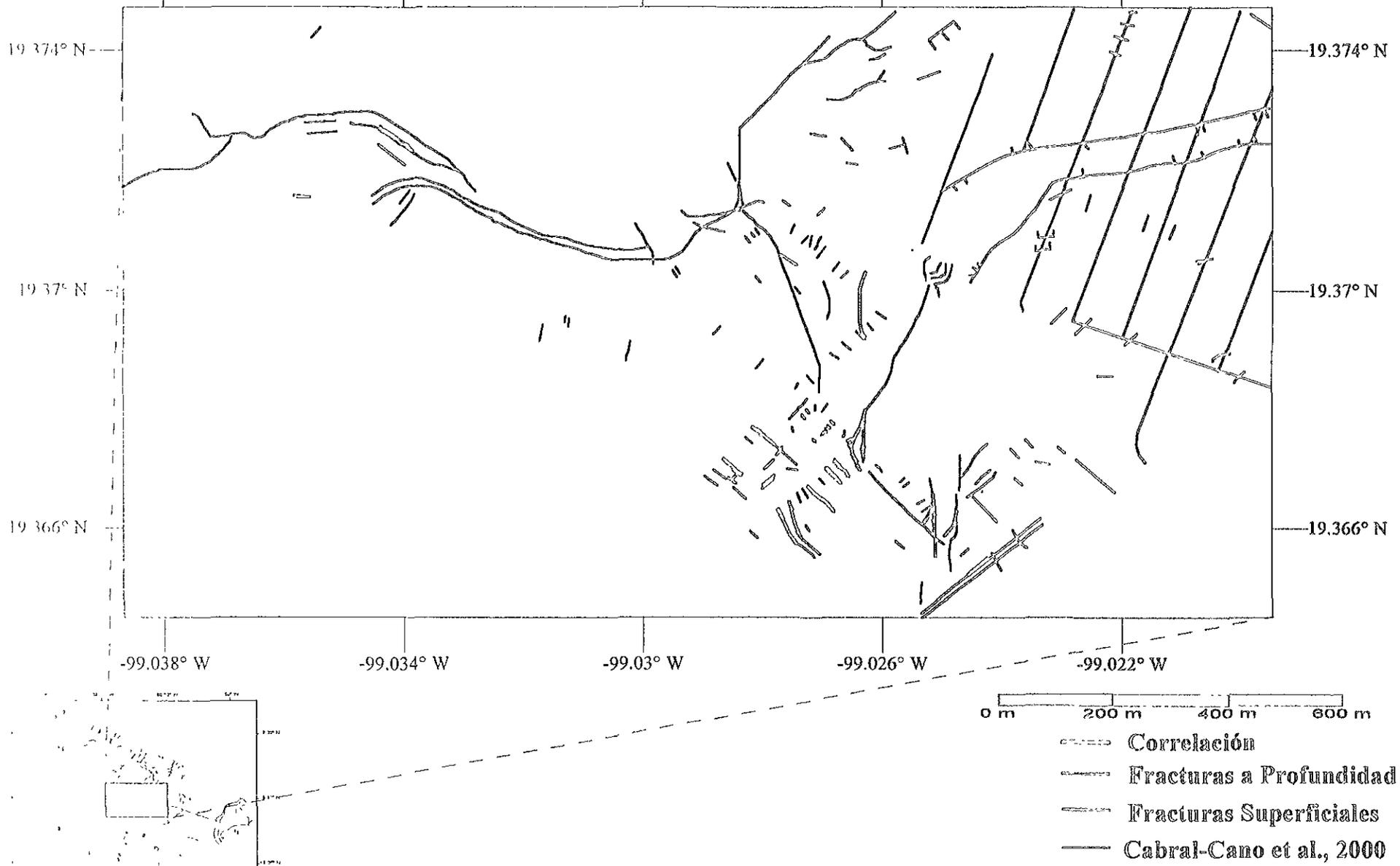


Lámina 19. - Fracturas Mapeadas Mediante los Perfiles de GPR.

