



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA



CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LA GENERACIÓN DE HUNDIMIENTOS
EN SAN ANDRÉS MIXQUIC, D.F.

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA

Rogelio Santacruz Benítez

TUTOR

Dr. Rafael Huizar Álvarez

Ciudad Universitaria

2009



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.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme permitido concluir un ciclo académico.

Quizó el destino, y el propio deseo que nos une a los seres, que llegara este día, puntual como siempre el gran espíritu que todo lo organiza sobre el sendero de la razón.

A mis padres por los sacrificios realizados para la culminación de mi carrera.

A mi madre, con mucho cariño, amor y respeto por todas las enseñanzas abundantes y generosas de la vida, por darme la oportunidad de respirar el ambiente y el espíritu universitario que día a día vivo. *Gracias Mamá Yuli.*

Por esa entrega de amor hacia sus hijos. Como aquel que le ha sido entregado todo, este, no puede hacer más que compartir lo que le ha sido otorgado. Por que con un pequeño trozo de su amplio saber alimenta el espíritu.

A mi padre, por enseñarme los deberes de los hombres, por darme sus aventuras vividas y enseñarme a estar siempre atento en el laberinto del engaño.

A mis hermanos: Nancy (Nana), Raúl (rulas), Johnny (Jon), Carlos (Char), Fredy (Afer) y Eduardo (lalin), por los abrazos cálidos y tibios que me han dado en los momentos más hermosos de mi vida, así como en los más difíciles.

A mi compañera de camino la C.D. Citlalli Jiménez B. por apoyarme en momentos de desaliento y por compartir la aventura del matrimonio.

Este trabajo difícilmente habría podido llevarse a un buen término sin la enseñanza, ayuda, paciencia y tolerancia de una gran cantidad de buenos amigos.

El Dr. Rafael Huizar por la paciencia y enseñanzas, el Dr. Lugo Hubp por las correcciones y sugerencias en el trabajo final, al Dr. José Zamorano por las observaciones realizadas, al M. en C. José Quintero, por el apoyo en tiempo laboral necesario para el termino de este trabajo, a la Mtra. Mary Frances, por las observaciones en beneficio del documento, a los compañeros del Instituto de Geografía por el apoyo técnico en los SIG. Juan R, Hugo, Mayeli, René R., Ana R., Miguel, Moisés, Luis R., Josafat G., y Alberto R.

A las instituciones que me brindaron información técnica para la realización de este trabajo (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Instituto Nacional de Geografía e Informática, al Instituto de Geografía, UNAM, Protección Civil Tláhuac, Dirección de Desarrollo Urbano Tláhuac).

Ustedes me dicen, entonces, que tengo que perecer
como también las flores que cultivé perecerán
¿De mi nombre nada quedará
nadie mi fama recordara?
Pero los jardines que planté, son jóvenes y
crecerán...
Las canciones que canté ¡cantándose seguirán!

HUEXOTZINCATZIN

Príncipe de Texcoco, 1484

Así lo dejó dicho
Tochihutzin,
Así lo dejo dicho
Coyolchiuhqui:
De pronto salimos del
sueño, solo vinimos a
soñar, no es cierto, no
es cierto, que vinimos a
vivir sobre la tierra.
Como yerba en
primavera es nuestro
ser.
Nuestro corazón hace
nacer, germinan flores
de nuestra carne.
Algunos abren sus
corolas, luego se secan.
Así lo dejó dicho
Tochihutzin.

TOCHIHUITZIN COYOLCHIUHQUI

Hijo de Itzcóatl y señor de Teotlaltzinco, 1419

Dedicado a Mi Hijo Yeetzin Tonatiuh, 2009

ÍNDICE TEMÁTICO

	Página
INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	1
Objetivos	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Justificación	3
Hipótesis	4
Marco Histórico	4
Marco Teórico	8
Metodología	25
POBLACIÓN	26
Población en la Delegación de Tláhuac	26
Incremento de las zonas urbanas (zonas irregulares)	29
Características de las zonas irregulares	30
MARCO FÍSICO	33
Delimitación del área de estudio	33
Suelos	34
Vegetación	34
Zonas chinamperas	37

Agricultura	37
Clima	38
Geología	39
Influencia geológica en la afectación del área de estudio	43
HIDROLOGÍA	51
Evolución de la Infraestructura hidráulica a partir de 1960 -1995	51
Aguas superficial. (Río Amécameca, canales)	55
Agua subterránea	55
Abasto de agua en la Delegación Tláhuac	56
Densidad de pozos en la zona de estudio y regiones hidrológicas	57
Región I Tecomitl- Tetelco	59
Región II Teutli- Tulyehualco	59
Región III Mixquic- Santa Catarina	60
Evolución de la extracción de agua subterránea	60
Evolución de los niveles piezométricos	63
ANALISIS DEL HUNDIMIENTO	67
Hundimiento y agrietamiento en San Andrés Mixquic	67
Seguimiento de nivelaciones realizadas por la DGCOH (1986-2005)	67
Zonificación del hundimiento en la zona de estudio	80
Hundimiento Alto	80
Hundimiento Medio	81
Hundimiento Bajo	81

ANÁLISIS CONSTRUCTIVO	84
Distribución de Grietas en San Andrés Mixquic	85
La Falla Perú (DGCOH)	87
Diagnostico de la Falla “Perú”	87
Infraestructura afectada por la Falla “Perú”	88
Zonificación del riesgo por hundimiento y agrietamiento en el pueblo de San Andrés Mixquic	97
Interpretación integral del hundimiento	99
CONCLUSIONES	103
BIBLIOGRAFÍA	106
GLOSARIO	111

I INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El hundimiento y el agrietamiento del terreno es un tema muy documentado por diversos especialistas, las causas y consecuencias que esto genera a la población tiene diferentes magnitudes, en algunas ocasiones muy visibles y en otras apenas perceptibles. Para algunos lugares es un problema temporal, tarde o temprano esta dinámica se hace presente y alarma a las autoridades, pone en riesgo a la población y puede llegar a ocasionar efectos ambientales a los que una sociedad debe de enfrentarse: colapso de techos, bardas y pisos, daños a la infraestructura vial, daños en el sistema hidráulico etc.

Para enfrentar los diferentes problemas ambientales, se deben considerar algunos factores, como el suministro de agua a la Cd. de México que conduce a la sobreextracción de agua subterránea y genera hundimiento del terreno, el incremento del área urbana (que reduce la recarga natural al acuífero), el crecimiento demográfico, la ineficiencia de los sistemas de drenaje (reportes de fugas y contaminación). Son algunos de los problemas que enfrentan los tomadores de decisiones (gobierno) para el beneficio de la sociedad.

El hundimiento del suelo es común en el área comprendida desde Coacalco hasta Chalco, Edo. de México, incluyendo el D.F. Frecuentemente es estudiado por geotecnistas, ingenieros civiles, hidrólogos, edafólogos, matemáticos, etc. Sin embargo, también atañe a la geografía, por lo que encontramos a los profesionistas de esta disciplina que dirigen su atención al análisis de los hundimientos del suelo. Este trabajo está construido con un enfoque *geográfico*, en la explicación e interrelación que existe entre el medio y la sociedad, *en el análisis de las causas y consecuencias que generan los hundimientos* que afectan con mayor fuerza a gran parte de la Ciudad de México y su área conurbada.

