



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
AGUAS SUBTERRANEAS**

**FRACTURAMIENTO EN EL ACUITARDO LACUSTRE QUE CUBRE AL
ACUÍFERO REGIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO: ORIGEN,
DINÁMICA E IMPLICACIONES.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

DALIA DEL CARMEN ORTIZ ZAMORA

ASESOR:

DR. MARCOS ADRIÁN ORTEGA GUERRERO

CIUDAD UNIVERSITARIA,

SEPTIEMBRE 2007



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.

A mis amores

Juan Raúl, Ana Dalia Minerva y Juanito

A

Magnolia, Jorge, Eugenio, Aurelio y Jerónimo

Agradecimientos

Al Dr. Marcos Adrián Ortega Guerrero por la dirección del presente trabajo así como su dedicación y apoyo durante todas las etapas del mismo.

A los Doctores José Lugo Hubp, Gustavo Tolson Jones, Joel Carrillo Rivera, Rafael Huizar Alvarez, Enrique Cabral Cano y Oscar Escolero Fuentes por la revisión y las contribuciones hechas para la mejora de esta tesis.

Al Ing. Roberto Ortega Guerrero por el apoyo recibido en el levantamiento e interpretación magnetométrica así como en diferentes etapas de trabajo de campo.

A la Diseñadora Nathziely Ortega Vallejo por su valiosa colaboración en la realización, actualización y presentación de las figuras.

A CONACYT y al Centro de Geociencias de la UNAM por las becas proporcionadas durante mi investigación doctoral.

A la Ing. Marcela Canedo Castro por su apoyo a lo largo de todo mi trabajo.

Al INCAN en especial al Dr. Noel Castañeda Soto por su empeño en mantenerme en óptimas condiciones para seguir adelante y a la Dra. Rita Rivas por brindarme su amistad y su apoyo incondicional.

CONTENIDO

Resumen.	i
Reconocimientos.	ii
Tabla de contenido.	iii

Capítulo 1	Introducción.	
	Resumen.	1
1.1.	Antecedentes.	1
1.2.	Necesidades de Investigación.	5
1.3.	Selección del área de estudio.	6
1.4.	Objetivos generales.	8
1.5.	Objetivos particulares.	9
1.6.	Metas.	10
1.7.	Metodología general.	10
1.8.	Contenido y organización de la tesis.	12
1.9.	Contribución Científica de la Tesis.	14
	Figuras	

Capítulo 2 Modelo conceptual hidrogeológico del origen y dinámica del fracturamiento multiescalar en el área metropolitana de la Ciudad de México: Implicaciones hidrogeológicas y de riesgo.

	Resumen.	19
2.1	Introducción.	19
2.2	Objetivos.	22
2.3	Antecedentes.	23
2.4	Distribución de fracturas en el Área Metropolitana de la Ciudad de México.	25
2.5	Metodología.	27
2.6	Resultados.	28
	Evolución del fracturamiento.	28
	Clasificación de las fracturas.	30
	Zonificación del fracturamiento.	32
	Implicaciones de contaminación y peligro hacia el acuífero.	36
2.7	Conclusiones.	37
	Figuras	

Capítulo 3	Origen y evolución de un Nuevo Lago en la Planicie de Chalco: Implicaciones de peligro por Subsistencia e Inundación de Áreas Urbanas en Valle de Chalco (Edo. México) y Tlahuac (D.F.)	
	Resumen	49
3.1	Introducción.	49
3.2	Objetivos.	50
3.3	Evolución de la extracción de agua subterránea y de la deformación vertical del terreno en la subcuenca de Chalco.	51
	3.3.1 Historia de la extracción de agua subterránea	51
	3.3.2 Historia de los hundimientos	52
3.4	Métodos y materiales.	54
3.5	Resultados.	55
	3.5.1 Evolución del Nuevo Lago de Chalco.	55
	3.5.2 Controles en la subsidencia del terreno.	57
	3.5.3 Situaciones de Peligro y Riesgo	59
	3.5.4 Consideraciones para la Planeación del Desarrollo Regional y Ordenamiento del Territorio.	62
3.6	Conclusiones.	65
	Figuras.	
Capítulo 4	Influencia de unidades de baja compresibilidad en la evolución de la deformación vertical del terreno en la planicie lacustre de Chalco.	
	Resumen.	76
4.1	Introducción.	76
4.2	Objetivos.	78
4.3	Metodología.	79
	4.3.1 Investigación de elevación del terreno.	79
	4.3.2 Investigación Magnética.	79
4.4	Resultados.	82
	4.4.1 Evolución de la Deformación Vertical del Terreno.	82
	4.4.2 Extensión de los Basaltos en el subsuelo.	82
4.5	Conclusiones.	85
	Figuras.	
Capítulo 5	Distribución y origen del fracturamiento en el acuitardo lacustre de Chalco.	

	Resumen.	96
5.1	Introducción.	96
5.2	Objetivos.	98
5.3	Metodología.	99
	5.3.1	Cartografía de fracturas en el acuitardo sobre la planicie Lacustre.
		99
	5.3.2	Investigación de la presencia de unidades de basalto en el subsuelo por medio de un levantamiento magnetométrico y su influencia en el desarrollo de fracturas en el acuitardo.
		99
	5.3.3	Levantamiento topográfico de precisión en una franja de 1 Km. A lo largo del sistema de pozos de Santa Catarina a partir de dos puntos GPS.
		101
5.4	Resultados	102
	5.4.1	Cartografía del fracturamiento.
		102
	5.4.2	Extensión de los Basaltos en el subsuelo.
		103
	5.4.3	Evolución de la Deformación Vertical del Terreno.
		105
	5.4.4	Modelo conceptual de fracturamiento.
		105
	5.4.5	Mapa de Peligro por Fracturamiento.
		106
5.5	Conclusiones.	107
	Figuras.	
Capítulo 6	Conclusiones y recomendaciones.	119
Apéndice A	Análisis fractal de las fracturas.	
	Resumen	125
A.1	Introducción.	125
A.2	Objetivos.	126
A.3	Metodología.	126
	A.3.1	Método de conteo de caja por líneas.
		127
A.4	Resultados.	128
A.5	Conclusiones.	150

Resumen

La explotación del acuífero granular regional de la Cuenca de México inició a mediados del siglo XIX y se incrementó en la zona centro de la Ciudad de México entre 1940 y 1960, generando la despresurización y consolidación de los sedimentos lacustres, fenómeno que se manifestó en el hundimiento del terreno en la parte central de la Ciudad de México y de sus edificios generando hundimientos anuales hasta de 50 centímetros. Motivo por el cuál, la extracción de agua subterránea fue redistribuida en subcuencas vecinas. De tal manera que los problemas de subsidencia y fracturamiento del terreno fueron transferidos. En respuesta a estos problemas se fueron diferentes enfoques al estudio del origen de las fracturas en el interior del Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM), las cuales se pueden clasificar de acuerdo con la disciplina y métodos utilizados, en análisis de tipo geotécnico, hidráulico, geológico-geofísico, e hidrogeológico. A pesar de los esfuerzos, a la fecha, existen numerosos problemas científicos aún sin atender, entre ellos los mecanismos adicionales al bombeo y el comportamiento de la deformación vertical del terreno y sus efectos como riesgo a largo plazo en condiciones que permitan dar seguimiento a los procesos involucrados; y la influencia de estos mecanismos de subsidencia con la escala y geometría del fracturamiento. Con base en este conocimiento, determinar las zonas más susceptibles para la aparición de fracturas regionales, determinar el peligro y riesgos, presentes y futuros, a la sociedad y sus propiedades e infraestructura urbana; y aportar elementos para ser considerados en la planeación del desarrollo y ordenamiento del territorio para disminuir los efectos destructivos de la subsidencia y del fracturamiento.

La planicie lacustre de Chalco, ubicada al sureste de la Cuenca de México, representa un sitio único para el estudio de los procesos mencionados. El sitio fue seleccionado debido a que se tienen problemas de subsidencia y fracturamiento similar a otras zonas lacustres de la Cuenca de México, en particular a los de la Ciudad, cuenta con áreas aún despobladas, de fácil acceso para realizar mediciones e instrumentación, es uno de los sitios mejor documentados y con información e infraestructura científica disponible en el interior de la Cuenca de México, cuenta con datos de la evolución de los hundimientos y respuesta transitoria del acuitardo al bombeo en los últimos 15 años.

El objetivo central de la investigación fue el de identificar la influencia de los estratos poco compresibles en el interior de la secuencia lacustre, en la dinámica de la consolidación; así como los factores principales que influyen en distribución, en el origen y dinámica de las fracturas regionales y locales en el acuitardo lacustre de Chalco; determinar el origen y evolución de los lagos someros que se están formando en la planicie de Chalco; y finalmente, aportar elementos al análisis de peligros por subsidencia y fracturamiento; y a la planeación del desarrollo y ordenamiento del territorio en zonas críticas afectadas por estos fenómenos.

La metodología utilizada para ello fue la de compilar estudios y reportes de fracturamiento en el AMCM; así como, datos de evolución de los niveles potenciométricos en pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina, datos de subsidencia en agencias gubernamentales del Distrito Federal y Estado de México. Realizar diversos mapeos: de fracturas en los sedimentos lacustres de Chalco a diferentes escalas; de topografía de precisión para actualizar los hundimientos regionales de la planicie de Chalco y establecer las tendencias; así como el hundimiento total a la fecha; del crecimiento del Nuevo Lago de Chalco desde su formación en 1986 a la fecha; magnetométrico para definir la extensión de basaltos someros interestratificados en la secuencia lacustre. Todo esto para correlacionar las tendencias del bombeo en el acuífero con los hundimientos regionales totales, distribución de los basaltos en el subsuelo y su relación con la formación y crecimiento del Nuevo Lago de Chalco y las zonas de fracturamiento identificadas; y elaborar mapas de peligros para la población de áreas urbanas cercanas, tanto del Distrito Federal como del estado de México, asociados a riesgo de subsidencia y fracturamiento, y aportar elementos de diagnóstico para el desarrollo regional y ordenamiento del territorio en los centros urbanos de Tláhuac y Valle de Chalco.

Los resultados muestran la existencia de tres diferentes escalas en la apertura de fracturas en la Cuenca de México: microfracturas (30-100 μ m), locales (decenas de centímetros) y regionales (algunos metros de apertura). La longitud de las fracturas también es proporcional y lo mismo se infiere de su profundidad. Se propone una zonificación hidrogeológica de la porción centro-sur de la Cuenca de México, y se proponen además, varios modelos conceptuales de fracturamiento basados en condiciones hidrogeológicas locales. Debido a la respuesta transitoria del acuitardo, las fracturas están sujetas a un proceso dinámico, donde generalmente aparecen después de varios años de iniciado el bombeo, y se incrementan en

número conforme continúa el bombeo, la consolidación y la magnitud de los hundimientos, por lo que es un fenómeno que una vez iniciado no se detiene. El nuevo lago de Chalco inició con zonas de acumulación superficial de agua, evidentes desde 1988. Las depresiones topográficas, en las que se almacena el agua superficial, han estado asociadas a hundimientos regionales del terreno debido a la operación de catorce pozos del denominado Sistema Mixquic-Santa Catarina, que inició la extracción de agua subterránea en 1984. Estos pozos han generado abatimientos anuales del nivel potenciométrico del orden de 1.5 m/año; lo que da lugar a una deformación vertical del terreno de hasta 40 cm/año en el centro de la planicie, por consolidación del acuitardo lacustre. Los hundimientos totales en la planicie de Chalco alcanzan los 12 metros, superando ya los hundimientos del centro de la Ciudad de México que son del orden de 10 metros. El método magnético permitió determinar la extensión de los basaltos por debajo de la planicie, donde se encuentran cubiertos por sedimentos lacustres cuaternarios. La unidad de basaltos que cruza la línea de pozos a una distancia de aproximadamente 600 metros, antes de canal General, zona donde se ubica la mayor cantidad de familias de fracturas. Las fracturas regionales se ubican en los límites de la colada de basalto bajo la superficie lacustre, donde algunos sitios coinciden adicionalmente con las proximidades de los pozos del sistema Mixquic-Santa Catarina (Pozos 2, 5 y 9 a 11), y en la zona interior de la colada de basalto somera. Adicionalmente, se encontró que el efecto del desarrollo de fracturas existentes y otras nuevas puede extenderse a la zona urbana de Valle de Chalco y algunas colonias de Tlahuac, y desde el punto de vista hidráulico a las inmediaciones del canal General (posible debilitamiento del canal y filtraciones laterales), el nuevo lago de Chalco (filtraciones verticales). Se desarrolló un mapa de peligros de hundimiento y fracturamiento hacia las zonas urbanas. La extracción de agua subterránea de este sistema de pozos seguirá, lo que continuará manifestándose como hundimientos del terreno y crecimiento del Nuevo Lago de Chalco.

Se estima que para el año 2015, la extensión de este lago podría afectar cerca de 25 hectáreas de la zona urbana de Tlahuac y 150 hectáreas de Valle de Chalco. En total se estima un crecimiento del nuevo lago entre 1,200 y 1,500 hectáreas para el año 2015, incluyendo suelo agrícola. La concentración de aguas residuales de origen urbano e industrial hacia este nuevo lago de Chalco da lugar a problemas de calidad química y biológica que pueden impactar negativamente a la población en caso de inundación y a otros seres vivos que se desarrollan en su interior. Con base en los mecanismos que controlan los hundimientos en la planicie de Chalco, es urgente controlar el crecimiento urbano, el desarrollo social y económico de la zona y el ordenamiento del territorio. Todo ello para evitar situaciones de desastre en un futuro cercano.

Capítulo 1. Introducción.

Resumen

El Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) depende principalmente para su abastecimiento de agua subterránea. Se ha apreciado fracturamiento de diferentes tamaños en el AMCM y sus alrededores lo que hace necesaria la investigación para entender con mayor precisión el origen y características de las fracturas asociadas al bombeo en el acuífero regional del que se abastece el AMCM, por lo que de manera general se trabajó en la identificación de la influencia de los estratos poco compresibles en el interior de la secuencia lacustre, la dinámica de la consolidación de los sedimentos; así como los factores principales que influyen en el origen y dinámica de las fracturas regionales y locales en el acuitardo lacustre de Chalco además de la determinación, el origen y evolución de los lagos someros que se están formando en la planicie de Chalco; para finalmente, aportar elementos al análisis de peligros por subsidencia y fracturamiento, mediante la compilación de estudios y reportes de fracturamiento, de evolución de los niveles potenciométricos en pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina, en el de subsidencia de agencias gubernamentales del Distrito Federal y Estado de México. AMCM, el levantamiento de fracturas en los sedimentos lacustres de Chalco a diferentes escalas, levantamientos topográficos de precisión, la elaboración mapas del crecimiento del Nuevo Lago de Chalco, la realización de un levantamiento magnetométrico, y la correlación de las tendencias del bombeo en el acuífero con los hundimientos regionales totales, la distribución de los basaltos en el subsuelo y su relación con la formación y crecimiento del Nuevo Lago de Chalco y las zonas de fracturamiento identificadas. Finalmente, la elaboración de mapas de peligros por inundaciones y fracturamiento permitirán reducir el riesgo a la población cercana, y por otro lado, los resultados permitirán planear el desarrollo regional y el ordenamiento del territorio.

1.1 Antecedentes

El Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) está ubicada en el interior de la Cuenca de México (Figura 1). Esta cuenca es de tipo endorreico, y en su parte media se desarrolló un ambiente lacustre con el depósito de sedimentos fundamentalmente arcillosos por mas de 700, 000 años (Urrutia-Fucugauchi, 1995). Los sedimentos lacustres, son denominados como acuitardo en términos hidrogeológicos; sobre ellos se encuentra construida una gran parte de la Ciudad de México, y a la vez, cubren un acuífero granular regional del que se extrae agua subterránea para el abastecimiento y desarrollo del AMCM (Figura 2). De este acuífero se extraen cerca de 50 m³/s, de un total de 65 m³/s, para abastecer una población de aproximadamente 25 millones de habitantes y el 30% de la industria

del país (INEGI-INE, 2000). Esta cuenca estuvo ocupada por seis lagos someros: Zumpango, Ecatepec, Texcoco, México, Xochimilco y Chalco (Figura 1), hasta finales del siglo XVIII, y fueron drenados artificialmente hacia el norte de la cuenca a través del Tajo de Nochistongo en el año de 1789 (Bribiesca, 1960).

La explotación del acuífero granular regional inició a mediados del siglo XIX y se incrementó en la zona centro de la Ciudad de México entre 1940 y 1960, generando hundimientos anuales hasta de 50 centímetros (Hiriart y Marsal, 1969).

El intenso bombeo ha causado, desde entonces, la despresurización y consolidación de los sedimentos lacustres, que a la vez ocasionó el hundimiento del terreno en la parte central de la Ciudad de México y de sus edificios, proceso documentado inicialmente por Carrillo (1947). La Figura 3 muestra la evolución de los hundimientos de la Ciudad de México entre 1898 y 1985. En la figura se observa que los hundimientos totales en ese periodo fueron cercanos a 8 metros.

Como una parte del problema de hundimientos, en las décadas de 1940 a 1960, fue evidente la aparición de fracturas sobre la superficie del terreno, fenómeno que causó severos problemas estructurales a edificios e infraestructura urbana en el centro de la Ciudad de México. Esto motivó la transferencia del bombeo a zonas periféricas y cercanas a la ciudad, particularmente hacia la zona de Ecatepec, Xochimilco y Chalco, donde se desarrollaron sistemas de baterías de pozos para conducir, a través de acueductos, el agua de origen subterráneo necesaria para los habitantes e industria incipiente de la Ciudad de México (Marsal y Mazari, 1959; Hiriart y Marsal, 1969). La transferencia de los pozos de extracción, a las zonas mencionadas, también ha tenido numerosos impactos negativos asociados al hundimiento y fracturamiento del terreno (Ovando-Shelley

y González-Valencia, 1990; Lugo *et al.*, 1996; Zawadsky, 1996; Escobar, 2004; Aguilar *et al.*, 2006; entre otros).

Existen diferentes enfoques al estudio del origen de las fracturas en el interior de la AMCM, las cuales se pueden clasificar de acuerdo con la disciplina y métodos utilizados, en análisis de tipo: (1) geotécnico, (2) hidráulico, (3) geológico, e (4) hidrogeológico. El aspecto más estudiado es, sin duda, el de tipo geotécnico, por su estrecha relación al comportamiento del suelo y obras civiles, donde ha tenido mayores implicaciones y costos. Desde el punto de vista geotécnico e hidráulico, Carrillo (1947), demuestra numéricamente que el hundimiento de la Ciudad de México se debe a la extracción del agua subterránea e infiere que la formación de fracturas es un proceso asociado. Juárez-Badillo (1969) y Alberro y Hernández (1990) sugieren el origen de las fracturas por la desecación de las arcillas en tiempo de secas, seguido por inundaciones en temporadas de lluvia, y desarrollan soluciones analíticas para demostrar dicho proceso. Por su parte, Hiriart y Marsal (1969), sugieren que el fracturamiento de los sedimentos de la Ciudad de México puede ser el resultado de la subsidencia. Melgoza (1978), describe la evolución y agrietamiento asociado al intenso bombeo de agua subterránea. Juárez-Badillo y Figueroa-Vega (1984) desarrollaron las bases de la formación de fracturas debido a fuerzas de filtración en el acuífero. Figueroa-Vega (1987, 1989), propone mecanismos de generación de fracturas por la extracción de agua subterránea, los que analiza por medio de soluciones analíticas. Juárez-Luna *et al.* (2002) sugieren un modelo de fracturamiento para los sedimentos lacustres. Zeevaert (1991), considera los severos daños causados a las casas, edificios e infraestructura municipal.

Desde el punto de vista geológico-geofísico, De Cserna *et al.* (1988) explican el fracturamiento por la presencia de estructuras regionales delimitadas por fallas en el subsuelo y actividad neotectónica. Trabajos geofísicos, como los de la Comisión Federal de Electricidad después de los sismos de 1985 (Benhumea y Vázquez, 1988), destacan la diferenciación del subsuelo hasta aproximadamente 500 m de profundidad en Chalco y Xochimilco, con lo que fue posible asociar cambios significativos entre las capas más superficiales y los eventos preexistentes al depósito de sedimentos lacustres, características hidrogeológicas y morfología de la roca basal. Entre los estudios geofísicos más actualizados se tiene el de Krivochieva y Chouteau (2002) donde se realizan estudios magneto-telúricos (MT) y dominio electromagnético (TDEM) en la región de Santa Catarina con objeto de delimitar la geometría del acuífero y confirmar la continuidad de los flujos basálticos entre el volcán y la cuenca sedimentaria. Otros estudios geofísicos reportados por Rodríguez-Castillo (1987), Chouteau *et al.* (1994) y Gonzáles-Morán (1992), Delgado-Rodríguez (1995), se han enfocado a definir estructuras en el subsuelo que pudieran estar asociadas a alguno de los mecanismos sugeridos por la litología, geotecnia e hidráulica.

Desde la perspectiva hidrogeológica las implicaciones de las fracturas en el flujo de agua subterránea y transporte de solutos fue estudiado por Rudolph *et al.*, (1991), Ortega (1994), Pitre (1994), Zawadsky (1996), Ortiz (1996), Leal (1997). En todos estos casos se infirió la densidad y profundidad de las fracturas a partir de perfiles químicos e isotópicos de los sedimentos lacustres, algunos de los cuales fueron simulados por medio de modelos numéricos en medios fracturados. Mas recientemente, Aguilar *et al.* (2006) integran un modelo numérico en el que

incluyen los conceptos geomecánicos e hidráulicos del subsuelo para explicar mediciones de deformación vertical y horizontal del terreno y distribución de fracturas; analizan las condiciones de formación, origen y dinámica de las fracturas asociadas al bombeo en la zona de Iztapalapa para condiciones de acuífero confinado y libre; finalmente realizan predicciones de la deformación vertical al año 2025.

1.2 Necesidades de Investigación

A pesar de los esfuerzos mencionados, existen necesidades urgentes de investigación para entender con mayor precisión el origen y características de las fracturas asociadas al bombeo en el acuífero regional del que se abastece el AMCM, en condiciones más controladas de instrumentación y soportadas por estudios sistemáticos previos. En particular, es necesario investigar el comportamiento de la deformación vertical del terreno y sus efectos como riesgo a largo plazo en condiciones que permitan dar seguimiento a los procesos involucrados; la influencia de los mecanismos de subsidencia con la escala y geometría del fracturamiento, ambos asociados al bombeo del acuífero. Una vez identificados estos mecanismos, será posible: (a) determinar las zonas más susceptibles para la aparición de fracturas regionales, (b) determinar el peligro y riesgos, presentes y futuros, a la sociedad y sus propiedades e infraestructura urbana; y (c) aportar elementos para ser considerados en la planeación del desarrollo y ordenamiento del territorio para disminuir los efectos destructivos de la subsidencia y del fracturamiento.

1.3 Selección del área de estudio

El problema del fracturamiento en el acuitardo donde se encuentra construida gran parte de la Ciudad de México está documentado en trabajos previos sobre los cuales se dio apoyo el presente trabajo, analizando las opciones de un trabajo más detallado se buscó una alternativa que tuviera las condiciones similares y de fácil acceso por lo que se definió con fines de medición, instrumentación y análisis, la subcuenca de Chalco.

La planicie lacustre de Chalco, ubicada al sureste de la Cuenca de México, representa un sitio único para el estudio de los procesos mencionados (Figura 1). El sitio fue seleccionado considerando los siguientes factores: (a) se tienen problemas de subsidencia y fracturamiento similar a otras zonas lacustres de la Cuenca de México, en particular a los de la Ciudad, (b) cuenta con áreas aún despobladas, de fácil acceso para realizar mediciones e instrumentación, (c) es uno de los sitios mejor documentados y con información e infraestructura científica disponible en el interior de la Cuenca de México, cuenta con datos de la evolución de los hundimientos y respuesta transitoria del acuitardo al bombeo en los últimos 15 años.

Los estudios previos realizados en la planicie de Chalco, y que sirven de referencia a la presente investigación son los siguientes: Las condiciones iniciales de flujo en Chalco mostraban flujo ascendente, lo cual fue confirmado a partir de evidencias hidrogeológicas y modelado matemático (Ortega y Farvolden, 1989). Ortega *et al.* (1993) mostraron que el gradiente hidráulico se ha invertido en los primeros cien metros de espesor del acuitardo lacustre de Chalco y que se encuentra en condiciones transitorias donde el espesor es mayor a 100 m.

Ortega *et al.* (1993) muestran secciones hidrogeológicas detalladas a lo largo del sistema de pozos de Santa Catarina, donde se define el espesor y la distribución de las diferentes unidades hidrogeológicas; destacando la Interestratificación de la secuencia lacustre con basaltos. Los sedimentos lacustres consisten en una secuencia de capas arcillosas de 10 a 30 m de espesor, intercaladas con capas de arena volcánica fina de uno a tres metros de espesor denominadas “capas duras”. El espesor del acuitardo lacustre en la planicie de Chalco se incrementa gradualmente desde la periferia hacia la parte central hasta un máximo de 300 m.

Ortega *et al.* (1999) cuantifican la respuesta del acuitardo lacustre al bombeo del Sistema de Santa Catarina, a través de una instrumentación detallada de campo y medición de parámetros geomecánicos e hidráulicos, que permitieron calibrar modelos no lineales de consolidación. Las predicciones realizadas pueden ser confirmadas en este proyecto de tesis; así como de otros posibles mecanismos no considerados anteriormente.

Investigaciones de flujo de agua subterránea y migración de solutos en el acuitardo muestran la influencia de microfracturas (Ortega, 1994). El transporte de contaminantes orgánicos (de mayor densidad que el agua **dense nonaqueous phase liquid** “DNAPL” líquidos más densos que el agua y que no se disuelven o mezclan fácilmente con el agua es decir es inmisible, en presencia con el agua forma una fase separada., muchos solventes clorinados como el tricloroetileno son DNAPLs) e inorgánicos derivados de un sitio de canal donde se disponen aguas residuales de origen industrial y urbano sin tratamiento, fueron estudiados por Leal (1997) y Ortiz (1996), respectivamente. La respuesta hidráulica evaluada a través

de la respuesta de sistemas electrónicos y en pruebas de permeabilidad (Vargas y Ortega, 2004), confirman la influencia de las fracturas en el acuitardo. Finalmente, Zawadsky (1996) investiga una fractura regional, encontrando que esta se extiende hasta una profundidad de hasta de 2 metros con aperturas de 1 a 2 metros, y presenta un cierre progresivo con la profundidad; de tal manera que, a 5 metros por debajo de la superficie, la fractura se hace imperceptible. Zawadski (1996) propone diversos escenarios que pueden resultar en la compactación diferencial relacionados con la presencia de basaltos, mismos que no han sido delimitados previos a esta tesis doctoral. Paralelamente a este trabajo, Aguilar *et al.* (2006) realizan una investigación relacionada con la integración de ecuaciones de flujo de agua subterránea y geomecánicas para explicar el fracturamiento en el Peñón del Marqués en la Delegación Iztapalapa.

1.4 Objetivos Generales

Los objetivos generales de esta tesis son:

Identificar la influencia de los estratos poco compresibles en el interior de la secuencia lacustre, en la dinámica de la consolidación; así como los factores principales que influyen en el origen y dinámica de las fracturas regionales y locales en el acuitardo lacustre de Chalco. Determinar el origen y evolución de los lagos someros que se están formando en la planicie de Chalco; y finalmente, aportar elementos al análisis de peligros por subsidencia y fracturamiento; y a la planeación del desarrollo y ordenamiento del territorio en zonas críticas afectadas por estos fenómenos.

1.5 Objetivos particulares

Los objetivos particulares de la tesis son:

- Determinar la zonificación del fracturamiento asociada a condiciones hidrogeológicas particulares en el AMCM y sus alrededores, con el fin de elaborar modelos conceptuales del mecanismo de fracturamiento.
- Definir la relación multiescalar del fracturamiento.
- Identificar la distribución de grietas regionales en la planicie lacustre de Chalco.
- Evaluar la influencia de unidades de diferente compresibilidad en los controles de la deformación vertical del terreno en la formación y distribución de fracturas en la planicie lacustre de Chalco.
- Definir la evolución de los hundimientos regionales en Chalco asociados a la extracción de agua subterránea en el acuífero subyacente.
- Identificar los mecanismos para controlar el crecimiento urbano, y determinar los peligros y riesgos por subsidencia e inundación a las zonas urbanas de Tláhuac (Distrito Federal) y Valle de Chalco (Estado de México).
- Determinar la influencia de formaciones hidrogeológicas poco compresibles en la evolución de la deformación actual del terreno y evolución de nuevos lagos.
- Comparar la situación de la deformación vertical del terreno con las predicciones realizadas por Ortega *et al.* (1993) y el efecto de las unidades poco compresibles estratificadas en la secuencia lacustre, con las tendencias de deformación vertical.

1.6 Metas

Las metas de la tesis son:

- Elaborar un mapa de zonificación de fracturamiento en el AMCM, la relación escalar de las mismas y su relación con diferentes unidades hidrogeológicas.
- Elaborar modelos conceptuales basados en la zonificación del fracturamiento y condiciones hidrogeológicas locales en el AMCM.
- Elaborar mapas que muestren y delimiten zonas de riesgo potencial a la sociedad e infraestructura urbana, en zonas sujetas a subsidencia y fracturamiento.
- Con base en los controles de subsidencia y fracturamiento proponer estrategias para el control del crecimiento urbano, y zonas que se deben evitar ya que existen riesgos potenciales inherentes a la subsidencia e inundación, particularmente en las zonas urbanas de Tláhuac (Distrito Federal) y Valle de Chalco (Estado de México). Adicionalmente ofrecer alternativas para el desarrollo regional y ordenamiento territorial.

1.7 Metodología general

La metodología general de la tesis es:

- Compilación de estudios y reportes de fracturamiento en el AMCM.
- Compilación de datos de evolución de los niveles potenciométricos en pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina, datos de subsidencia en agencias gubernamentales del Distrito Federal y Estado de México.

- Levantamiento cartográfico de fracturas en los sedimentos lacustres de Chalco a diferentes escalas.
- Levantamiento topográfico de precisión para actualizar los hundimientos regionales de la planicie de Chalco y establecer las tendencias; así como el hundimiento total a la fecha.
- Elaborar mapas del crecimiento del Nuevo Lago de Chalco desde su formación en 1986 a la fecha, utilizando observaciones en los últimos 20 años y fotos aéreas históricas.
- Realizar un levantamiento magnetométrico para definir la extensión de basaltos someros interestratificados en la secuencia lacustre.
- Correlacionar las tendencias del bombeo en el acuífero con los hundimientos regionales totales, distribución de los basaltos en el subsuelo y su relación con la formación y crecimiento del Nuevo Lago de Chalco y las zonas de fracturamiento identificadas.
- Elaborar mapas de peligros para la población de áreas urbanas cercanas, tanto del Distrito Federal como del estado de México, asociados a riesgo de subsidencia y fracturamiento.
- Aportar elementos de diagnóstico para el desarrollo regional y ordenamiento del territorio en los centros urbanos de Tláhuac y Valle de Chalco.

1.8 Contenido y organización de la tesis

En este trabajo se presentan cuatro capítulos principales y un anexo, además del capítulo dedicado al resumen de la tesis, uno de introducción y uno de conclusiones e implicaciones. El contenido y organización de la tesis es:

- Resumen
- Capítulo 1 Introducción
- Capítulo 2. Modelo conceptual hidrogeológico del origen y dinámica del fracturamiento multiescalar en el área metropolitana de la Ciudad de México: Implicaciones hidrogeológicas y de riesgo.
- Capítulo 3. 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 (Edo. México) y Tláhuac (D.F.).
- Capítulo 4. Evolución de la deformación vertical del terreno y mecanismos de control.
- Capítulo 5. Distribución y origen del fracturamiento en el acuitardo lacustre.
- Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.
- Anexo A. Análisis fractal del fracturamiento

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes que sirvieron de base al presente trabajo y las necesidades de investigación identificadas. Se justifica la selección del área de estudio y se detallan los objetivos y metodologías empleadas en la realización de este trabajo.

El capítulo 2 presenta la distribución de fracturas de diferentes tamaños en el AMCM y sus alrededores. Se propone una clasificación escalar del fracturamiento, asociado a la respuesta dinámica del acuitardo como respuesta al bombeo del acuífero subyacente. Se elaboran algunos modelos conceptuales en función de las características hidrogeológicas dominantes.

En el capítulo 3 se analiza el origen y la evolución de un Nuevo Lago en la planicie lacustre del exlago de Chalco como respuesta al bombeo de los catorce pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina desde 1984. Se actualizan los hundimientos totales al centro de la planicie, y se identifican las zonas mas vulnerables al fenómeno de subsidencia a sufrir desastres por inundaciones; adicionalmente se aportan elementos para la planeación del ordenamiento del territorio y el desarrollo regional en Valle de Chalco (Estado de México) y Tláhuac (Distrito Federal).

En el capítulo 4 se presentan los resultados de los levantamientos topográficos de detalle y magnetométricos, los cuales se comparan con la evolución de la deformación vertical del terreno, con las predicciones realizadas por Ortega *et al.* (1999) al centro de la planicie lacustre. Se presenta un perfil de la deformación vertical del terreno a lo largo de la línea de pozos de Santa Catarina desde 1960 a la fecha. Se analizan otros mecanismos que controlan la evolución de la deformación vertical del terreno, con la consolidación diferencial a lo largo del sistema de pozos y con el desarrollo del Nuevo Lago de Chalco.

El capítulo 5 presenta la distribución de fracturas regionales en el interior de la planicie lacustre de Chalco. Posteriormente analiza su relación con los mecanismos que controlan los procesos de deformación vertical del terreno y que

pueden generar los esfuerzos necesarios para generar el fallamiento de los sedimentos lacustre. Una vez identificados los mecanismos de formación, se identifican las zonas potenciales para el crecimiento de las fracturas existentes y aquellas zonas donde se pueden generar familias nuevas. Se elabora un mapa de peligro por fracturamiento en las zonas urbanas de Valle de Chalco y algunas colonias de Tláhuac.

En el Capítulo 6 se concentran las conclusiones obtenidas de la investigación y se presentan recomendaciones para mejorar las condiciones ambientales de la zona y reducir las condiciones de peligro; así como algunas investigaciones futuras.

En el Anexo A, se utiliza la geometría fractal en el análisis escalar del fracturamiento como herramienta y apoyo al estudio multiescalar descrito en el Capítulo 2.

1.9 Contribución Científica de la Tesis.

La presente investigación aporta nuevos elementos para entender con mayor precisión el origen y características de las fracturas asociadas al bombeo en el acuífero regional del que se abastece el AMCM, en condiciones más controladas de instrumentación y soportadas por estudios sistemáticos, como se logró en la Planicie Lacustre de Chalco. En particular, se contribuyó al conocimiento del comportamiento y evolución de la deformación vertical del terreno en los últimos 10 años, y sus efectos de peligro y riesgo a corto y largo plazo a zona urbanas, en condiciones de seguimiento a los procesos involucrados. Se definen por primera vez la influencia de los mecanismos de subsidencia con la escala y geometría del

fracturamiento, ambos asociados al bombeo del acuífero, en diferentes condiciones hidrogeológicas. Con la identificación de los mecanismos adicionales al bombeo del acuífero, como son la identificación y geometría de unidades de baja compresibilidad, fue posible determinar las zonas más susceptibles para la aparición de nuevas fracturas regionales, y la determinación de peligro y riesgos, presentes y futuros, a la sociedad y sus propiedades e infraestructura urbana. Se determinó el origen y evolución del Nuevo Lago de Chalco, así como de los controles que definen su forma y extensión, al igual que su crecimiento a futuro. Finalmente, se aportan elementos para ser considerados en la planeación del desarrollo y ordenamiento del territorio para disminuir los efectos destructivos de la subsidencia y del fracturamiento; y aprovechar los cambios hidrológicos del sistema para ser aprovechados en provecho social, ambiental y económico de la región que involucra el Distrito Federal y al Estado de México.

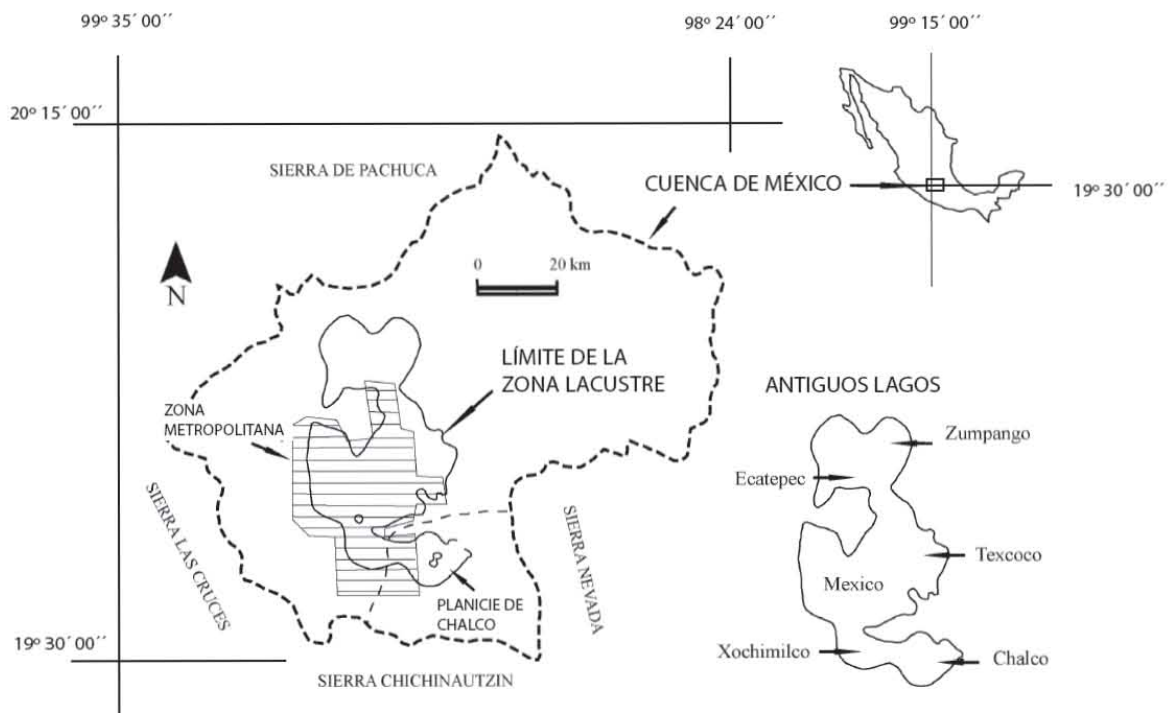


Figura 1. Cuenca de México. Ubicación del Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) y de las zonas lacustres. (Modificado de Ortega et al. 1993.)

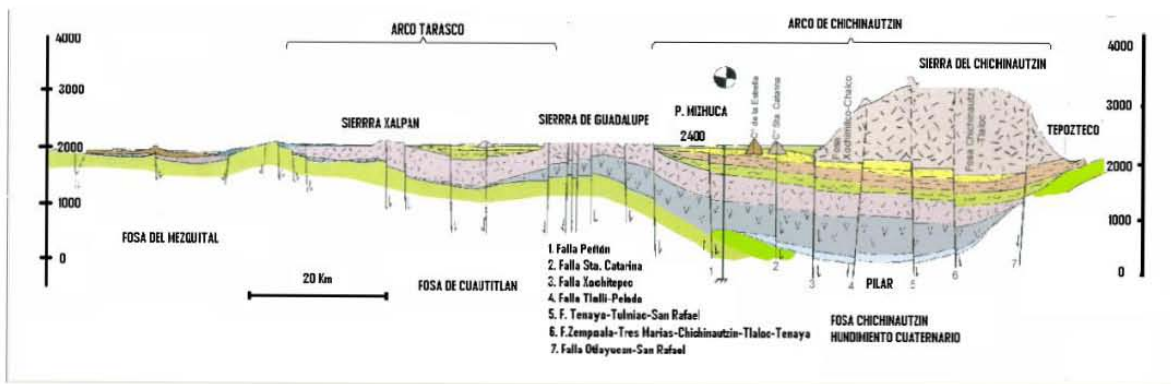


Figura 2. Sección geológica de la Cuenca de México (Santoyo *et al.* 2005)

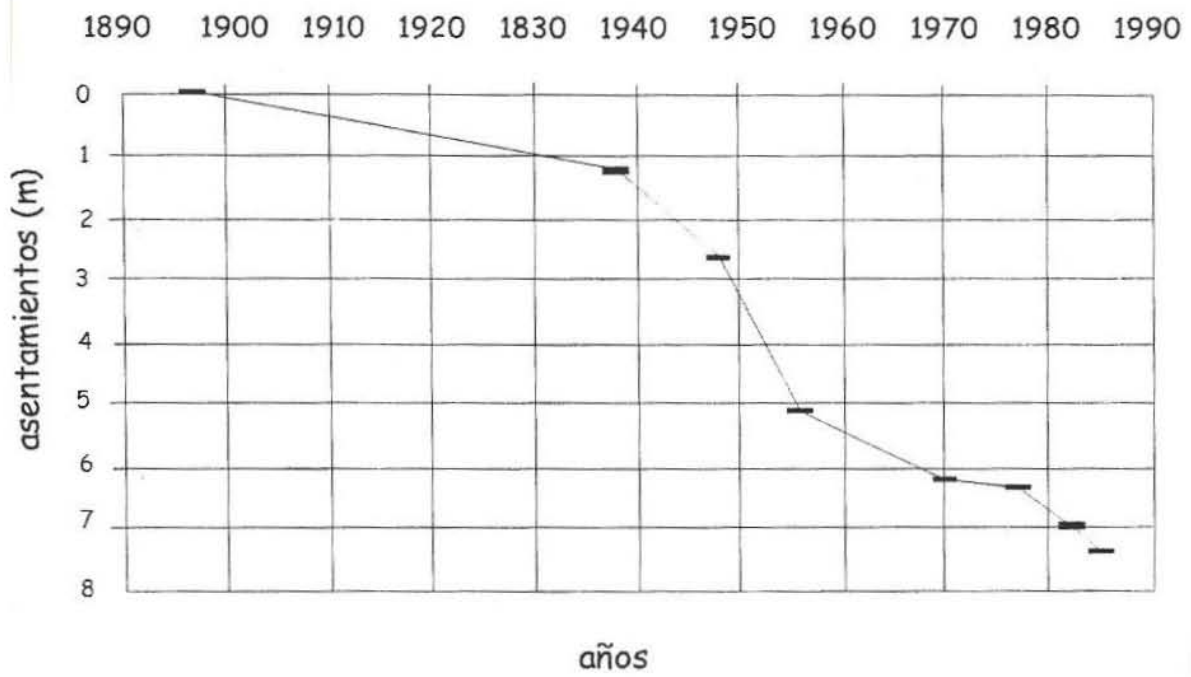


Figura 3. Evolución de los hundimientos en el centro de la Ciudad de México en el periodo de 1890 a 1985.

Capítulo 2. Modelo conceptual hidrogeológico del origen y dinámica del fracturamiento multiescalar en el área metropolitana de la Ciudad de México: Implicaciones hidrogeológicas y de riesgo.

