



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**ESTUDIO GEOMORFOLÓGICO GENERAL
Y APLICADO A PELIGROS EN LA ZONA DEL
LAGO DE CHALCO, ESTADO DE MÉXICO**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA

ALICIA FIGUEROA ENCINO

ASESOR: DR. JOSÉ LUGO HUBP



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

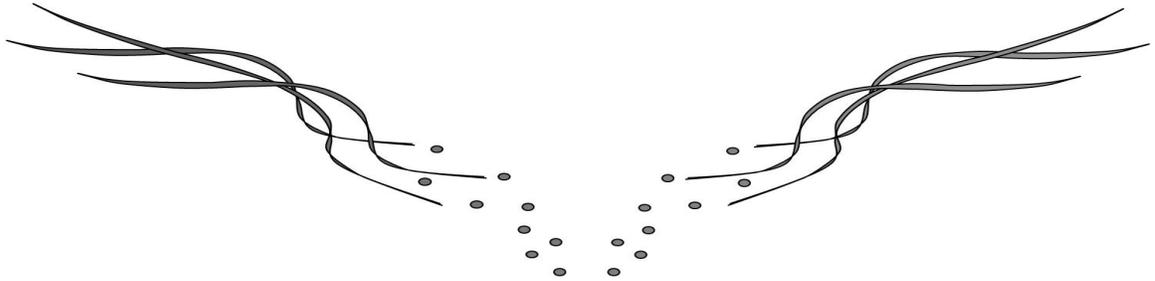
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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.



Exponeis emrañapmoca rep
Adueñw a y Oluñáirt im a
Selegná sol a Soñin sim
a saicarg Pod

1470



Dedico mi esfuerzo
a mi familia mis
profesores y
amigos

Índice

	Pág.
Introducción	1
Capítulo 1 Contexto geográfico-histórico de las subcuencas de Chalco y Texcoco	
1.1 Características de la Cuenca de México	3
1.2 Localización y límites del área de estudio	5
1.3 Características del medio físico	6
1.3.1 Relieve	6
1.3.2 Clima	7
1.3.3 Suelos	9
1.3.4 Vegetación y uso de suelo	14
1.4 Características socioeconómicas	16
1.4.1 Composición de la población	16
1.4.2 Vías de comunicación	17
1.4.3 Tipo de vivienda y servicios	17
1.4.4 Actividades económicas	19
Capítulo 2. Geología	
2. 1 Estratigrafía de la Cuenca de México	21
2. 2 Rasgos estructurales de la Cuenca de México	23
2. 3 Evolución geológica	28
2.4 Geología de la zona estudiada	29
2.5 Geohidrología de la subcuenca de Chalco	37
Capítulo 3. Geomorfología	
3.1 Morfogénesis y morfodinámica	39
3.1.1 Relieve endógeno	39
3.1.2 Releve endógeno modelado	43
3.1.3 Relieve exógeno	44
3.1.4 Relieve antrópico	49
3.2 Morfometría	52
3.2.1 Modelo Digital de Terreno	52
3.2.2 Atributos primarios derivados del MDT	53
3.2.3 Parámetros derivados de la red fluvial	58

3.3 Unidades Geomorfológicas -----	61
3.3.1 Planicie lacustre -----	61
3.3.2 Planicie aluvial-lacustre -----	62
3.3.3 Planicie aluvial -----	62
3.3.4 Piedemonte -----	62
3.3.5 Laderas inferiores de montaña -----	63
3.3.6 Mapa de unidades geomorfológicas -----	63
Capítulo 4. Crecimiento urbano del área de estudio y su impacto socioambiental	
4.1 Evolución demográfica y crecimiento de la mancha urbana -----	67
4.1.1 Factores socioeconómicos que influyeron el crecimiento urbano -----	69
4.2 Procesos antrópicos que modificaron el ciclo hidrológico en Chalco -----	70
4.2.1 Deforestación -----	71
4.2.2 Extracción de material en canteras -----	71
4.2.3 Cambio de uso del suelo -----	75
4.2.4 Obras hidráulicas y la extracción de agua subterránea -----	79
Capítulo 5. Peligros	
Introducción -----	86
5.1 Peligros por unidad geomorfológica -----	87
5.1.1 Inundaciones -----	88
5.1.2 Subsistencia -----	91
5.1.3 Formación de grietas -----	96
5.2 Problemas sociales derivados de la sobrepoblación -----	101
5.2.1 Falta de servicios -----	102
5.2.2 Contaminación del agua y riesgo sanitario -----	103
5.3 Cantidad de población por unidad geomorfológica -----	105
5.4 Vulnerabilidad -----	106
5.5 Peligros -----	108
5.5.1 Metodología para la elaboración del mapa de peligros -----	109
Conclusiones -----	113
Bibliografía -----	114

Introducción

Al sureste de la Cuenca de México se ubica el área de estudio, misma que comprende la subcuenca de Chalco y la porción sur de la de Texcoco. En este lugar ha habido un crecimiento excesivo de la población desde 1960 que ha llevado al aprovechamiento irracional de recursos naturales y la fractura del equilibrio natural, cuyos efectos se pueden observar básicamente en el cambio del uso de suelo, de rural a urbano, la modificación del relieve, la tala de bosques y la sobreexplotación del agua del subsuelo.

Con base en lo anterior se considera importante hacer un estudio geomorfológico de tipo morfogenético, enfocado a conocer los peligros en el área mencionada, a partir de la modificación del relieve por acciones antrópicas. Los peligros que se analizan en este trabajo son las inundaciones, los hundimientos del terreno (subsistencia) y la formación de grietas, procesos que pueden representar un alto riesgo para la población del área estudiada, cuya vulnerabilidad frente a cualquiera de estos es, de hecho, ya elevada, dado su bajo nivel socioeconómico y la inadecuada construcción y ubicación de sus viviendas.

En este sentido, la investigación que a continuación se presenta plantea como hipótesis que, con el constante crecimiento urbano en la zona estudiada, se hará más frecuente e intensa la ocurrencia de peligros, si esto se suma a la vulnerabilidad existente por la baja calidad de las viviendas y la ubicación de los asentamientos irregulares, se pueden esperar situaciones de alto riesgo para la población.

El objetivo general es conocer el origen y la evolución de los hundimientos del terreno, la formación de grietas y las inundaciones en la zona estudiada. Así, los objetivos particulares derivados del general y orientados a resolver la hipótesis mencionada en el párrafo anterior, son los siguientes:

1. Identificar los peligros asociados con cada unidad de relieve.
2. Localizar las zonas afectadas por cada proceso y las áreas con mayor peligrosidad.

Finalmente, es conveniente mencionar que esta investigación se estructura de la siguiente manera: en el primer capítulo se explican las características físicas y sociales más importantes que pueden estar relacionadas con la ocurrencia de peligros como relieve, clima, características socioeconómicas y tipo de vivienda; en el segundo capítulo se muestra la geología del área de estudio, fundamentalmente, su estratigrafía, los rasgos estructurales y la geohidrología; el tercer apartado se refiere a la geomorfología del lugar, que comprende la delimitación de las unidades geomorfológicas, realizada a partir del manejo de cartas topográficas del INEGI escala 1:50,000, fotointerpretación, trabajo de campo y análisis morfogénico; el capítulo cuarto sintetiza el crecimiento demográfico del área de estudio y explica los principales factores que influyeron dicho poblamiento; el último apartado comprende la revisión conceptual de peligro, riesgo, vulnerabilidad y desastre, así como una breve reseña histórica de la ocurrencia de inundaciones, subsidencia y agrietamiento en varias localidades del área de estudio. La parte con mayor trascendencia de este apartado, radica en la elaboración del mapa de peligros del área de estudio que muestra de forma sintetizada cómo se presentan estos por unidad geomorfológica y los distintos grados de peligrosidad por localidad.

Capítulo 1. Contexto geográfico-histórico de las subcuencas de Chalco y Texcoco

1.1 Características de la Cuenca de México

El área en estudio es la subcuenca de Chalco que se ubica en la parte suroriental de la Cuenca de México en la región centro-oriental del Sistema Volcánico Transversal Mexicano “SVTM” (Mooser, 1975). El origen de la Cuenca de México se remonta, de acuerdo con el mismo autor, a un millón de años atrás cuando la actual cuenca era un relieve con corrientes fluviales que escurrían hacia el sur, a la cuenca del río Amacuzac, cuyo sistema está integrado por los ríos Cuautla y Cuernavaca.

La Cuenca de México se formó por la tectónica regional propia del SVTM y, en menos de 50,000 años, se formaron más de 220 conos volcánicos monogenéticos situados entre los volcanes Ajusco (al occidente) y Popocatepetl (al oriente), lo que creó una barrera montañosa que cerró la antigua cuenca hidrográfica para convertirla en una presa natural con un lago principal.

Las coordenadas extremas de la Cuenca de México son: 19° 00', 20° 15' de latitud norte y 98° 15', 99° 30' de longitud oeste. La altitud de la planicie de nivel de base varía de <2,240 msnm (metros sobre el nivel del mar) en el sur, a 2,390 msnm en el norte; su longitud máxima de norte a sur es de 110 km y, de este a oeste, 80 km. El parteaguas delimita una superficie aproximada de 9,600 km² y comprende cinco entidades de la República Mexicana: Estado de México, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y el Distrito Federal (Figura 1.1).

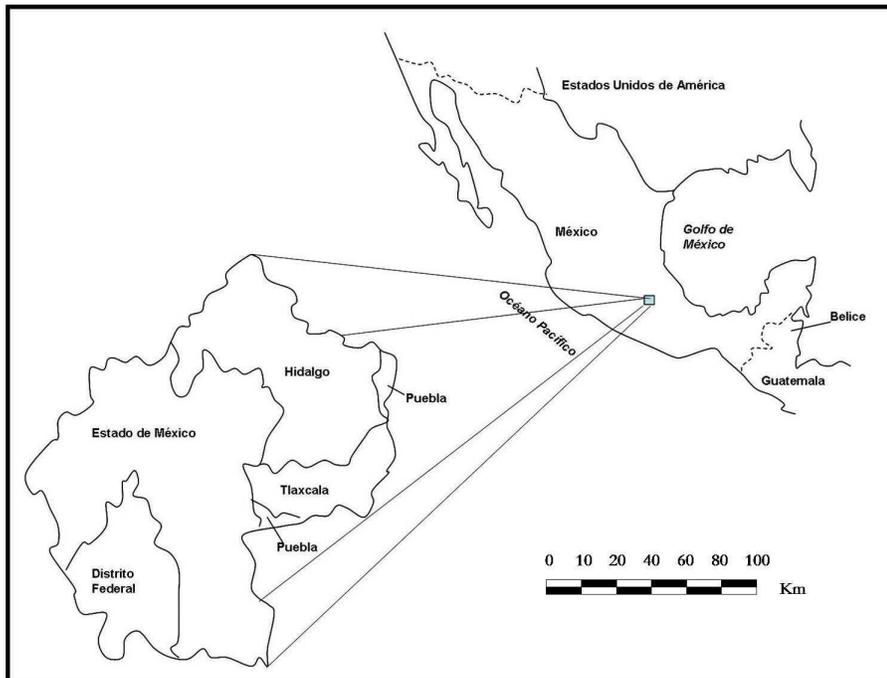


Figura 1.1. Mapa de localización de la Cuenca de México. Modificado de Gutiérrez *et al.* (2005).

En la figura 1.2 se muestra una imagen de satélite Landsat de la Cuenca de México; siguiendo la línea de parteaguas se aprecia al norte, las Sierras de Tezontlalpan y Pachuca; al este las de Tepozán y Calpulalpan, en el sureste las Sierras Nevada y de Río Frío; al sur y suroeste las Sierras Chichinautzin y Las Cruces, respectivamente; y al oeste, las de Monte Alto, Monte Bajo y Tepozotlán.

1.2 Localización y límites del área de estudio

Por la naturaleza y dinámica de los peligros que se abordan en esta investigación, el área de estudio no sólo se restringe a los límites físicos de la subcuenca de Chalco, también integra la porción sur de la subcuenca de Texcoco. Debido a que no hay formas del relieve que delimiten el área de estudio al norte y oeste, se toman en cuenta los límites que coinciden con los de la carta topográfica Chalco, escala 1: 50,000 del INEGI (1998); al este el límite natural es la ladera occidental de la Sierra de Río Frío y, el extremo sur lo marca la Sierra Chichinautzin.

Las coordenadas extremas del área de estudio son $19^{\circ} 10' 57''$, $19^{\circ} 28' 21''$ de latitud norte y $98^{\circ} 45' 08''$, $99^{\circ} 00' 00''$ de longitud oeste; su superficie es de 832 Km² y su altitud varía de <2,240 m a poco más de 3,500 msnm. Comprende dos delegaciones del Distrito Federal (Tláhuac y Milpa Alta) y doce municipios del Estado de México: Texcoco, Chimalhuacán, Chicoloapan de Juárez, La Paz, Ixtapalapa, Valle de Chalco Solidaridad, Chalco de Díaz Covarrubias, Cocotitlán, Tlalmanalco, Temamatla, Tenango del Aire y Amecameca (Figura 1.3).

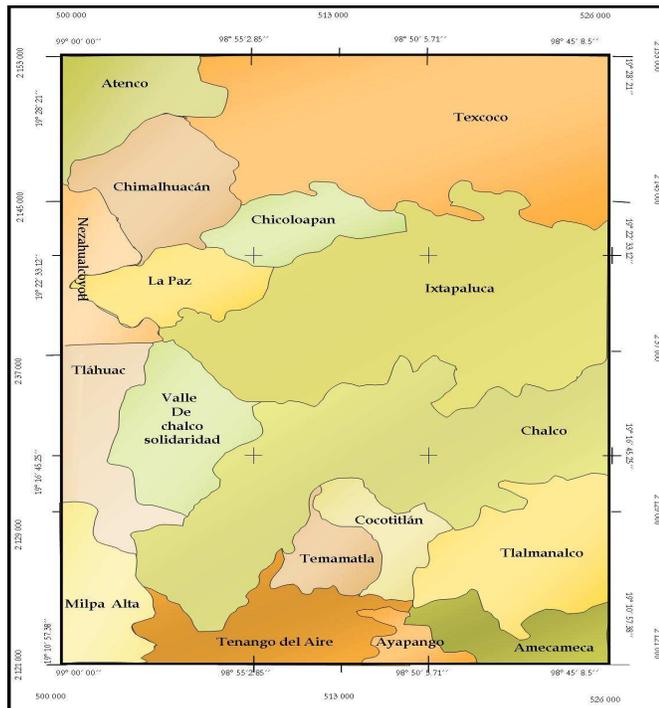


Figura 1.3. División administrativa del área de estudio con base en el INEGI (2001 y 2002).

1.3 Características del medio físico

La fisiografía es la disciplina que se encarga de la descripción de los rasgos físicos de la superficie terrestre y de los fenómenos que en ella se producen (Lugo, 1989). En este apartado se hará hincapié en el relieve, factor que tiene estrecha relación con el clima, el que a su vez influye en los procesos del modelado (erosión-acumulación) del relieve.

Actualmente en el área de estudio hay una fuerte influencia antrópica derivada del crecimiento urbano de la ciudad de México y de las poblaciones vecinas. Esta situación repercute, según Gutiérrez *et al.* (2005), en una dinámica geomorfológica que en algunos casos llega a representar peligros para la población, como inundaciones, azolves y desarrollo de barrancos; procesos que se abordarán en el último capítulo.

1.3.1 Relieve

La provincia fisiográfica del Sistema Volcánico Transversal Mexicano (Figura 1.4) es una serie de planicies escalonadas sobre las que se asientan volcanes de diversas dimensiones, aislados o en grupos, formando algunas cuencas cerradas ocupadas por lagos. Está constituida de un gran paquete de rocas volcánicas emitidas en diferentes episodios, y de acuerdo con el INEGI (1981 en Lugo y Córdova, 1992) se divide en tres subprovincias: 1) Mil Cumbres, 2) Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo y 3) Lagos y Volcanes de Anáhuac, a esta última pertenecen la Cuenca de México, la Ciudad de México y las capitales de los estados de México, Tlaxcala, Hidalgo, Puebla y Morelos.

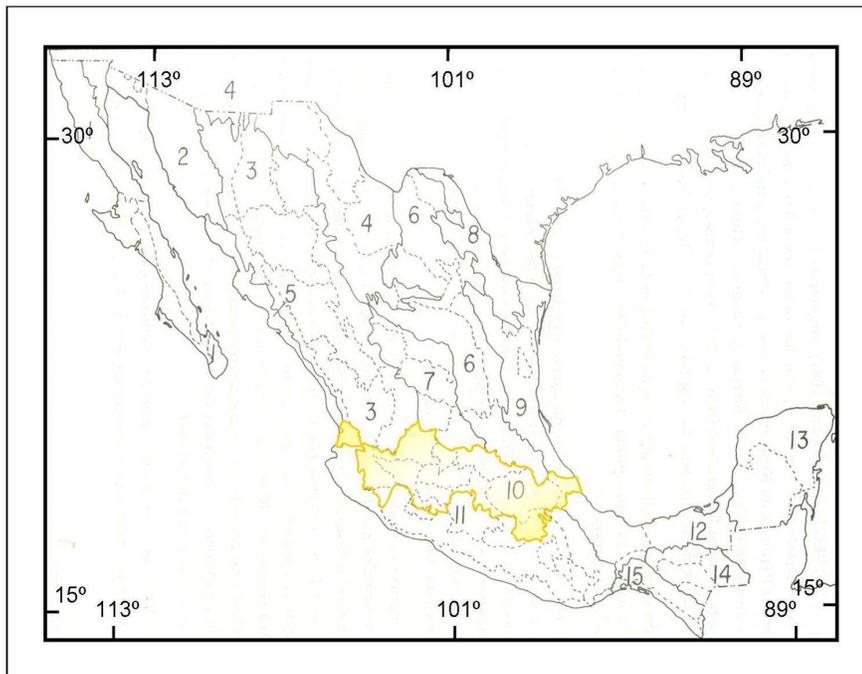


Figura 1.4. Provincias fisiográficas de la República Mexicana. La provincia número 10 corresponde al Sistema Volcánico Transversal Mexicano o Eje Neovolcánico (Quiñones, 1987). Modificado de Lugo y Córdova (1992).

La Cuenca de México está constituida de rocas volcánicas, principalmente del Plioceno y Cuaternario y derivadas de estas, por lo que las formas del relieve son edificios volcánicos de composición y forma diversa, así como derrames de lava y depósitos piroclásticos de flujo y caída. El piso lacustre en la subcuenca de Chalco está constituido principalmente por arcillas que se extienden como una franja discontinua de norte a sur y se interrumpe por las elevaciones de la Sierra de Santa Catarina, el Cerro de Chimalhuacán y el complejo Volcánico El Pino, integrado por los volcanes el Tejolote Grande, el Tejolote Chico, Santa Cruz y El Pino (Figura 1.5).

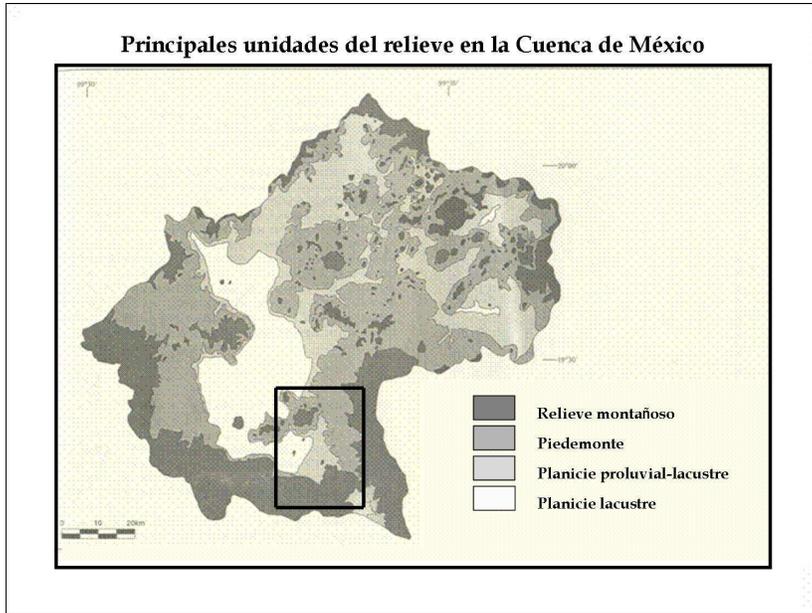


Figura 1.5. Principales unidades de relieve en la Cuenca de México. El rectángulo indica el área de estudio. Modificado de Gutiérrez *et al.* (2005).

Otras elevaciones importantes dentro del área de estudio son: el cerro Huepango y los volcanes Tláloc y Telapón en la Sierra de Río Frío; el cráter freático magmático Xico, el cerro Tlapacoya (El Elefante) y el cerro de Cocotitlán, ubicados en la planicie de Chalco (Figura 1.6). La diferencia altitudinal es de aproximadamente 1,280 m entre la zona más baja (el Lago Nabor Carrillo, menos de 2,240 msnm) y la zona más elevada (el cerro Huepango, más de 3,500 msnm).

1.3.2 Clima

El clima del área de estudio está condicionado básicamente por la latitud y la altitud; ambos factores determinan la precipitación y la temperatura y otros fenómenos como heladas y granizadas.

La latitud determina dos estaciones bien diferenciadas a lo largo del año:

1. En verano los vientos alisios provenientes del Golfo de México penetran hasta la Sierra Madre Occidental y originan lluvias. Otro fenómeno meteorológico que tiene lugar durante el verano y

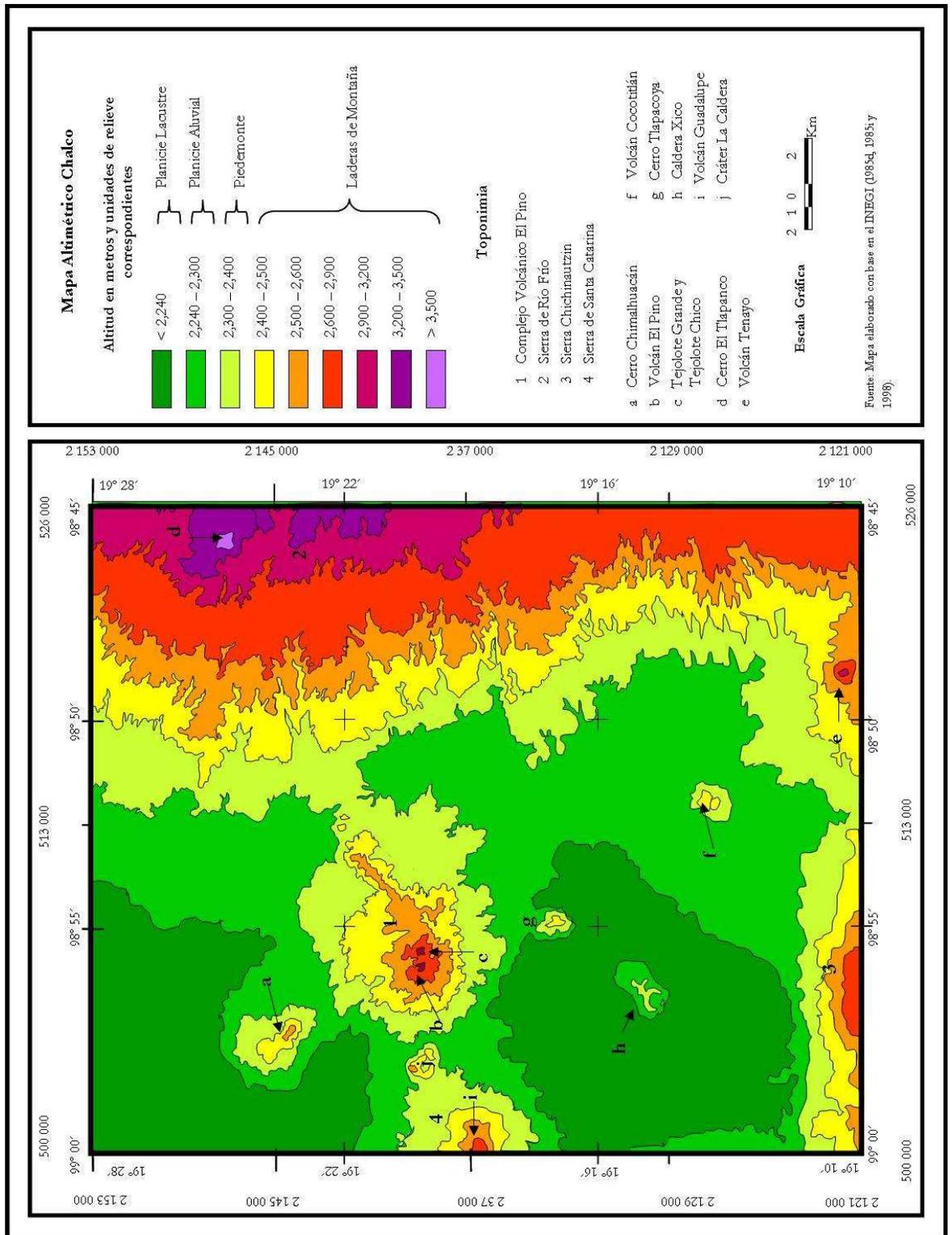


Figura 1.6. Altimetría de la zona de estudio

principios del otoño, es la formación de tormentas tropicales y ciclones que producen importantes precipitaciones.

2. Durante el invierno masas de aire frío producen el descenso de la temperatura y en ocasiones producen lluvias (*nortes*). En la época más seca del año, febrero y marzo, los vientos adquieren mayor velocidad y producen deflación (tolvaneras) en la planicie lacustre de Chalco y Texcoco.

En cuanto a la altitud, es el relieve montañoso el que determina la variación de la temperatura, misma que desciende, en promedio 0.6 °C por cada 100 m. Esto depende de la humedad, pues al disminuir con la altitud, la temperatura se reduce más rápido. Según García (1988), en el área de estudio la precipitación media anual es de 656.9 mm, la temperatura media anual de 15.1 °C y hay cinco tipos de clima (Figura 1.7), los cuales se describen a continuación:

1. BS₁ (k): Semiseco templado con lluvias de verano y verano caluroso. Se localiza en la planicie lacustre y ocupa el piso altitudinal menor a los 2,240 m.
2. C (w₀) (w) b (i'): Templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano de menor humedad. Se localiza en las unidades que corresponden a la planicie aluvial-lacustre y al piedemonte, entre los 2,240 y 2,300 msnm.
3. C (w₁) (w) b (i') g: Templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media. En la subcuenca de Chalco se presenta en las planicies lacustre y aluvial-lacustre, así como en las laderas de la Sierra de Río Frío, entre los 2,300 y 2,500 msnm.
4. C (w''₂) (w) b (i') g: Templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad. Se extiende como una franja al oriente del área de estudio, en las laderas de la Sierra de Río Frío, entre los 2,500 y 2,600 msnm, y en las laderas de la Sierra Chichinautzin, al sur de la subcuenca de Chalco, ocupando el piso altitudinal mayor a los 2,600 m.
5. C (E) (w₂): Semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad. Se ubica por encima de los 2,700 m sobre las laderas de montaña de las Sierra de Río frío.

Se puede observar en la figura 1.7 que los climas frío y subhúmedo se encuentran en el extremo oriental, donde predomina la zona montañosa cuya altitud supera los 2,500 m; en contraste, los climas más secos se encuentran al noroeste en la planicie lacustre de Texcoco.

1.3.3 Suelos

El suelo es un sistema complejo que resulta de la interacción de cinco variables: el clima, los organismos, el material de origen o geológico, el relieve y el tiempo. En el área de estudio estos factores se combinaron para dar diez tipos de suelo a partir de diversas rocas volcánicas y

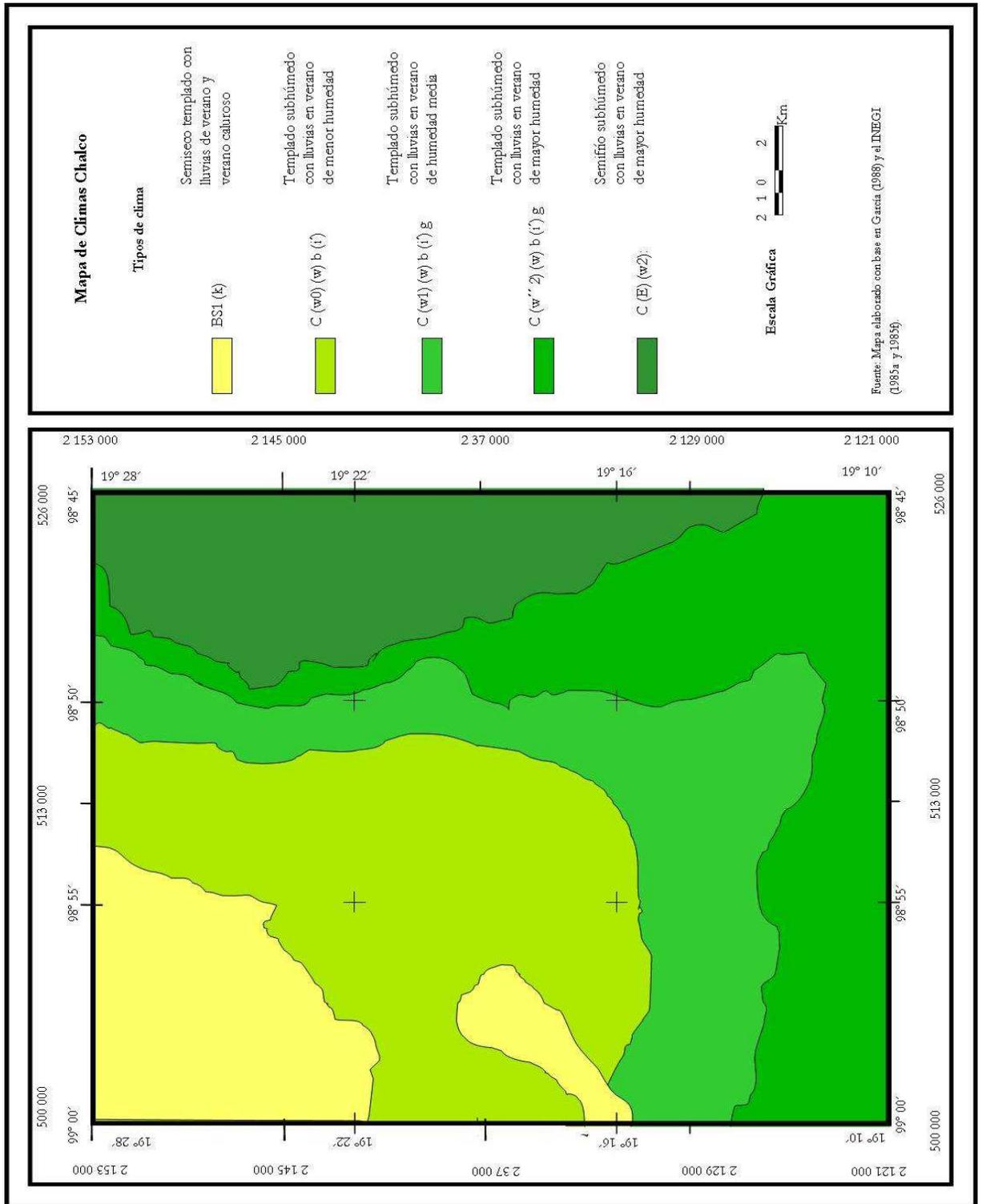


Figura 1.7. Climas en la zona de estudio

sedimentos derivados de éstas. Con base en datos del INEGI (1985b, 1985g y 2001) se elaboró el mapa (Figura 1. 8) que muestra la distribución de los suelos en el área de estudio:

Histosoles. Se encuentran en climas húmedos, templados o cálidos, se restringen a zonas de inundación, pantanosas o lechos de antiguos lagos, donde las plantas se descomponen y acumulan en la superficie, por lo que tienen una alta cantidad de materia orgánica. Se reconocen en la planicie lacustre de Chalco.

Gleysoles. Se forman en condiciones húmedas y poseen textura fina, por tal razón no asimilan bien el oxígeno; contienen hierro reducido y una coloración gris, azulada o rojiza. Se encuentran en las zonas que formaron parte de los antiguos lagos de Texcoco y Chalco, donde actualmente el agua se estanca durante la época de lluvias y llega a formar ciénagas como ocurre en Chimalhuacán, Chalco de Díaz Covarrubias y Chalco Solidaridad.

Vertisoles. Se forman a partir de rocas arcillosas, generalmente montmorilloníticas, llegan a tener 30% de arcilla que les permite expandirse y contraerse (con humedad y sequía formando el microrrelieve de gilgai), estos movimientos provocan agrietamiento e inversión de materiales que dañan las edificaciones y hacen difícil y costosa la infraestructura urbana; además, poseen una alta compresibilidad con resistencia promedio a 2 ton/m². Están en la planicie lacustre y aluvial-lacustre.

Solonchaks. Son característicos de zonas con acumulación de salitre, como lechos de lagos. Se forman por desecación de lagos salinos que dejan en la superficie una alta concentración de sales de cloro, sodio, magnesio y cloruro de calcio, o cuando al ascender el agua freática arrastra minerales que cristalizan en la superficie del suelo al evaporarse el agua. La vegetación se compone de pastizales y plantas que toleran el exceso de sal como rábanos y romeritos.

Fluvisoles. Se forman a partir de materiales depositados por corrientes de agua en forma de planicies de deslave, planicies inundables, terrazas de ríos, deltas y abanicos aluviales. Sus partículas tienden a ser redondas y lisas por la acción de las corrientes de agua, acomodadas en estratos diferenciados por tamaños de partículas. Se encuentran en las márgenes de la mayoría de las desembocaduras de ríos en el piedemonte y planicie aluvial-lacustre, así como en las zonas inundables de la planicie lacustre.

Phaeozems. Son suelos ricos en humus (materia orgánica y nutrientes). Su material parental proviene de depósitos piroclásticos y pómez. En el área de estudio se encuentran a lo largo del piedemonte y en los llanos de origen volcánico. Estos suelos se utilizan para la agricultura de riego o de temporal de granos, legumbres y hortalizas con alto rendimiento.

Cambisoles. Son característicos de las zonas tropicales, son de color claro y presentan alto grado de meteorización; soportan vegetación boscosa y comúnmente son aprovechados para agricultura de frutales. Se localizan en la Sierra de Río Frío, al oriente del área de estudio.

Litsoles. Se desarrollan generalmente en relieves montañosos y se caracterizan por la presencia de un horizonte muy delgado cuya profundidad es menor a 10 cm.; están limitados en su base por una roca dura, tepetate o caliche duro y su pH es de 6.05 (ligeramente ácido); se localizan en las superficies escarpadas de pendiente media a fuerte y en lavas que, por la pendiente o juventud, no han permitido el desarrollo de suelo.

Regosoles. Son depósitos profundos de material suave con fragmentos de roca que se forman a partir de depósitos no consolidados cuando el material madre se abre a causa del crecimiento de raíces, por lo que tienen pocas o casi ninguna de las características de un suelo desarrollado. Generalmente se encuentran en pendientes pronunciadas donde la erosión ocurre rápidamente y no da tiempo suficiente para el desarrollo del suelo.

Andosoles. Se forman por la deposición de cenizas y otros materiales volcánicos. Son ricos en vidrio volcánico, minerales amorfos, organominerales complejos y humus (de 8 a 15%), que les dan una coloración oscura. Se localizan en el piedemonte y planicies.

La textura de los suelos es muy importante, pues de ella derivan la estructura, el paso de fluidos, la retención de nutrientes y la velocidad de erosión. En el área de estudio los peligros que se estudiarán en los siguientes capítulos están asociados con la textura de los suelos. La formación de grietas, el hundimiento diferencial e inundaciones, se relacionan con suelos arcillosos por su textura fina y gran plasticidad (Tabla 1.1).

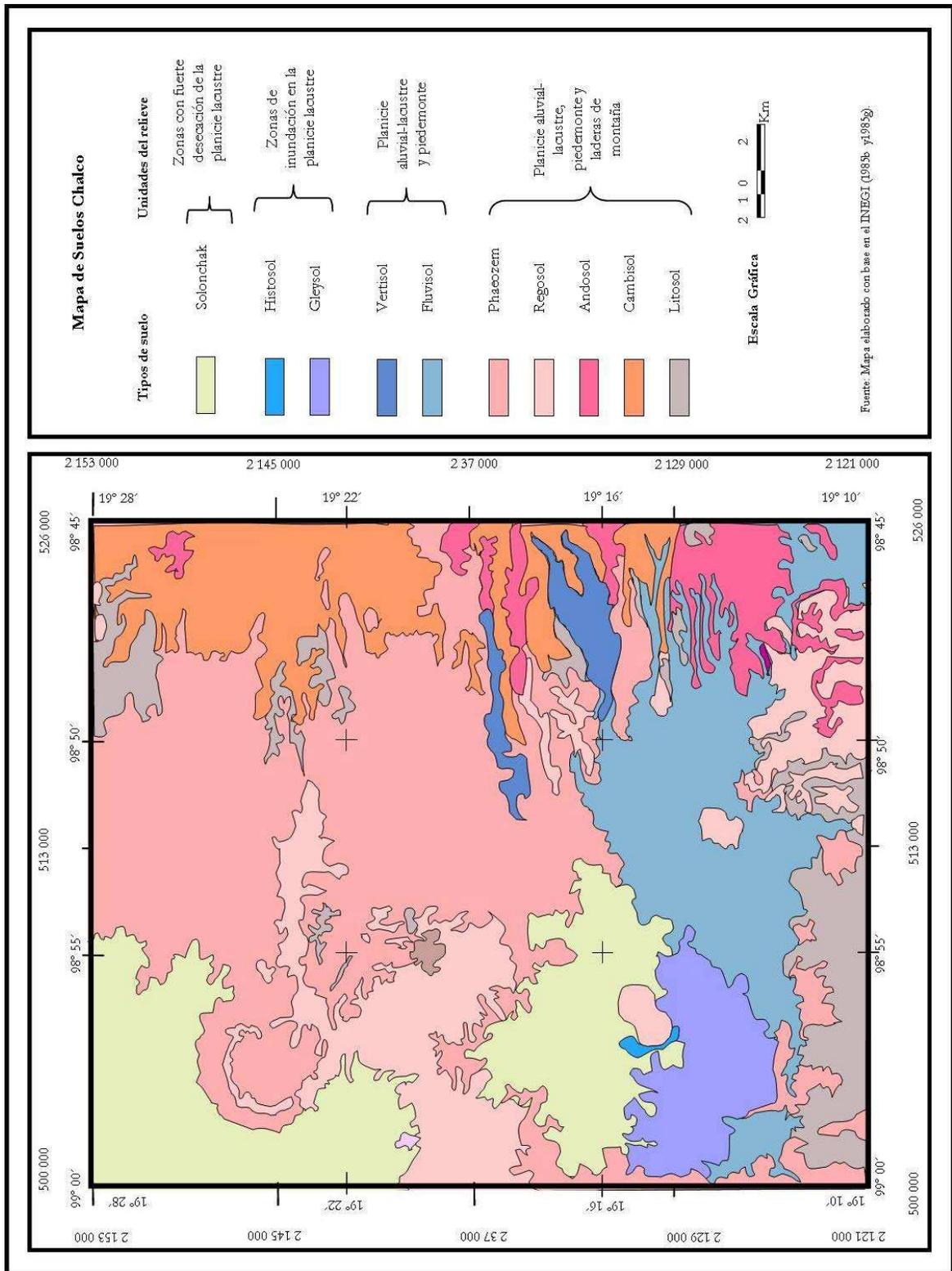


Figura 1.8. Suelos en la zona de estudio

Tabla 1.1. Texturas del suelo. Con base en Mela (1966) y FitzPatrick (1996).