La investigación sobre el hundimiento en el pueblo de San Andrés Mixquic ofrece una aproximación en el estudio de riesgos que enfrentan los habitantes de esta región, debido a agentes perturbadores como la sobreextracción de agua de los mantos acuíferos para abastecer a la población. Son entre 500-1000 pozos ubicados en su mayoría en las partes bajas de las delegaciones de Tláhuac, Iztapalapa y Xochimilco. Actualmente la extracción de agua es del orden de los 21 m³/s. que se

inyecta a la red de distribución (DGCOH, 2002). Tal dinámica pone en riesgo a los pobladores de la delegación de Tláhuac y sus colindantes que en su mayoría están asentados sobre una capa de arcillas, la cual sufre una fuerte consolidación, debido a la pérdida de presión hidrostática (presión del agua de pozo) ocasionada por la extracción del agua, dando como resultado agrietamientos y hundimientos en el suelo, que originan una inestabilidad en el suelo, dañando al mismo tiempo a la infraestructura urbana, casas, edificios públicos, tubería de drenaje y red de agua potable etc., que pone en riesgo directo e indirecto a los habitantes del sur de la Ciudad de México.

Este estudio se basa en la fuerte dinámica del suelo que se presenta en gran parte del pueblo de San Andrés Mixquic, principalmente en la parte central del pueblo, donde se originó una fractura, llamada por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH), como “Perú”, que afecta de manera directa a las bardas del panteón, lápidas, carretera y casas cercanas. Esta fractura tiene una longitud aproximada de 500 m; se prolonga en dirección NW afectando a la calle Medellín, justo donde se instala todos los días un tianguis ubicado frente al panteón del pueblo (Figura 52), atraviesa la calle Medellín y sigue con la misma dirección afectando a varias casas que se encuentran a su paso. Esta fractura origina graves daños y accidentes a la población.

Por otra parte, se ha registrado una disminución del nivel freático en las chinampas. A estos problemas ambientales se suma el aumento de la cantidad de habitantes del pueblo, con las nuevas áreas de viviendas que se construyen de forma ilegal, denominadas zonas irregulares (zonas donde esta prohibido construir inmuebles debido al uso de suelo que establece la delegación bajo el marco legal que lo ampara en el Programa delegacional en curso), son cuatro las zonas que existen de este tipo: San Isidro de Loyola, Santa Cruz, El Vado y San Bartolomé. Todos estos factores son la base fundamental en el análisis de los hundimientos del pueblo de San Andrés Mixquic.

Si se toma en consideración que el abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México se realiza principalmente por la extracción de agua subterránea mediante pozos profundos, actualmente el 74% del gasto proviene de fuentes propias y de éste el 94% proviene del acuífero de la ciudad (25.9m³/s), debido a que la extracción es mayor que la recarga, se origina la sobreexplotación. Entre los efectos colaterales que genera está el abatimiento de niveles piezométricos y el hundimiento del suelo, debido a la consolidación de las arcillas, al romperse el equilibrio hidrostático en los materiales que componen el acuífero a causa de la extracción de agua. Este fenómeno presenta mayor magnitud en las zonas donde el espesor de la arcilla es

mayor. Los valores máximos de acumulación de arcilla hacia la zona oriente y sur del Distrito Federal alcanza los 120 metros en Xochimilco, Tláhuac y Chalco. (DGCOH, 1995).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL.

- Determinar las causas y consecuencias del hundimiento y agrietamiento en San Andrés Mixquic.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el contexto histórico, físico y social de la zona de estudio.
- Jerarquizar los factores perjudiciales que dan origen a los hundimientos.
- Revelar en qué grado estas grietas han afectado y continuaran afectando a la población.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El problema de los hundimientos en la delegación de Tláhuac (Mixquic) es de mucho interés, tanto para la población local como para la comunidad científica, ya que se ha venido incrementando desde 1985 de manera lenta pero constante.

Es un problema conocido, pero no todos nos preocupamos. Sin embargo, es necesario aportar conocimiento de cómo es el proceso del hundimiento en el pueblo de San Andrés Mixquic, cómo y de que manera la extracción de agua en los acuíferos de la zona sur del Distrito Federal está afectando al suelo lacustre, de saber a cuánta población e infraestructura afectaría. Y sobre todo poder dar una

aproximación en las recomendaciones de mitigación que se podrían emplear en la zona de estudio.

Las aportaciones de este documento deberán apoyar estudios relacionados con el hundimiento en instituciones como:

- Sistema de Aguas del Valle de México, Instituto de Geografía UNAM, Instituto de Geología UNAM, Protección Civil Tláhuac, Gobierno del Distrito Federal y el Instituto Nacional de Ecología. Con la finalidad en común de conocer, entender y mejorar las condiciones ambientales que prevalecen en la zona de estudio.
- Contribuir como ejemplo de análisis en algunas materias del Colegio de Geografía relacionadas con la conservación de los recursos naturales y el medio ambiente.
- Proporcionar información acreditada, científica, técnica y social, que será de utilidad en beneficio a la población interesada y afectada por los hundimientos que existen en su espacio social

1.4 HIPÓTESIS

La inestabilidad del suelo lacustre en el pueblo de San Andrés Mixquic está en función del material litológico que lo subyace, y la extracción de agua subterránea funciona como un catalizador en el hundimiento y agrietamiento de la zona de estudio.

1.5 MARCO HISTÓRICO

Los habitantes del antiguo lago de Xochimilco y Chalco vivieron de la recolección y de la caza de la fauna lacustre y complementaban su dieta alimenticia con productos agrícolas como el maíz, el chile, el frijol y la calabaza, así como la cacería de conejo, venado y liebre, del lago debieron obtener ranas, larvas, crustáceos, moluscos y renacuajos así como patos y algunas aves que migraban para obtener un mejor clima para empollar.

“La abundancia en recursos naturales que les proporcionaron los lagos de Chalco y Xochimilco a los primeros pobladores de lo que ahora es Mixquic, fue la razón para que siglos después otros pueblos guerreros del norte decidieran peregrinar al sur, buscando establecerse en tierras fértiles. Así fue como el grupo de los cuitlahuacas

junto con otras tribus que vinieron del norte se establecieron en la parte sur del lago de Xochimilco, y sin saberlo participaron al desarrollo histórico-cultural del Valle de Anáhuac, en el Posclásico” (Puente, 1965).

Mixquic.- “los signos que dan la escritura de esta palabra son: un mezquite, árbol de las leguminosas característico por sus espinas y frutos, sobre el signo calli, (Figura 1), casa que expresa generalmente la terminación cal-co; la lectura fonética es Mix- cal –co, por metaplasmo, Mix-qui-c. En el mismo jeroglífico que describió el Sr. Orozco y Berra la palabra consta del signo de mezquite (prosopis dulces) H.B. Árbol que produce la goma del país: en síntesis la palabra Mixquic significa: *en el mezquital o entre mezquites*” (González, 1988).