Resumen

Existen diversas zonas afectadas por la presencia de grietas en el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM). Este fracturamiento representa un riesgo continuo para la población, ya que en áreas donde se presentan, se aprecian muchos daños en conjuntos y casas habitación, con longitudes de varios cientos de metros, algunas de las cuales han incluso tenido que ser demolidas; así como daños a la infraestructura urbana. En este trabajo se hace una revisión de informes técnicos y datos publicados relacionados con las fracturas en el AMCM. Se realizaron visitas de campo a los sitios más representativos, de los cuales se elaboraron modelos conceptuales locales. Los resultados permiten proponer una caracterización del fracturamiento a diferentes escalas, basado en cartografía y una zonificación del fracturamiento asociado a la respuesta dinámica del acuitardo como respuesta al bombeo del acuífero subyacente. Los resultados indican que el fracturamiento se aprecia en diferentes unidades hidrogeológicas: (a) en los sedimentos lacustres cuaternarios que sobreyacen al acuífero hacia el interior de la planicie lacustre, (b) en la parte no confinada del acuífero, y (c) en el acuífero basáltico-piroclástico cuaternario. Por sus dimensiones, las fracturas se clasificaron en: (a) micro (con apertura de algunos micrómetros y hasta algunos metros de longitud) (b) locales (con apertura de algunos centímetros longitud de hasta decenas de metros) y (c) regionales (con apertura desde uno a cinco metros y longitudes de cientos y hasta miles de metros). También se encontró una relación logarítmica entre apertura y longitud. Basado en datos históricos y evidencias de campo, el incremento en el número de zonas afectadas por fracturas se puede asociar a la hidroestratigrafía y al descenso de niveles piezométricos en relación con la subsidencia del terreno. Se propone una zonificación del fracturamiento a diferentes escalas en relación con la dinámica del flujo de agua subterránea. Las áreas más afectadas por el fracturamiento regional se localizan en el acuífero aluvio-piroclástico no confinado y en el acuífero volcánico cuaternario, las cuales están distribuidas en una franja de aproximadamente 3 a 5 kilómetros a partir de los límites del acuitardo lacustre. Se consideran las zonas más crítica, aquellas que están en la planicie lacustre donde el acuitardo tiene espesores menores a 100 m. Esta zonificación permite aportar elementos para la protección civil, del acuífero subyacente, así como al desarrollo urbano y ordenamiento territorial del AMCM.

2.1 Introducción

El Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) está construida sobre un acuitardo arcilloso altamente compresible, de edad cuaternaria, y sobre las laderas de las montañas que la rodean, constituidas por depósitos volcánicos cuaternarios y terciarios (Figuras 1). En el AMCM residen aproximadamente 19.5 millones de personas (Garza, V.G. 2006), quienes dependen principalmente para su consumo de agua subterránea principalmente del acuífero aluvio-piroclástico regional, del que se extraen cerca de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ de un total de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ (INEGI-INE,

2000). Este acuífero está semiconfinado en las partes bajas de la planicie por un acuitardo lacustre y no confinado hacia las montañas (Figuras 2 y 3). El acuífero regional comenzó a ser explotado desde el siglo pasado con el fin de satisfacer a la población en constante crecimiento (Figura 4a). La intensa explotación del acuífero ha causado descensos en los niveles piezométricos hasta de 50 m (Figura 4b) y cerca de 9 m de subsidencia en el centro de la Ciudad de México y en la planicie de Chalco (Figura 4c) (SARH-CAVM, 1986; Ortega, 1993).

El acuitardo lacustre está fracturado, lo cual hace más complicada una predicción adecuada de su comportamiento hidrogeológico y geoquímico. Diferentes investigadores (Rudolph *et al.*, 1991; Ortega, 1993) han demostrado que estas fracturas controlan el flujo de agua subterránea en las partes someras del acuitardo y que tienen un papel crítico en la migración de contaminantes hacia el acuífero subyacente, debido a que representan una ruta preferencial de los mismos. Las fracturas también representan un riesgo para la población, ya que en áreas donde se presentan, se aprecian muchos daños en conjuntos y casas habitación, con longitudes de varios cientos de metros, algunas de las cuales han incluso tenido que ser demolidas. (Lugo-Hubp *et al.*, 1991; Murillo *et al.*, 1991; Zeevaert, 1991; CNA, 1991).

Se han realizado diferentes intentos para tratar de clasificar el comportamiento mecánico de los sedimentos lacustres y otros materiales que conforman la Cuenca de México. Marsal y Mazari (1959) propusieron una clasificación geotécnica del área de la Ciudad de México en a) planicie b) de transición y c) rocosa, esta clasificación fue modificada por el DDF (1987 y 2000) (gaceta oficial del DF, 2005) con el fin de proporcionar elementos básicos para la

construcción de casas y otras estructuras. Esta clasificación, la cual se encuentra vigente entre la comunidad geotécnica, es insuficiente para explicar el complejo comportamiento hidrogeológico de los sedimentos lacustres y el comportamiento transitorio del acuitardo debido al bombeo. No se considera la estratigrafía vertical en detalle ni las variaciones laterales de los materiales ni de sus propiedades geomecánicas e hidráulicas. La escala de aplicación del problema condiciona la selección de los parámetros mecánicos o hidráulicos, por ejemplo, el coeficiente de consolidación (C_v) de los sedimentos lacustres depende de la escala y el tiempo (Ortega, 1996), parámetro equivalente a la relación de la conductividad hidráulica sobre el almacenamiento específico, también llamado en términos hidrogeológicos difusividad hidráulica (Domenico y Mifflin, 1965). Esto es particularmente crítico porque las predicciones realizadas para subsidencia y consolidación están basados en parámetros medidos en laboratorio en muestras de dos centímetros de espesor, las cuales han sido seleccionadas evitando cualquier tipo de fracturamiento o capas arenosas. Esto ocasiona que el coeficiente de consolidación medido en campo pueda llegar a ser entre dos o tres órdenes de magnitud mayor al medido con odómetro (Ortega, 1996).

Desde el punto de vista geotécnico, desde la década de 1940, se han desarrollado diferentes hipótesis para tratar de explicar el origen de las fracturas (Carrillo, 1947; Marsal y Mazari, 1959). De igual manera, la comunidad geotécnica mexicana ha realizado numerosos esfuerzos desde la década de 1960, y en particular después del sismo ocurrido en la Ciudad de México en el año de 1985 (SMMS, 1978, 1991 y 1996). Recientemente, Aguilar *et al.* (2006) realizaron un análisis numérico acoplado de las ecuaciones de flujo y geomecánicas, aplicadas

en el Peñón del Marqués, en la Delegación Iztapalapa, al oriente de la Ciudad de México, donde existen severas condiciones de consolidación y fracturamiento. Esto ilustra que es necesaria la investigación multidisciplinaria para tratar de explicar el complejo comportamiento de los sedimentos lacustres y los procesos asociados, en particular la presencia, profundidad, apertura, origen y el comportamiento dinámico de las fracturas.

Estudios recientes realizados en la Cuenca de México (Rudolph y Frind, 1991; Rivera *et al.*, 1991; Ortega *et al.*, 1993 y Ortega *et al.*, 1998) muestran que el acuitardo lacustre que sobreyace al acuífero en producción tiene una respuesta transitoria al acuífero donde los niveles piezométricos descienden continuamente y donde la distribución de la presión de poro en el acuitardo y la subsidencia del terreno continúan en aumento. Es de esperarse que estas nuevas contribuciones en términos de geología e hidrogeología del sistema acuífero-acuitardo aporten el conocimiento de los procesos que controlan la formación y evolución de las fracturas.

2.2 Objetivos

En este trabajo se propone una caracterización del fracturamiento a diferentes escalas y una zonificación del mismo, asociado a la respuesta dinámica del acuitardo arcilloso debido al bombeo del acuífero. Se incluye una revisión de informes técnicos y datos publicados relacionados con las fracturas e investigaciones en campo dentro de la Cuenca de México.

Basado en datos históricos y evidencias de campo, la formación de fracturas se asocia a la hidroestratigrafía y a la evolución del bombeo. Las

fracturas, en función de su tamaño, fueron clasificadas en tres escalas. Además se encontró una relación de la apertura vs la longitud entre diferentes escalas.

Este trabajo es el inicio de un estudio a largo plazo sobre el origen y el comportamiento del fracturamiento en la Cuenca de México, donde se emplean técnicas hidrogeológicas y geomecánicas, las cuales incluyen instrumentación en campo, análisis fisico-químicos y mecánicos y modelación numérica.

2.3 Antecedentes

Hidrogeología de la Cuenca de México

La Cuenca de México (Figura 1), donde se localiza la Ciudad de México, tiene un área de 9,600 km², la cual fue drenada artificialmente en 1789. El área de trabajo seleccionada para este estudio es una porción de la cuenca delimitada por el AMCM y algunas zonas conurbadas. El AMCM está construida principalmente sobre una planicie la cual estuvo ocupada por lagos someros, esta tiene una elevación promedio de 2240 msnm y está rodeada por conjuntos montañosos que incluyen la Sierras Chichinautzin, de Guadalupe, Nevada y las Cruces (Figuras 1 y 2)

De acuerdo con el comportamiento hidráulico y sus propiedades, Ortega y Farvolden (1989) propusieron cuatro unidades hidrogeológicas: (1) Acuitardo en depósitos lacustres cuaternarios, (2) Acuífero en rocas volcánicas cuaternarias y material piroclástico, (3) Acuífero principal en producción, en depósitos terciarios aluvio-piroclásticos y (4) Acuitardo en rocas volcánicas terciarias fracturadas. Los sedimentos lacustres y los depósitos basálticos son contemporáneos y se encuentran interdigitados.

Los sedimentos lacustres cuaternarios forman un acuitardo altamente compresible que sobreyace al acuífero regional Terciario aluvio-piroclástico, el cual se extiende hacia los sistemas montañosos de las Sierras Nevada y Las Cruces donde se comporta como acuífero no confinado. El acuífero cuaternario en rocas basálticas y materiales piroclásticos asociados se extiende hacia la porción sur de la Cuenca de México.

La figura 3 muestra los espesores del acuitardo lacustre, mismos que aumentan desde los límites de la planicie hacia el interior, donde alcanzan espesores de 100 a 200 m en la Ciudad de México y Texcoco, y los máximos espesores en las planicies de Xochimilco y Chalco llegan a ser de 300 m.

Antes de que se iniciara el bombeo del acuífero, las áreas lacustres y sus límites fueron zonas de descarga de agua subterránea, donde se tenían numerosos manantiales de agua potable que abastecían para su consumo a la ciudad (Ortega y Farvolden, 1989). El bombeo del acuífero principal se inició en 1847 cuando los primeros pozos artesianos fueron perforados en la planicie lacustre. El bombeo se incrementó sustancialmente a principios de la década de los años 30. Esta excesiva explotación provocó inversión de gradientes hidráulicos en el acuitardo, abatimiento de niveles de agua en el acuífero, subsidencia del terreno en el centro de la Ciudad de México cerca de 9 m y la ausencia de manantiales cerca de los límites de la planicie lacustre, desde finales de la década de los años 70 (Figura 4).

Con la finalidad de reducir futuros daños en el centro de la Ciudad de México y zonas adyacentes, las tasas de bombeo en el centro urbano fueron reducidas y nuevos pozos fueron perforados en otras partes de la Cuenca de

México como es el caso de las planicies de Chalco y Xochimilco localizadas en la porción sur de la serie de lagos (Figura 1). Los efectos de esta explotación del acuífero en la planicie de Chalco causaron el desarrollo de importantes problemas hidrogeológicos, como inversión de gradientes hidráulicos en el acuitardo, subsidencia del terreno del orden de hasta 0.40 m/año, la formación de lagos someros en el centro de la planicie y *dropping* de la superficie potenciométrica a una tasa anual de 1.0-1.5 m (Ortega *et al.*, 1993)

2.4 Distribución de fracturas en el Área Metropolitana de la Ciudad de México

Las fracturas han sido identificadas en la Cuenca de México a diferentes escalas y en diferentes unidades geológicas desde la década de los años 40, en consecuencia, diferentes hipótesis han sido propuestas para tratar de explicar su origen (Carrillo, 1947; Marsal y Mazari, 1959; Resendiz y Solana, 1969; SMMS, 1978, 1990 y 1991; Lugo-Hubp *et al.* 1991). Estas fracturas, además de la subsidencia del terreno han causado severos daños a las casas, edificios e infraestructura municipal (Zeevaert, 1991).

Las teorías para explicar el origen del fracturamiento pueden clasificarse en dos grupos principales uno en relación con el origen geológico y otro asociado a flujos de agua. El control geológico puede estar asociado a: (1) Cambios laterales y verticales en la sedimentología y estratigrafía en la secuencia sedimentaria, observados por Zeevaert (1953), Marsal y Mazari (1959) y Larson (1984); o por interdigitación de flujos de lava cuaternarios y piroclastos con los sedimentos lacustres (publicados por Ortega *et al.* 1993) y Zawadzki, (1996). (2) Control estructural: topografía del basamento como indican Auvinet y Arias (1991) y

Larson (1984). (3) Tectónica, donde fallas geológicas preexistentes pueden ser reactivadas como propuso Klreiter (1976), Melgoza (1978) y Garduño *et al.* (1997).

La generación de fracturas asociadas a flujos de agua son: (1) Deseccación por evaporación (Juárez Badillo, 1962; Holzer y Davis, 1976 y Alberro y Hernández, 1990). (2) Fuerzas de filtración (Lofgren, 1972; Juarez-Badillo y Figueroa, 1984 y Alberro y Hernández, 1990). (3) Fracturamiento hidráulico (Alberro y Hernández, 1990 y Jaime, A., 1988) (4) Abatimientos diferenciales en el acuífero (Holzer y Davis, 1976; Holzer, 1984 y Figueroa, 1989), y (5) Interacción acuífero-acuitardo: (Carrillo, 1947; Marsal y Mazari, 1959 y Lee y Shen, 1969). De cualquier manera estas teorías empíricas y numéricas que tratan de explicar el origen del fracturamiento en la Cuenca de México, no han sido validadas mediante instrumentación en campo para medir los diferentes parámetros que incluye la teoría. Recientemente Aguilar-Pérez *et al.* (2006) presentan un análisis numérico acoplado de las ecuaciones de flujo de agua subterránea y geomecánicas, para evaluar la deformación vertical del terreno asociada a la extracción de agua subterránea en escenarios de acuífero libre y acuífero confinado; en este último se analizan las condiciones de formación de fracturas hidrodinámicas; los resultados muestran que la extracción del Sistema Peñón, con un promedio de 527 l/s, ha causado una disminución de la carga hidráulica hasta de 35 metros en casi 40 años, dando lugar a una variación en la elevación del terreno superior a los seis metros para el acuífero confinado y de ocho metros para el no confinado; definieron también que los parámetros más sensibles a la deformación vertical fueron, en orden de importancia, el coeficiente de consolidación (C_v), la transmisividad (T) y el módulo de rigidez al corte (G), mientras que la

conductividad hidráulica del acuífero confinado (K) es el más sensible a los tiempos críticos de fracturamiento; finalmente, los caudales críticos de extracción en el acuífero, de 420 L/s a 470 L/s, se sobrepasaron desde el inicio de la operación del Sistema Peñón, causando la falla mecánica de los materiales del subsuelo para condiciones de confinamiento. Aguilar-Pérez *et al.*, (2006) determinaron también que, es imposible ajustar la deformación con un solo conjunto de valores hidráulicos y geomecánicos; necesariamente se tienen que considerar dos conjuntos de valores, uno para el periodo 1960–1984 y otro para 1985–1998; las simulaciones sugieren que, de continuarse con los actuales caudales de bombeo, la deformación total vertical del terreno será cercana a los diez metros para el año 2025.

2.5 Metodología

En este trabajo se incluye una revisión de informes técnicos y datos publicados relacionados con el fracturamiento, así como trabajo de campo dentro de un área seleccionada en la Cuenca de México.

Se recopiló y revisó la información disponible, la información consiste en publicaciones geológicas y geotécnicas, hidroestratigrafía y evolución de las condiciones de flujo de agua subterránea en la cuenca, y la interacción del acuífero-acuitardo.

El trabajo de campo fue realizado en la planicie de Chalco, de donde se tiene la mayor cantidad y más reciente información hidrogeológica publicada. En campo se realizó la cartografía de las fracturas considerando diferentes escalas.

Toda la información recopilada, así como los resultados obtenidos en campo, fue integrada en un mapa regional de la Cuenca de México, en el que se localizaron los sitios donde se tienen fracturas y el año en que fueron identificadas. Su distribución en el acuitardo y en el acuífero no confinado fue asociado al concepto del comportamiento hidráulico transitorio del sistema acuífero-acuitardo, como fue publicado por Rivera *et al.* (1991), Ortega *et al.* (1993), y Ortega *et al.* (1998), el concepto de comportamiento transitorio fue incorporado a la zonificación regional del fracturamiento.

La información hidrogeológica, geológica, evidencias de campo y las características de las fracturas fueron usadas para definir áreas que pueden ser críticas en términos de contaminación al acuífero y peligrosas para la población de la ZMCM.

2.6 Resultados

Evolución del fracturamiento

El tema ha sido publicado en la literatura geotécnica desde la década de los años 40 y el número de casos ha ido en aumento (Figura 5). Generalmente son de fracturas que afectan casas habitación en áreas de algunos kilómetros cuadrados, fueron descritos en informes técnicos alrededor de dos a cinco años después de que aparecieron, ya que las fracturas localizadas en áreas despobladas, raramente son mencionadas, aunque sean del conocimiento de los granjeros de la zona. La información histórica muestra que aparecen más fracturas con el transcurso del tiempo y los consecuentes problemas asociados también están en aumento.

La Figura 6 muestra la localización de diferentes áreas donde existe fracturamiento, también presenta la referencia y el año en que aparecieron o cuando fueron estudiadas o publicadas. De esta figura, se desprende la identificación de dos zonas principales: Áreas “A” y “B”. La primera incluye las planicies lacustres de México y Texcoco, donde la presencia de fracturas fue principalmente referida su aparición entre los años de 1940 la década de los años 70 (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1969; Melgoza, 1978). La segunda zona incluye la parte sur de la Cuenca de México en las planicies de Chalco y Xochimilco, donde los casos de fracturamiento que afectan a casas y tierras agrícolas iniciaron en la década de los años 70 y se incrementó en la siguiente década (Auvinet, 1981; Murillo *et al* 1991; Ortega, 1993 y Zawadzki, 1996).

Este hecho puede ser correlacionado con la evolución del bombeo del principal acuífero en producción, el cual se inició en el centro de la Ciudad de México y áreas adyacentes desde finales del siglo pasado y se hizo intenso en la década de los años 30 (Figura 4b). El intenso bombeo causó despresurización y consolidación de los depósitos lacustres, dando como resultado 8.5 m de subsidencia del terreno en el centro de la Ciudad de México (Figura 4c), durante el periodo comprendido entre los años 1900 y 1970, ha causado daños a casas, edificios e infraestructura municipal. Para reducir futuros daños, las tasas de bombeo en el centro de la ciudad fueron reducidas y fueron perforados nuevos pozos en otras partes de la Cuenca de México, los más recientes en el acuífero principal cerca de la Ciudad de México, están situados en las subcuencas de Chalco y Xochimilco (Figura 2). A mediados de la década de los años 70 la extracción total en los límites de la subcuenca de Chalco era aproximadamente de

5 m³/seg. A principios de la década de los años 80 fueron perforados 14 pozos en el centro de la planicie lacustre de Chalco a profundidades de 400 m para satisfacer la creciente demanda de la Ciudad de México aportando de 1 a 1.5 m³/s a la ciudad. A principios de los años 90, la explotación total de agua subterránea en la subcuenca de Chalco era del orden de 8 m³/s lo cual representa cerca del 16% del total de la extracción del acuífero granular de la Cuenca de México (Sahab,1992).

Los efectos de la explotación del acuífero en la parte sur de la cuenca causó el desarrollo de importantes fracturas de las que se tuvo información a finales de la década de los años 80 (Ovando-Shelley y González-Valencia, 1990; Lugo *et al.*, 1996, Zawadsky, 1996, Escobar, 2004, Aguilar *et al.*, 2006). Se espera que durante este periodo, las fracturas desarrolladas en el acuitardo lacustre y en la parte no confinada del acuífero aluvio-piroclástico sean la consecuencia de la concentración de esfuerzos inducidos por el excesivo bombeo. Casos similares de fracturamiento asociados al bombeo han sido publicados en otras partes como es el caso de Las Vegas (Holzer, 1984), Arizona (Leonard, 1929; Poland y Davis, 1969; Schumann y Poland, 1969; Anderson, 1973; Jachens y Holzer, 1982; Holzer, 1984 y Corwin, 1991); California en la Cuenca de Santa Clara (Poland y Davis, 1969), entre otros.

Clasificación de las fracturas

Las fracturas presentes en la figura 6 pueden reconocerse y clasificarse con base en su apertura y su longitud, como se muestra en la figura 7. De las figuras 6 y 7, las fracturas pueden ser clasificadas en tres categorías (1) fracturas escala *micro* (2) fracturas escala *local* y (3) fracturas escala *regional*. Rudolph *et*

al. (1991) y Ortega (1993) concluyeron que el flujo de agua subterránea y el transporte de solutos en los sedimentos lacustres están controlados por microfracturas en las planicies de Texcoco y Chalco respectivamente. Estos autores calibraron un modelo numérico contra perfiles de soluto y obtuvieron aperturas de fracturas entre 300 y 100 μm y espaciamientos entre ellas de 1 a 2 m, la profundidad de estas fracturas es de 20 o 25 m. Es de esperarse que este tipo de fracturas se extienda a toda la planicie lacustre de la Cuenca de México. En la figura 8 están dibujadas las aperturas de las microfracturas vs una estimación de su longitud.

Las fracturas escala local pueden ser observadas en campo, las aperturas de éstas varían desde algunos centímetros a algunos decímetros, la longitud también puede variar en el orden de unas decenas a cientos de metros y la profundidad no se conoce. Este tipo de fracturas puede ser vista en toda la planicie lacustre y presenta rasgos característicos de un lugar a otro, generalmente de geometría errática, excepto cuando se encuentran en las inmediaciones de los volcanes o de zonas con pozos de bombeo, donde se desarrollan paralelamente a la topografía, ya sea de la línea de pozos o de los contactos litológicos. En la planicie de Texcoco, cerca del evaporador solar, donde la salmuera es extraída de dos principales capas arenosas localizadas a 20 y 40 m de profundidad, las fracturas forman rectángulos regulares del orden de decenas de metros. Una gráfica de log de aperturas vs log de longitudes es presentado en la figura 7, las cuales se encuentran entre las dibujadas de dimensión micro y regional.

Las fracturas a escala regional presentan aperturas del orden de uno a 5 metros y se aprecian de una manera continua desde algunos cientos hasta varios kilómetros. Este tipo de fracturas se localizan principalmente en los límites de la planicie lacustre (ej. línea de pozos de Santa Catarina, Figura 6), en la parte no confinada del acuífero aluvio-piroclástico (Florida-Echegaray, Figura 6) y en las rocas volcánicas cuaternarias y piroclastos (Iztapalapa, Figura 6). Este tipo de fracturas afectan cimientos y muros de casas a lo largo de su trayectoria.

En la Figura 8 se obtiene una relación lineal entre los tres tipos de fracturas presentadas anteriormente donde, las de escala micro tienen longitud pequeña y las regionales grande; las de escala local se distribuyen entre ambas. Es difícil de especular si esta es una relación entre longitud y profundidad de fracturamiento, sin embargo la pregunta acerca de la extensión de la profundidad de las diferentes escalas del fracturamiento aun existe.

Zonificación del fracturamiento

De la Figura 6 se desprenden numerosas observaciones. La mayoría de las fracturas se encuentran en el acuitardo lacustre, en la parte no confinada del acuífero aluviopiroclástico y en el acuífero de rocas volcánicas cuaternarias y piroclastos. En el caso de las fracturas presentes en el acuitardo lacustre, las escalas micro y local se localizan en el centro del área y las regionales cerca de los límites del acuitardo. El tipo de fracturas que se presentan en el acuitardo dependen de la unidad hidrogeológica que lo subyace. En la Figura 8 se muestran diferentes modelos conceptuales de fracturamiento. En esta figura, el acuitardo cubre al acuífero principal (Figura 8a), las rocas volcánicas cuaternarias

contemporáneas y piroclastos (8b) y las estructuras volcánicas terciarias (8c). En estos tres escenarios, el espesor del acuitardo es delgado cerca de los límites y se incrementa hacia el interior de las planicies; y ya que el tiempo de respuesta del acuitardo y su consolidación es proporcional al espesor, se infiere que la consolidación diferencial pueda ocurrir con el desarrollo de grietas de tensión paralelas a los contactos de otras unidades hidrogeológicas. La carga hidráulica en la interestratificación entre el acuitardo y otras unidades está controlada por la magnitud del bombeo y la permeabilidad de la unidad que lo subyace (Ortega *et al.* 1998). En el caso del acuífero granular, estos cambios son importantes con respecto al tiempo (Figura 4b) y las fracturas pueden formarse en zonas donde el basalto termina (Figura 8b) (Zawadzki, 1996), en las estructuras volcánicas terciarias, los cambios de carga hidráulica no existen y los grandes cambios en la carga se presentan hacia el interior de la planicie lacustre donde ocurre la consolidación creando una consolidación diferencial mas fuerte y originando grietas de tensión como se muestra en la Figura 8c.

Con base en la presencia de fracturas en las diferentes unidades hidrogeológicas y características obtenidas del trabajo de campo, se presenta una clasificación en la tabla 1 y en la Figura 9, donde se consideran tres tipos de fracturas: (1) fracturas presentes en el acuífero no confinado (UAQF) (Figura 8a y 9); (2) fracturas presentes en planicies lacustres (AQT), en este tipo se hace una subdivisión: fracturas presentes cerca de los márgenes lacustres donde el acuitardo es muy delgado (M) y las que están en el interior de las planicies (I) donde el acuitardo es más potente (Figuras 3 y 9); y (3) el tercer grupo se asocia a fracturas en materiales volcánicos cuaternarios.

Las fracturas cercanas a los límites de las planicies están controladas por la estratigrafía y las unidades hidrogeológicas afloran hacia las montañas que definieron los antiguos lagos, donde la distribución diferencial de los esfuerzos es producida, de aquí se definen tres categorías de áreas: (Mu) fracturas cercanas al acuífero granular no confinado (Figura 8a y 9), (Mq) fracturas cercanas a flujos de lava cuaternarios y piroclastos (es característica la interdigitación de depósitos lacustres con flujos de basalto) (Figura 8b y 9) y (Mt) fracturas cercanas a estructuras volcánicas terciarias (con saltos abruptos en el basamento) (Figuras 8c y 9).

Las fracturas presentes en el interior de las planicies lacustres pueden ser clasificadas en aquellas formadas por la influencia de bombeo somero de las principales capas arenosas para explotación de salmuera como es el caso de Texcoco (Is) (Figura 8b y 9) y aquellas posiblemente asociadas a los efectos de bombeo profundo como a la consolidación diferencial (Id) (Figura 8a, 8b y 9). Esta clasificación considera las condiciones hidrogeológicas locales y la interacción entre el acuífero y el acuitardo en particular y la respuesta transitoria del acuitardo al bombeo del acuífero.

Con base en las figuras 6, 7, 8, y 9 se desprenden algunas observaciones: Las fracturas de escala local están asociadas a áreas localizadas en el interior de las planicies lacustres (AQT(Is)) y AQT(Id)), las fracturas de escala regional están asociadas al acuífero no confinado (UAQF), a los límites de las planicies lacustres con tipos indistintos de roca o material (AQT(Mu),(Mq),(Mt)) y a rocas volcánicas cuaternarias y piroclastos (QVR). Estas observaciones son consistentes con los resultados publicados por Ortega y Farvolden (1989), Ortega *et al.* (1993) y Ortega

et al. (1998) que consideran la interacción dinámica entre el acuitardo lacustre y al acuífero en explotación. Estos autores concluyen que antes de iniciarse el bombeo en el acuífero los gradientes hidráulicos prevalecientes en el acuífero eran hacia arriba y existían numerosos manantiales en los límites de las planicies. Como resultado de la respuesta hidráulica del acuitardo al significativo descenso de la superficie potenciométrica del acuífero subyacente debido a la extracción de agua subterránea, existen evidencias que indican que donde el acuitardo es delgado (menor a 100 m) los gradientes hidráulicos se han invertido y ahora tienen una dirección hacia abajo. El acuífero no confinado presenta más de 50 m de descenso de la superficie piezométrica, en contraste con las áreas lacustres donde el acuitardo aporta agua.

Es por eso que la parte más delgada del acuitardo y el acuífero no confinado cerca de los límites de las planicies lacustres son las zonas más afectadas en términos de cambios de presión de poro, el cual afecta la distribución diferencial de los esfuerzos efectivos causando la falla de los materiales y la formación de fracturas de escala local y regional. En contraste, hacia el centro de la subcuenca de Chalco donde los sedimentos son más gruesos, los gradientes ascendentes aún continúan en la parte superior del acuitardo (Ortega y Farvolden, 1989) y las fracturas pueden ser asociadas a procesos de evaporación, debido al desagüe de los lagos antiguos y a las fluctuaciones del nivel freático en las partes someras del acuitardo, generando fracturas de escala micro y local.

Con base en la información presentada anteriormente, la respuesta dinámica del acuífero regional aluvio-piroclástico y de los sedimentos lacustres,

juegan un papel muy importante en el desarrollo de las fracturas, donde la presión de poro continúa cambiando hacia el acuífero no confinado y hacia el acuitardo, y donde el número de fracturas aumenta con respecto al tiempo, como lo muestran las evidencias históricas. Es de esperarse que en un futuro se desarrollen fracturas en nuevas áreas. De cualquier modo, es necesaria una evaluación cuantitativa para entender los mecanismos de fracturamiento y su evolución bajo diferentes condiciones hidrogeológicas.

Implicaciones de contaminación y peligro hacia el acuífero

El inevitable incremento en la demanda de agua para abastecer a la AMCM necesita de una continua explotación de agua subterránea dentro de la Cuenca de México, con la continua respuesta transitoria del sistema y el inevitable incremento del número de áreas afectadas por fracturas. Esto es crítico para la migración de contaminantes dispuestos en la superficie hacia el acuífero subyacente peligros que afectan a la población y sus propiedades.

Diferentes estudios realizados por el Centro de Investigación en Agua Subterránea de la Universidad de Waterloo y el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México consideran la investigación de migración de contaminantes a través de fracturas (Rudolph *et al.* 1991; Ortega 1993; Pitre, 1994; Cervantes, 1996; Ortiz, 1996; Zawadzki, 1996 y Leal, 1997). Estos estudios muestran como las fracturas representan una ruta preferencial de contaminantes hacia el acuífero regional acortando el tiempo de transporte de los contaminantes y el tiempo de impacto al acuífero, en consecuencia como el riesgo del desarrollo de fracturas aumenta, el riesgo de contaminación del acuífero

aumenta también. Por esta razón es muy importante el entendimiento de la formación y evolución del fracturamiento para el manejo a largo tiempo del agua subterránea en la Ciudad de México.

Desde la década de los años 70 las fracturas en la ZMCM han afectado infraestructura municipal y representado peligro para la población y sus propiedades, lo que ha causado pérdidas económicas importantes. Como las áreas afectadas por fracturas van en aumento, el incremento de riesgo y peligro se incrementa también.

Las áreas más afectadas están localizadas en el acuífero no confinado cerca de las planicies lacustres (UAQF)(Figura9) y en los límites del acuitardo lacustre donde sus espesores son menores a los 100 m (AQTM) independientemente del tipo de roca al cual sobreyacen. (AQTMu, AQTMq y AQTMt) (Figura 9). Con base en la respuesta transitoria del sistema acuífero-acuitardo en la Cuenca de México, se supones que los daños causados por fracturas se incrementen en el futuro y sea necesario un plan de desarrollo urbano y de reubicación de vivienda para tratar de evitar efectos adversos en la población. Como parte de un estudio a largo plazo del comportamiento del fracturamiento, el Instituto de Geología lleva a cabo estudios de campo para caracterizar las fracturas a diferentes escalas con el fin de conocer los peligros para la población y un plan para desarrollo urbano en áreas con alto riesgo.

2.7 Conclusiones

Se establecieron tres diferentes escalas de fracturamiento en la Cuenca de México: (1) Microfracturas (30-100 μm), (2) fracturas locales (decenas de cm.) y

(3) fracturas regionales (algunos metros de apertura). El desagüe de lagos antiguos dio como resultado la generación de fracturas en escala micro y local. Como resultado del bombeo que inició a finales del siglo pasado hasta mediados de la década de los años 50, se desarrollaron numerosas fracturas en el acuífero granular no confinado y en el acuitardo lacustre de escalas local y regional. En Texcoco se desarrollaron fracturas de escala local debido al bombeo somero en las dos principales “capas duras” de la secuencia lacustre. Con el fin de reducir la subsidencia del terreno en el centro de la Ciudad de México, gran parte de agua subterránea que se extraía del centro de la ciudad fue transferida a las subcuencas de Chalco y Xochimilco hacia los límites de las planicies lacustres durante los años 60 y 70 y hacia el centro de las mismas en los años 80. Esta transferencia de bombeo ha dado como resultado la generación de significativos problemas hidrológicos en ambas cuencas, en particular en la generación de fracturas de escala local y regional.

Debido a que el acuitardo lacustre que sobreyace al acuífero en producción presenta una respuesta transitoria, existen fracturas que prevalecen y nuevos casos de fracturamiento se incrementarán de manera exponencial en un futuro cercano, causando problemas a casas, edificios e infraestructura municipal. En particular el riesgo de peligro a la población también aumentará y los problemas de contaminación por migración a través de las fracturas aumentarán el riesgo de contaminación al acuífero en producción. Las áreas con más alto riesgo, peligro y de contaminación al acuífero son los límites de la secuencia lacustre donde el acuitardo es menor a 100 m, en particular cerca de las estructuras volcánicas cuaternarias. Una franja de dos Km. a partir de los límites del acuitardo lacustre

hacia el interior del acuífero no confinado y el acuífero volcánico cuaternario son también áreas donde desarrollan fracturas de escala regional.

Tablas

Tabla 1. Zonificación del fracturamiento en el AMCM.

SISTEMA DE FRACTURAS	SUBSISTEMAS
<p style="text-align: center;">UAQF</p> <p>Fracturas en el acuífero no confinado</p>	
<p style="text-align: center;">AQT</p> <p>Fracturas en el acuitardo lacustre.</p> <p>(M): Fracturas próximas a las márgenes lacustres.</p> <p>(I): Fracturas en el interior de las planicies lacustres.</p>	<p>(Mu): Zona lacustre cercana al acuífero no confinado</p> <p>(Mq): Zona lacustre cercana a los depósitos volcánicos Cuaternarios. Incluye zonas de interestratificación volcánica y lacustre.</p> <p>(Mt): Zona lacustre cercana a rocas volcánicas Terciarias</p> <p>Is: Asociadas a extracción de agua de las “capas duras”.</p> <p>Id: Asociadas a la extracción en el acuífero granular.</p>
<p style="text-align: center;">QVR</p> <p>Fracturas en materiales volcánicos Cuaternarios.</p>	

Tabla 1. Zonificación del fracturamiento en el AMCM

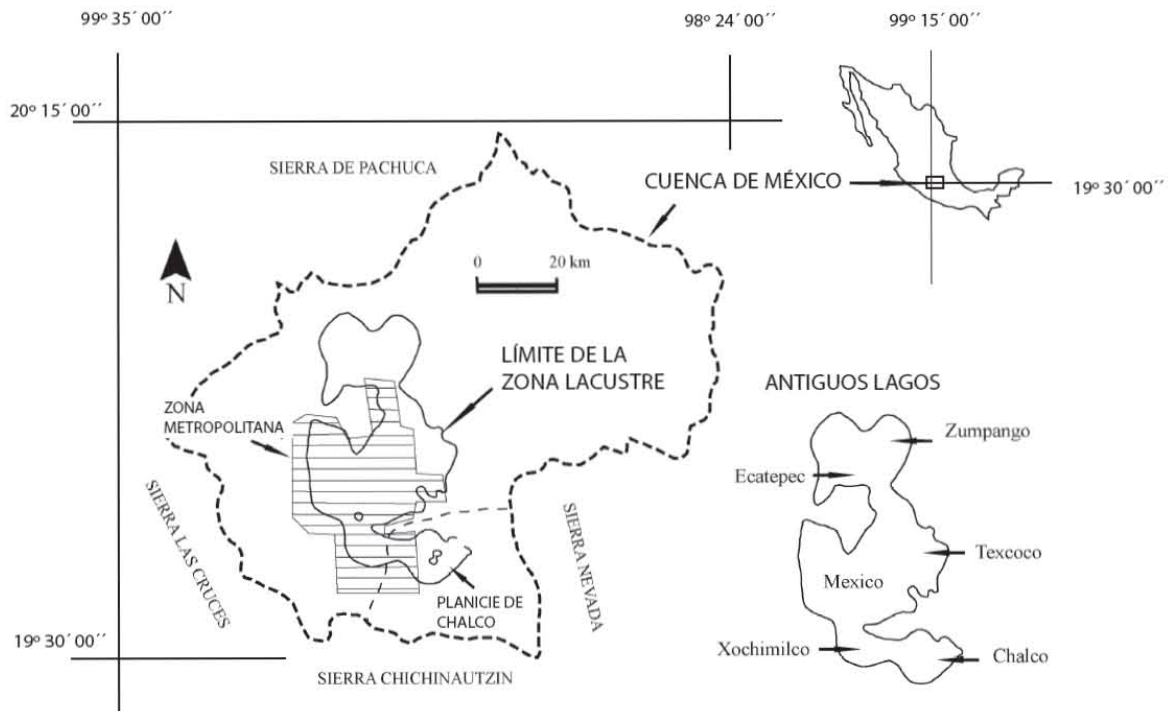


Figura 1. Localización del Área Metropolitana de la Ciudad de México en el interior de la Cuenca de México y distribución de los antiguos lagos (Modificada de Ortega et al., 1993)

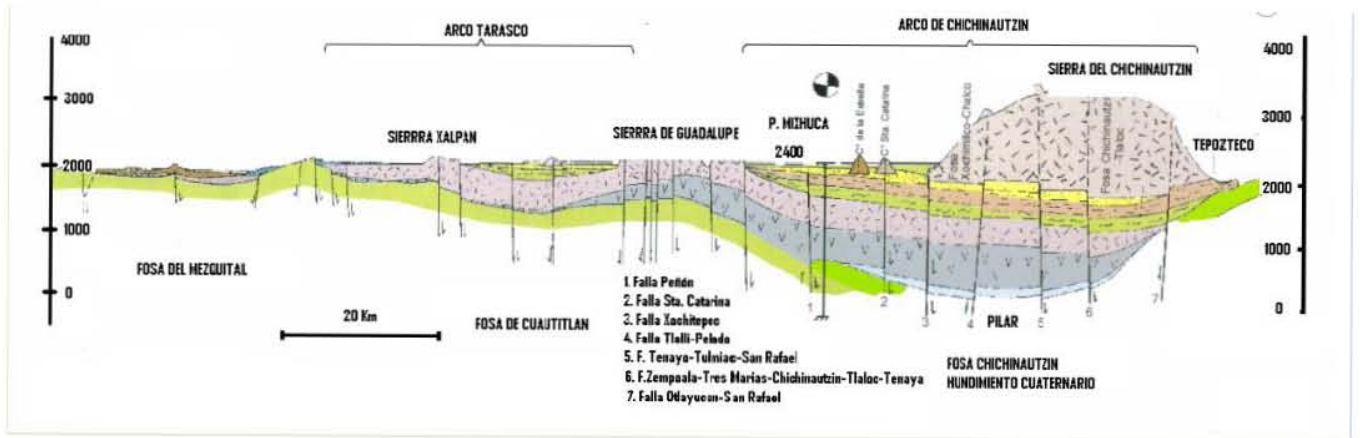


Figura 2. Sección geológica de la Cuenca de México (Santoyo *et al.* 2005)