Partícula	Diámetro en mm.	No de partículas/g	Sup. Expuesta en cm ² /g
Arena			
Muy gruesa	2 – 1.0	90	11
Gruesa	1.0 – 0.5	720	23
Mediana	0.5 – 0.2	5, 700	45
Fina	0.2 - 0.1	460, 000	91
Muy fina	0.1 – 0.05	722, 000	227
Ultra fina	0.05 – 0.02		
Limo			
Grueso	0.02 – 0.006	5, 776, 000	454
Fino	0.006 – 0.002		
Arcilla			
Gruesa	0.002 – 0.0006	90, 260, 853, 000	8, 000, 000
Fina	0.0006 – 0.0002		
Ultra-arcilla	< 0.0002		

Las tres texturas principales tienen diferentes características, en tanto que el tamaño de la partícula es proporcional a la porosidad, a la retención y a la pérdida de agua u oxígeno y retención de nutrientes.

El mapa de suelos muestra que las texturas finas corresponden a la planicie lacustre, y conforme los suelos ocupan una altitud mayor, el tamaño de las partículas aumenta hasta gravas y bloques en las laderas de montaña. Los suelos de la planicie y el piedemonte son apropiados para el cultivo de diferentes granos e, incluso, han permitido el cambio de uso del suelo de agrícola a urbano.

1.3.4 Vegetación y uso de suelo

En el área de estudio hay núcleos de vegetación diversa por los cambios altitudinales, la orientación de las laderas y por la variedad de suelos y de climas. Las partes más altas están cubiertas por bosques y, conforme se desciende, se encuentra una vegetación que cambia sucesivamente a matorrales y finalmente, a tipo desértico al alcanzar las llanuras. Es importante mencionar que la cubierta vegetal ha sido talada para aumentar los terrenos agropecuarios con perjuicio para las comunidades (Benassini, 1984). En el área de estudio se reconocen los siguientes tipos de vegetación (Figura 1.9).

Bosque. Pertenece al relieve montañoso de la Sierra de Río Frío. Con clima semifrío se distribuyen tres tipos de bosque en toda el área, con excepción de las planicies lacustre y aluvial-lacustre; estos son: a) bosque de pinos, se encuentra a una altitud por encima de los 2,700 m, donde el material volcánico y el relieve han favorecido la formación de suelos con grosor mayor a los 50 cm; b) bosque de coníferas, no rebasa los 2,900 msnm y, c) bosque de *abies*, se localiza en zonas montañosas con altitud mayor a los 2,900 m. La importancia de los bosques, además de la diversidad de especies vegetales y animales, radica en la recarga de agua a los mantos freáticos.

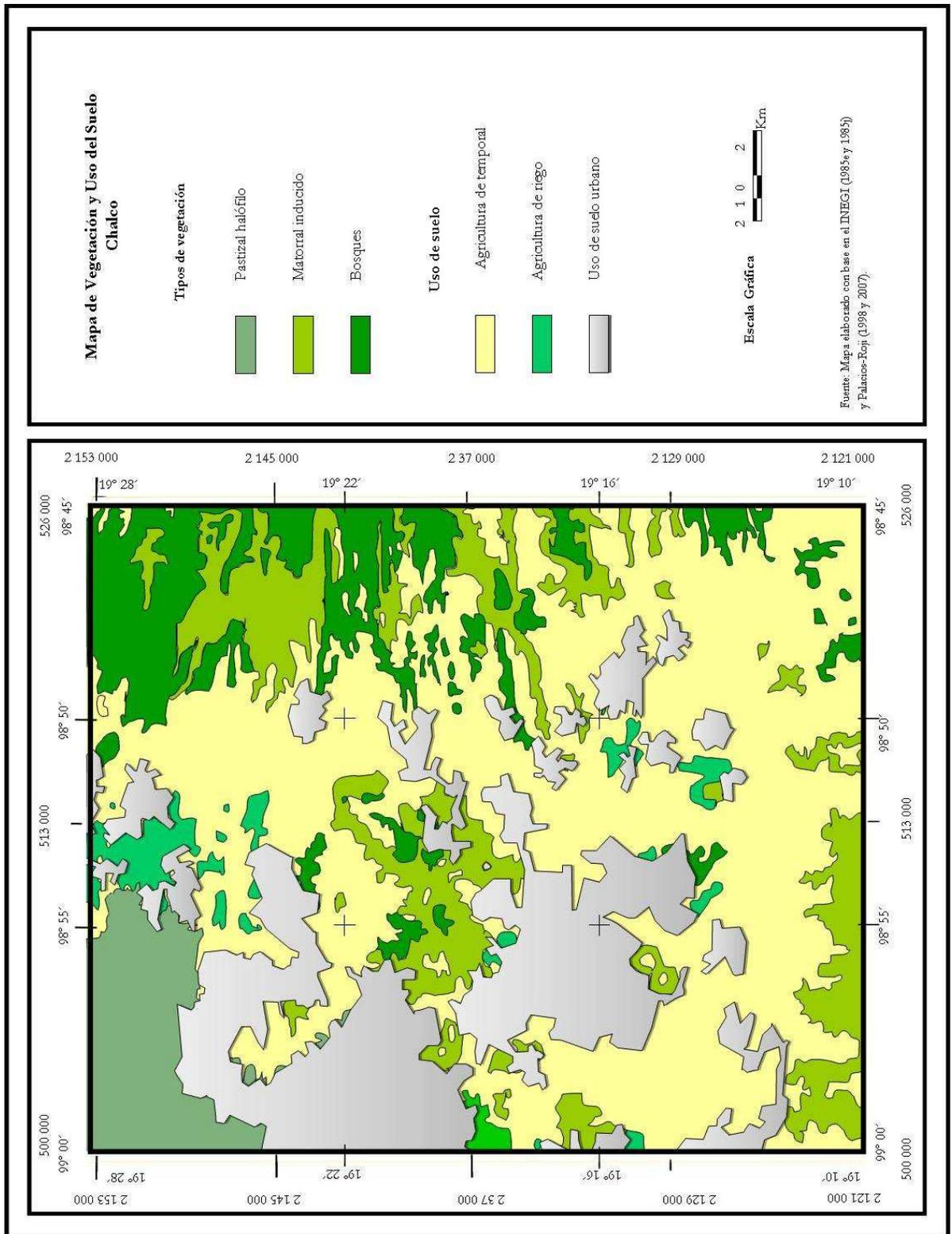


Figura 1.9. Vegetación y áreas urbanas en la zona de estudio

Matorrales. Están asociados con temperaturas altas, humedad y precipitación media; se ubican sobre las laderas bajas y el piedemonte formado por coladas de lava y flujos piroclásticos. Resultan de la deforestación de los bosques de encino y coníferas.

Pastizales. Se ubican en las planicies y superficies poco accidentadas y son de naturaleza artificial ya que fueron sembrados para realizar actividad agrícola o pecuaria.

Pastizal halófilo. Es el resultado de la creciente desertificación de los antiguos lagos; la vegetación halófila actual se compone de romerillo, zacate salado, pegarropa, hierba del carbonero, escobilla y maravilla.

En el área estudiada el uso de suelo dominante es el agrícola, principalmente de temporal, enfocado al cultivo de hortalizas, frutales, flores y pastos para el ganado; pero, en la planicie lacustre y cerca de las zonas de inundación de los canales, se practica la agricultura de riego.

1.4 Características socioeconómicas

1.4.1 Composición de la población

El INEGI divide a la población en tres grandes grupos de edad: jóvenes de <1 a 14 años, adultos de 15 a 64 años y viejos de más de 65 años. Con los datos de población (INEGI, 2000a) se realizó la pirámide de edad del área de estudio (Figura 1.10), la cual es de tipo progresivo porque su base es amplia y su cima angosta, lo que indica altas tasas de natalidad y mortalidad, por ello hay una gran cantidad de personas jóvenes y adultas; pero, por otra parte, se puede ver la tendencia a reducir la tasa de natalidad, lo que hará que en un futuro la pirámide sea regresiva y la cantidad de personas viejas sea más numerosa que la población joven.

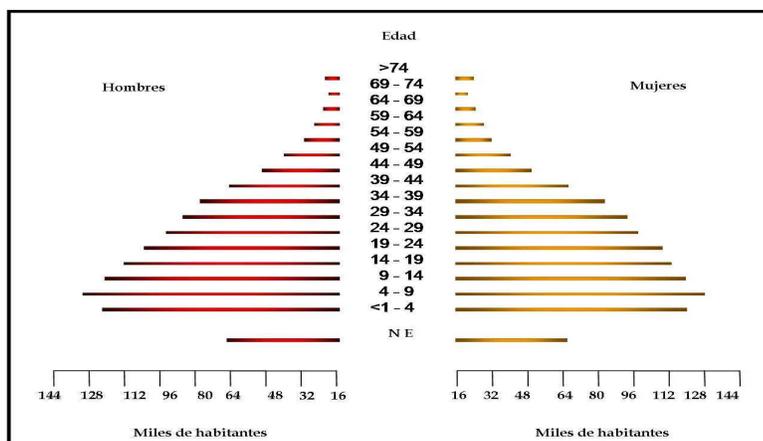


Figura 1.10. Pirámide de edad por sexo del área de estudio. Censo General de Población y Vivienda, México. INEGI (2000a).

1.4.2 Vías de comunicación

En el área de estudio hay una amplia red de carreteras que incluye cinco autopistas federales que facilitan el acceso de la población a otros municipios del Estado de México, la ciudad de México e incluso con algunos estados de la República como Puebla, Morelos, Veracruz, Guerrero y los estados del norte, sur y sureste. Las carreteras federales son las siguientes:

1. Al noroeste del área de estudio, la carretera de cuota México–Texcoco que conecta Chimalhuacán, Texcoco y Atenco con las avenidas Zaragoza y Ermita Ixtapalapa del Distrito Federal.
2. La carretera federal libre No. 136 México–Texcoco se ubica sobre la planicie aluvial-lacustre y atraviesa los municipios de Texcoco, Chicoloapan, La Paz e Ixtapaluca.
3. De oeste a este, dos autopistas cruzan los municipios Chalco Solidaridad, Ixtapaluca y Chalco de Covarrubias, así como la Sierra de Río Frío; estas son las carreteras federales México–Puebla, la libre No. 190 y la de cuota No. 150.
4. En el municipio de Chalco de Covarrubias se encuentra la carretera federal No. 115 que se conecta casi a la altura del Cerro Tlapacoya con la carretera No. 190, con dirección a Cuautla; ésta atraviesa los municipios de Cocotitlán, Tlalmanalco y Amecameca.

La comunicación terrestre entre Chicoloapan, Chimalhuacán y Chalco Solidaridad con la ciudad de México se lleva a cabo gracias a la vía los Reyes la Paz, también hay un gran número de avenidas y terracerías que conectan entre sí a los municipios. A pesar de ello, las vías de comunicación representan un grave problema porque no tienen la capacidad adecuada para permitir un flujo libre a la población por el desmedido crecimiento urbano.

1.4.3 Tipo de vivienda y servicios

La mayoría de la población habita viviendas de autoconstrucción que, de acuerdo con Kunz (2003), en un principio fueron precarias (sin techo de losa, con pisos de tierra firme o cemento y paredes de lámina y cartón), pero con el paso del tiempo las condiciones de la vivienda han mejorado en la medida en que lo han permitido las condiciones económicas, y lo ha exigido el constante crecimiento demográfico. Actualmente, la mayoría de las viviendas cuenta con paredes de tabique, block, cemento, piedra o tabicón y techos de mejor calidad con losa, pero aún se encuentran muchas viviendas con techos de lámina de asbesto, cartón o metal.

A pesar del mejoramiento de las construcciones, fácilmente se distinguen las colonias recién creadas porque las casas están construidas con materiales menos resistentes y más económicos, como adobe,

lámina de cartón y de asbesto, y tienden a estar ubicadas en el piedemonte o en la parte baja de las laderas de montañas, alejadas del centro de los poblados y de los servicios.

El crecimiento demográfico de la Cuenca de México ha aumentado en los últimos años por factores económicos, biológicos, médicos, accesibilidad a nuevos terrenos y servicios. En el área de estudio, varias oleadas de inmigrantes influyeron en el crecimiento de las poblaciones ya establecidas sobre las planicies lacustre y aluvial-lacustre. Así en 1995, había 303,097 viviendas que aumentaron un 35.57% (107,806 viviendas) para ser en el año 2000 un total de 317,303 (Figura 1.11).

Del total de viviendas (317,303) que había en el año 2000, en los 11 municipios del área de estudio, el 92% tenía agua potable, el 69% drenaje y el 99% energía eléctrica. De acuerdo con la cantidad de viviendas de cada municipio, hasta esa fecha Chicoloapan y Texcoco tenían una mayor cantidad de viviendas con los tres servicios básicos, en el caso contrario están los municipios de Chalco de Covarrubias, Chalco Solidaridad e Ixtapaluca.

Actualmente, las viviendas que cuentan con la mayor cantidad de servicios se encuentran en el centro de las poblaciones y las menos abastecidas en la periferia, donde el terreno (la parte inferior de las laderas de montaña) es más inaccesible para la infraestructura del drenaje, agua potable y el cableado para la energía eléctrica.

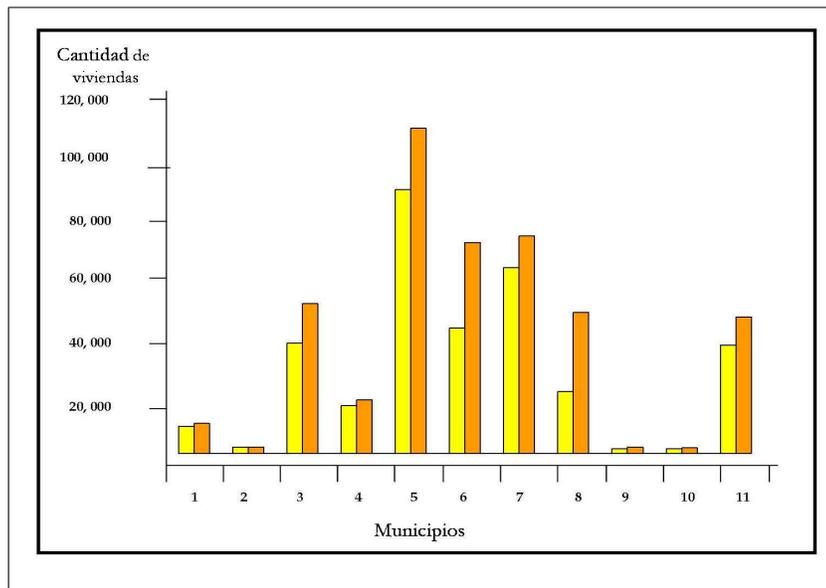


Figura 1.11. Crecimiento de la población: el color amarillo representa el número de viviendas que había en 1995 y el color anaranjado las viviendas en el año 2000. Incluye 11 municipios del Estado de México. Censo General de Población y Vivienda, México. INEGI (2000a).

En síntesis, esta información resulta indispensable para el análisis de las inundaciones, ejemplo de estos es que, los terrenos aptos para las poblaciones deben tener una pendiente mayor al 15% para evitar las inundaciones de las zonas planas y permitir que el drenaje sea profundo, con un desnivel para no obturarse; pero, también, antes de que una localidad sea habitada, debe contar con todo tipo de servicios y tener control de las redes de infraestructura de agua, luz, drenaje y vialidad.

1.4.4 Actividades económicas

Las actividades agropecuarias fueron significativas en el área de estudio, pero han perdido importancia por el proceso de urbanización y, actualmente, menos de la mitad de la población subsiste de éstas. La agricultura de riego y de temporal permiten la siembra de hortalizas, frutales, plantas medicinales y la floricultura (Figura 1.12); si bien, históricamente la siembra ha sido escasa por los altos contenidos de sales del suelo y se han sembrado siempre vegetales tolerantes a las sales como remolacha, rábano, romeros y verdolagas.

Debido a que los suelos permiten el crecimiento de pastos, la agricultura ha sido siempre subsidio del ganado vacuno, en especial cuando existía la cuenca lechera de Chalco integrada por Texcoco, Chalco e Ixtapaluca, que actualmente se ha reducido a su mínima expresión, quedando algunos ranchos con tendencia a la desaparición por la escasez de pastos y la caída del mercado forrajero; hoy, sólo quedan pocas cabezas de ganado vacuno y caprino (Figura 1.13), escasas granjas porcícolas trabajadas rudimentariamente y un número pequeño de personas que se dedican a la crianza de aves de corral para autoconsumo.



Figura 1.12. Cultivo con hortalizas en Chalco. Enero de 2005

Figura 1.13. Un rebaño de cabras en Ixtapaluca. Enero de 2005

La silvicultura, al igual que el resto del sector primario, está en declive desde que las tierras comenzaron a poblarse. Actualmente se obtiene madera de oyamel, cedro, pino, álamo, sauce llorón, pirúl y encino que se usan para la construcción de casas y muebles, pero también hay acciones de reforestación para evitar la erosión y mejorar la alimentación de los mantos freáticos.

La industria, por su parte, se ha desarrollado últimamente con la constante urbanización; en la actualidad, las industrias más importantes son las procesadoras de lácteos, le siguen en importancia la extracción de materiales para la construcción (como tepetate, arena y tezontle rojo y negro de las canteras), la fabricación de tabiques y, por último, una variedad de talleres de todo tipo, como tecnoelectromecánica, máquinas de costura, vulcanizadoras, electromecánica de radio y televisión, sastrería, reparadoras de calzado, carpinterías, herrerías, de bicicletas, de hojalatería y diversas actividades más.

Finalmente, es importante mencionar dos actividades económicas del sector terciario que también se llevan a cabo: el turismo y el comercio. En relación con la primera hay zonas arqueológicas en Tlapacoya, Ayotla, Ixtapaluca y Tlalpizahuac, zonas recreativas como el Parque Nacional Zoquiapan, Río Frío y el Parque Ejidal los Depósitos. En cuanto al comercio, este se lleva a cabo en tianguis, plazas comerciantes y tiendas de autoservicio.

Capítulo 2. Geología

2.1 Estratigrafía de la Cuenca de México

En la superficie de la Cuenca de México sólo se han reconocido rocas volcánicas y derivadas de estas, donde las más antiguas se consideran del Oligoceno. En el subsuelo se encuentran, por debajo de potentes depósitos cuaternarios volcánicos, fluviales y lacustres, formaciones neogénicas y del Cretácico. Estas últimas están expuestas en la superficie al norte (Hidalgo) y al sur (Morelos) de la Cuenca de México. En el subsuelo profundo de la cuenca fueron determinadas por medio de pozos en Texcoco en los años sesenta (Schlaepfer, 1968) y en la ciudad de México en 1986 (Vázquez y Jaimes, 1989). En ambos casos las perforaciones llegaron al sustrato cretácico. No se conoce la estructura geológica a mayor profundidad.

Las rocas más antiguas conocidas en el subsuelo de la cuenca son de origen marino, del Cretácico Inferior y Superior, las cuales corresponden con las que afloran al sur, en Morelos, y al norte en Hidalgo. Son cuatro formaciones principales: Xochicalco, Morelos, Cuautla y Mexcala; de acuerdo con Fries (1956).

La Formación Xochicalco consiste en capas alternas de caliza, calcilita y calcilimolita, con un grosor de hasta 500 m. Se le atribuye una edad de entre 121 a 112 millones de años. No se sabe qué formación se encuentra abajo, puede ser la formación Acuitlapan que se presenta en Morelos y consiste en capas delgadas de caliza y arcilla, resultado de una intensa erosión en tierra firme.

La Formación Morelos consiste en capas masivas de calizas y dolomías de 400 a 800 m de grosor. Se originó en una plataforma marina. Aflora al sur de la Sierra Chichinautzin cerca de Cuautla y Cuernavaca, Morelos, y se reconoció en el subsuelo de la ciudad de México en los pozos de PEMEX, Mixhuca-1 y Tulyehualco, a una profundidad mayor de 2,000 m. Sobreyace a la Formación Xochicalco y su edad es de entre 100 y 95 millones de años.

La Formación Cuautla está constituida por calizas y calcarenitas en estratificación gruesa, formadas en aguas marinas poco profundas, de edad entre 93 y 89 millones de años. Se encuentra a 1,575 y 2,100 m de profundidad en los pozos Mixhuca y Tulyehualco, y aflora como elevaciones montañosas de 1,500 msnm al sur de Tepoztlán, Mor., y al norte, en Zumpango, Estado de México.

La Formación Mexcala es una secuencia de capas de sedimentos de aguas someras y consiste en lutitas, areniscas y margas en alternancia, y en algunos casos, calizas (*flysch*). Representa las rocas mesozoicas más jóvenes del “basamento” de la Cuenca de México y se encuentra a una profundidad de 1,720 y 1,850 m en el pozo Mixhuca, con un grosor máximo de 1,000 m.

Al Cretácico marino siguen rocas de ambiente continental.

La Formación Balsas es un conglomerado de rocas calizas con una matriz de limolita arcillosa cementada por calcita y óxido de hierro; está cubierto por capas deleznable de arcillas, limo y arena (Mooser *et al.*, 1996). Estos depósitos tipo molassa son producto de la erosión de montañas de rocas sedimentarias cretácicas. Yace sobre la Formación Mexcala.

Las unidades litológicas a partir del Oligoceno son esencialmente volcánicas y se encuentran en el subsuelo de la cuenca y de manera aislada en localidades de la superficie (Mooser *et al.*, *op. cit.*). De acuerdo con Vázquez y Jaimes (1989) la unidad de rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano, consiste en andesitas, riolacitas, depósitos piroclásticos, tobas líticas y tobas, originadas por la actividad del Arco Magmático del Terciario Medio (que originó la Sierra Madre Occidental) y cubre discordantemente a las unidades del Cretácico y al Grupo Balsas, están cubiertas, en algunos casos, por depósitos plioceno-cuaternarios.

Los mismos autores (*op. cit.*) definen la unidad **Rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío**. Se trata de lavas y piroclastos de composición principalmente andesítica y dacítica. Se le atribuye una edad de entre 14 y 11 millones de años y aflora en los cerros Tlapacoya, El Judío, Los Remedios, El Peñón de Los Baños y en la base de la Sierra de Guadalupe. Han sido reconocidas a una profundidad de 814-920 m en el pozo Texcoco-1, a 600-633 m en el pozo Roma-1, a 190 m en el pozo Mixhuca-1 y en el pozo Copilco entre 1,180-1,580 m. Estas rocas cubren discordantemente a las del Mioceno Temprano, al Grupo Balsas y a las Formaciones del Cretácico, y están cubiertas por materiales volcánicos más recientes a excepción de la Sierra de Tepoztlán.

Del final del Mioceno consideran a la mayor parte de las rocas de las Sierras de Las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo y la Sierra Nevada-Río Frío. Son el resultado de un volcanismo de composición intermedia y ácida, sus centros de emisión fueron estructuras poligenéticas de grandes dimensiones (estratovolcanes como el Iztaccíhuatl, el Popocatepetl y el Ajusco).

Siguen los **Depósitos volcánicos del Plioceno**, consistentes en lavas y piroclastos de andesitas y dacitas, y se asocian a un segundo período de actividad del Arco Volcánico Terciario. Se les atribuye una edad de 2 a 5.3 millones de años. Sobreyacen a las rocas anteriores y están cubiertas por las rocas del Cuaternario. Estos depósitos se reconocen en los flancos de las Sierras de Las Cruces, Zempoala y Río Frío y en el subsuelo de la Cuenca de México en los pozos de PEMEX Roma-1 a 315-658 m y Copilco-1 a 1,150 m de profundidad (Ibíd.).

En el Cuaternario dominan las rocas andesítico-basálticas. Incluye parcialmente a las unidades que constituyen la Sierra de Las Cruces, el complejo del volcán Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Chichinautzin y Tarango. Las rocas más jóvenes de la Cuenca de México son volcánicas de la Formación Chichinautzin, y las volcánicas removidas, intemperizadas y erosionadas que constituyen depósitos aluviales, lacustres y proluviales.

Los Depósitos aluviales son sedimentos que han rellenado valles y depresiones, hasta formar, en algunos casos, amplias llanuras.

Los **Depósitos lacustres** son sedimentos clásticos y piroclásticos depositados en un ambiente lacustre (Vázquez y Jaimes, op. cit.). El grosor aumenta del centro de la cuenca hacia las márgenes y de sur a norte; en la ciudad de Pachuca, Hidalgo, se tienen aproximadamente 30 m de espesor, al centro de la cuenca alcanzan unos 200 m y al sur, en las cercanías de la Sierra Chichinautzin, 600 m.

2. 2 Rasgos estructurales de la Cuenca de México

La provincia del SVTM se considera que debe su origen a la subducción de la Placa de Cocos bajo el continente y la diferencia entre las alineaciones de ambas estructuras se ha explicado por el hundimiento de la Placa de Cocos con diferente inclinación, lo que hace que el volcanismo en vez de ser paralelo a la costa y presentarse entre Jalisco y Chiapas, sea transversal al continente, desde Nayarit y Colima hasta Veracruz.

Los estudios de De Cserna *et al.* (1988), muestran numerosas fallas en lo que se considera el basamento de la Cuenca de México (Figura 2.1). Esto ocurre, según Mooser *et al.* (1996), debido a que las zonas de vulcanismo son también zonas de fracturamiento de tipo tensional; así, debido a que el área de estudio es parte de la Cuenca de México, tiene la influencia de los siguientes sistemas de fallas y fracturas:

1. *Fracturamientos en forma de "Z" alargada.* Se desprenden del Arco Tarasco y avanzan del centro de la fosa de Acambay hacia el SSE. Resultaron de la interacción entre las fracturas del Arco Tarasco, del Plio-Pleistoceno, y el sistema de fallas profundas del Oligoceno. Debido al vulcanismo que ocasionaron se formaron los grandes estrato y escudo-volcanes que, por superposición continua, construyeron los edificios de las Sierras Mayores (de Las Cruces y Nevada-Río Frío) así como el volcán La Malinche (Figura 2.2) (Mooser *et al.*, op. cit.).

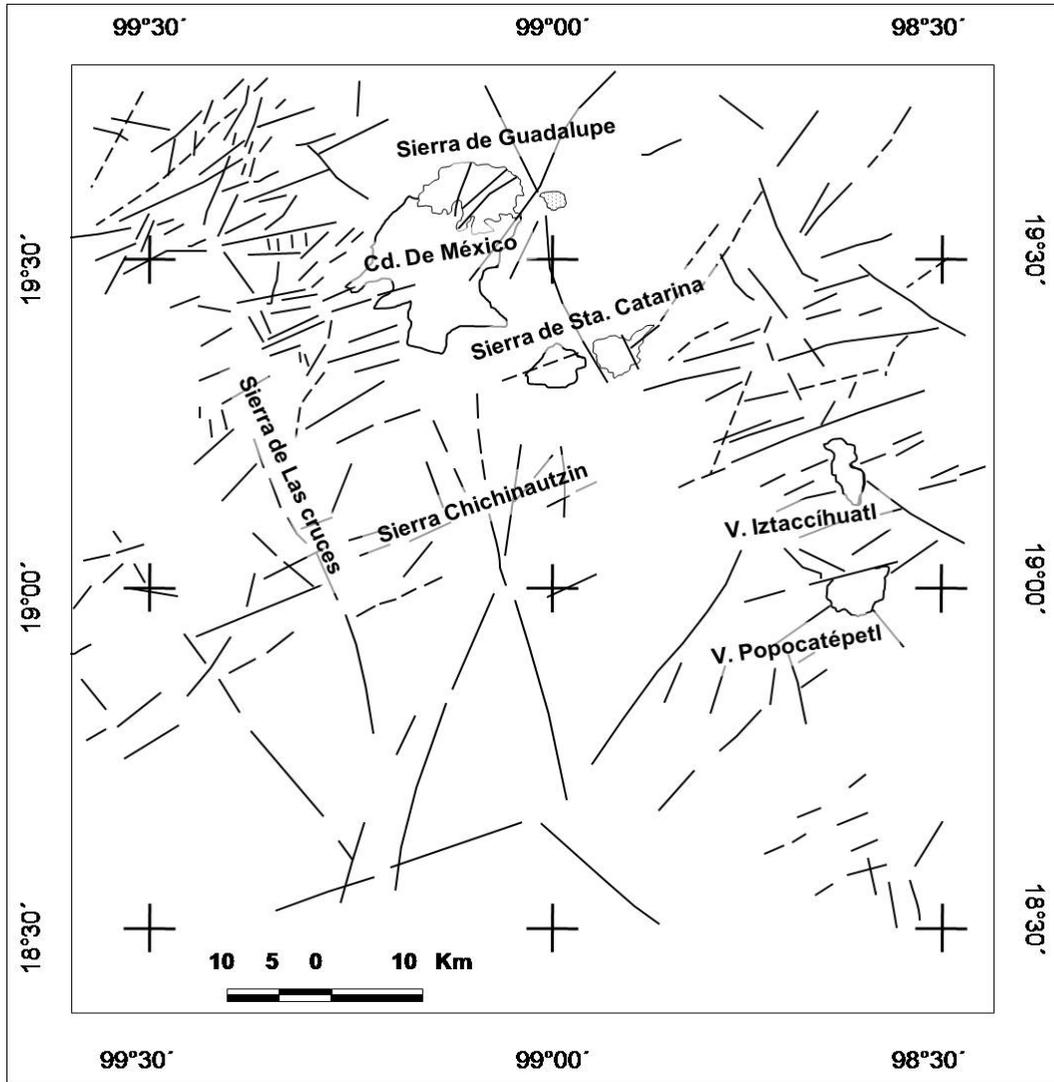


Figura 2.1. Lineamientos principales en la región circundante a la Cuenca de México. Tomado de De Cserna *et al.* (1988).

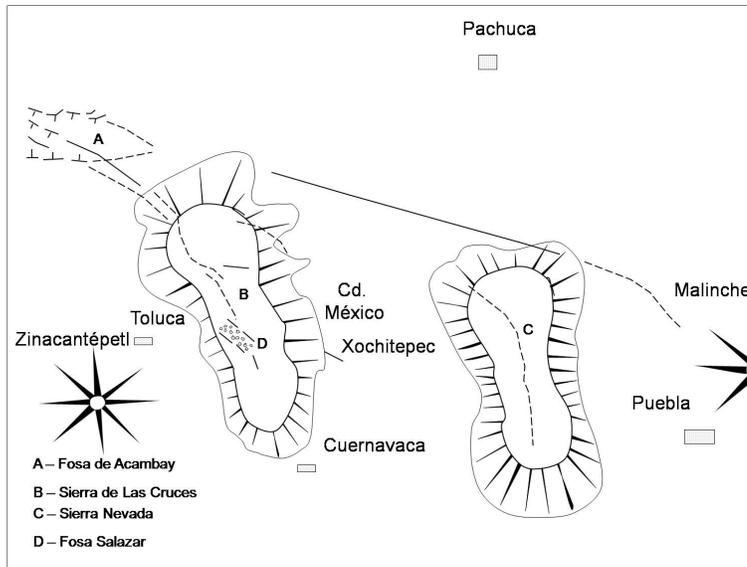


Figura 2.2. Ubicación de los fracturamientos en "Z" alargada. Tomado de Mooser *et al.* (1996).

2. *Fracturamientos al NNE*. Es un grupo de fallas, fracturas y fosas que mantienen un rumbo al NNE, que Mooser (1961 y 1975 en Mooser *et al.*, 1996) había nombrado, anteriormente, como fracturamientos Tláloc-Apan y se presentan en la cima del Cerro Tláloc en la Sierra de Río Frío (Figura 2.3).

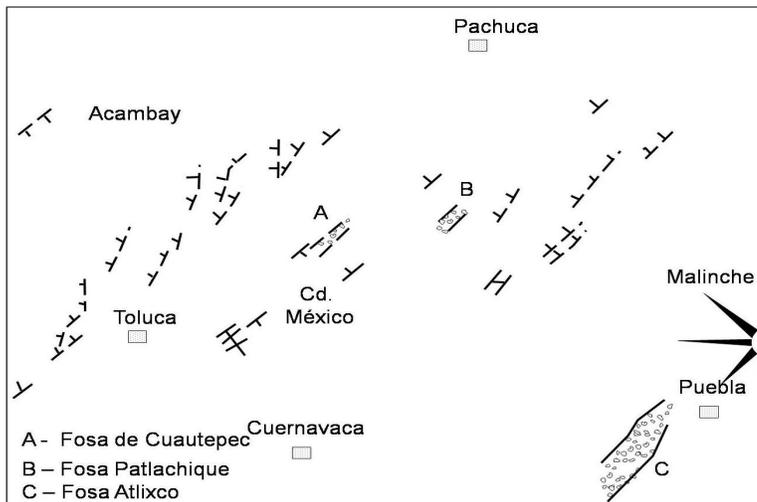


Figura 2.3. Fracturamientos al NNE. Tomado de Mooser *et al.* (1996).

3. *Arco Chichinautzin*. Se localiza en la subcuenca de Chalco y de acuerdo con Mooser *et al.* (Ibid.) son los fracturamientos típicos del sur de la Cuenca de México; fueron definidos como fracturamientos Santa Catarina, debido a que en esta Sierra hay volcanes de fisura que los caracteriza mejor y controlan los grandes volcanes del centro del país

(Zinacantépetl, Popocatépetl, Iztaccíhuatl y La Malinche). De acuerdo con De Cserna *et al.* (1988), controlan, también, los conos volcánicos monogenéticos cuaternarios de la subcuenca de Chalco como Chimalhuacán, la cadena de volcanes que integran a la Sierra de Santa Catarina y los cerros Cocotitlán y Xico (Figura 2.4).

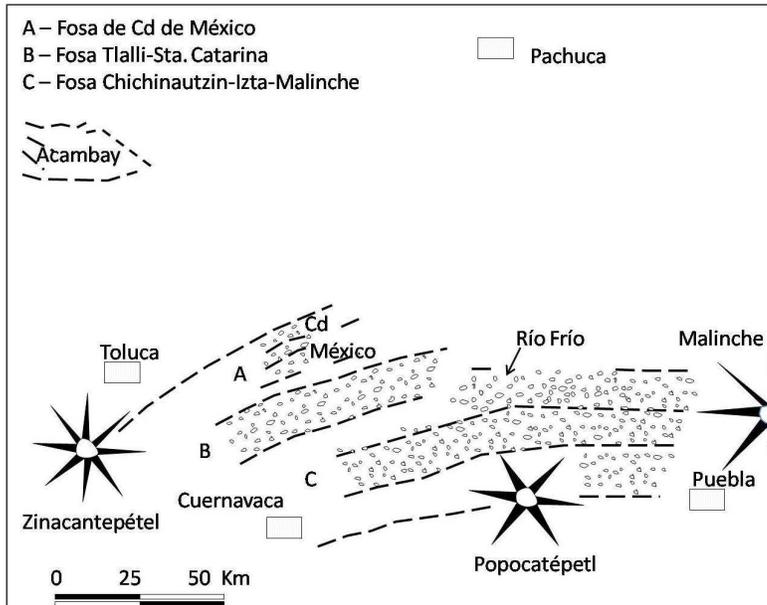


Figura 2.4. Fracturamientos Chichinautzin. Tomado de Mooser *et al.* (1996).

La importancia de estos fracturamientos en el área de estudio, es que han influido tanto en la formación de fosas tectónicas como en el origen de varios conos volcánicos; según Mooser (en Garay, 1974), durante el Cuaternario se desarrolló un graben al sur de la Cuenca de México con orientación ENE-WSW (que no tiene expresión en el relieve), resultado de dos fallas en las que más tarde los volcanes se agruparon en dos alineamientos principales (Figura 2.5):

1. *Chimalhuacán-Peñón del Marqués-Cerro de la Estrella*. Este sistema se integra por tres fallas inferidas: la primera tiene una orientación de 50° NE y está asociada con actividad sísmica reciente, por lo que se puede considerar activa; de acuerdo con Garay (Ibid.) y De Cserna *et al.* (1988), sobre esta falla se encuentran los cerros de Chimalhuacán y San Nicolás (cono más occidental de la Sierra de Santa Catarina). La segunda falla presenta una orientación de 45° NE, y sobre ella, se encuentran los conos gemelos que forman el Cerro de Santa Catarina. El tercer alineamiento es paralelo al primero, se dirige a Topilejo y atraviesa los cerros Peñón del Marqués y La Estrella (Ibid.).

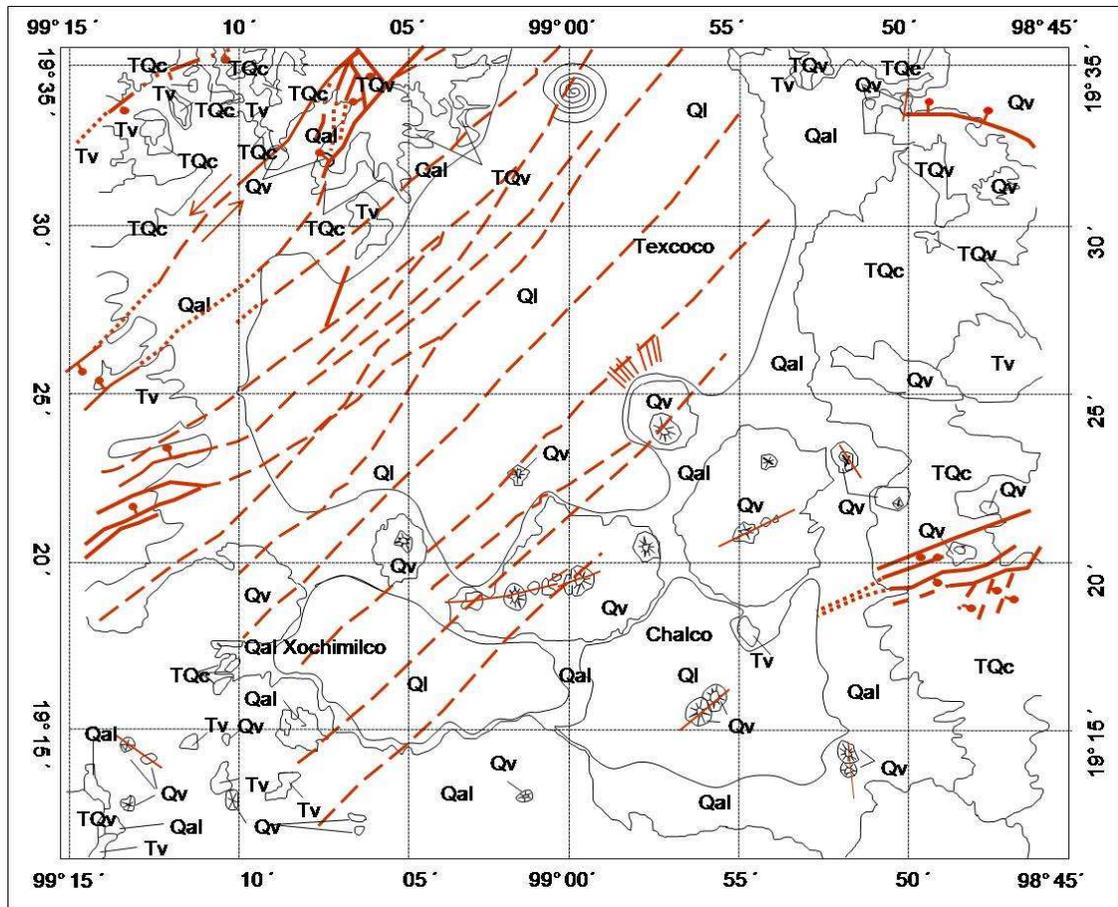


Figura 2.5. Alineamientos de la Cuenca de México. Modificado de De Cserna *et al.* (1988).