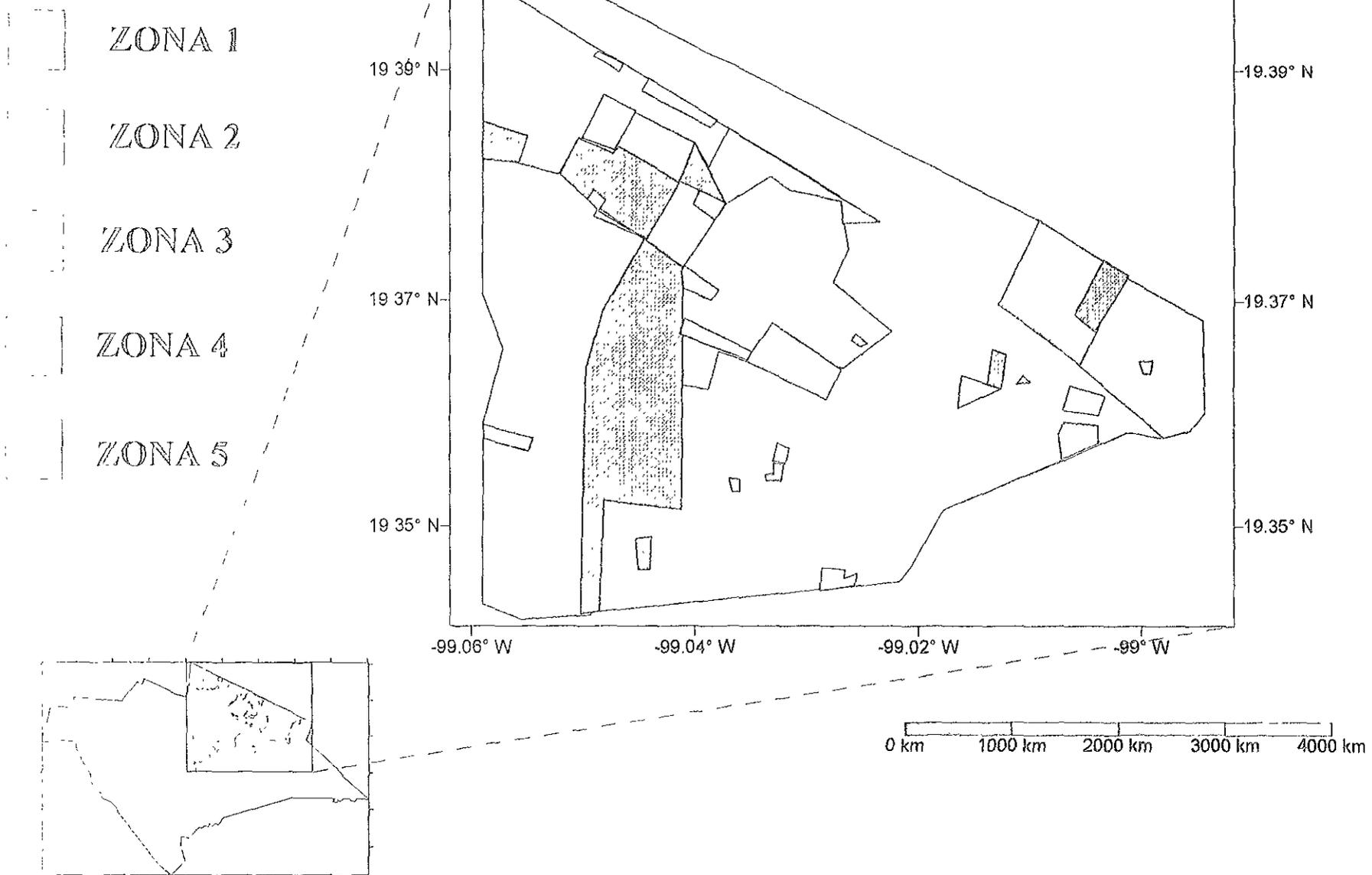


Lámina 20.- Zonificación de los Elementos Bajo Riesgo.