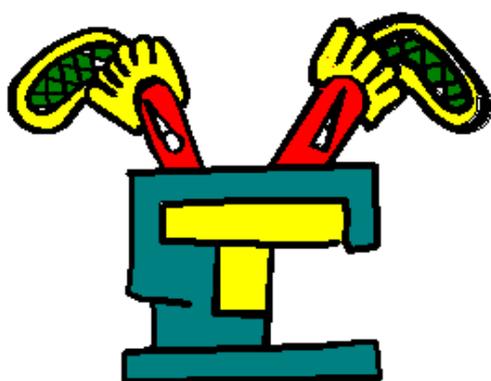


Figura. 1 Glifo de Mixquic

Modificado de (González, 1988)



Figura 2. Principales pueblos lacustres

Tomado de http://www.proyectosalohnogar.com/images/azt-l_textcoco.jpg

Mixquic se fundó en una isleta cerca del antiguo lago de Xochimilco, hacia los años 1160 a 1168 D.C. Los pobladores de este lugar estaban vinculados étnicamente con los Toltecas- Chichimecas manteniendo cierto parentesco con los Chalcos y Cuitlahuacas (Figura 2). Hacia 1403 los aztecas los conquistan, siendo definitivo en 1430 durante el gobierno de Itzcóatl. Después, rinden tributo a Tenochtitlan y se convierte en centro ceremonial para sacrificio de prisioneros (Folleto Informativo Mixquic, 2006).

Los mexicas comenzaron el despliegue de una fuerte organización bélica y por la fuerza de las armas ganaron en un principio las plazas de Xochimilco, Cuauhnáhuacan (Cuernavaca), Mixquic, Chalco y Xaltocan durante la primera mitad del siglo XIV (Manzanilla, 1988).

Después de que Itzcoatl, Netzqualcoyotl y Totoquihuatzin, señores (de la triple Alianza) de Tenochtitlan, Texcoco y Tacuba acabaron con el imperio de Azcapotzalco y sometieron a los pueblos sujetos a los tecpanecas, obligaron a los xochimilcas a construir una calzada ancha que comunicara a Xochimilco con Tenochtitlan. En el lecho lacustre se construyó un terraplén que comunicaba a Tulyehualco, Tecomitl y Mixquic, pasando por Tláhuac y Zapotitlán en la base de la Sierra de Santa Catarina. Además de los beneficios que aportaba la comunicación por tierra, esta calzada tuvo el efecto de dividir las aguas de Xochimilco e incrementar el lago de Chalco, que además de contenerlas evitaba en buena medida las inundaciones de la rivera oeste (Manzanilla, 1988).

Mixquic sufría inundaciones con frecuencia, sin embargo, logró prosperar gracias al sistema de chinampas, la mayoría de las habitaciones y cementseras estaban construidas sobre pisos artificiales hechos con varas y tules arrancados de las orillas de los lagos, de manera que a la vez formaban canales. La fertilidad de estas tierras se incrementaba con el flujo de varios manantiales, tan abundantes en tiempos de lluvias, que para detener sus aguas e impedir que México-Tenochtitlan se inundara hubo que construir un dique en Mexicalzingo, al extremo oriente de Churubusco. En los pocos terrenos útiles se cultivaba maíz, frijol, cebada, calabaza, apio, col, brócoli, cilantro, alfalfa y muchas otras especies de leguminosas (Figura 3) (Legorreta, 1994).

En la época colonial se le llamó a este sitio “el granero de la Ciudad de México” por su gran producción en las chinampas y árboles frutales. Los agustinos en 1533 le dieron el nombre de San Andrés Apóstol (Folleto Informativo Mixquic 2006).

A fines del siglo XVIII la delegación de Tláhuac pertenecía al corregimiento de Chalco y a su vez estaba bajo la jurisdicción de la Ciudad de México. En esa época era frecuente que la calzada de Tláhuac se cubriera por agua, se volvía casi intransitable el único medio directo de comunicación entre la capital y los pobladores que rodeaban los lagos de Xochimilco y Chalco (Legorreta, 1994).

Cerca de Tlaltenco había una compuerta y otra en la entrada de Tulyehualco, que durante la época colonial sirvieron de aduana para controlar el tránsito de las canoas, los vecinos las llamaban “puertas” en el lugar de la primera compuerta hoy queda un arco de piedra de 6 metros (Figura 4) (Legorreta, 1994).

Por otra parte y durante todo el siglo XIX, Tláhuac, Mixquic y demás pueblos enclavados a la orilla del lago, fueron testigos mudos de diversos proyectos. Unos consideraban indispensable desecar los lagos, otros sugerían aprovecharse de ellos con fines de transporte, canalización e irrigación y, para otros, una y otra acción debía combinarse en el desarrollo no planificado de la Ciudad de México. (Legorreta, 1994).



Figura 3. Entrada de San Andrés Mixquic (1945). Muestra el paisaje chinampero.
http://es.wikipedia.org/wiki/Vuelta_a_la_ciudad_lacustre



Figura 4. Arco de prendera en la entrada del pueblo de San Francisco Tlaltenco.

1.6 MARCO TEÓRICO

El tema de las causas de hundimientos en San Andrés Mixquic se resume en 3 puntos principales:

1. Localización de la zona de estudio: rasgos geomorfológicos de la cuenca de México.
2. Principios teóricos sobre los procesos de hundimientos y agrietamientos.
3. Análisis histórica de extracción de agua por medio de pozos en la ciudad de México.

La cuenca de México

La cuenca de México es una altiplanicie rodeada de montañas volcánicas de edad plio-cuaternarias, su altitud varía de 2 240 msnm en el S, a 2 390 al N, y la longitud mínima es de 80 km, de este a oeste. Dicha cuenca es de tipo endorreico (con desagüe artificial actualmente), se encuentra rodeada por elevaciones topográficas como la Sierra Nevada al SW, la Sierra Chichinautzin al sur, la Sierra de Tepoztlán-Tezontlalpan al NW y Pachuca, Chiconautla y Tepozán al N y NE.

De acuerdo con Mooser (1975) la cuenca de México se formó al cerrarse el antiguo valle de México (Cuaternario superior) cuando existía un sistema fluvial que drenaba hacia el sur, como resultado de una intensa actividad volcánica, la cual dio origen a la Sierra Chichinautzin compuesta por rocas andesítico-basálticas la cual cerró el drenaje natural existente, dando paso a la formación de lagos y azolvamiento paulatino 1800 m (Fries, 1960). Los detritos de acarreo fluvial, volcánico y lacustre fueron un relleno que sepultó la topografía original, tal evento determinó las condiciones litológico-estructurales que subyace al suelo de la Ciudad de México.

La zona de estudio se encuentra en la parte suroriental de la cuenca de México, en la delegación de Tláhuac (Figura 21). Está limitada por la Sierra de Santa Catarina al N, el volcán Teutli al SE y el cerro Xico al E.

La planicie donde se encuentra el pueblo de San Andrés Mixquic está constituida por la alternancia de arcilla con materiales de acarreo fluvial y volcánico (Marsal y Mazari, 1959; Zeevaert, 1949; Huizar, 1993; Vázquez Sánchez y Jaimes- Palomera, 1989), Su naturaleza ha sido reconocida en pozos perforados a diferentes profundidades, en donde se aprecia la interdigitación con los flujos de lava de las elevaciones circundantes a la planicie.