2. *El Pino-El Tejolote-Santa Catarina*. Sobre este sistema se encuentran los volcanes El Pino, El Tejolote, Tecuatzin, Mazatepec, Xaltepec, Tetecón, Santa Catarina y San Lorenzo. Se integra por dos fallas: una tiene una orientación de 75-80° NE, sobre la que se encuentran los siete conos de la Sierra de Santa Catarina, y la otra está ubicada sobre el conjunto volcánico El Pino, al SW de Coatepec, su orientación es de 65° NE y sobre ella se encuentran el volcán El Pino y dos de sus tres conos adventicios (Ibidem.).

Además de éstos dos alineamientos existen fracturas secundarias perpendiculares a las principales, a lo largo de las cuales se han formado volcanes con dos cráteres, como La Estrella, Chimalhuacán, La Caldera y Tlapacoya. Una de estas fracturas, cuya orientación es NE-SW, está relacionada con el cerro El Tejolote, y dio origen a los volcanes Tlapacoya y Xico (Garay, 1974). Este último se localiza al oeste de Chalco, y de acuerdo con De Cserna *et al.* (1988), sus dos conos acusan una orientación de esfuerzos tectónicos de 50° NE. Otras dos fracturas secundarias de la subcuenca de Chalco son el alineamiento de los dos conos que forman el cerro Cuetlapanca, ubicado al oeste de Coatepec, con una orientación de 35° NW y el alineamiento de los dos conos del cerro Cocotitlán, al sureste de Chalco, con una orientación de 5° NW (Cserna *et al.*, op. cit.).

La figura 2.5 muestra el inventario de los alineamientos de la Cuenca de México realizado por De Cserna *et al.* (Ibíd.) con base en el análisis de imágenes de satélite Landsat a escala 1:500,000, datos geológicos estructurales de mapas publicados y diferentes mapas topográficos.

2.3 Evolución geológica

La historia geológica de la Cuenca de México y zonas contiguas se ha interpretado a partir de la información que proporcionan las formaciones que de manera breve se explicaron en las páginas anteriores.

A inicios del Cretácico el territorio mexicano actual es prácticamente inexistente. Entre el sur de Norteamérica y Suramérica se disponía el océano.

A los depósitos de las formaciones Acuitlapán y Xochicalco, siguieron los de la Formación Morelos en el Cretácico Temprano y parte del Tardío, ampliamente expuestos en las sierras Madre Oriental y Madre del Sur. Constituyen las montañas mayores formadas de rocas sedimentarias plegadas. Representan una etapa de acumulación en un mar en expansión.

En el Cretácico Tardío se invirtió el régimen de acumulación-hundimiento y pasó a otro de acumulación en un ambiente de inestabilidad tectónica, lo que se reconoce en los sedimentos tipo *flysch* de la Formación Mexcala. Representan el fin del régimen marino, la transición a la orogenia. Al final del Cretácico, el mar correspondiente al territorio mexicano actual, se había convertido en tierra firme y continuó el ascenso del relieve terrestre constituido de rocas sedimentarias marinas.

El Eoceno es la época principal de formación de las montañas de las sierras Madre Oriental y del Sur. Testigo de esto es la Formación tipo molassa Balsas, expresión de una intensa erosión que favoreció los depósitos fluviales en valles extensos y sus desembocaduras.

Los movimientos tectónicos continuaron en el Oligoceno, lo que se reconoce en el basculamiento del conglomerado de la Formación Balsas, y en el volcanismo tipo ácido que se produjo en el territorio mexicano, desde el extremo noroccidental hasta el norte del estado de Guerrero, debido al choque de la placa oceánica Farallón con el continente. Se formaron algunas unidades volcánicas de la Cuenca de México y representan las rocas más antiguas conocidas en la superficie de la misma.

Durante el Mioceno continuó la actividad volcánica, sepultando a rocas anteriores, en especial en la actual provincia del SVTM. En el Plioceno y Cuaternario se formó la provincia mencionada, por una intensa actividad, aproximadamente entre los paralelos 19° y 21°, misma que continuó cubriendo grandes extensiones de rocas sedimentarias marinas mesozoicas y otras más jóvenes. Es la época de formación del relieve actual, de los últimos 2 millones de años.

En el Cuaternario y particularmente, el Pleistoceno Tardío-Holoceno se constituye el conjunto monogénético Chichinautzin, que de acuerdo con Fries (1960), cubre discordantemente desde las unidades cretácicas (sedimentos marinos plegados) hasta cuaternarias (sedimentos lacustres) y es responsable de la obstrucción del antiguo drenaje hacia el sur, como resultado de la edificación de más de un centenar de conos, derrames lávicos y material piroclástico que acumulado alcanzó un espesor de 1,800 m. El derrame más reciente de ésta formación es el del volcán Xitle hace aproximadamente 2,000 años.

2.4 Geología de la zona estudiada

Varios conjuntos de rocas volcánicas se presentan en los límites del lago de Chalco. Debido a que la información estratigráfica del área de estudio es escasa, fue necesario recurrir a los estudios estratigráficos del subsuelo de la ciudad de México. Se describe a continuación la reconstrucción estratigráfica (tabla 2.1) obtenida a partir de los trabajos de Bellia *et al.* (1992), Mooser (1986), Mooser *et al.* (1996), Schlaepfer (1968) y Vázquez y Jaimes (1989).

Mioceno-Plioceno

Estas rocas siguen una secuencia de tobas y brechas volcánicas interestratificadas con lavas andesíticas y dacíticas (Vázquez y Jaimes, 1989). Constituyen el cerro El Elefante (o Tlapacoya) y se encontraron en el pozo Texcoco-1 a 814 y 920 m de profundidad. En apariencia, pertenecen a la Formación Tepoztlán.

Límite entre Plioceno y Pleistoceno

En el Plioceno Tardío se formaron las Sierras Mayores que delimitan la Cuenca de México, y en el Pleistoceno alcanzaron su máximo desarrollo. Estos elementos descansan sobre los depósitos lacustres pliocénicos y algunos conos de las Sierras Menores. Al suroeste del área de estudio quedó constituida la Sierra Nevada.

Rocas volcánicas del Cuaternario

Posteriormente a las publicaciones de Fries (1956) y Schlaepfer (op. cit.), Vázquez y Jaimes (op. cit.) propusieron otras unidades litológicas.

La Formación Llano Grande está constituida por intercalaciones de pómez soldadas, depósitos de oleadas piroclásticas (*surges*), depósitos de flujos de ceniza, brechas, coladas lávicas y domos de composición andesítica a dacítica. Estas rocas afloran en el centro-occidental de la subcuenca de Chalco.

La Formación El Pino es un conjunto de rocas volcánicas que cubre discordantemente a otras del Oligoceno, Mioceno, Plioceno y la formación Llano Grande, del Pleistoceno Temprano. Está cubierta por las formaciones Chichinautzin y Telapón. Mooser (1986) le asigna una edad entre 0.9 y 0.7 millones de años, y está constituida de coladas lávicas de composición basáltica, andesítica y traquítica, con intercalaciones de ceniza, lapilli y escoria soldada que formaron los volcanes Chimalhuacán, La Estrella, El Pino, Peñón del Marqués, Chiconautla y Gordo, así como los campos volcánicos de Tezontepec-Ozumba y la Traquita Guajolote del distrito minero de Hidalgo.

En el área de estudio esta formación aflora al norte del volcán El Pino (Figura 2.6), en el Cocotitlán (Figura 2.7) y en los cerros Santa Cruz y Tezoyo, con expresión de conos cineríticos terminales, volcanes escudo y amplias coladas lávicas.



Figura 2.6. Conjunto volcánico El Pino constituido por los volcanes El Pino (a), El Tejolote Chico (b) y El Tejolote Grande (c).



Figura 2.7. Cono volcánico Cocotitlán, parte de la Formación El Pino, se ubica en la porción sureste de la planicie lacustre de Chalco.

La Formación Tláloc fue definida por Schlaepfer (1968) para referirse a las coladas lávicas de composición andesítica y dacítica que forman parte de la Sierra de Río Frío (Figura 2.8); toda la estructura se caracteriza por presencia de pómez en su base y líticos angulosos de tamaño de lapilli, con un espesor aproximado de un metro y con gradación inversa que implica erupción pliniana de caída.

La Formación Telapón se constituye de derrames de lava de composición andesítica y dacítica que forman al volcán del mismo nombre (Figura 2.8) y se extienden sobre una parte de la Sierra de Río Frío, hasta el piedemonte, donde son cubiertas por depósitos aluviales y piroclásticos. Sobreyace a las formaciones anteriores y la cubren las formaciones Popocatepetl, Chichinautzin y los depósitos lacustres y aluviales.

La Formación Popocatepetl fue nombrada por Fries (1965) e incluyó los derrames lávicos del Popocatepetl. De acuerdo con Schlaepfer (op. cit.) se constituye por piroclastos y brechas, recubiertas por alternancias de lavas, pómez, flujos de cenizas, piroclastos soldados y depósitos de oleada piroclástica (*surges*) recientes que forman el cráter actual del estratovolcán; se le atribuye una edad Plio-Pleistoceno.



Figura 2.8. Cruce de las carreteras México-Puebla y Chalco-Acuautla. Muestra la ladera occidental de la Sierra de Río Frío donde se aprecian los volcanes Tláloc (a) y Telapón (b).

La Formación Chichinautzin es una secuencia de coladas lávicas andesíticas y basálticas, alternadas con material piroclástico que constituyen numerosos conos volcánicos. Se extiende al sur de la Cuenca de México, al oriente hacia el Estado de Puebla y al oeste hacia Toluca; incluye a la Sierra de Santa Catarina y al cráter freático magmático Xico en la planicie lacustre de Chalco (Ibíd.).

Los sedimentos lacustres provienen principalmente de piroclastos producidos por la actividad volcánica del Popocatepetl y de la unidad Chichinautzin, que al depositarse en los antiguos lagos de Chalco y Texcoco originaron suelos arcillosos blandos. La existencia de lagos se debió a condiciones climáticas frías y húmedas generadas por las glaciaciones; al entrar en el período interglacial actual las condiciones climáticas cambiaron, la temperatura aumentó y disminuyó la humedad, se interrumpió el proceso de depósito, descendió el nivel de los lagos e incluso se formaron capas de arcilla endurecidas por deshidratación o secado solar. Debido a estas transgresiones climáticas, Santoyo *et al.* (2005) sugieren sólo llamar a estos materiales “sedimentos de lago” para los de tiempos geológicos con condiciones climáticas propicias para la existencia de un lago, y sedimentos lacustres en su ausencia.

Estos sedimentos se encuentran en la planicie lacustre (los lechos de los exlagos de Chalco y Texcoco). Por sus características plásticas (composición arcillosa) estos sedimentos se encuentran actualmente en un proceso constante de consolidación por las siguientes causas:

- *Natural*. Por compactación por peso, excepto en las capas que se preconsolidaron por deshidratación o secado solar. Debido a que Texcoco no sufrió etapas de sequía, y por tener mayor cantidad de sales, las arcillas son más blandas y compresibles que en el resto de la cuenca, esto aumenta la probabilidad de que los hundimientos sean más intensos.
- *Inducida*. Debido a la apertura de tajos y túneles del drenaje, y a la extracción de agua subterránea para abasto de viviendas y mantenimiento de zonas agrícolas, acciones que han influido en el abatimiento del nivel freático, así como en la consolidación constante de las arcillas, condiciones que aumentan la peligrosidad por hundimiento en el área de estudio.

Los depósitos aluviales son recientes, poco consolidados (grava, arena, limos y arcillas con contenido local de turba, loess, travertino, sedimentos lacustres y depósitos volcánicos cuaternarios) acumulados en valles, barrancos o planicies por acción fluvial o deluvial. En el área de estudio, estos depósitos descansan en discordancia sobre depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno y depósitos lacustres. Forman la llanura aluvial en la base de las Sierras de Río Frío, Santa Catarina y el Complejo volcánico El Pino. Es casi nula al pie de la Sierra de Chichinautzin.

En el subsuelo tienen gran extensión y rellenan amplios valles socavados en depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno, así como el graben de Chalco. Su espesor es mayor a 500 m en el centro de la subcuenca y se adelgaza hacia las márgenes de la llanura (Santoyo *et al.*, op. cit.).

Los depósitos de transición son materiales aluviales y lacustres que de acuerdo con Mooser *et al.* (1986), forman una franja intermedia entre los suelos lacustres y las sierras que rodean las planicies de Chalco y Texcoco, o los aparatos volcánicos que sobresalen en la zona del lago. Como el lago central no fue profundo, los arroyos que bajaban por las barrancas y desembocaban en la planicie, formaron deltas poco extensos que se introdujeron en el cuerpo lacustre, y consecuentemente los depósitos fluviales y aluviales se acumularon en la ruptura de pendiente, intercalándose localmente con las series arcillosas. Estos depósitos (Figura 2.9) se presentan de manera interestratificada o abrupta.

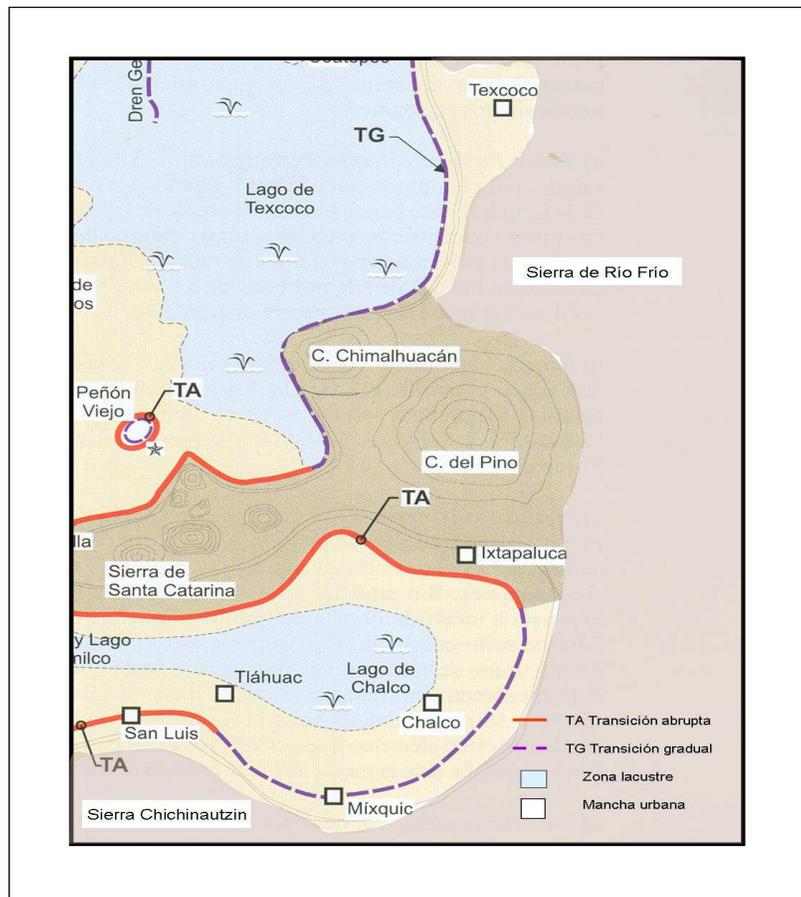


Figura 2.9. Distribución de los depósitos de transición en el área de estudio. Modificado de Santoyo *et al.* (2005).

- *Transición interestratificada o gradual.* Es una zona que se forma en la desembocadura de barrancos por la acumulación de aluvión que forma abanicos que se extienden hacia los antiguos lagos de Chalco y Texcoco, por lo que se intercalan las arcillas lacustres con arenas y gravas de río.
- *Transición abrupta.* Es una zona donde las arcillas lacustres están en contacto directo con la roca volcánica; se encuentra en la base de los volcanes que sobresalen de la planicie lacustre de Chalco, como Xico, Tlapacoya y Cocotitlán. La estratigrafía típica de estas zonas se integra por la serie arcillosa lacustre, interrumpida por numerosas lentes duras de materiales erosionados de los cerros vecinos (Santoyo *et al.*, 2005).

Con base en los datos de INEGI (1985c y 1985h) y Mooser *et al.* (1996) se realizó el mapa geológico (Figura 2.10) del área de estudio.

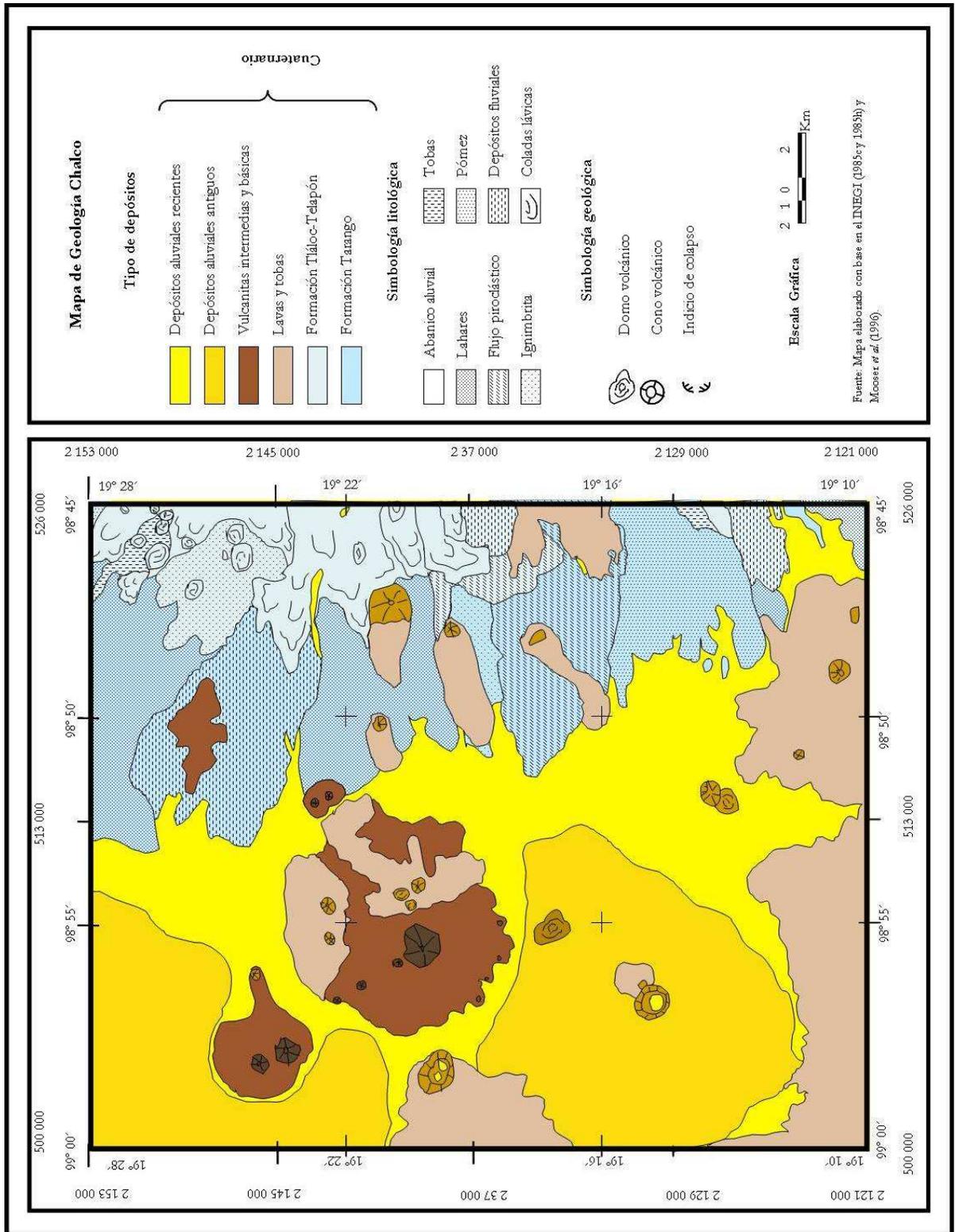


Figura 2.1. Geología del área de estudio

2.5 Geohidrología de la subcuenca de Chalco

La reconstrucción geológica del subsuelo se realizó a partir de la correlación entre los datos estratigráficos del pozo Tulyehualco-1, de PEMEX (1986 en SARH, 1986), ubicado entre Milpa Alta y Tláhuac, al oeste de Chalco, con una profundidad de 300 m, y el pozo Tláhuac-3, de la Dirección General de Obras Hidráulicas (1964 en SARH, op. cit.), de 1,207 m de profundidad, y se determinó la presencia de un paquete de sedimentos con un espesor variable, mayor a 400 m (Bellia *et al.*, 1992).

Entre éstos depósitos, los que tienen mayor distribución en la subcuenca de Chalco son los sedimentos lacustres (de baja permeabilidad) que están, generalmente, saturados de agua con alto contenido de sales y llegan a estar intercalados en las planicies aluvial-lacustre y aluvial con material piroclástico de grueso a fino y coladas lávicas de decenas de metros, por ello adquieren una permeabilidad variable (Santoyo *et al.*, 2005). Esta característica ha generado distintos suelos en la zona lacustre que, con base en el modelo estratigráfico de Marsal y Mazari (1959, en Santoyo *et al.*, 2005) se integran por las siguientes unidades:

La costra superficial. Es una cubierta de material heterogéneo que puede incluir sedimentos eólicos, lacustres y restos de construcción y llega a alcanzar de 1 a 7 m de profundidad. Es prácticamente inexistente en el centro y las orillas de las planicies de Chalco y Texcoco.

La formación arcillosa superior. Se compone por arcillas y tiene un espesor variable entre 25 y 50 m. De acuerdo con su origen geológico, los efectos de la consolidación inducida por sobrecargas superficiales y la extracción de agua, las arcillas se pueden encontrar en cuatro estados: a) preconsolidadas, por secado solar, ascenso capilar, sobrecargas externas y rellenos; b) normalmente consolidadas; c) consolidadas, debido al bombeo excesivo para abastecimiento de agua para la ciudad, que ha generado la consolidación más significativa del cuerpo lacustre, y d) lentes duros, estratos de arcilla interrumpidos o intercalados por lentes duros que pueden ser costras de secado solar, arena basáltica o vidrio pómez.

La capa dura. Es una estructura de limos arenosos con arcillas y gravas que separa las formaciones arcillosas superior e inferior. Su variabilidad en espesor y resistencia se debe a que en las épocas de mayor sequía, las zonas centrales del lago de Texcoco (las más bajas) se expusieron parcial o intermitentemente a los rayos solares; mientras que la exposición de las orillas durante estos períodos fue total. Como resultado de esto, el espesor de la capa dura y su resistencia disminuye

gradualmente del centro de la Cuenca de México hacia las planicies de Xochimilco, Chalco y Texcoco.

La formación arcillosa inferior. Es una secuencia de estratos de arcilla separados por lentes duros, similar a la serie arcillosa superior. Su espesor es de unos 15 m al centro del lago y prácticamente desaparece en las orillas.

Los depósitos profundos. Es una serie de arenas y gravas aluviales limosas, cementadas con arcillas duras y carbonatos de calcio. Tiene un espesor de 1 a 5 m.

En lo referente a las características subterráneas de la subcuenca de Chalco, tienen gran importancia las Sierras Chichinautzin y Santa Catarina como receptores de agua pluvial y transmisores de agua subterránea, debido a que están constituidas por basaltos muy fracturados que les dan una permeabilidad de media a alta (SARH, 1986 y Bellia *et al.*, 1992).

El flujo hídrico subterráneo de la Sierra Chichinautzin presenta tres direcciones de descarga de las cuales dos son preferenciales, una hacia el norte (Xochimilco-Chalco) y otra hacia el sur (Cuernavaca-Cuautla); la tercera es más limitada y se dirige hacia Amecameca de Juárez (Bellia *et al.*, op. cit.). De acuerdo con el mismo autor, a partir de los principales alineamientos por dislocación tectónica, la unidad hidrogeológica Chichinautzin se divide en seis hidroestructuras secundarias caracterizadas por condiciones estratigráficas y estructurales particulares: Topilejo-Milpa Alta-Temamatla, Tenango-Amecameca-Ozumba, Valle de Cuernavaca, Tepoztlán, Yautepec y Yecapixtla. De estas, las dos que alimentan los acuíferos subterráneos de la hidroestructura de Chalco son:

Topilejo-Milpa Alta-Temamatla. Esta hidroestructura está constituida por terrenos de elevada permeabilidad que permiten la infiltración de agua pluvial que alimenta los acuíferos de la planicie lacustre-aluvial de Chalco (Ibíd.).

Tenango-Amecameca-Ozumba. Esta unidad marca la frontera entre las subcuencas de México y Amacuzac, y está constituida por material piroclástico granular de permeabilidad media a baja. En Amecameca se desarrolló un parteaguas subterráneo que determina la descarga hídrica subterránea preferencial hacia Tenango del Aire, con dirección a la subcuenca de Chalco, mientras otra descarga se realiza hacia el suroeste con dirección de Ozumba y Tepetlixpa (Ibidem.).

Capítulo 3. Geomorfología

La geomorfología es una ciencia geológico-geográfica que estudia el relieve terrestre: su estructura, origen, historia de desarrollo y dinámica actual (Lugo, 1989); por ello, en este capítulo el objetivo principal es clasificar las formas del relieve a partir de su origen y rasgos cualitativos (morfogénesis), su dinámica (morfodinámica) y sus características cuantitativas (morfometría), para realizar el mapa de unidades geomorfológicas y, posteriormente, el mapa de peligros.

3.1 Morfogénesis y morfodinámica

Lugo (1984) menciona que, la morfogénesis estudia el origen y evolución de las formas del relieve debidas a procesos endógenos (volcanismo y tectonismo) y exógenos (íntemperismo, erosión-transporte y acumulación). En lo referente a la morfodinámica, señala que, ésta examina la interacción de los procesos formadores del relieve con aquellos encargados de modelarlo y nivelarlo. De este modo, lo primero que se hará a continuación, es una explicación de las geoformas del área de estudio.

3.1.1 Relieve endógeno

Es el conjunto de formas del relieve constituidas por los procesos endógenos (tectonismo, magmatismo (intrusivo y extrusivo o volcanismo), metamórficos e hidrotermales) que son controlados por la energía interna de la Tierra, la fuerza de gravedad y la rotación terrestre (Lugo, 1989). Aquí conviene señalar que las geoformas predominantes en el área de estudio se deben a procesos volcánicos, los cuales se subdividen del modo siguiente:

1. Volcánico acumulativo

Incluye las formas que se originan por depósitos de lavas y piroclastos y no han sido modificados de manera sustancial por la erosión. De acuerdo con el tipo de proceso volcánico que las origina, constituyen relieves volcánicos de tipo explosivo, efusivo, extrusivo y combinación de éstos.

a. *Volcánico explosivo.*

El origen de estos relieves, Sheldon *et al.* (1999) lo explican de la siguiente manera: a medida que el magma se acerca a la superficie el agua se separa y escapa en forma de vapor, pero, si el conducto volcánico está obstruido, el vapor se acumula y la presión aumenta hasta que no puede ser contenida y, entonces, se produce una explosión. De este modo, los autores añaden que, si la temperatura es de 980 °C, el vapor aumenta su fuerza expansiva y destruye el tapón de lava, lo

que origina que el volcán arroje magma y gases junto con un gran volumen de piroclastos que al caer constituyen geoformas como las siguientes:

- *Conos de tefra, de escoria o cineríticos.* Estos se forman a partir de material basáltico y andesítico expulsado a través de un cráter en torno al cual se acumula una vez que cae a la superficie (*piroclastos*); por lo general, estos conos crecen rápidamente y presentan erupciones explosivas y efusivas (Scarth, 1994, cit. en Castillo, 2003); de esta forma, la sobreposición de materiales de distintos centros eruptivos ha originado volcanes sobrepuestos, cubiertos y con cráteres con distinto grado de relleno (Lugo, 1984). En el área de estudio, algunos conos de escoria se pueden distinguir fácilmente debido a su geometría casi perfecta, como el volcán Guadalupe en la Sierra de Santa Catarina ubicada al noroeste de la planicie lacustre de Chalco (Figura 3.1).



Figura 3.1. Al fondo se puede observar el cono volcánico Guadalupe, Sierra de Santa Catarina. Enero de 2007.

- *Maar.* Es un volcán pequeño generado por actividad hidromagmática, constituido por un cráter de algunos cientos de metros de diámetro y rodeado por un borde de poca altura (Macías y Capra, 2005). De acuerdo con Lugo (1996), son característicos de las planicies que poseían una rica alimentación hídrica subterránea, e incluso había lagos presentes; estas formas son comunes en Valle de Santiago, Guanajuato, así como en la cuenca de Oriental de Puebla-Veracruz, donde existen axalapazcos (cráteres de explosión que tienen un lago en el fondo) y xalapazcos (cráteres que no tienen agua) (Yarza, 1992).

En el área de estudio se encuentra el cráter freático-magmático Xico, mismo que emerge de la planicie lacustre de Chalco (Figura 3.2). De acuerdo con Yarza (op. cit.), Xico es un volcán poco elevado, constituido por tobas con una pequeña colada lávica inmediata que se fusiona con otro volcán semejante (Xico Viejo) que fue considerado por Ordóñez (1905) como relieve volcánico explosivo anterior, y al Xico, como explosivo freático.



Figura 3.2. Fotografía aérea del cráter Xico, se ubica al suroeste de Chalco en la planicie lacustre. Del lado izquierdo, se pueden observar las zonas inundables de la planicie que rodean al cráter. Tomada de www.imagenesaereasdemexico.com.

- *Flujos y oleadas piroclásticas.* Son flujos de material volcánico producidos por erupciones de tipo explosivo; están compuestos por gases volcánicos y fragmentos de rocas, pómez o escoria de dimensiones variables, desde bloques de varios metros hasta partículas de ceniza. Estos flujos viajan a velocidades elevadas por las laderas del volcán destruyendo y quemando todo a su paso. Si la concentración de los fragmentos sólidos respecto al gas dentro del mismo flujo es alta, se forman flujos piroclásticos. Si por el contrario, la cantidad de fragmentos sólidos en el flujo es menor con respecto a la cantidad de gas, se forman oleadas piroclásticas que son flujos diluidos capaces de sobrepasar obstáculos topográficos altos a velocidades elevadas. (Macías y Capra, op. cit.).

En el área de estudio los depósitos de flujo son muy comunes, en particular, en la ladera occidental de la Sierra de Río Frío. En este sentido conviene mencionar que, durante el trabajo de campo se visitaron varios puntos sobre la ladera señalada y particularmente en la loma El Epazote, al oriente de Coatepec, donde se pueden distinguir depósitos de flujos piroclásticos (Figura 3.3).

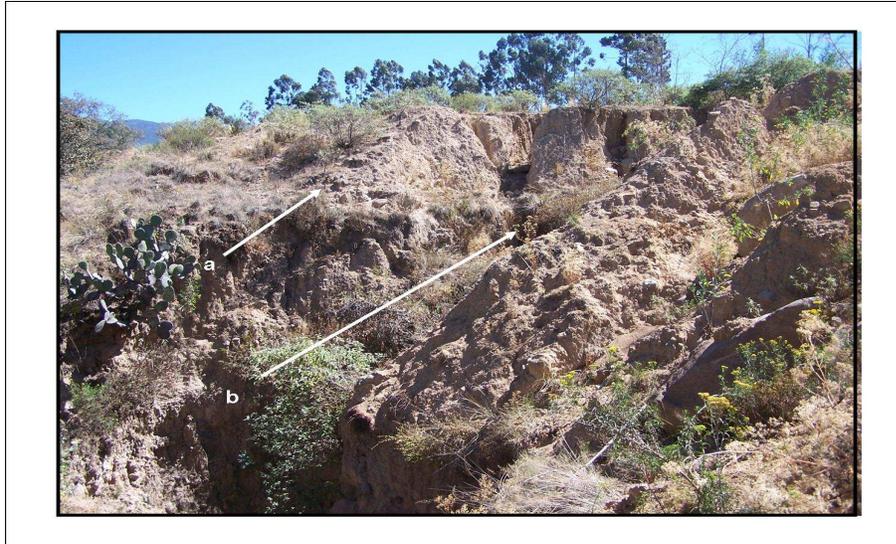


Figura 3.3. Flujo piroclástico en la loma El Epazote, sobre la ladera de la Sierra de Río Frío. Se puede apreciar su constitución de cenizas, material deleznable y de grano muy fino que tiene un espesor aproximado de 18 m (a) y los barrancos que se están formando en la ladera norte de flujo (b). Es posible que este flujo sea producto del cerro Teloxochitl ubicado al noroeste del volcán Telapón. Enero de 2007.

- b. **Volcánico efusivo.** Se origina por el escurrimiento de lava que se desborda por un centro eruptivo o fractura y origina coladas lávicas, laderas y mesas. En el área de estudio estas geoformas están limitadas al conjunto volcánico El Pino (Figuras 3.4-a y 3.4-b), y las Sierras de Santa Catarina y Chichinautzin.



Figura 3.4-a. Colada lávica en forma de mesa emitida por el cerro El Tejolote Grande, parte del complejo volcánico El Pino. Enero de 2007.



Figuras 3.4 –b. El frente de la colada lávica anterior. Enero de 2007.

3.1.2 Relieve endógeno modelado

El relieve de origen endógeno (volcánico o tectónico) es modelado por procesos exógenos en función de la litología (tipo de roca, textura, extensión en sentido horizontal y vertical) edad de las rocas, tiempo que ha permanecido a la intemperie, pendiente, condiciones climáticas, fracturas y actividad social. Debido a esto, el relieve deja de conservar su aspecto original, por lo que se le nombra volcánico erosivo; éste se subdivide a su vez en laderas montañosas volcánico-erosivas y superficies de parteaguas.

1. Volcánico erosivo

Según Lugo (1989), si el relieve volcánico acumulativo es expresión de procesos endógenos de fines del Cuaternario, el volcánico erosivo representa una etapa, no forzosamente continua, de nivelación de esas formas volcánicas. Los dos tipos de geoformas son laderas montañosas y parteaguas:

- *Laderas montañosas volcánico-erosivas.* Son laderas compuestas de coladas lávicas y piroclastos, originalmente con una pendiente de 12 °, que comienzan a ser disecadas por una densa red de barrancos (cañadas) que dejan entre sí superficies estrechas de parteaguas. En el área de estudio, la formación de barrancos en las laderas inferiores de la Sierra de Río Frío no es muy importante debido a que el relieve es muy joven y por su composición de piroclastos el agua se infiltra con facilidad y eso evita la formación de barrancos; sin embargo, donde las laderas están constituidas por coladas lávicas, como en El Pino, la Sierra de Guadalupe y los

volcanes de Río Frío (en las laderas superiores de montaña), la erosión fluvial ha generado un mayor número de barrancos de 60 y 120 metros de profundidad (Figura 3.5).

- *Superficies de parteaguas*. Son áreas estrechas de menos de 250 m, constituidas por una ladera volcánica original de lavas, piroclastos o ambos materiales, que han sido disecadas por la erosión fluvial (Lugo, 1984). En el área de estudio se aprecian en las partes elevadas de la Sierra de Río Frío (Figura 3.5).

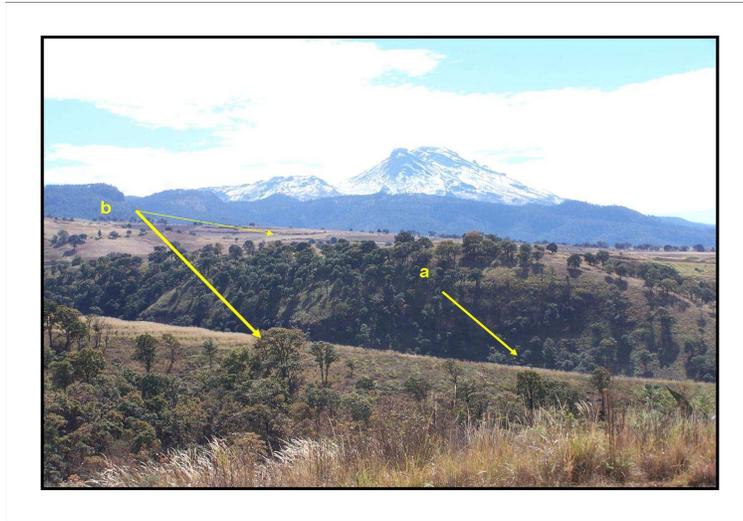


Figura 3.5. Ladera suroccidental de la Sierra de Río Frío. a) Barranco La Cañada, b) el parteaguas. Enero de 2007.

3.1.3 Relieve exógeno

Es el resultado de la acción modeladora de los procesos exógenos. Los llevan a cabo seis agentes principales (hielo, agua superficial, agua subterránea, gravedad, mar y viento). Se manifiestan por tres procesos principales: intemperismo, erosión (transporte) y acumulación, que a su vez dan lugar a dos tipos de relieve, erosivo y acumulativo.

Al sur de la Cuenca de México, los procesos exógenos, de acuerdo con Lugo (1984), no han sido continuos en el tiempo debido a que la actividad volcánica (especialmente cuaternaria) y los procesos nivales y glaciares han interrumpido la erosión y acumulación de material. Las formas más extendidas de este relieve son las planicies lacustres y formas erosivas como barrancos y cañadas.

1. Relieve erosivo (destrutivo o denudatorio)

Refleja una determinada retirada de material que genera un modelado cóncavo (Viers, 1983); en el área de estudio este relieve es de naturaleza fluvial y gravitacional.

a. Fluvial

El agua de escurrimiento superficial es el agente más común. Según Knighton (1984, en De Pedraza, 1996), su eficacia depende del flujo (régimen de caudales, velocidad y tipo de flujo), naturaleza de la litología que forma el conducto, clima, condiciones del subsuelo (percolación, sufusión y humedad), geometría del colector, actividad biológica e intervención antrópica (canalizaciones, drenajes, urbanización, represamiento, dragados, etc.). En el área de estudio se reconocen las siguientes formas erosivas fluviales:

- *Barranco*. Forma lineal negativa del relieve, estrecha, con laderas abruptas que se ramifica hacia la cabecera; si las márgenes no tienen vegetación se denota su actividad (Figura 3.6). Surge por la precipitación pluvial y nival en las laderas (Lugo, 1989). Se transforma gradualmente en un valle fluvial.



Figura 3.6. Barranco de rápido desarrollo en un depósito de flujo piroclástico (a), con la formación de una cabecera en retroceso (b) sobre la Loma El Epazote. Enero de 2007.