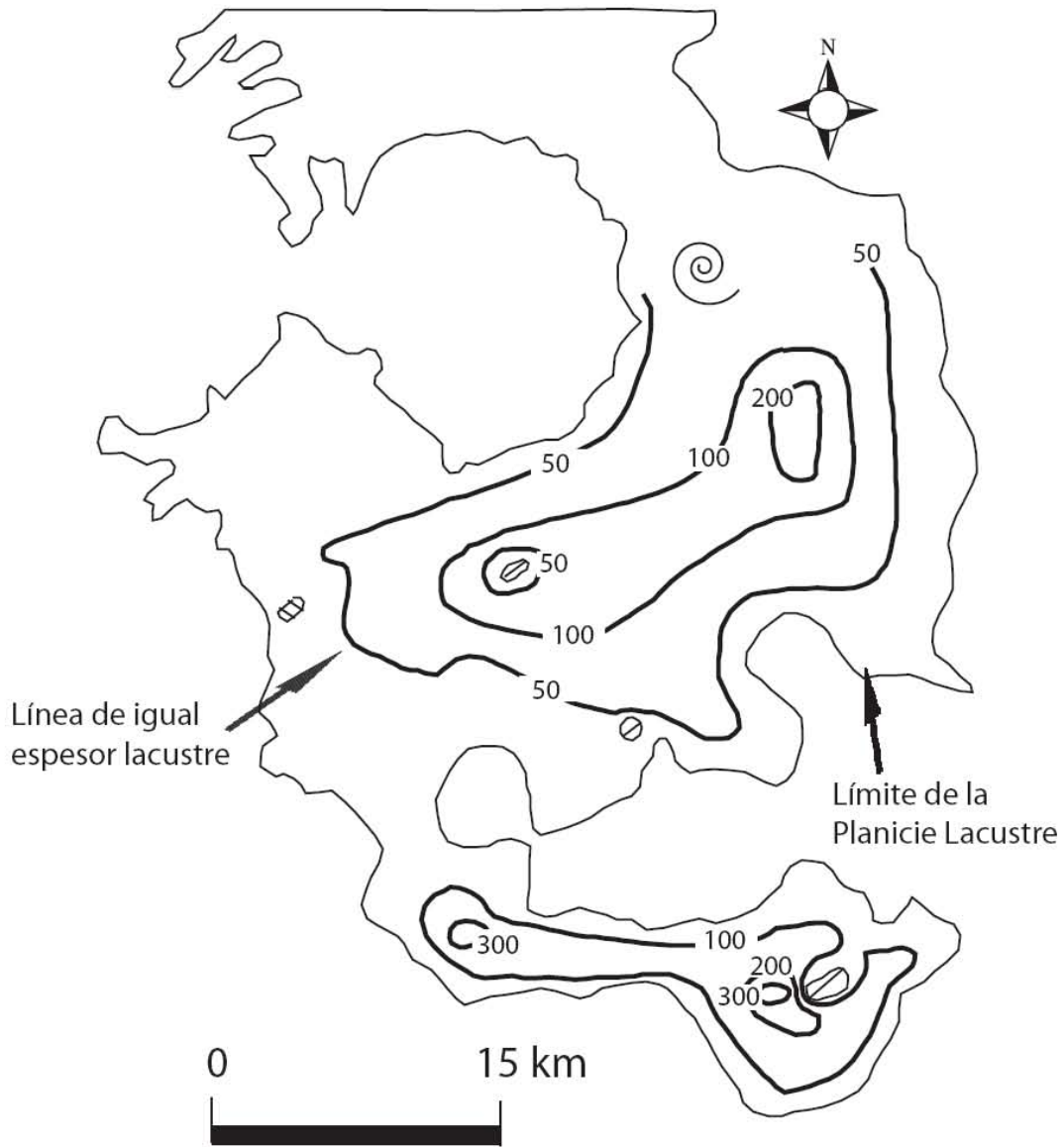
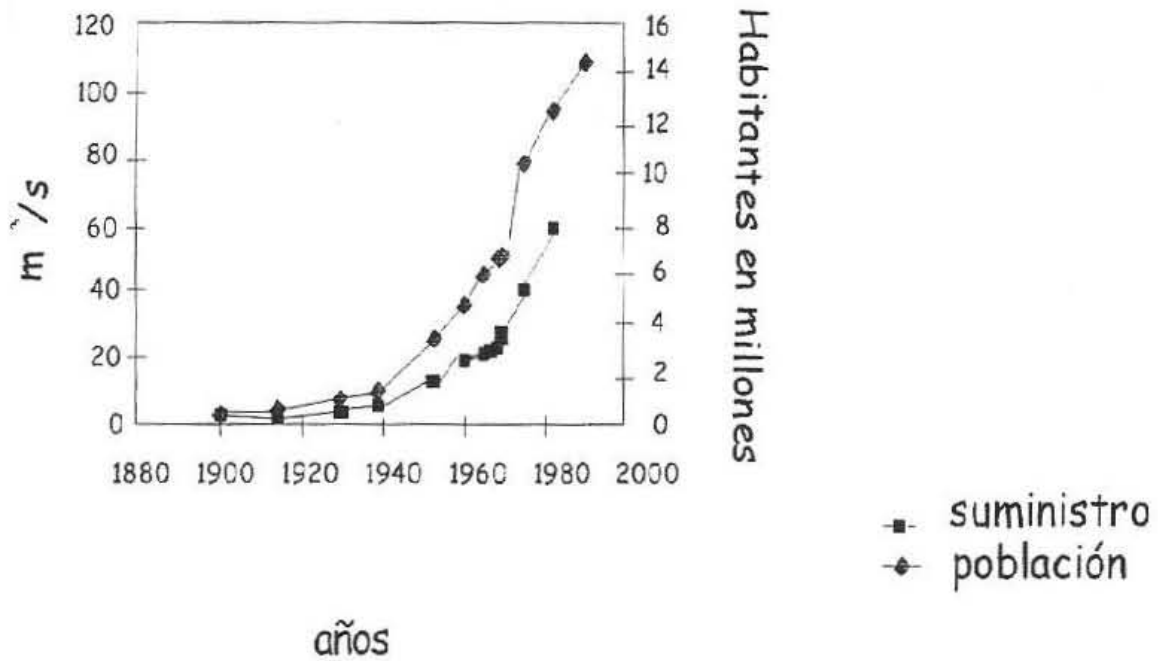
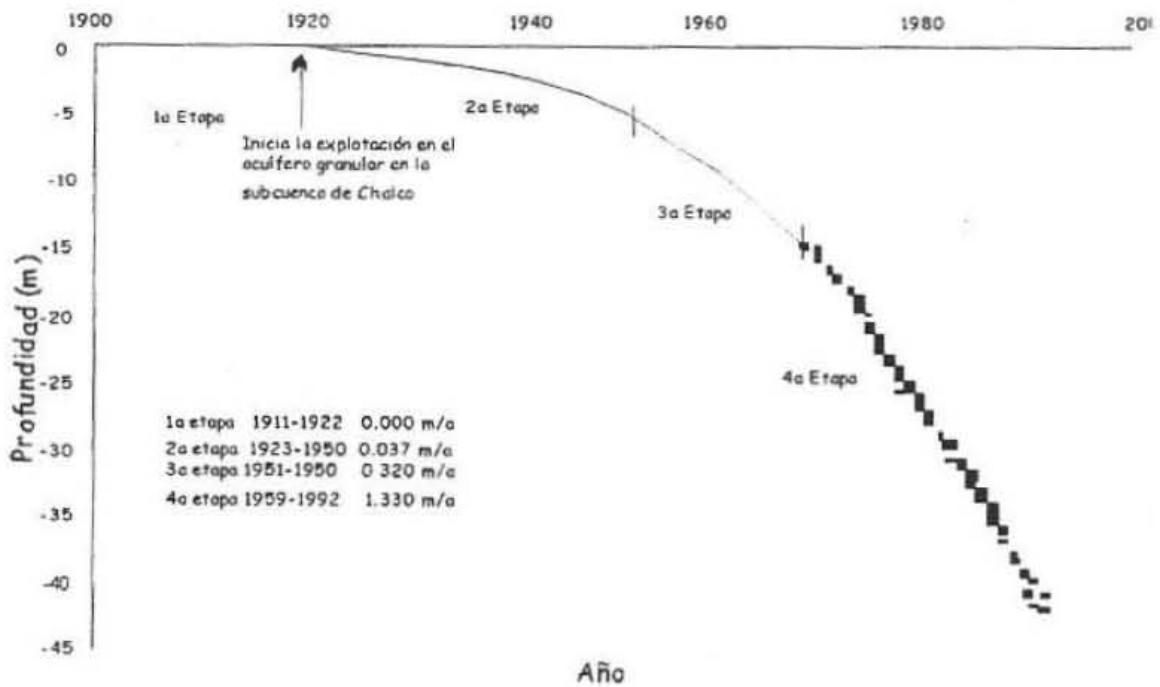


Figura 3. Espesores del acuitardo lacustre.

a)



b)



c)

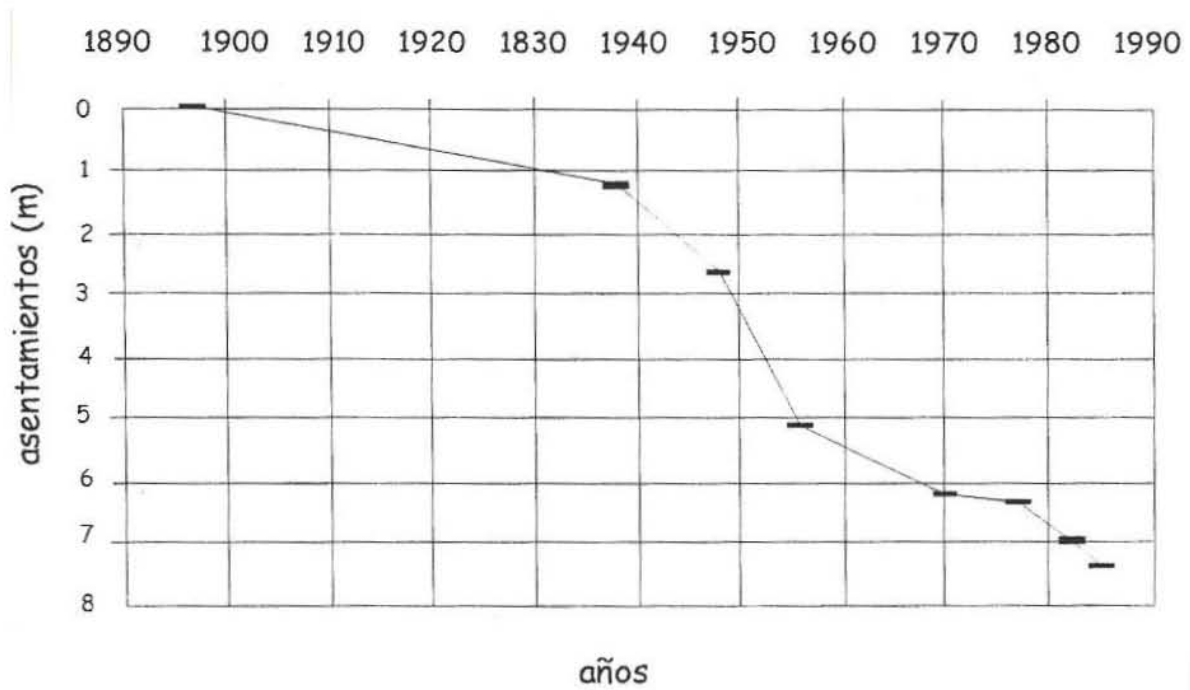


Figura 4. (a) Crecimiento de la población y demanda de agua en el AMCM, (b) Evolución del descenso del nivel piezométrico en el acuífero principal. (c) Evolución de la subsidencia en el núcleo de la Ciudad de México.

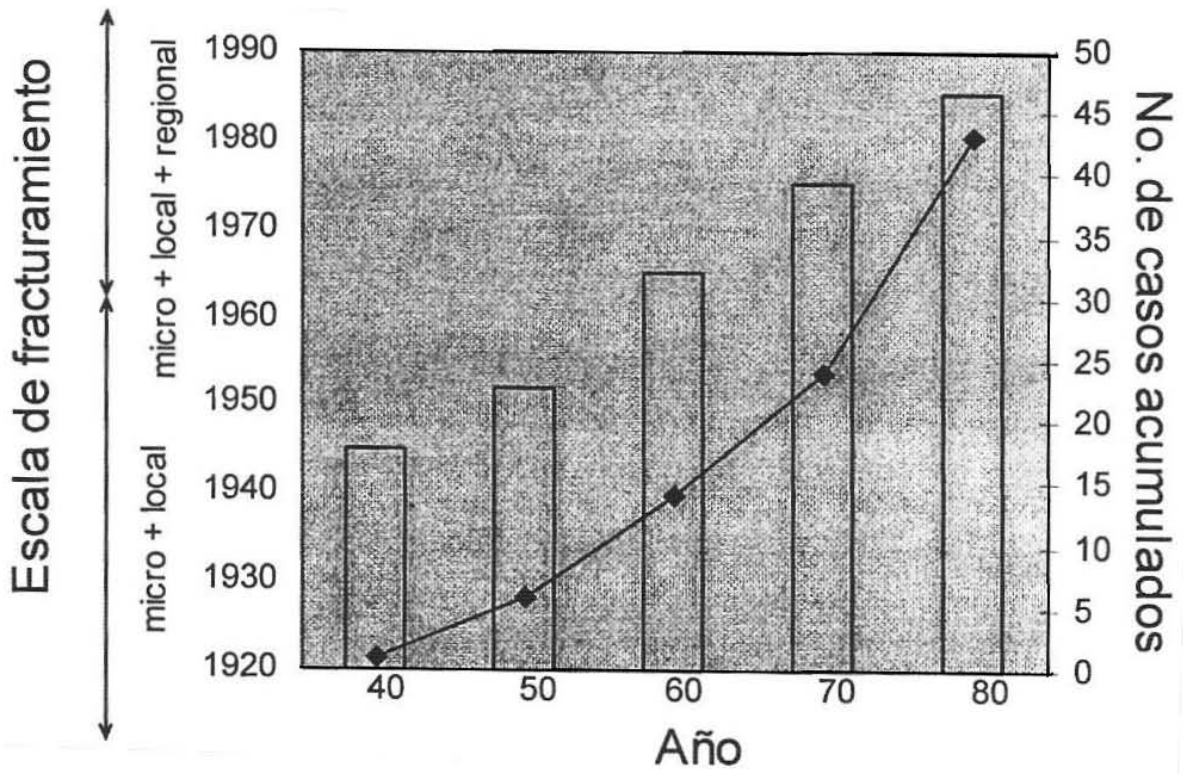


Figura 5. Número de áreas afectadas por fracturas en función del tiempo, en el interior del AMCM.

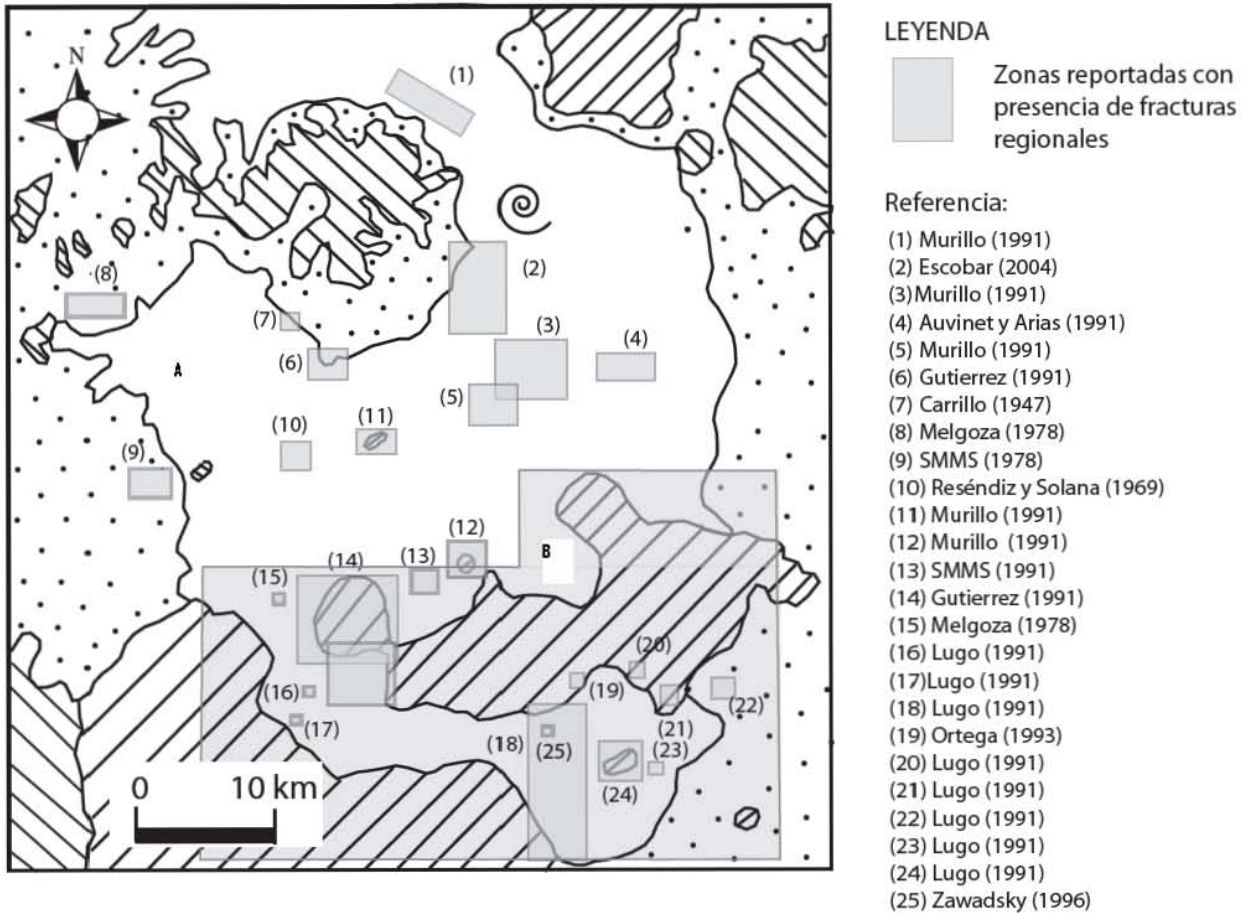


Figura 6. Localización de áreas afectadas por fracturas. Se muestra la delimitación del área estudiada y la referencia.

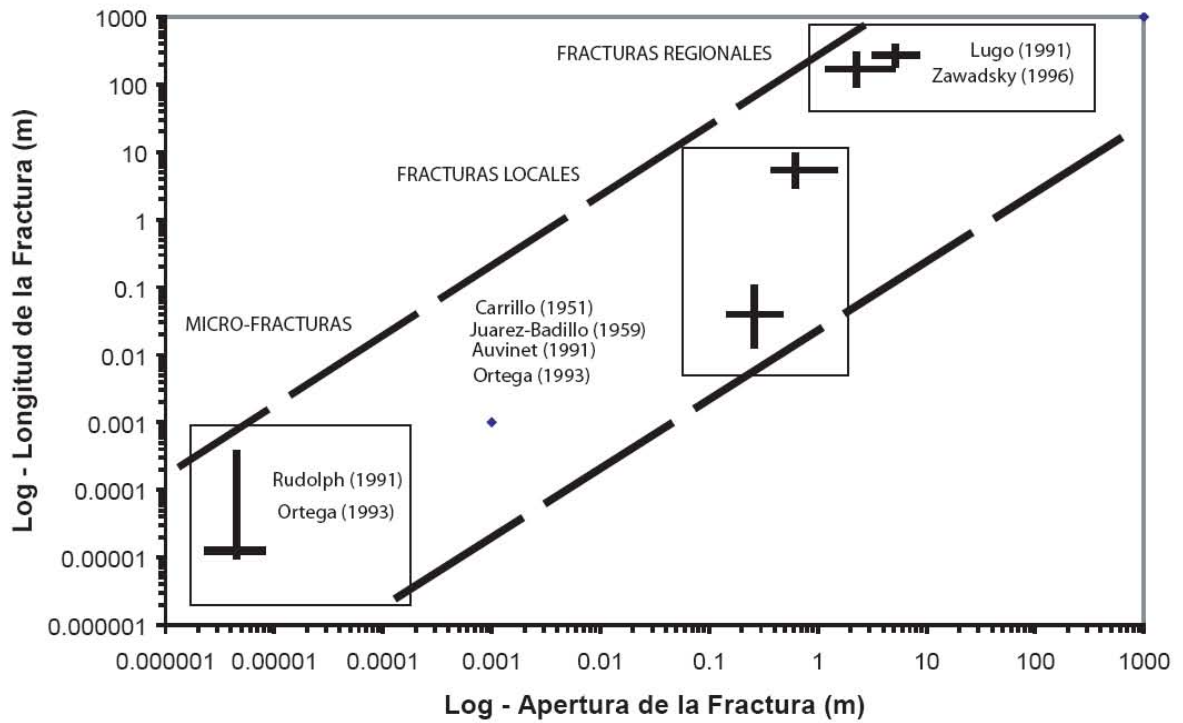


Figura 7. Gráfica bilogarítmica de la apertura de las fracturas contra su longitud.

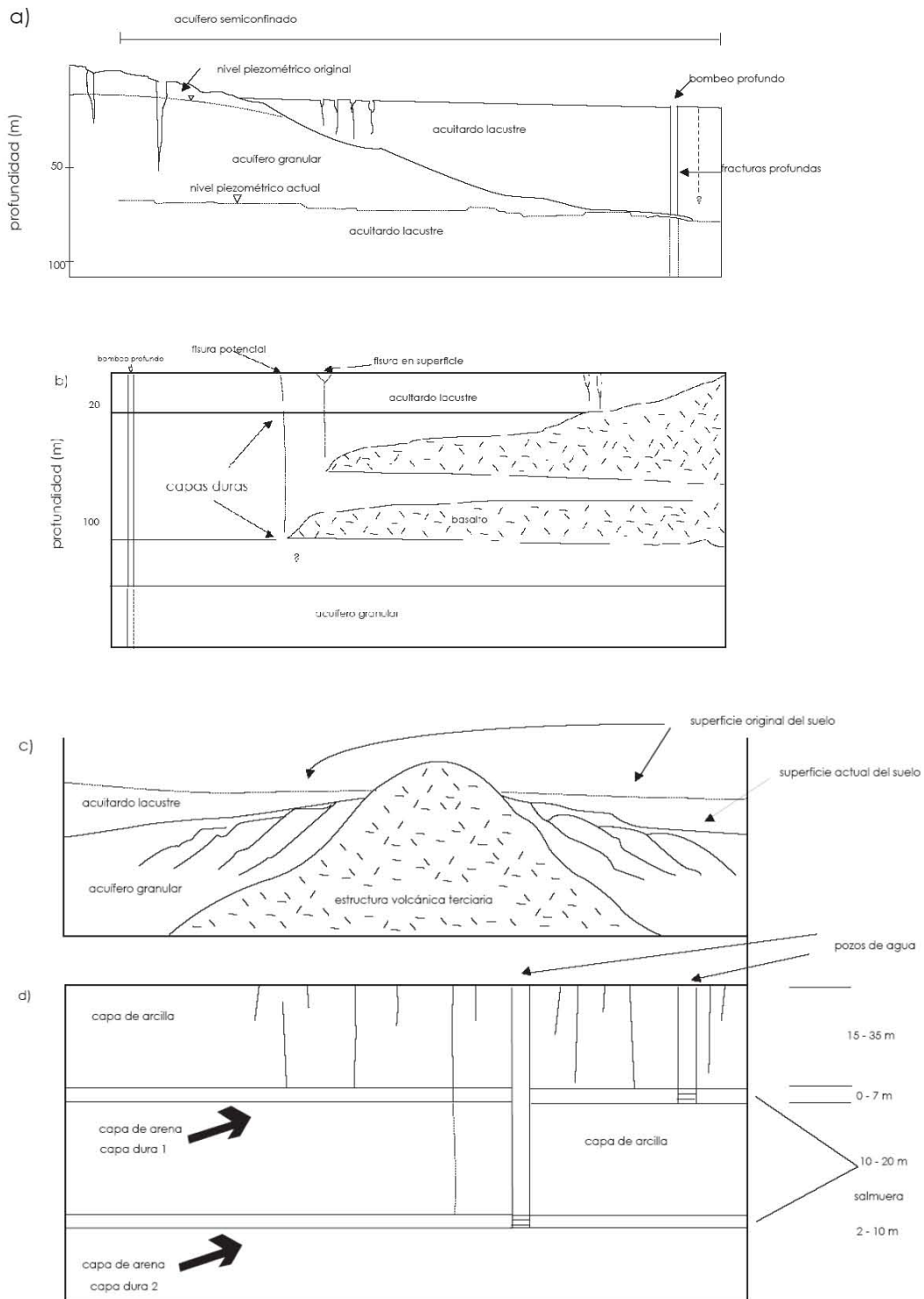


Figura 8. Modelos conceptuales de fracturamiento.

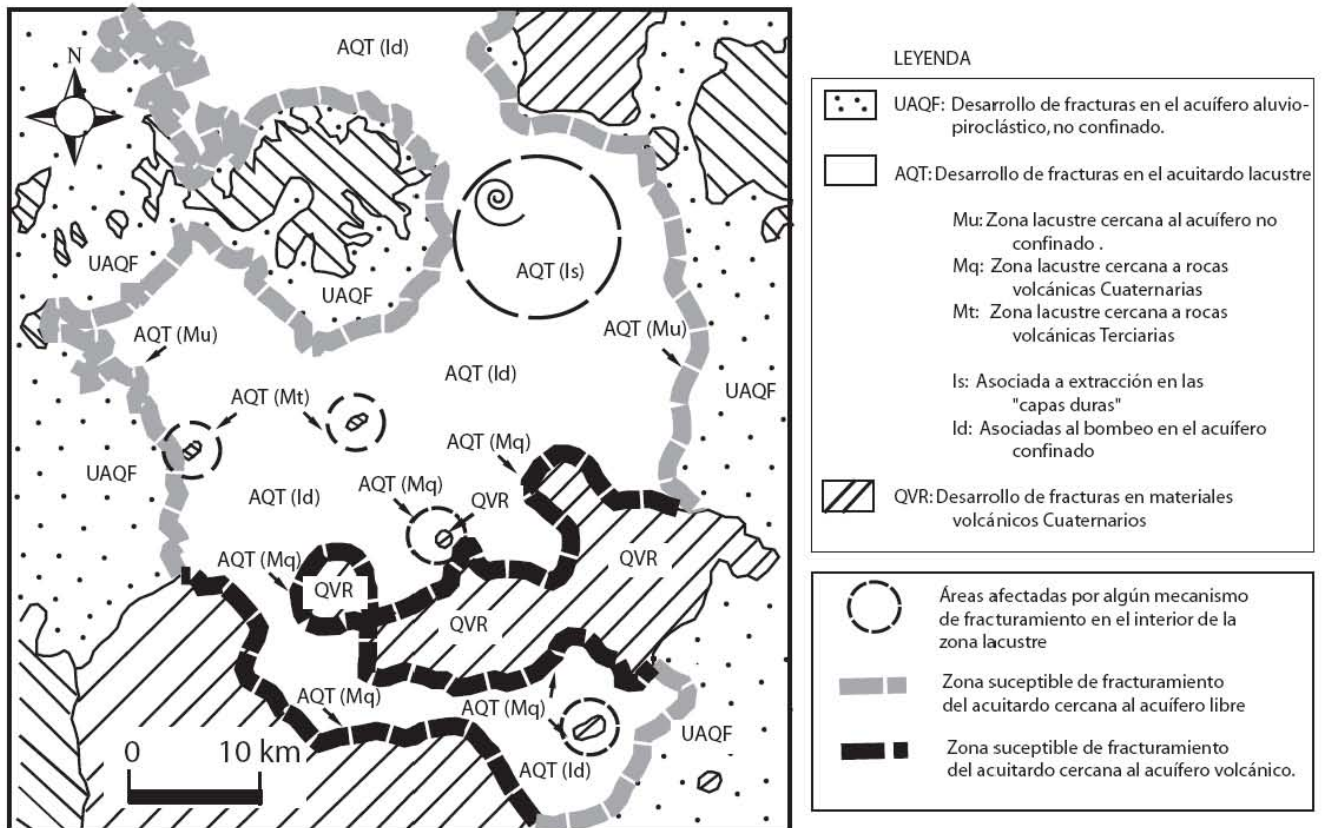


Figura 9. Zonificación propuesta del fracturamiento en el AMCM.

Capítulo 3. Origen y Evolución de un Nuevo Lago en la Planicie de Chalco: Implicaciones de Peligro por Subsistencia e Inundación de Áreas Urbanas en Valle de Chalco (Estado de México) y Tláhuac (Distrito Federal).

Resumen.

La operación de catorce pozos construidos en la década de 1980, denominado Sistema Mixquic-Santa Catarina (SMSC), en la planicie de Chalco, ubicada al sureste de la Ciudad de México, está causando una de las transformaciones ambientales del paisaje más importantes de la Cuenca de México en las últimas dos décadas. En la zona central de la planicie, donde existe el mayor espesor de sedimentos lacustres (300 m), se han generado hundimientos de hasta 40 cm/año como resultado de la consolidación del acuitardo por efecto del bombeo en el acuífero principal subyacente. En esta depresión topográfica se está desarrollando un nuevo lago, por la acumulación de agua superficial, cuya evolución y forma actual es controlada por la extensión y la geometría de una colada de basaltos, proveniente de la Sierra de Santa Catarina, ubicada a 50 metros de profundidad dentro de la secuencia lacustre. La superficie del Nuevo Lago de Chalco, se ubica 12 metros por debajo del nivel original del terreno, cubriendo una extensión actual de 1,000 ha. De acuerdo con los controles y magnitud de la subsidencia regional observada, se estima un crecimiento de hasta 1,500 ha para el año 2015, incrementando el riesgo por inundación a las zonas urbanas de Tláhuac y Valle de Chalco. Para reducir el peligro y riesgo de subsidencia e inundaciones será necesario analizar la conveniencia de incrementar la cantidad y la eficiencia de la infraestructura hidráulica a futuro contra la opción de reubicar varias colonias, en un radio aproximado de 2.5 a 3 Km. con centro en el pozo P9 del SMSC. La creación de un Consejo Metropolitano permitirá definir las estrategias dinámicas e integrales para el ordenamiento del territorio, y en particular para la prevención de desastres y el adecuado equilibrio entre la planeación de las áreas propuestas de conservación y mejoramiento ambiental, con la reducción o mitigación del riesgo.

3. 1 Introducción

La operación de catorce pozos construidos a principios de la década de 1980, denominado Sistema Mixquic-Santa Catarina, en la Planicie de Chalco ubicada al sureste de la Ciudad de México (Figuras 1 y 2a), está causando una de las transformaciones ambientales del paisaje más importantes de la Cuenca de México en las últimas dos décadas, con profundas implicaciones sociales y económicas asociadas al riesgo progresivo de subsidencia e inundaciones. Debajo de los sedimentos lacustres, definidos en términos hidrogeológicos como acuitardo, sobre los que se ubica la Ciudad de México, se extiende un importante

acuífero regional granular del que se extrae agua, para abastecimiento principalmente de agua potable, del cuál se extraen un total de 50 m³/seg (INEGI-INE, 2000), de los cuales Chalco aporta cerca del 3%.

La extracción de agua subterránea en este acuífero en el siglo XIX y XX ocasionó hundimientos totales cercanos a 10 metros en el centro de la Ciudad de México. En la planicie de Chalco, la extracción extensiva de agua subterránea se inició a mitad de la década de los 1980`s, igualando en menos de 20 años los hundimientos totales de la Ciudad de México. Los hundimientos son de hasta de 40 cm/año en el centro de la planicie de Chalco, donde el espesor de los sedimentos lacustres es de 300 metros, y se estima que para el año 2015 serían de un total de 15 metros; esto con base en modelos numéricos de predicción de la deformación vertical del terreno, en mediciones de parámetros hidráulicos y de mecánica de suelos, tanto del acuífero como de los sedimentos lacustres (Ortega *et al.*, 1993; Ortega *et al.*, 1999). Sin embargo, los estudios anteriores no evaluaron la evolución de crecimiento de los lagos someros, ni otros controles asociados al hundimiento, fuera de la zona donde el espesor máximo de los sedimentos lacustres, o acuitardo, es de 300 metros. Los impactos de los hundimientos regionales y la acumulación de agua superficial en los centros urbanos y sus riesgos tampoco han sido evaluados con anterioridad.

3.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo determinar el origen y evolución de los lagos someros que se están formando en la Planicie de Chalco, con el fin de aportar elementos a la planeación del desarrollo, ordenamiento del territorio, y en

particular, para controlar el crecimiento urbano y determinar los peligros y riesgos por subsidencia e inundación a las zonas urbanas de Tláhuac (Distrito Federal) y Valle de Chalco (Estado de México).

3.3 Evolución de la extracción de agua subterránea y de la deformación vertical del terreno en la Subcuenca de Chalco

3.3.1 Historia de la extracción de agua subterránea

El bombeo del acuífero no confinado en la periferia del acuitardo lacustre en la subcuenca de Chalco se inició a principios de la década de 1940 para uso local agrícola y urbano. Información histórica indica que el extremo sur fue una zona de descarga de agua subterránea, proveniente de la Sierra de Chichinautzin, antes de la intensa extracción de agua subterránea por debajo del acuitardo lacustre en los años 1950. Los primeros pozos que se construyeron para proveer de agua potable a la Ciudad de México se perforaron en el acuífero basáltico de las faldas de la Sierra de Chichinautzin y Santa Catarina a principios de los años 1960. Los manantiales ubicados a los pies de la Sierra de Chichinautzin desaparecieron en consecuencia (Durazo y Farvolden, 1989).

A mitad de la década de los años 1970 la extracción total en la subcuenca de Chalco era de aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (DDF, 1979). Catorce pozos profundos, denominados Sistema Mixquic-Santa Catarina se perforaron en la planicie lacustre de Chalco a profundidades de 400 m, a principios de los años 1980 (Figuras 2a y 2b), para satisfacer parte de la creciente demanda de agua a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). A partir de 1984, estos pozos han aportado entre $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.75 \text{ m}^3/\text{s}$ a la ZMCM (Ortega et al., 1993). La cantidad total de agua subterránea extraída en la subcuenca de Chalco se estimó en 7.75

m^3/seg en 1988 (Huizar, 1989) y en 1991 fue estimada en casi $8 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ortega *et al.*, 1993), contra una recarga estimada de $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Huizar, 1989).

3.3.2 Historia de los hundimientos

Como resultado de la extracción de agua subterránea en la subcuenca se consolidó el acuitardo. Los hundimientos registrados en la superficie del terreno, son consecuencia de la aportación de agua subterránea del acuitardo hacia el acuífero subyacente, lo que da lugar a un cambio volumétrico de los sedimentos altamente compresibles, en la interfase acuitardo-acuífero (Carrillo, 1947; Rudolph *et al.*, 1991).

Los primeros datos de elevación del terreno en la Planicie de Chalco se remontan a principios de los años de 1960, donde la planicie lacustre era prácticamente plana, es decir que no presentaba influencia significativa de subsidencia influenciada por el bombeo. La elevación del terreno en el centro de la planicie era de 2240.3 metros sobre el nivel medio del mar (msnm) (SARH-CAVM, 1981). A finales de los años 1970 reportaron elevaciones entre 2237 y 2238 msnm en la zona referida. Lo que indica un promedio en la subsidencia del terreno entre 0.10 y 0.15 m/año inducido por el bombeo regional y previo a la construcción de los catorce pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina. Nivelaciones del terreno posteriores se llevaron a cabo desde los años 1980 y 1990 (SARH-CAVM, 1984; SARH-CAVM, 1991).

La evolución de la deformación vertical del terreno, para el periodo de 1984 a 1989, se presenta en la Figura 3. En la figura se puede apreciar que se dieron hundimientos hasta de 2 metros en la zona donde los espesores de sedimentos

lacustres son los mayores (Figura 2a) y que de alguna manera han experimentado los cambios más fuertes en la presión de poro inducida por el bombeo. Después de iniciado el bombeo del Sistema de pozos de Mixquic-Santa Catarina, en 1984, la deformación vertical del terreno fue claramente diferencial, siendo mayor en el centro de la planicie y progresivamente menor hacia sus límites laterales (Ortega *et al.*, 1993). Este acelerado hundimiento diferencial dio lugar a la formación de una depresión topográfica localizada aproximadamente en el centro de la planicie (Figura 3), donde se está formando un nuevo lago por la acumulación de agua de lluvia y agua superficial que ya no sale por gravedad a través del sistema de canales en la zona.

La naturaleza transitoria y no lineal del proceso de consolidación fue estudiada por Ortega *et al.* (1999), basados en la instrumentación y medición de parámetros geomecánicos e hidráulicos del acuitardo lacustre de Chalco y la aplicación de un modelo no lineal de consolidación (Rudolph y Frind, 1991) inducido por cambios en la carga hidráulica en el Sistema Mixquic-Santa Catarina. Las predicciones numéricas estiman que para el año 2000 y 2010 los hundimientos totales serán de 11 y 15 metros respectivamente para condiciones similares de extracción existentes en la década de los años 1980 y 1990.

La evolución y otros controles asociados al desarrollo y crecimiento de los lagos, así como sus tendencias de crecimiento y sus impactos a la planeación urbana o rural, no han sido considerados con anterioridad; tampoco lo han sido los peligros y riesgos asociados, que son motivo del trabajo que aquí se presenta.

3.4 Métodos y Materiales

La presencia de zonas de acumulación de agua superficial en el interior de la planicie de Chalco se definieron a partir de fotos aéreas y mediciones directas de campo realizadas a lo largo de 20 años de observaciones, paralelas a mediciones de diversos instrumentos instalados en la planicie de Chalco por Ortega (1993).

La elevación de la superficie del Nuevo Lago de Chalco se obtuvo a partir de un equipo de Sistema de Posicionamiento Global en dos puntos, uno de los cuales funcionó como base: Un posicionador de doble frecuencia (L1, L2), marca Thales, modelo Zmax y otro posicionador de una frecuencia (L1) marca ASHTECH, modelo Promark 2. Las coordenadas obtenidas fueron conectadas a la Red Geodésica Nacional activa del INEGI (Estaciones Base de Toluca 99°38'36.49337"; 19°17'35.64431"; 2,651.725 m).

Se realizó una actualización de los abatimientos piezométricos en el acuífero granular, medido en los pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina y elevación de bancos de nivel de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del Distrito Federal.

En Junio de 2000 se produjo la rotura del Canal de la Compañía, ubicado al noreste de la planicie de Chalco, provocando la inundación de varias colonias, causando enfermedades por la exposición de las aguas residuales e importantes daños a casa habitación e infraestructura urbana. Por lo que, es fundamental establecer un programa de desarrollo regional y ordenamiento territorial congruente con la evolución del nuevo sistema de lagos de la planicie de Chalco

asociado a la evolución de la extracción de agua subterránea y la deformación vertical del terreno por efecto de consolidación.

El área de riesgos geológicos utiliza el conocimiento de los procesos de naturaleza geológica para la prevención de accidentes, y se caracteriza también por abarcar conceptos, métodos y técnicas de análisis y administración de riesgo relacionados con otras ramas profesionales (Coch, 1995; Ogura y Soares, 2000), industria, protección civil, compañías de seguros, planeación urbana, entre otras.

Con base en los controles sobre los hundimientos y sus tendencias, a partir del inicio de operaciones del Sistema de 14 pozos Mixquic-Santa Catarina, en 1984, se identificaron aquellas zonas susceptibles de ser inundadas, en particular las áreas urbanas donde la población puede sufrir daño a su seguridad, salud y a su propiedad, para lo cual se elaboró un mapa de peligros presentes y estimados para el año 2015.

3. 5 Resultados

3.5.1 Evolución del Nuevo Lago de Chalco

Las Figuras 4a y 4b muestran la ubicación de los sitios de acumulación permanente de agua superficial para los años de 1988 y 1991. En ambos casos la ubicación de estos sitios era en la periferia de los pozos P11, P12 y P13 del Sistema Mixquic-Santa Catarina. En el año de 1988, se formaron cinco zonas de acumulación de agua hasta de una hectárea de influencia algunas de ellas, a ambos lados del camino de acceso a los pozos y de la carretera Tláhuac-Chalco (Figura 4a). Posteriormente, en 1991, las cinco áreas mencionadas se integraron en un pequeño lago, que rodeaba las inmediaciones de los Pozos P11, P12 y P13,

con una extensión de agua de aproximadamente 100 hectáreas (Figura 4b). En ambas figuras, se ilustra la extensión del Nuevo Lago de Chalco en 2006, como una referencia, y con la idea de mostrar su evolución desde estados iniciales hasta el actual.

En la Figura 5, se ilustra la posición actual del Nuevo Lago de Chalco en su contexto regional. El desarrollo de este lago difiere significativamente del que mostró en sus primeras etapas de crecimiento. Lejos de continuar con un desarrollo condicionado al contorno de espesor de 200 o 300 metros de la secuencia lacustre (Figura 2a), continuó hacia los límites con el Canal General inmediatos a los límites de la zona urbana de Valle de Chalco, ambos paralelos a la línea de pozos; y se conecta con una zona de acumulación de agua alrededor del pozo P6, que ya era visible desde la segunda parte de los años 1990. De esta manera adquiere su forma actual, que semeja la forma de la luna menguante o de una letra "C" invertida. El área total del Nuevo Lago es de un poco más de 1,000 Hectáreas. Cabe mencionar que el Canal General representa el límite político del Distrito Federal con el Estado de México (Figura 5).

La elevación actual de la superficie del Nuevo Lago de Chalco, indica que éste se encuentra 12 metros más abajo que la superficie original del terreno, antes que se iniciara la extracción intensiva de agua subterránea en la subcuenca de Chalco, a principio de los años 1960. Esta magnitud de la deformación vertical del terreno ya sobrepasó la resultante en el centro de la Ciudad de México, que se generó, después de más de un siglo de extracción de agua subterránea. Con base en ello, podría señalarse que el centro de la planicie de Chalco corresponde a uno de los niveles topográficos más bajos en el interior de la Cuenca de México.

En la Figura 4c se presenta un gráfico donde se ilustra la evolución del área (en hectáreas) afectada por la acumulación de agua superficial con el tiempo. Puede observarse el incremento progresivo de áreas inundadas; en particular, el incremento promedio, entre 1991 y 2006, fue de aproximadamente 60 hectáreas por año. De continuarse con estas tendencias, se esperaría que el número de hectáreas ocupadas por el Nuevo Lago de Chalco sería de aproximadamente 1,200 para el año 2010 y de 1,500 para el año 2015, con importantes impactos en las zonas urbanas de Tláhuac y Valle de Chalco, como se verá más adelante.

3.5.2 Controles en la subsidencia del terreno

El control principal en la subsidencia del terreno es el proceso de consolidación, es decir el cambio volumétrico de los sedimentos finos de la secuencia lacustre (acuitardo) debido a la pérdida de agua, generada por la disminución de carga hidráulica en el acuífero sujeto al bombeo (Figura 2a y 2b). Los gradientes hidráulicos en el acuífero, impuestos por el bombeo, inducen una aportación de agua del acuitardo hacia el acuífero subyacente (Ortega *et al.*, 1999). El cambio volumétrico de los sedimentos se manifiesta en una deformación vertical del terreno o hundimientos, como comúnmente se le conoce.

La velocidad de la deformación vertical en el centro de la planicie de Chalco, después del inicio de operación del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina, 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. Por tal motivo, el centro de la planicie se ha hundido más que en sus orillas. Sin embargo, esta deformación no ha sido homogénea en el

centro de la planicie, ya que los hundimientos del terreno en las inmediaciones de los pozos P7, P8, P9 y P10 han sido menores. ¿Cuál es entonces el factor que controla que la deformación en estos pozos sea menor que la esperada?

Con base en la sección hidrogeológica de la Figura 2b, se puede observar que la única diferencia estratigráfica entre los pozos P7 a P10, donde los hundimientos han sido menores, con respecto a los pozos P6 y P11 a P14, donde los hundimientos han sido mayores, es la presencia de un estrato de basalto de aproximadamente 30 metros de espesor, ubicado a 50 metros de profundidad. El basalto es prácticamente incompresible, por lo que su presencia en la secuencia lacustre reduce la magnitud de la consolidación y por tanto de los hundimientos.

Adicionalmente, el estrato de basalto se ubica prácticamente en la misma elevación de los basaltos provenientes de la Sierra Volcánica de Santa Catarina identificados en los pozos P1 a P3 (Figura 2b); sin embargo, el Volcán de Xico ubicado al oriente de los pozos (Figura 5) es otra posible fuente de los basaltos observados en los pozos P7 a P10. La forma que está adquiriendo el Nuevo Lago de Chalco es quizá la respuesta para conocer el origen del basalto interestratificado en la secuencia lacustre, ya que su continuidad en el subsuelo se verá evidenciada por hundimientos menores, que contrasten con los sitios donde no se encuentra presente y que se hunde con mayor rapidez. De acuerdo con la Figura 5, los basaltos identificados en los pozos P7 a P10 (Figura 2b), se extenderían hacia el noroeste donde se ubica la Sierra de Santa Catarina, y donde no existen zonas inundadas. La colada de basalto (observada entre los pozos P7 a P10) terminaría antes del Canal General, tal como se observa en la Figura 5; por

lo que la forma del Nuevo Lago de Chalco está definido por la geometría y la extensión de esta colada de basalto en el subsuelo.

De esta manera, es de esperarse que el crecimiento del Nuevo Lago de Chalco siga los límites de la colada de basalto en el subsuelo hacia el noroeste, y se extienda preferentemente hacia el sur y oriente donde no está presente en el subsuelo, es decir hacia la zona de Valle de Chalco, lo que la haría la zona urbana de mayor vulnerabilidad a las inundaciones, como se verá más adelante. De igual manera, los entornos de los pozos P6 y P11 a P13, continuarán inundados; mientras que el pozo P5 tenderá a inundarse a futuro. Tanto el camino de acceso a los pozos, como de la carretera Tláhuac-Chalco requerirán de reparaciones y elevación permanentes, cada vez más costosas. Entre Septiembre y Noviembre de 2006, la carretera y el camino de acceso a los pozos estuvieron suspendidos por encontrarse inundados localmente.

3.5.3 Situación de Peligro y Riesgo

Existen dos tipos de peligros asociados en la zona: (1) Peligro por subsidencia y (2) Peligro por inundación. Ambos peligros están íntimamente vinculados, ya que como resultado de la subsidencia, debida a la extracción del agua del subsuelo, se generan depresiones topográficas o hundimientos en los que se acumula el agua superficial, en parte por inhabilitación de obras de drenaje preexistentes.

El Peligro se define como la amenaza potencial a personas y o bienes, mientras que el Riesgo es la posibilidad de que eventos peligrosos produzcan consecuencias indeseables; es el peligro presentido, mejor evaluado, es decir, es

una pérdida potencial evaluada (Coch, 1995; Ogura y Soares, 2000). Con base en los resultados presentados anteriormente existe, por un lado la situación de peligro por inundaciones permanentes; y por otro lado, en algún momento, inundaciones que pueden dar lugar a un desastre potencial, donde la vida y la propiedad de los habitantes de sectores específicos de Valle de Chalco y Tláhuac se vean amenazados.