El espesor del relleno de la planicie que incluye sedimentos fluviales, lava y piroclastos es de 2,000 m en promedio, está reconocido a través de cinco perforaciones profundas (PEMEX, 1987, en Pérez Cruz, 1998). Los primeros 400 m de la parte superior, por lo general está constituido por arcillas y limos, arenas y derrames de lava en horizontes de espesores variables dispuestos indistintamente.

El proceso del hundimiento

El fenómeno de los hundimientos es parte del proceso que ha tenido la Ciudad de México en el abastecimiento del vital líquido para una población con una dinámica poblacional acelerada. Los primeros problemas de hundimiento registrados fueron subsecuentes a la solución de perforar más pozos y más profundos para el abastecimiento de la Ciudad de México. En 1925 el problema del hundimiento comenzó a preocupar. El Ing. Roberto Gayol (Director de las Obras de Drenaje), expuso a la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos el problema que se manifestaba y la deformación que se había acumulado en la red de drenaje. El Ing. Gayol demostró que la Ciudad de México se hundía respecto al Lago de Texcoco, y quedo pendiente la respuesta científica y técnica para enfrentar este fenómeno que para entonces era desconocido (SMMS, 1991).

El Dr. Nabor Carrillo explicó el fenómeno del hundimiento en la Ciudad de México (Carrillo, 1947), él establece la relación teórica entre el hundimiento y la consolidación de las arcillas inducidas por la extracción de agua. Consecutivamente más investigadores se sumaron a esta demostración entre ellos: Raúl J. Marsal y Marcos Mazarí (1947- 1952), Leonardo Zeevaert (1953), E. Juárez Badillo (1969), A. Rico Rodríguez (1969), Germán Figueroa Vega (1978), Carlos Melgoza (1978).

G. Marín (1978), J. Trujillo Candelaria (1985) entre otros, aportaron sus investigaciones científicas para entender y dar una solución clara y precisa al fenómeno de los hundimientos, que sin duda pone en un grave riesgo a la Ciudad de México (SMMS, 1991).

De acuerdo con Juárez Badillo que dice: “como consecuencia de la extracción del agua, se abaten las presiones hidrostáticas en la masa de arcilla y aparecen en la parte superior del estrato arcilloso esfuerzos de tensión en el agua, que correspondientemente generan compresiones, en las tres direcciones X, Y, Z, en la estructura sólida del suelo. Cuando la lluvia llega a formar una delgada lámina de agua sobre el estrato, las tensiones del agua se disipan y, por lo tanto, también las correspondientes compresiones en la fase sólida disminuyen en su parte proporcional; de hecho pueden llegar a convertirse en tensiones bajo circunstancias especiales previas de esfuerzos” (Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez Alonso, 1969).

Con las investigaciones del Dr. Carrillo (1968), las autoridades decretan la veda en apertura de pozos. Esta medida ayudo a disminuir los efectos provocados por la extracción del agua, sin embargo, los problemas aún no estaban resueltos ya que la Ciudad siguió creciendo y debido a la fuerte presión en el suministro de agua que demandaban los habitantes, en 1973 las autoridades tomaron la decisión de perforar más pozos y más profundos para subsanar el déficit. Esta decisión hoy es evidente, zonas que antes tenían poco hundimiento, actualmente es muy rápido; el centro histórico, tradicionalmente la zona más afectada. El hundimiento ha evolucionado en importancia y el fenómeno de agrietamiento del terreno que antes se pensaba que solo ocurría en el vaso de Texcoco, ahora se presenta en las zonas de transición abrupta y muy recientemente la zona Sur del Distrito Federal, a partir de las recientes decisiones de perforar pozos profundos en la parte Sur del Distrito Federal: Tláhuac, Xochimilco, Coyoacán e Iztapalapa (SMMS, 1991).

Bajo esta premisa encontramos algunos problemas urbanos que se han manifestado en la Ciudad de México, en la parte central de la Ciudad de México, específicamente la Catedral Metropolitana, que se ha hundido 12.5 metros desde su construcción iniciada a fines del siglo XVI, de ellos, 7.5 han sido en este siglo. Los estudios coinciden en que la Ciudad ha sufrido en las partes más críticas, hundimientos de entre 8 y 10 m en los últimos 100 años, es decir, casi un metro cada 10 años (Legorreta, 1994).

Hace un siglo la ciudad se encontraba dos metros arriba del nivel del Lago de Texcoco a donde confluían entonces los primeros drenajes; asimismo, cinco metros por encima del Gran Canal del Desagüe. La extracción de agua del subsuelo ha provocado durante el presente siglo que el nivel de la capital haya descendido tanto, que ahora se encuentre debajo del drenaje. Hoy el Zócalo capitalino está siete m por debajo de la parte más alta del Gran Canal. Debido a la extracción de agua, se hunde toda la zona que fuera lacustre, pues ello depende de la localización y la potencia de las plantas de bombeo (TASA, 1995).

Otro efecto es la pérdida de pendiente del Gran Canal del Desagüe (Figura 5) Los 16.2 centímetros por kilómetro que tenía en 1900 se redujeron a 11.7 en 1951 y a cero en algunas partes a partir de 1993 (DGCOH, 1995).

Los hundimientos diferenciales en el Centro Histórico han provocado fracturas en las estructuras del Palacio Nacional, la Catedral Metropolitana, el Arzobispado, el antiguo Ayuntamiento y las oficinas del Departamento del Distrito Federal, entre otros. Los últimos sistemas utilizados para aminorar los daños sólo buscan nivelar el hundimiento, sin disminuir su ritmo. Edificios con cimentaciones hasta las partes más duras del subsuelo han emergido. Es el caso del Ángel de la Independencia. Otro resultado son los agrietamientos del suelo: en 1985 el sismo causo una abertura en la zona lacustre de San Gregorio Atlapulco, Xochimilco, muy cercana a los canales

chinamperos. En los últimos cinco años, agrietamientos y oquedades de consecuencias graves se observan en otras zonas de la ciudad; sobresale la ocurrida el 6 de julio de 1996 al lado de Canal Nacional (TASA, 1995).

Cabe señalar las previsiones hechas en 1947 por Nabor Carrillo, acerca de los impactos del hundimiento, se cumplieron durante los siguientes 50 años y no han desaparecido, aunque el hundimiento de la ciudad descendió a un promedio de 7 centímetros por año (SMMS, 1991)

Debido a la inestabilidad en el suelo de México y el mundo, los especialistas en este tema, han realizado conferencias en donde se exponen los más recientes avances en el conocimiento científico que atañe no solo a México, sino a otras partes del mundo.