- *Cauce*. Corresponde a la porción más deprimida del valle, ocupada en forma temporal o permanente por el agua de escurrimiento que origina la erosión vertical. Se caracteriza por la anchura, profundidad y superficie de un río, mismas que varían en función del nivel de las aguas en el cauce (Lugo, 1989).
- *Valle fluvial*. Es la forma erosiva por excelencia de la erosión fluvial y se origina por la acción de las aguas de escurrimiento; es un terreno con fondo diverso, más o menos plano o cóncavo formado por un corredor lineal confinado a unas elevaciones (De Pedraza, 1996). De acuerdo con Lugo *et al.* (1980), debido al vulcanismo joven de la Cuenca de México, estas formas erosivas, al sur, son frecuentemente incipientes (de corta extensión, poca profundidad,

con jerarquía de primero y segundo orden), controladas por las planicies de nivel de base, el piedemonte y las elevaciones montañosas (aisladas o en conjunto) y constituyen una red de drenaje de débil desarrollo, debido a que en la Sierra de Río Frío sus laderas se componen de material no consolidado (piroclastos) que no favorece la erosión vertical; en el caso del conjunto volcánico El Pino y las Sierras de Santa Catarina y Chichinautzin, el drenaje está ausente o es incipiente debido a la litología de lavas y piroclastos muy jóvenes y de alta permeabilidad, que no facilita la erosión.

b. Gravitacional

Este tipo de relieve se produce por material que se desprende de las laderas; la forma erosiva representativa es el escarpe.

- *Circo de erosión.* Forma cóncava del relieve montañoso, a manera de semicírculo con laderas empinadas, que se origina en las cabeceras de algunas corrientes fluviales, por desprendimiento y deslizamiento (erosión remontante), y la acción erosivo-fluvial de pequeñas escorrentías que inciden en un canal principal (Lugo, 1989).
- *Escarpe.* Es una ladera abrupta que se forma debido a la separación de material rocoso por desprendimiento o caída, vuelco o desplome, deslizamiento, flujos, expansión lateral o movimientos complejos, y su origen puede ser erosivo, litológico, estructural o tectónico.

2. Relieve constructivo (acumulativo)

Es aquel que se forma a partir de la acumulación de los materiales erosionados en las zonas bajas del relieve y origina formas positivas como conos de eyecciones y mantos de derrubios (Viers, 1983).

a. Fluvial

Este tipo de relieve no tiene una expresión significativa en el área de estudio, debido a que se trata de un relieve montañoso joven que ha sido alterado constantemente por procesos volcánicos; asimismo, las formas que se reconocen son locales, están asociadas con una cuenca lacustre y son condicionadas por volcanismo y obras de ingeniería (Lugo, 1984). A continuación se describen las formas fluviales acumulativas del área de estudio.

De tipo aluvial

Estas formas son los depósitos sedimentarios de las corrientes fluviales y se encuentran en las desembocaduras de ríos donde el cambio brusco de pendiente (entre el piedemonte y la planicie de nivel de base), provoca que la corriente deposite su carga. En el área de estudio se encuentran:

- *Planicie aluvial*. Su origen se debe a la deposición constante de un río, y para que se forme es necesario que la desembocadura esté cerca del nivel de base y que el relieve sea amplio en horizonte para que el río pueda divagar y aportar una cantidad importante de detritos o aluvión. En el área de estudio constituye una franja de transición entre la planicie de nivel de base (lacustre) y el piedemonte.
- *Abanicos aluviales o conos de eyecciones*. Son acumulaciones de material detrítico mal clasificado; tienen aspecto de medio cono inclinado, con el ápice hacia arriba (Lugo, 1989). Se forman sobre una superficie plana o de poca inclinación y generalmente tienen una pendiente menor de 10°, son formas activas (especialmente con ocurrencia de lluvias torrenciales) y se sobrepone a la planicie aluvial. En el área de estudio los abanicos aluviales son pequeños y se encuentran entre el piedemonte y la planicie aluvial (Figura 3.7).

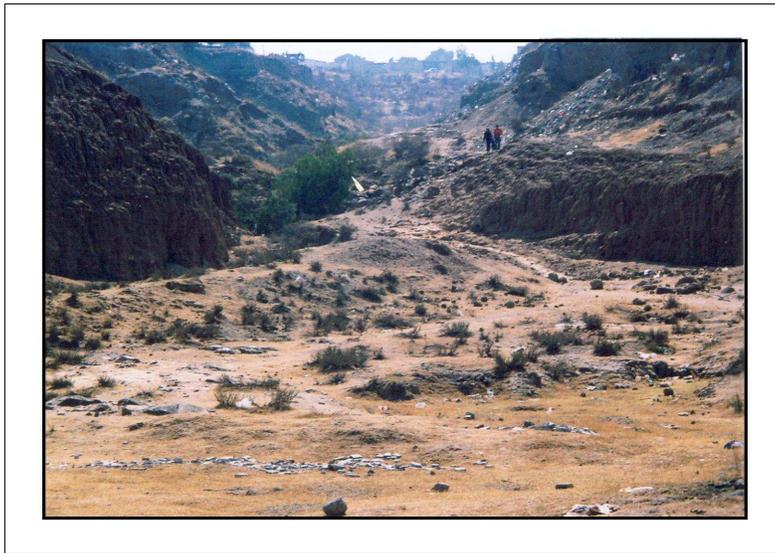


Figura 3.7. Abanico aluvial localizado al sureste de Chicoloapan en la desembocadura de un río del cerro Xolcuango. Enero de 2005.

De tipo deluvial

Son formas originadas por productos de intemperismo removidos por escurrimiento de corta extensión en las laderas. Crecen de manera frontal y tienen detritos gruesos arriba y más finos en su base. Estas formas son significativas al sur de la Cuenca de México, no tanto por intemperismo, sino por que el material volcánico sin consolidación es removido por el agua de lluvia cuando se encuentra descansando en planos de fuerte inclinación (Lugo, 1984).

- *Mantos deluviales*. Son superficies compuestas por productos del intemperismo, removidos y depositados en las laderas y al pie de las mismas como resultado de escurrimientos de origen

pluvial y nival en las laderas y por corrientes generalmente permanentes en la base (Lugo, 1989). Se reconocen al pie y en las laderas inferiores de volcanes jóvenes, como en la Sierra de Santa Catarina donde se presentan como franjas estrechas desde centenas de metros hasta 2 km (Lugo, 1984). En la loma El Epazote, se encontró un deluvión reciente (Figura 3.8), compuesto por material volcánico con bloques aún subangulosos debido a que el acarreo ha sido de poca distancia (entre el parteaguas de la loma y sus laderas) insuficiente para pulir los bloques.



Figura 3.8. El deluvión se constituye del material del lahar arrastrado por una película de agua debido a lo cual sus bloques no tienen arreglo y son subangulosos. Enero de 2007.

De tipo proluvial

Son generalmente conos de eyecciones con material mal clasificado y de débil pulimento que se originan en las desembocaduras de ríos debido a lluvias torrenciales, y al unirse dan lugar al piedemonte (Lugo, 1989). Estas formas se constituyen generalmente en el límite de dos morfologías con marcado contraste orográfico: una zona montañosa y un piedemonte o cuenca intermontana (Pedraza, 1996). En el área de estudio los conos o abanicos proluviales del frente occidental de la Sierra de Río Frío se extienden hasta la planicie lacustre de Texcoco y en su porción inferior soportan actividad agropecuaria (Lugo, 1984).

Volcánico fluvial

Se trata de material volcánico, compuesto por piroclastos, arrastrado y depositado por el agua; la característica de estos depósitos es que están constituidos por bloques angulosos que no tienen arreglo.

- *Lahares*. Son corrientes de lodo que surgen en las laderas de un volcán y contienen detritos de diversos tamaños, generalmente angulosos y de origen volcánico (Lugo, 1989). Durante el trabajo en campo, se observaron depósitos de lahar que sobreyacen a los flujos piroclásticos de la Sierra de Río Frío, especialmente, en la loma El Epazote, donde están compuestos de bloques subredondeados (Figura 3.9).

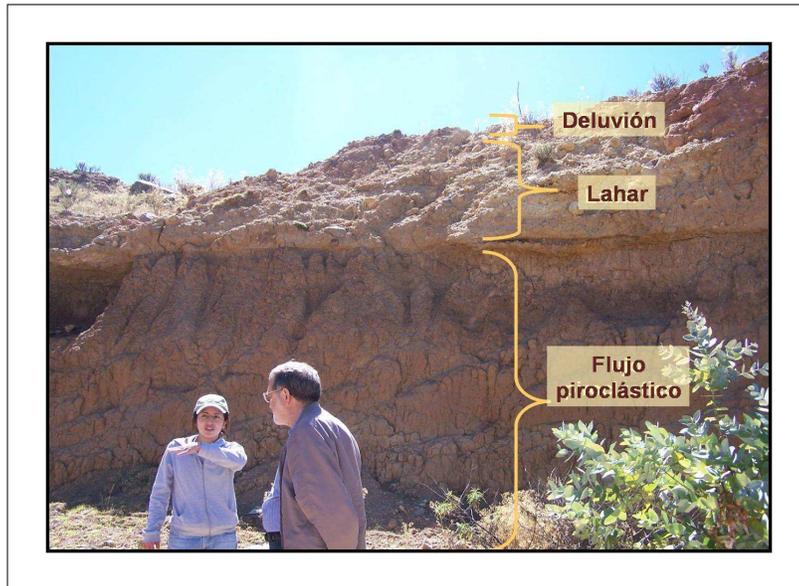


Figura 3.9. En la loma El Epazote se pueden diferenciar tres depósitos: un flujo de ceniza, un lahar compuesto por una matriz fina (de cenizas volcánicas) con bloques heterométricos subangulosos y un deluvión. Enero de 2007.

b. Gravitacional

Son formas originadas en el límite entre la planicie aluvial y las laderas de montaña a partir de la acumulación de material removido de las laderas por procesos gravitacionales (desprendimiento, deslizamiento, flujo y alud). Entre las formas resultantes están los abanicos coluviales que al unirse forman un incipiente piedemonte.

c. Lacustre

Los lagos de la Cuenca de México surgieron por la formación de la Sierra Chichinautzin que cerró el desagüe. En los lagos se depositaron sedimentos finos transportados por corrientes fluviales, el viento y arrojados por erupciones volcánicas. Al desecarse los lagos por actividad humana se formó la planicie lacustre que actualmente limita con depósitos que constituyen la planicie aluvial y el piedemonte.

3.1.4 Relieve antrópico

Este es el relieve que ha sido modificado por la actividad humana; generalmente se considera como parte del relieve exógeno, sin embargo, debido a la importancia que tiene actualmente en el mundo, y en particular en el área de estudio, se explica por separado.

- *Escarpes y abanicos artificiales.* Sobre la ladera occidental de la Sierra de Río Frío, en los depósitos de flujo piroclástico que descienden hacia la planicie lacustre de Chalco, se encuentran zonas que han sido excavadas para construir unidades habitacionales y canteras; para poder establecerlas es necesario retirar el material de las laderas para nivelar el terreno, así se han creado escarpes artificiales y formas que asemejan conos de eyección al fondo de los barrancos (Figura 3.10).

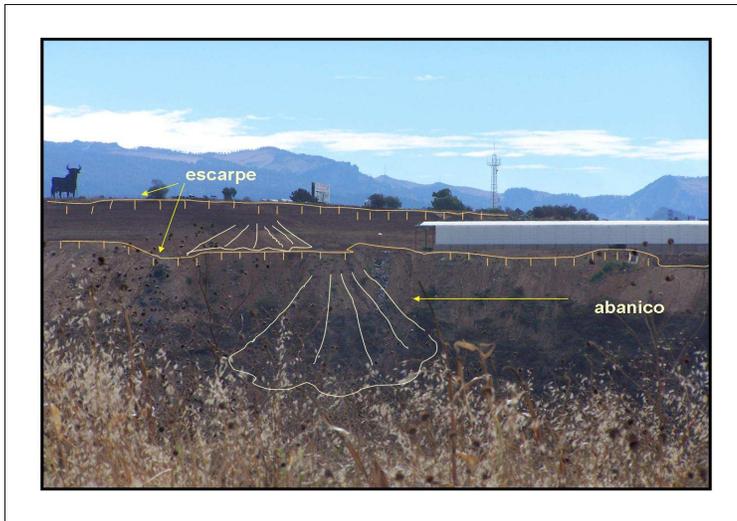


Figura 3.10. Entre las carreteras libre y de cuota México-Puebla, al sur del cerro Tezoyo, se encuentra una serie de escarpes artificiales. El material excavado se arroja a los barrancos donde adquiere una forma de un cono recostado. Enero de 2007.

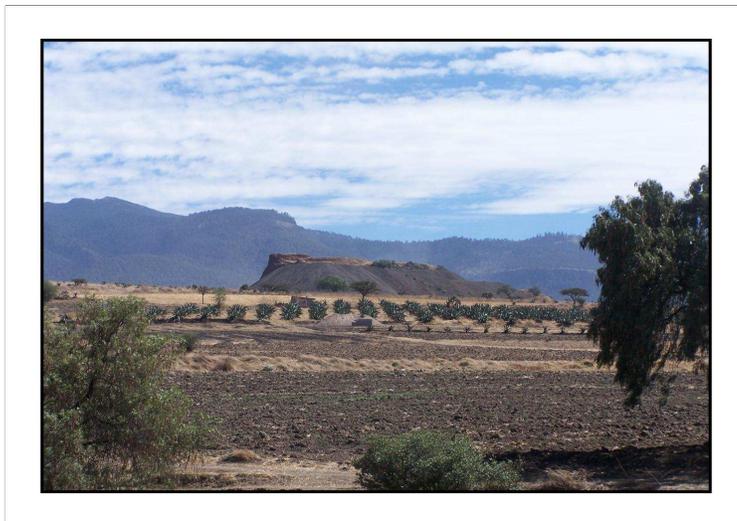


Figura 3.11. Residuo del volcán Santa Cruz. Al fondo la Sierra de Río Frío. Enero de 2007.

- *Minas a cielo abierto.* Una actividad antrópica sustancial es la extracción de material que conduce a la destrucción de muchos conos de tefra. Como ejemplo está el volcán Santa Cruz (Figura 3.11) y un cono al suroeste del cerro Chichiquil (Figura 3.12), ambos en la Sierra de Río Frío.



Figura 3.12. Este cono se ubica al noroeste del poblado Gral. Manuel Ávila Camacho, su forma cónica original se perdió por la extracción de material; al fondo se muestra la parte sur de la subcuenca de Chalco y la Sierra Chichinautzin. Enero de 2007.

- *Canales.* Además de la desecación artificial de los lagos de Texcoco y Chalco, se construyeron canales y el relleno de cauces fluviales. Las condiciones de humedad atmosférica y la alimentación hídrica en la planicie lacustre cambió y alteró el ciclo hidrológico. Actualmente se encuentran canales y acueductos en las planicies lacustres de Chalco y Texcoco, cercanos a las zonas de cultivo y a los cuerpos de agua permanentes (como el lago artificial Nabor Carrillo) y temporales (como las zonas de inundación de Chalco), así como a la mancha urbana en constante desarrollo (Figura 3.13).



Figura 3.13. Canal utilizado para la agricultura de riego en la planicie lacustre de Chalco. Febrero de 2005.

3.2 Morfometría

3.2.1 Modelo Digital del Terreno

Un Modelo Digital del Terreno (MDT) de acuerdo con Felicísimo (1994 en Sánchez, 2005), es una estructura numérica que representa la distribución espacial de la elevación de la superficie terrestre y su unidad básica de información es el valor de altitud (Z) al que acompañan los valores correspondientes de X, Y, expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referenciación espacial. Es importante mencionar que, a diferencia de los mapas convencionales que usan casi exclusivamente las curvas de nivel para representar la superficie terrestre, los MDT disponen de alternativas más variadas, desde una transposición casi directa de las isohipsas hasta otras menos habituales en la cartografía impresa pero más adaptadas al proceso digital (Ibíd.). Los MDT constituyen una representación de la superficie muy apegada a la realidad que trata de describirla a partir del conocimiento de la estructura geométrica del terreno original y las relaciones espaciales entre los datos; también, permite hacer operaciones sobre la representación numérica y estimar eventos acaecidos o no, sobre el terreno, gracias a la incorporación de datos adicionales (Ochoa, 2004).

Existen dos tipos de MDT: 1) El modelo vector, donde cada punto corresponde con los propios valores de x, y, z . 2) El modelo raster, donde cada celda o punto corresponde a un dato de altitud.

Modelo Raster

Un MDT raster tiene una malla regular que hace corresponder a cada celda georeferenciada (píxel) con un valor de cota; así el MDT raster consiste en un arreglo de cotas cuyas resolución depende del tamaño del píxel, esto es, que mientras más pequeño sea el píxel mayor será la resolución y la forma del modelo se acercará más a la forma real de superficie terrestre (Bosque, 1997 en Ochoa, 2004). Otra característica de este modelo es que tiene las mismas propiedades que una imagen, con excepción de que contiene valores altimétricos cuando la imagen registra tonos de gris, por ello está perfectamente adaptado a las herramientas utilizadas en el tratamiento de imágenes (Ochoa, op. cit.).

Generación del MDT del área de estudio

Para elaborar el MDT de la zona estudiada se adquirieron las curvas digitales del INEGI (E14B31, Chalco y E14B41, Amecameca) en formato dxf, es decir en formato vectorial, a escala 1: 50,000 con un intervalo altitudinal de 20 m. Posteriormente, con la ayuda del programa Transf._dxf_v2 (Parrot, 2005), los datos vectoriales generaron una imagen en formato raster con un tamaño de píxel de 30 m y una tabla de correspondencia entre los valores de altitud y los tonos de gris de esta imagen.

Sobre la imagen de 8 bits generada, el espacio entre las curvas de nivel esta codificado con el valor 255, lo que significa que, en esta etapa, no existe ninguna correspondencia entre este tono de gris y la altitud. El propósito de las etapas siguientes será, precisamente, el hecho de atribuir a estos últimos tonos de gris un valor de altitud a través de un proceso de interpolación.

Siguiendo el método propuesto por Parrot y Ochoa (2004), con el software *Paint Shop* versión 4, se eliminaron los puntos errados de la imagen anteriormente obtenida y, cuando fue necesario, se añadieron puntos y se cerraron todas las curvas de nivel. Una vez limpias todas las curvas, la imagen se guardó en formato *.raw*. Consecuentemente, a estos archivos se les aplicó un tratamiento con el programa *Brod4_mx* (Parrot, 2003) para crear, a partir de la imagen 8 bits, de las curvas de nivel en tonos de gris, y de la tabla de correspondencia anteriormente mencionada, una imagen de 4 bytes de las curvas de nivel con sus valores reales de altitud embebidas en un fondo neutro (-99999) correspondiente al valor 255 de la imagen 8 bits. Esta imagen tiene la extensión *_c4.raw*. Con el programa *Miel4_mx* (Parrot, 2003) se hizo un tratamiento a la imagen *_c4.raw* consistente en una interpolación multidireccional para crear el MDT con extensión *_m4.raw* (Figura 3.14) que, por su formato en 4 bytes, el tamaño de píxel se puede medir en metros, decímetros o centímetros.

3.2.2 Atributos primarios derivados del MDT

Hipsometría

Para construir el mapa altimétrico, el MDT fue clasificado en 12 intervalos altitudinales considerando la altura máxima (>3,500 m) y la mínima (< 2,240 m), con la finalidad de cubrir todos los intervalos de valor entre estas dos altitudes (Figura 3.15). El objetivo principal de este mapa es mostrar las variaciones del relieve que permite distinguir las partes planas de las altas y escarpadas, siendo las primeras susceptibles a inundaciones, formación de grietas y hundimientos y, las segundas, a presentar procesos de remoción en masa. Las mayores altitudes se encuentran localizadas en la Sierra de Río Frío y las menores en las planicies lacustres de Chalco y Texcoco. De acuerdo con Ochoa (*op. cit.*) es importante mencionar que el mapa altitudinal sobrepuesto en un MDT sombreado no sirve para hacer cálculos ya que solo es una representación visual.

Pendiente

La pendiente de una superficie se puede definir como el ángulo entre ésta y el plano horizontal. El valor de la pendiente se calcula a partir del valor de la normal de la superficie y de la normal a un plano horizontal. Por otro lado, la proyección de la normal sobre un plano horizontal indica su orientación.

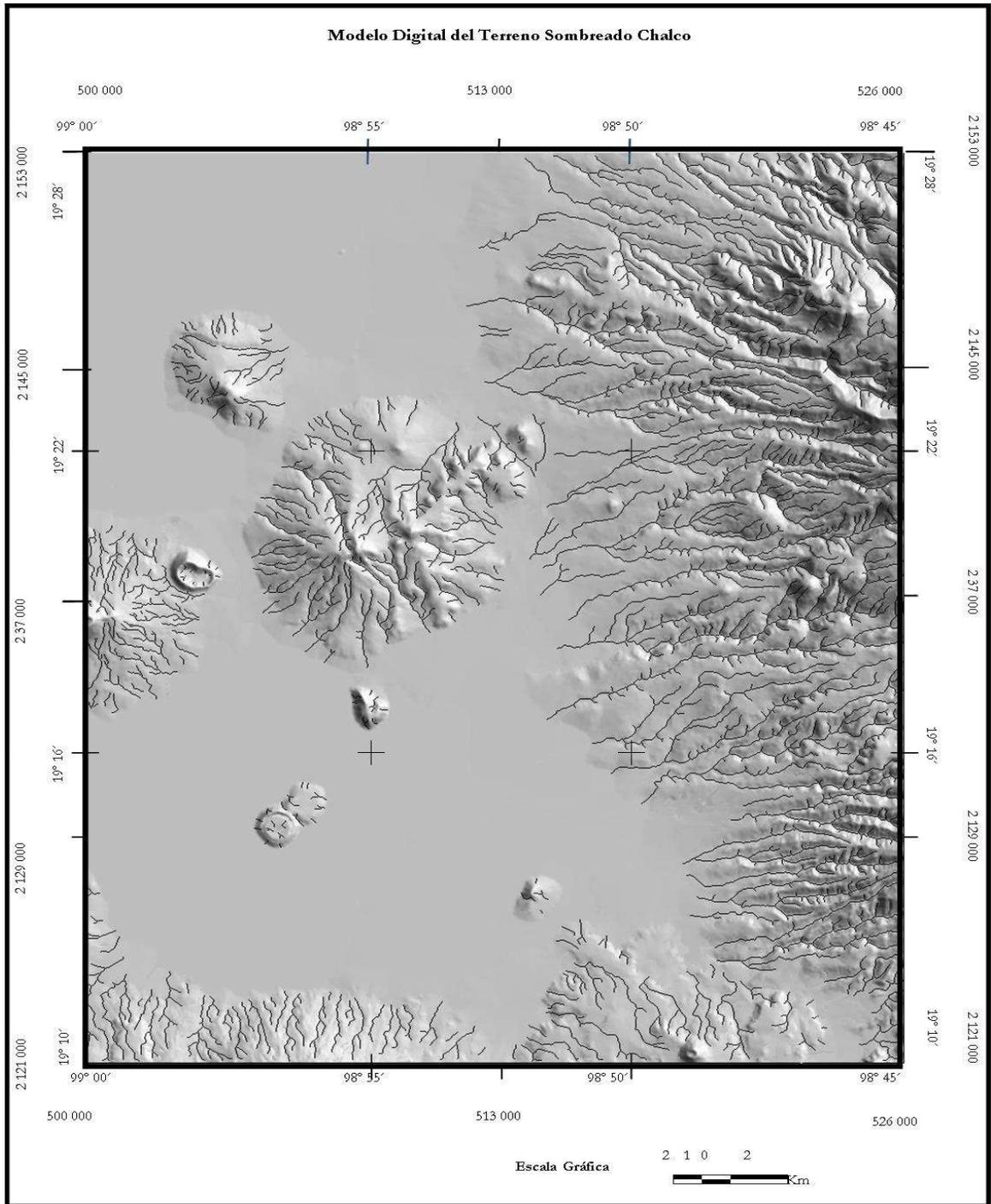


Figura 3.14. Modelo digital del terreno con sombra

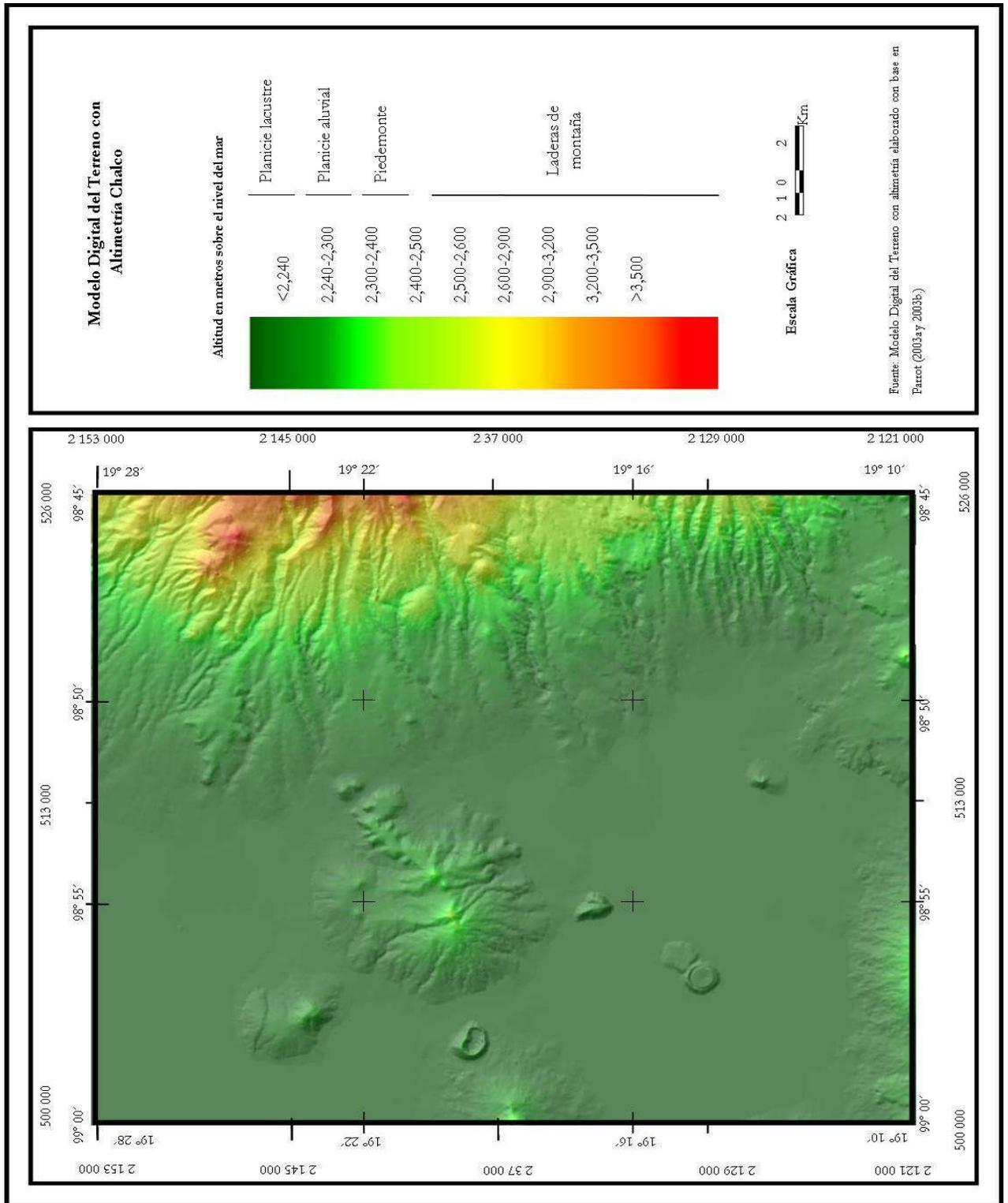


Figura 3.15. MDT con los pisos altitudinales del área de estudio

El método que se utilizó para calcular los valores de pendiente del área de estudio a partir del MDT, fue el de los operadores de Sobel aplicados en el programa *Versant* (Parrot, 2003). El procedimiento se describe a continuación:

Filtro de Sobel

Para calcular la pendiente se pueden utilizar los dos operadores (Sx, Sy) del filtro de Sobel, los cuales corresponden a las matrices; donde A es la altitud del píxel de coordenadas (i,j) y p es el tamaño del píxel (Ochoa, 2004).

$$S1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \quad S2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Sx = \left[\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N S1_{m,n} \cdot A_{i-m,j-n} \right] / (8 \times p)$$

$$Sy = \left[\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N S2_{m,n} \cdot A_{i-m,j-n} \right] / (8 \times p)$$

} con M=N=1.

El valor de la pendiente se calcula de la siguiente manera:

$$Pendiente = \sqrt{Sx^2 + Sy^2}$$

y finalmente:

$$Pendiente = (a \tan(Pend) + 180) / \pi$$

Aunque el programa calcula la pendiente cada grado, se prefirió definirla en rangos de 5°, obteniendo una clasificación de 12 rangos comprendidos entre 1 y 54° a los que se agregaron dos rangos más equivalentes a pendientes menores de 1° y mayores a 54°.

La finalidad del mapa de pendientes es representar, mediante colores, regiones con pendiente semejante; así la figura 3.16 muestra que, la mayor parte del área de estudio queda comprendida en un rango de pendiente que oscila entre 1 y 4 grados, aproximadamente esto sería como el 70% de la superficie de la zona. En términos generales la pendiente aumenta de poniente a oriente, presentándose los valores mínimos de pendiente en la planicie lacustre y los valores máximos en las laderas de la Sierra de Río Frío.

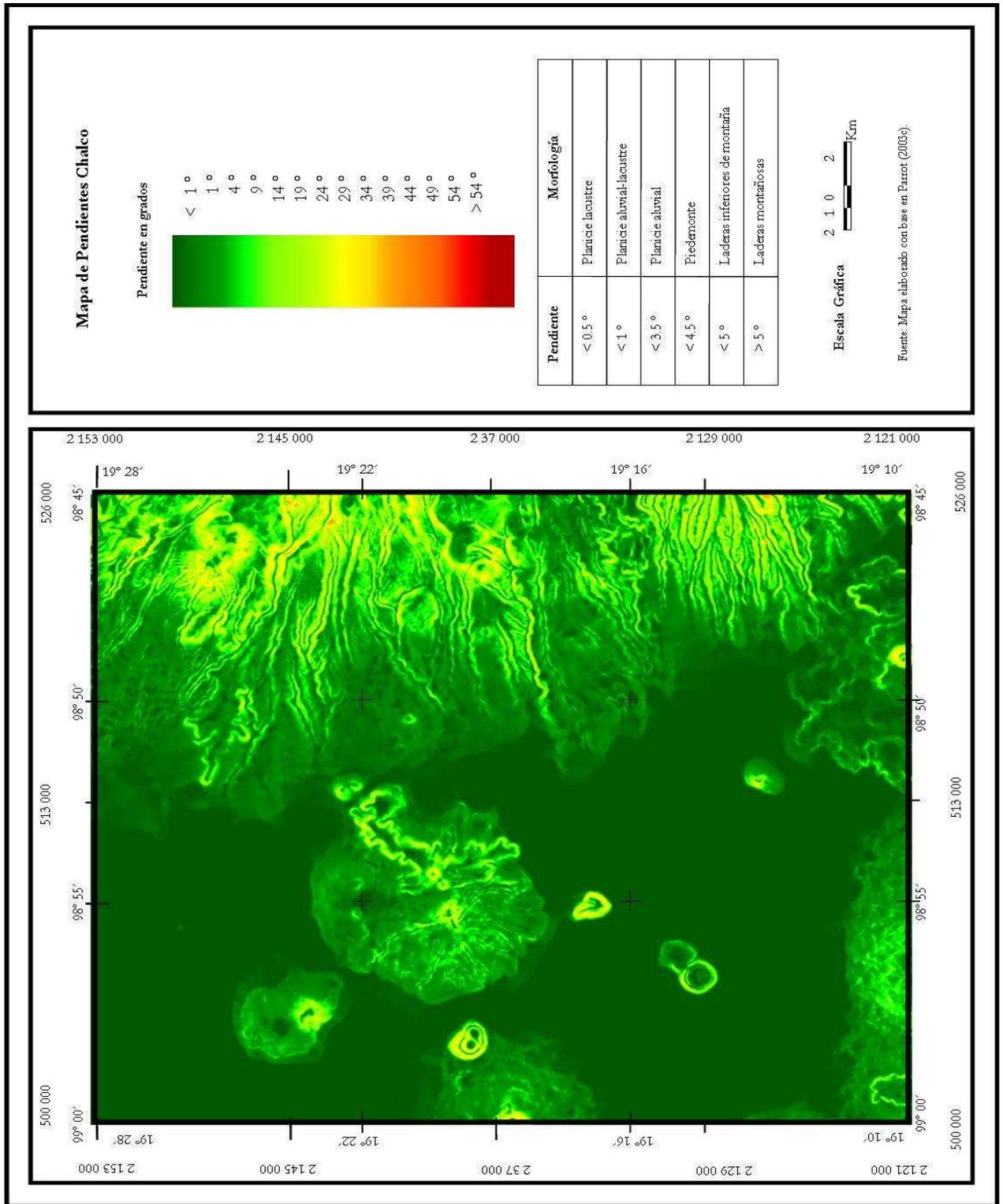


Figura 3.16. Distribución de las pendientes del área de estudio

3.2.3 Parámetros derivados de la red fluvial

Extracción de la red fluvial

Teniendo en cuenta que una zona de *talweg* es, de acuerdo con Deffontaines y Chorowicz (1991 en Ochoa, 2004), "el conjunto de las superficies topográficas, con agua de manera temporal o permanente, ubicadas debajo de todos los puntos vecinos más altos y dirigidos según una dirección", la red fluvial (Figura 3. 17) se extrajo a partir del MDT sombreado con el programa Tlálloc versión 1.0 (Parrot, 2006). Así el algoritmo propuesto se basó en una proporción dada (generalmente más de 50%) de píxeles vecinos más altos del píxel estudiado.

Una vez extraída la red fluvial se rectificó con el programa *Paint Shop* versión 4 y los mapas topográficos del INEGI (1998) Chalco y Amecameca a escala 1: 50 000 de INEGI. De igual modo, se infirió el drenaje que no estaba marcado por medio de la configuración de las curvas de nivel y, finalmente, se procedió a calcular la densidad de drenaje con la que se obtuvieron diez intervalos de densidad.

Como se observa en la figura 3.17, las zonas donde se presenta una mayor concentración de drenaje son las partes altas de la Sierra de Río Frío que aparecen de color anaranjado y que corresponden al mayor rango que es de 9.90 km/km^2 ; las de menor concentración de drenaje son las planicies lacustres de Chalco y Texcoco que se aprecian en color verde.

Densidad de disección

A partir de la división del área de estudio en cuadrantes de $2 \times 2 \text{ km}$, sobre el MDT se midió el "parámetro de disección" con base e el algoritmo *Disec.exe* (Parrot, 2002) que calcula la longitud total de los cauces (L_c) por cada celda tomando en cuenta el valor del lado (L_p) y de la superficie (S_p) del píxel. Este parámetro ha sido aplicado por Lugo (1988, en Ochoa, op. cit.) en zonas con una superficie de $16 \text{ km} \times 16 \text{ km}$, 4×4 o 1×1 ; sin embargo, en el algoritmo se puede utilizar cualquier tamaño de la superficie (S_t) y se puede definir una malla regular o elegir ventanas móviles que recorren toda la imagen y dan un valor a cada píxel.

El mapa de densidad de disección (Figura 3.18) muestra las zonas donde se concentra la mayor longitud de cauces por unidad de área (longitud en km /superficie de los cuadrantes en km^2). A partir de este se pueden inferir deslizamientos y procesos de remoción en masa por la cantidad de agua infiltrada o por la capacidad de una corriente para transportar material granular, detritos y grandes bloques de roca que generan flujos de lodo o de detritos.

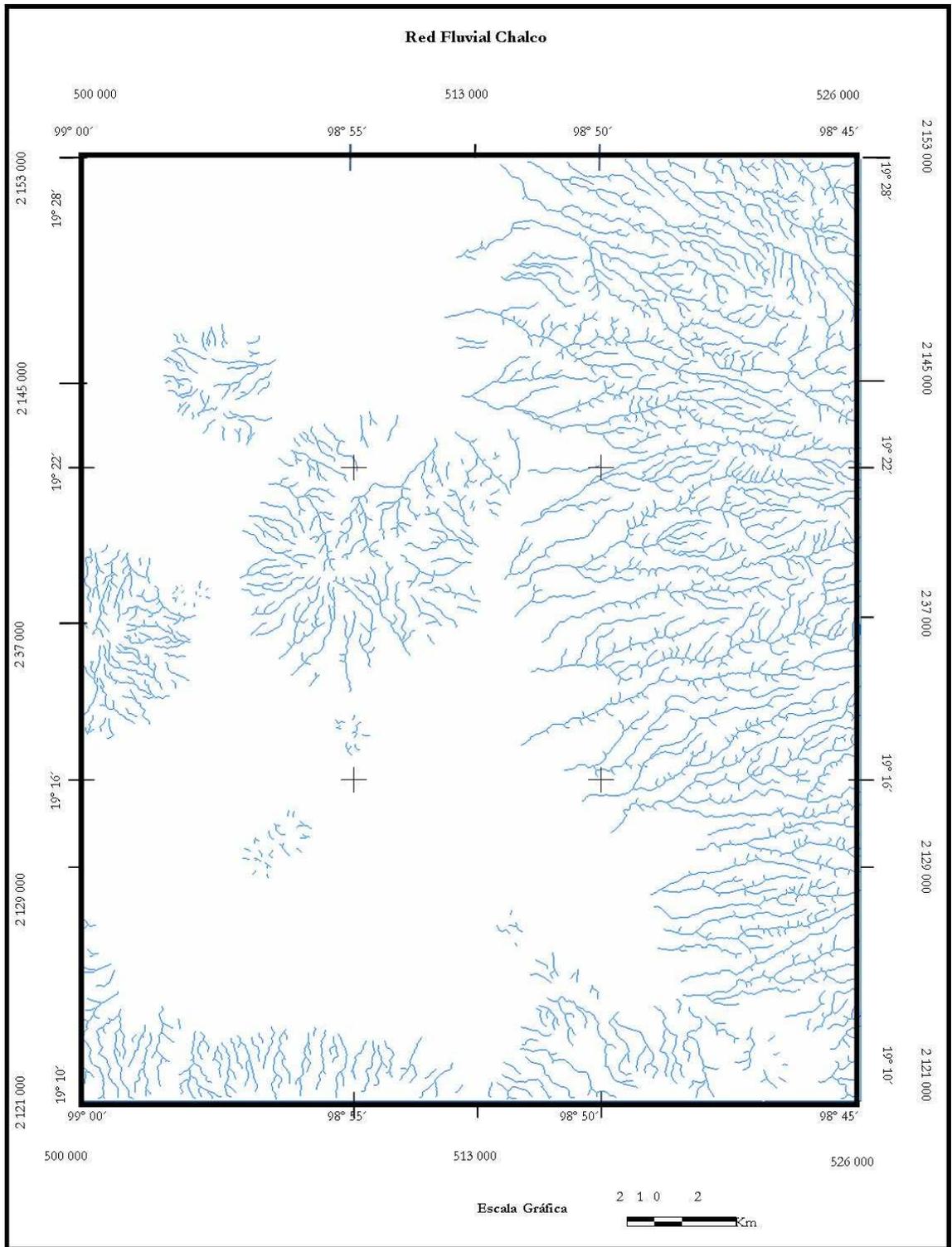


Figura 3. 17. Red fluvial del área estudiada

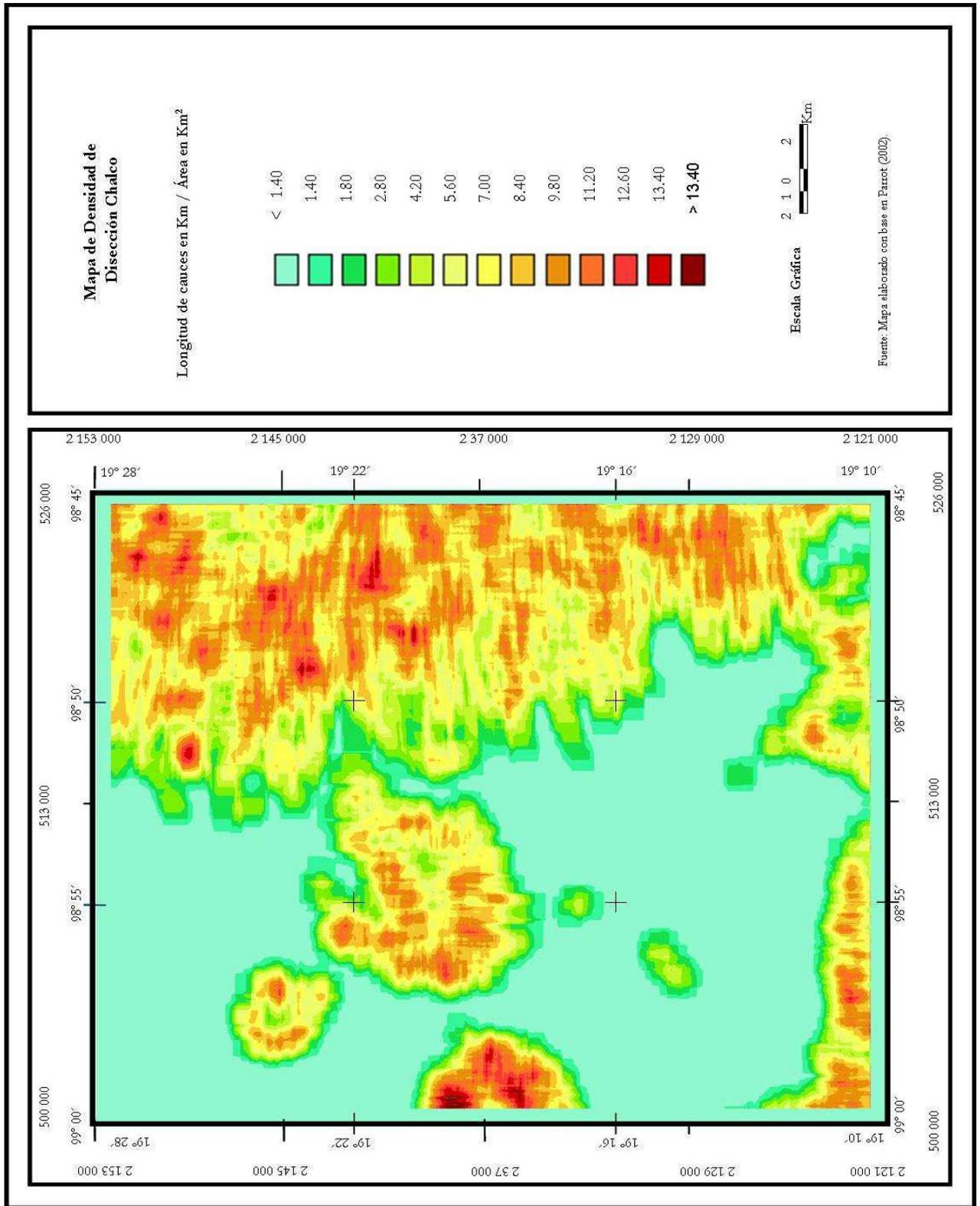


Figura 3. 18. Densidad de disección.