La Figura 6 muestra un Mapa de Peligros de aquellas áreas que son vulnerables a ser inundadas por la subsidencia progresiva a la que están sujetas. En esta figura se aprecia la posición del Nuevo Lago de Chalco, cuyo límite oriental, está definido y controlado por el Canal General; este canal cumple con dos funciones principales: (a) Impedir que el agua del Nuevo Lago inunde la zona urbana de Valle de Chalco, que se encuentra a un nivel menor que la superficie del Nuevo Lago, y (b) Drenar el agua del Nuevo Lago hacia la planicie de Texcoco, por medio de bombas ubicadas en diferentes puntos, para evitar acumulaciones mayores.

La Figura 6 muestra la zona de mayor vulnerabilidad a las inundaciones, definida por un círculo de aproximadamente 2 Km. de radio, cuyo centro se ubica aproximadamente en el pozo P9 del Sistema Mixquic-Santa Catarina. El círculo considera zonas que se ubican prácticamente 12 metros por debajo del nivel original del terreno. Parte de este círculo incluye la porción occidental de la zona urbana de Valle de Chalco, particularmente las colonias Américas I, Américas II, María Isabel, Niños Héroes, Alfredo Baranda, San Miguel Xico (secciones 1ª a 4ª). La avenida Acapol corre paralela al Canal General, y se ubica en una posición más baja (entre 0.50 y 1.0 m) que la superficie del Nuevo Lago de Chalco. A lo

largo de esta avenida es evidente la constante actividad de reparación de las casas, algunas de ellas tienen las ventanas al nivel del piso, mostrando el nivel de hundimiento a la que están expuestas; existe en ellas una constante aportación de humedad del subsuelo y el desarrollo de salitre, por la proximidad del nivel freático en los sedimentos lacustres sobre las que están construidas. De no existir la protección del Canal General, las colonias mencionadas, estarían cubiertas por el agua.

La velocidad de hundimiento de la zona ocupada por el Nuevo Lago de Chalco es del orden de 40 cm/año, por lo que en cinco años (2011), el nivel del terreno estará dos metros más abajo del nivel actual, y en el 2015 estará casi 4 metros del nivel medido en 2006; es decir con hundimientos totales de 14 a 16 metros. El área de mayor vulnerabilidad crecerá y estará definida por el segundo círculo que se extiende hasta 2.5 km de radio. Se estima que el incremento del área en peligro se extendería a 150 hectáreas de la zona poblada.

A medida que continúe la deformación vertical del terreno, las obras hidráulicas perderán progresivamente su integridad física, pudiendo romperse en los puntos más débiles, como ocurrió con el Canal de la Compañía en Junio de 2000. Por lo que será necesario considerar programas de mantenimiento y observación permanente en todos los canales. En algún momento tendrá que valorarse el costo de mantener actualizada la infraestructura hidráulica, los costos de obras de reducción o mitigación del riesgo, y costo de posible desastre, contra los costos de reubicación de algunas colonias de Valle de Chalco.

El círculo de peligro, para el año 2015, también impactaría un sector de la parte oriente de la zona urbana de Tláhuac, directamente las Colonias La Habana

y San José, próximas al Nuevo Lago de Chalco. Se estima que 25 hectáreas del área urbana quedarían inundadas.

Existen riesgos adicionales al de subsidencia e inundaciones en las zonas de transición entre los sedimentos lacustres y las estructuras volcánicas y zonas de transición, entre ellos el de agrietamiento del terreno que daña la infraestructura urbana (Aguilar et al., 2006). Se encuentra en proceso el análisis del origen y dinámica del agrietamiento en la zona y la influencia del proceso de deformación vertical del terreno.

3.5.4 Consideraciones para la Planeación del Desarrollo Regional y Ordenamiento del Territorio

La necesidad de seguir abasteciendo a los habitantes de la Ciudad de México de agua potable, requiere mantener la extracción de agua subterránea de este sistema de pozos, lo que seguirá manifestándose como hundimientos del terreno y crecimiento del Nuevo Lago de Chalco. Por tal motivo, es fundamental considerar la condición dinámica del crecimiento del Nuevo Lago de Chalco y sus implicaciones en el proceso orientado a la transformación y organización de los espacios y los territorios del Estado de México y Distrito Federal, que involucran la zona de estudio y sus alrededores. Esto implica cambios cualitativos en los planos social, económico, político, ambiental, tecnológico y territorial; incorporando principios de equidad y participación, y reconociendo las vertientes del desarrollo en un sentido integral. La organización productiva y el progreso técnico; las tareas de gobernabilidad y gestión; la preservación del ambiente y la organización territorial de la sociedad que habita al interior de las mismas es una necesidad

inmediata en el área de estudio para reducir los impactos negativos, incluso desastres por inundación que podrían presentarse en un futuro próximo.

La región enfrenta varios desafíos, particularmente en lo que se refiere a la competitividad de las regiones del Estado de México con el Distrito Federal, su identidad cultural y sobrevivencia social a partir de sus diversas potencialidades. Por tanto, la planeación regional es un proceso mucho más complejo que requiere la concurrencia de diversos aspectos más allá de los estrictamente económicos. Será necesario identificar los indicadores más representativos para elaborar diagnósticos regionales, para ubicar en el desarrollo las potencialidades de las regiones consideradas, basadas en los resultados que se presentan en términos de la situación dinámica de peligro y riesgo por inundaciones.

Entre los elementos ambientales y culturales que pueden ser considerados en el desarrollo regional se tiene la naturaleza lacustre de la zona que dominó el antiguo lago de Chalco por varios miles de años hasta principios del siglo XX cuando fue drenado. El desarrollo del Nuevo Lago de Chalco, como consecuencia del bombeo en el acuífero subyacente, genera condiciones similares a las que existieron en el pasado, y que son reconocidas por los pobladores nativos y por las numerosas aves migratorias que regresan ya de manera periódica a la zona. El desarrollo de vida acuática y flora nativas, reconoce las condiciones naturales, por lo que la adaptación de la vida silvestre no será problema a excepción de la calidad química y biológica del agua. El agua residual, no tratada, de numerosas poblaciones y de núcleos industriales convergen a través de los canales hacia el Nuevo Lago de Chalco. En otros casos, la rotura de estos canales puede

ocasionar problemas serios de salud, como el de junio de 2000, donde el Canal de la Compañía causó serios problemas de salud en la población afectada.

La pérdida de terreno agrícola, hace también necesario recuperar la posibilidad de cultivar alimentos en la zona y de dar trabajo temporal o permanente a la población rural. Una opción a evaluar, es la de aprovechar el crecimiento del Nuevo Lago de Chalco con el desarrollo de áreas de cultivo tipo chinampa. Las chinampas representan una opción viable ante el incremento dinámico de áreas lacustres, y cuya eficacia ha sido comprobada desde tiempo de los Aztecas. Su desarrollo debe ser parte del modelo integral de la región.

El gobierno del Estado de México, recientemente declaró como “Parque Estatal Santuario del Agua Lagunas de Xico”, cerca de 1556 hectáreas del Estado de México (Gobierno del Estado de México, 2005). A pesar de que esta es una iniciativa importante, las Lagunas de Xico son aisladas y pequeñas (Figura 6); el desarrollo del Lago de Chalco se da preferentemente en la Delegación Tláhuac, por lo que esta declaratoria deberá modificarse e incluir un programa conjunto de planeación y desarrollo con el Gobierno del Distrito Federal; particularmente porque todo el sistema del Nuevo Lago de Chalco y “Lagunas de Xico”, formarán parte de un solo sistema acuático en el futuro.

Se propone la creación de un Consejo Metropolitano para definir las estrategias dinámicas e integrales para la prevención de desastres y establecer las políticas mencionadas en torno al Nuevo Lago de Chalco en sus diferentes etapas de crecimiento futuro. Particularmente, la educación de la población

afectada y la capacidad de las autoridades para diagnosticar e intervenir en la reubicación de familias asentadas en zonas de alto riesgo y el adecuado equilibrio entre la planeación de las áreas de conservación y mejoramiento ambiental con la reducción o mitigación del riesgo, serán elementos fundamentales para un ordenamiento del territorio, también dinámico.

3.6 Conclusiones

En la parte central de la planicie lacustre del antiguo lago de Chalco, se están formando zonas de acumulación superficial de agua, evidentes desde 1988. El área de influencia de estos lagos someros, se ha incrementado progresivamente desde 1988 a la fecha. De unas cuantas hectáreas inundadas en 1988, se incrementó a casi 100 hectáreas en 1991; y en la actualidad, se tienen cubiertas por lagos someros alrededor de 1,000 hectáreas.

Las depresiones topográficas, en las que se almacena el agua superficial, están asociadas a hundimientos regionales del terreno, debido a la operación de catorce pozos del denominado Sistema Mixquic-Santa Catarina, que inició la extracción de agua subterránea, en 1984. Estos pozos han generado abatimientos anuales del nivel potenciométrico del orden de 1.5 m/año; lo que da lugar a una deformación vertical del terreno de hasta 40 centímetros por año en el centro de la planicie, por consolidación del acuitardo lacustre.

Estos hundimientos han modificado sustancialmente el sistema de drenaje natural y de canales en la planicie lacustre que operaba desde principios del siglo XX, causando la acumulación del agua superficial y la necesidad del bombeo escalonado a lo largo del Canal General para drenar el agua hacia la planicie de

Texcoco. Los ríos de la Compañía y de Amecameca, entre otros, han tenido que ser elevados al mismo ritmo de los hundimientos y son reforzados constantemente para evitar su ruptura y provocar inundaciones locales como la que ocurrió en el Canal de la Compañía en Junio del año 2000.

Las predicciones de modelos matemáticos realizadas en el pasado han sido muy precisas en la parte central de la planicie, donde el espesor del acuitardo lacustre es de 300 metros, pero no así en otras zonas de menor espesor. Se encontró que la presencia de un estrato de 30 metros de espesor de roca basáltica, interestratificado a 50 metros de profundidad con la secuencia lacustre, entre los pozos P7 y P10, disminuye la magnitud de los asentamientos asociados al bombeo; formando una especie de península que se extiende hacia Tláhuac y posteriormente hacia el volcán Guadalupe, que dio origen a la colada de basalto, ubicado en la Sierra de Santa Catarina.

La necesidad de seguir abasteciendo a los habitantes de la Ciudad de México de agua potable, requiere mantener la extracción de agua subterránea de este sistema de pozos, lo que seguirá manifestándose como hundimientos del terreno y crecimiento del Nuevo Lago de Chalco. Este Nuevo Lago se desarrolla entre dos importantes asentamientos humanos: Tláhuac (Distrito Federal) y Valle de Chalco (Estado de México). De acuerdo con las tendencias observadas de hundimientos del terreno, se estima que para el año 2015, la extensión de este lago podría afectar cerca de 25 hectáreas de la zona urbana de Tláhuac y 150 hectáreas de Valle de Chalco. En total, se estima un crecimiento del Nuevo Lago entre 1,200 y 1,500 hectáreas para el año 2015, incluyendo suelo agrícola (Figura 4c).

La concentración de aguas residuales de origen urbano e industrial hacia este Nuevo Lago de Chalco da lugar a problemas de calidad química y biológica que pueden impactar negativamente a la población en caso de inundación y a otros seres vivos que se desarrollan en su interior.

De acuerdo con los controles y magnitud de la subsidencia regional observada, es necesario evitar un crecimiento urbano mayor entre Tláhuac y Valle de Chalco. Para reducir el peligro y riesgo de inundaciones será necesario analizar la conveniencia de incrementar la cantidad y la eficiencia de la infraestructura hidráulica a futuro contra la opción de reubicar varias colonias de Valle de Chalco y Tláhuac, en un radio aproximado de 2.5 a 3 km con centro en el pozo P9 del Sistema Mixquic-Santa Catarina.

Propiciar el crecimiento controlado del Nuevo Lago de Chalco para permitir el retorno masivo de aves migratorias y de especies acuáticas nativas a la región, aunado a un desarrollo ecoturístico y el cultivo en sistemas de chinampas para mejorar las condiciones sociales y económicas.

La dinámica del crecimiento del Nuevo Lago de Chalco tiene implicaciones importantes en el proceso orientado a la transformación y organización de los espacios y los territorios del Estado de México y Distrito Federal. Este proceso debe involucrar cambios cualitativos en los planos social, económico, político, ambiental, tecnológico, de protección civil y ordenamiento territorial; incorporando principios de equidad y participación social, reconociendo las vertientes del desarrollo en un sentido integral y también dinámico.

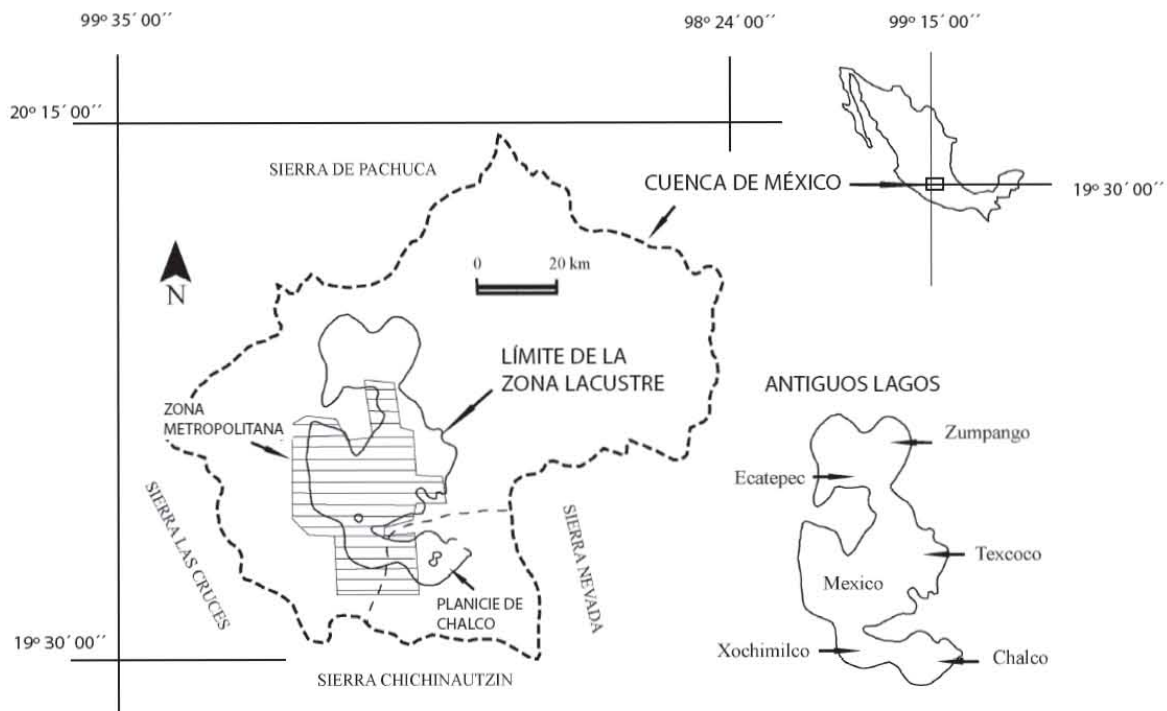


Figura 1. Localización de la Planicie lacustre de Chalco en el interior de la Cuenca de México. El antiguo Lago de Chalco es parte de una serie de lagos que ocupaban el interior de la Cuenca de México.

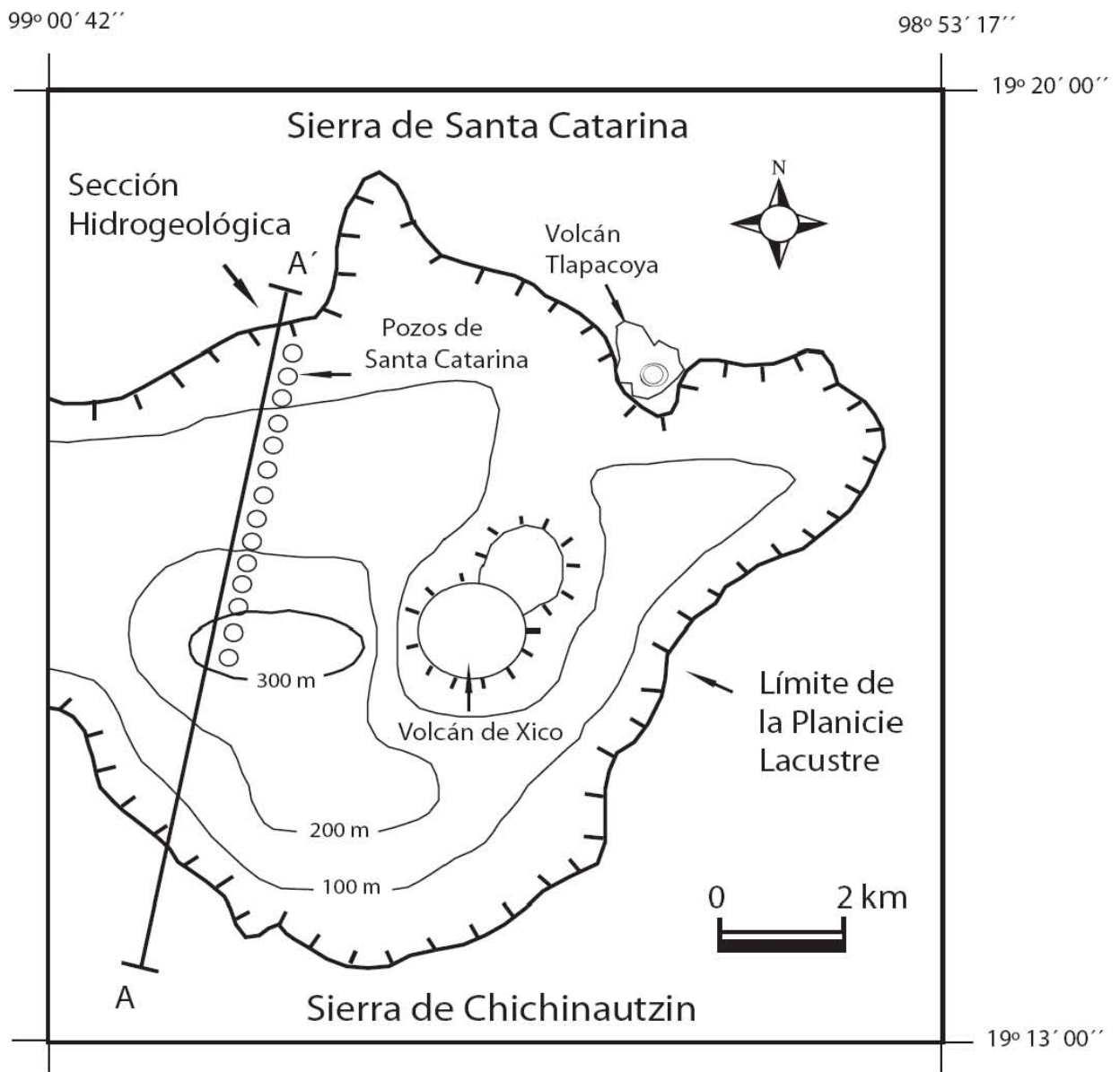


Figura 2a. Ubicación de los catorce pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina en el interior de la Planicie de Chalco. Se muestra la ubicación de la sección hidrogeológica. El espesor de los sedimentos lacustres es de hasta 300 m en el centro de la planicie (Modificado de Ortega *et al.*, 1999).

SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA A-A'

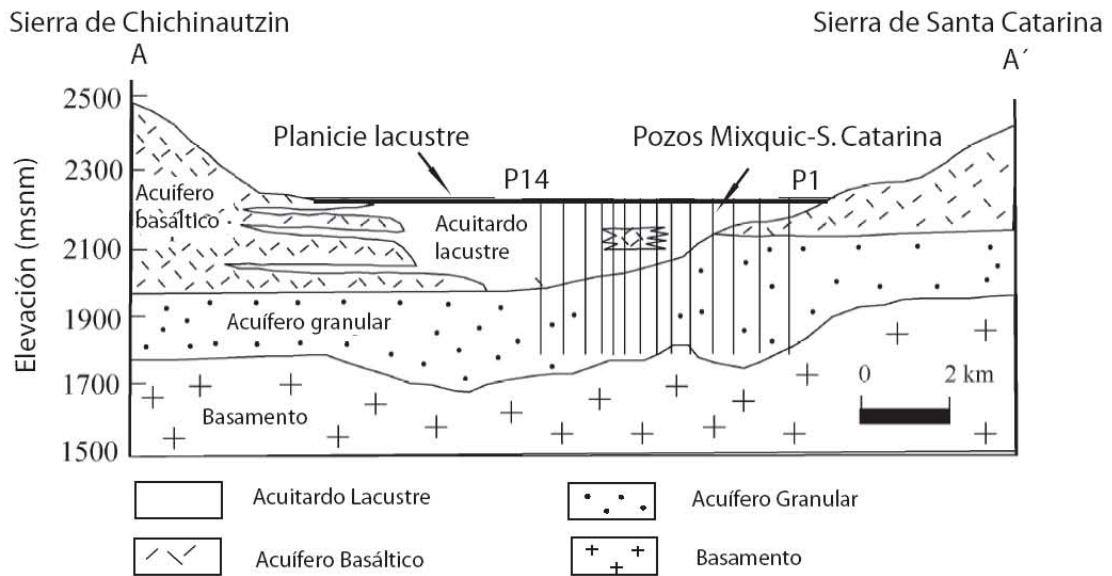


Figura 2b. Sección hidrogeológica a través de la Planicie de Chalco. Se muestra la posición de los sedimentos lacustres (acuitardo) sobre el acuífero granular. La presencia de basaltos provenientes de la Sierra de Chichinautzin y Sierra de Santa Catarina son contemporáneos a la sedimentación lacustre (Modificado de Ortega *et al.*, 1999).

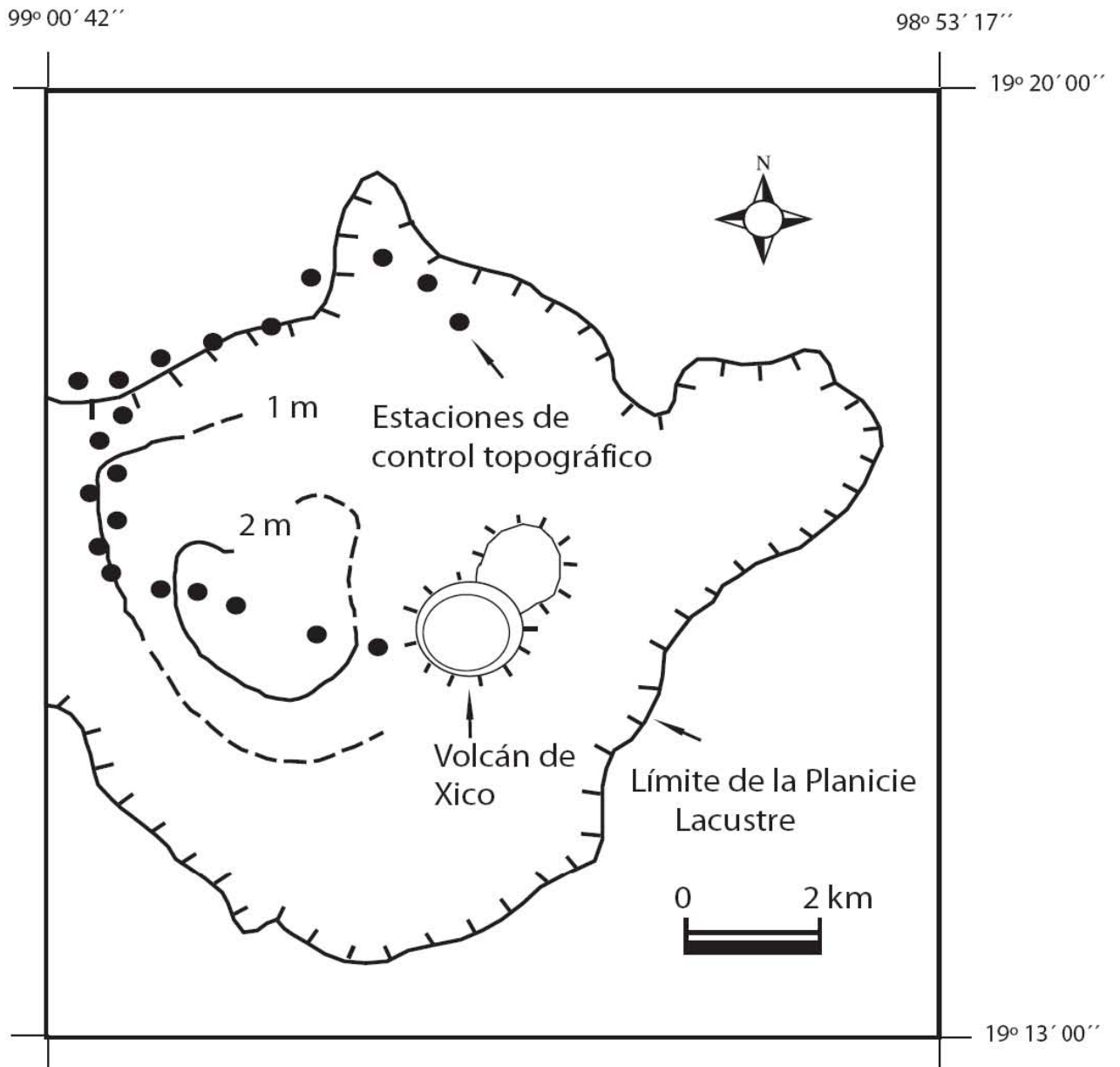


Figura 3. Deformación vertical del terreno en el periodo de 1984 a 1989, en respuesta al bombeo de los catorce pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina (Modificado de Ortega et al., 1999). Los hundimientos máximos corresponden con los mayores espesores del paquete lacustre (Figura 2a).

Evolución de los lagos someros entre 1988 y 1991

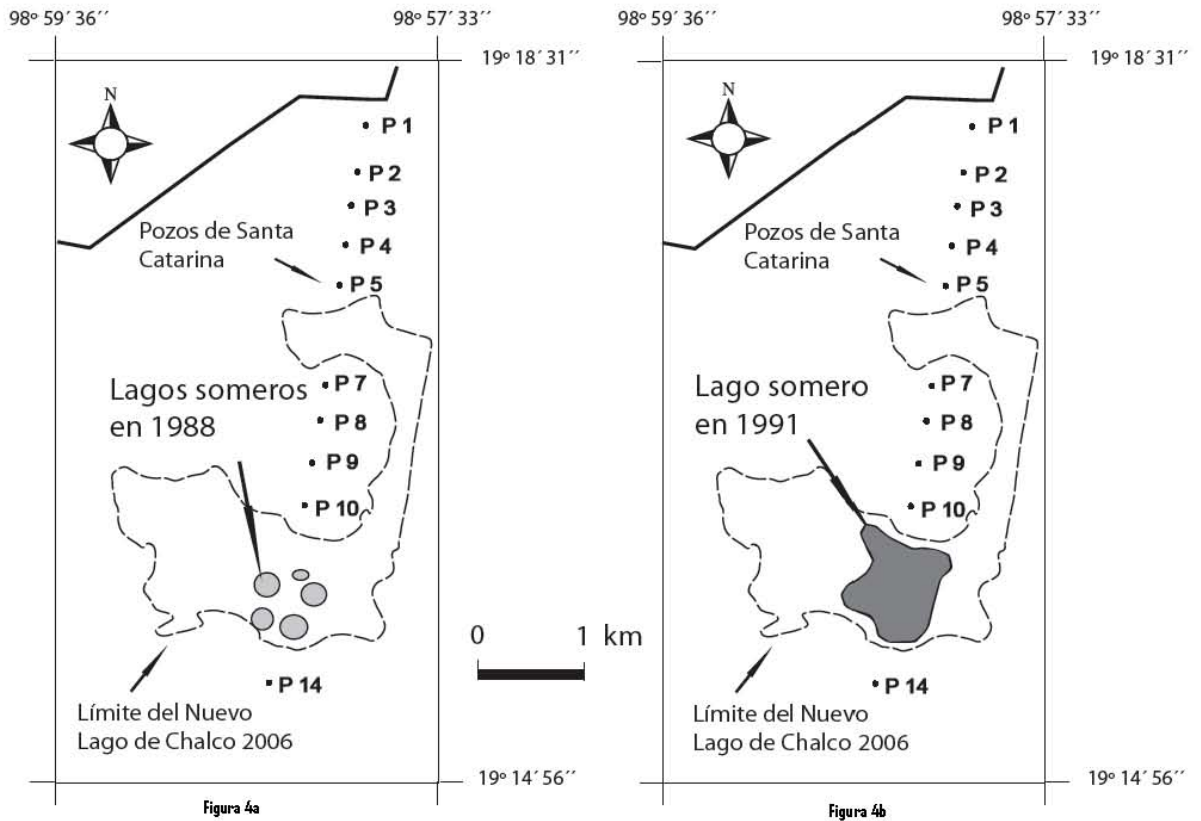


Figura 4a. Ubicación y dimensión de los lagos someros en 1988. Se muestra el contorno del Nuevo Lago de Chalco en 2006 como referencia.

Figura 4b. Ubicación y dimensión de los lagos someros en 1991. Se muestra el contorno del Nuevo Lago de Chalco en 2006 como referencia.

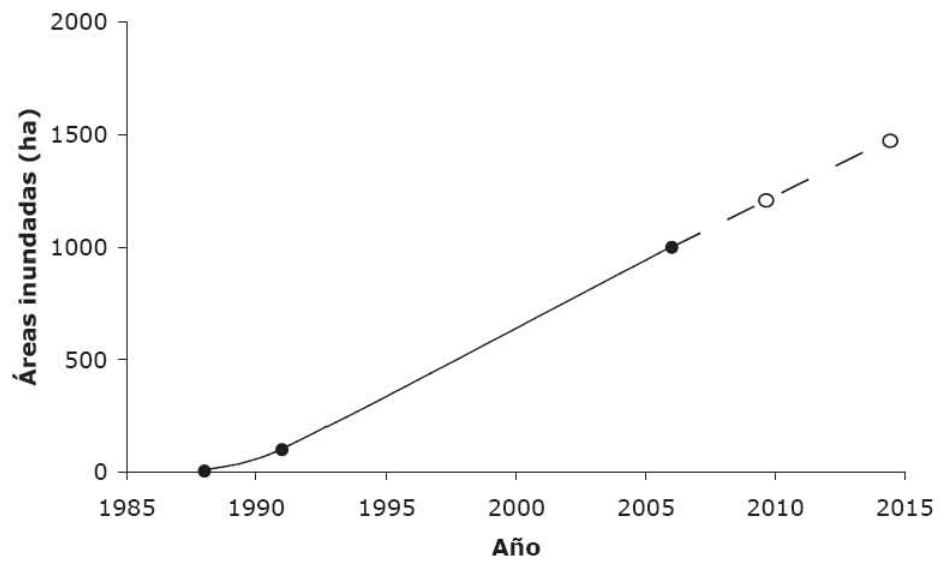


Figura 4c. Superficie inundada (en hectáreas) en el periodo de 1988 a 2006, y proyección a 2010 y 1015.

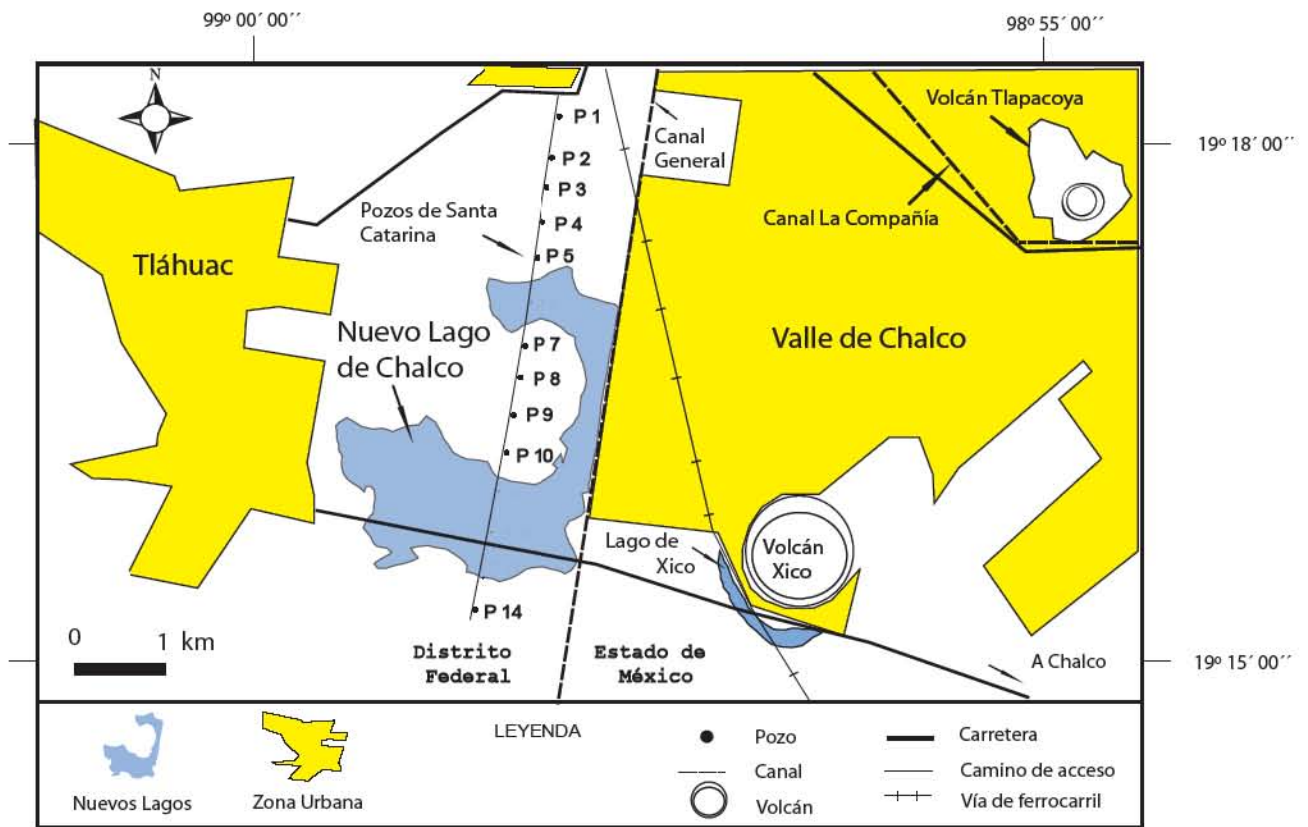


Figura 5. Ubicación del Nuevo Lago de Chalco entre las zonas urbanas de Tláhuac (Distrito Federal) y Valle de Chalco (Estado de México). El lago tiene la forma de luna menguante y cubre un área de alrededor de 1,000 hectáreas.

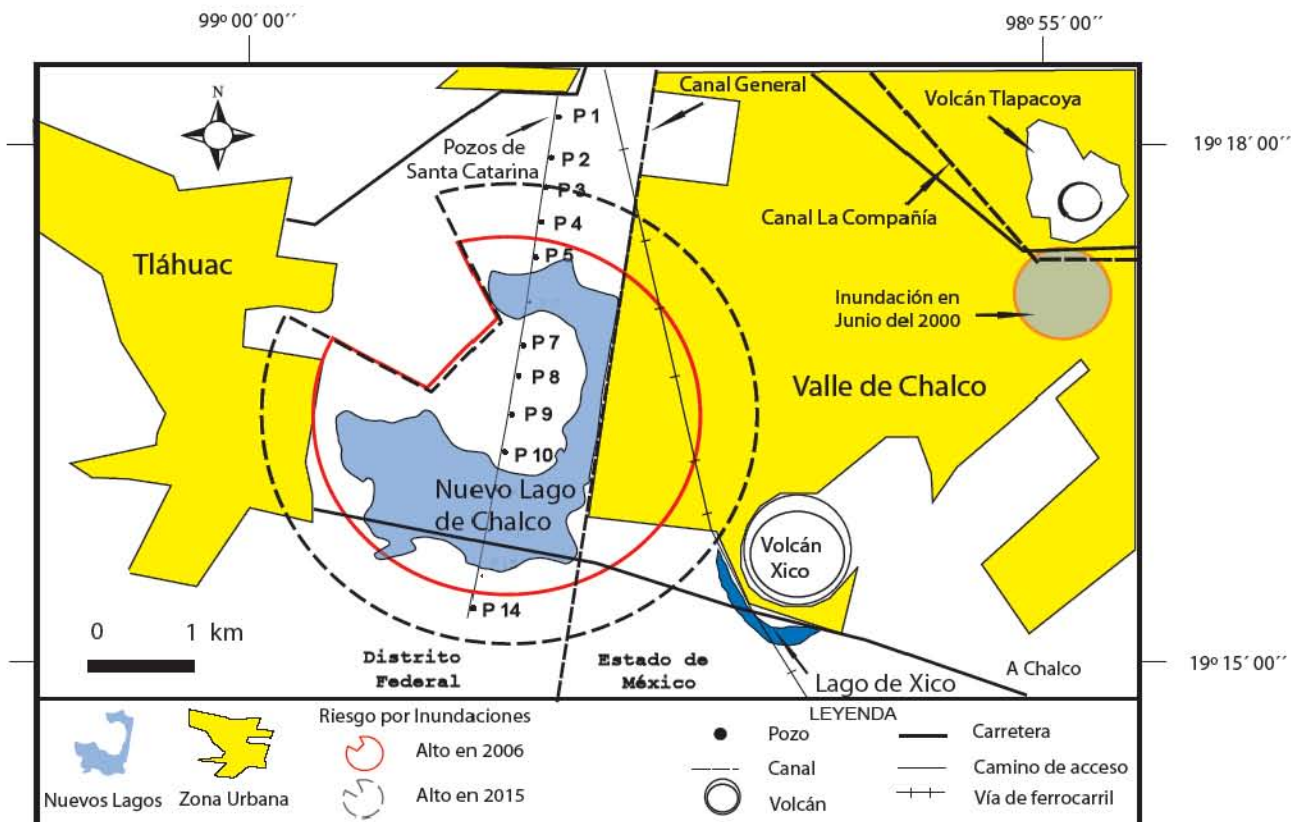


Figura 6. Mapa de Peligros. El círculo rojo presenta la zona que se ubica prácticamente a doce metros por debajo del nivel original del terreno. El Canal General protege la zona urbana de ser inundada. Existen varias colonias sujetas a riesgo. El círculo exterior achurado, representa el límite estimado de peligro de inundación en el año 2015. Se muestra la ubicación de la zona inundada en Junio de 2000 por rotura del Canal La Compañía.

Capítulo 4. Influencia de unidades de baja compresibilidad en la evolución de la deformación vertical del terreno en la planicie lacustre de Chalco.

Resumen

Entre los pozos P7 y P10 del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina, se observa una colada de basaltos con espesor aproximado de 30 metros, a 50 metros de profundidad y que están controlando la magnitud de los hundimientos regionales debido a la extracción del agua subterránea en la Planicie de Chalco. Con el fin de determinar la extensión lateral de estos basaltos se realizó un levantamiento magnetométrico en una franja de un kilómetro paralela a la línea de pozos; y paralelamente se realizó un levantamiento topográfico de detalle para actualizar la magnitud total de los hundimientos. Los resultados indican que los hundimientos totales han sido diferenciales a lo largo de la línea de pozos Mixquic-Santa Catarina, se desarrollaron dos depresiones topográficas principales, con un hundimiento total de 12 metros, una en las proximidades de los pozos P5 y P6 y otra entre los pozos P11 y P14, zona donde se desarrolla el Nuevo Lago de Chalco. En contraste entre los pozos P7, P8, P9 y P10, los hundimientos fueron menores generándose un alto topográfico de aproximadamente 3 metros con respecto a las zonas de mayor hundimiento. El método magnético permitió determinar la extensión de los basaltos por debajo de la planicie, donde se encuentran cubiertos por sedimentos lacustres, cuyo origen es la Sierra de Santa Catarina; confirmándose su continuidad a través de la línea de pozos y que termina a una distancia de aproximadamente 600 metros, justo antes del Canal General.

4.1 Introducción

La Cuenca de México es una cuenca naturalmente cerrada, delimitada por diversas sierras de origen volcánico y en cuyo interior se desarrollaron condiciones lacustres (Figura 1). La cuenca fue artificialmente abierta para drenar el agua de los lagos a través del Tajo de Nochistongo en 1789 (Bribiesca, 1960).

El depósito de sedimentos lacustres y la actividad volcánica de las Sierras de Chichinautzin y Santa Catarina fueron simultáneos (Ortega *et al.*, 1993). Los registros litológicos de catorce pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina perforados hasta una profundidad de 400 metros, para extraer agua subterránea del acuífero granular regional, a través de la planicie del ex Lago de Chalco (Figuras 2 y 3), muestran la presencia de basaltos presumiblemente provenientes de la Sierra de Santa Catarina sobre el acuífero granular en los tres primeros pozos del sistema (P1 a P3), y sobre los basaltos existen espesores hasta de 100

metros de sedimentos lacustres. Entre los pozos P7 y P10 del Sistema de Pozos se observa una colada de basaltos con espesor aproximado de 30 metros, a 50 metros de profundidad. Hacia la Sierra de Chichinautzin se reporta la interestratificación de basaltos con sedimentos lacustres, también basado en la interpretación de cortes litológicos en esa zona (Ortega *et al.*, 1993).

En el capítulo anterior se describió la presencia de basaltos en la secuencia lacustre y como estos están aparentemente controlando la magnitud de la consolidación y por tanto de la deformación vertical del terreno, donde la colada de basalto en los pozos P7 a P10 del Sistema Mixquic-Santa Catarina, contribuye al desarrollo y forma del Nuevo Lago de Chalco. Por esta razón es fundamental entender la distribución y geometría de los paquetes de basalto en el subsuelo para de esta manera entender los controles de la deformación del terreno y establecer futuros escenarios de la consolidación de los sedimentos lacustres inducida por el bombeo en el Sistema de Pozos. La identificación de basaltos debajo de sedimentos granulares ha sido exitosa en diferentes condiciones geológicas (Gibson *et al.*, 2005; Nayak *et al.*, 2006; Gwaze *et al.*, 2000).

En el interior de la Cuenca de México se han aplicado diferentes métodos geofísicos con el fin de conocer su estructura profunda y constitución litológica; la mayor parte de estos estudios han contado con información de pozos profundos hasta de 2000 metros de profundidad. Entre las diversas técnicas destacan los métodos: (a) Gravimétricos (Molina, 1957; Chávez y Flores, 1989; Gómez, *et al.* 1993; Chávez *et al.*, 1994, Diaz Molina, 2000); (b) de Refracción Sísmica (Benhumea y Vázquez, 1988; Pérez-Cruz, 1988; Campos *et al.*, 1997; Rodríguez-Chávez, 2003)), (c) Sondeos Eléctricos Verticales (Rodríguez, 1987; Benhumea y

Vázquez, 1988; Rodríguez y Lara, 1988; Rodríguez y González, 1989; González-Morán, 1992; Zawadsky, 1996); (d) Resistividad Azimutal (Zawadsky, 1996); (e) Magneto-telúricos (Chouteau *et al.*, 1994); Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (Krivochieva y Chouteau (2001); Krivochieva y Chouteau (2002); Magnetometría (Rodríguez-Chávez, 2003). A excepción de los estudios de Zawadsky (1996) realizados en las proximidades del Pozo 2 del Sistema Mixquic-Santa Catarina, y en el caso del método magnetométrico, este ha sido usado para identificar estructuras regionales y no cuerpos someros estratificados en la secuencia lacustre.