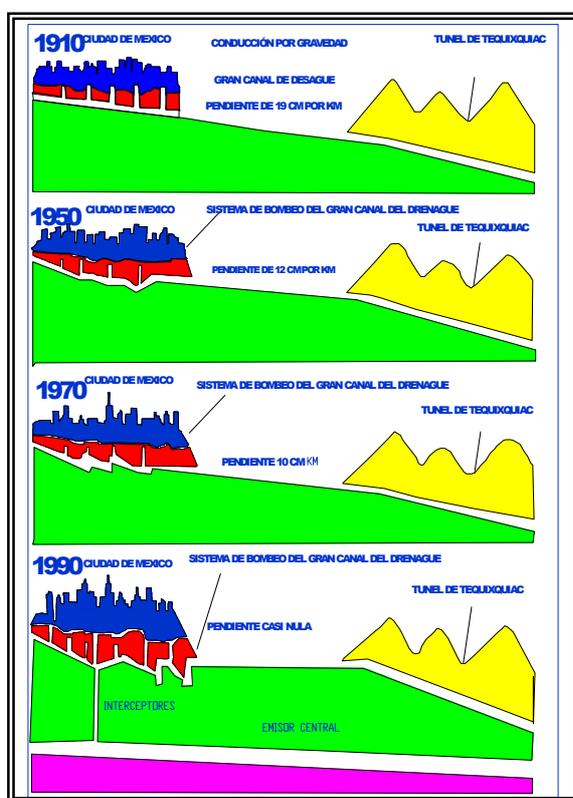


Figura 5. Evolución del hundimiento de la Ciudad de México. Tomado de memorias del drenaje profundo de la ciudad de México (DGCOH, 1995).

En el año de 1969, en Tokio Japón se llevó a cabo el *Primer Simposio Internacional sobre Hundimientos del terreno, (IASH-UNESCO)*, en el cual, investigadores prestigiados (H. H y Poland, J. F., 1969. en SMMS. 1991) expusieron

algunas investigaciones referentes a las grietas registradas en los Estados Unidos, en particular en la zona de Eloy-Picacho y en la región oeste del condado de Pinal, Arizona, ya que estas dos zonas han registrado hundimientos debido a la extracción de agua para riego a gran escala. En esta investigación los autores hacen la cuantificación de daños ocasionados por el fenómeno en carreteras, presas y en el sistema de pozos.

En el mismo simposio investigadores como Leonard (1929), Heindl y Fetch (1955), Pashley (1961), Robinson y Peterson (1962), Winikka (1964) describen una grieta de 4.8 Km que apareció después de una fuerte tormenta, y posteriormente aparecieron muchas más, sensiblemente paralelas a las curvas de nivel del terreno.

Por su parte Lee y Strauss (1969), en SMMS (1991) afirman que “la remoción de los materiales del suelo, sean estos agua, petróleo, o sólidos, ocasionan frecuentemente el hundimiento de la superficie, a menos que se tomen precauciones especiales para evitarlo. Los puntos de la superficie se mueven no sólo hacia abajo, sino también lateralmente.

El Segundo Simposio Internacional del Suelo, (IAHS-UNESCO, 1976), en Anaheim California, Thomas L. Holtzer expone numerosas grietas en los estados de Arizona, California Texas y Nevada. Describe que las grietas se presentan súbitamente y con frecuencia después de fuertes lluvias y termina sugiriendo que la causa de la mayor parte de las grietas puede ser el abatimiento de los niveles piezométricos en el agua subterránea. En el mismo trabajo señala que las grietas se presentan súbitamente y con frecuencia durante fuertes lluvias, que hay evidencia que muchas grietas se originan a profundidad y que se propagan hacia arriba.

Ch W. Kleitler, explica que las grietas existentes en Galveston, Texas, obedecen a un sistema de falla preexistente y que pueden ser por extrapolación de antiguas o por reactivación, y que además pueden funcionar como barreras al flujo subterráneo, induciendo la formación de escalones piezométricos que favorecen los hundimientos.

Marzo de 1978, en México el simposio de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Carlos Melgoza presenta el agrietamiento en la zona de Naucalpan, describe una falla que afectaba algunas de las recién construidas casas habitacionales del fraccionamiento Hacienda de Echegaray y el municipio de Naucalpan de Juárez del Estado de México.

Los trabajos de campo determinaron que todas las casas afectadas así como una serie de daños en las calles y banquetas, se localizaban a lo largo de una línea que cruzaba la hacienda de Echegaray hacia la Av. circunvalación y continuaba con un escalón importante en zonas de cultivos localizadas al oriente de dicha avenida. Se concluyó que el escalón correspondía a la traza de una falla entre dos zonas de rellenos artificiales que se estuvieron consolidando, a una diferencia en las características de comprensibilidad de los suelos localizados a ambos lados de la

calle, acentuada por la extracción del agua del subsuelo, o bien a la posibilidad de una falla geológica activa que se observó al iniciarse la urbanización.

Melgoza (1978), atribuyó el fenómeno a fallas geológicas asociadas a un graben, activadas por el bombeo de agua por el acuífero, o a falla por cortante, asociada a consolidación diferencial del subsuelo.

Moreno (1978), presentó algunos aspectos a los daños al puente Lomas Verdes y reportó una grieta en el cerro de Xico.

Figuroa Vega y Efraín Germán (1978), presentaron fotografías del Alto Lerma donde muestran los impactos causados por el bombeo de agua en 1970 con la operación de nuevos pozos para el abastecimiento del agua a la Ciudad de México.

1984 Venecia, Italia Tercer Simposio Internacional sobre hundimientos del suelo, (IAHS-UNESCO). Larson Michael (1984) describe 7 condiciones favorables para la aparición de una grieta al abatir los niveles del agua subterránea.

Boling J. K, presenta un extensómetro para medir los movimientos relativos en las paredes de las grietas, llegando a la conclusión de que dichos movimientos continúan después de abiertas y dependen del bombeo y de las lluvias que tienden a cerrarse con el tiempo volviéndose a abrir durante fuertes tormentas (1984).

En 1985 la Sociedad de Mecánica de Suelos se reunió en la Ciudad de Celaya, en donde abordaron los problemas de la misma y de Aguascalientes. Candelaria hizo una descripción de la grieta de Celaya, la cual se formó 25 años atrás, y el fenómeno se aceleró para los años 80. Por lo que respecta a la ciudad de Aguascalientes, los hermanos Aranda Gómez informan sobre 10 grietas de la ciudad sensiblemente paralelas al río San Pedro, que tienden a unirse para formar un sistema de tres. La faja hundida en la zona del cauce y los escalones de mayor dimensión corresponden a las más antiguas y son del orden de los 70 cm, con aberturas iniciales de 1 a 2 cm. Pero se erosionan rápidamente y se amplían.

En 1986, en la Ciudad de Toluca se registra la aparición de grietas similares a las de Naucalpan, con asentamientos diferenciales del orden de los 30 cm, debidos a los abatimientos piezométricos de 40 m, que habían tenido los acuíferos locales en los últimos 20 años.

Auvinet y Arias (1990), analizan el agrietamiento en el Valle de México, con base al método Griffith (Jeanger, 1956) para fracturas mecánicas, y se estudia el estado de esfuerzos en el vértice de una grieta y el criterio de propagación basado en el llamado factor de intensidad de esfuerzos críticos para el caso de una grieta preexistente reactivada por la presión del agua de lluvia infiltrada durante un fuerte aguacero.