La red fluvial muestra cambios bruscos no solo en su dibujo, sino en la concentración de corrientes según la influencia de factores físico-geográficos y geológicos.

3.3 Unidades Geomorfológicas

El estudio del relieve inicia con una clasificación del mismo en un número reducido de unidades. Con base en el principio de la homogeneidad morfológica-geológica se definió un total de cinco zonas que describen a continuación.

3.3.1 Planicie Lacustre

Con la formación de la Sierra Chichinautzin surgió la cuenca endorreica que recibía las descargas de los ríos que descendían de las sierras circundantes; esto formó un lago que, en su mayor desarrollo, se pudo extender desde el pie de dicha sierra hasta las proximidades de Zumpango, Estado de México; Mooser (1975a, en Gutiérrez, 2005) le calcula una edad inferior a 700,000 años. El origen de esta unidad de relieve que, ocupa el nivel altitudinal más bajo de la cuenca, se explica a partir del continuo relleno del lago motivado por la aparición de la Sierra Chichinautzin que fungió como represa natural. Dicho vaso se azolvó intercalando distintos tipos de materiales, entre los que destacan los proluviales (limos y arenas) y los lacustres (arcillas y limos), así como las arenas y cenizas volcánicas, que al intemperizarse generaron arcillas altamente compresibles. En el área de estudio este lago era dividido por la Sierra de Santa Catarina en dos: el de Xochimilco-Chalco (al sur de esta sierra) y el de Texcoco (al norte), y cuando los lagos se desecaron (en los últimos cuatro siglos) se formó la planicie lacustre actual.

Para delimitar esta unidad geomorfológica, al igual que las demás, se utilizó como criterio principal la inclinación del terreno; así, las superficies cuya pendiente es menor a 1° corresponden a la planicie lacustre y en la zona estudiada se encuentran, parcialmente, las de Chalco y Texcoco; sus características se describen a continuación:

1. Son superficies casi horizontales en el nivel altitudinal más bajo (menor a 2,240 msnm).
2. Limitan con el piedemonte de acumulación, con lavas y piroclastos.
3. De acuerdo con Lugo (1984), la planicie lacustre se puede dividir en cuatro tipos: a) la ocupada por la mancha urbana de la ciudad de México y que tiene una cubierta de asfalto, b) la ocupada por cuerpos de agua permanentes y temporales, como el lago Nabor Carrillo en Texcoco, c) la ocupada por cultivos, entre Xochimilco y Chalco y d) la que estuvo

afectada por un régimen lacustre en tiempos prehistóricos pero que, actualmente, está cubierta de piroclastos finos y se encuentra alterada en su superficie por obras agrícolas.

3.3.2 Planicie aluvial-lacustre

En la medida en que los depósitos proluviales se acumularon en el fondo de los lagos de la Cuenca de México, se constituyó la expresión morfológica de planicie aluvial-lacustre. Se trata de superficies subhorizontales, inclinadas, onduladas, cóncavas y escalonadas que actualmente son modificadas por el proceso de urbanización (Gutiérrez, op. cit.). En el área de estudio, esta unidad es una zona plana con menos de 1° de inclinación, dispuesta en una franja que rodea las planicies lacustres de Chalco y Texcoco, y se encuentra entre los 2,220 y 2,240 msnm.

3.3.3 Planicie aluvial

Esta unidad se encuentra entre la planicie aluvial-lacustre y el piedemonte y se constituye de depósitos sedimentarios aportados por las corrientes fluviales que desembocan en la planicie. En el área de estudio es una franja delgada, de 0.5 a 2.5 km de ancho, que se extiende alrededor de la Sierra de Santa Catarina, el complejo volcánico El Pino, de las elevaciones menores que emergen en la planicie lacustre y, al oriente del área de estudio, a lo largo de la Sierra de Río Frío. Ocupa la posición altitudinal entre los 2,240 y 2,260 m, tiene una pendiente menor a 3.5° y su composición granulométrica, en general, es heterogénea. En la porción superior, cerca del piedemonte, los materiales son gruesos, con predominio de guijarros mal clasificados y con ausencia de estratificación precisa; en cambio en la porción inferior, cercana a la planicie aluvial-lacustre, la textura se hace más fina y predomina una composición de arenas con más heterogeneidad y arreglo. Esta unidad, al igual que la anterior, sostiene zonas urbanas recientemente formadas.

3.3.4 Piedemonte

Es una superficie inclinada, marginal a las elevaciones montañosas, lo mismo en las sierras que en volcanes aislados, aunque con distinta inclinación, altitud y extensión. Consiste en sedimentos, principalmente proluviales, conos de eyecciones coalescentes, a manera de un manto de perfil ligeramente convexo o disecado por barrancos (Lugo, 1989).

En la Cuenca de México el piedemonte de mayor desarrollo se asocia con sierras que iniciaron su formación en el Mioceno, como la Sierra Nevada, en cambio, la estructura más joven con menos de un millón de años, la Sierra Chichinautzin, ha tenido un modelado poco intenso que se refleja en un piedemonte incipiente y discontinuo en su flanco norte (Lugo, 1984). En el área de estudio esta unidad sólo se encuentra al pie de la Sierra de Río Frío, donde se extiende como una franja al

oriente del complejo volcánico El Pino. Tiene una pendiente menor a 4.5° y actualmente se encuentra en un fuerte proceso de urbanización, principalmente, por la construcción de unidades habitacionales en los poblados de San Francisco Acuatla, San Miguel Coatlinchán, San Luis Huexotla y San Martín Huixtoco.

3.3.5 Laderas inferiores de montaña

Son terrenos elevados que por su altura se distinguen de las superficies adyacentes limitantes; presentan contraste altitudinal en corta distancia y laderas heterogéneas en longitud, geometría y orientación. En el área de estudio esta unidad constituye las sierras que interrumpen la continuidad de la planicie y su composición varía en cada conjunto, pues en la Sierra de Río Frío se forma de depósitos de flujo piroclástico y en el resto de los volcanes de coladas lávicas. En general tiene una pendiente menor a 5°.

La figura 3.19 muestra tres perfiles del área de estudio en los que se observa la distribución de las unidades geomorfológicas, la ubicación de las localidades en cada unidad de relieve y las principales elevaciones de cada transecto. El perfil No 1 parte de la planicie lacustre de Texcoco hacia la Sierra de Río Frío, el No 2 va del volcán El Pino al Cerro El Tejolote en la Sierra de Río Frío y muestra la zona que divide las planicies de Chalco y Texcoco; el No 3 atraviesa la planicie lacustre de Chalco desde el volcán La Caldera hasta la ladera inferior de la Sierra Chichinautzin.

3.3.6 Mapa de unidades geomorfológicas

La figura 3.20 muestra el mapa de unidades geomorfológicas que es el documento base para construir el mapa de peligros. A continuación se describe la metodología empleada para su elaboración.

Metodología para la elaboración del mapa de unidades geomorfológicas

1. *Determinación del área de estudio.*
2. *Selección y consulta de documentos cartográficos básicos.* Se eligieron las cartas topográficas, que cubren el área de estudio, correspondientes a las cartas Chalco con clave E14B31 (INEGI, 1985i y 1998) y Amecameca con clave E14B41 (INEGI, 1985d) a escala 1: 50,000, así como las fotografías aéreas estereoscópicas correspondientes a la carta Chalco (INEGI, 2000b) a escala 1: 37,500.
3. *Selección de la escala de mapeo y el tiempo del levantamiento.* Para iniciar el levantamiento geomorfológico, se realizó una rápida interpretación de la cartografía topográfica y de un mosaico de fotografías aéreas para conocer las formas del terreno de manera general.

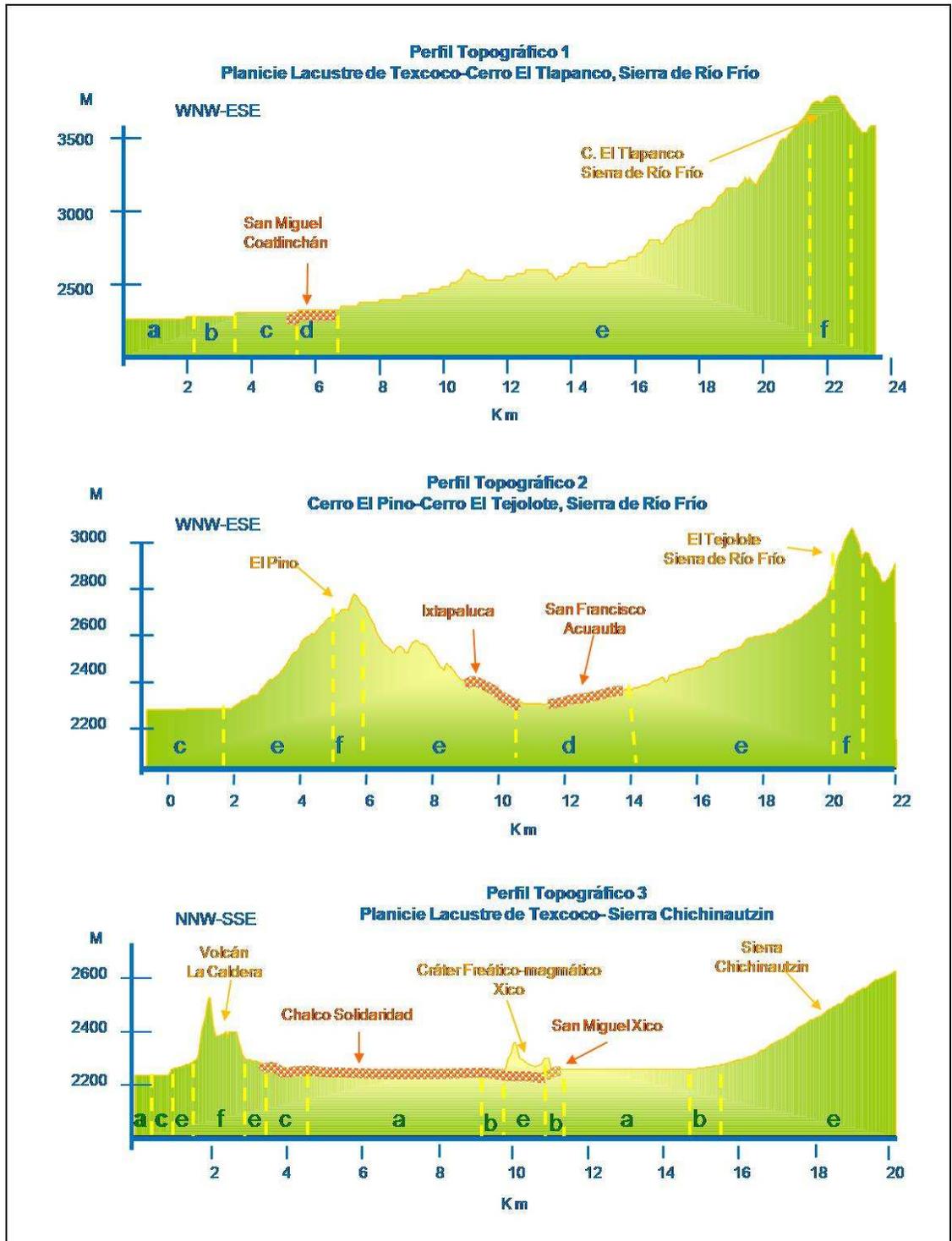


Figura 3.19. Perfiles topográficos con la distribución de las unidades de relieve con base en el INEGI (1985d y 1985i). La extensión de las poblaciones está indicada por la línea gruesa de color anaranjado y las unidades geomorfológicas del área de estudio son: planicie lacustre (a), planicie aluvial-lacustre (b), planicie aluvial (c), piedemonte (d), laderas de montaña (e) y conos volcánicos (f).

4. *Consulta de otras fuentes de información disponibles.* Se buscó la literatura existente referente a la geología del área de estudio así como cartografía temática.
5. *Mapeo provisional de las unidades de relieve.* Con base en el análisis de las cartas topográficas y la fotointerpretación de las fotografías aéreas, se realizó una primera delimitación de las grandes unidades de relieve utilizando como criterio principal el cambio de pendiente. Sobre los mapas topográficos se marcaron las unidades geomorfológicas y otros datos geomorfológicos relevantes visibles en las imágenes.
6. *Mapa base topográfico.* Para facilitar la ubicación en campo, de los fenómenos observados mediante la fotointerpretación, fue necesario trasladar algunos puntos de referencia de las fotografías a las cartas topográficas.
7. *Fotointerpretación detallada* Mediante un trabajo de laboratorio (fotointerpretación) se realizó una subdivisión de las formas de relieve para identificar geoformas individuales y asociaciones de geoformas, así como algunos procesos (endógenos y exógenos) que fueron indicados con símbolos lineales.
8. *Descripción de las unidades.* Al mismo tiempo que se realizó la fotointerpretación se llevó a cabo una búsqueda de la literatura que permitiera conocer las características geológicas y estructurales de las geoformas.
9. *Elaboración del mapa de unidades geomorfológicas.* Una vez terminada la fotointerpretación, se trasladó la información corregida a la base topográfica y, algunas formas del relieve que no pudieron ser identificadas directamente en las fotos, se delimitaron por medio de la interpretación de las cartas topográficas.
10. *Trabajo en campo y levantamiento en el terreno.* Se eligieron algunos lugares para visitar en campo y con el mapa provisional y las fotografías aéreas se constató la delimitación del mapa provisional y se incorporó la información que no se obtuvo en las fotografías aéreas.
11. *Mapeo final.* Ultima fase del levantamiento en la que se obtiene el mapa definitivo donde las unidades geomorfológicas coinciden con las unidades de terreno. Se realiza, también, una jerarquización de la leyenda y se seleccionan los colores así como los símbolos lineales.

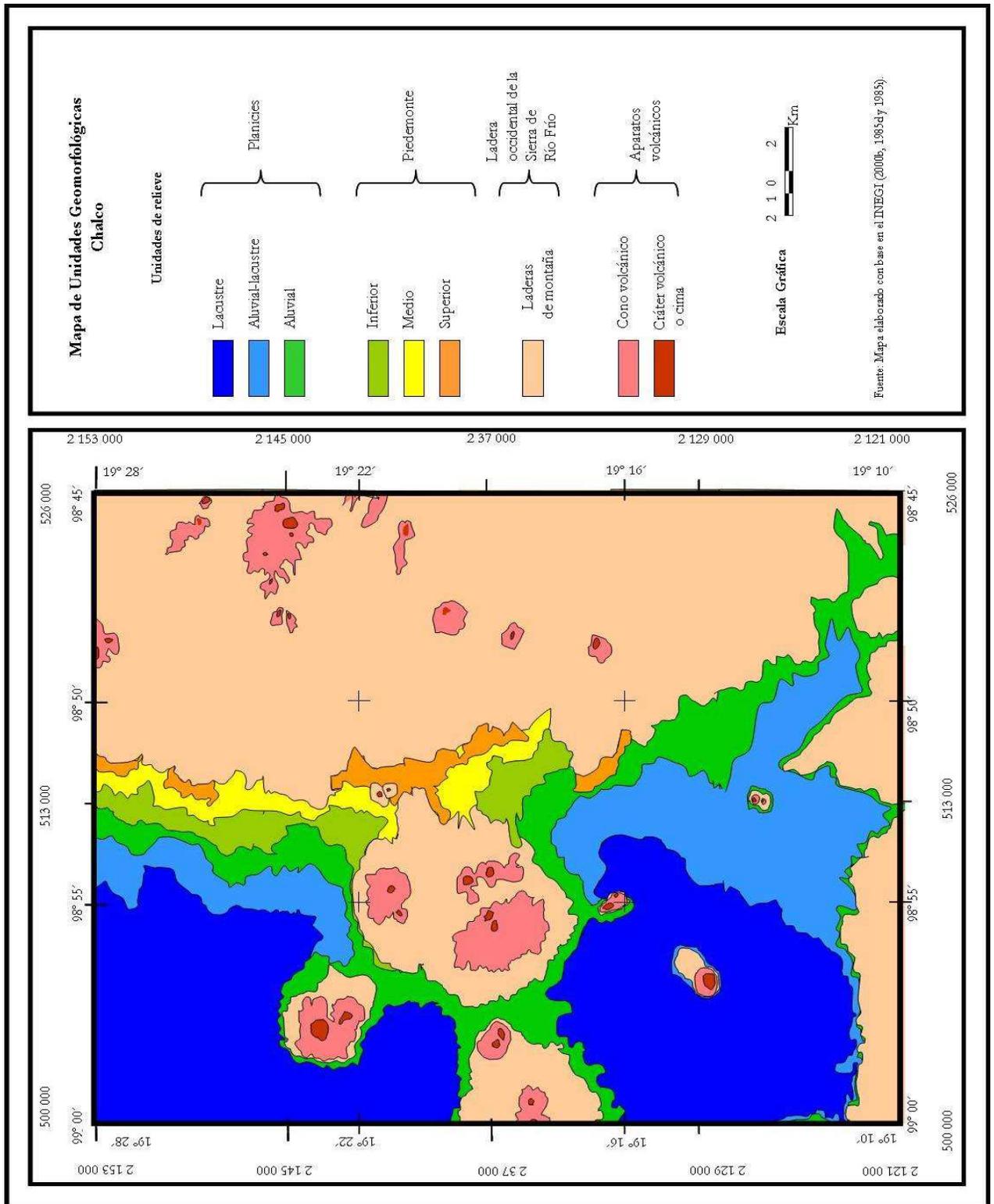


Figura 3.20. Formas de relieve en la zona de estudio

Capítulo 4. Crecimiento urbano del área de estudio y su impacto socioambiental

4.1 Evolución demográfica y crecimiento de la mancha urbana

Los problemas sociales del área de estudio y su situación demográfico-espacial no pueden analizarse en forma autónoma, es necesario revisar los antecedentes de la dinámica poblacional de la Cuenca de México y los factores históricos, económicos, políticos y geográficos que la influyeron. Aparentemente la primera ciudad de la cuenca fue Cuicuilco, pero quedó cubierta por dos coladas lávicas del volcán Xitle en los años 100 a.C. y 400 d.C. (INHA, 1998). Algunos autores consideran que por esto su población emigró y fundó la ciudad de Teotihuacan (INHA, op. cit.); ésta se degeneró por su sobrepoblación y problemas sociales derivados del impacto ambiental (destrucción de bosques, desertización y erosión del suelo agrícola); por su lado, los mexicas tuvieron la necesidad de emigrar y buscar agua para desarrollar un sistema agrícola. Después de su larga peregrinación, en el año 1325, se establecieron en un islote del Lago de Texcoco y fundaron la ciudad de México-Tenochtitlán que se convirtió en una de las economías más fuertes de la cuenca por su poder político así como por sus buenas cosechas, debido a que aprovechaban la alta fertilidad del suelo de origen volcánico y la abundancia de agua (Figura 4.1).

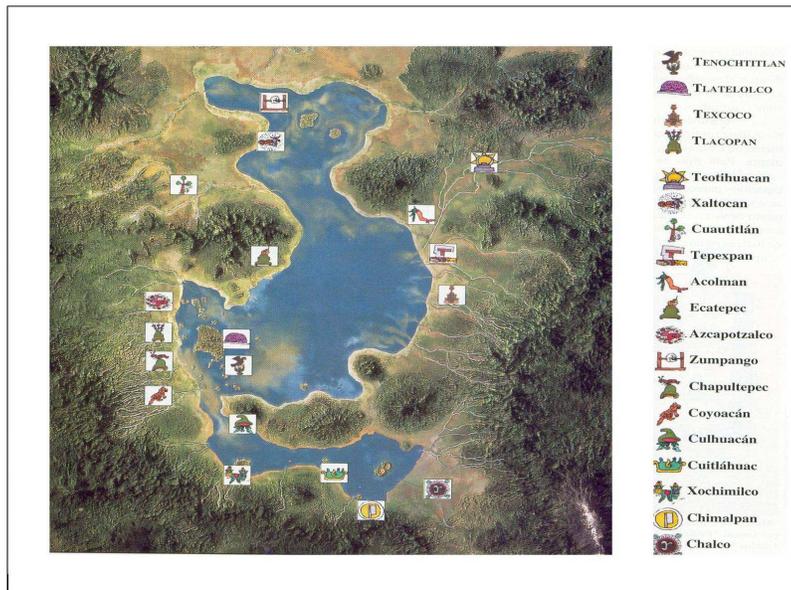


Figura 4.1. La Cuenca de México en el siglo XV con la localización de las primeras poblaciones en las riberas de los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. Tomado de INHA, 1998.

A fines de 1519 resurge la ciudad de México como la más importante de la cuenca y del reino al erigirse durante la época colonial, como el centro administrativo, económico, educativo, cultural, religioso y de consumo de la Nueva España. En 1821, después de la Colonia y por influencia francesa, la ciudad adopta las innovaciones tecnológicas en sistemas de transporte y comunicaciones que propician y mantienen constante su expansión hasta el siglo XX.

De acuerdo con Gutiérrez *et al.* (2005), en los últimos 50 años la concentración demográfica en la ciudad aumentó y generó una mayor heterogeneidad en la distribución de la población, debido a que unas localidades se establecieron en función del desarrollo de una metrópoli central y otras se instalaron en los lugares circundantes que lo permitían sin contar con los servicios básicos.

En 1960, las poblaciones circundantes a la ciudad de México fueron absorbidas por el crecimiento demográfico-espacial del centro. En el área de estudio, entre las poblaciones alejadas de la ciudad, Texcoco con 11 mil habitantes y Amecameca con 12 mil habitantes llegaron a constituirse como poblaciones urbanas, aún cuando prevalecía en ellas un paisaje rural y sin la necesidad de que sus habitantes cambiaran de residencia o actividad económica (Figura 4.2-a). Durante la década de 1970 ambas ciudades mantuvieron constante su crecimiento demográfico y durante ese período Chalco se constituyó también, como población urbana por albergar a 12 mil habitantes (Figura 4.2-b), Gutiérrez *et al.* (op. cit.).

A partir de 1980 Texcoco y Chalco fueron absorbidas por la Zona Metropolitana de la ciudad de México (ZMCM), misma que en 1990 se convirtió en una de las aglomeraciones de mayor tamaño del mundo, a pesar de que en esa década las poblaciones más importantes de la zona de estudio ya formaban parte del área conurbana. Amecameca continuó como una ciudad satélite de la capital (Figura 4.2-c) debido posiblemente, a que se encuentra en una planicie rodeada por las sierras Chichinautzin y Nevada-Río Frío (Gutiérrez *et al.*, *Ibíd.*).

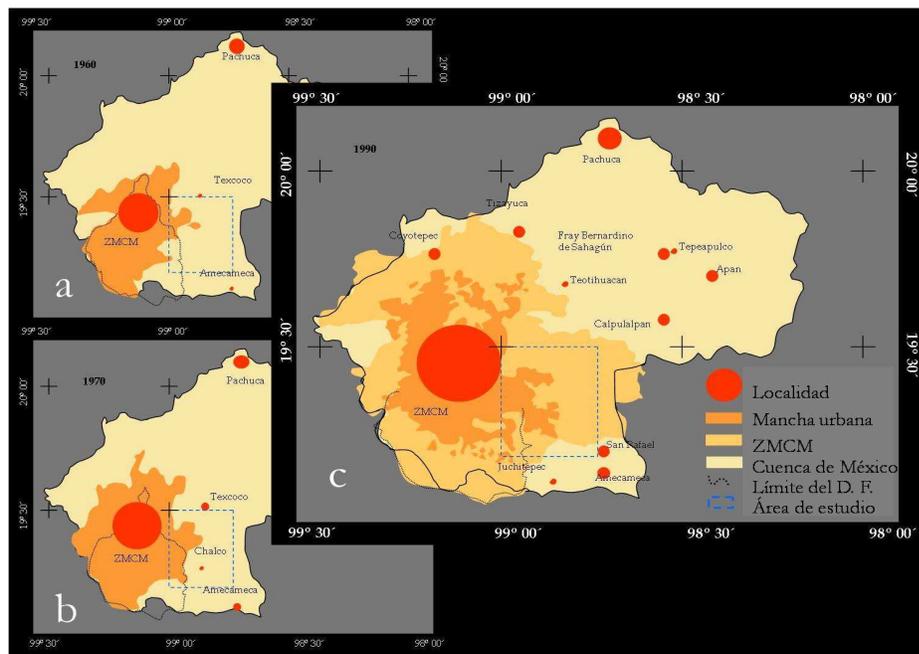


Figura 4.2. Crecimiento de la mancha urbana en la ciudad de México y área conurbana entre 1960 y 1990. Con base en Gutiérrez *et al.* (2005).

A pesar de que en el año 2000 la ZMCM redujo su tasa de crecimiento, quedó establecida la red urbana en la que la población se concentra, principalmente, en las partes más bajas del relieve, como las planicies lacustre y aluvial-lacustre (Gutiérrez *et al.*, *Ibidem.*). En el área de estudio la problemática social actual se debe al crecimiento demográfico que exige espacios habitacionales, de comercio, de recreación y servicios que modifican drásticamente el espacio y por carecer de visión futura se ha fracturado el equilibrio natural del lugar (Figura 4.3).

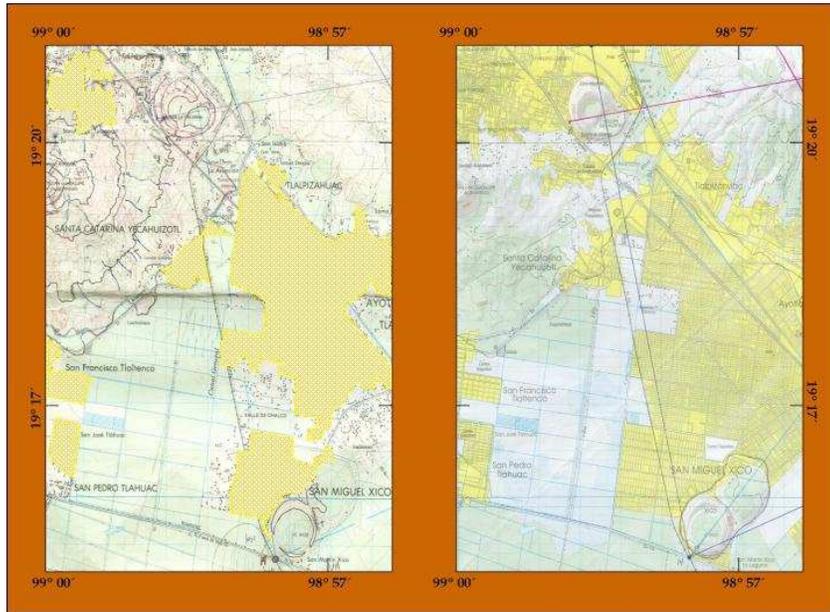


Figura 4.3. Mancha urbana de Chalco. Cartas topográficas Chalco. INEGI (1985g y 1998).

4.1.1 Factores socioeconómicos que influyeron el crecimiento urbano

En 1910 la ciudad de México se convirtió en la sede del poder político. En 1940 se llevó a cabo la reforma agraria y, en 1950, se consolidó el modelo hidráulico del Porfiriato; estos sucesos propiciaron las condiciones idóneas para la concentración y centralización de los poderes político-administrativo, económico-financiero, cultural, educativo, industrial y de comunicación que condujeron a la generación de empleos. Pero, además de estos factores, también influyeron el avance de la medicina, que disminuyó la tasa de mortalidad, y las obras hidráulicas de principios del siglo XX, que permitieron disminuir la tasa de mortalidad por enfermedades transmitidas a falta de higiene y por tener contacto directo con aguas negras. Todos estos factores aumentaron la calidad de vida en la ciudad y motivaron movimientos migratorios provenientes de todos los estados de la República Mexicana.

De los factores anteriores, el que más ha contribuido al crecimiento urbano del área de estudio ha sido la inmigración. De acuerdo con Cabrera (1981, en Gutiérrez *et al.*, 2005), este proceso lo determinan factores de expulsión y atracción entre los lugares de origen y destino, siendo las

situaciones que provocan el desplazamiento, el desempleo o subempleo, bajos ingresos, deficiencias en los servicios de salud pública o educativos, cambios en el estado civil, escasez de actividades culturales y de medios de esparcimiento.

En el área de estudio, según el INEGI (2000a), el 30% de la población es originaria de la zona y el 70% es inmigrante, de esta población el 25% es originaria del D. F y el 45% proviene de otros estados u otro país (Figura 4.4). Con base en estas cifras se infiere que la zona debe tener movimientos pendulares y actuar como zona dormitorio ya que, a pesar de ser parte de la ZMCM, no ofrece servicios suficientes a su población, por lo que la mayor parte de sus habitantes realiza algunas de sus actividades diurnas (como empleo y educación, principalmente de nivel superior) en el Distrito Federal y en los municipios más cercanos a la ciudad de México y regresa por las noches sólo a dormir.

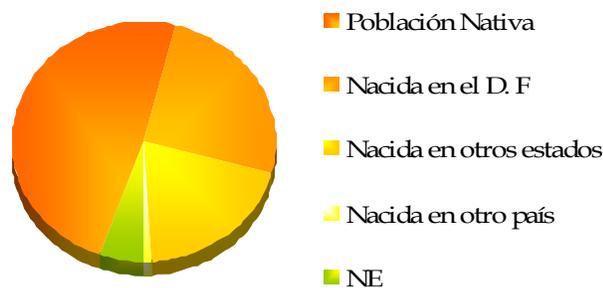


Figura 4. 4. Población del área de estudio. Censo General de Población y Vivienda, México. INEGI (2000a).

4.2 Procesos antrópicos que modificaron el ciclo hidrológico en Chalco

A causa del desplazamiento urbano, la ciudad ha rebasado los límites administrativos del D. F., y debido a que la capital es un polo de atracción, también lo son la zona conurbana y las ciudades cercanas a ella. Así, en el área de estudio hay una constante transformación del relieve por un obligado cambio de uso de suelo que implica la construcción de servicios y obras públicas (como nuevas viviendas, escuelas, medios de transporte, servicios médicos y creación de empleos, entre otros) que, desafortunadamente, desde la década de 1970 siempre han sido superadas por la demanda de la población, ya que no crecen al mismo ritmo. A partir de esa modificación del relieve se ha alterado el ciclo hidrológico por distintas acciones que agravan las situaciones de riesgo, principalmente para el sector proletario que por sus características socioeconómicas es el más vulnerable.

4.2.1 Deforestación

Desde la época colonial los bosques de esta zona, al igual que los del resto de la cuenca, comenzaron a ser talados para producir madera con fines de construcción de casas y muebles, milpas, pastizales y posteriormente papel en las fábricas de Loreto y Peña Pobre (Romero, 1999), pero también han sido utilizados con fines recreativos y estéticos. Además, los bosques son muy importantes para conservar el equilibrio ecológico, ya que brindan servicios de protección al suelo, la flora y la fauna, facilitan la infiltración del agua pluvial, previenen escurrimientos torrenciales, oxigenan y purifican el aire, mantienen una humedad atmosférica agradable para las ciudades porque reducen la oscilación térmica y protegen el microclima.

En el área de estudio los bosques de pino han sido los más afectados, debido a que son los que tienen mayor distribución en la zona y están más próximos a las localidades urbanas. Actualmente se encuentran superficies clareadas en los cerros pequeños que emergen en la planicie lacustre de Chalco, en las laderas bajas de las sierras y en piedemontes cercanos a las planicies lacustre y aluvial-lacustre, con la finalidad de obtener madera, superficies agrícolas de temporal (no muy eficientes porque los suelos son delgados y las pendientes no son aptas para mantener los cultivos), y superficies de pastoreo (que son cultivadas con pastos). Además de estas actividades que destruyen los bosques, también se encuentran las plagas y los incendios no controlados.

Con la pérdida de los bosques, el balance hídrico de la subcuenca de Chalco, que hasta antes de 1950 (SARH, 1986) estaba equilibrado, se alteró. Los suelos perdieron su capacidad para absorber agua y alimentar los mantos freáticos, así como su cohesión y quedaron sujetos a la erosión por viento, desprendimiento o arrastre fluvial. Debido a que el agua que ya no se infiltraba se sumó a los escurrimientos, los ríos comenzaron a desbordarse y aumentaron su fuerza de arrastre que trasladaba mayor cantidad de material y, con el tiempo se azolvieron las presas y el escaso drenaje de las poblaciones; de esta manera las inundaciones fueron cada vez más violentas. Estos escurrimientos que llegaban a los cuerpos lacustres y ciénagas, aumentaron el nivel de los cuerpos de agua, pero también la cantidad de evaporación y con ello se aceleraron la desecación de los lagos y la disminución de la humedad atmosférica (Romero, op. cit.).

4.2.2 Extracción de material en canteras

En el área de estudio el número de canteras se ha mantenido más o menos constante en 26 años, según la información de las cartas topográficas Chalco, en la década de 1980 eran 30 los bancos de material activos, en la siguiente (1990) eran 32 y actualmente son 27 los que se encuentran

en explotación. Estas canteras no son las mismas, debido a que varias de ellas han sido agotadas por las grandes cantidades de material extraído y han sido sustituidas por otras. Todos los bancos de material se ubican en el piedemonte y conos volcánicos de Chimalhuacán, Santa Catarina y El Pino.

Durante la realización del trabajo en campo se visitaron catorce canteras ubicadas al sur de Chimalhuacán y en las cercanías de los poblados de San Luis Huexotla, San Miguel Coatlinchán y Coatepec, todas en la ladera occidental de la Sierra de Río Frío. Debido a que en ellas predominan los piroclastos y especialmente depósitos de flujo constituidos por limos, arenas, gravillas y fragmentos gruesos, los materiales extraídos son pómez, escoria volcánica (tezontle) y, principalmente, grava que son utilizados en la industria de la construcción (Figuras 4.5 y 4.6).



Figura 4.5. Cantera La Rosita en la Sierra de Río Frío. Enero de 2005.



Figura 4.6. Un camión de volteo que transporta grava. Enero de 2005.

La extracción de estos materiales se realiza sin medir las consecuencias futuras y, debido a que los materiales expuestos en la superficie del terreno no son arcillosos, en la cantera y en sus alrededores, los suelos quedan desprotegidos contra la erosión por acción del viento o por acarreos fluviales; de este modo, la modificación antrópica del relieve repercute en la alteración del ciclo hidrológico en la subcuenca de Chalco y genera los problemas sociales siguientes:

1. Ya que las canteras se ubican en el piedemonte de las sierras y de algunos cerros, para poder transportar el material de las canteras a las casas de material, hubo necesidad de abrir caminos de terracería que al igual que las canteras, al carecer de vegetación y constituirse de material compactado reducen la infiltración de agua pluvial y constantemente aportan material que se suma al azolve de drenajes en las planicies lacustres de Chalco y Texcoco.
2. La superficie que deja una cantera abandonada no puede ser cultivada o reforestada porque no tiene suelo, tampoco puede ser usada con fines recreativos, ya que no tienen las condiciones óptimas. Si algunos de estos terrenos, por sus dimensiones y ubicación permiten la construcción de unidades habitacionales, es necesario que se lleve a cabo una nivelación aún mayor del relieve para conseguir una superficie más homogénea.
3. Al transportar los materiales de construcción, las partículas finas escapan de la caja de los camiones de carga y contaminan la atmósfera, al mismo tiempo que aportan material para la formación de tolveneras.
4. Con base en la fotointerpretación y la comparación de las cartas topográficas del área de estudio (INEGI, 1985d, 1985i y 1998), se pudo observar que las canteras en un principio se encontraban alejadas de las poblaciones; ahora, debido al rápido crecimiento de la mancha urbana, es común que se encuentren cercanas o rodeadas por asentamientos irregulares.
5. Las canteras que ya están muy cerca de la mancha urbana pueden ocasionar accidentes, debido a que los camiones de carga al transportar el material atraviesan constantemente las localidades.
6. Algunas canteras son cuevas rodeadas de paredes verticales de hasta 40 m de altura constituidas por el material cuaternario (piroclastos) depositado sobre las laderas de las sierras (Figura 4.7). En su parte superior éstas paredes son escarpes que marcan el límite de la superficie construida y, si se tienen en cuenta las características poco consolidadas del material y el sobrepeso que ejercen las viviendas, se pueden esperar desprendimientos de material que podrían arrastrar consigo las casas cercanas al escarpe y sepultar algunas viviendas cercanas a las canteras ubicadas en zonas más bajas.