4.2 Objetivos

Los objetivos del presente capítulo son: (a) Actualizar la información acerca de la deformación vertical del terreno en la planicie de Chalco, particularmente en las proximidades del Sistema de Pozos de Santa Catarina. (b) Determinar la influencia de formaciones hidrogeológicas poco compresibles en la evolución de la deformación actual del terreno y evolución de nuevos lagos. (c) Comparar la situación de la deformación vertical del terreno con las estimaciones realizadas por Ortega *et al.* (1993) en la porción central de la Planicie de Chalco. (d) Establecer nuevos escenarios para los hundimientos, considerando los nuevos (recientemente reconocidos) controles estratigráficos.

4.3 Metodología

Para cumplir con los objetivos mencionados se utilizan dos métodos: (1) Un levantamiento topográfico de precisión en una franja de 1 Km. a lo largo del Sistema de pozos de Santa Catarina, a partir de dos puntos GPS, y (2) Investigación de la presencia de unidades de basalto en el subsuelo por medio de un levantamiento magnetométrico.

4.3.1 Investigación de Elevación del Terreno

Los puntos de control topográfico se obtuvieron a partir de un Sistema de Posicionamiento Global. Para ello se contrato a la Empresa Proyectos y Servicios de Ingeniería S.A. de C.V. La empresa, utilizó un receptor GPS de doble frecuencia (L1, L2), marca Thales, modelo Zmax y otro receptor GPS de una frecuencia (L1) marca ASHTECH, modelo Promark 2. Las coordenadas obtenidas fueron ligadas a la Red Geodésica Nacional activa del INEGI (Estaciones Base de Toluca $99^{\circ}38'36.49337''$; $19^{\circ}17'35.64431''$; 2,651.725 m). A partir de estos puntos de control se llevó a cabo el levantamiento topográfico por medio de una estación total.

4.3.2 Investigación Magnética

El método magnético es usado en esta tesis, para ubicar la presencia y extensión de un cuerpo de basalto que se encuentra interestratificado en la secuencia lacustre de la Planicie de Chalco; el cual contrasta en sus propiedades magnéticas con los sedimentos lacustres, ya que el basalto se encuentra constituido por minerales ferromagnéticos, mientras que los sedimentos lacustres están formados por arcillas, limos y arenas con bajo contenido de minerales ferromagnesianos

(Warren y Rudolph, 1997). El método magnético es, además, barato, fácil de aplicar, requiere poco procesamiento de datos y tiene buena profundidad de penetración.

Para el levantamiento magnético del área referida se utilizó la técnica de magnetómetro base para monitorear las variaciones horarias del campo magnético terrestre. (julio 2005). El magnetómetro base se programó para tomar lecturas a cada 5 minutos y poder utilizar esta información para corregir la variación diurna del campo magnético terrestre. Se realizó la medición de la intensidad del campo magnético terrestre en cada uno de los puntos. Para tener control de la calidad de la información, se tomaron dos lecturas en cada una de las estaciones teniendo cuidado de que los valores observados fueran similares. El equipo utilizado en el levantamiento magnético fue:

- Magnetómetro base: magnetómetro de protones marca Geometrics, modelo G-856AX, con precisión de 0.1 nanotesla.
- Levantamiento magnético: magnetómetro de cesio marca Scintrex, modelo SMARMAG – 4, con precisión de 0.01 nanotesla.

El procesamiento y análisis de la información consistió en aplicar la corrección por variación diurna y deriva que corresponde a la diferencia de valor entre dos lecturas medidas en el magnetómetro base. Dependiendo si esta diferencia es mayor o menor al primer dato obtenido, habrá que sumarla o restarla a los valores del recorrido magnético obtenidos en el resto de los puntos medidos.

Posteriormente se le asignó a cada uno de los puntos corregidos la coordenada que le correspondió de acuerdo con un receptor GPS. Con las

coordenadas e intensidad del campo magnético, se formó el plano de curvas de igual valor de intensidad total del campo magnético terrestre.

La interpretación de los datos magnéticos se hace a partir de la construcción de perfiles y/o mapas donde se determina la ubicación de anomalías magnéticas obvias en los sitios donde se conoce de antemano la presencia de basaltos, y con base en esa respuesta delimitar aproximadamente la extensión de los basaltos someros en el subsuelo. Queda fuera del presente análisis la obtención de la anomalía magnética residual debida a un objeto de interés y que puede ser determinada del campo magnético total. La interpretación de las anomalías magnéticas residuales, involucra la creación de modelos de las variaciones de la susceptibilidad magnética en el subsuelo para inferir una sección geológica. Estos modelos son generalmente construidos usando una gran variedad de métodos que varían desde soluciones analíticas de geometrías simples hasta más complejos algoritmos computacionales en tres dimensiones.

Las correlaciones empíricas gráficas para determinar el valor del campo magnético y el umbral que define diferentes unidades litoestratigráficas se tomó de los efectos magnéticos de cuerpos de geometría simple, bajo diferentes inclinaciones magnéticas de Telford *et al.* (1990).

4.4 Resultados

4.4.1 Evolución de la Deformación Vertical del Terreno

La Figura 4 ilustra la distribución de los nuevos lagos en agosto 2006. El lago central creció y se extendió hacia los límites urbanos de Valle de Chalco y Tlahuac. Se identificó el crecimiento de un nuevo lago hacia el norte y noreste del lago central, el cual se desarrolla paralelo al Canal General y hacia los pozos P5 y P6, formando en su conjunto una herradura o letra "C" invertidas, también simula una luna menguante. Este desarrollo no era el esperado para el Valle de Chalco, ya que se esperaba que el espesor del acuitardo sería el control principal. La misma figura muestra los hundimientos totales hasta principios de 2006; donde se observa en el perímetro del Nuevo Lago de Chalco la isolínea de deformación vertical del terreno de -12 metros; donde dos porciones de la línea de pozos se encuentra prácticamente rodeada de agua, estos son el pozo P6 y los pozos P11 y P12.

La magnitud de la deformación total del terreno disminuye progresivamente hacia la parte norponiente de la planicie, hasta no presentar ninguna variación en una pequeña porción de la carretera del Eje 10 Sur que conecta con Tlahuac, donde se observa la presencia de basaltos. La porción media de los pozos de Santa Catarina (Pozos P7 a P10) sufrió menor deformación. La Figura 5 muestra un perfil de la elevación del terreno a lo largo del camino de acceso del Sistema Santa Catarina. A partir de este perfil se derivan varias observaciones de interés

- (1) El hundimiento es muy irregular a lo largo del perfil. Se desarrollaron dos depresiones topográficas, una en las proximidades de los pozos P5 y P6 y otra entre los pozos P11 y P14; mientras que entre los pozos P7, P8, P9 y P10, los

hundimientos fueron menores generándose un alto topográfico de aproximadamente 3 metros con respecto a las zonas de mayor hundimiento. (2) Los hundimientos totales en las proximidades de los pozos P5 y P6 es de 12 metros, entre los pozos P7 a P10 es de 9 y 10 metros y en las inmediaciones de los pozos P12 y P13 de hasta 13 metros. (3) Es justamente en las depresiones topográficas que se ubican en las inmediaciones de los pozos P5 y P6 y de los pozos P11 a P14 donde se desarrollan los lagos de la Figura 3.

La tabla 1 muestra los hundimientos en la zona lacustre teniendo un coeficiente promedio de cambio de volumen de 0.38 m/día con las tendencias de la modelación realizada por Ortega *et al.* 1999

Tabla 1

AÑO	mm/día/m²
1985	0.38
1990	0.6
1995	0.8
2000	1.1
2005	1.3

4.4.2 Extensión de los Basaltos en el Subsuelo

La Figura 6 muestra los resultados del levantamiento magnetométrico, donde se configuran isovalores de la Intensidad Total del Campo Magnético Terrestre (ITCMT). De acuerdo con la escala, de la misma figura, se observan

valores mínimos de 41,146 nT en color azul y máximos de 41,779 nT en color rosa, los colores verdes, amarillos y rojos representan valores intermedios. Las instalaciones de los pozos y la tubería que se extiende a profundidad muestran máximos o mínimos magnéticos puntuales. La distribución de basaltos en el subsuelo, a lo largo del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina puede observarse en las Figuras 2a y 2b (Ortega-Guerrero *et al.*, 1993). En la sección hidrogeológica, existen basaltos provenientes de la Sierra de Santa Catarina que son identificados en los cortes litológicos de los pozos P1 a P3; posteriormente, entre los pozos P7 a P10 se identifica una pequeña colada de basaltos ubicados a una profundidad de 50 metros y con un espesor de 30 metros, cuya posición y espesor sugieren un tiempo de emplazamiento diferente; su origen podría asociarse a la Sierra de Santa Catarina, a la de Chichinautzin o al Volcán de Xico.

Estos puntos, a lo largo de la sección es donde existen evidencias de la presencia y posición de los basaltos, y que representan sitios para calibrar y determinar la respuesta de los datos magnéticos. Es de esperarse que la respuesta magnética de los basaltos identificados entre los pozos P1 a P3 y los observados entre los pozos P7 a P10 sea diferente ya que alguno de ellos podría tener anomalías magnéticas invertidas, esto es que en alguno de los eventos volcánicos la polaridad de la tierra hubiera estado invertida con respecto a la actual.

La inspección visual de la Figura 6, muestra dos zonas principales, una ubicada en la porción izquierda del Sistema de pozos Mixquic-Santa Catarina donde dominan altos de la intensidad del campo magnético con valores superiores a 41, 500 nT y una segunda zona ubicada al oriente de la línea de pozos donde

en general dominan valores bajos de la intensidad del campo magnético, representados con colores verdes y azules. Entre los pozos P8 y P11, zona que prácticamente corresponde con la zona donde se reportan basaltos a 50 metros de profundidad

La Figura 7 muestra tres perfiles magnético transversales a la línea de pozos. Los perfiles se muestran en la figura 8 y corresponde a los perfiles LL, LLA y LLB. De acuerdo con los criterios de Telford et al (1990) el cuerpo de basalto puede simularse como un estrato horizontal semi infinito, donde el umbral que define diferentes unidades litoestratigráficas corresponde aproximadamente con la isolínea de 41,500- 41,600 nT.

En la Figura 9 puede observarse la relación que existe entre la extensión y geometría de los basaltos en el subsuelo con la forma del Nuevo Lago de Chalco.

La extensión de los basaltos de la Figura 9, coincide con las zonas de menor hundimiento de la Figura 3, mostrando el control que tienen los basaltos en la deformación vertical del terreno, ya que se trata de una unidad de muy baja compresibilidad ($C_v=1.0E-02 \text{ m}^2/\text{s}$) contra la alta compresibilidad del paquete lacustre que es del orden de $1.0E-07 \text{ m}^2/\text{s}$; es decir cinco órdenes de magnitud mas compresible que el basalto.

4.5 Conclusiones

Los hundimientos totales han sido diferenciales a lo largo de la línea de pozos Mixquic-Santa Catarina. Se desarrollaron dos depresiones topográficas principales, una en las proximidades de los pozos P5 y P6 y otra entre los pozos P11 y P14. En contraste entre los pozos P7, P8, P9 y P10, los hundimientos

fueron menores generándose un alto topográfico de aproximadamente 3 metros con respecto a las zonas de mayor hundimiento.

Los hundimientos totales en las proximidades de los pozos P5 y P6 son de 12 metros, mientras que entre los pozos P7 a P10 es de 9 y 10 metros y en las inmediaciones de los pozos P12 y P13 de hasta 13 metros. Es justamente en las depresiones topográficas que se ubican en las inmediaciones de los pozos P5 y P6 y de los pozos P11 a P14 donde se desarrolla una porción del Nuevo Lago de Chalco.

El método magnético permitió determinar la extensión de los basaltos por debajo de la planicie, donde se encuentran cubiertos por sedimentos lacustres Cuaternarios. El origen de los basaltos es la Sierra de Santa Catarina, posiblemente del volcán Guadalupe uno de los siete volcanes principales en esta Sierra y el cual destaca por ser el más alto y más reciente de todos. La unidad de basaltos que cruza la línea de pozos termina a una distancia de aproximadamente 600 metros, justo antes del Canal General.

La distribución y geometría de los basaltos identificados por debajo de los sedimentos lacustres, coinciden con zonas de menor deformación vertical del terreno, demostrando su control en la magnitud de la consolidación. Por lo que la forma del Nuevo Lago de Chalco se desarrolla en los límites de la colada de basalto.

La zona urbana de Valle de Chalco, en las inmediaciones del Canal General y del Nuevo Lago de Chalco, tuvo una deformación vertical total de 13 metros, por lo que se ubica por debajo del nivel del Nuevo Lago de Chalco. El Canal General representa una frontera importante para evitar la inundación de la zona urbana.

Sin embargo, es en esta zona donde se presentarán los hundimientos más importantes de la región y por tanto se incrementará el riesgo por inundaciones.

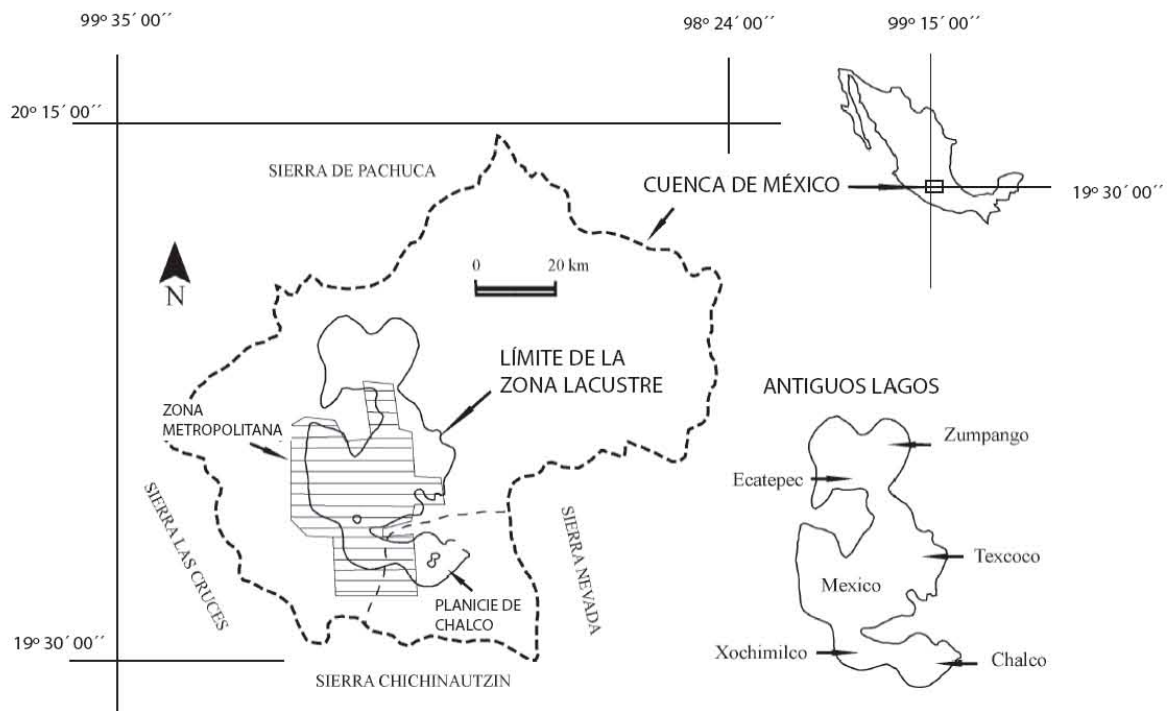


Figura 1. Ubicación del Área Metropolitana de la Ciudad de México en el interior de la Cuenca de México y antiguos lagos. Localización de la Planicie lacustre de Chalco.

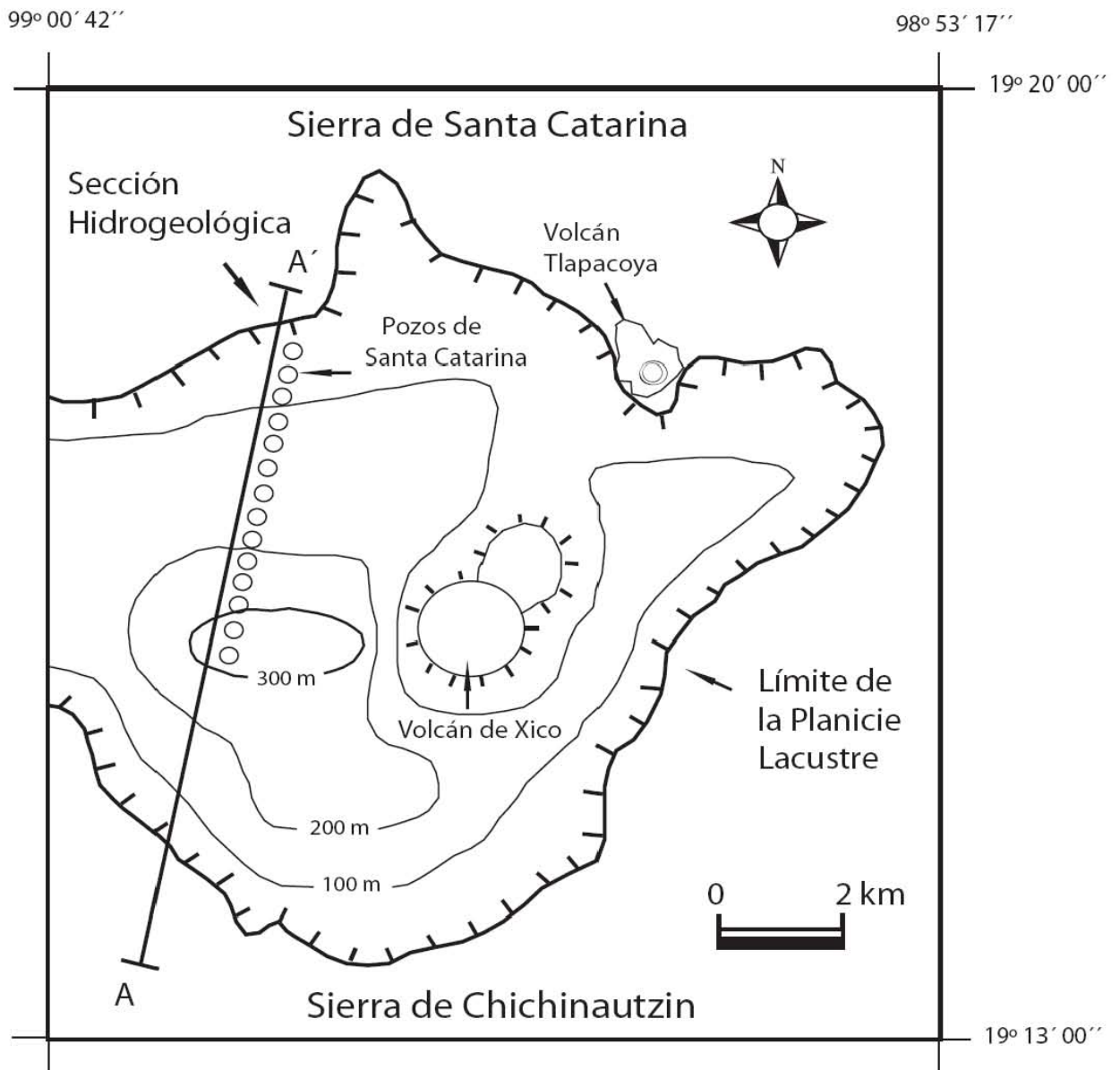


Figura 2. Espesor de los sedimentos lacustres en la Planicie de Chalco, ubicación del Sistema de pozos Mixquic-Santa Catarina y de la sección hidrogeológica

SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA A-A'

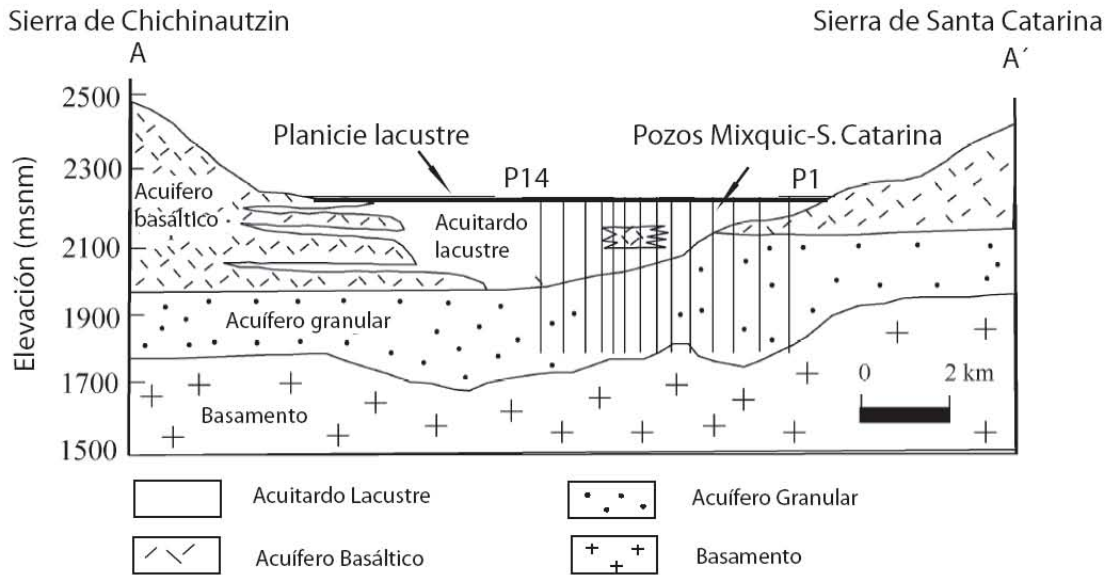


Figura 3. Sección hidrogeológica a lo largo del Sistema Mixquic-Santa Catarina.

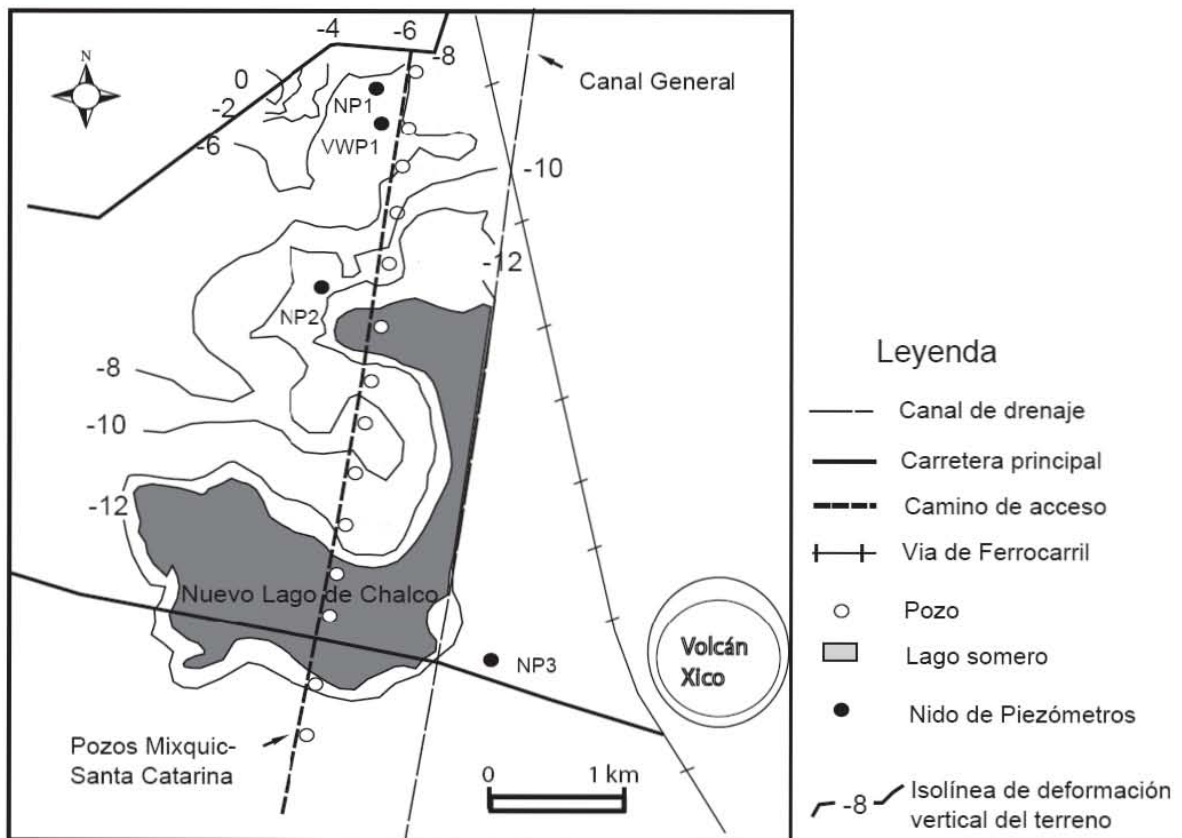


Figura 4. Deformación vertical del terreno al año 2006 y control en el crecimiento del Nuevo Lago de Chalco en el interior de la Planicie de Chalco.

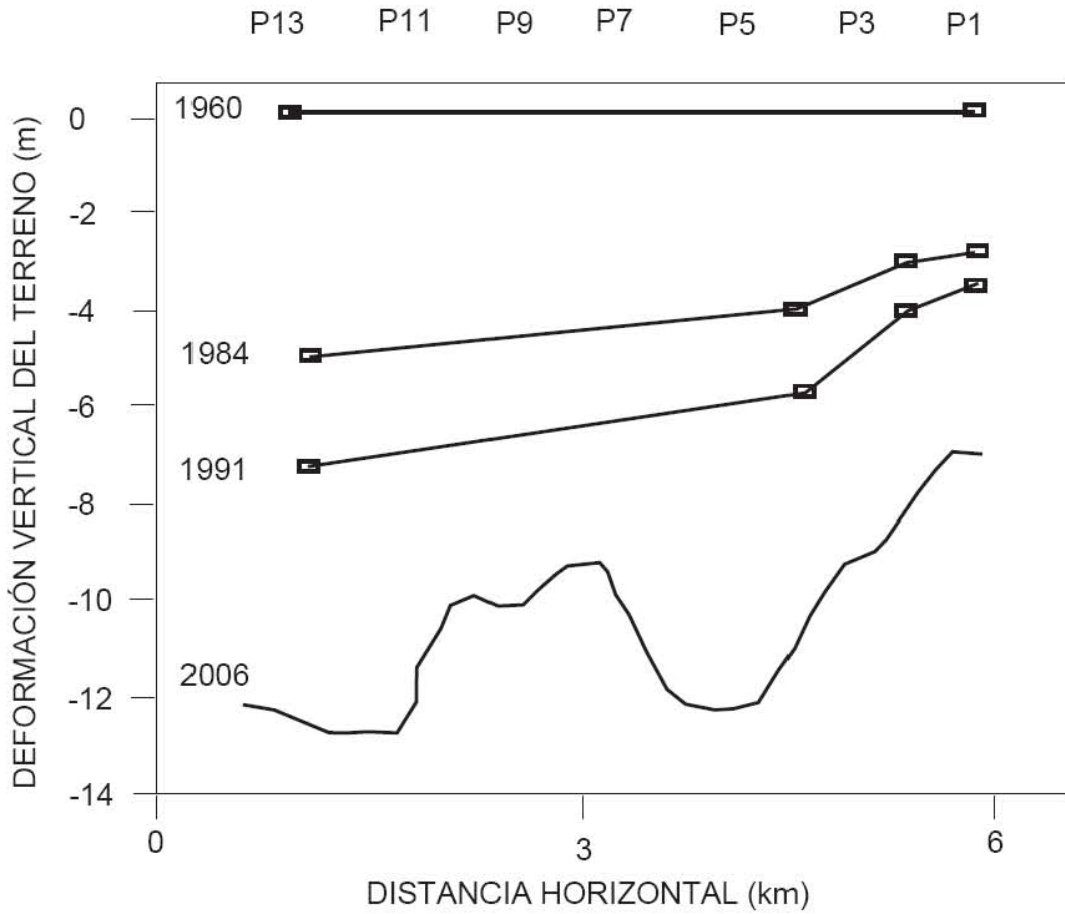


Figura 5. Evolución de la deformación vertical del terreno entre 1960 y 2006, a lo largo de la línea de pozos Mixquic-Santa Catarina.

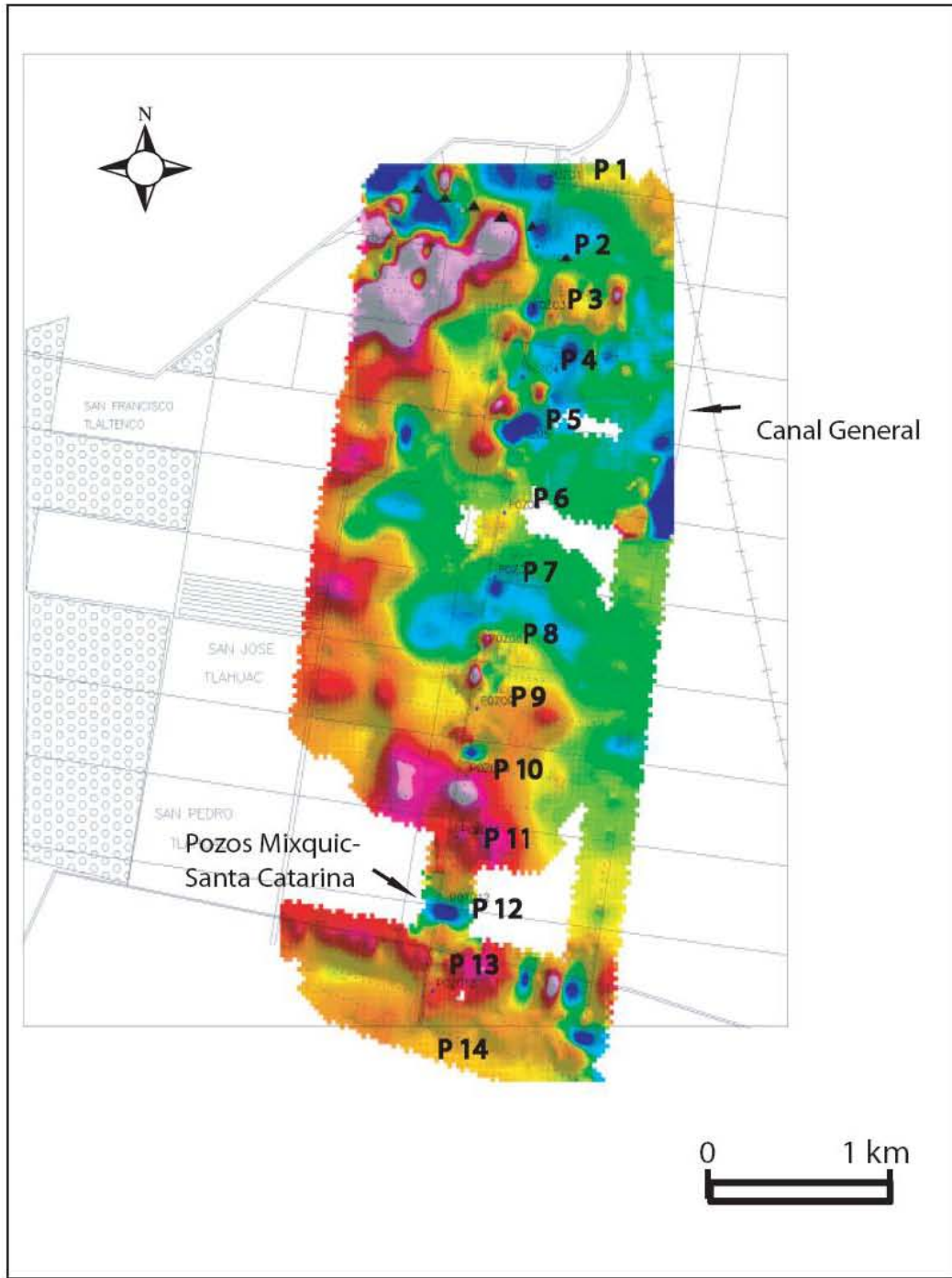


Figura 6. Configuración de la Intensidad del Campo Magnético Terrestre.

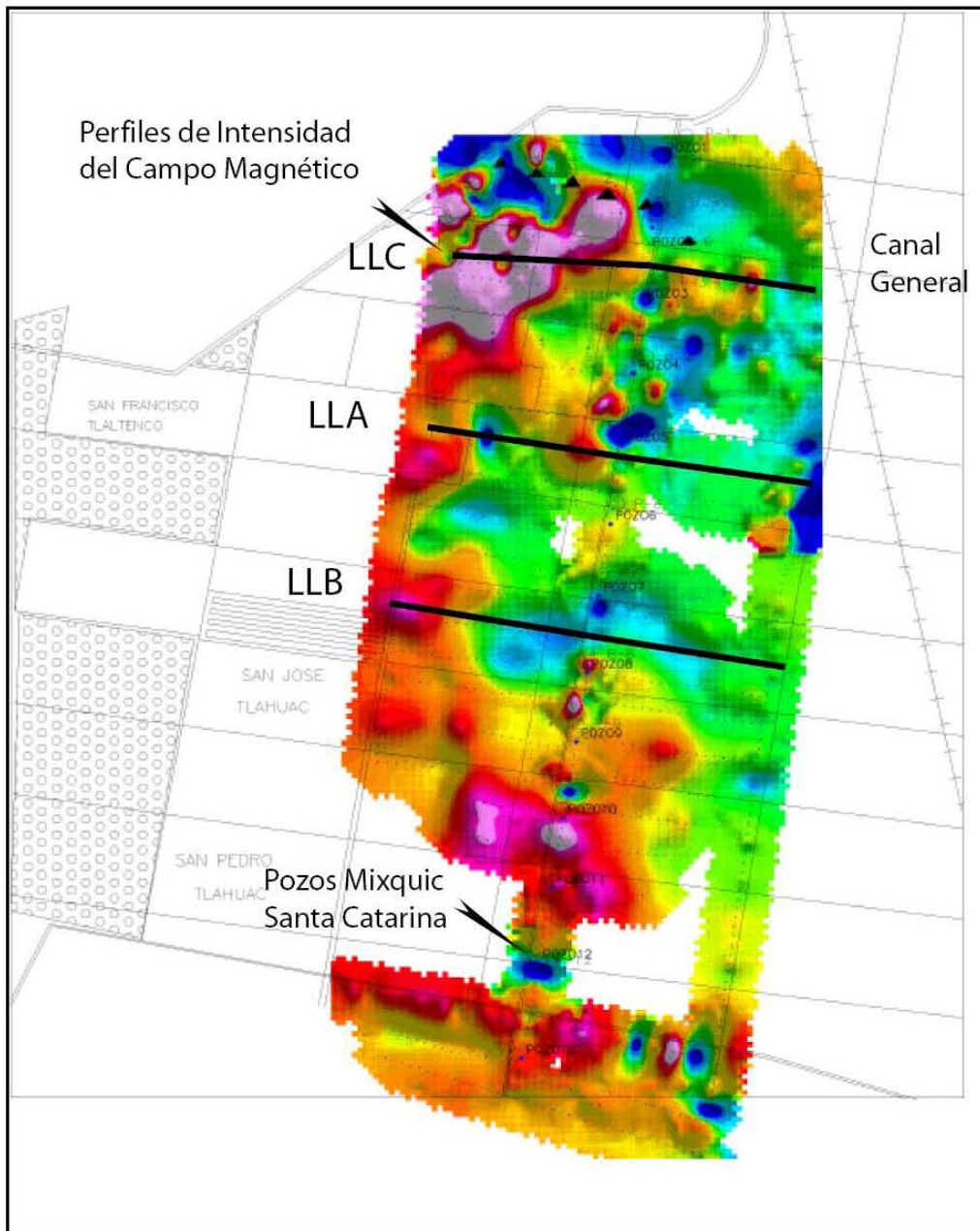


Figura 7. Ubicación de perfiles magnéticos transversales a la línea de pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina.

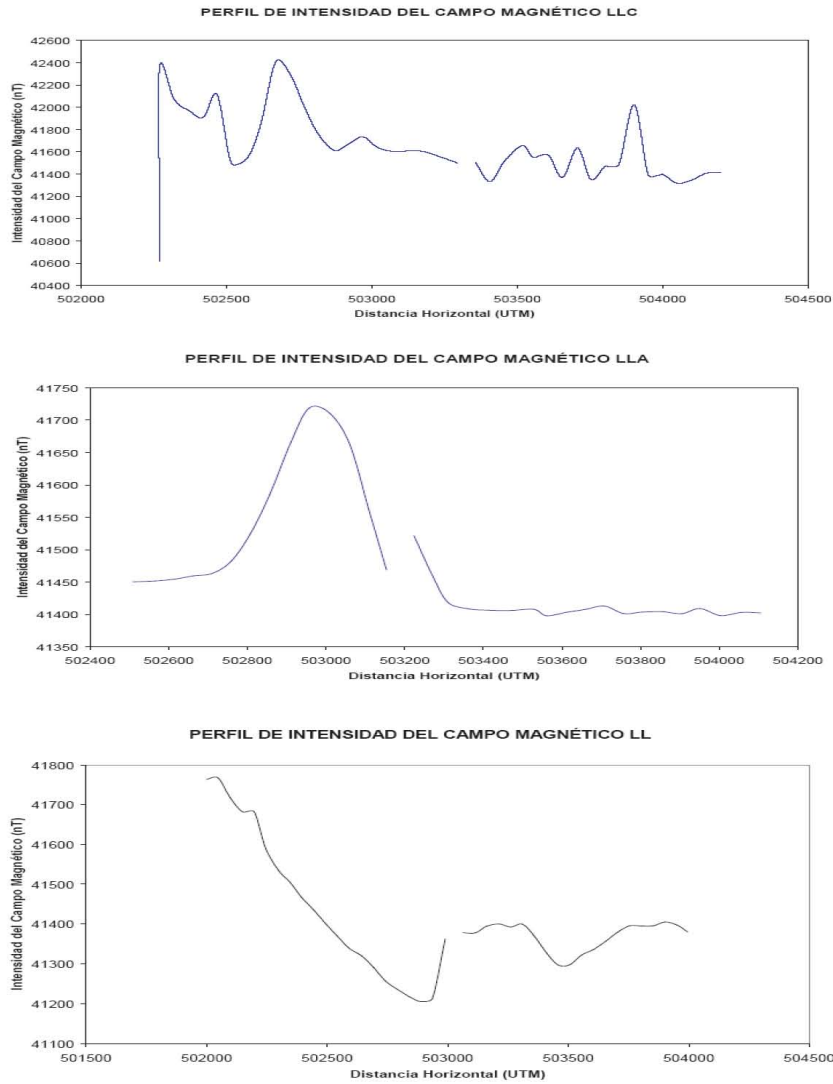


Figura 8. Perfiles magnéticos transversales a) Perfil de intensidad del Campo Magnético LLC, b) Perfil de intensidad del Campo Magnético LLA y c) Perfil de intensidad del Campo Magnético LL.

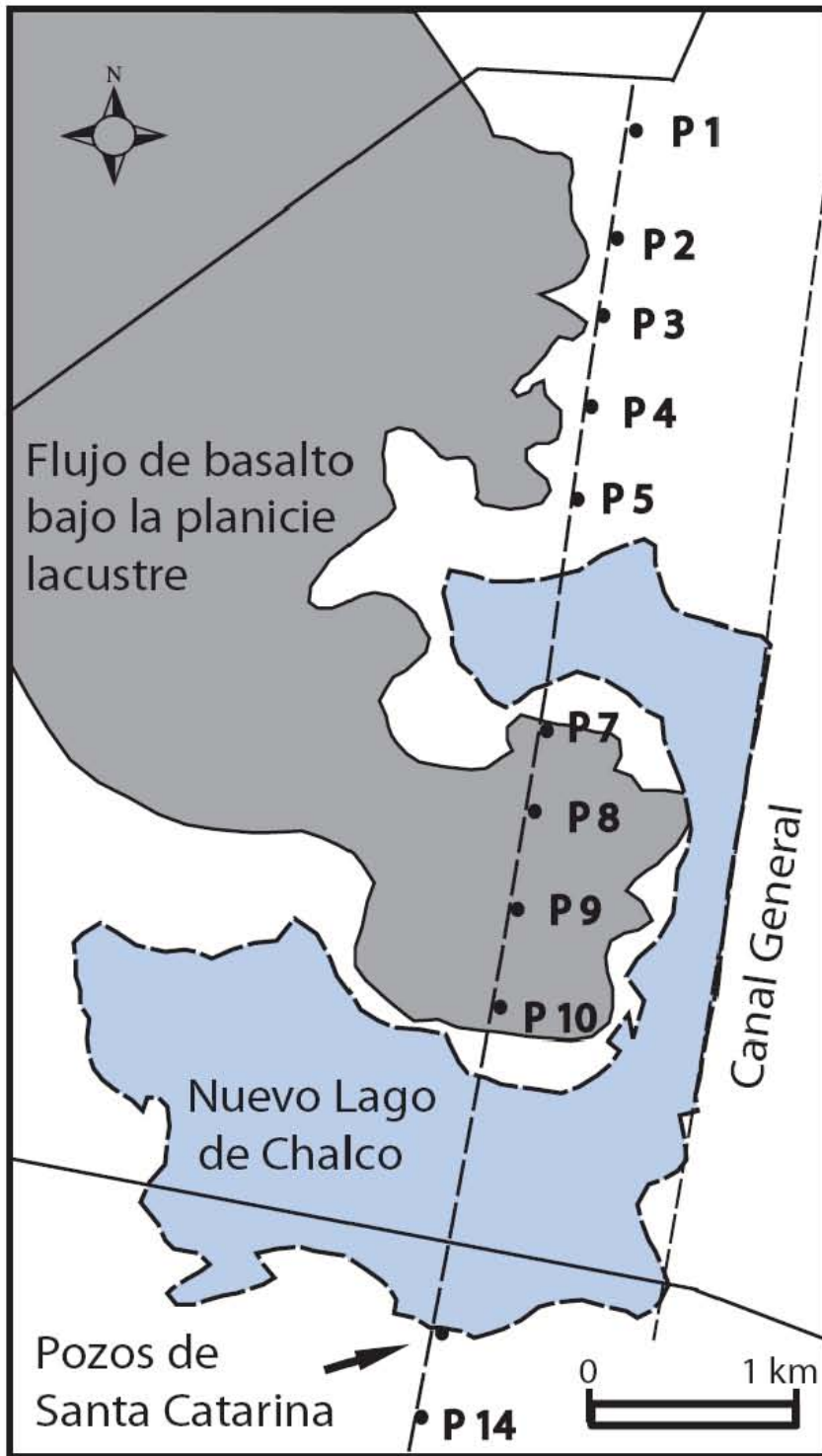


Figura 9. Extensión de la colada de basaltos en la secuencia lacustre y la posición del Nuevo Lago de Chalco.