En el *Cuarto Simposio Internacional de Hundimientos del Suelo*. En Houston, 1991 Berckwith y coautores mostraron el uso bondadoso de fotografías aéreas bajo ángulo solar para la detección de fisuras incipientes.

Heneberg y otros mostraron los resultados obtenidos mediante perfiles sísmicos y gravimétricos a través de dos grietas.

C Cruickshank en 1991 realizó una simulación de hundimiento para el año 2000, utilizando datos de extracción de más de 500 pozos. Registra los mayores hundimientos en la zona oriente de la Ciudad de México, entre 15 y 30 cm anuales, así como la zona de Xochimilco, donde los hundimientos serán del orden de 11 a 18 centímetros anuales. Por lo que respecta al abatimiento del nivel de agua, éstos serán de 1 m en la zona céntrica de la ciudad y de Chapultepec hasta Aeropuerto Internacional, de alrededor de 1.5 m del abatimiento anual entre el Viaducto Miguel Alemán y Av. Río Churubusco. Otras zonas con abatimiento fuerte se localizan al sur de Tláhuac, entre Tulyehualco y San Juan Ixtayopan. Existen problemas al trabajar en conjunto abatimiento y hundimiento. Al calibrar el hundimiento se descalibra abatimiento y viceversa (DGCOH, 1992).

El proceso del agrietamiento

La formación de grietas se explica como el estado de tensión en las arcillas provocando por la extracción de agua subterránea, que contribuye a la ruptura de arcilla (Badillo, 1959).

Existen diversas teorías para predecir, con base en el comportamiento del material en los ensayos de tensión o de compresión simple, las condiciones en que se producirá el agrietamiento bajo cualquier combinación de cargas (Singer, 1980).

Algunas teorías son:

- a) Teoría de Rankine: *la teoría del esfuerzo máximo*, es la más antigua y la más sencilla de todas. Se basa en la hipótesis de que la falla tiene lugar cuando el mayor de los esfuerzos principales alcanza un valor límite, que puede ser el punto de frecuencia determinado en un ensayo de presión simple, o el esfuerzo último si el material es frágil.
- b) Teoría de Saint Venant: *La teoría de tensión máxima*, establece que la falla empieza cuando la deformación principal máxima alcanza el valor necesario para que inicie la fuerza en el ensayo de tensión simple.
- c) Teoría de Griffith: Es conocido que los materiales tienen una resistencia muy inferior a la que cabría esperar de la magnitud de las fuerzas moleculares. Griffith (Jaeger, 1956) explica lo anterior por la presencia de un gran número

de grietas pequeñas (microfisuras). En los vértices de estas fisuras se presenta una elevada concentración de esfuerzos que puede producir el desarrollo de una grieta. La teoría considera que el material contiene un gran número de grietas incipientes, orientadas casualmente, y que las fallas se presentan cuando el esfuerzo local es mayor en la fisura más grande y de orientación más peligrosa alcanza un valor crítico.

De acuerdo con Hellan (1984) existen tres modos básicos de desarrollo del agrietamiento (Figura 6 a, b y c).

Modo I: se presenta una abertura simétrica; el desplazamiento relativo entre las caras correspondientes es perpendicular a la superficie de la fractura; las grietas se generan por tensión, separándose entre sí las caras de las grietas.

Modo II: la separación es asimétrica con desplazamientos tangenciales relativos perpendiculares al frente de la grieta; el agrietamiento se genera por cortante; las caras de la grieta deslizan una sobre otra en dirección perpendicular al vértice.

Modo III: la separación es nuevamente asimétrica, con desplazamientos tangenciales relativos paralelos al frente de la grieta; bajo el efecto de esfuerzos inducidos por torsión, las superficies de las grietas deslizan una sobre otra, en dirección paralela al vértice.

En general, en un cuerpo homogéneo el agrietamiento puede ser descrito por algunos de estos modelos o sus combinaciones. Sin embargo, el crecimiento de las grietas tiene usualmente un lugar en el modelo I.

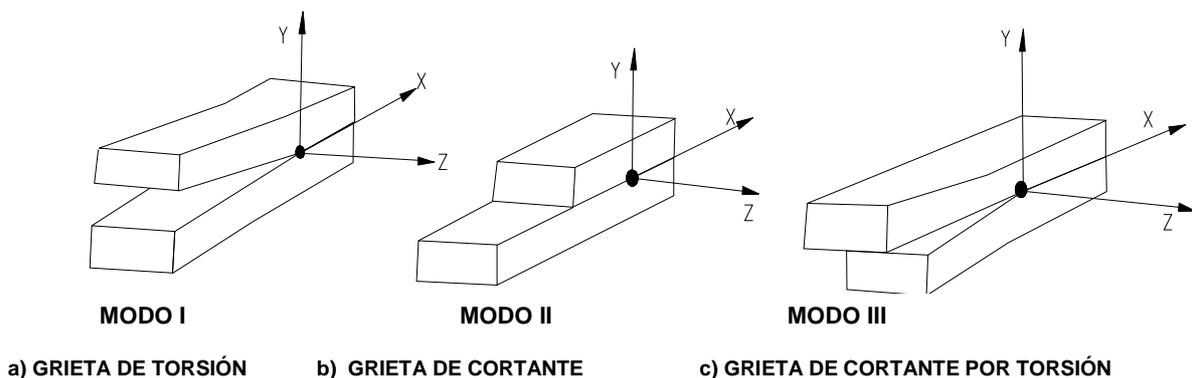


Figura 6. Esquema de tipos de grietas (Hellan, 1984).

Las grietas pueden desarrollarse bajo ciertas condiciones naturales y artificiales del terreno:

1.- Reptación o arrastre (creep); es evidente la existencia de una rampa o plano de desplazamiento que favorece el movimiento que se desencadena por la fluidización del sistema, gracias a los periodos de lluvias y estiaje cada año.

2.- Mecanismos tectónicos; la intensidad del drenado que sufre el suelo debido a la urbanización, evapotranspiración y explotación de los acuíferos y la existencia de una falla crean las condiciones de desecación que favorecen la expresión superficial de ésta.

3.- Por construcciones; es producto o reacción del suelo al tipo de cimentación que sustenta a una gran construcción y su peso, lo que origina el hundimiento o levantamiento.

4.- Condiciones de terreno (chinampas); La urbanización, evapotranspiración y explotación de los acuíferos, son mecanismos que cambian las condiciones hidratadas que tenían los suelos del valle de México. En general, la pérdida de las condiciones hidratadas de un lago o chinampa a la que hay que agregar la infraestructura creciente, extracción del agua subterránea, y procesos aún desconocidos, así como la naturaleza tectónica, sugerido en las planicies (lecho del lago) (Consultores en Geología, 2002).

Otras son de origen geológico; Aparentemente estas estructuras se desarrollan asociadas a la abrupta zona de transición del relieve volcánico con la planicie del Valle, donde se identifican fácilmente, pues allí alcanzan su máxima extensión y desplazamiento.