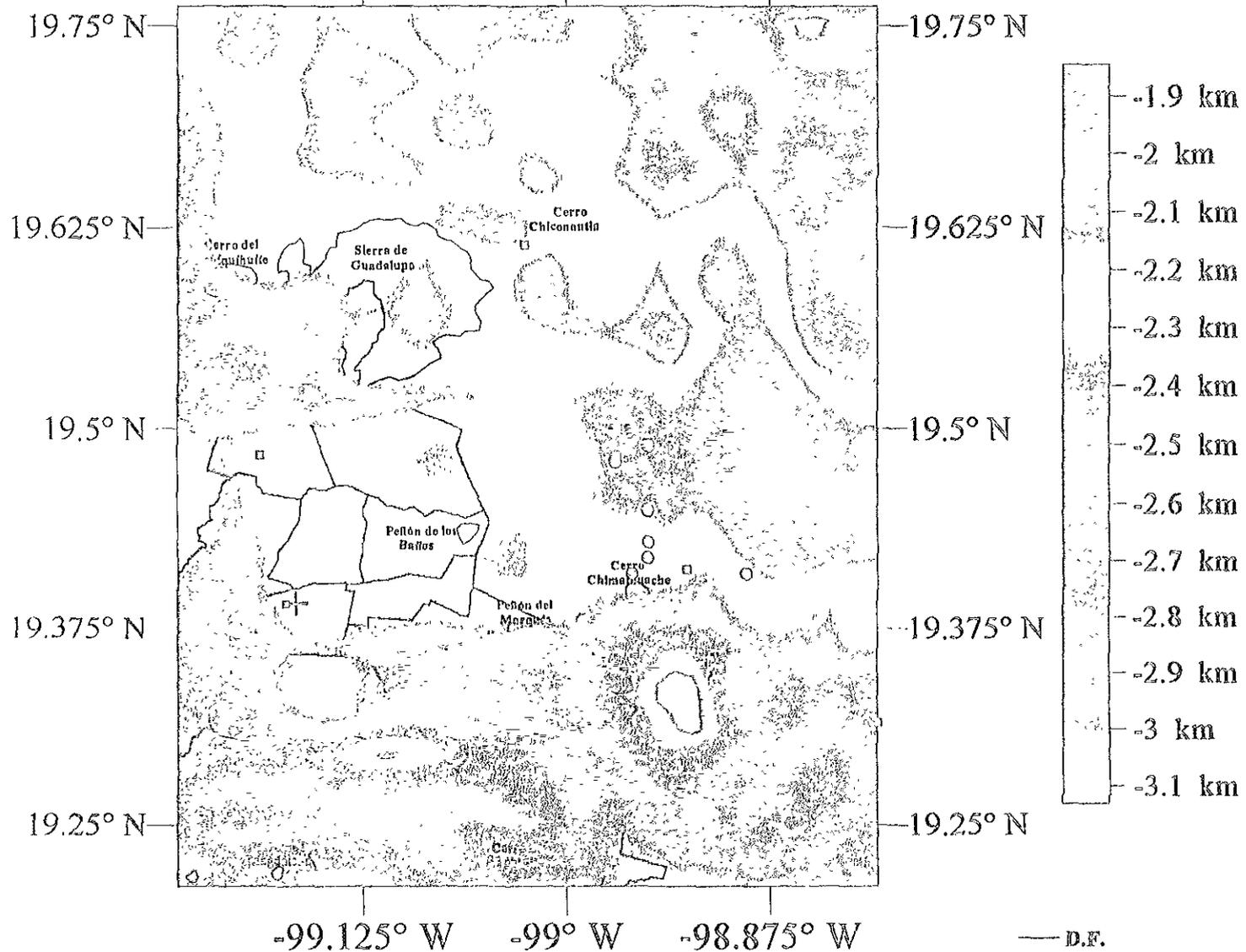
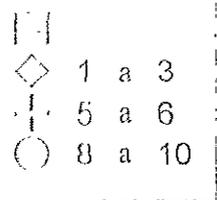


Lámina 22.- Correlación entre el Basamento Estimado y Sísmica.