Capítulo 5. Distribución y origen del fracturamiento en el acuitardo lacustre de Chalco

Resumen

En la planicie lacustre de Chalco existe evidencia de fracturas en el acuitardo a diferentes escalas. Estas fracturas afectan las condiciones de flujo y transporte de solutos en el acuitardo que potencialmente pueden favorecer la migración de contaminantes dispuestos en la superficie hacia el acuífero subyacente. El objeto de este capítulo es realizar la cartografía de las fracturas regionales y analizar su origen y dinámica a través de la evolución de los hundimientos regionales y la distribución de unidades hidrogeológicas de menor compresibilidad (basaltos entre ellos). Los resultados indican la presencia de diferentes familias de fracturas regionales, con una longitud de varios cientos de metros y aperturas en superficie entre 0.50 y 2 metros. El método magnetométrico permitió determinar la extensión de los basaltos por debajo de la planicie, donde se encuentran cubiertos por sedimentos lacustres Cuaternarios, con origen en la Sierra de Santa Catarina. Las fracturas regionales se ubican en dos zonas principales (1) en los límites de la colada de basalto bajo la superficie lacustre, donde algunos sitios coinciden adicionalmente con las proximidades de los pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina, y (2) en la zona interior de la colada de basaltos somera. Adicionalmente, las fracturas coinciden con las zonas de mayor tensión asociadas a la deformación diferencial vertical del terreno mayor a 10 metros. Con base en este control, es posible identificar las zonas potenciales para el crecimiento de las fracturas existentes y familias nuevas que pueden desarrollarse en futuro a medida que avance la deformación del terreno; lo cual permitió elaborar un mapa de peligro por fracturamiento, hacia las zonas urbanas de Valle de Chalco y algunas colonias de Tláhuac, donde causarían severos daños a la infraestructura urbana existente y casas habitación. Desde el punto de vista hidráulico impactaría las inmediaciones del Canal General (posible debilitamiento del canal y filtraciones laterales), el Nuevo Lago de Chalco (filtraciones verticales).

5.1 Introducción

En el capítulo 2 de esta tesis se presentó un modelo conceptual del origen y dinámica del fracturamiento multiescalar en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), la cual depende principalmente del agua subterránea para el abastecimiento de casi 25 millones de habitantes y cerca del 30% de la industria del país (INEGI-INE, 2000). El fracturamiento se asocia a diferentes situaciones hidrogeológicas combinadas con la extracción del agua subterránea de un acuífero granular regional aluvio-piroclástico terciario, y de un acuífero en materiales de origen volcánico del Pleistoceno (Ortega y Farvolden, 1989). Son aproximadamente $52 \text{ m}^3/\text{s}$, de un total de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ que se extraen para la ZMCM, de estos acuíferos (NRC-AIC-ANI 1995).

La extracción del agua subterránea en el acuífero granular regional se inició a mitad del siglo XIX y se intensificó en las décadas de 1940 y 1950 lo que provocó hundimientos anuales hasta de 0.50 m/año en el centro de la ciudad de México, causando severos daños a edificios coloniales e infraestructura urbana (Carrillo, 1947; Zeevaert, 1953; Marsal y Mazari, 1959) y posteriormente en la década de los años 1960 y 1970 la aparición de fracturas regionales incrementó los daños y el riesgo de colapso de casa habitación. Con el fin de reducir la velocidad de los hundimientos en el centro de la ciudad, se descentralizó la explotación a la periferia de la ciudad. Como consecuencia el problema de hundimientos y fracturamiento del terreno se concentró en las nuevas áreas de explotación de agua subterránea, entre ellas la de la Planicie de Chalco (Figura 1) donde inició la operación de 14 pozos profundos en la década de los 1980.

Diferentes autores han estudiado el problema de la consolidación y el fracturamiento en la ciudad de México y sus alrededores. Entre los trabajos clásicos de consolidación se tienen los siguientes Carrillo (1947), Marsal y Mazari, (1959), Zevaert (1953), Rudolph *et al.* (1991), Ortega-Guerrero *et al.* (1999), este último en la Planicie Lacustre de Chalco. Los trabajos sobre la ocurrencia de fracturas están los de Auvinet, G.G. (1981), De Cserna, Z., *et al.* (1987), Arias, R.A. (1989), Lugo *et al.* (1991), Lugo *et al.* (1997), Aguilar *et al.*, (2006), entre otros; mientras que, entre los modelos teóricos de formación de fracturas destacan los de Juárez (1961), Juárez (1975), Juárez y Figueroa (1984), Figueroa (1987), Figueroa (1989), Alberro y Hernández (1990), Juárez-Luna *et al.* (2002) y mas recientemente Aguilar *et al.*, (2006). Estos últimos analizan de manera

integral las propiedades hidráulicas y geomecánicas del acuitardo lacustre y del acuífero granular en la zona de Iztapalapa, ubicada al norte de la zona de estudio.

En la subcuenca de Chalco (Figura 1) existen estudios previos que indican la presencia de fracturas en el acuitardo a diferentes escalas. Ortega (1993) reporta la presencia de fracturas someras, a través de la simulación matemática del desarrollo de perfiles químicos e isotópicos en los primeros 85 metros del acuitardo lacustre y que solo pueden ser explicados por la presencia de micro fracturas. Zawadsky (1996) estudia una fractura regional en las proximidades del pozo 2 del Sistema Mixquic-Santa Catarina (Figura 2a). Vargas y Ortega (2004) confirman la presencia de microfracturas a partir de la respuesta hidráulica del acuitardo por medio de pruebas de permeabilidad en piezómetros existentes, donde la conductividad hidráulica de zonas fracturadas contrasta hasta en dos órdenes de magnitud con la conductividad de la matriz arcillosa no fracturada. Los estudios previos no consideraron la presencia y distribución de fracturas regionales, por lo que el presente capítulo pretende realizar una cartografía de las fracturas que se observan sobre la planicie lacustre y explicar el origen de las mismas a partir de la información hidrogeológica presentada en capítulos previos.

5.2 Objetivos

Realizar una cartografía de los sistemas de fracturas que se pueden observar en la superficie lacustre de Chalco, en las proximidades del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina.

Comparar la deformación vertical del terreno en la planicie de Chalco y la influencia de formaciones hidrogeológicas poco compresibles, con la distribución de fracturas.

Proponer un modelo conceptual para explicar el origen y dinámica del fracturamiento del acuitardo lacustre de Chalco.

5.3 Metodología

5.3.1. Cartografía de fracturas en el acuitardo sobre la planicie lacustre.

Para la identificación y distribución de fracturas se utilizaron los accesos paralelos a la red de canales y otros secundarios, con el fin de formar una red de observaciones espaciadas al menos cada 100 metros de distancia.

Las fracturas se identificaron mediante la observación directa en el terreno, de elementos o características como irregularidades, diferentes tipos de vegetación, discontinuidades, escalonamiento, etc.

Una vez localizada la fractura se tomaron los siguientes datos con el fin de caracterizarla y tener un control de parámetros físicos para representarse posteriormente: posicionamiento (con un receptor GPS) de un punto inicial a partir del cual se tomó orientación, longitud, apertura (en su caso), desnivel, relleno y profundidad.

5.3.2. Investigación de la presencia de unidades de basalto en el subsuelo por medio de un levantamiento magnetométrico y su influencia en el desarrollo de fracturas en el acuitardo.

El método magnético es usado en esta tesis, para ubicar la presencia y extensión de un cuerpo de basalto que se encuentra interestratificado en la

secuencia lacustre de la Planicie de Chalco; el cual contrasta en sus propiedades magnéticas con los sedimentos lacustres, ya que el basalto se encuentra constituido por minerales ferromagnéticos, mientras que los sedimentos lacustres están formados por arcillas, limos y arenas con bajo contenido de minerales ferromagnesianos (Warren CJ y Rudolph DL, 1997). El método magnético es, además, barato, fácil de aplicar, requiere poco procesamiento de datos y tiene buena profundidad de penetración.

Para el levantamiento magnético del área referida se utilizó la técnica de magnetómetro base para monitorear las variaciones horarias del campo magnético terrestre. (julio 2005). El magnetómetro base se programó para tomar lecturas a cada 5 minutos y poder utilizar esta información para corregir la variación diurna del campo magnético terrestre. Se realizó la medición de la intensidad del campo magnético terrestre en cada uno de los puntos. Para tener control de la calidad de la información, se tomaron dos lecturas en cada una de las estaciones teniendo cuidado de que los valores observados fueran similares. El equipo utilizado en el levantamiento magnético fue:

- Magnetómetro base: magnetómetro de protones marca Geometrics, modelo G-856AX, con precisión de 0.1 nanotesla.
- Levantamiento magnético: magnetómetro de cesio marca Scintrex, modelo SMARMAG – 4, con precisión de 0.01 nanotesla.

El procesamiento y análisis de la información consistió en aplicar la corrección por variación diurna y deriva que corresponde a la diferencia de valor entre dos lecturas medidas en el magnetómetro base. Dependiendo si esta diferencia es mayor o menor al primer dato obtenido, habrá que sumarla o restarla a los valores del recorrido magnético obtenidos en el resto de los puntos medidos.

Posteriormente se le asignó a cada uno de los puntos corregidos la coordenada que le correspondió de acuerdo con un receptor GPS. Con las coordenadas e intensidad del campo magnético, se formó el plano de curvas de igual valor de intensidad total del campo magnético terrestre.

La interpretación de los datos magnéticos se hace a partir de la construcción de perfiles y/o mapas donde se determina la ubicación de anomalías magnéticas obvias en los sitios donde se conoce de antemano la presencia de basaltos, y con base en esa respuesta delimitar aproximadamente la extensión de los basaltos someros en el subsuelo. Queda fuera del presente análisis la obtención de la anomalía magnética residual debida a un objeto de interés y que puede ser determinada del campo magnético total. La interpretación de las anomalías magnéticas residuales, involucra la creación de modelos de las variaciones de la susceptibilidad magnética en el subsuelo para inferir una sección geológica. Estos modelos son generalmente contruidos usando una gran variedad de métodos que varían desde soluciones analíticas de geometrías simples hasta más complejos algoritmos computacionales en tres dimensiones.

Las correlaciones empíricas gráficas para determinar el valor del campo magnético y el umbral que define diferentes unidades litoestratigráficas se tomó de los efectos magnéticos de cuerpos de geometría simple, bajo diferentes inclinaciones magnéticas de Telford *et al.* (1990).

5.3.3. Levantamiento topográfico de precisión en una franja de 1 Km. a lo largo del Sistema de pozos de Santa Catarina, a partir de dos puntos GPS.

Los puntos de control topográfico se obtuvieron a partir de un sistema de Posicionamiento Global. El equipo utilizado fue: Un posicionador de doble frecuencia (L1, L2), marca Thales, modelo Zmax y otro posicionador de una frecuencia (L1) marca ASHTECH, modelo Promark 2. Las coordenadas obtenidas fueron ligadas a la Red Geodésica Nacional activa del INEGI (Estaciones Base de Toluca 99°38'36.49337"; 19°17'35.64431"; 2,651.725 m).

5.4 Resultados

5.4.1 Cartografía de las fracturas

La Figura 3 muestra la ubicación de los diferentes sistemas de fracturas identificados en la superficie de la planicie lacustre. En esta figura se observan varios grupos de fracturas. Por su distribución pueden dividirse en dos grupos: (1) El primero caracterizado por su proximidad y orientación paralela a la línea del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina; tal es el caso de las familias de fracturas ubicadas al poniente de los pozos P2 (estudiado por Zawadsky en 1996), P5 y P8; y al oriente de los pozos P9 a P11, donde la densidad de las fracturas es mayor y de orientación irregular; y (2) el segundo grupo lo forman familias aisladas de fracturas más alejadas en más de un kilómetro de la línea de pozos, ubicadas al poniente de los pozos P4 y P5.

De las familias observadas, destacan por su abundancia y formas muy variadas, que van desde porciones curvas, de diapasón y grupos ortogonales, aquellas que se ubican entre los pozos P9 a P11 y el Canal General.

5.4.2 Extensión de los Basaltos en el Subsuelo

La Figura 4a muestra la geometría del levantamiento magnetométrico y la ubicación de los puntos de medición. Se utilizaron cerca de 2000 estaciones de medición. La Figura 4b muestra los resultados del levantamiento magnetométrico, donde se configura la Intensidad Total del Campo Magnético Terrestre (ITCMT). Como se describió en el Capítulo 4, se observan valores mínimos de 41,146 nT en color azul y máximos de 41,779 nT en color rosa, los colores verdes, amarillos y rojos representan valores intermedios. Las instalaciones de los pozos y la tubería que se extiende a profundidad muestran máximos o mínimos magnéticos puntuales. De igual manera, la distribución de basaltos en el subsuelo, a lo largo del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina puede observarse en las Figuras 2a y 2b. En la sección hidrogeológica, existen basaltos provenientes de la Sierra de Santa Catarina que son identificados en los cortes litológicos de los pozos P1 a P3; posteriormente, entre los pozos P7 a P10 se identifica una pequeña colada de basaltos ubicados a una profundidad de 50 metros y con un espesor de 30 metros, cuya posición y espesor sugieren un tiempo de emplazamiento diferente; el capítulo anterior se definió su origen a la Sierra de Santa Catarina. También se demostró que su extensión se correlaciona con una zona donde los hundimientos son mucho menores comparados con zonas de la planicie donde no existen basaltos interestratificados.

Es importante mencionar que, a lo largo de la sección y otros sitios en el interior de la planicie, es donde existen evidencias de la presencia y posición de

los basaltos que representaron sitios para calibrar y determinar la respuesta de los datos magnéticos. De tal manera que la inspección visual de la Figura 4c, permitió definir zonas de contraste en la respuesta magnética, una ubicada en la porción izquierda del Sistema de pozos Mixquic-Santa Catarina donde dominan altos de la intensidad del campo magnético con valores superiores a 41, 500 nT y una segunda zona ubicada al oriente de la línea de pozos donde en general dominan valores bajos de la intensidad del campo magnético, representados con colores verdes y azules. Entre los pozos P8 y P11, zona que prácticamente corresponde con la zona donde se reportan basaltos a 50 metros de profundidad. De igual manera, la construcción de tres perfiles magnéticos transversales a la línea de pozos permitió identificar el umbral que define diferentes unidades litoestratigráficas que corresponde aproximadamente con la isolínea de 41,500-41,600 nT, utilizando los criterios de Telford et al (1990) donde el cuerpo de basalto corresponde con el modelo conceptual de un estrato horizontal semi infinito. La relación que existe entre la extensión y geometría de los basaltos en el subsuelo con la forma del Nuevo Lago de Chalco, también fue discutido en el capítulo anterior; así como, la manera en que coincide con las zonas de menor hundimiento, mostrando el control que tienen los basaltos en la deformación vertical del terreno, con un contraste importante en los valores del Coeficiente de compresibilidad del basalto ($C_v=1.0E-02 \text{ m}^2/\text{s}$) contra la alta compresibilidad del paquete lacustre ($C_v=1.0E-07 \text{ m}^2/\text{s}$).

En la Figura 4c puede observarse la relación que existe entre la extensión y geometría de los basaltos en el subsuelo con la distribución de las diferentes

familias de fracturas. Resalta la coincidencia del primer grupo de fracturas asociadas a los límites de la colada de basalto, y el segundo al interior del cuerpo de basalto. La zona de mayor densidad de fracturas ubicada al oriente de los pozos P9 a P11, coincide con el límite frontal de la colada de basalto (Figura 4c) y la zona de 300 metros de espesor de la secuencia lacustre (Figura 2a) y que corresponde a una amplia zona de esfuerzos de tensión, por la consolidación diferencial que se genera en el límite del cuerpo de basaltos.

5.4.3 Evolución de la Deformación Vertical del Terreno

La Figura 5 ilustra los hundimientos totales hasta principios de 2006; donde se observa en el perímetro del Nuevo Lago de Chalco la isolínea de deformación vertical del terreno de -12 metros; donde dos porciones de la línea de pozos se encuentra prácticamente rodeada de agua, estos son el pozo P6, P11 y P12. La magnitud de la deformación total del terreno tiende a reducirse progresivamente hacia la parte norponiente de la planicie, hasta no presentar ninguna variación en una pequeña porción de la carretera del Eje 10 Sur que conecta con Tlahuac, donde se observa la presencia de basaltos. La porción media de los pozos de Santa Catarina (Pozos P7 a P10) sufrió menor deformación.

La extensión de los basaltos de la Figura 4c, coincide con las zonas de mayor hundimiento de la Figura 5, mostrando el control que tienen los basaltos en la deformación vertical del terreno, ya que se trata de una unidad de muy baja compresibilidad. En los alrededores de los pozos P9 a P11 las fracturas se desarrollaron a lo largo de la zona con hundimientos mayores y que delimitan el Nuevo Lago de Chalco.

5.4.4 Modelo conceptual de fracturamiento.

La Figura 6 muestra el modelo conceptual de fracturamiento cuando el acuitardo que cubre al acuífero principal tiene un contacto interdigitado con rocas volcánicas cuaternarias y piroclastos (fracturas cercanas a flujos de lava cuaternarios y piroclastos es característica la interdigitación de depósitos lacustres con flujos de basalto). En este escenario se aprecia el espesor del acuitardo delgado cerca de los límites y su incremento hacia el interior de la planicie y como el tiempo de respuesta del acuitardo y su consolidación es proporcional al espesor, puede esperarse que la consolidación diferencial pueda ocurrir con el desarrollo de grietas de tensión paralelas a los contactos de otras unidades hidrogeológicas. La carga hidráulica en la interfase entre el acuitardo y otras unidades está controlado por la magnitud del bombeo y la permeabilidad de la unidad que lo subyace (Ortega *et al* 1998).

5.4.5 Mapa de Peligro por Fracturamiento

Los datos indican que la generación del fracturamiento se origina principalmente a lo largo de los límites de la colada de basalto ubicado a una profundidad aproximada de 50 metros. La zona donde existen basaltos interestratificados o donde no existen, es propicia para hundimientos diferenciales que generan zonas de tensión. Adicionalmente la disminución progresiva de la carga hidráulica en el acuífero subyacente, generado por el bombeo, genera igualmente fuerzas de tensión a profundidad que se puede traducir en la falla de los materiales lacustres y formar condiciones para favorables para el

fracturamiento a profundidad, que posteriormente migraría hacia la superficie, tal como lo presenta Aguilar *et al.* (2006) en la zona de Iztapalapa.

Independientemente del mecanismo dominante, es evidente que las grietas existentes permanecerán dinámicas y otras nuevas se irán generando progresivamente en el futuro, en la zona limítrofe del basalto en el interior lacustre. La Figura 7 muestra la zona potencial para la generación de fracturamiento a futuro, tanto en la zona de Valle de Chalco Estado de México), como de Tláhuac (Distrito Federal).

5.5 Conclusiones

Se identificaron diferentes familias de fracturas regionales, con una longitud de varios cientos de metros y aperturas en superficie entre 0.50 y 2 metros. Algunas de estas familias, tienen una orientación sensiblemente Norte-Sur, paralelas al camino de acceso a los pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina, y el resto muestra formas y orientaciones irregulares.

El método magnetométrico permitió determinar la extensión de los basaltos por debajo de la planicie, donde se encuentran cubiertos por sedimentos lacustres cuaternarios. La fuente de esta colada se ubica en el Volcán Guadalupe de la Sierra de Santa Catarina. La unidad de basaltos que cruza la línea de pozos termina a una distancia de aproximadamente 600 metros, justo antes del Canal General, zona donde ubican la mayor cantidad de familias de fracturamiento.

Las fracturas regionales se ubican en dos zonas principales (1) en los límites de la colada de basalto bajo la superficie lacustre, donde algunos sitios coinciden adicionalmente con las proximidades de los pozos del Sistema Mixquic-

Santa Catarina (Pozos P2, P5 y P9 a P11), y (2) en la zona interior de la colada de basaltos somera.

La ubicación del primer grupo de fracturas coincide con la distribución y geometría de los basaltos identificados por debajo de los sedimentos lacustres; que a la vez, coinciden con las zonas de mayor tensión asociadas a la deformación diferencial vertical del terreno. La zona de mayor densidad de fracturamiento corresponde al límite de la colada de basalto en las proximidades de los pozos P7 a P11, donde la deformación vertical total del terreno es mayor a 10 metros. Estas fracturas mapeadas en 1998, se encuentran cubiertas en la actualidad por el Nuevo Lago de Chalco. El segundo grupo de fracturas corresponde a zonas donde los hundimientos totales son el control del fracturamiento del terreno, asociado a la extracción del agua del acuífero, a la consolidación de la secuencia lacustre y a la distribución de basaltos en los primeros 50 metros de profundidad, permiten identificar las zonas potenciales para el crecimiento de las fracturas existentes y familias nuevas que pueden desarrollarse en futuro. Lo cual permitió elaborar un mapa de peligro por fracturamiento.

El efecto del desarrollo de fracturas existentes y otras nuevas puede extenderse a la zona urbana de Valle de Chalco y algunas colonias de Tláhuac, y desde el punto de vista hidráulico a las inmediaciones del Canal General (posible debilitamiento del canal y filtraciones laterales), el Nuevo Lago de Chalco (filtraciones verticales).

Efectos de las fracturas en el acuitardo lacustre en términos de flujo y transporte de solutos.

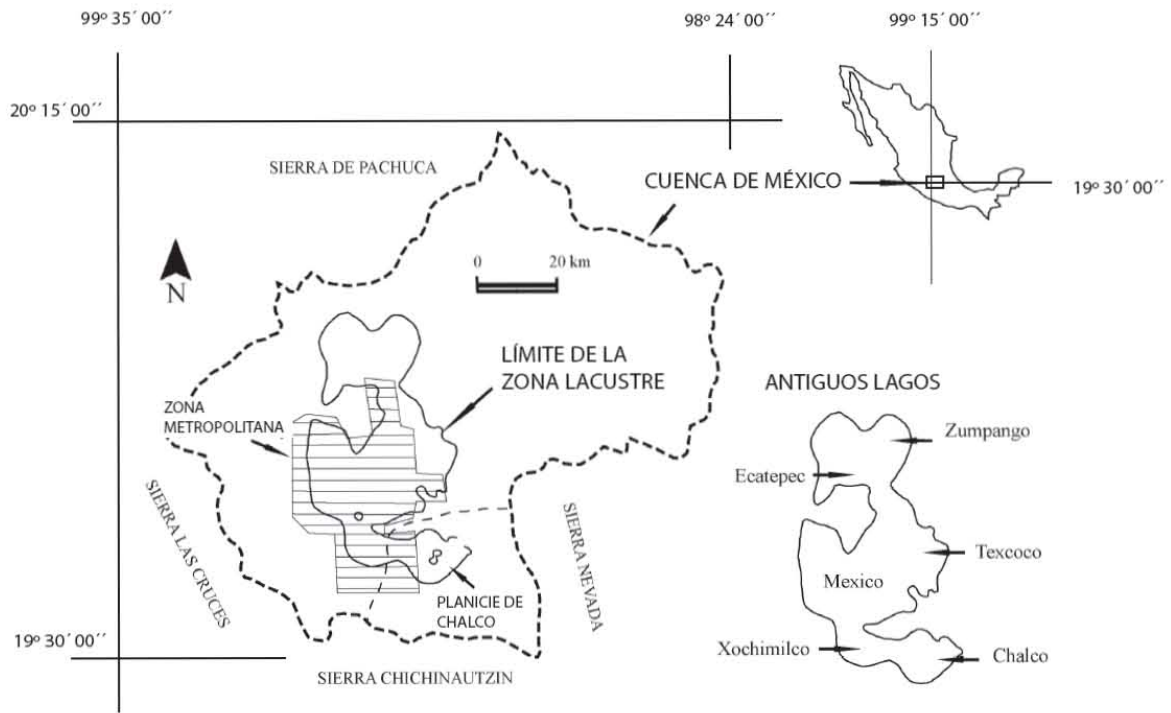


Figura 1. Ubicación del Área Metropolitana de la Ciudad de México en el interior de la Cuenca de México y antiguos lagos. Localización de la Planicie lacustre de Chalco.

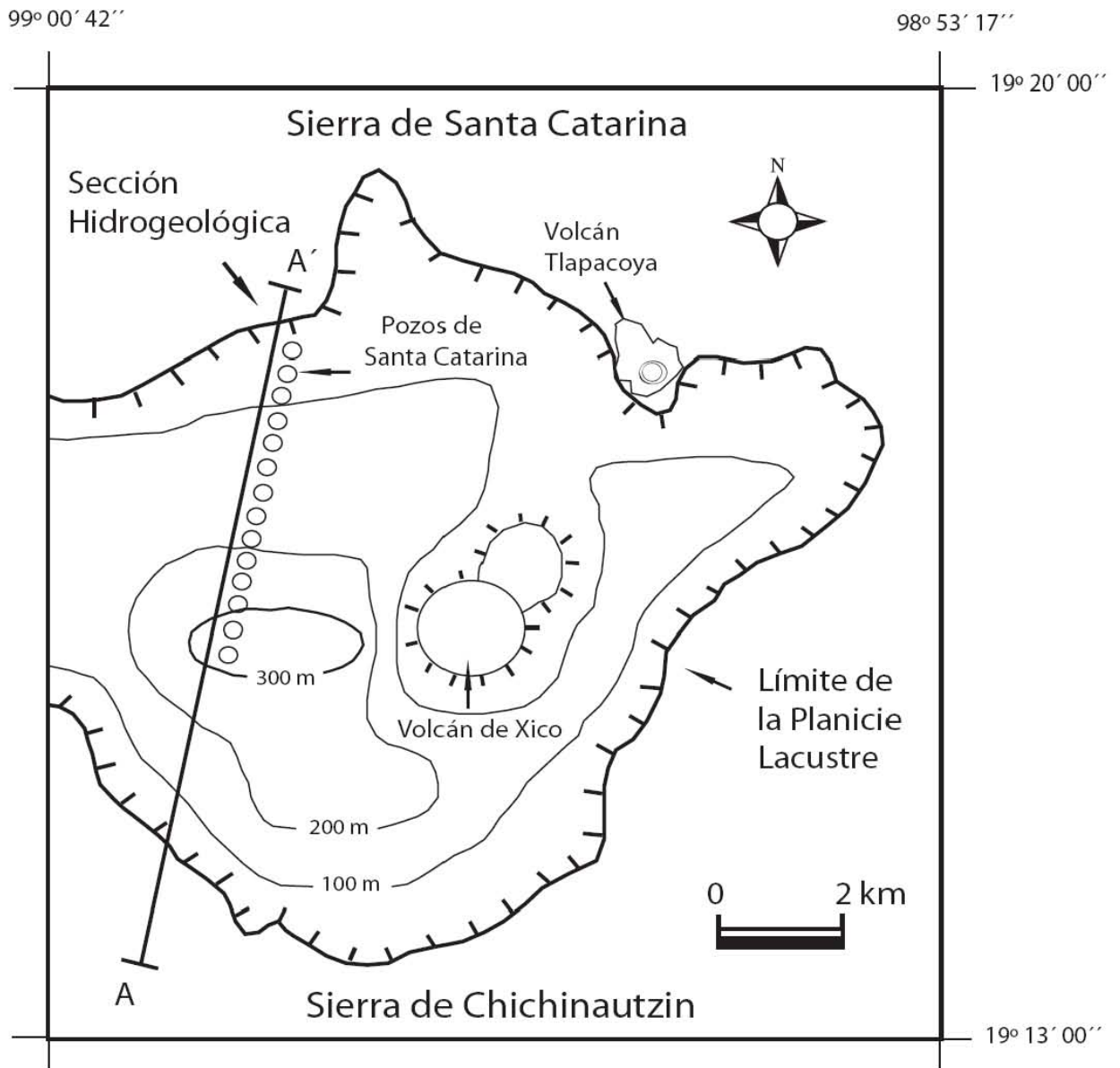


Figura 2. (a) Espesor de los sedimentos lacustres en la Planicie de Chalco, ubicación del Sistema de pozos Mixquic-Santa Catarina y de la sección hidrogeológica (Modificada de Ortega *et al.*, 1993).

SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA A-A'

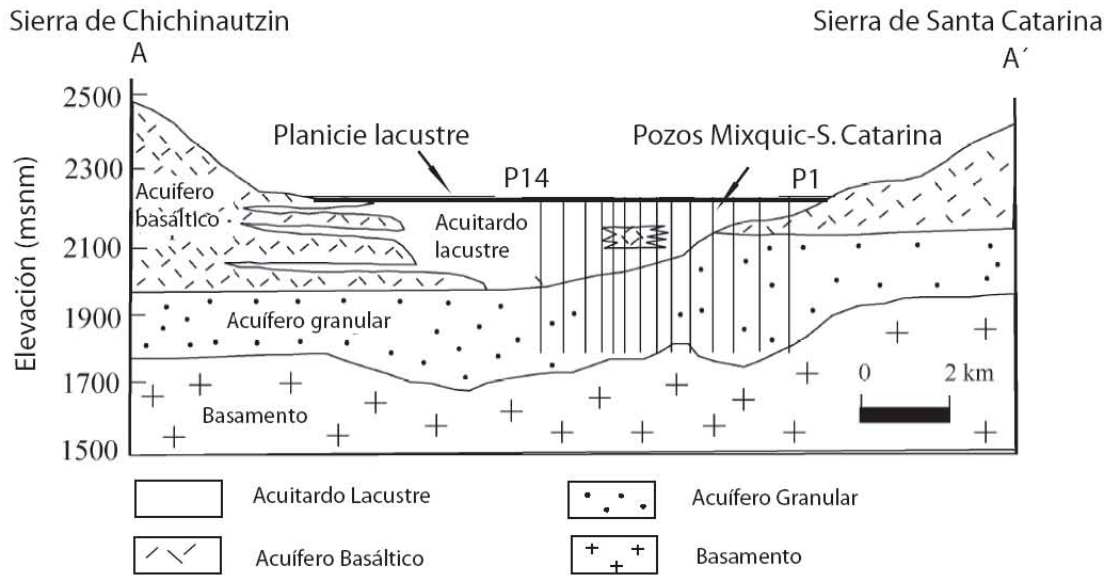


Figura 2. (b) Sección hidrogeológica a lo largo del Sistema Mixquic-Santa Catarina (Modificada de Ortega *et al.*, 1993).

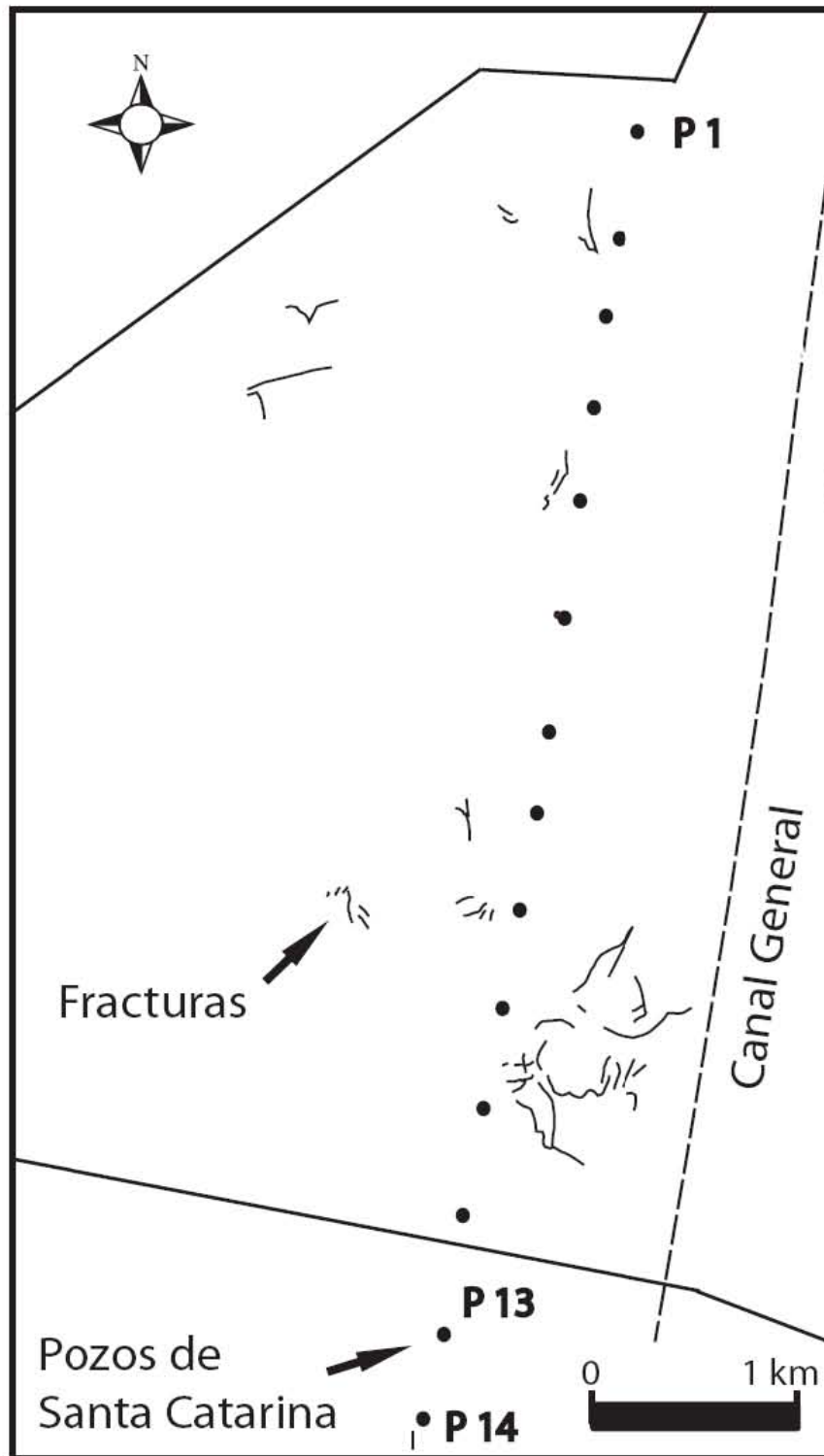


Figura 3. Ubicación de fracturas regionales en el interior de la Planicie de Chalco.

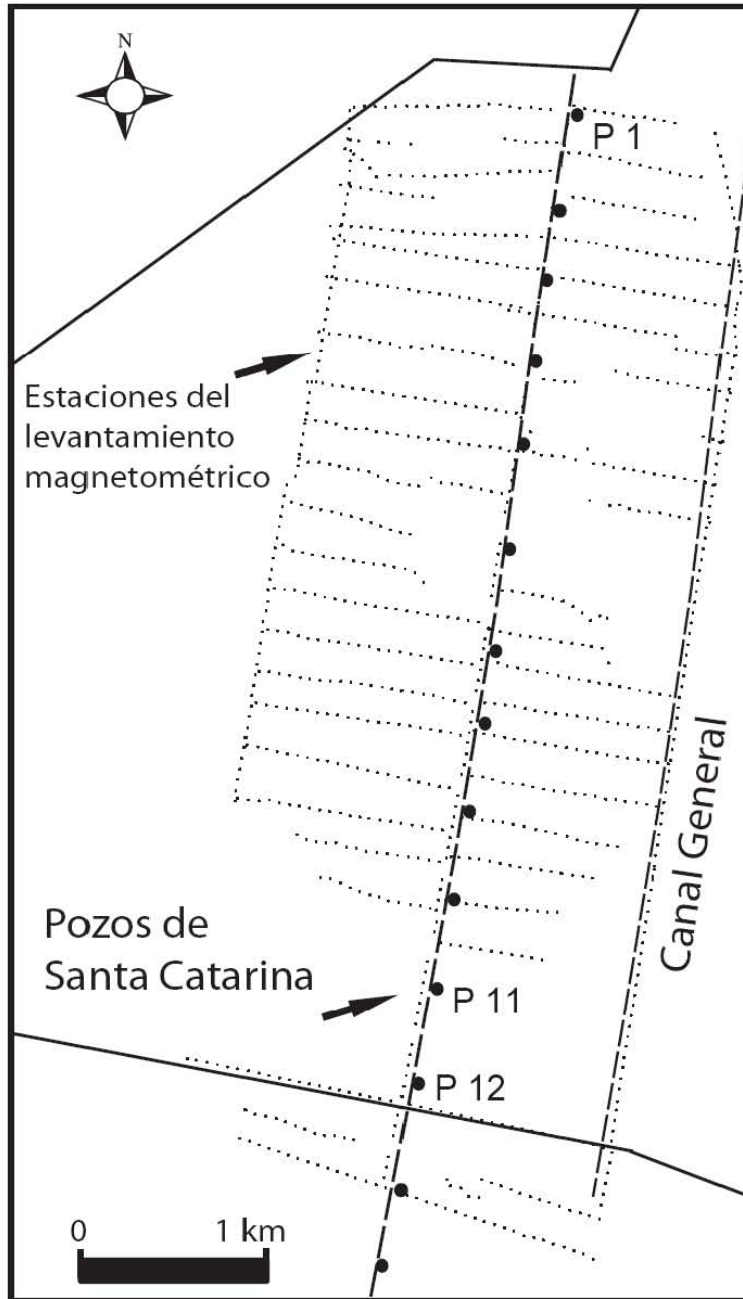


Figura 4. (a) Ubicación de estaciones para el levantamiento magnetométrico.

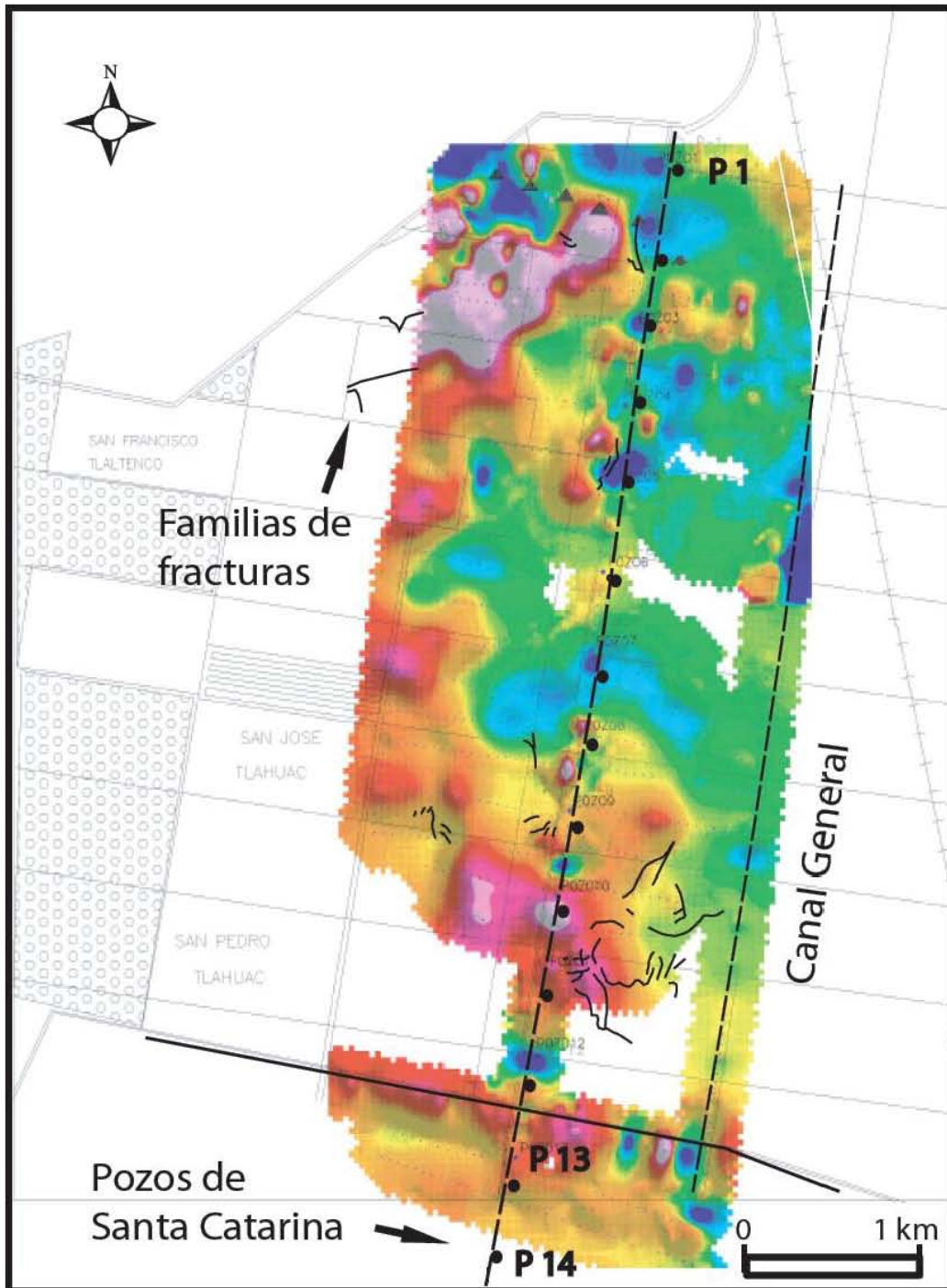


Figura 4. (b) Configuración de la Intensidad del Campo Magnético Terrestre y ubicación de fracturas regionales.

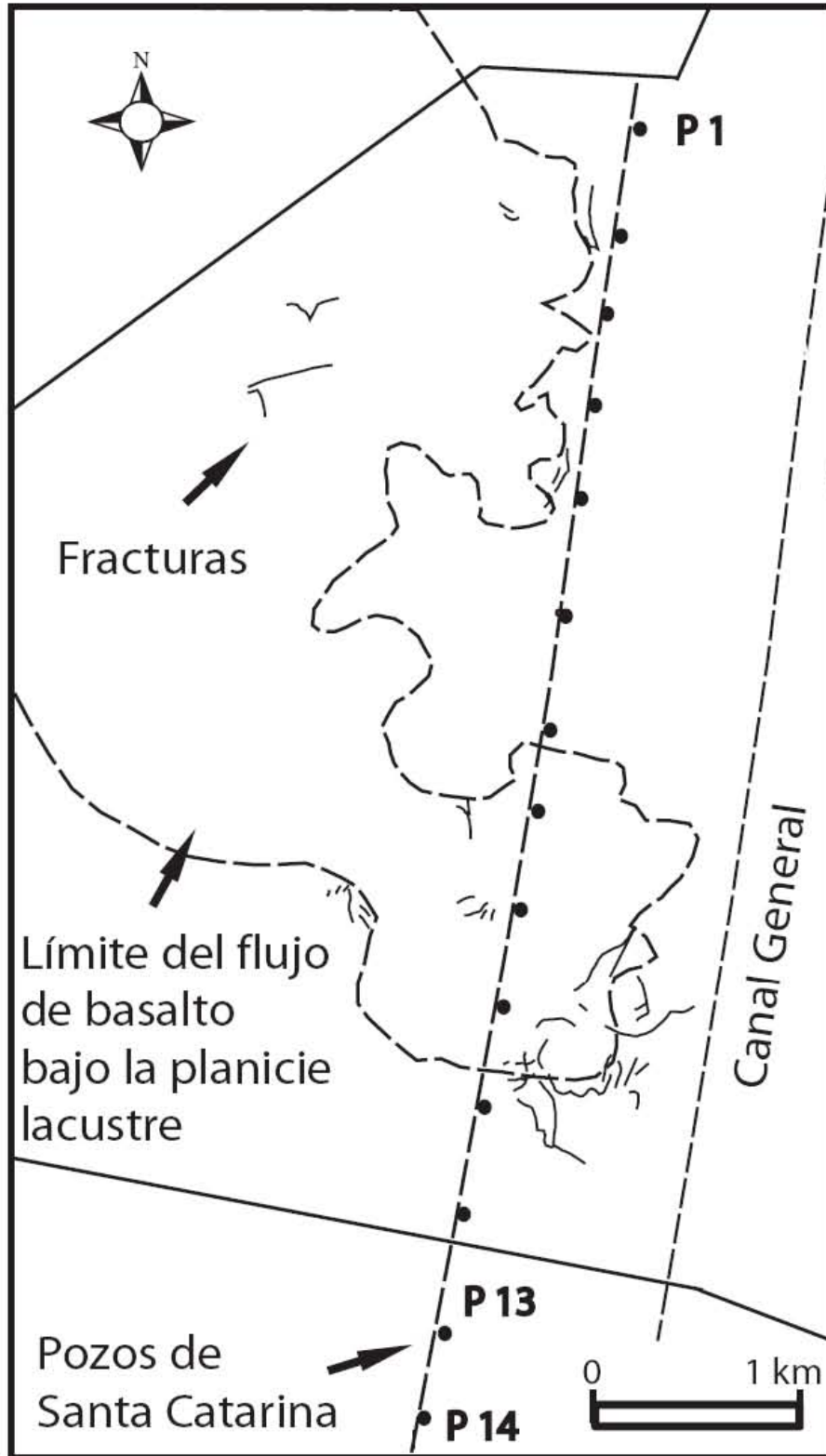


Figura 4. (c) Extensión del flujo de basalto interestratificado en la secuencia lacustre y ubicación de las fracturas regionales.