Hechos históricos del desagüe en Ciudad de México

Las obras hidráulicas tuvieron una gran importancia en el desarrollo de Tenochtitlan, conformada por 5 lagos (Figura 7a) encuentra innumerables problemas a resolver. Ya que durante las lluvias más intensas aumentaban las corrientes que desembocaban en los lagos llegando a formar uno solo. Estos crecían y como estaban a diferentes alturas se vertían uno sobre otro, hasta quedar en ocasiones unidos nuevamente, ocasionando graves problemas como la inundación de terrenos, contaminación de agua salada con agua dulce. Fue necesaria la construcción de albarradones y diques para separar las aguas, el más famoso fue el albarradón de Nezahualcóyotl, que partió el lago de Texcoco y formó el lago de México en torno a Tenochtitlan y Tlatelolco (Manzanilla, 1988).

La grandeza de las civilizaciones prehispánicas estaba fundamentada en el profundo conocimiento del agua. De la indisoluble relación con tan vital elemento

provenía su fortaleza económica, cultural y militar, pues de ella obtenían alimento y protección. La Gran Tenochtitlan fue una Ciudad sobre el agua con avanzadas tecnologías para controlar sus niveles y reciclar sus desechos.

Con la llegada de los europeos, la situación cambió y el manejo adecuado e integral sobre el agua que tenían nuestros antepasados. A partir del siglo XVI, los europeos comenzaron su errónea tarea de desecar la cuenca de México (Figura 7b).



Figura 7.a (1519 -1521) los 5 Antiguos lagos de la Cuenca de México

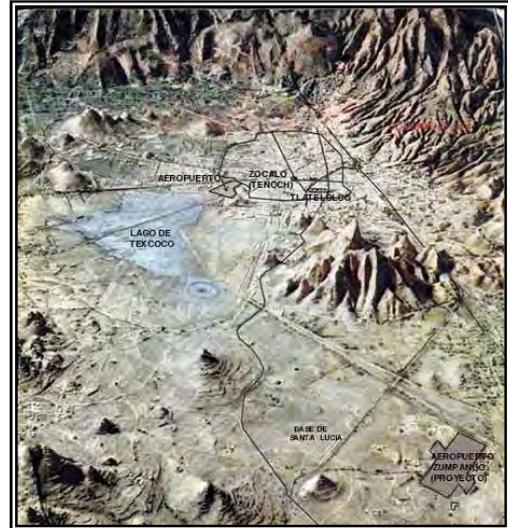


Figura 7.b (1976) desecación de los lagos de la Cuenca de México

La cuenca de México y sus cambios ambientales después de 450 años de historia.

Tomado de: <http://sociedadyagua.wordpress.com/2008/08/04/las-cuencas-lacustres-del-altiplano-central-lagos-del-valle-de-mexico/>

Después de las terribles inundaciones de 1604 y 1607 se aprueba el proyecto del cosmógrafo alemán Enrico Martínez, de desecar los cinco grandes lagos; Chalco, Xochimilco, San Cristóbal-Xaltocan, Zumpango y Texcoco, éste último era el más bajo. Su proyecto original era construir desde éste un gran desagüe artificial para conectarlo al río Tula, y por sus afluentes Moctezuma y Pánuco, conducir el agua hasta el Golfo de México. Las limitaciones de recursos obligaron sólo a construir dicho conducto desde el lago más alto, el de Zumpango, de tal manera que desviando su río principal, el Cuautitlán, se redujera considerablemente el agua en la cuenca y sobre todo aquella que llegaba hasta el lago de Texcoco, en donde se encontraba la ciudad.

La obra se inicia en 1607 y es la más importante de toda América durante la Colonia. En sólo 11 meses, 450 mil indígenas construyeron un túnel de 7 km de largo y 50 m de profundidad; a él se unió un canal abierto, un tajo llamado de Nochistongo por el que se desviaron las aguas del río Cuautitlán. El lago de Zumpango quedó así conectado al mar a través del río Tula y sus afluentes. Con la perforación artificial del túnel llamado Huehuetoca, la cuenca se convirtió en lo que hoy es el valle de México. Pero los propósitos de reducir las áreas lacustres continuaron. Ignacio Castera el arquitecto neoclásico creador del primer plano regulador de la ciudad, construyó en 1794 el Canal de Guadalupe con el fin de incluir las aguas del lago de San Cristóbal-Xaltocan. (Legorreta, 1994).

El emperador Maximiliano, autoriza en 1867 un proyecto presentado por Luis Espinosa, basado en la idea original del siglo XVII de construir un desagüe desde el lago más bajo, el de Texcoco. La obra consistió en un canal abierto de 47 km desde San Lázaro hasta Zumpango: el Gran Canal del Desagüe; de ahí al pie de las montañas, se perforó por segunda vez la cuenca con un túnel de 11 km de largo y 4 m de diámetro. La lumbrera en la parte más elevada de las montañas fue ahora de 100 m de profundidad. Se le conoce como el primer túnel de Tequixquiac, concluido en 1895 e inaugurado en 1900 por el general Porfirio Díaz.

La ciudad creció durante la primera mitad del presente siglo. En 1920 contaba con 46 km² de extensión y 950 mil habitantes. En 1953 eran ya 240 km² y 3.5 millones de habitantes. Tal crecimiento saturó los desagües de la ciudad, obligando a perforar por tercera vez la cuenca; un nuevo túnel, similar al de Tequixquiac, se construyó junto a éste entre 1937 y 1942; con ello quedaban aseguradas las posteriores expansiones de la ciudad (Legorreta, 1994).

En 1951 el Centro Histórico y algunas colonias aledañas se inundaron durante tres meses. El nivel del agua alcanzó dos metros, convirtiendo nuevamente la capital en lago. Los hundimientos y la saturación de los túneles de Tequixquiac para desalojar las aguas residuales, obligaron a construir el cuarto desagüe, llamado el Drenaje Profundo. La obra, todavía en construcción, es en su tipo, la más impactante de América Latina. Se trata de 1,353 kilómetros de túneles subterráneos de 5 metros de diámetro que atraviesan el subsuelo citadino, conducen el agua al emisor central, un túnel de seis y medio metros de diámetro construido a 240 metros de profundidad. Con esta obra concluyen los propósitos de desaguar la cuenca de México mediante las grandes obras de ingeniería.

Como resultado, casi toda el agua de la cuenca, alimentada por 14 grandes ríos y 35 afluentes, fue suprimida. La navegación en lagos y canales paulatinamente se extinguió.

En su lugar se implantaron en diversas épocas los caminos para las carretas, luego para los tranvías y, finalmente, el área la ocupó una ciudad de viaductos, de

periféricos y de ejes viales (Figura 8) todo esto como parte de un proceso de urbanización acelerada (Legorreta, 1994).



Figura 8. Vista de la ciudad de México 1958-2009, se aprecia en esta dos imágenes el procesos de urbanización acelerada de la ciudad de México.

Tomado de: http://farm3.static.flickr.com/2295/2273686057_1bf8284a31.jpg,
http://i91.photobucket.com/albums/k287/paulatreides25/09_ciudad_de_mexico_aerea_1.jpg

La extracción del agua subterránea

La perforación de pozos para el abastecimiento de agua municipal en la Ciudad de México la iniciaron los señores Pane y Molteni en 1847. La razón fue que la ciudad no tenía una red de distribución adecuada para aprovechar los manantiales que había; los pozos, casi siempre artesianos con caudal del orden de 1.5 l/s, fueron una magnífica solución al problema del abastecimiento del agua. Por muchos años se mantuvieron las condiciones artesianas, pero el crecimiento de la ciudad obligó a perforar más pozos, esto propició la desaparición del artesianismo y muchos manantiales se agotaron (SMMS, 1991).