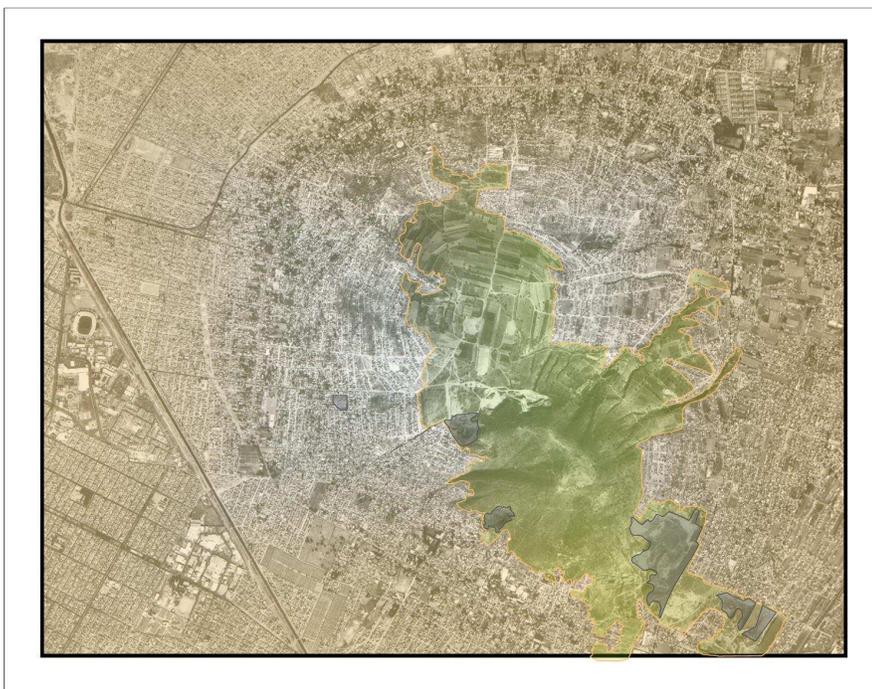


Figura 4.7. Fotografía aérea del INEGI (2000b) sobre la que se digitalizaron la zona con menor alteración (verde), la zona urbana (anaranjado) y las canteras (gris).

En la mina Santa Cruz se entrevistó al Sr. Roberto Ruiz (checador) quien controla el tiempo de entrada y salida de los camiones de carga de la mina; según la información obtenida, las canteras laboran seis días a la semana (de lunes a sábado) con un horario de 6:00 a 17:00 hrs., en el cual la cantidad de material extraído al día es de 200 y 300 m³. Para extrapolar estos datos a los 26 bancos de material restantes del área de estudio se consideró como cantidad promedio de extracción de material al día, 250 m³ (Tabla 4.1); la importancia de mostrar estas cifras es que permiten comprender porqué las canteras representan la modificación más rápida del relieve por acción antrópica.

Tabla 4.1. Cantidades extraídas de material en las 30 canteras del área de estudio

Ubicación de los bancos de material	N. de canteras	Ton./día	Ton./semana
Chimalhuacán	4	1,000	6,000
Complejo volcánico El Pino	4	1,000	6,000
Sierra de Río Frío			
N de Santa María Nativitas	1	250	1,500
E de San Luis Huexotla	4	1,000	6,000
N de Coatepec, sobre la cañada del Río Manzano	3	750	4,500
N de Coatepec, sobre la cañada Las Majadas	2	500	3,000
NW de Coatepec	1	250	1,500
NE de Coatepec, sobre la cañada Salitre	2	500	3,000
SE de Coatepec	1	250	1,500
NW del C. Tejolote, sobre la cañada El Olivar	1	250	1,500
W del C. Tejolote	5	1,250	7,500
SW del C. Tejolote	1	250	1,500

4.2.3 Cambio de uso del suelo

El proceso demográfico en el área de estudio se puede dividir en tres períodos que indican un cambio drástico en la transformación del paisaje:

1. De 1900 a 1940 dominaba un espacio agrícola y ganadero con un crecimiento medio anual muy lento, determinado por alta natalidad, afectada por tasas elevadas de mortalidad.
2. En las tres décadas siguientes inició la ocupación del área, impulsada por la intensificación de la actividad agropecuaria y la influencia del crecimiento de la ciudad de México.
3. A partir de 1970 disminuyó la tasa de natalidad, debido a la planificación familiar y el uso de métodos anticonceptivos; aun así, el área de estudio tuvo mayor impulso demográfico debido a la población inmigrante y la influencia de la modernización económica y urbana de la ciudad.

En la zona estudiada, estos cambios graduales marcaron su transformación espacial y demográfica de rural a urbana en la década de 1970, sin necesidad de cambiar totalmente el giro de la actividad económica, y por el hecho de que las localidades rebasaron el límite de la población para conseguir la categoría de ciudad. Sin embargo, desde 1981 esta transformación fue más allá de la simple absorción del área de estudio a la ZMCM, y la población comenzó a sustituir las actividades agropecuarias por la industria y la prestación de servicios.

La Figura 4.8 muestra una gráfica del crecimiento medio anual de la población urbana, rural y total de la cuenca de México en el período de 1900-2000, y permite observar, a nivel general, que la población urbana creció a costa de la disminución de la población rural porque una gran cantidad de población dedicada a actividades rurales comenzó a emplearse en actividades urbanas debido a que el campo dejó de ser rentable (Gutiérrez *et al.* op. cit.).

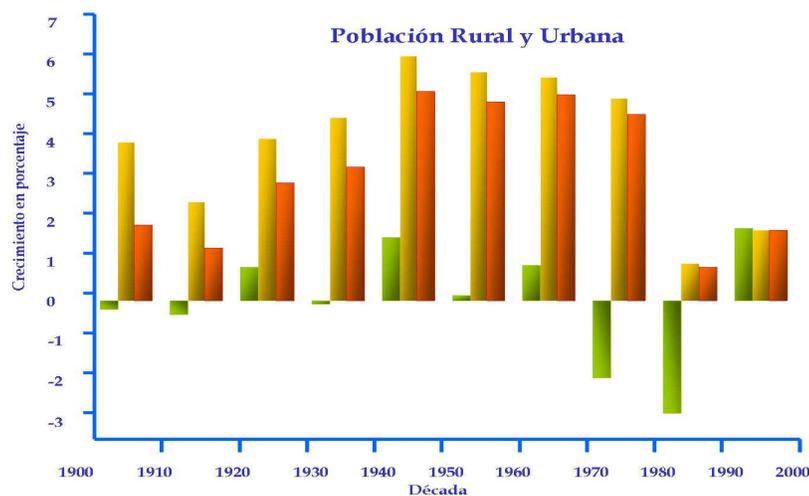


Figura 4.8. Crecimiento de la población urbana (anaranjado), rural (verde) y total (amarillo) de la Cuenca de México. Con base en Gutiérrez *et al.* (2005).

La población total de los 12 municipios del área de estudio es cercana a los 2 millones, de la cual, la población económicamente activa (PEA) y ocupada es de 649,809 habitantes y la cantidad de población empleada por sector de actividad económica es el siguiente: 2% en el sector primario (agricultura, ganadería y recursos forestales), 33% en el sector secundario (minería, construcción e industria), 62% en el sector terciario (electricidad, comercio, transporte, medios de comunicación, cultura, salud, otros servicios) y 3% no específica. Con estas cifras se infiere que actualmente, la mayor parte de la población del área de estudio se dedica a la prestación de servicios y la minoría aún se dedica a las actividades agropecuarias (Figura 4.9).

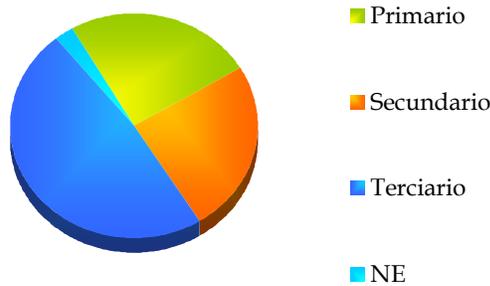


Figura 4.9. Población económicamente activa (PEA) por sector de actividad. Censo General de Población y Vivienda, México. INEGI (2000a).

Además del cambio de las actividades económicas Sánchez (1982, en Durán, 1985) dice que es importante señalar que la demanda de suelo para uso urbano le dio un gran valor a las tierras ejidales y comunales de la cuenca de México, que con su parcelamiento y su venta desde 1925 propiciaron el crecimiento de núcleos urbanos. En Chalco, por la venta de tierra desde la década de 1970, las poblaciones comenzaron a extenderse sobre terrenos planos dedicados a la agricultura, pero con el tiempo la demanda de espacios habitables hizo que los terrenos de cultivo y pastoreo se desplazaran a zonas más altas y alejadas de los cuerpos de agua, además de que originaron la distribución caótica de las áreas urbanas (Figuras 4.10).

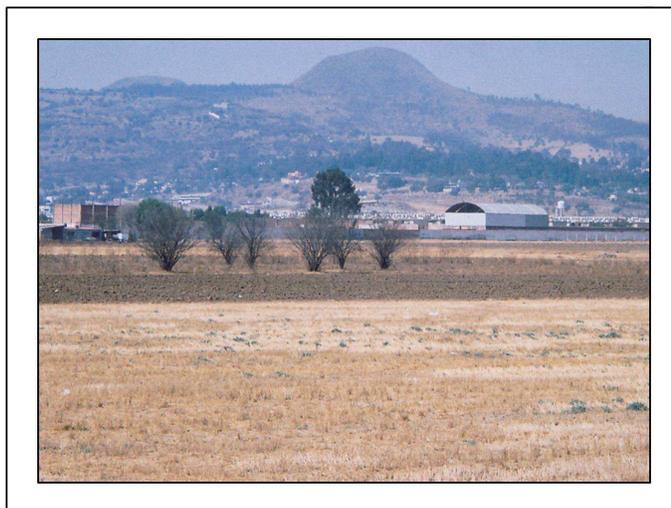


Figura 4.10-a. Se observa cómo la mancha urbana se extiende hasta las laderas del complejo volcánico El Pino. Enero de 2005.



Figura 4.10-b. Zonas con tala de bosques para la agricultura. Enero de 2005.

Este fenómeno continúa en la actualidad y representa uno de los problemas sociales más graves del área de estudio, ya que la población está dividida, una parte quiere vender sus tierras porque ya no es rentable la actividad agropecuaria, y otra parte de la población, de acuerdo con mi experiencia en trabajo de campo, está en desacuerdo, e incluso se muestra renuente con las personas ajenas al lugar porque creen que son representantes de las compañías constructoras que quieren comprar sus tierras para construir unidades habitacionales (Figura 4.11); éstas son de rápida construcción y a pesar de constituirse de viviendas pequeñas de interés social, en promedio alcanzan a ser 3,400 casas por unidad, diseñadas sin contar con los servicios adecuados para soportar una gran cantidad de población (Figura 4.12).

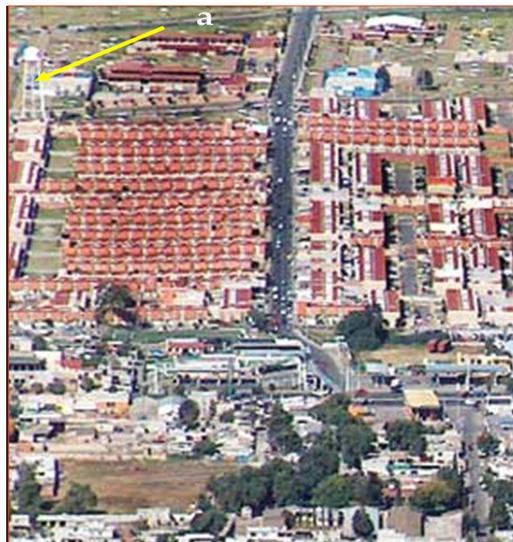


Figura 4.11. Unidad habitacional en el poblado San Jerónimo. a) Pozo de extracción de agua. Enero 2005.

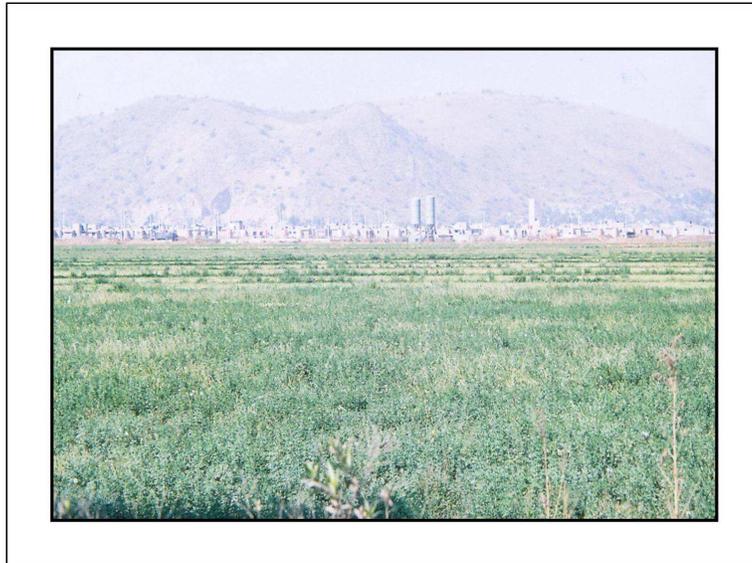


Figura 4.12. Unidad habitacional Lomas de Ixtapaluca, Chalco. Febrero de 2005.

Estas viviendas representan, para algunos sectores de la población, la opción de tener un patrimonio propio y, por ello, se puede prever que la población de las subcuencas de Chalco y Texcoco va a aumentar en gran medida a corto plazo (por la gran oferta de viviendas que hay) y con ella la demanda de servicios, que siempre han sido escasos. Así, serán necesarias fuertes inversiones para cubrir las demandas de la población. Además de los conflictos sociales, un problema grave es que los terrenos de cultivo, en menos de un mes, son transformados en casas habitación o comercios (Figura 4.13).

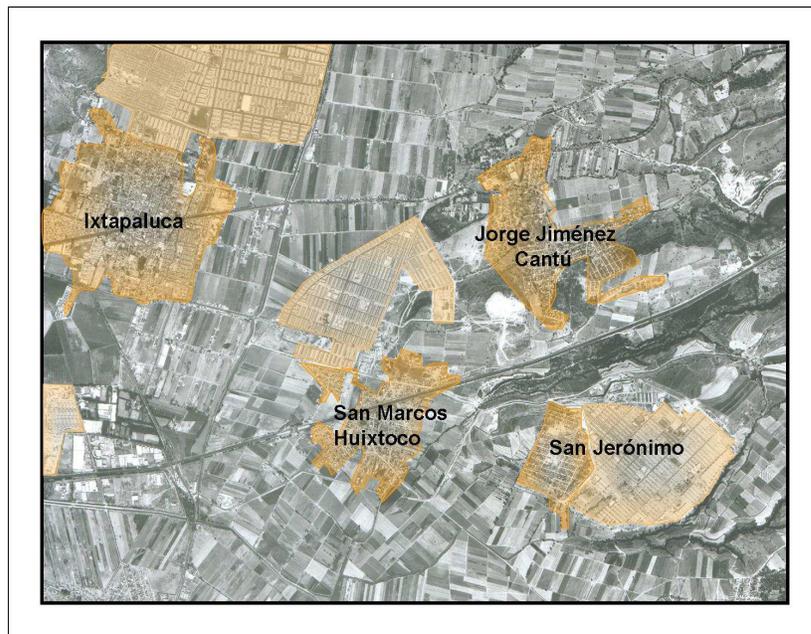


Figura 4.13. Fotografía aérea del INEGI (2000b) sobre la que se digitalizaron las localidades (anaranjado) que tienen una constante construcción de unidades habitacionales (anaranjado claro).

Otro factor que permitió la urbanización del área de estudio fue la construcción de vías de comunicación que a pesar de ser insuficientes, hicieron accesible el área a la población citadina e inmigrante.

Con el tiempo se construyeron poblaciones desordenadas, en su mayoría de viviendas precarias, carentes de los servicios básicos, pero que favorecieron al crecimiento de la mancha urbana y con ella, la cubierta de asfalto, reduciendo aún más las áreas de infiltración natural. Toda el agua pluvial que no se infiltra escurre y en pendientes suaves o moderadas se desplaza a mayor velocidad, arrastrando partículas suspendidas, que al depositarse en zonas bajas forman una capa impermeable que limita el paso del agua hacia niveles inferiores. Así aumenta la cantidad de agua de escurrimiento con déficit del abastecimiento subterráneo, generando, junto con los hundimientos de terreno, las condiciones para la ocurrencia de inundaciones.

4.2.4 Obras hidráulicas y extracción de agua subterránea

A continuación se hace un recuento de las características hidrológicas durante las épocas que más impacto tuvieron en la transformación de las condiciones naturales del área de estudio y la generación de los peligros que se estudian en el capítulo cinco.

Época Prehispánica

Una parte del agua precipitada era captada por los bosques e infiltrada al subsuelo para surgir en manantiales cerca de la ribera lacustre; otra parte del agua se evaporaba y mantenía constante la humedad atmosférica, la radiación nocturna, la temperatura y la velocidad de los vientos, contrarrestaba el impacto de las inundaciones; y otra parte del agua pluvial formaba escurrimientos que alimentaban el vaso lacustre. Por la diferencia altitudinal entre los cuerpos de agua de la cuenca, Texcoco por su menor altitud, se convertía en receptor de los excesos de agua de las otras subcuencas, y al desbordarse inundaba los asentamientos prehispánicos del vaso lacustre de México (Romero, 1999). Se considera que la primera obra hidráulica en la cuenca de México, se realizó en 1325 con la fundación de Tenochtitlán, después vinieron otras, como una serie de calzadas y bordos (Figura 4.14) para separar las aguas dulces y salobres de los lagos, controlar el paso del agua de un lago a otro y acequias para conducir las aguas de albañal fuera de las comunidades; todas modificaron el régimen hidrológico (Rojas *et al.*, 1974 en Bellia *et al.*, 1992).

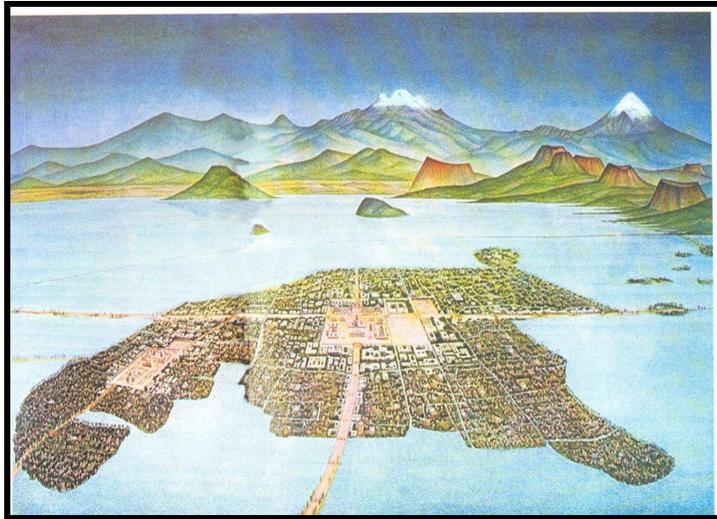


Figura 4.14. Reconstrucción pictórica de Tenochtitlán, Museo de la Ciudad de México. Tomada de Santoyo *et al.* (2005).

Época Colonial

Con la construcción de la ciudad de México, sobre las ruinas de Tenochtitlan se redujo la capacidad natural de infiltración y aumentó la erosión del suelo por arrastre fluvial, después el azolve impidió que acequias, diques y zanjas funcionaran adecuadamente; con el tiempo el impacto de las inundaciones empeoró. Para controlar y expulsar las aguas excedentes de la Nueva España durante las lluvias en 1607, inició la construcción del Tajo de Nochistongo y la presa El Rey para controlar las avenidas del Río Pachuca y se desvió el río Cuautitlán, así comenzó otra etapa de modificación de los lagos de la Cuenca de México.

En el siglo XVIII hubo numerosas inundaciones y un sismo que destruyeron muchas obras hidráulicas, se reconstruyeron y continuó la construcción del Tajo de Nochistongo así como la desecación general de la cuenca (Gurría, 1978).

Porfiriato

Durante muchos años la población hizo peticiones para controlar las inundaciones y sanear el sistema de drenaje sin recibir atención alguna; pero con la tercera reelección de Porfirio Díaz en 1888, se inició la construcción del sistema hidráulico para controlar corrientes de los ríos y el nivel de los lagos, evitar inundaciones y mejorar las condiciones para la actividad económica (Romero, 1999). Francisco de Garay propuso la construcción de un canal desde la Garita de San Lázaro hasta Texcoco con capacidad de desalajo de 33 m³/s, y tres canales secundarios, uno que conectara con el tajo de Nochistongo, otro entre Chalco y Zumpango y otro entre Chalco y Xochimilco. El inconveniente del proyecto fue que no tomó en cuenta que al aumentar la población también lo harían las aguas negras (Gurría, *op. cit.*).

Otros proyectos llevados a cabo en el siglo XIX fueron la construcción del túnel de Tequixquiac, que trasladaba el agua de Chalco y Xochimilco a las atarjeas de la ciudad México y después se enviaba, con las aguas negras, al Tajo de Nochistongo que se conectaba con el Río Pánuco y sacaba el agua de deshecho hasta la vertiente del Golfo; otra obra fue la construcción del gran Canal del desagüe, diseñado por Roberto Gayol para conducir los desechos domésticos y el agua pluvial fuera de la cuenca, hasta Tequixquiac. El problema que presentó fue que, por reducir el costo económico, sus dimensiones se redujeron provocando el constante azolve del drenaje; también se propuso la desecación de los lagos para evitar la insalubridad y aprovechar el suelo e instalar unidades agropecuarias y haciendas, esto causó que la chinampería comenzara a desaparecer y con ella la gran producción de maíz y hortalizas que abastecían a la ciudad de México.

Otra solución a la insalubridad fue la pavimentación de las calles, pero redujo la infiltración del agua pluvial y sus efectos nocivos ocasionaron inundaciones más frecuentes, aunque también tornó la ciudad accesible al tránsito de mercancías y personas aumentando a su vez la construcción de viviendas y centros comerciales, haciendo que el área urbana aumentara de 4,010 hectáreas en 1910 a 11,753 hectáreas en 1940 (Romero, 1999).

Durante el siglo XX el túnel de Tequixquiac presentó inestabilidad y se inició la excavación para construir otro túnel, que tuvo daños a los 6 meses y durante su remodelación se hicieron los dos túneles de Tequixquiac y se reforzaron los muros del lago de Texcoco. Esos dos túneles constituyeron el Drenaje Profundo que comenzó a funcionar en 1982 y hasta hoy día conduce las aguas negras de la ZMCM fuera de la cuenca de México (Bellia *et al.*, 1994). En la figura 4.15 se muestra la evolución de los lagos de la cuenca de México.

Todas las obras hidráulicas han afectado el régimen hidrológico de la Cuenca de México. En la subcuenca de Chalco, la agricultura, la ganadería y la tala de los bosques originaron la erosión de los suelos y apresuraron la reducción natural del lago; sin embargo, las obras humanas, orientadas a la desecación de los lagos o al abasto de agua potable, para la capital y las poblaciones circundantes, mediante la captación de los manantiales y la extracción de agua subterránea dieron como resultado la desaparición de los lagos de Chalco y Texcoco.

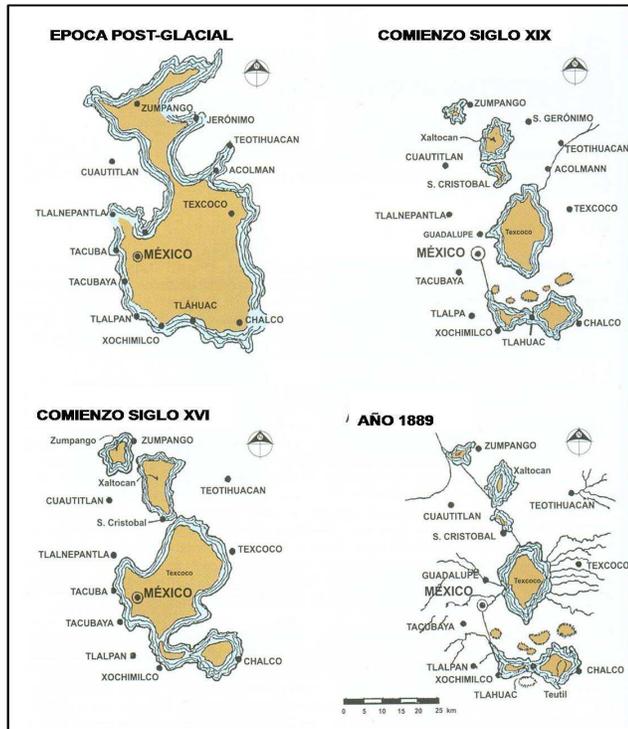


Figura 4.15. Evolución del gran lago de la Cuenca de México entre los siglos XVI y XIX. Modificado de Santoyo *et al.* (op. cit.).

En los últimos 50 años la alteración del ciclo hidrológico generó las condiciones semiáridas del área de estudio que influyeron en la presencia de tres fenómenos en las planicies lacustres de Chalco y Texcoco:

1. La mineralización de los nutrientes en los pantanos y relictos de los lagos, principalmente en Texcoco. A esto se le conoce como fase distrófica, la última de las cuatro fases por las que transcurre la vida de un cuerpo lacustre (fase oligotrófica, mesotrófica, eutrófica y distrófica) (Durán, 1985).
2. El origen de los suelos de tipo solonchak e histosol, ampliamente distribuidos en las planicies lacustres, debido a la disminución del nivel de agua por azolve y desecación.
3. Ocurrencia de deflación (tolvaneras) en la época seca, como consecuencia directa de las obras de desecación de los antiguos lagos que al dejar desnudos los suelos anteriormente cubiertos por agua el polvo fino y suelto de sus superficies es levantado y transportado a gran distancia por los vientos (Durán, op. cit.). Otras fuentes de material suelto son las canteras y los terrenos de cultivo no sembrados.

Estos fenómenos hasta hoy día, traen complicaciones a los habitantes porque la salinización de los suelos reduce el número de las especies cultivables a especies halófilas, como pastos, y hace

difícil y costosa la agricultura, ya que requiere la aplicación de lavados de suelo para disminuir la cantidad de sales; la deflación representa un problema de contaminación atmosférica que disminuye durante la época de lluvias, entre los meses de julio a noviembre, porque la temperatura desciende y consecuentemente, los fenómenos convectivos. Como solución, a partir de la década de 1970, se puso en marcha el Plan Lago Texcoco con la finalidad de dotar de agua a la creciente población e impedir las tolvaneras, ya que de acuerdo con la SARH (1986) el 40% de ellas se producían en la planicie lacustre de Texcoco.

El Programa Texcoco comprendió la construcción de lagos artificiales con poca superficie expuesta para almacenar y regular los escurrimientos de los ríos al oriente de la cuenca; tener agua para la actividad agropecuaria, industrial, servicios y recreación; controlar el desbordamiento de los ríos que confluyen en el exlago y eliminar el peligro de inundaciones; controlar la erosión, permitir la recarga de acuíferos; recuperar suelos y crear áreas de reserva para salvaguardar la flora y la fauna silvestre.

En el área de estudio la primera etapa del proyecto originó el lago artificial “Nabor Carrillo” (Figura 4.16), posteriormente se llevó a cabo la canalización y el encauzamiento de los tramos más importantes de los ríos de la subcuenca para alimentarlo.

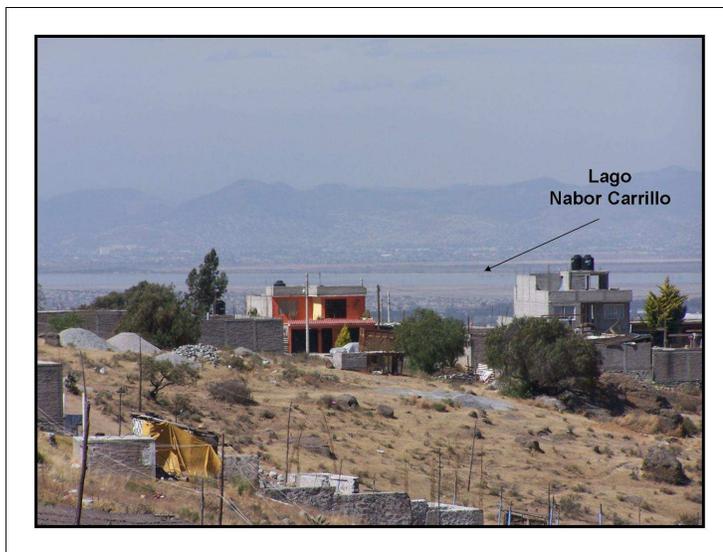


Figura 4.16. Al fondo se muestra el lago artificial Nabor Carrillo. Fotografía tomada desde la loma El Epazote, Sierra de Río Frío., Febrero de 2007.

Aunque la cantidad de agua en la cuenca, a principios del siglo XX, ya no era comparable con el volumen del siglo anterior, las inundaciones continuaban y, para evitar que el drenaje se azolvara se construyeron acueductos secundarios que también abastecieron de agua a la zona central de la ciudad de México. De acuerdo con Garza (1985 en Gutiérrez *et al*, 2005), este fue el segundo

impulso al crecimiento demográfico citadino y desde entonces se constituyó un fenómeno constante de alimentación recíproca entre economía y población, que a finales del siglo XX alcanzó al área de estudio. Al aumentar la concentración demográfica en la ciudad, el agua se tornó insuficiente y la situación empeoró cuando se eliminaron por contaminación, algunos manantiales que la abastecían, como los de Chapultepec (Romero, 1999). Para mantener el abasto de agua se dio impulso a la extracción de agua subterránea mediante pozos, pero aún hubo necesidad de importar agua a la ciudad desde los lagos de Xochimilco y Chalco así como del río Lerma, sin ser suficiente.

Esta explotación creciente de agua subterránea originó problemas de hundimientos en varias zonas de la cuenca que fueron documentadas en 1947 por el ingeniero Nabor Carrillo en un trabajo técnico, donde señaló que estos se debían a las presiones del manto acuífero localizado bajo la ciudad (Durán, 1985). En el área de estudio, el explosivo crecimiento de la población entre 1950 y 1990 generó la sobreexplotación de agua subterránea, pues no sólo debía abastecer a los núcleos urbanos que comenzaron a constituirse en Chalco y Texcoco sino también a la ciudad de México.

El agua de la ciudad de México proviene en un 70% de sistemas externos al Lerma y el resto se extrae de las subcuencas de Texcoco, Xochimilco y Chalco (Tabla 4.2). De estas fuentes, es en Chalco donde más se limita el recurso para abasto de la población porque el principal objetivo es la ciudad de México (Tabla 4.3); así la dotación de agua potable por habitante en Chalco es de 82 litros al día (Tabla 4.4). Del total de agua en los municipios metropolitanos el 80% se emplea en uso doméstico, el 15% en industria y el 15 % en comercio (Rodríguez, 1990 en Bellia *et al.*, 1992).

La sobreexplotación del acuífero subterráneo en Chalco trajo consigo la desecación y compactación de los suelos, así como hundimientos y fracturas de las cimentaciones, banquetas y tuberías; para evitarlos, la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (CHCVM) propuso en 1990 reducir el bombeo a límites que no ocasionaran movimientos en superficie e inyectar agua pluvial a los acuíferos por medio de pozos de absorción, pero esta idea fue descartada por la Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOH), porque se consideraba que esta agua estaría contaminada (SARH, 1986). En los últimos 10 años, estos problemas se han agravado con la formación de grietas en la planicie lacustre de Chalco, y para solucionar el problema los gobiernos municipales colocaron baterías en los pozos de extracción de agua, para no explotar la formación lacustre somera, sino los acuíferos más profundos; de este modo los pozos de 50, 100 y 200 m se sustituyeron por pozos de más de 400 m de profundidad (Bellia *et al.*, op. cit.).

Tabla 4.2. Volúmenes de agua (en m³/seg.) según fuentes de abastecimiento (1930-1950) con base en Romero (1999).

Fuentes de abastecimiento	Período		
	1930	1940	1950
Xochimilco-Chalco-Xotepingo	2.10	2.10	1.60
Pozos particulares	0.60	0.60	2.50
Pozos municipales	0.00	1.20	6.50
Diversos manantiales	0.40	0.40	0.20
Total	3.10	4.30	10.80

Tabla 4.3. Demanda, oferta y déficit de agua potable en el Distrito Federal y área metropolitana. Con base en Rodríguez (1990, en Bellia *et al.*, 1992).

Regiones	Población mill. Hab.	Demand a m ³ /s	Oferta m ³ /s	Déficit m ³ /s
Distrito federal				
1. Norte	2.2	8.15	7.14	1.01
2. Poniente	1.2	4.80	4.78	0.10
3. Centro	3.5	12.60	12.59	0.01
4. oriente	2.0	7.15	6.05	1.10
5. Sur	1.6	6.25	6.24	0.01
Subtotal	10.5	38.95	36.80	2.15
Municipios Metropolitanos				
1. Cuautitlán	0.5	1.60	1.60	--
2. Coacalco	0.5	1.40	1.30	0.10
3. Ecatepec	2.4	7.10	4.50	2.60
4. Nezahualcóyotl	2.1	5.00	3.50	1.50
5. Chalco	0.4	0.80	0.30	0.50
Subtotal	8.5	27.60	19.50	8.10
Total	19.0	66.55	56.30	10.20

Tabla 4.4. Dotación de agua potable por habitante en el Distrito Federal y área metropolitana. Tomado de Bellia *et al.*, (op. cit.).

Entidad y zona.	Dotación (litros / habitante / día)	Entidad y zona.	Dotación (litros/habitante/día)
Distrito federal:		Municipios metropolitanos:	
Norte	265	Naucalpan-Zaragoza- Tlalnepantla	258
Poniente	310	Cuautitlán	278
Centro	305	Coacalco	235
Oriente	255	Ecatepec	150
Sur	310	Nezahualcóyotl	139
Dotación promedio	303	Chalco	82
		Dotación promedio	198
Dotación promedio área metropolitana		256	

Capítulo 5. Peligros

Este capítulo integra los conocimientos recabados en los capítulos anteriores y les da aplicación en la elaboración del producto final, el mapa de peligros. Antes se analiza el tratamiento que le dan diversos autores. Los peligros son abordados a partir de la presencia del riesgo y el desastre. Generalmente son tratados desde el punto de vista histórico en publicaciones del Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS) y de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Algunos autores que han publicado sobre el tema son García Acosta (1992, 1996 y 1997), Maskrey (1993), Arntz y Fahrbach (1996), Lavell (1994), Espíndola (1990), García Acosta y Suárez Reynoso (1996), Gelman (1996) y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) de México (Lugo e Inbar., 2002); otros autores son Calderón y Hewitt (1995 en Calderón, 2001), Calderón (2001), y Ayala y Olcina (2002). Actualmente las formas de abordar el tema se están diversificando pero siempre están basados en dos posturas generalizadas que Calderón y Hewitt (1995) definen como visión dominante y alternativa, y una tendencia muy reciente que es el estudio de la percepción:

1. *Visión dominante.* Es la forma en que técnicos y especialistas estudian un peligro, riesgo o desastre, tomando sólo en cuenta las características cualitativas y cuantitativas del fenómeno natural y debido a que, regularmente son personas ajenas al lugar, es frecuente que no tomen en cuenta los problemas sociales o a la población afectada del sitio.
2. *Visión alternativa.* Estudia el tema a partir del análisis de las cada vez más acentuadas diferencias económicas y sociales, y el deterioro de algunos sectores sociales en las condiciones naturales y de vida. Algunas disciplinas sociales, como Antropología, Sociología, trabajo social, Historia y la propia Geografía social, han considerado esta posición como punto de partida para sus investigaciones y actualmente esta visión está tomando gran fuerza, debido a que a pesar del desarrollo tecnológico de las ciencias “duras”, éstas no han podido explicar el incremento de peligros, riesgos y desastres en los últimos tiempos; en cambio, con esta postura se da una respuesta y de acuerdo con Susman, O’keefe y Wisner (1983, *cit.* en Calderón, 2001) “se conoce que la frecuencia aumenta especialmente en naciones subdesarrolladas”, con base en que la creciente vulnerabilidad de las personas a eventos físicos extremos está conectada al subdesarrollo.
3. *La percepción.* Estudia la situación de cómo la sociedad percibe, individualmente o en grupo, los riesgos de índole natural. Esta forma ha dado origen a una amplia bibliografía en las

últimas décadas y ha sido el modo en que los geógrafos como científicos sociales trabajan los riesgos. Por ello, Ayala y Olcina (2002) dicen que en las sociedades contemporáneas los científicos no pueden seguir garantizando certidumbres con respecto a los riesgos tecnológicos y ambientales, sino que deben compartir sus dudas con la sociedad.

El alcance de este trabajo es sólo identificar los peligros y establecer sus áreas de influencia por unidad de relieve, y para llevarlo a cabo, además de aclarar la visión alternativa, que es la que se aplica en esta investigación, es conveniente precisar los conceptos teóricos bajo los cuales se rige el presente trabajo:

1. *Peligro*. Es la ocurrencia de un fenómeno natural o inducido por la sociedad en un territorio y en un tiempo determinado (Lugo e Inbar, 2002). El peligro puede ser: a) natural, cuando su origen se debe a la naturaleza, como sismos, erupciones volcánicas, ciclones, tornados, tsunamis, inundaciones, nevadas, entre otros; b) social, si deriva de las actividades humanas como derrames de petróleo, delincuencia, infecciones por falta de higiene, etc., y c) ambiental, cuando se genera por la combinación de causas naturales y sociales.
2. *Riesgo*. Es la probabilidad de ocurrencia de un peligro que afecte a una comunidad social y, de acuerdo con Anthony Giddens (1998, en Ayala y Olcina, op. cit.): riesgo y peligro no son lo mismo, puesto que el peligro implica sólo estudiar el fenómeno en sí y el riesgo implica el afrontar y evaluar activamente el fenómeno dañino, pero también impulsa a la sociedad a generar cambios a futuro para mejorar su bienestar en vez de abandonarla en las determinaciones de la religión, la tradición o la naturaleza.
3. *Desastre*. Es la situación de crisis o estrés derivada de la coincidencia de un fenómeno natural peligroso y determinadas condiciones sociales vulnerables en que la sociedad o parte de ella sufre daños y pérdidas para sus miembros, impidiendo la realización de sus actividades y operaciones habituales; éste se mide en intensidad, de acuerdo con la cantidad de habitantes afectados y debe ir asociado al grado de pérdida de la comunidad (Calderón, 2001; Lavell, 1992 y Maskrey, 1989, cit. en Ramírez y Stolarski, 1993).