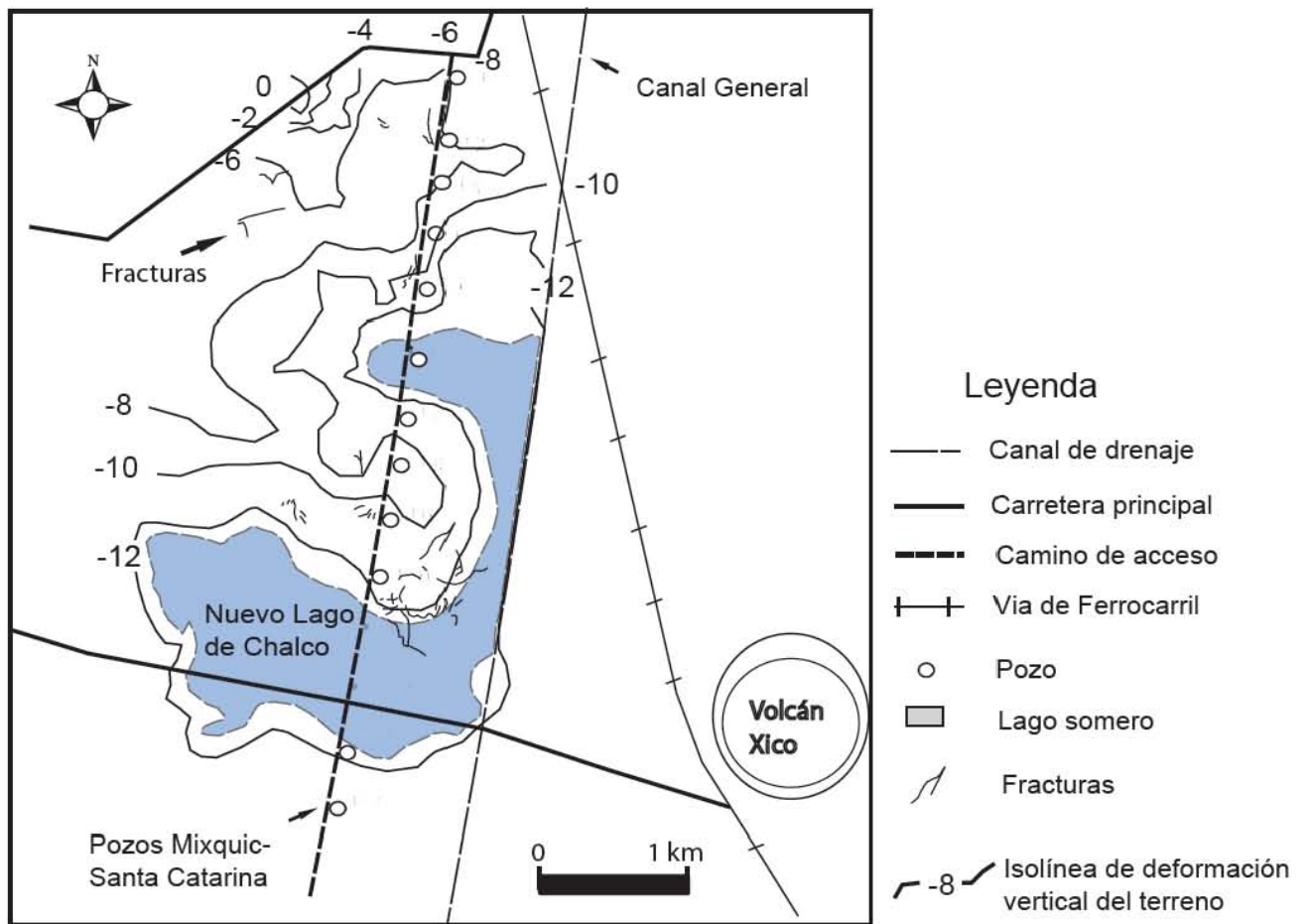


Figura 5. Deformación vertical total del terreno y su relación con las fracturas regionales y la posición del Nuevo Lago de Chalco.

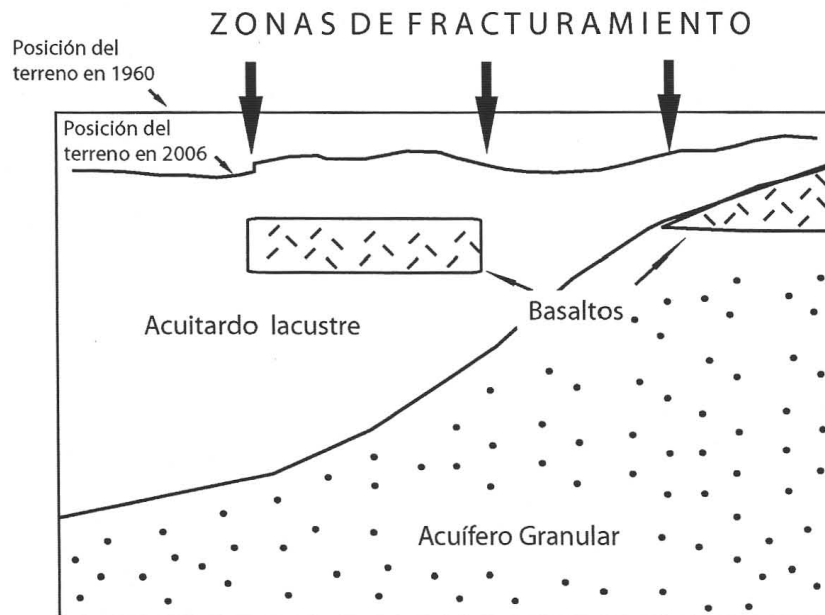
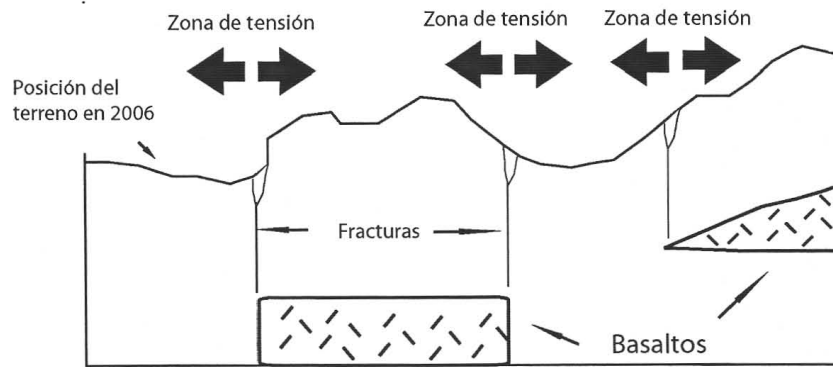


Figura 6. Modelo conceptual del fracturamiento en la Planicie de Chalco.

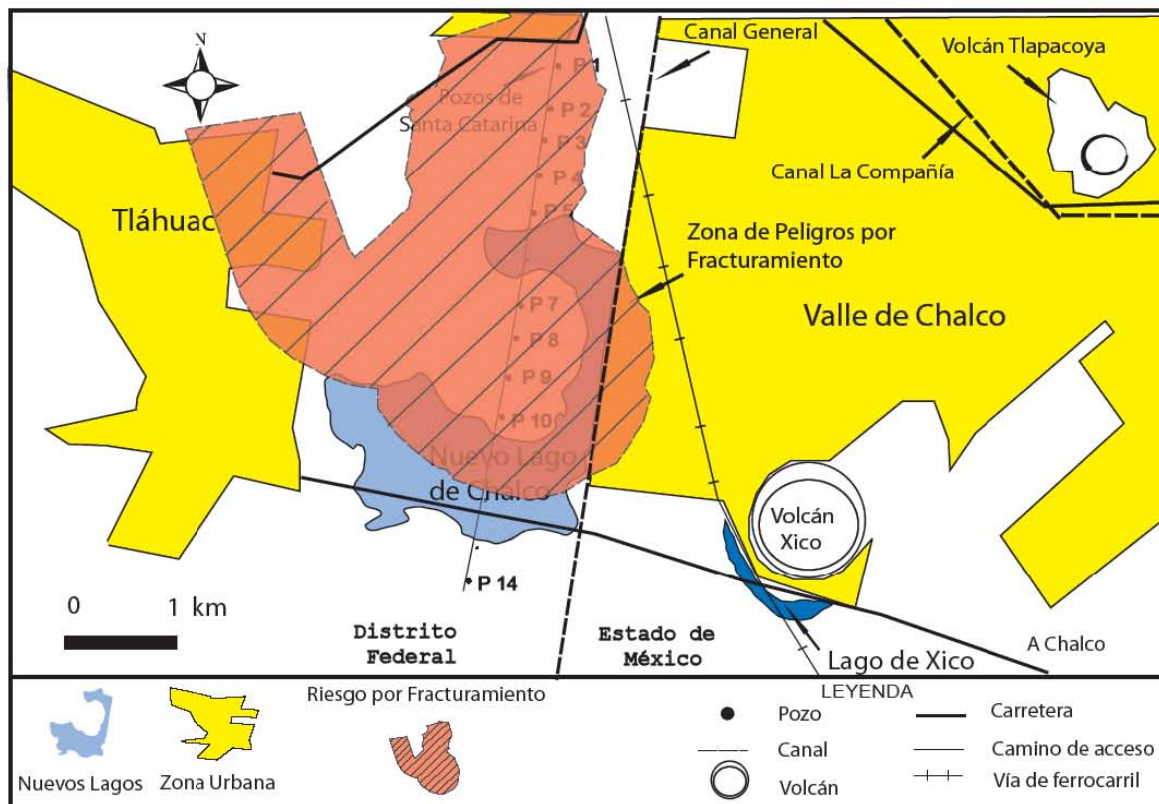


Figura 7. Mapa de peligro por fracturamiento a las zonas urbanas de Valle de Chalco (estado de México) y Tláhuac (Distrito Federal).

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

La transferencia de bombeo del centro de la Ciudad de México a la planicie lacustre de Ecatepec, Chalco, y Xochimilco, a partir de la década de los años 60 también transfirió la problemática de hundimiento y fracturamiento del terreno. Se encontró un incremento progresivo en el número de casos de fracturamiento en el AMCM en las últimas cuatro décadas. Se definieron tres diferentes escalas en la apertura de fracturas en la Cuenca de México: (1) microfracturas (30-100 μ m), (2) locales (decenas de centímetros) y 3 regionales (algunos metros de apertura). La longitud de las fracturas también es proporcional y lo mismo se infiere de su profundidad. Se propone una zonificación hidrogeológica de la porción centro-sur de la Cuenca de México, y se proponen además, varios modelos conceptuales de fracturamiento basados en condiciones hidrogeológicas locales. De esta manera, las microfracturas están asociadas al proceso de desecación de los lagos a partir de 1789 y las variaciones anuales del nivel freático. Mientras que las fracturas regionales y locales están asociadas a la falla mecánica de los sedimentos lacustres en el entorno de los pozos de extracción y a la distribución y geometría de unidades hidrogeológicas poco compresibles.

Debido a la respuesta transitoria del acuitardo, las fracturas están sujetas a un proceso dinámico, donde generalmente aparecen después de varios años de iniciado el bombeo, y se incrementan en número conforme continúa el bombeo, la consolidación y la magnitud de los hundimientos, por lo que es un fenómeno que una vez iniciado no se detiene.

Las investigaciones enfocadas a la zona de la planicie de Chalco permitieron identificar la evolución de la deformación vertical del terreno y los mecanismos que la controlan. Se definieron los hundimientos regionales totales a la fecha y el control que ejercen los basaltos interestratificados en los primeros 50 metros de la secuencia lacustre; los cuales controlan el crecimiento y la forma del nuevo lago de Chalco, los hundimientos diferenciales y el desarrollo de fracturas regionales en sus límites.

El método magnético permitió determinar la extensión de los basaltos por debajo de la planicie, donde se encuentran cubiertos por sedimentos lacustres cuaternarios. La unidad de basaltos que cruza la línea de pozos a una distancia de aproximadamente 600 metros, antes de canal General, zona donde se ubica la mayor cantidad de familias de fracturas.

Las fracturas regionales se ubican en dos zonas principales (1) en los límites de la colada de basalto bajo la superficie lacustre, donde algunos sitios coinciden adicionalmente con las proximidades de los pozos del sistema Mixquic-Santa Catarina (Pozos 2, 5 y 9 a 11), y (2) en la zona interior de la colada de basalto somera.

La ubicación del primer grupo de fracturas coincide con la distribución y geometría de los basaltos identificados por debajo de los sedimentos lacustres; que a su vez coinciden con las zonas de mayor tensión asociadas a la deformación vertical del terreno. La zona de mayor densidad de fracturamiento corresponde al límite de la colada de basalto en las proximidades de los pozos 7 a 9, donde la deformación vertical total del terreno es mayor a 10 metros. Estas fracturas cartografiadas en 1998, se encuentran cubiertas en la actualidad por el

Nuevo Lago de Chalco. El segundo grupo de fracturas corresponde a zonas donde los hundimientos totales son el control del fracturamiento del terreno, asociado a la extracción del agua del acuífero, a la consolidación de la secuencia lacustre y a la distribución de basaltos en los primeros 50 metros de profundidad, permiten identificar las zonas potenciales para el crecimiento de las fracturas existentes y familias nuevas que pueden desarrollarse en el futuro. Lo cual permitió elaborar un mapa de peligro por fracturamiento.

El efecto del desarrollo de fracturas existentes y otras nuevas puede extenderse a la zona urbana de Valle de Chalco y algunas colonias de Tlahuac, y desde el punto de vista hidráulico a las inmediaciones del canal General (posible debilitamiento del canal y filtraciones laterales), el nuevo lago de Chalco (filtraciones verticales). Se desarrolló un mapa de peligros de hundimiento y fracturamiento hacia las zonas urbanas.

El nuevo lago de Chalco inició con zonas de acumulación superficial de agua, evidentes desde 1988. Las depresiones topográficas, en las que se almacena el agua superficial, han estado asociadas a hundimientos regionales del terreno debido a la operación de catorce pozos del denominado Sistema Mixquic-Santa Catarina, que inició la extracción de agua subterránea en 1984. Estos pozos han generado abatimientos anuales del nivel potenciométrico del orden de 1.5 m/año; lo que da lugar a una deformación vertical del terreno de hasta 40 cm/año en el centro de la planicie, por consolidación del acuitardo lacustre.

Estos hundimientos modificaron sustancialmente el sistema de desagüe natural y de canales en la planicie lacustre que operaba desde principios del siglo XX, causando la acumulación de agua superficial y la necesidad del bombeo

escalonado a lo largo del Canal General para drenar el agua hacia la planicie de Texcoco. Los ríos de la Compañía y de Amecameca, entre otros, han tenido que ser elevados al mismo ritmo de los hundimientos y son reforzados constantemente para evitar su ruptura y provocar inundaciones locales como la que ocurrió en el canal de la Compañía en junio del año 2000.

La extracción de agua subterránea de este sistema de pozos seguirá, lo que continuará manifestándose como hundimientos del terreno y crecimiento del Nuevo Lago de Chalco. Este nuevo lago se desarrolla entre dos importantes asentamientos humanos: Tlahuac (Distrito Federal) y Valle de Chalco (Estado de México). De acuerdo con las tendencias observadas de hundimientos del terreno, se estima que para el año 2015, la extensión de este lago podría afectar cerca de 25 hectáreas de la zona urbana de Tlahuac y 150 hectáreas de Valle de Chalco. En total se estima un crecimiento del nuevo lago entre 1,200 y 1,500 hectáreas para el año 2015, incluyendo suelo agrícola.

La concentración de aguas residuales de origen urbano e industrial hacia este nuevo lago de Chalco da lugar a problemas de calidad química y biológica que pueden impactar negativamente a la población en caso de inundación y a otros seres vivos que se desarrollan en su interior.

Con base en los mecanismos que controlan los hundimientos en la planicie de Chalco, es posible predecir las tendencias, y en particular las zonas más susceptibles a ser inundadas y a las zonas potenciales para el desarrollo de fracturas; por lo que es posible elaborar mapas de peligro y proveer elementos para controlar el crecimiento urbano, el desarrollo social y económico de la zona y

el ordenamiento del territorio. Todo ello para evitar situaciones de desastre en un futuro cercano.

6.2 Recomendaciones.

Propiciar el crecimiento controlado del Nuevo Lago de Chalco para permitir el retorno masivo de aves migratorias y de especies acuáticas nativas de la región, aunado a un desarrollo ecoturístico y el cultivo en sistemas de chinampas para mejorar las condiciones sociales y económicas.

De acuerdo con los controles y magnitud de la subsidencia regional observada, es necesario evitar un crecimiento urbano mayor entre Tlahuac y Valle de Chalco. Para reducir el peligro y riesgo de inundaciones será necesario analizar la conveniencia de incrementar la cantidad y eficiencia de la infraestructura hidráulica a futuro contra la opción de reubicar varias colonias de Valle de Chalco y Tlahuac, en un radio aproximado de 2.5 a 3 Km. con centro en el pozo 9 del sistema Mixquic-Santa Catarina.

La dinámica del crecimiento del Nuevo Lago de Chalco tiene implicaciones importantes en el proceso orientado a la transformación y organización de los espacios y los territorios del Estado de México y Distrito Federal. Este proceso debe involucrar cambios cualitativos en los planos social, económico, político, ambiental, tecnológico, de protección civil y ordenamiento territorial; incorporando principios de equidad y participación social, reconociendo las vertientes del desarrollo en un sentido integral y también dinámico.

Establecer un sistema de monitoreo satelital de los hundimientos y el crecimiento del Nuevo Lago de Chalco, además de sistemas de monitoreo de estabilidad del Canal General y variaciones del nivel freático en los sedimentos

lacustres. Todo esto con el fin de identificar posibles situaciones de peligro por inundación en Valle de Chalco y Tlahuac y dar tiempo a los habitantes a ser reubicados temporalmente. Se recomienda evaluar opciones de desastre contra la de reubicación de varias colonias.

Apéndice A. Análisis fractal de las fracturas

Resumen

En el capítulo 5 se mostró la presencia de fracturas regionales asociadas a la subsidencia y distribución de basaltos en la secuencia lacustre. La geometría fractal puede ser la herramienta que ayude a caracterizar el patrón de heterogeneidad de un sistema natural tomando en cuenta las relaciones fundamentales entre las propiedades de un sistema y los procesos que en éste ocurren. Se realizaron excavaciones, con un trascabo, con un ancho de 1.5m, a profundidades de hasta 2.5m, con el fin de obtener imágenes de las fracturas en las paredes de la excavación. Estas zanjas se hicieron en y a los lados de una fractura de dimensiones de algunos cientos de metros de longitud. Las imágenes se seleccionaron y se procesaron para la obtención de la dimensión fractal de las fracturas por el método de conteo de cajas. Se analizaron un total de 27 puntos. Los resultados muestran que las dimensiones tienen valores entre 1.7 y 1.8 en posiciones ortogonales. La desviación estándar fue menor a 0.08 en todos los casos.

A.1 Introducción

Los sistemas naturales muestran una heterogeneidad tanto en su variabilidad en el espacio como en su dinámica en el tiempo. La organización del patrón de la heterogeneidad puede variar significativamente en escalas de tiempo pequeñas y en distancias cortas. La geometría fractal puede ser la herramienta que ayude a caracterizar el patrón de heterogeneidad de un sistema natural tomando en cuenta las relaciones fundamentales entre las propiedades de un sistema y los procesos que en éste ocurren que no pueden analizarse desde el punto de vista de la estadística clásica ni la geoestadística.

De acuerdo con algunos autores, muchos fenómenos geológicos tienen características de invariabilidad y autoafinidad como son los sismos, erupciones volcánicas y depósitos minerales (Mandelbrot *et al.* 1984, Turcotte, 1992, Pilkington y Todoeschuck, 1995, Pilkington *et al.* 1994, Zhou y Thybo, 1998). La geometría fractal ha sido aplicada en la descripción, comparación y modelado de sistemas de fracturas naturales y en la obtención de una amplia variedad de atributos en poblaciones de fallas y fracturas como son longitud de la traza, espaciamiento y desplazamiento (Yussim y Flores, 2006).

Los sedimentos lacustres de la Cuenca de México presentan un panorama susceptible de ser analizado por esta técnica. Las fracturas como estructuras disyuntivas dispuestas en la superficie de acuitardo lacustre, se generan en lugares preferenciales, de manera sistemática. La distribución espacial de éstas ha sido tratada de diferentes manera, y el análisis se realiza con métodos de estadística circular o esférica para determinar los intervalos de frecuencia de los patrones de fracturamiento, evaluando, adicionalmente , la escala, forma, forma, espaciamiento y distribución espacial de las fracturas. Un método alternativo es el análisis geoestadístico (Tavchandjian, *et al.* 1997) cuyos objetivos son más amplios: se pueden estudiar patrones de fracturamiento, densidad, posibilidad de ocurrencia, etc. No obstante, estas técnicas no están formuladas para representar la heterogeneidad de los sistemas.

A.2 Objetivos

El propósito de caracterizar las fracturas en dos perfiles en sedimentos lacustres de la subcuenca de Chalco generadas de manera relativamente sistemática es tratar de demostrar que mediante el uso de métodos fractales se puede analizar la distribución de fracturas a diferentes escalas como cualquier sistema natural o artificial, fragmentado y articulado de una manera autosimilar.

A.3. Metodología

El análisis fractal de las fracturas se llevó a cabo en dos etapas:

1 De campo la cual incluyó la excavación de tres zanjas con el fin de tener imágenes de las fracturas en las paredes de la excavación a profundidades de hasta 2.5m. Estas zanjas se hicieron en y a los lados de una fractura de

dimensiones de algunos cientos de metros ubicada a unos cuantos metros del pozo número 10 de la batería de pozos Mixquic-Santa Catarina. La apertura de la zanja se realizó con un trascabo.

Se seleccionaron 13 imágenes al azar de un total de 60, para la obtención de la dimensión fractal de las fracturas por el método de conteo de cajas.

A.3.1 Método de conteo de caja por líneas.

Se trata de una técnica matemática para las mediciones y descripciones de los sistemas naturales (Power y Tullis, 1991) Young y Crawford (1992) desarrollaron una técnica fractal lineal de conteo de caja y la usaron para la caracterización de los perfiles de fracturas en el suelo, la técnica se basó en el análisis de las muestras impregnadas de los agregados del suelo fracturadas con la mano. Los agregados se cortaban en el sentido perpendicular a la superficie de las fracturas (Dexter y Horn, 1988). Se desarrolló un software para analizar las imágenes obtenidas y la dimensión fractal de cada imagen se calculó con base en la siguiente ecuación:

$$N(r)=k/r^D$$

Donde:

K=constante de proporcionalidad

D=dimensión fractal

La gráfica log-log de N (Número de cuadros totales que cubre totalmente la línea) contra r (lado del cuadro) da una recta cuya pendiente negativa es la dimensión fractal D.

Los primeros análisis fractales realizados en secciones delgadas fueron hechos por Katz y Thomppson (1985) al estimar la dimensión fractal de las paredes de

los poros en los materiales sedimentarios con la técnica del análisis de las secciones lineales.

A.4 Resultados

El resultado que se obtiene del programa es la dimensión fractal, que se expresa como la pendiente de la recta en el ajuste por mínimos cuadrados de los datos medidos; la intersección de la recta al eje vertical y el coeficiente de correlación de los datos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1.

Por cada archivo (fotografía) se obtuvo la dimensión fractal y su desviación estándar. A cada fotografía se le realizó dos veces el proceso ya que cada una de ellas fue escaneada en una posición y girada 90° con respecto de la anterior para ver si los resultados variaban con el cambio de orientación.

Una vez escaneadas se trabajaron con Adobe Photoshop con el fin de variar los tonos de gris hasta obtener una definición clara de la fractura y ser analizado por el método de conteo de cajas.

Lo que se tiene es que las dimensiones fractales tienen valores entre 1.7 y 1.8 ya sea en una posición del análisis o la otra lo que implica que la posición no afecta en casos de análisis de fracturas.

Tabla 1

archivo	dimensión	desv. st
---------	-----------	----------

fia_irre	1.76028	0.0423929
f2a_irre	1.75610	0.0437774
f3a_irre	1.80398	0.0288028
F10a_irr	1.76980	0.0317882
f11a_irr	1.77918	0.0389396
f12a_irr	1.75443	0.0261606
fF13a_irr	1.77131	0.0467239
f14a_irr	1.80109	0.0433906
f16a_irr	1.76499	0.0246776
f17a_irr	1.81686	0.0280956
f18a_irr	1.78971	0.0493740
f18aa_ir	1.79155	0.0763717
f20a_irr	1.75494	0.0404126
f23a_irr	1.75516	0.0602403
f1a_irrv	1.74834	0.0458868
f2a_irrv	1.76647	0.0387684
f10a_irv	1.79180	0.0235791
f11a_irv	1.77613	0.0411715
f12a_irv	1.77457	0.0269406
f13a_irv	1.77447	0.0463796
f14a_irv	1.80283	0.0413599
f16a_irv	1.77868	0.0193682
f17a_irv	1.80990	0.3227871
f18a_irv	1.79287	0.0469409
f18aa_iv	1.77011	0.0309441
f20a_irv	1.78374	0.0556593
f23a_irv	1.76896	0.0567475

Las fotografías que se muestran a continuación son de la zanja "a" es decir la que se encuentra asociada a la fractura en campo. Las gráficas correspondientes a cada fotografía representan los resultados del método por conteo de cajas.

Fig 1a_irre

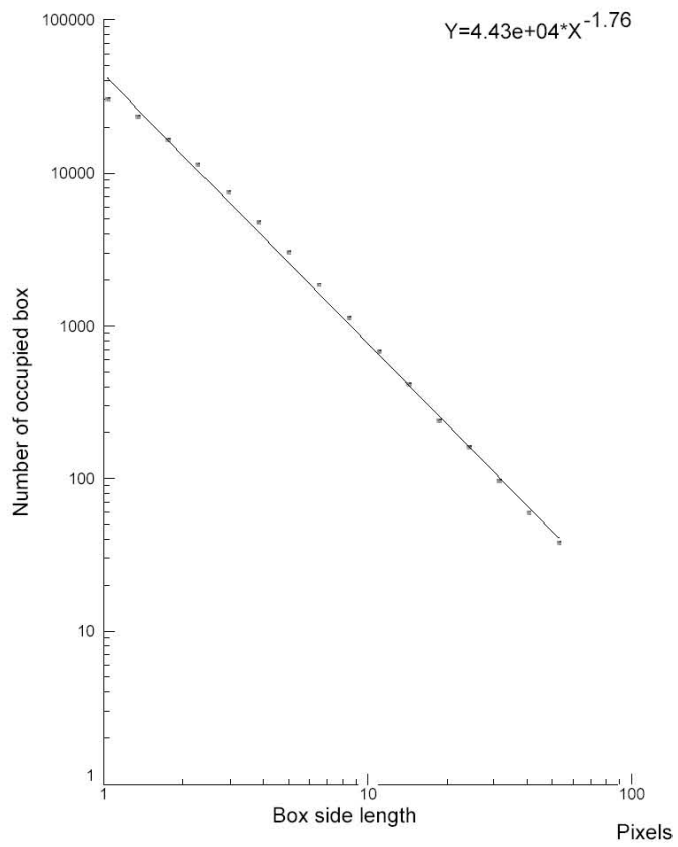
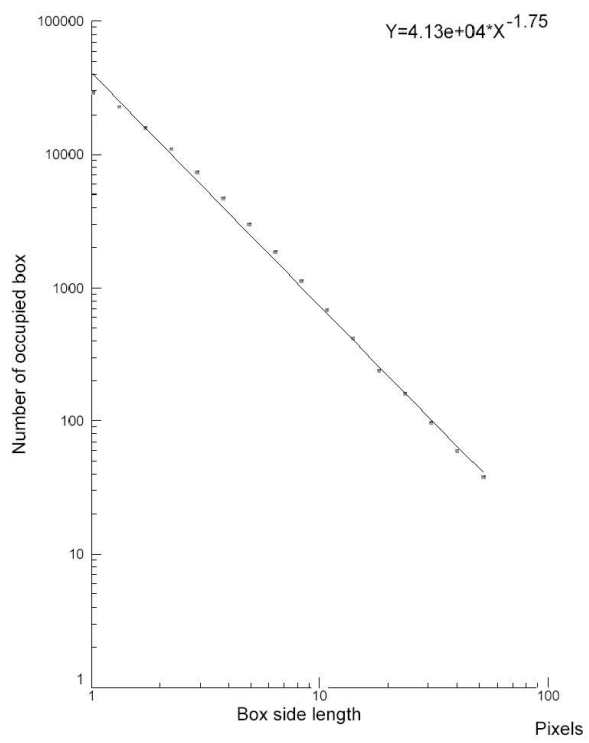
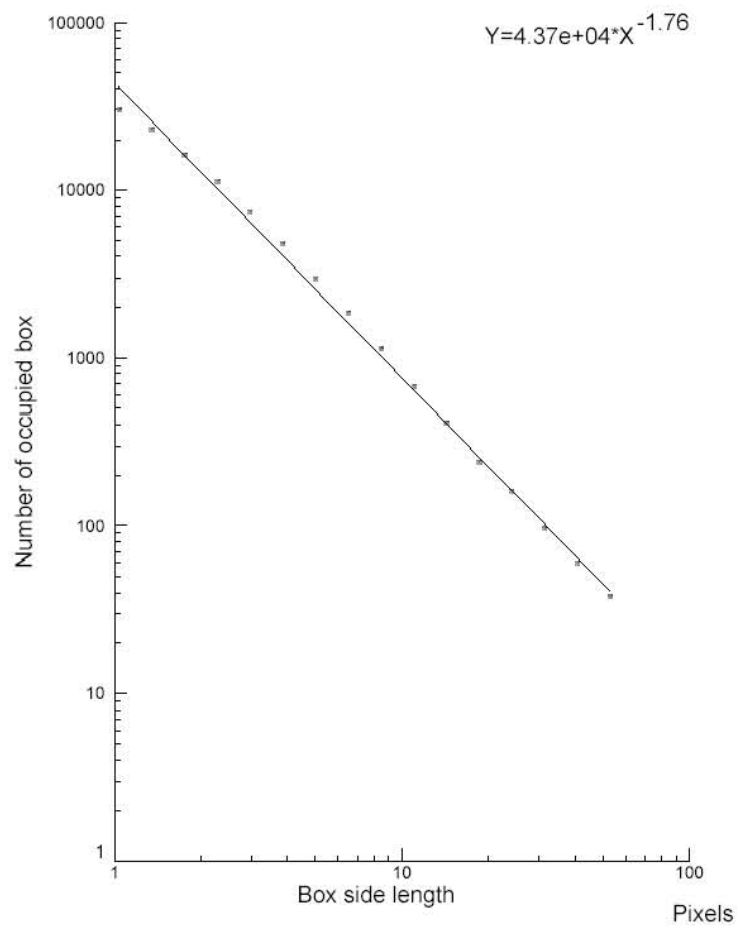
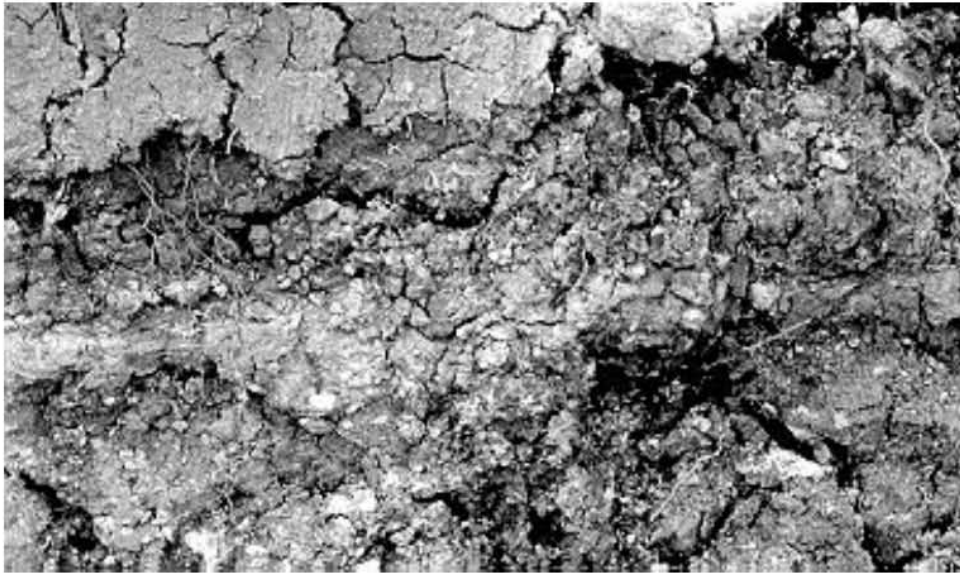


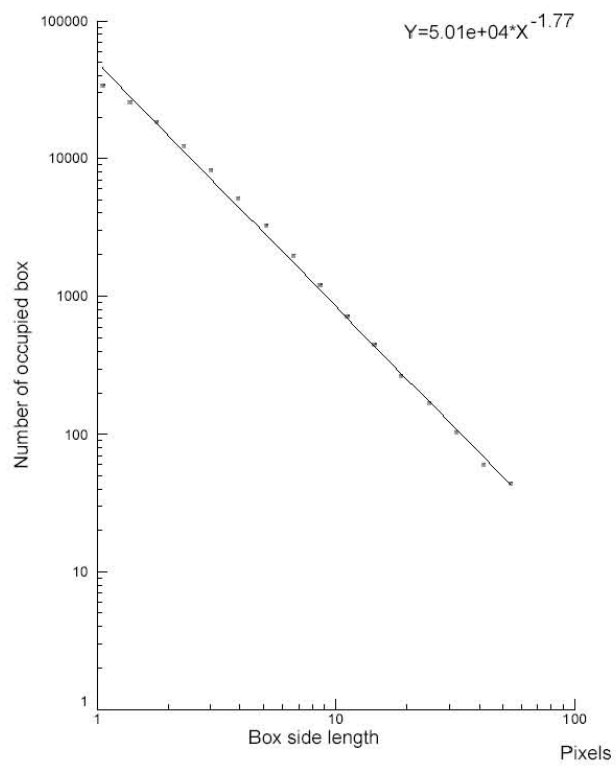
Fig. 1a_irrv



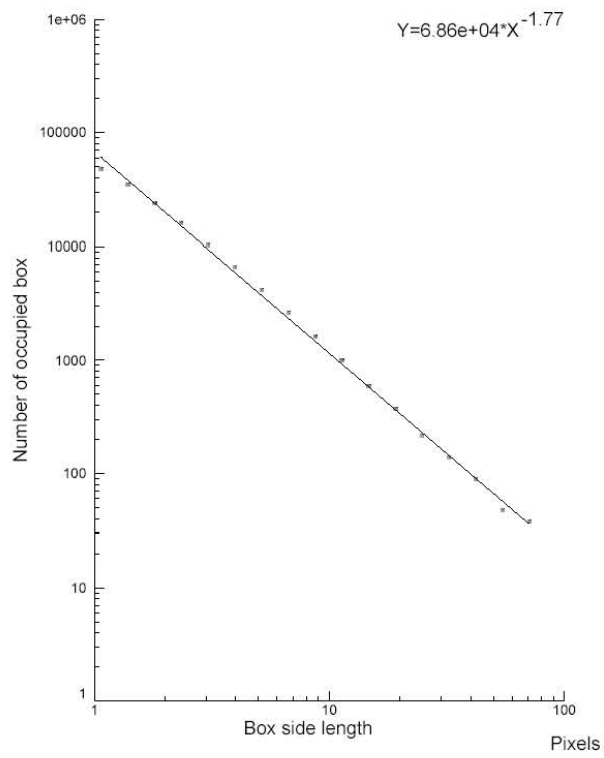
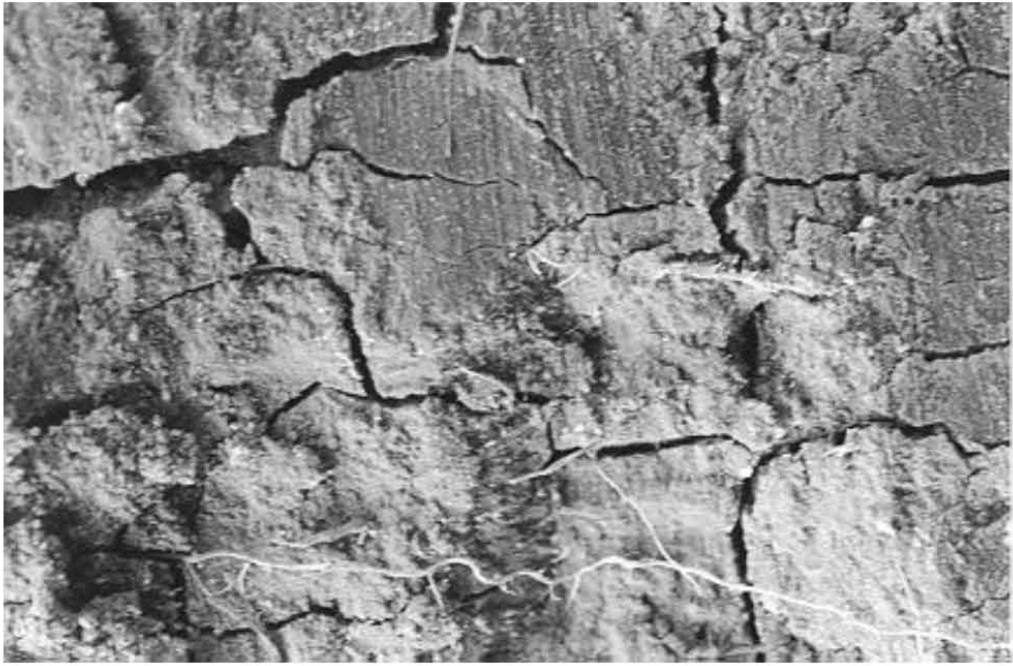
f2a_irre