5. 1 Peligros por unidad geomorfológica

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, las características físicas de la Cuenca de México como el clima, con elevadas precipitaciones concentradas en breves periodos propias de las fajas intertropicales, su ubicación dentro del SVTM, el subsuelo y su morfología, como cuenca

endorreica, hacen que dicha área sea a menudo objeto de aluviones e inundaciones (Bellia *et al.*, 1992); a pesar de que el estudio de los aspectos físicos es muy importante, más lo es la interacción de todos ellos con la sociedad; así, en este trabajo los peligros que se describen a continuación no son los de origen natural, sino los peligros ambientales generados por causas naturales, pero que han sido agravados por el crecimiento desordenado, tanto de la población como de la mancha urbana, que constantemente demandan recursos y alteran el equilibrio natural del área de estudio. Entre los peligros ambientales se encuentran inundaciones, hundimiento (subsistencia) y formación de grietas.

5.1.1 Inundaciones

En el área de estudio la unidad geomorfológica que se inunda periódicamente es la planicie lacustre porque es la zona más baja del relieve y en donde confluyen de manera natural las corrientes fluviales que escurren por la vertiente de la Sierra de Río Frío (Figura 5.1). Esta unidad, en Chalco está casi completamente cubierta por la mancha urbana y la acción antrópica se ha encargado de imponer obras de regulación a las corrientes fluviales que actualmente presentan graves problemas de obturación.

Si en los últimos años las inundaciones en Chalco se han intensificado es debido al aumento de la población, que en primer lugar, está alterando cada vez más el balance hídrico del área, haciendo que, en vez de evaporarse o infiltrarse, una mayor cantidad del agua pluvial escurra; y en segundo, de acuerdo con Bellia *et al.* (op. cit.) el canal de La Compañía que desaloja las aguas negras de la ciudad de Chalco y asentamientos circunvecinos, conduce caudales reducidos que no sufren incrementos notables en época de lluvias; sin embargo, hay que considerar a la población creciente que aporta una importante cantidad de basura y desechos orgánicos que azolvan el drenaje y propician que la escasa red de desagüe no pueda expulsar las aguas negras, situación que empeora en época de lluvias, cuando el flujo supera, por mucho, la capacidad de evacuación del cauce o canal, y entonces el agua excedente pasa a ocupar la planicie lacustre y ocasiona inundaciones en las poblaciones cercanas. Además de esto, se considera que el simple hecho de que la mancha urbana se extienda y ocupe cada vez más terrenos anualmente inundables, ya incrementa en sí la probabilidad e intensidad de las inundaciones.

De toda el área de estudio en la planicie lacustre de Chalco ha sido donde se han producido con más frecuencia las inundaciones que generalmente se deben a lluvias torrenciales y a la ruptura de los bordos en el canal de La Compañía y en sus afluentes. Como ejemplo de esto, a continuación se hace un breve recuento de las inundaciones que han ocurrido en el área de estudio en los últimos 50 años:

los vecinos de la colonia El Molino, en Ixtapaluca, porque según ellos el apoyo del gobierno estatal y federal siempre se concentra en Valle de Chalco. Sufrieron daños 151 comercios, 103 locales del mercado municipal “El Triunfo” y 11 vehículos; hubo también 119 personas damnificadas, 10 personas desaparecidas y una persona ahogada.

El 10 de junio de 2003, el canal de aguas negras Chimalpain, que cruza la zona habitacional de Xico, sufrió una fractura de 180 m de largo y 12 centímetros de ancho. El suceso afectó tierras ejidales de Mixquic y la delegación Tláhuac, así como una vivienda particular de la colonia Xico I.

El 5 de agosto de 2005, amaneció inundada la carretera federal de cuota No 190, a la altura del cerro Tlapacoya. Los vecinos de la calle 10, paralela a la carretera, dijeron que “un día antes comenzó a llover por la tarde, e incluso cayó granizó, y no paró en toda la noche”, esta lluvia torrencial desbordó el canal de aguas negras La Compañía (Figura 5.2) y generó dos inundaciones, la primera a las 2:30 PM y la segunda a las 8:00 PM, en las colonias cercanas, situadas sobre la carretera. Por la mañana los habitantes pidieron una solución a las constantes inundaciones en época de lluvias, porque saben que si el agua no se bombea cuanto antes, puede quedarse en el lugar fácilmente una semana y provocar enfermedades, y al no recibir respuesta de las autoridades municipales y estatales cerraron la autopista frente a la caseta vieja; esta medida afectó el flujo de vehículos de pasajeros y de carga generando el embotellamiento en esa parte de la carretera (Figura 5.3).



Figura 5.2. La barda azul es la parte reconstruida del canal de La Compañía que se rompió. Agosto de 2005 sobre la carretera federal de cuota No 190, frente al cerro Tlapacoya.



Figura 5.3. Embotellamiento sobre la carretera No 190. En la mañana del 5 de agosto de 2005 el nivel del agua en la autopista era de 35 cm.

Al recorrer el área afectada, desde la calle 10 hasta la calle oriente, se confirmó que las casas ubicadas del lado sur de la carretera están a un nivel altitudinal menor con respecto a ésta (porque es la zona de transición hacia la planicie lacustre que queda al sur) y por ello al desbordarse del canal, el

agua siempre se dirige hacia esos asentamientos que se inundan en parte por el azolvamiento del drenaje; en la colonia San Isidro se observó que generalmente hay un pequeño muro de unos 20 cm frente a las puertas para frenar un poco la inundación de las viviendas (Figura 5.4).



Figura 5.4. Calle División del Norte casi Esq. con la autopista México-Puebla. Muestra las casas inundadas. Agosto de 2005.

5.1.2 Subsistencia

Según Santoyo *et al.* (2005), la extracción de agua de los acuíferos se califica como sobreexplotación cuando se extrae un volumen mayor que la capacidad de recuperación, y tal abuso en una región tiene dos consecuencias:

1. La inevitable reducción de agua extraíble, que llevada al límite puede agotar la fuente y reducir la producción agrícola del lugar.
2. El descenso gradual pero continuo del nivel de los acuíferos que provoca, a su vez, la disminución de las presiones del agua intersticial e incrementa el esfuerzo que actúa efectivamente en la parte sólida del suelo. Esto último desencadena el proceso de consolidación de los estratos de suelos blandos de toda a región afectada por el bombeo, y se manifiesta con hundimiento de la superficie que casi siempre termina por dañar a las construcciones e instalaciones municipales.

En el primer reporte técnico-científico sobre subsidencia Gayol (1929), asoció el hundimiento con la extracción de agua subterránea. Y gracias a los estudios de Nabor Carrillo y otros especialistas en mecánica de suelos se determinó que, en el exlago de Texcoco, el suelo o “jaboncillo” está compuesto de 90 a 94% de agua y de un 6 a 10% de materia sólida o arcilla (Santoyo *et al.*, 2005).

Con base en esto, ahora se sabe que cuando las arcillas blandas lacustres pierden agua comienzan a compactarse, y de acuerdo con Marsal y Mazari (1962 en Santoyo op. cit.) tal procedimiento ha provocado un hundimiento generalizado en la ciudad de México de 4 m, con zonas de hasta 8 m, pero que al oeste de Chalco la velocidad de hundimiento es de 13 cm/año. Para analizar el hundimiento diferencial Terzaghi y Peck (1967 en Ayala y Olcina, 2002) dividieron los suelos arcillosos, de acuerdo con su nivel de equilibrio hidromecánico en:

1. *Normalmente consolidados*. Están comprimidos a una presión igual a la que tienen.
2. *Subconsolidados*. No están consolidados bajo presión, por lo que son propensos a la compresibilidad, y por tanto a una mayor subsidencia; se encuentran en zonas deltaicas, estuarinas y costeras.
3. *Consolidados*. Han sido consolidados bajo una presión mayor que la que tienen y son, después de los suelos subconsolidados, propensos al proceso de consolidación y por tanto, también, a sufrir hundimiento.

En el área de estudio los hundimientos se deben a tres factores: 1) la sobreexplotación de agua subterránea para abastecer a la población, 2) la compactación de las arcillas debido a su poca consistencia y 3) el peso de las construcciones que consolida aún más las arcillas.

Los hundimientos siempre han existido desde que se inició la desecación de los lagos, el problema es que con la urbanización, desde principios del siglo XX, se han enmascarado bajo las cimentaciones. En los últimos años en las poblaciones de Ixtapaluca, Los Reyes, San Vicente Chicoloapan y Valle de Chalco se han manifestado de manera repentina obligando a la reubicación de viviendas y empresas.

Durante el trabajo en campo, el día 24 de febrero de 2005, se encontraron grietas y hundimientos diferenciales en el cráter freático-magmático Xico. La ruta que se siguió para marcar los puntos de control alrededor del cráter (Figura 5.5) comenzó en la calle Paraíso, se continuó por la Ave. Francisco Sarabia, donde sólo se encontró una grieta visible en medio de la carretera (Figura 5.6), y en el cruce con cerrada de la Virgen se continuó sobre la Av. Adolfo López Mateos, donde la grieta que se encontró era una ramificación de la anterior y fue sobre esta calle que se encontraron varias viviendas populares dañadas por fisuras y agrietamientos (Figura 5.7). En el cruce de Av. A. López Mateos y calle Paso de Cortés se localiza la iglesia de la ex-hacienda Xico muy dañada que permite tener una idea del desplazamiento que ha tenido la ladera de Xico hacia la planicie lacustre y del gran riesgo que corren los habitantes de esas colonias (Figura 5.8).

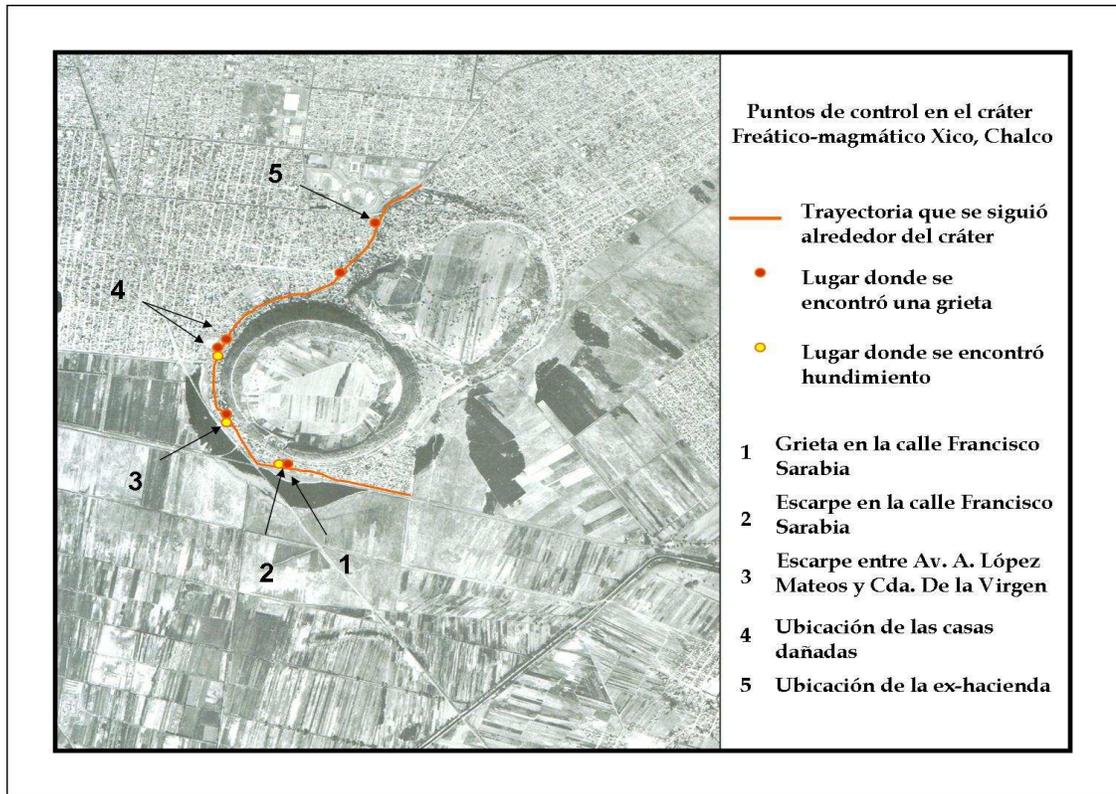


Figura 5.5. Fotografía aérea de Xico (INEGI, 2000d) sobre la cual se digitalizó la ruta del trabajo en campo, muestra los puntos donde se encontraron grietas y hundimientos.

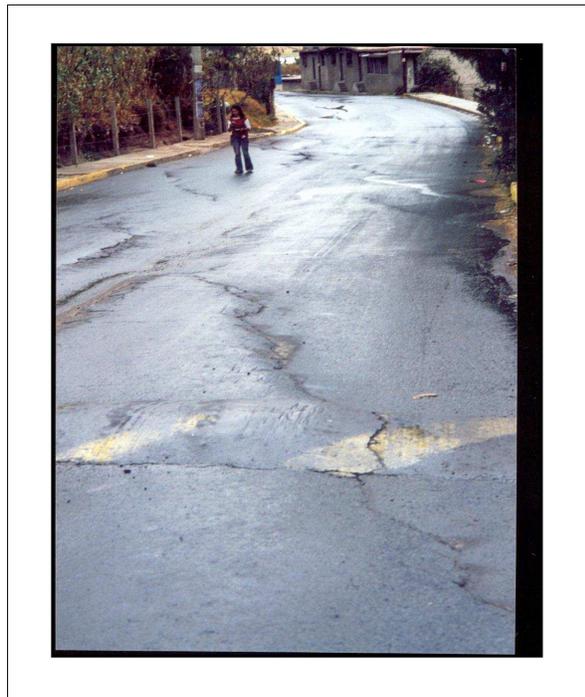


Figura 5.6. Grieta visible que se extiende a lo largo de la Avenida Francisco Sarabia. Febrero de 2005.

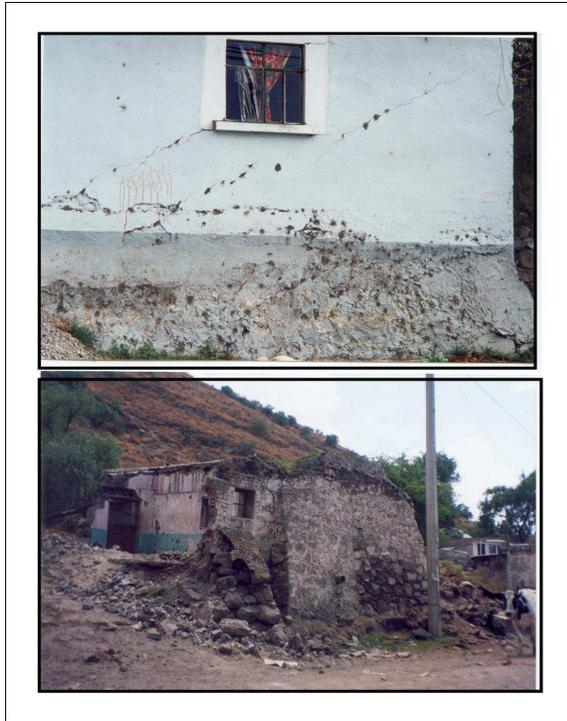


Figura 5.7. Arriba, casa con bardas fisuradas. Abajo, casa de la familia Fortino González totalmente destruida. Ambas sobre la Av. López Mateos. Febrero de 2005.

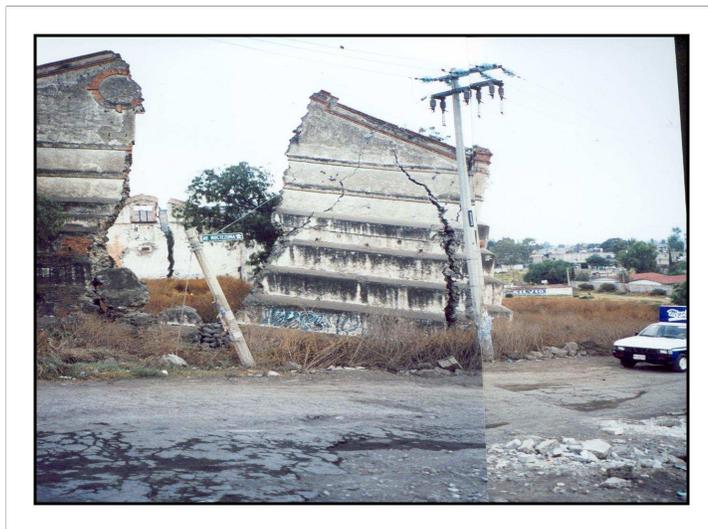


Figura 5.8. Exhacienda de Xico ubicada en el cruce de Av. A. López Mateos y calle Paso de Cortés en la ladera inferior del cono. Febrero de 2005.

Con base en los datos cualitativos y cuantitativos recabados a lo largo del recorrido se concluyó que tanto los hundimientos como las grietas son deformidades concéntricas dispuestas alrededor de Xico que se producen porque al hundirse la planicie lacustre de Chalco “jala” la ladera inferior de Xico deformándola (Figura 5.9). Este hundimiento que le da un aspecto escalonado a las laderas, a su vez, genera grietas de tensión perpendiculares a la pendiente (Figura 5.10).



Figura 5.9. Sobre la Av. A. López Mateos, cerca de las casas dañadas, los postes de luz se inclinan hacia la planicie lacustre. Febrero de 2005.

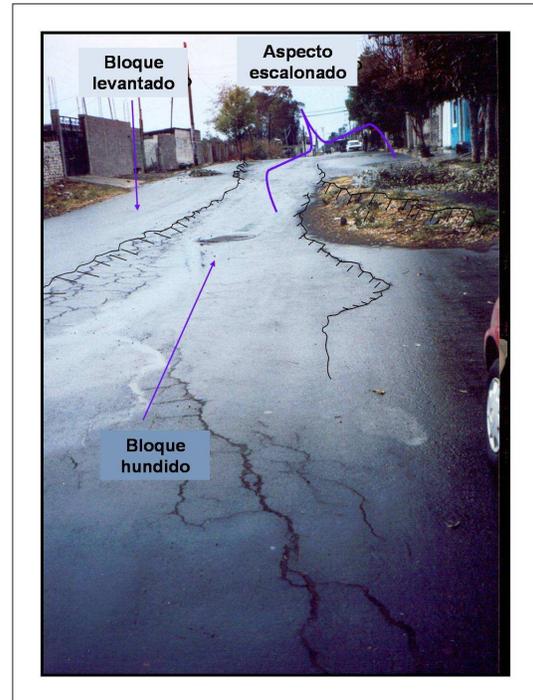


Figura 5.10. Sobre la calle Francisco Sarabia se encontró un desnivel de 25 cm. Al centro de la calle se puede observar una depresión formada por el escalonamiento que genera el hundimiento en la ladera de Xico.

De acuerdo con Ortega *et al.* (1999, en Ortíz y Ortega, 2007) la subsidencia del terreno se produce por la consolidación de los sedimentos finos de la secuencia lacustre (acuitardo) debido a la pérdida de agua por la disminución de carga hidráulica en el acuífero sujeto a bombeo. Este gradiente hidráulico induce una aportación de agua del acuitardo hacia el acuífero subyacente y el cambio volumétrico se manifiesta en una deformación vertical del terreno o hundimientos.

Según Ortíz y Ortega (op. cit.) la velocidad del hundimiento en el centro de la planicie de Chalco, después del inicio de operación del Sistema de pozos Mixquic-Santa Catarina en Valle de Chalco, ha sido de aproximadamente 40 cm/año, donde el espesor del acuitardo es de 300 metros, y de 5 cm/año cerca del límite de la planicie, donde el espesor es cercano a 50 metros.

En general, las consecuencias del hundimiento son la pérdida de pendiente en el drenaje que provoca que las aguas negras en vez de salir regresen a la ciudad y sea, entonces, necesario contar con más y mejores plantas de bombeo (Santoyo *et al.*, 2005).

Entre las propuestas que hay para evitar el hundimiento y el daño de las construcciones (principalmente viviendas), están: 1) reforestación, 2) inyección de agua pluvial al subsuelo mediante pozos de absorción, especialmente ubicados en las tobas, 3) el endurecimiento del subsuelo arcilloso blando para incrementar su capacidad de carga, método ensayado en la ciudad de México por Enrique Tamez, 4) aumentar la profundidad de los pozos de extracción de agua pues se sabe que los valores más altos de hundimiento se dan cuando los pozos están a menos de 60 m de profundidad y entonces por cada 100 m³ de agua extraída, la superficie se hunde de 15 a 30 m³, en cambio, si el bombeo se hace a más de 80 m, por cada 100 m³ de agua extraída la superficie se hunde 1.3 m³, 5) estudiar la posibilidad de explotar los acuíferos confinados en las calizas que subyacen a los depósitos lacustres y las vulcanitas que se encuentran bajo la cuenca y 6) no extraer más agua de lo que los cálculos indiquen para evitar el abatimiento del nivel piezométrico (Ibid.).

5.1.3 Formación de grietas

El asentamiento progresivo del terreno (por sobreexplotación de los mantos artesianos) ha generado en las zonas de transición, entre las planicies lacustre y aluvial, una corriente de agua muy lenta en las capas de jaboncillo, y con ello la rotura de su estructura provocando un agrietamiento. Desde la década de 1950 en la planicie del antiguo lago de Texcoco se ha observado este fenómeno de fisuramiento de las arcillas (Santoyo *et al.*, 2005); sin embargo, actualmente este fenómeno se ha extendido, no sólo dentro de la cuenca de México, sino también en otras ciudades de la República Mexicana como son Abasco, Silao, Celaya e Irapuato, Guanajuato; Zapopan, Jalisco; Xochitlá, Tlaxcala; Toluca, Estado de México; Morelia, Michoacán y Querétaro, entre otras (Lugo *et al.*, 1991).

El primero en explicar la mecánica de formación de grietas con fundamentos fue Nabor Carrillo y después de él muchos han estudiado este fenómeno y lo han atribuido a diferentes causas: Hiriart (1952) consideró que el agrietamiento derivaba del hundimiento de la ciudad de México. Por su parte Juárez-Badillo (1959) lo atribuyó “a esfuerzos inducidos en el terreno al anular la tensión del agua producida por una intensa y prolongada evaporación superficial”. Entre las publicaciones más recientes están las de Riquelme (1974), Figueroa (1984), Alberro (1990 y 1991) y Alberro y Hernández (1988, 1990), éstos últimos consideraron que las grietas se deben a esfuerzos de tensión por evaporación y encharcamiento del agua pluvial, bombeo y exceso de presión por artesianismo en capas permeables confinadas por materiales impermeables del subsuelo (Lugo *et al.*, op. cit. y Santoyo *et al.*, op. cit.).

Actualmente se sabe que el mecanismo de formación de las grietas es por fisuramiento hidráulico; esto es, que el agua acumulada en la superficie penetra en una discontinuidad y genera un incremento de las presiones horizontales en su vértice inferior propagando la grieta (Figura 5.11) (Ibid.).

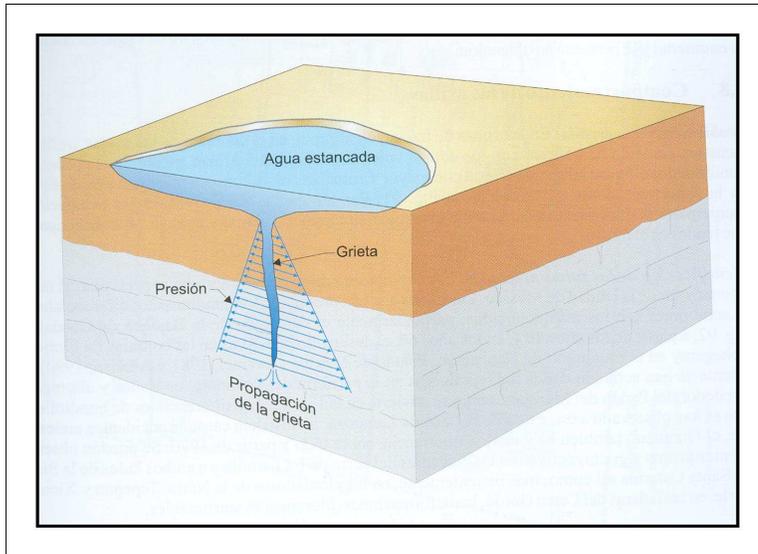


Figura 5.11. Modelo del fisuramiento hidráulico en una grieta. Tomado de Santoyo *et al.* (2005).

Entre 1986 y 1990 se formaron grietas anchas, de forma repentina en cuatro localidades distintas del oriente de la cuenca de México: Ayotla, Chicoloapan, Ixtapaluca y Tlapala (Lugo *et al.*, 1991). En los últimos años también se han encontrado, dentro del área de estudio, en Chimalhuacán, Huexoculco, Tlalpizahuac, Miraflores, Mixquic y Huitzilzingo. De acuerdo con Lugo *et al.* (op. cit.), por lo general se forman en las condiciones siguientes:

1. Zonas planas (planicies lacustre, aluvial-lacustre y aluvial) o en la transición entre planicie aluvial y piedemonte, donde la inclinación es débil (menor a 3°); frecuentemente son terrenos de cultivo o zonas urbanas.
2. En terrenos de sedimentos finos (de arcillas a arenas) con buena afluencia hídrica, por la presencia de montañas contiguas y donde se acumula el agua en superficie.
3. En zonas con precipitación pluvial media anual mayor a 500 mm; se forman con lluvias torrenciales.
4. En zonas a menos de 3 km de la ribera de los lagos desecados de Chalco y Texcoco.
5. Regularmente, a menos de 1 km de distancia de la grieta hay un pozo de bombeo.
6. Y en épocas cuando el nivel freático, originalmente cercano a la superficie, está a más de 30 m de profundidad.

Durante el trabajo en campo se visitaron las localidades de San Vicente Chicoloapan, Chimalhuacán y Tlapala, donde cada año, en época de lluvias, se forman o reactivan sistemas de grietas.

Grietas en San Vicente Chicoloapan

El 10 de julio de 1989 se produjo una lluvia torrencial durante 20 minutos, que aprovechó las calles transversales al flujo como canales de circulación, y generó o reactivó un sistema de grietas que afectaron, en diverso grado, a varias construcciones modestas en la Colonia Santa Rosa. Los vecinos comentaron que esta grieta se había manifestado, por lo menos, cinco años antes, pero siempre como fisuras milimétricas en anchura; sin embargo, en esa ocasión la grieta se extendió a través de tres manzanas, en terrenos que fueron agrícolas y después baldíos, y alcanzó 6 m de profundidad, después fue rellenada y se redujo a un par de metros. A fines de agosto de 1990, esta grieta se había vuelto a abrir a causa de aguaceros y para agosto de ese año, ya medía 5 m más de longitud (Figura 5.12) (Lugo et al., 1991).

Durante el trabajo en campo, el 20 de enero de 2005, se visitó la zona donde se había formado la grieta en 1989 (calle Nardo No 7 casi esquina con calle 12, colonia Santa Rosa) para dar continuidad al monitoreo de la grietas iniciado por Lugo. Ese día no fue posible tomar una fotografía de la casa afectada porque había una barda recién construida que no permitió ver cómo estaba el terreno por dentro, por ello se fotografió el otro lado de la calle Nardo (frente al No 7) hacia donde se extendía la grieta. (Figura 5.13).

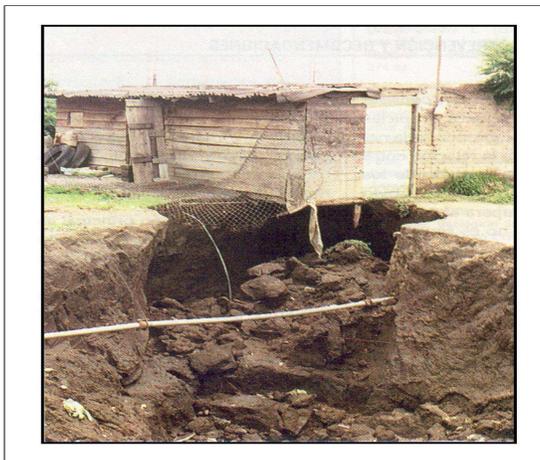


Figura 5.12. Casa dañada por la grieta en 1989. Tomada de Lugo et al. (1991).

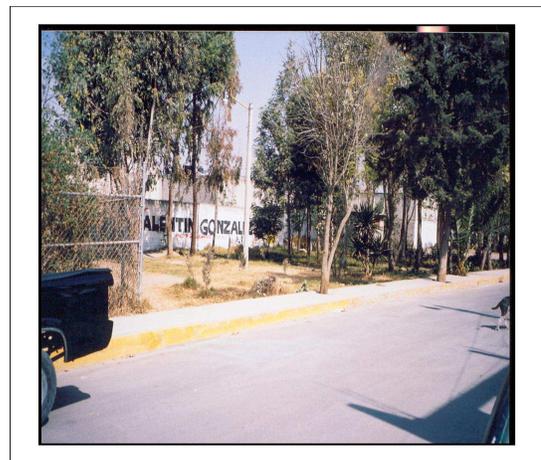


Figura 5.13. Terreno frente a la casa dañada. Actualmente la grieta no se ve, la calle está pavimentada y el lote baldío está ocupado por varias viviendas. Enero de 2005.

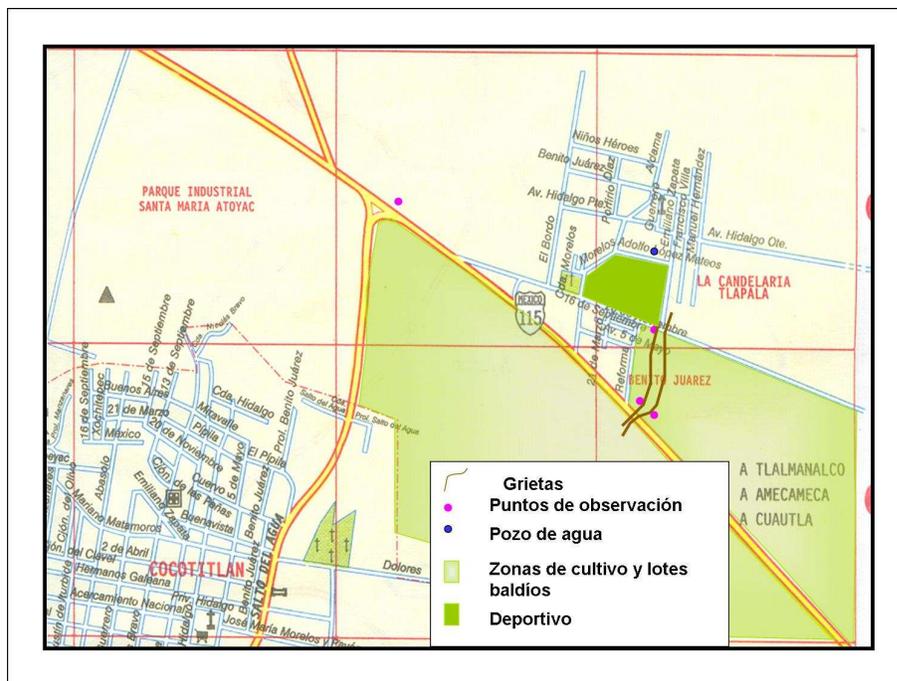


Figura 5.15. Plano de Tlalapa en Chalco. Tomado y modificado de Guía Roji (1998). Muestra las grietas (líneas sepiá), los puntos de observación (puntos rosas) y el pozo de agua (punto azul).

Grietas en Chimalhuacán

En campo se recorrieron varias colonias alrededor de Chimalhuacán y se observó el 27 de diciembre de 2005, siete grietas, de las cuales tres se describen a continuación:

1. En la cancha de fútbol en el cruce de Av. de las Peras y Calle Huayeli, Colonia Barrio Saraperos, una presentó orientación de 10° NE.
1. En Av. Organización Popular casi esquina con Yacatle, en el estacionamiento de una iglesia, una grieta con más de 60 m de longitud se veía en las paredes como fisuras, su orientación era de 60° NE. El encargado comentó que fue rellenada 2 meses atrás.
2. Entre las calles Gardenia y Dalia, Barrio San Hipólito, se encontró otra grieta en un campo de fútbol. Un vecino comentó que se abrió por primera vez en agosto de 2005 y fue rellenada en los primeros días de diciembre, su orientación fue de 30° NE; atravesó la escuela primaria José María Pino Suárez, donde se estaban reforzando las bardas interiores, y gracias a las obras, se observó el aparente nivel freático a menos de 1 m de profundidad, y continuó sobre la calle Italia hasta un terreno baldío frente a la escuela, donde su orientación era de 65° NE, y progresivamente cambió hasta alcanzar una dirección de 85° NE (Figura 5.16). La longitud total de la grieta era aproximadamente de 188 m, con una anchura de 45 cm y una profundidad promedio de 60 cm.

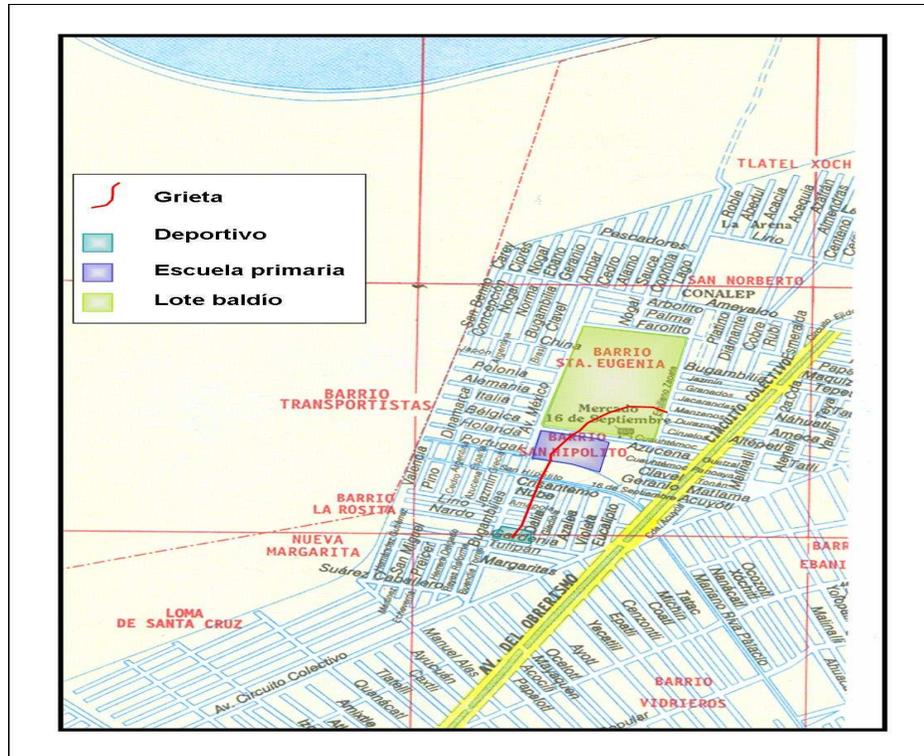


Figura 5.16. Plano de la grieta en el barrio de San Hipólito, Chimalhuacán Estado de México. Tomado y modificado de Guía Roji (1998).

La problemática social actual por la formación de grietas está enfocada a los daños en instalaciones municipales y particulares. Debido al fuerte proceso de urbanización del área de estudio es frecuente que estas grietas no sean visibles y se tenga la completa confianza de construir un patrimonio en una zona peligrosa, pero existe la probabilidad de que con una lluvia torrencial se formen o reactiven grietas que destruyan parcial o totalmente las viviendas y pongan en riesgo la vida de sus habitantes. En las unidades habitacionales el problema social se agudiza, debido a que muchas familias, con la aspiración de tener un patrimonio propio, compran su casa a pagar en un plazo de 30 años, pero en menos de 5 años de haberlas comprado, éstas comienzan a presentar agrietamientos y después, las compañías constructoras no se responsabilizan de los daños.

5.2 Peligros sociales derivados de la sobrepoblación

Los peligros y riesgos sociales son, relativamente, nuevos y se puede decir que son el carácter híbrido, socionatural, de los fenómenos ambientales extraordinarios. Destacan la estrecha relación entre naturaleza y tecnología y hacen la frontera entre riesgos naturales y tecnológicos, cada vez más borrosa y obsoleta (Ayala y Olcina, 2002). Actualmente ya no es válido estudiarlos como resultado del fenómeno natural porque derivan de una construcción social.

5.2.1 Falta de servicios

Las reformas en 1994 al Artículo 27 constitucional, que liberaron jurídicamente la venta masiva de terrenos ejidales, y la promulgación en 2001 del "Bando 2" del Gobierno del DF, que prohibió los fraccionamientos de vivienda en nueve delegaciones, facilitaron e influyeron en la expansión metropolitana hacia 50 municipios conurbados del Estado de México e Hidalgo. Desde hace 12 años esta situación ha sido aprovechada por las compañías constructoras como Geo, Demet, Ara, Hir, Beta, Sare, Urbi y Sadasi e incluso por las de interés social, como Infonavit, Fovissste y Fovi, para adquirir terrenos de uso agrícola y forestal de propiedad ejidal, comunal y privada, para crear fraccionamientos para sectores medios (Figura 5.17). Estas acciones han generado un fuerte impacto ambiental y urbanístico que ni en ese momento, ni ahora, ha sido considerado por las autoridades que siguen permitiendo la venta y transformación de terrenos agrícolas (Figura 5.18).



Figura 5.17. El 24 de febrero de 2005 estos terrenos ubicados sobre la carretera 115 (500 m después de la unión con la carretera 190) eran agrícolas; pero 10 meses después se transformaron en construcciones y en 2007 contienen las unidades habitacionales de Lomas de Ixtapaluca.



Figura 5.18. Sobre la carretera 115, al este de Chalco, terrenos agrícolas en febrero de 2005 se transformaron a diciembre de 2006 en un gran conjunto comercial. Febrero de 2007.

El problema del crecimiento de la mancha urbana es que lo hace a la manera tradicional, sin contar con los servicios básicos o necesarios para que la población pueda tener un buen nivel de vida; primero se forman los asentamientos y después se introducen los servicios; así, en el área de estudio, es común encontrar embotellamientos por la falta vías de comunicación y colonias que tienen poco más de 20 años de haberse formado y que apenas empiezan a ser pavimentadas o a tener la infraestructura apropiada para agua potable y drenaje.

Generalmente los poblados ubicados en la planicie aluvial o el piedemonte, descargan sus aguas residuales en un arroyo cercano que las dirige al canal de La Compañía para sumarse al agua que desalojan las zonas habitacionales de Valle de Chalco y Nezahualcóyotl; continúan hasta las lagunas de regulación del Plan Texcoco y por último al Gran Canal del Desagüe. Las nuevas unidades habitacionales también, generan desechos que aumentan las descargas de aguas negras y, cada vez más, saturan el drenaje principalmente en época de lluvias, influyendo en la ocurrencia de inundaciones en las localidades de la planicie lacustre. Como ejemplo, en San Vicente Chicoloapan, donde también hay un gran impulso a las unidades habitacionales, las aguas negras son dirigidas por los ríos El Manzano y Coatepec hacia los alrededores del lago Nabor Carrillo, aportes muy riesgosos para el área urbanizada de Chimalhuacán y el Plan Texcoco.