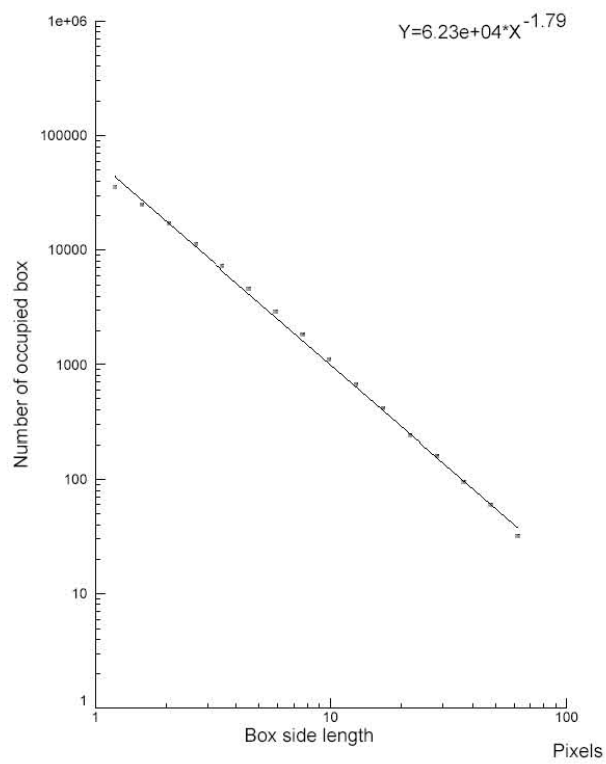
f2a_irrv



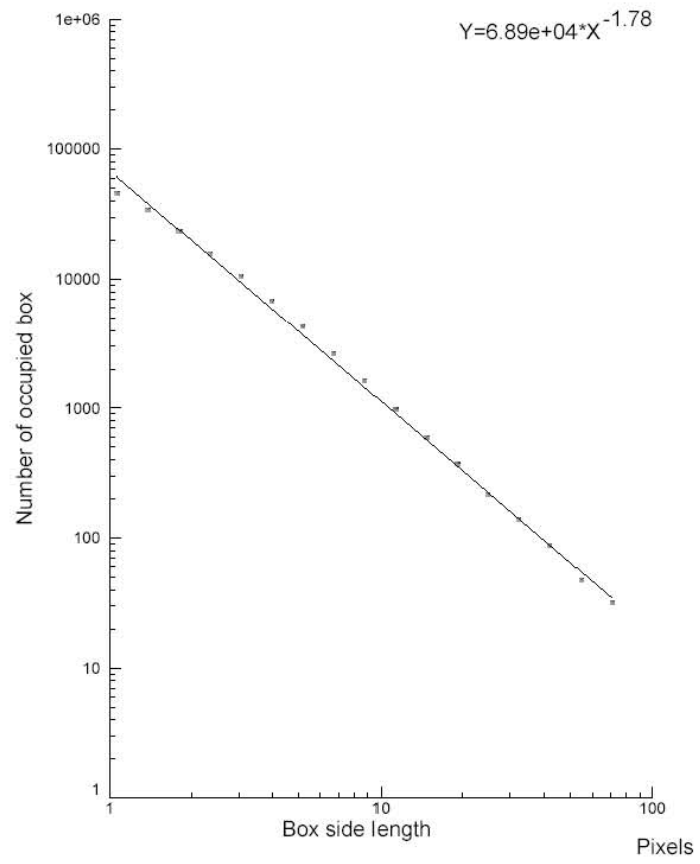
f10a_irr



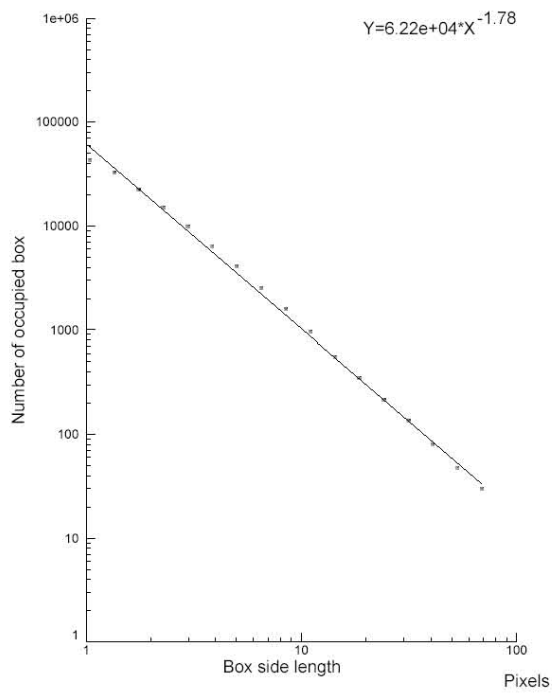
f10a_irv



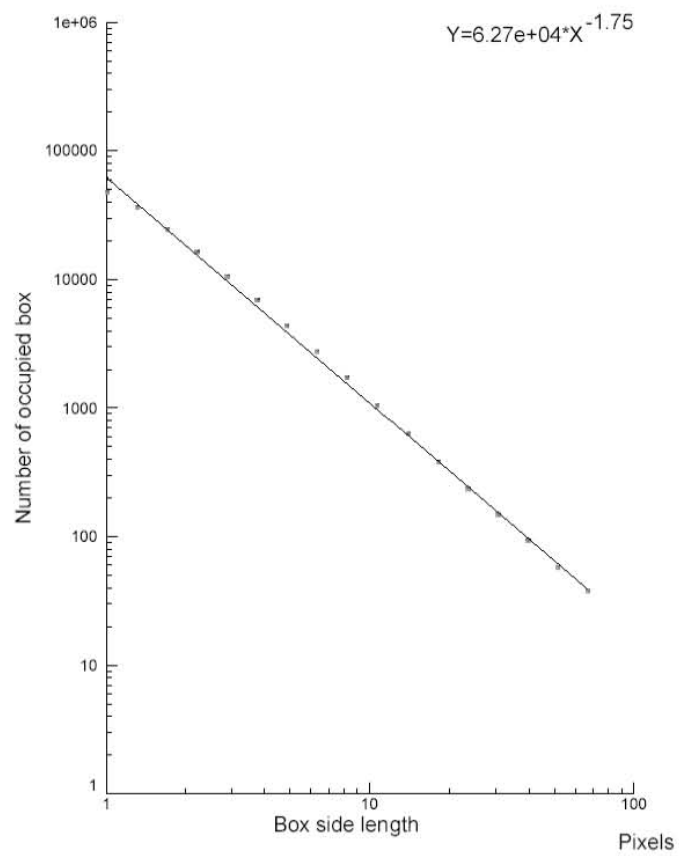
f11a_irr



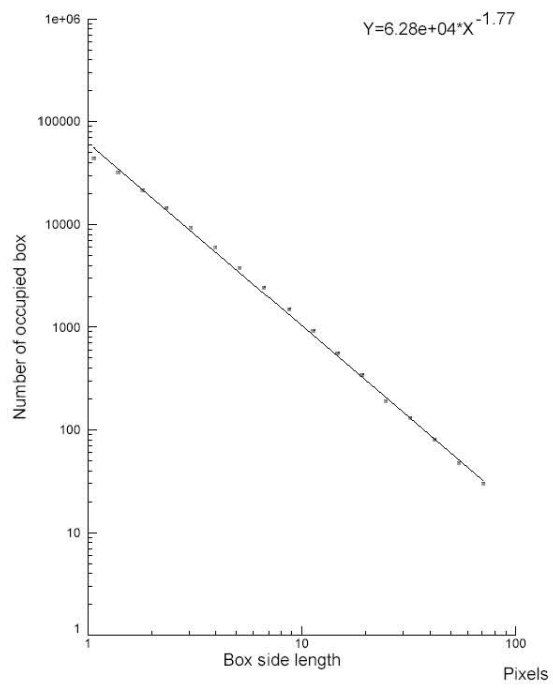
f11a_irv



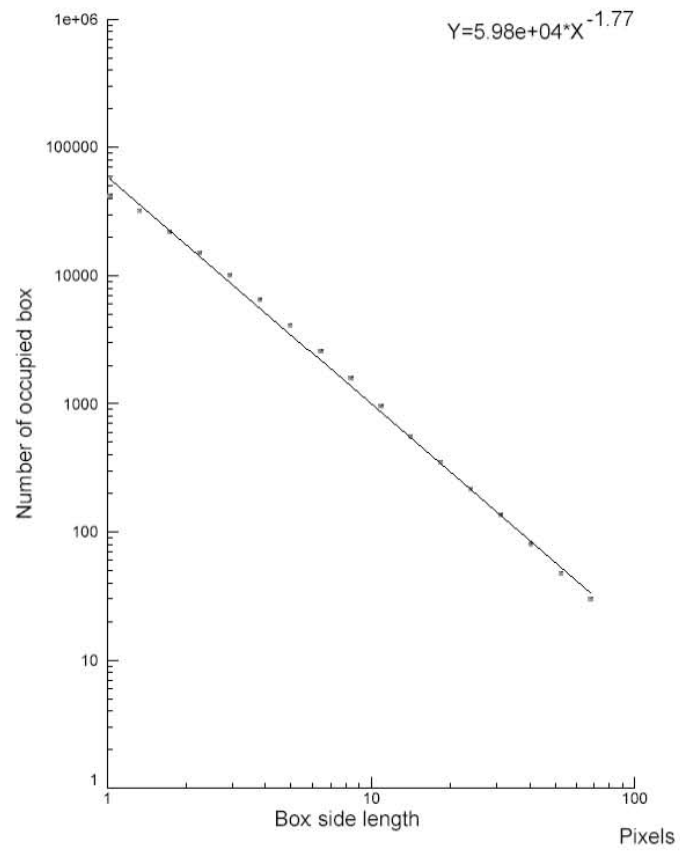
f12a_irr



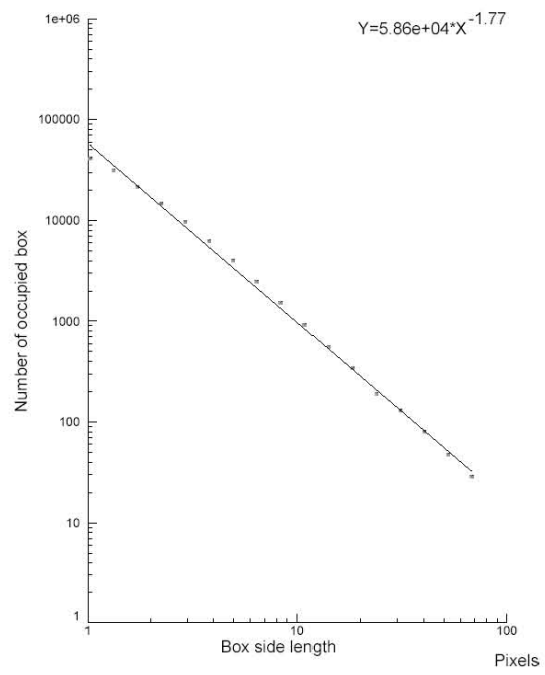
f12a_irv



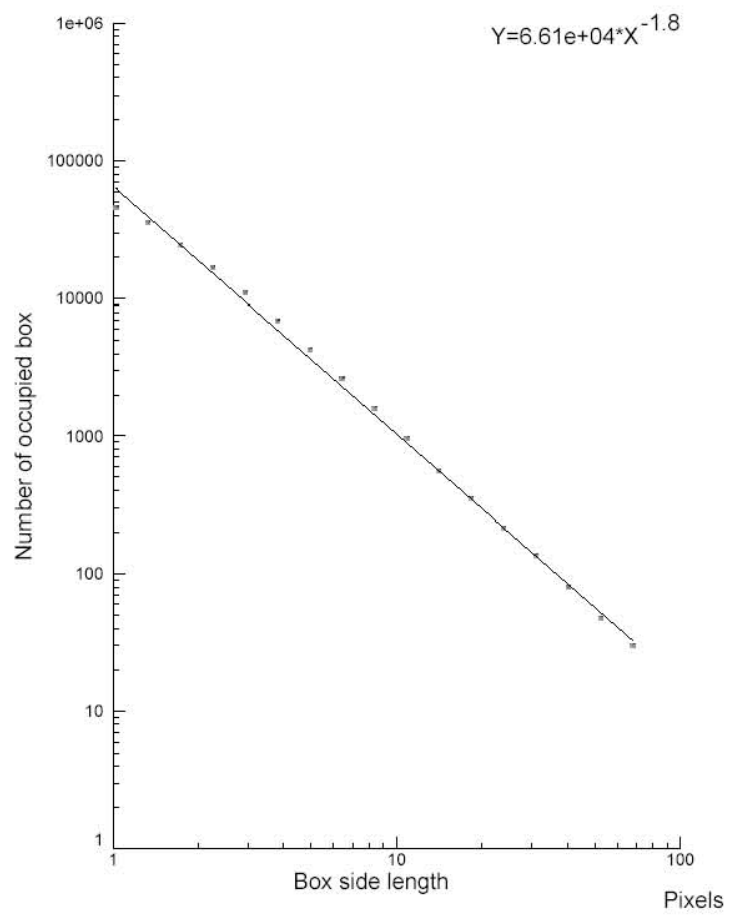
f13a_irr



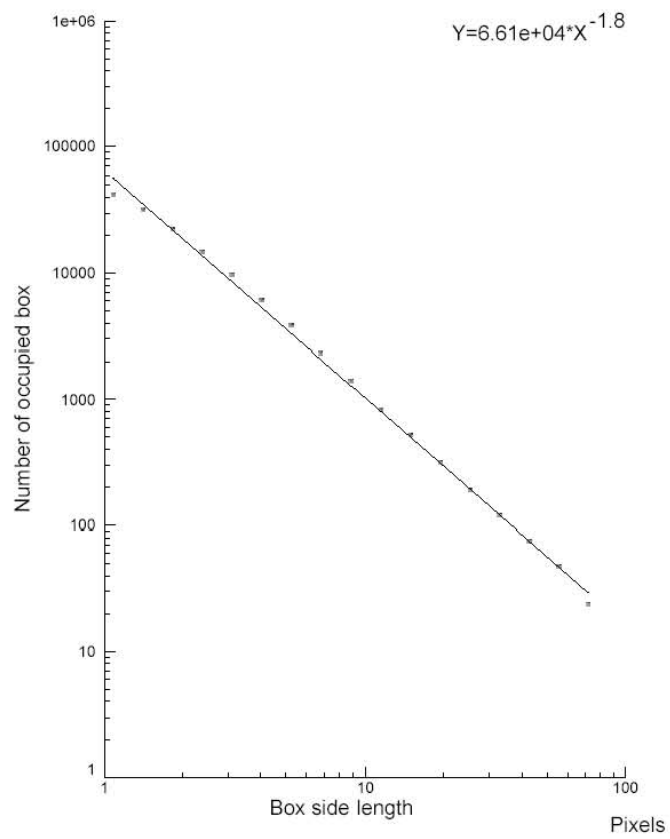
f13a_irv



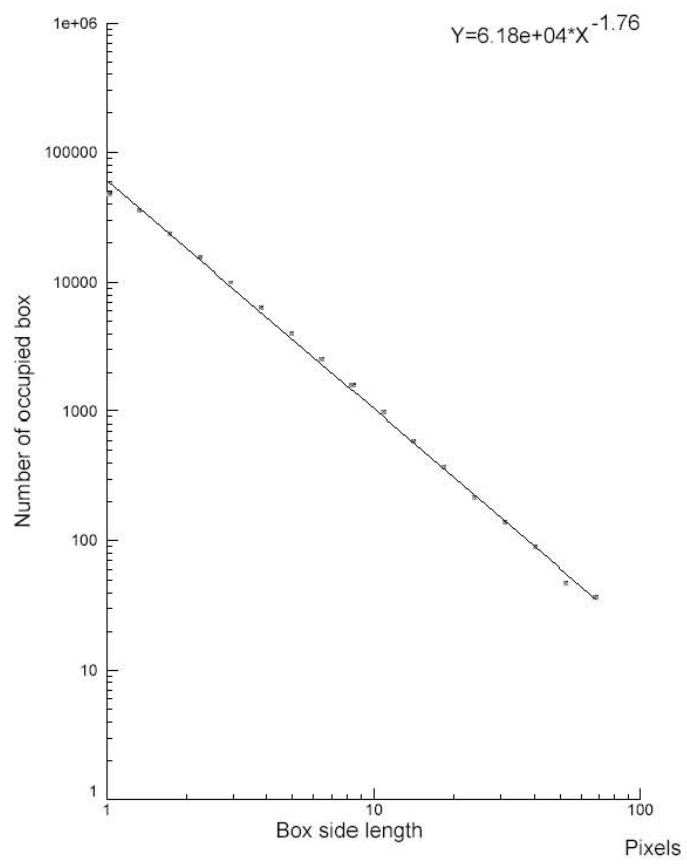
f14a_irr



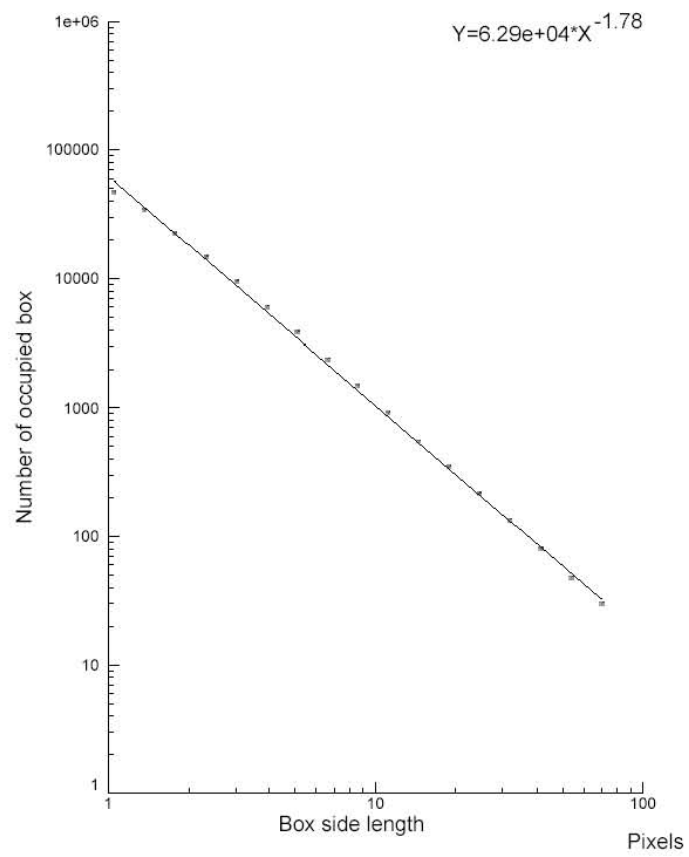
f14a_inv



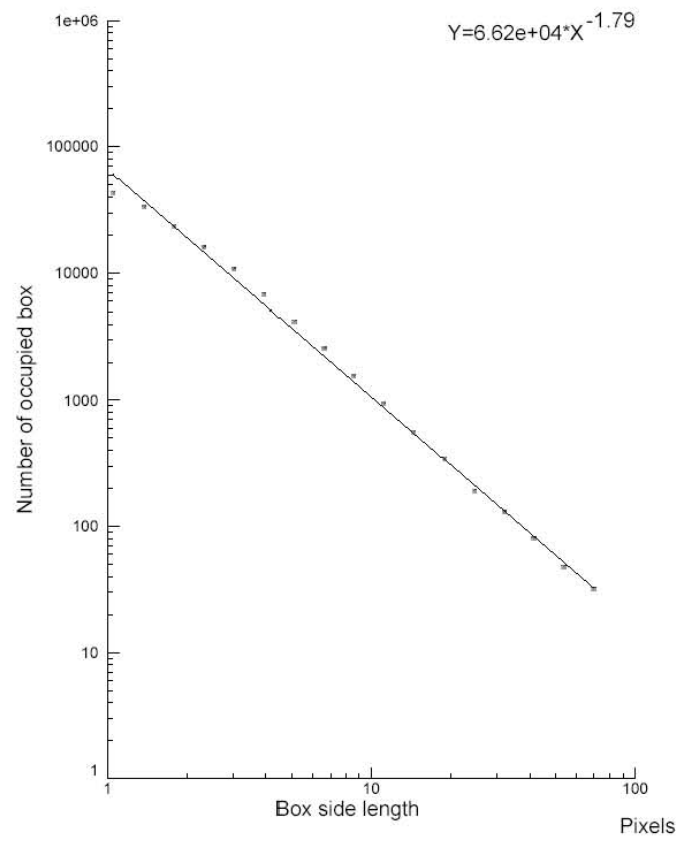
f16a_irr



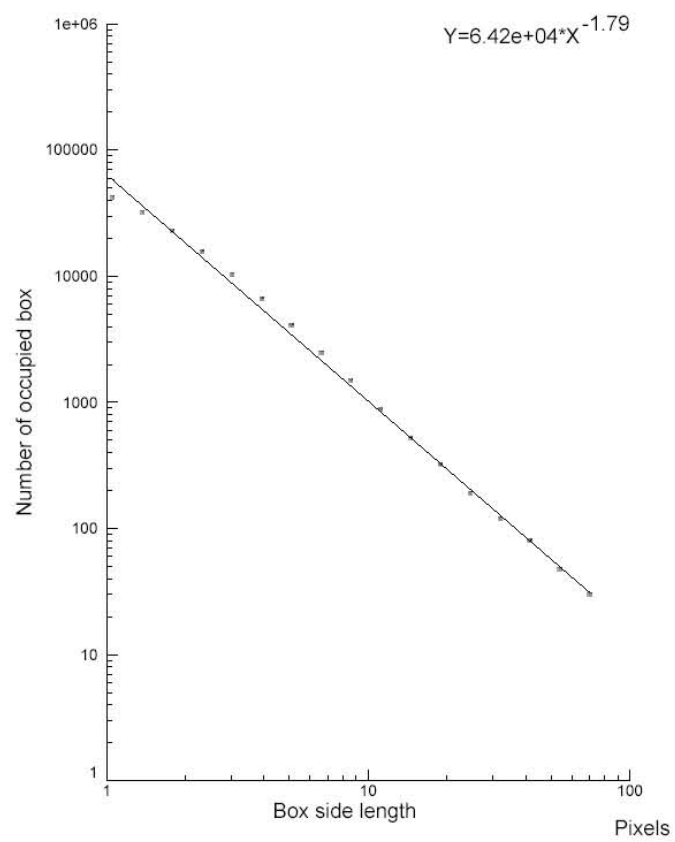
f16a_inv



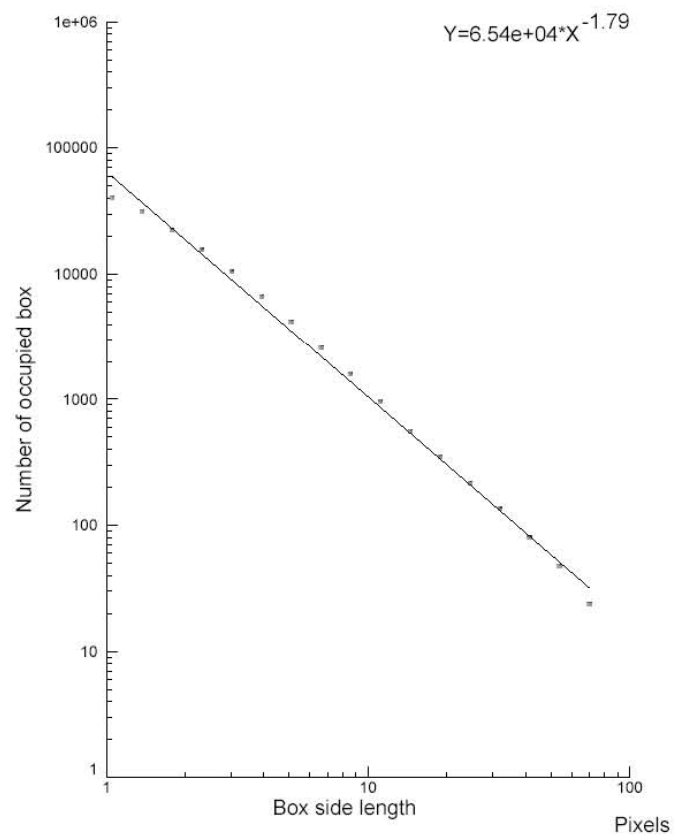
f18a_irr



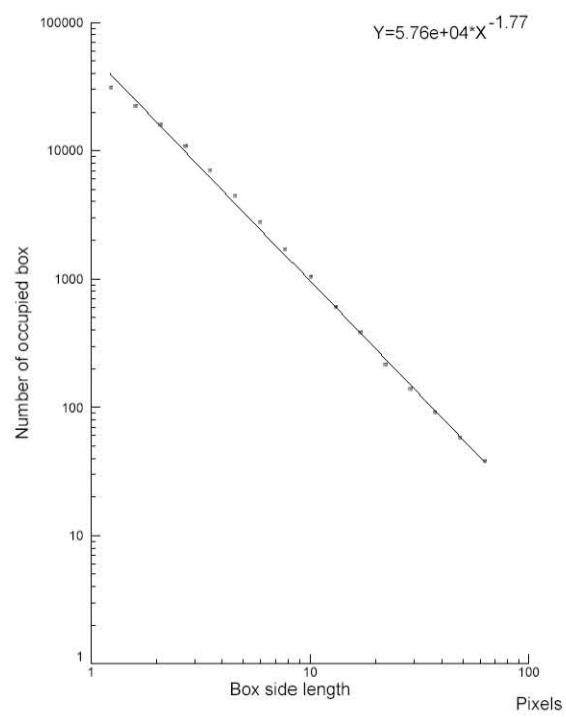
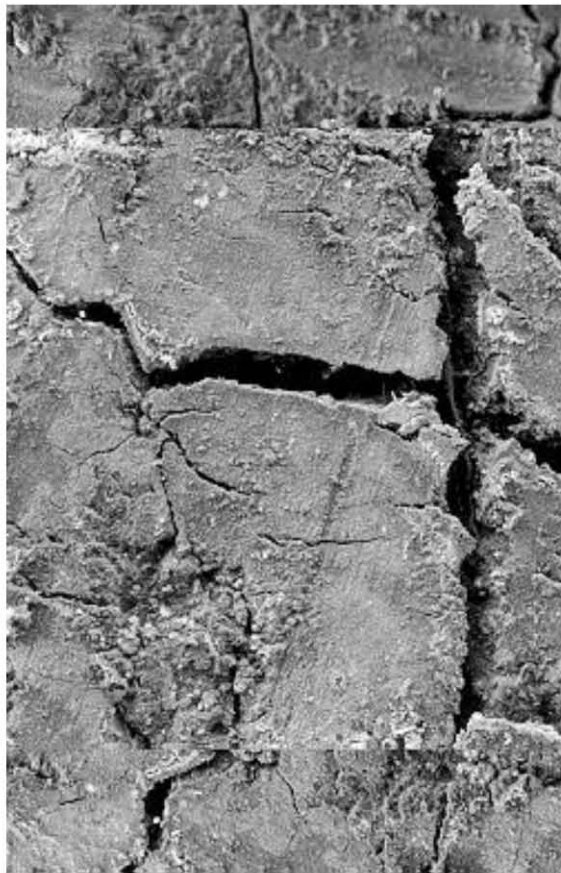
f18a_inv



F18aa_ir



F18aa_iv



A.5 Conclusiones

Las dimensiones de masa fractal de poros y sólidos como indicadores de las diferentes imágenes es muy similar.

Debido a que los resultados obtenidos a esta escala con muy poca diferencia en la dimensión fractal y por la presencia de fracturamiento a mayores escalas (descritas en capítulo 2 y 5) es posible suponer que el análisis sea factible en diferentes partes de la cuenca como apoyo a la caracterización y generación de fracturas en el acuitardo lacustre.

Referencias

- Aguilar-Pérez, L. A., Ortega-Guerrero, M. A., Lugo-Hubp, J. Y Ortiz-Zamora, D. C., 2006. *Análisis numérico acoplado de los desplazamientos verticales y generación de fracturas por extracción de agua subterránea en las proximidades de la Ciudad de México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 23, núm. 3, p. 247-261.
- Alberro, J. Y Hernández, R., 1990. *Génesis de las grietas de tensión en el Valle de México. Simposio del subsuelo de la Ciudad de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones: México DF.*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, p 95-108.
- Alvarez J.; Chavez R.E.; Lomnitz C., 1995, *Shallow SH-refraction survey on Mexico City mud: amplification by wedge effects*, First Break 13, no.12 p. 471-479.
- Anderson, S.L., 1973, *Investigation of Mesa Earth-Crack, Arizona attributed to differential subsidence due to ground water withdrawal*. MSc. Thesis, Tempe, Arizona State University, IIIp.
- Arias, R. A., 1989, *Agrietamiento del subsuelo en el valle de México: México, DF.*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Tesis de Maestría, 153 p.
- Auvinet, G. y Arias A., 1991, *Propagación de grietas*. En agrietamiento de suelos, SMMS, pp. 21-31.
- Benhumea, M.I. y Vázquez, A. C., 1988. *Estudios Geofísicos del Valle de México*. Comisión Federal de Electricidad (CFE). Reporte interno, México DF. 60p.
- Briebesca, C. J., 1960, *Hidrología histórica del Valle de México*. Revista de Ingeniería Hidráulica Mexicana, No. XIV.
- Brown, S.A., 1987, A Note on the Description of Surface Roughness Using Fractal Dimension: Geophys. Res. Lett., v.14, p. 1095-1098.
- Campos-Enríquez, J. O., Delgado-Rodríguez, O., Chávez-Segura, Gómez-Contreras, P., Flores-Márquez, E. L. y Birch, F. S., 1997, *The subsurface structure of the Chalco sub-basin (Mexico City) inferred from geophysical data*, Geophysics, Vol. 62, No.1, p 23-35.
- Carrillo, N., 1947, *Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City*. En volumen Nabor Carrillo, Comisión impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica, Anuario 47, publicado en 1969, pp. 7-14, Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- Cervantes, M. A., 1996, *Tritio como indicador ambiental de recarga a través del acuitardo lacustre de Chalco, México*, Tesis de Maestría, DEPEFI, UNAM, México.
- Chavez R.E.; Flores E.L., 1989, *Interpretation of gravity data from the Xochimilco-Chalco Basin, Mexico (preliminary results)* Revista Geofísica 30 p. 125-135.
- Chávez, R. E., Campos, J. O., Gómez-Cabrera, P.T., Delgado, O. y Urrutia-Fucugauchi, J., 1994, *Gravity and MT studies over the Xochimilco-Chalco sub-basins, México*, Society of Exploration Geophysicists, Annual Meeting Proceedings.
- Chouteau, Michel; Krivochieva, Stefka; Rodriguez, R., Tomás Gonzalez; T. Jouanne, Virginie, 1994, *Study of the Santa Catarina aquifer system (Mexico Basin) using magnetotelluric soundings*, Geophysics and environment Journal of Applied Geophysics 31, no. 1-4 (19940215): 85-106.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 1991, Boletín 10 de Mecánica de suelos, México.
- Coch, Nicolas K., 1995, *Geohazards, Natural and Human*. Prentice Hall, USA, p 481.
- Corwin, E.J., et al 1991. *Earth fissures urbanization and litigation: A case study from the Temecula area, southwestern Riverside Country, California*, Proc. Of the Fourth Int. Symp. On Land subsidence, Houston, Texas, U.S.A., IAHS, Publ. No.200, pp. 291-299.
- De Cserna, Z., De al Fuente, D.M., Palacios, N.M., Triay, L. Mitre, S.M. y Mota, P.R., 1988. *Estructura geológica, gravimétrica, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Vol. 104, 71 p.
- DDF, 1987, Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, 1987, publicado en el diario oficial del 3 de julio, tomo CDVI, No. 3, México, DF.

- Delgado-Rodríguez, O., (1995), *Estudios geofísicos en la subcuenca de Chalco, algunas consideraciones sobre la tectónica de la porción norte del sector central del sistema volcánico Trans-Mexicano*. Tesis de maestría en exploración geofísica, Instituto de Geofísica, UNAM, México
- Díaz, M., 2001, Determinación de zonas de riesgo geológico- ambiental en la cuenca de México mediante sensores remotos y radar de penetración somera. Tesis de Licenciatura en la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Durazo, J. and Farvolden, R.N., 1989, "The groundwater regime of the Valley of México from historic evidence and field observations", *Journal of Hydrology*, Vol. 112, pp. 171-190.
- Escobar, X., 2004. *Agrietamiento en sedimentos lacustres ubicados en zonas cercanas a la Sierra de Guadalupe, localizada al Norte del área conurbada del Distrito Federal y Estado de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, 132p.
- Feth, J.H., 1951, *Structural reconnaissance of the Red Rock quadrangle, Arizona*, open file report, 332pp., U.S. Geol. Surv., Tucson, Ariz.
- Figuerola-Vega, G., 1987. *Structural stability problems of wells and aquifers. Workshop on Leaky Aquifers Mechanics*, Conference Proceedings: México City, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, p53-61.
- Figuerola-Vega, G., 1989, *Mecanismos de producción de grietas inducidos por la explotación del agua subterránea*. Academia Mexicana de Ingeniería, Alternativas tecnológicas 29, pp. 371-378.
- Figuerola-Vega, G., 1990, *Grietas por sobreexplotación y hundimientos durante los sismos*. El subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo, SMMS, México.
- Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, 2005, Normas Técnicas complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, Art. 120 Cap VIII Título sexto del reglamento.
- Garduño, V. H; Arreygue, E; Israde, Y; Álvarez-Bejar, R; Ibañez, D; Miranda, G. y Uribe, R. 1997, *Las fallas geológicas y sísmicas de la región de Morelia-Cuitzeo, Michoacán, México, II Convención sobre la evolución geológica de México y recursos asociados, Pachuca, Hgo., México*.
- Garza, V.G., 2006, *Macroeconomía de la Ciudad de México. Urban Age México City Conference, México D.F.*
- Gibson David, Andrew Fitzpatrick & Heike Apps, 2005. *Using a lidar DEM, radiometrics and magnetics to map basaltic regolith in the Lake Corangamite catchment, Victoria, Regolith – Ten Years of CRC LEME*, pp 112-116
- Gobierno del Estado de México, 2005, "Declaratoria de Parque Estatal Santuario del Agua Lagunas de Xico", *Gaceta del Gobierno del Estado* No. 119, Jueves 27 de Enero de 2005.
- Gomez-Gonzalez, J. M.; Calderon-Macias, C.; Romero-Jimenez, E.; Chavez-Perez, S.; Ramos-Martinez, J., 1993, *Surface wave imaging of shallow seismic refraction data in the Xochimilco-Chalco region, Mexico City Basin*, Seismological Society of America, 88th annual meeting Seismological Research Letters 64, no. 1.
- González-Moran, T., 1992, *Estudio Hidrogeofísico de la subcuenca de Chalco; evaluación de impacto ambiental del basurero de Santa Catarina*, Tesis Doctoral, Instituto de Geofísica, UNAM, México.
- Gwaze, P., Dahlin, T., Owen, R., Gwavava, O. And Danielsen, J., 2000. *Geophysical investigations of the Karoo aquifer at Nyamandhlovu, Zimbabwe*. Proceedings EEGS 00, Bochum, Germany, 3-7 September, HY04.
- Hiriart, F., Marsal, R. J., Cruickshank, G. y Key, F., 1951, *Contribución de la Comisión Federal de Electricidad a la solución del problema de abastecimiento de agua a la Ciudad de México*.
- Hiriart, F., Marsal, R.J., 1969, en *El Hundimiento de la Ciudad de México, Proyecto Texcoco*, Volumen Nabor Carrillo, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, Ciudad de México, pp. 109-147.

- Holzer, T.L. y Davis, S.N., 1976, *Earth fissures associated with water-table declines*, Geol. Soc. America, Abs. With Programs, V.8, No.6, pp. 9223-924.
- Holzer, T.L. and Pampeyan, E.H., 1981, *Earth fissures and localized differential subsidence*, Water Resources Research, v. 17, pp. 223-227.
- Holzer, T. L., 1984, *Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment*, Geological society of America. Reviews in Engineering Geology. V.VI, pp. 67-105.
- Huizar, A. R., 1989, *Contribution a l'étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Chalco-Amecameca et de son bassin versant (Mexique)*. Diplome de docteur de l'Université de Besançon, Francia, 160pp.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y el Instituto de Ecología (INEGI-INE), 2000, *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*, 5 de Junio de 2000.
- Jachens, R.C. y Holzer, T.L., 1982, *Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona*, Geological Society of America Bulletin, v. 93, pp. 998-1012, 13 figs, 1 table.
- Jaime, A., 1988, *Geotecnia y sismicidad en el Valle de México*, Series del Instituto de Ingeniería, No. D-29, UNAM, México.
- Juárez, B.E. y Figueroa, V.G.E., 1984, *Stresses and displacements in an aquifer due to seepage forces (one dimensional case)*, Jour. Of Hydrology. V.73, pp. 259-288.
- Juárez-Badillo, E., 1969, *Mecanismo de las grietas de tensión en el valle de México*: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de doctorado, 220 p.
- Juárez-Badillo, E., 1975, *Constitutive relationships for soils, en Symposium on recent developments in the analysis of soil behaviour and their application to geotechnical structures: Kensington, Australia*, University of New South Wales, 231-257.
- Juárez-Luna, G., Rangel, N.J.L., Ayala, M.A.G. y Romo, O.M.P., 2002. *Modelo de fracturamiento de las arcillas del Valle de México*. XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos A.C. p183-192.
- Katz, A.J. y Thompson, A.H., 1985, *Fractal Sandstones pores: Implication for conductivity and pore formation*. Phys. Rev. Lett. 54:1325-1328
- Kreitler, Ch. W., 1976, *Faulting and Land subsidence from ground water and hydrocarbon production, Houston-Galveston, Texas, U.S.A.*, Proc. Of the Second Int. Symp. Anaheim, California, IAHS-AISH Publ. No. 121 pp.435.
- Krivochieva, S. y Chouteau, M., 2001, *Improvement in 1D TDEM interpretation by simultaneous inversion of data from two loop configurations*, Journal of Environmental & Engineering Geophysics 6, no. 1, 19-32.
- Krivochieva, S. and Chouteau, M., 2002, *Integrating TDEM and MT methods for characterization and delineation of the Santa Catarina aquifer (Chalco sub-basin, Mexico)*, Journal of Applied Geophysics 52, p.23-43.
- Larson, M.K., 1984, *Potential for subsidence fissuring in the Phoenix Arizona USA area*, Proc. Of the Third Int. Symp. On land subsidence, Venice, Italy, IAHS Publ. No. 151, pp. 291-299.
- Leal, B.R., 1997, *Sorción de metales traza y compuestos orgánicos por las arcillas en las proximidades de la Ciudad de México*, Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, México.
- Lee, K.C. y Shen, C.K., 1969, *Horizontal movements related to subsidence soil mechanics and foundation division*, SU2.
- Leonard, R.J., 1929, *An earth fissure in southern Arizona*, Jour Geology, v. 37, No. 8, pp. 765-774.
- Lofgren, B.E., 1972, *Sensitive response of basin deposits to regional stress changes*, Geol. Soc. America, Abs. With Programs, v. 5, No. 7, pp.715-716.
- Lugo H. J., Pérez Vega A., Rojas Salas M., 1991. *Formación de grieta en la margen del antiguo lago al oriente de la Cuenca de México*. Geofísica Internacional, 30 (2): 87-95.
- Lugo-Hubp, J., Pérez-Vega, A. y Rojas-Salas, M., 1991, *Formación de grietas en la margen del antiguo lago al oriente de la Cuenca de México*, Geofísica Internacional, v. 30, No.2, pp. 87-95.

- Lugo, H. J., Ortega, A., Zamorano, O.J.J., Mondragón Y.D.E., Zermeño, O. V. y Salas, G.O., 1996 (Instalaciones de la Secretaría de Seguridad Pública), D.F., Instituto de Geografía, UNAM. *Informe sobre el agrietamiento en la Delegación Iztapalapa (al sur del Barrio de San Lorenzo Tezonco) y límites con la Delegación Tláhuac.*
- Lugo-Hubp, J., 1997, Informe Técnico, Instituto de Geografía, UNAM.
- Mandelbrot, B.B., 1982, *The fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, N.Y. 468.
- Marsal, R. J., y Mazari, M., 1959, *El subsuelo de la Ciudad de México*. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, v.1 y 2.
- Mase, C.W., Cherry, J., McKay, L. y Unger, A., 1990, *Hydrogeology of dessicated fractures clays*, Abstract resents at American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, CA.
- Mazari, M. y MacKay, D., 1993, *Potential for groundwater contamination in Mexico City*, Environ. Sci. Technol., Vol. 27, No.5.
- Melgoza, P.G.A., 1978, *Descripción, evolución y origen de los agrietamientos, El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México*, SMMS, México.
- Molina-Berbeyer, R., 1957, *Hundimiento de la Ciudad de México y su relación con los estudios de mecánica de suelos, geoquímicos, geofísicos y geológicos de las aguas del subsuelo de la Cuenca del Valle de México*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo XX, No.2.
- Murillo, F. R., 1990, *Sobreexplotación del acuífero de la Cuenca del Valle de México: efectos y alternativas*, El subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo, SMMS, México.
- Murillo, F. R., Morales, M. R. y Hernández, R. A., 1991, *Agrietamiento lacustre al oriente de la Ciudad de México*, Agrietamiento de suelos, SMMS, pp. 79-94.
- National Research Council, Academia de la Investigación Científica y Academia Nacional de Ingeniería (NRC-AIC-ANI), 1995, *Mexico City's Water Supply; Improving the Outlook for Sustainability*: Washington DC, National Academic Press, 105 p.
- Nayak, G. K., P. K. Agrawal, Ch. Rama Rao and O. P. Pandey, 2006. *Thickness estimation of Deccan Flood Basalt of the Koyna Area, Maharashtra (India) from inversion of aeromagnetic and gravity data and implications for recurring seismic activity*. CURRENT SCIENCE, VOL. 91, NO. 7, 10 OCTOBER 2006
- Ogura y Soares, 2000, *Procesos y riesgos geológicos*. Editores, Repeto F. y Karez C. Notas del II Curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental, UNESCO, 332 p.
- Ortega-Guerrero, B., 1992, *Paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y paleoecología del Cuaternario tardío en el lago de Chalco, Cuenca de México*, Tesis de Doctorado en Geofísica, Instituto de Geofísica, UNAM, México.
- Ortega, G.M.A. y Farvolden, R.N., 1989, *Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basin of Mexico*, Journal of Hydrology, 110, pp. 271-294.
- Ortega, G.M.A., 1993, *Origin of pore water and salinity in the consolidating Chalco Aquitard, near Mexico City*. PhD Thesis. University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Ortega G.M.A., 1993, *Origin and migration of pore water and salinity in the consolidating Chalco aquitard, near México City*, Ph.D. thesis, University of Waterloo, Ont., Canada, 294 p.
- Ortega, G.M.A., Cherry, J.A. y Rudolph, D.L., 1993, *Large-scale aquitard consolidation near Mexico City*, Ground Water 31 (5): 708-718.
- Ortega, G.M.A., 1996, *Variability of the coefficient of consolidation of the Mexico City clayey sediments on spatial and time scale*, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Paris, pp. 125-135.
- Ortega, G.M.A., Rudolph, D.L. y Cherry, J.A., 1999, *Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: field investigations and predictive modelling*, Water res, 35:3327-3341
- Ortiz-Zamora, D., 1996, *Migración de compuestos inorgánicos derivados de un canal de aguas residuales de origen urbano e industrial a través de arcillas fracturadas hacia el acuífero subyacente, Chalco-Ixtapaluca, México*, Tesis de maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- Ovando-Shelley, E. Y González-Valencia, F., 1990, *El subsuelo de la cuenca del Valle de México y su relación con la Ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo*. Soc. Mex. de Mec. de Suelos, México, 228 pp.

- Pérez-Cruz, G. A., 1988, *Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México*, Tesis de Maestría en Ingeniería, DEPI, UNAM. México, 83pp.
- Pitre, C.V., 1994, *Analysis of induced recharge from a waste water canal through fractures clays in Mexico City*, MSc. Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Poland, J.F. y Davis, G.H., 1969, *Land subsidence due to withdrawal of fluids*, reprinted from Reviews in engineering geology II, The Geological Society of America Inc.
- Rivera, A. y Ledoux, E., 1991, *Non-linear modeling of groundwater flow and total subsidence in the Mexico City aquifer-aquitard system*. Land subsidence proceedings of Fourth International Symposium of Land subsidence, IAHS, No. 200, pp. 45-58.
- Reséndiz, D., y Solana, J., 1969, *La estabilidad a corto plazo de Excavaciones a cielo abierto en la arcilla de la Ciudad de México*. Nabor Carrillo, Comisión impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica, Anuario 47, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, Ciudad de México, pp. 203-227.
- Rodríguez C R., 1987, *Consideraciones preliminares, basadas en resultados geoelectrónicos, sobre la interfase agua mineralizada-agua dulce en el área de Sta. Catarina Yecahuitzol, Distrito Federal, México*, Geofísica Internacional 26, no.4 (1987) p. 573-583.
- Rodríguez-Chávez, F., 2003, *Modelado gravimétrico de la estructura de la Cuenca de México*, Tesis, Facultad de Ingeniería UNAM, México.
- Rudolph, D.L., Cherry, J.A. y Farvolden, R.N., 1991, *Field investigations and solute transport in a lacustrine aquitard near Mexico City*. Water Res., v.27, No. 9, pp. 2187-2201.
- Rudolph, D.L. y Frind, 1991., *Hydraulic response of highly compressible aquitards during consolidation*. Water Resour. Res., 27 (1), pp. 17-28.
- Sahab-Hadad, E., 1992, *Acciones de a Gerencia de Aguas del Valle de México dentro del programa Naciona de Agua Potable y Alcantarillado*. Agua Potable, v. 8.
- Santoyo, V.E., Ovando, S.E., Mooser, F., León, P.E., 2005, *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. TGC.
- SARH-CAVM., 1986, *Nivelación de precisión para determinar la evolución de los hundimientos de la Ciudad y Valle de México*, 8t.
- SARH-CAVM., 1991, *Relación de bancos de nivel de la zona de Santa Catarina*. Tarjetas de control internas 1984-1989, México D.F.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1964, *Investigación Geofísica en la zona Xochimilco-Chalco-Amecameca*, México D.F.
- Servicios Geofísicos, S.A., 1953, *Informe sobre el trabajo gravimétrico efectuado en el Valle de México*, Instituto Nacional de Investigación Científica de México.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. *El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México*, Simposio 10 de marzo 1978.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. *Agrietamiento de suelos*. 1991
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. XVIII Reunión Nacional de Suelos, vol.1. 1996.
- Schuman, H.H. y Poland, J.F., 1969, *Land subsidence, earth fissures and groundwater withdrawal in south-central Arizona, U.S.A.*, land subsidence, proc. Of the Tokyo symposium IASH/AIHS- UNESCO, pp. 295-302.
- Urrutia-Fucugauchi, J.; Chavez, Rene E. 1991, *Gravity modeling of lake basin structure; the lakes of Xochimilco and Chalco*, Mexican southern basin Expanded abstracts with biographies, technical program, 61st annual international SEG meeting.
- Urrutia-Fucugauchi, J.,1995, *Paleomagnetic constraints on spatial/temporal activity in the Santa Catarina-Chalco region, southeastern basin of Mexico*. Geofísica Internacional, Vol. 34, No. 1, pp. 55-66.
- Vargas, C. y Ortega-Guerrero, A., 2004, *Fracture hydraulic conductivity in the Mexico City clayey aquitard: Field piezometer rising-head test*, Hydrogeology Journal vol. 12, No.3, pp.336-344(9).
- Warren, C.J. y Rudolph, D.L., 1997, *Clay minerals in basin of Mexico lacustrine sediments and their influence on ion mobility in groundwater*. J CONTAM HYDROL 27 (3-4): 177-198

Yussim, G.S. y Flores, E.H., 2004, Box Count: Programa para la estimación de la dimensión fractal de fracturas, Simposio La Investigación en la Facultad de Ingeniería, Díaz-Rodríguez *et al.* ed.

Zawadzki, A., 1996, *Investigations regarding the origin and hydrologic activity of a large sediment-filled fissure in fractured lacustrine clay near Mexico City*, MSc, Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.

Zeevaert, L., 1953, *Pore pressure measurements to investigate the main source of surface subsidence in Mexico City*. Proc. III ICOSOMEF, v. II, p. 299, Switzerland.

Zeevaert, L., 1991, *Problemas de diseño de cimentaciones profundas relacionadas con el hundimiento regional, Agrietamiento de suelos*, SMMS, pp. 43-62.