5.2.2 Contaminación del agua y riesgo sanitario

Entre los efectos negativos de los fenómenos hídricos extremos, adquiere singular relevancia el deterioro de la calidad de aguas superficiales y subterráneas, principalmente por las condiciones precarias higiénico-sanitarias, relacionadas con procesos de rápida urbanización y que contribuyen a la dispersión de contaminantes orgánicos, como heces fecales, una de las principales fuentes de ingreso de nutrientes en los cuerpos de agua, que aumentan la productividad y la biomasa vegetal (fenómeno de eutrofización) que proporciona el sustrato vegetal, propicio para el establecimiento de macroinvertebrados, mosquitos y moluscos planórbidos, vectores de enfermedades (Lugo e Inbar, 2002 y Bellia *et al.*, 1992).

En el área de estudio, una forma común de contaminar los cuerpos de agua superficial es convertirlos en tiraderos de basura; un ejemplo es el caso de las lagunas Xico, tierras inundadas, ciénagas, pastizales y matorrales a las que cada año llegan aves migratorias del norte de América y sirven como zona de desfogue al río Amecameca y al Canal General. En 2004 fueron nombradas “Santuario del Agua” y actualmente funcionan como lagunas de oxidación debido a que transportistas de la Confederación de Trabajadores de México (CTM), a la altura del kilómetro 6 de la carretera Chalco-Mixquic, depositan diariamente varias toneladas de casajo.

La forma de contaminar los cuerpos de agua subterránea es mediante la infiltración de lixiviados a través de las grietas pues, se usan como tiraderos de basura y de animales muertos (Figuras 5.19). Otras fuentes de contaminación son los basureros de Santa Cruz Meyehualco y Tezonco, al poniente de la subcuenca y Santa Catarina y Tláhuac dentro de la zona de estudio.



Figuras 5.19. Grieta formada por primera vez en 1989 y reactivada en la época de lluvias de 2004, se localiza en las afueras de la colonia Santa Rosa al suroeste de Chicoloapan, Estado de México. Febrero de 2005.

Tiradero de Santa Catarina

Se ubica en el municipio de La Paz, Estado de México, y cubre un área de 500 hectáreas. Hasta 1982 fue tiradero a cielo abierto sin ningún control y después se convirtió en relleno sanitario. Se ubica en las laderas del volcán La Caldera, a un lado de la carretera México-Puebla. Por estudios ingenieriles se justificó corregir su inclinación terraceando sus laderas para darles seguridad y ampliar el área de depósito (Figura 5.20), asimismo se perforaron pozos para el venteo del biogás, drenes horizontales para desalojar la acumulación de lixiviados y una planta al pie de ese relleno para seleccionar desechos sólidos domésticos que, actualmente, son enviados al Bordo poniente, porque el relleno Santa Catarina está prácticamente clausurado (Santoyo *et al.*, 2005).

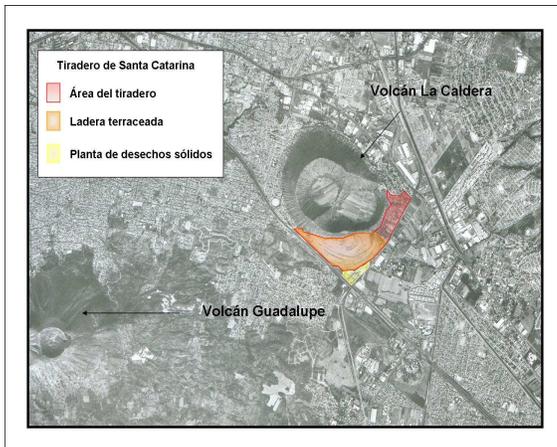


Figura 5.20. Fotografía aérea del INEGI (2000) sobre la cual se digitalizaron el área del tiradero (rojo), la zona terraceda (anaranjado) y la planta de desechos sólidos domésticos (amarillo).

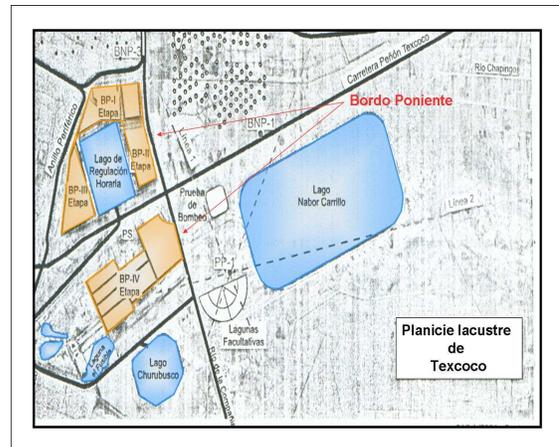


Figura 5.21. Muestra las etapas del Bordo poniente (anaranjado) y los cuerpos de agua cercanos al tiradero de basura (azul). Modificado de Santoyo *et al.* (2005).

Bordo Poniente

Se localiza en la planicie lacustre de Texcoco, al noroeste del área de estudio (Figura 5.21). Se utilizó para depositar gran parte de los escombros recogidos después de los sismos de 1985. Sus primeras tres etapas abarcan una superficie de casi 250 hectáreas, la cuarta etapa es la más amplia y cuenta con una planta de selección de desechos sólidos. Estas secciones están dispuestas alrededor del lago de regulación horaria y por ello se han discutido los riesgos que este relleno representa por la penetración de lixiviados directamente en el acuífero de Texcoco, pero, de acuerdo con Santoyo *et al.* (2005), el Bordo de Xochiaca, que no tiene ningún control representa un peligro mayor para el acuífero de la cuenca de México.

5.3 Cantidad de población por unidad geomorfológica

Las soluciones que requieren las áreas urbanas a los peligros ya antes mencionados son, de acuerdo con Santoyo *et al.* (2005) un reto tecnológico que se debe sustentar en un análisis de la historia de su poblamiento. Pero también es necesario tener en cuenta la distribución heterogénea de la población en el relieve y al respecto Gutiérrez *et al.* (2005) explican que esta variación es el resultado de una serie de factores históricos, económicos, políticos, sociales, culturales y físicos que no pueden analizarse individualmente, pero que sí es posible encontrar relaciones entre su influencia y la ubicación de viviendas; prueba de ello es que a lo largo del siglo XX, más del 99% de la población urbana se estableció en las planicies lacustres, debido a que son las partes más bajas y llanas de la cuenca, que contienen suelos volcánicos fértiles y facilitan la construcción de viviendas, el cultivo de tierras y su irrigación.

Debido a la falta de datos sobre la cantidad de población por unidad del relieve en el área de estudio se emplearon como base de referencia los estudios de Gutiérrez *et al.* (op. cit.), a nivel general de la cuenca de México, los que explican que en el año 2000 el 96% de la población total urbana habitaba en la planicie lacustre, el 2% en la planicie proluvial y menos del 1% en el piedemonte y relieve montañoso porque las pendientes pronunciadas dificultan el cultivo de la tierra, la retención del agua y las comunicaciones (Figura 5.22).

Con base en los datos anteriores se puede concluir que, si los factores históricos son importantes, aún lo son más los aspectos físicos que guían el crecimiento demográfico y su expansión; aunque en los últimos años, debido a la explosión demográfica del área de estudio, las poblaciones han comenzado a extenderse hacia el piedemonte e incluso a la porción inferior de las laderas de cerros, como Coatepec, Ixtapaluca, Ayotla y Chimalhuacán, entre otras.

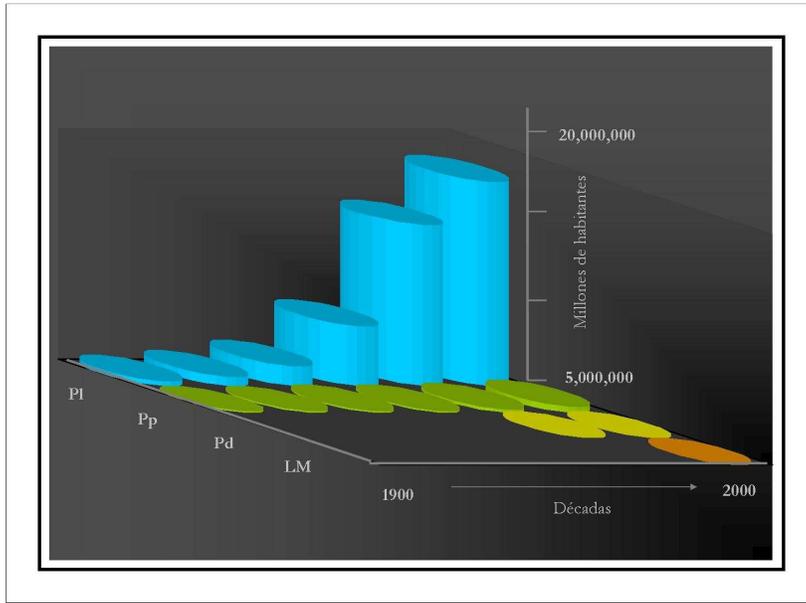


Figura 5.22. Población (en millones) por unidad de relieve, cada dos décadas, de 1900 a 2000. Azul: planicie lacustre, verde: planicie proluvial, amarillo: piedemonte y anaranjado: laderas de montaña. Con base en Gutiérrez *et al.* (2005).

5. 4 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es la capacidad de las personas para enfrentar el riesgo (Lugo *et al.*, 2002), es una circunstancia social que está en función de la posición económica que da infraestructura y defensa a la población para enfrentar y amortiguar la situación antes (prevención), durante y después de un evento nocivo. De acuerdo con esto, se puede entender por qué los eventos más dañinos parecen pasar siempre en el tercer mundo y no en sociedades de elevados ingresos (Ayala y Olcina., 2002). Por su parte Wilches Chau (1988, en Ramírez y Stolarski., 1993) describe diez niveles sociales que caracterizan el grado de vulnerabilidad global y que deben ser tomados en cuenta para realizar un trabajo lo más apegado posible a la realidad social:

1. *Física o locacional.* Cantidad de viviendas ubicadas en zonas de riesgo, por condiciones de pobreza y falta de opciones para tener una ubicación menos riesgosa.
2. *Económica.* Muestra la relación inversa entre el ingreso de la población y el impacto del fenómeno físico porque denota la ausencia de infraestructura y adecuados presupuestos públicos.
3. *Social.* Es el bajo grado de organización y cohesión interno de las comunidades en riesgo que les impide prevenir, mitigar o responder a situaciones de desastre
4. *Política.* Refleja la débil autonomía de las comunidades frente a la centralización en toma de decisiones y organismo gubernamentales de los núcleos importantes.
5. *Técnica.* Evidencia lo inadecuado de las construcciones e infraestructura básica en zonas de riesgo.

6. *Ideológica*. Es la percepción de las comunidades que genera pasividad, fatalismo y prevalencia de mitos que evitan la acción de sus habitantes ante los riesgos.
- 7, 8. *Cultural y Educativa*. Se refieren a la percepción propia y en conjunto del individuo y la influencia de los estereotipos de medios de comunicación
9. *Ecológica*. Se refiere a los ecosistemas vulnerables, incapaces de autoajustarse internamente para compensar los efectos de la acción humana
10. *Institucional*. Es la obsolescencia y rigidez de las instituciones jurídicas, donde la prevalencia de decisión política y el dominio de criterios personalistas impiden respuestas adecuadas y ágiles a la realidad existente.

La vulnerabilidad en el área de estudio es alta, debido a que hay muchos asentamientos irregulares en zonas propensas a sufrir distintos peligros (como inundaciones, hundimientos diferenciales y formación de grietas, entre otros) que si no se presentan actualmente, posiblemente lo harán en un futuro no muy lejano; generalmente se trata de poblados con viviendas precarias, que cada vez tienen más población, y en las que prevalecen condiciones económicas de bajos ingresos. Por sus características culturales, educativas e ideológicas, de acuerdo con Lugo e Inbar (2002), lo anormal para los habitantes, es la ocurrencia de fenómenos extraordinarios y no su ubicación riesgosa. Otras circunstancias que aumentan la vulnerabilidad del área son: uno, la constante alteración del equilibrio ecológico por la intervención humana; dos, la concentración de la ayuda en el poblado más importante, que es Chalco; tres, la mala ubicación y las pésimas condiciones de la infraestructura de servicios públicos y, cuatro, la burocracia en nuestro país que lleva a los habitantes a pensar dos veces en gastar el dinero suficiente para trasladarse a la capital por varios días para tramitar los apoyos económicos del gobierno, cuando sus ingresos son bajos y la respuesta frecuentemente consiste en aplazar los trámites.

De acuerdo con Ramírez y Stolarski (1993), para mejorar las condiciones en nuestro país es necesario enfatizar la importancia de las ciencias sociales, ya que permiten comprender mejor la realidad del fenómeno desastroso y diseñar políticas públicas relacionadas con la prevención, mitigación y atención de desastres. De igual modo critican el mal uso de los conceptos sobre el tema, pues los errores se han llevado hasta el campo de la acción, y un ejemplo de esto es que no debería manejarse “Sistema Nacional de Protección Civil” (SINAPROC) sino “Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres” (SINAPAD). Esto, para incluir la cultura preventiva en la sociedad, así como, para dejar de llamar al desastre por el nombre del fenómeno físico pues esto sólo contribuye a difundir la idea de que es el fenómeno extraordinario el desastre, cuando en realidad es la condición social de pérdida o alteración del orden habitual.

5.5 Peligros

Debido a que la geomorfología aplicada estudia el relieve donde la acción social puede desencadenar consecuencias importantes, ha sido necesario cambiar la escala de tiempo, de carácter geológico a otra más humana, e introducirse en contextos variados, desde el puramente geomorfológico hasta otros de características socioeconómicas, ambientales o administrativas (Peña, 1997). Los estudios geomorfológicos aplicados se han enfocado, de acuerdo con Panizza (1988 en Peña op. cit.), en dos temáticas: 1) los procesos pasados, actuales y futuros que desencadenan peligros a la sociedad y 2) la degradación y desequilibrio del medio ambiente por la actividad social sobre el relieve. Para llevarlas a cabo es necesario realizar un levantamiento geomorfológico que según Verstappen y Van Zuidam (1991), debe proporcionar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos y los fenómenos naturales conexos. Según el tipo de levantamiento que se realice se generan tres diferentes mapas geomorfológicos:

1. *Analítico*. Este mapa resulta de estudios geomorfológicos que proporcionan información sobre las formas del relieve y los procesos. Se basa principalmente en la morfogénesis para determinar el origen y desarrollo de las geoformas y representa la información mediante símbolos lineales y areales según su origen (estructural, volcánico, denudatorio, fluvial, lacustre/marino o antrópico), pero también incluye la información morfoestructural para conocer la naturaleza del sustrato rocoso y la morfocronológica que indica la edad de las formas, el periodo de su formación y su desarrollo posterior (Verstappen y Van Zuidam op. cit.).
2. *Sintético*. Este mapa resulta de estudios multidisciplinarios que vinculan la expresión geomorfológica del terreno (morfodinámica, morfogenética y morfocronológica) y las condiciones ambientales predominantes (clima, relieve, litología, suelos, hidrología y vegetación). Esta información permite realizar una zonificación del relieve, por la homogeneidad que presenta, y obtener grandes unidades de terreno y subunidades; sin embargo, es importante mencionar que la uniformidad varía con la escala de mapeo (Ibid.).
3. *Pragmático*. Resulta de investigaciones geomorfológicas guiadas desde el principio por un propósito específico, como la planificación, se basa en los levantamientos analítico y sintético que proporcionan las unidades de mapeo y la información geomorfológica detallada, así como el contexto ambiental y las relaciones ecológicas del paisaje. Sin embargo, para propósitos específicos (como la zonificación de peligros y riesgos) no siempre es necesario recabar toda la información analítica y sintética, resultando más

conveniente concentrarse sólo en las formas que son relevantes directamente para el propósito del levantamiento (Ibidem.).

Debido a que cada vez los peligros se hacen más frecuentes, la pérdida de vidas y los riesgos a la propiedad han aumentado y, con ello, la cartografía relacionada con evaluaciones de riesgos naturales y los programas de mitigación de desastres se está haciendo cada vez más importante (Verstappen y Van Zuidam, 1991). Por estas circunstancias los mapas de peligros deben representar diferentes modalidades espaciales del fenómeno físico y las circunstancias sociales (como ubicación, severidad, exposición, áreas potencialmente afectables, permanencia del efecto, periodo de retorno y vulnerabilidad) para disminuir la exposición y vulnerabilidad de las personas e impedir la consumación de riesgos naturales en catástrofes. Sin embargo, en nuestro país, por la falta de una legislación adecuada, esta cartografía tiene escasa repercusión en el planeamiento territorial y urbanístico; esto ha ocasionado la inexistencia de las pautas metodológicas estandarizadas para su elaboración, por lo que frecuentemente estos mapas quedan reducidos a mapas de peligrosidad con hincapié en severidad y probabilidad de ocurrencia (Ayala y Olcina, op. cit.).

El resultado final de este estudio geomorfológico es el mapa de peligros (Figuras 23 y 24), que indica las zonas susceptibles a la ocurrencia de inundaciones, subsidencia y formación de grietas (peligrosidad), y fue construido con una metodología basada en Peña (1997) y Verstappen y Van Zuidam (1991). Como los mapas de riesgos se preparan sobre la base de un levantamiento geomorfológico (analítico o sintético), fue necesario usar como base el mapa de unidades geomorfológicas. A continuación se describe la metodología que se siguió para elaborar el mapa de peligros.

5.5.1 Metodología para la elaboración del mapa de peligros

1. *Documentación sobre peligros y riesgos.*
2. *Determinación de los peligros.* Fueron seleccionados tres peligros ambientales (inundaciones, subsidencia y agrietamiento) que se relacionan genéticamente con la extracción de agua subterránea y las lluvias torrenciales.
3. *Investigación de la ocurrencia de los peligros en el área de estudio.* Se realizó un estudio histórico de la ocurrencia de inundaciones, hundimientos diferenciales y la formación de grietas en la Cuenca de México y el área de estudio, con base en fuentes escritas, los trabajos de Lugo, *et al.* (1991) y Lugo *et al.* (1999) y entrevistas realizadas a los habitantes de las localidades afectadas.

4. *Seguimiento de los eventos en campo.* Desde el 23 de agosto de 2004 hasta el 2 de febrero de 2007 se realizaron 11 visitas al área de estudio en las que se recorrió un área aproximada de 380 km² en busca de zonas afectadas recientemente por inundaciones, hundimientos y formación de grietas; también, se le dio seguimiento a los eventos ocurridos en años anteriores, documentados por Lugo, para conocer la evolución del fenómeno. Con los puntos muestreados se obtuvo una base de datos con las características cuantitativas y cualitativas de los fenómenos obtenidas directamente en el terreno con mediciones o con indicadores en postes, casas, etc.
5. *Empleo de laboratorios.* La base de datos de los puntos muestreados fue transformada a una manera virtual para su manipulación y se agregaron los datos al mapa de unidades de relieve.
6. *Ubicación de los peligros.* Con base en el mapa de unidades geomorfológicas y los puntos muestreados los fenómenos fueron localizados y limitados a las unidades de relieve en las que se presentan y causan más daños.
7. *Zonificación de peligros.* Con la ubicación de los peligros por unidad geomorfológica, la información de los puntos muestreados y el estudio histórico de la ocurrencia de peligros en el área de estudio, se realizó una zonificación de los peligros. Esta consiste en el mapeo de las superficies afectadas por cada peligro destacando los rasgos del relieve que permiten las condiciones para la ocurrencia del peligro, incluyendo los factores de origen, la duración y las redes de drenaje en el caso de las inundaciones.
8. *Construcción del mapa de peligros y elaboración de la leyenda.* Una vez delimitadas las áreas afectadas y susceptibles de ser afectadas por los distintos peligros se elaboró la leyenda a partir de una jerarquización de los peligros por unidad de relieve, génesis y zonas afectadas.

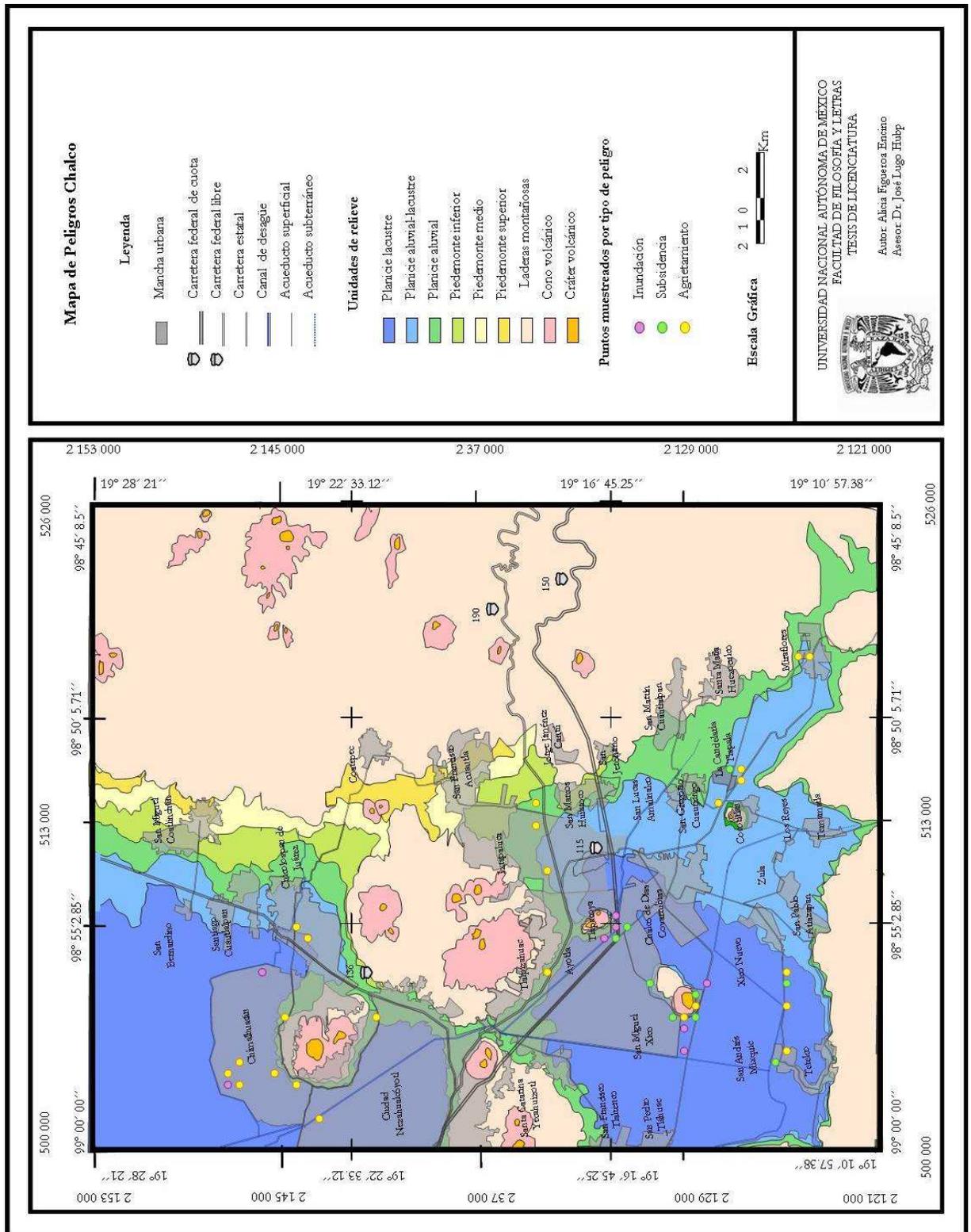


Figura 5.23. Mapa de peligros I. Muestreros por unidad de relieve y proceso

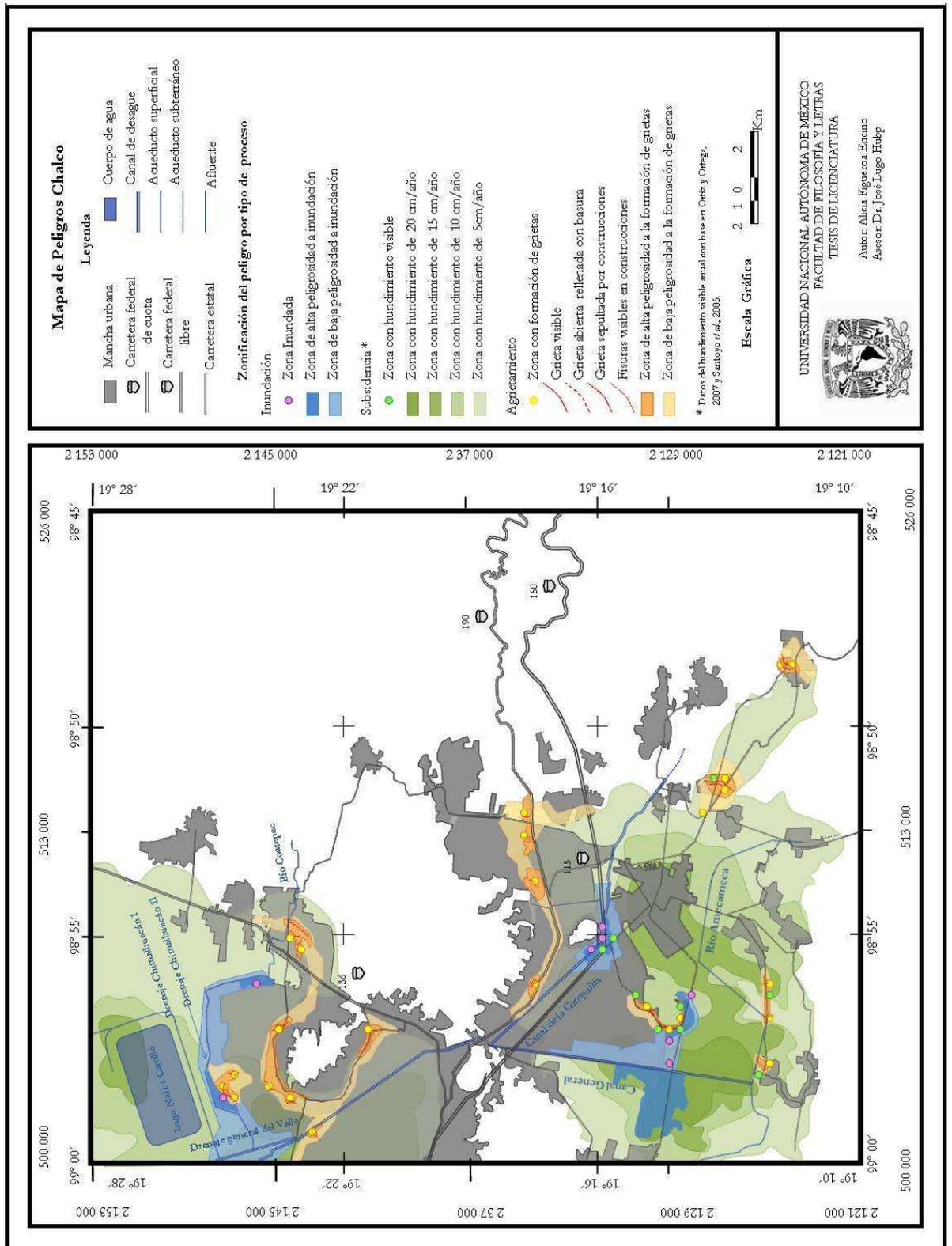


Figura 5.24. Mapa de peligros II. Índice de peligrosidad por proceso

Conclusiones

En el área de estudio la ocurrencia de inundaciones, hundimientos y agrietamientos esta determinada por características físicas y sociales; entre las primeras, se pueden mencionar las unidades litológicas constituidas de arcillas que se compactan por la extracción de agua y el peso de las construcciones y, las fuertes precipitaciones que generan corrientes fluviales que confluyen en la planicie lacustre, donde se sitúa la mayor parte de la población. En cuanto a las condiciones sociales, el constante crecimiento de la zona urbana ha generado condiciones de desigualdad, desabasto de las redes de infraestructura y vulnerabilidad social.

Las inundaciones se presentan en la planicie lacustre de manera periódica y son cada vez más intensas debido al crecimiento de las superficies con asfalto que evitan la infiltración de agua y favorecen su escurrimiento y acumulación en las zonas bajas. Por otra parte, la gran cantidad de basura y desechos orgánicos que azolvan el drenaje, hacen imposible que durante la época de lluvias, el canal de La Compañía pueda desalojar las aguas negras de Chalco, por lo que el agua excedente inunda las poblaciones cercanas.

Los hundimientos del terreno en la planicie lacustre se deben al reacomodo de las capas del subsuelo que buscan un equilibrio frente a la extracción de agua y a la compactación natural en la que incide directamente el peso de las construcciones. En los últimos años se han manifestado de manera repentina en las poblaciones de Ixtapaluca, Los Reyes, San Vicente Chicoloapan y Valle de Chalco, lo que ha obligado la reubicación de viviendas y empresas. Además, este proceso causa severos daños a las construcciones porque genera grietas en las planicies aluvial-lacustre y aluvial, las cuales a su vez originan otro efecto negativo ya que a través de ellas pueden infiltrarse contaminantes a los mantos freáticos.

La elaboración del mapa de peligros, basado en mapas de características físicas (relieve, clima, suelo, vegetación y geología), morfológicos, morfométricos, fotointerpretación y trabajo de campo, es la parte fundamental de esta investigación y cabe destacar que, a pesar de que no indica la ocurrencia de dichos procesos en el ámbito temporal, si evidencia que los procesos estudiados se concentran en las unidades geomorfológicas de planicie lacustre, planicie aluvial-lacustre y planicie aluvial y muestra de manera espacial los sitios potencialmente afectables. De igual modo, los resultados finales, que se muestran en el mapa de peligros, pueden ser útiles en la prevención y mitigación de procesos así como en la planeación de los futuros asentamientos humanos.

Bibliografía

Ayala, C. y C. Olcina (2002), *Riesgos naturales*, España, Ariel.

Bellia, S., Cusimano, G., González, T., Rodríguez, R. y G. Giunta (1992), *El Valle de México, consideraciones preliminares sobre los riesgos geológicos y análisis hidrogeológico de la cuenca de Chalco*, Instituto Italo-Latino Americano Piazza G. Marconi, México.

Benassini, O. (1984), *Impacto de los caminos en el medio ambiente*, México, Imprecolor-Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México.

Calderón, G. (2001), *Construcción y reconstrucción del desastre en México*, Plaza y Valdéz, S. A., México.

Castillo, R. (2003), *Procesos exógenos en la Delegación Magdalena Contreras, Ciudad de México*, Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

De Cserna, Z., De la Fuente, M., Palacios, M., Triay, L., Mitre, L. y R. Mota (1998), “Estructura geológica, gravimétrica, sismicidad y relaciones geotectónicas regionales de la Cuenca de México”, *Boletín del Instituto de Geología*, núm. 104, UNAM, México.

De Pedraza, J. (1996), *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*, Editorial Rueda, Madrid, España.

Durán, F. (1985), *Descripción del deterioro ecológico en la Cuenca de México: una perspectiva histórica*, Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

FitzPatrick, E. (1996), *Introducción a la ciencia de los suelos*, Trillas, México.

Fries, C. (1956), “Estudios geocronológicos de rocas mexicanas”, *Boletín del Instituto de Geología*, No. 64. Instituto de Geología, UNAM, México, pp. 1-151.

----- (1960), *Geología del estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México*, Instituto de Geología, UNAM, México.

Garay, M. (1974), “Morfología de la región volcánica Chimalhuacán-Cerro de la Estrella-Sierra de Santa Catarina”, *Anuario de Geografía*, núm. 14, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, pp. 11-66.

García, E. (1988), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*, 5ta. ed., Offset Larios, México.

Gurría, L. (1978), *El desagüe del Valle de México durante la época novohispana*, UNAM, México.

Gutiérrez de MacGregor, M., González, S. y J. Zamorano (2005), *La cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales*, Temas selectos de geografía de México, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Hiriart, F. (1952), *El mecanismo que regula la formación de grietas en el valle de México*, Comisión Federal de Electricidad, México.

INEGI. (1985a), *Carta de climas*, hoja Amecameca, clave E14B41, escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (1985b), *Carta edafológica*, hoja Amecameca, clave E14B41, escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (1985c), *Carta geológica*, hoja Amecameca, clave E14B41, escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (1985d), *Carta topográfica*, hoja Amecameca, clave E14B41, escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (1985e), *Carta de vegetación y uso de suelo*, hoja Amecameca, clave E14B41, escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (1985f), *Carta de climas*, hoja Chalco, clave E14B31, escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (1985g), *Carta edafológica*, hoja Chalco, clave E14B31, escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (1985h), *Carta geológica*, hoja Chalco, clave E14B31, escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (1985i), *Carta topográfica*, hoja Chalco, clave E14B31, escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (1985j), *Carta de vegetación y uso de suelo*, hoja Chalco, clave E14B31, escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (1998), *Carta topográfica*, hoja Chalco, clave E14B31, escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (2000a), *Censo de población y vivienda*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (2000b), Conjunto de fotografías aéreas de la carta topográfica Chalco. Escala 1:37,500. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (2001), *Síntesis geográfica del Estado de México*, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

----- (2002), *Anuario estadístico del Estado de México*, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

INAH. (1996), *México antiguo, antología arqueológica mexicana*, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Secretaría de Educación Pública y Editorial Raíces, México.

Kunz, I. (2003), *Usos del suelo y territorio, tipos y lógicas de localización en la ciudad de México*, México.

Lugo, J. (1984), “Geomorfología del sur de la cuenca de México”, Serie Varia, Tomo 1, núm. 8, México

----- (1989), *Diccionario geomorfológico*, Instituto de Geografía, UNAM, México.

----- (2001), *La superficie de la Tierra II, procesos catastróficos, mapas, el relieve mexicano*, La ciencia para todos, Fondo de Cultura Económica, Segunda edición, México.

Lugo, J. y V. Martínez (1980), “La disección del relieve en el sur de la cuenca de México y porciones adyacentes”, *Boletín del Instituto de Geografía*, num. 10, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 55-64.

Lugo, J., Pérez, A. y M. Rojas (1991), “Formación de grietas en la margen del antiguo lago al oriente de la Cuenca de México”, *Geofísica Internacional*, vol. 30, núm. 2, Instituto de Geofísica, UNAM, México, pp. 87-95.

Lugo, J. y C. Córdova (1992), “Regionalización geomorfológica de la República Mexicana”, *Boletín del Instituto de Geografía*, num. 25, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 25-63.

Lugo, J., Salas, O. y M. García (1999), “Grietas en campos de cultivo, un tipo de riesgo”, *Prevención, órgano informativo del sistema nacional de protección civil*, núm. 22, febrero-mayo, Instituto de Geografía y CENAPRED, UNAM, México.

Lugo, J. y M. Inbar (comp.) (2002), *Desastres naturales en América Latina*, Fondo de Cultura Económica, México.

Macías, J. y L. Capra (2005), *Los volcanes y sus amenazas*, Fondo de Cultura Económica, Secretaría de Educación Pública y Consejo de la Ciencia y Tecnología, México.

Marsal, R. (1992), *Hundimiento de la Ciudad de México*, El Colegio Nacional, México.

Marsal, R. y M. Mazari (1987), “El subsuelo de la ciudad de México”, *Series del Instituto de Ingeniería*, núm. 505, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Mela, P. (1966), *Tratado de edafología y sus aplicaciones*, Agrociencias, México.

Montaño, R. (1997), *Impacto en el medio ambiente por asentamientos irregulares, el caso del valle de Chalco*, Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Mooser, F. (1975), “Historia geológica de la cuenca de México”, *Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal*, Tomo 1, Departamento del Distrito Federal, México, pp. 7-38.

Mooser, F., Montiel A. y A. Zúñiga (1996), *Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla; estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos*, Comisión Federal de Electricidad, México.

Mooser, F., Taméz, E., Santoyo, E., Holguín, E. y C. Gutiérrez (1986), *Características geológicas y geotécnicas del valle de México*, Comisión de Vialidad y Transporte Urbano del Departamento del Distrito Federal, México.

Ochoa, V. (2004). *Propuesta metodológica para el estudio de la inestabilidad de laderas a partir de los MDT y la Percepción Remota. Sierra Norte de Puebla: México*, Tesis de Maestría en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Ortiz, D. y G. Ortega (En prensa), “Origen y evolución de un nuevo lago en la planicie de Chalco, implicaciones de peligro por subsidencia e inundación de áreas urbanas en valle de Chalco, Estado de México y Tláhuac, Distrito Federal”, *Investigaciones geográficas*, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Palacios-Roji, A. y J. Palacios-Roji (1998), *Guía Roji del área metropolitana de la ciudad de México y alrededores*, Guía Roji, S.A. de C.V., México.

----- (2007), *Guía Roji del área metropolitana de la ciudad de México y alrededores*, Guía Roji, S.A. de C.V., México.

Parrot, J y V. Ochoa. (2004). “Generación de Modelos Digitales de Terreno raster. Método de digitalización”, *Geografía para el Siglo XXI*, Serie Textos Universitarios, Instituto de Geografía, UNAM. México, pp. 1-31

Peña, J. (1997), *Cartografía geomorfología básica y aplicada*, Logroño, España.

Rivas, D. (1985), *Uso, contaminación y agotamiento del agua en la cuenca de México*, Tesis de licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Rodríguez, R. y T. González (1989), “Comportamiento hidrodinámico del sistema acuífero de la subcuenca de Chalco, México”, *Geofísica internacional*, vol. 28-2, Instituto de Geofísica, UNAM, México. pp. 207-217.

Romero, P. (1999). *Obra hidráulica de la ciudad de México y su impacto socioambiental 1880-1990*. Instituto de Geografía, UNAM, México.

Rodríguez, C. y A. Ochoa. (1989). “Estudio geoelectrico del sistema acuifero de la Cuenca de México. Geofísica internacional”, Vol. 28 No. 2, Instituto de Geofísica, UNAM, México, pp. 191-205.

Ramírez, G. y N. Stolarski (1993), *Riesgos y su mitigación en el contexto metropolitano*, Cambio XXI, México.

SARH. (1986), *Perfiles geofísicos al sur del valle de México*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos e Instituto de Geografía, México.

Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F. y E. León (2005), *Síntesis geotécnica de la cuenca del valle de México*, Grupo Editorial TGC, México.

Schlaepfer, C. (1968), *Carta geológica de México, hoja México, clave 14 Q-b (5), escala 1:1,000, 000, y texto: resumen de la geología de la hoja México, Distrito Federal, Morelos y Estado de México*, Instituto de Geología, UNAM, México.

Sánchez, E. (2005), *Vulnerabilidad, deforestación e inestabilidad de laderas: una zonificación del riesgo en Zacatlán, Puebla*, Tesis de Maestría en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Sheldon, J. y L. Don (1999), *Fundamentos de geología física*, Limusa, México.

Tapia, G. y J. López (2002), “Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la cuenca de México; unidades morfogenéticas a escala 1:100,000”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 19, núm. 1, Instituto de Geología, UNAM, México, pp. 50-66.

Vázquez, E. y R. Jaimes (1989), “Geología de la cuenca de México”, *Geofísica Internacional*, vol. 28, núm. 22, Instituto de Geofísica, UNAM, México, pp. 133-190.

Verstappen, H. y R. Van-Zuidam (1991), “The ITC System of Geomorphologic Survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards”, *Enschede, ITC Publication*, núm. 10, The Netherlands.

Viers, L. (1983), *Geomorfología*, Oikos-tau, S.A. Barcelona, España.

Yarza, E. (1992), *Volcanes de México*, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Softwares:

Parrot, J. F. (2002) Disec.exe

----- (2003a) Brod4_mx

----- (2003b) Miel4_mx

----- (2003c) Versant

----- (2005) Transf_dxf_v2

----- (2006) Tlálloc Versión 1.0