A partir de la segunda mitad del siglo XIX, parte del abastecimiento de agua se resolvió con extracción de agua subterránea, esto provocó los primeros impactos del hundimiento de la ciudad de 5 centímetros por año, registrado entre 1861 y 1895 (SMMS, 1991).

En 1902 se iniciaron estudios para determinar la conveniencia de aprovechar a través de pozos los manantiales de Xochimilco. En 1909 el agua se condujo desde

ahí hasta los tanques ubicados en la Loma de Molino del Rey, a 26 km de distancia. Para ello se construyó un pozo de 9 m de profundidad y se instalaron varias bombas con el fin de introducir el agua hasta un acueducto de concreto para conducirla hasta la estación de bombeo, ubicada en la colonia Condesa. De aquí se elevó a dichos tanques para después distribuirla a la ciudad.

Hasta 1924 el abastecimiento de agua proveniente de las regiones del sur, era de manera intermitente. Hacia 1927 se construyeron más pozos con bombas de mayor capacidad ubicados en los manantiales de San Luís Tlaxialtemalco, resolviendo así la demanda de agua.

Para 1936 nuevamente la población había aumentado en forma considerable hasta rebasar el millón de habitantes. Y surgieron deficiencias en el abastecimiento. Durante ese año se perforaron los primeros 18 pozos profundos, de entre 100 y 200 m, así se inició la extracción intensiva del acuífero (DGCOH, 1995). De 1936 a 1944 se perforaron 93 pozos en el centro y en la periferia. Este incremento de extracción de agua subterránea provocó hundimientos en el centro de la Ciudad de México, a razón de 16 cm/año. El más drástico ocurrió entre 1948 y 1952; fue en 1951 cuando la ciudad se hundió en promedio 46 cm/año (DGCOH, 1995).

El doctor Nabor Carrillo demostró que la Ciudad de México se hundía por la extracción de agua del acuífero, calculada en 7.2 m³/s (Carrillo, 1947). Sus investigaciones fueron determinantes para imponer la veda en el acuífero de la Ciudad de México. *A partir de entonces los nuevos pozos se hicieron en el sur, principalmente en Chalco, Tláhuac y Xochimilco;* los más antiguos fueron reemplazados por otros cuya profundidad fue de 400 m (SMMS, 1991).

Para asegurar el abasto de agua, en 1956 se concluyó el sistema de pozos, Chiconautla que constaba de 41 pozos, ubicados al norte de la ciudad; 40 de ellos con profundidad media de 150 m. En 1964 la población del Distrito Federal fue de 5.8 millones y tenía un abastecimiento de 22.2 m³/s. La política de extraer más agua del subsuelo continuó a pesar de tener el abastecimiento proveniente de Lerma: obtener más agua mediante la extracción del líquido en el Valle, pospuso acciones más enérgicas para tratar de crear una conciencia sobre el uso racional del agua y evitar fugas en las redes de distribución, detectadas desde entonces (SMMS, 1991).

Desde 1964 y hasta 1975 se incrementó la extracción de agua subterránea con la perforación de 50 pozos distribuidos en Xochimilco, Tláhuac, Los Reyes, Ciudad Netzahualcoyotl y en Teoloyucan. De esta forma aumentó el caudal a 9.5 m³/s.

A partir de 1980 se logró, por fin, disminuir relativamente la extracción de agua del subsuelo, gracias al abastecimiento externo de los ríos Lerma y Cutzamala. Sin embargo, la población continuó creciendo, aumentó la demanda de agua. En 1994,

se alcanzó el promedio más elevado de consumo por habitante: 337 litros. En los últimos tres años, los programas de ahorro de agua han disminuido en forma poco significativa dicho promedio. *Hoy se tiene un consumo de 324 litros por habitante al día.* La OMS (2005) ha establecido un mínimo de 80 litros para ciudades en países desarrollados. Un consumo mínimo para evitar problemas de salud lo establece el Banco Mundial en 50. Sin embargo, los promedios no reflejan necesariamente la realidad. Consumos mínimos de agua en la Ciudad de México se registran en algunos asentamientos ilegales alrededor de 28 litros diarios por habitante, mientras que la estimación para las zonas de sectores medios es entre 275 y 410 litros por habitante al día, y en los sectores de máximos ingresos entre 800 y 1,000 (DGCOH, 2002).

Abastecimiento externo de agua para el Distrito Federal

En 1929 se vislumbró la posibilidad de conducir las aguas del Río Lerma y sus manantiales a la Ciudad de México. A fines de 1940 se iniciaron los estudios para determinar esa factibilidad. Dos años después se comenzó la portentosa obra hidráulica, por vez primera en la historia, transferir el agua de una cuenca a otra a través de grandes acueductos de concreto.

El rápido crecimiento de la población durante los años treinta hizo evidente que las fuentes subterráneas no serían suficientes para abastecer la demanda de miles de nuevos habitantes. Si recordamos el hecho geográfico de que la Ciudad de México y su área metropolitana, es vecina de cuatro cuencas hidrográficas, siendo las más cercanas la de Lerma, Cutzamala, Tula y Valle de México (Figura 9). De todas ellas, las dos primeras resultaban más apropiadas para aportar agua a la Ciudad de México. De esta manera la cuenca del río Lerma aporta 6 m³/s (8.6% del total) y la del Cutzamala 14.4 m³/s (21.3% del total). En resumen, se trata de 20.3 m³/s y 30% de todo el abastecimiento (DGCOH, 2002).

En 1951 entraron por primera vez a la Ciudad de México las aguas de la región de Toluca-Lerma cuyas lagunas se encontraban 300 m arriba respecto al nivel de la Ciudad de México. Esto fue posible a través de un tubo de 62 km de largo y 2.5 m de diámetro. El acueducto atravesó la Sierra de Las Cruces por un túnel de 14 km llamado Tarasquillo-Dos Ríos. Se construyó un sistema de distribución y almacenamiento en la segunda sección del bosque de Chapultépec. Ahí, un depósito que canalizó el agua hacia 4 grandes depósitos de 100 m de diámetro y 10 de altura, para ser distribuida por gravedad a la urbe. De esta forma se importan inicialmente 4 m³/s más de agua. Los beneficios por el aumento en el suministro fueron notables (DGCOH, 2000).

A mediados de los años sesenta, la Secretaría de Recursos Hidráulicos y el Departamento del Distrito Federal, inician los estudios para aumentar el caudal del sistema Lerma, el cual se llevo a cabo entre 1965 y 1975 por medio de la construcción de 230 pozos, el área de extracción se extendió hacia la región de Ixtlahuaca y Jocotitlán. Con ello el suministro a la ciudad se elevó a 14 m³/s, sin embargo, por el grave deterioro de la zona debido a la severa explotación de sus mantos acuíferos se ha reducido a 6 m³/s (DGCOH, 2000).

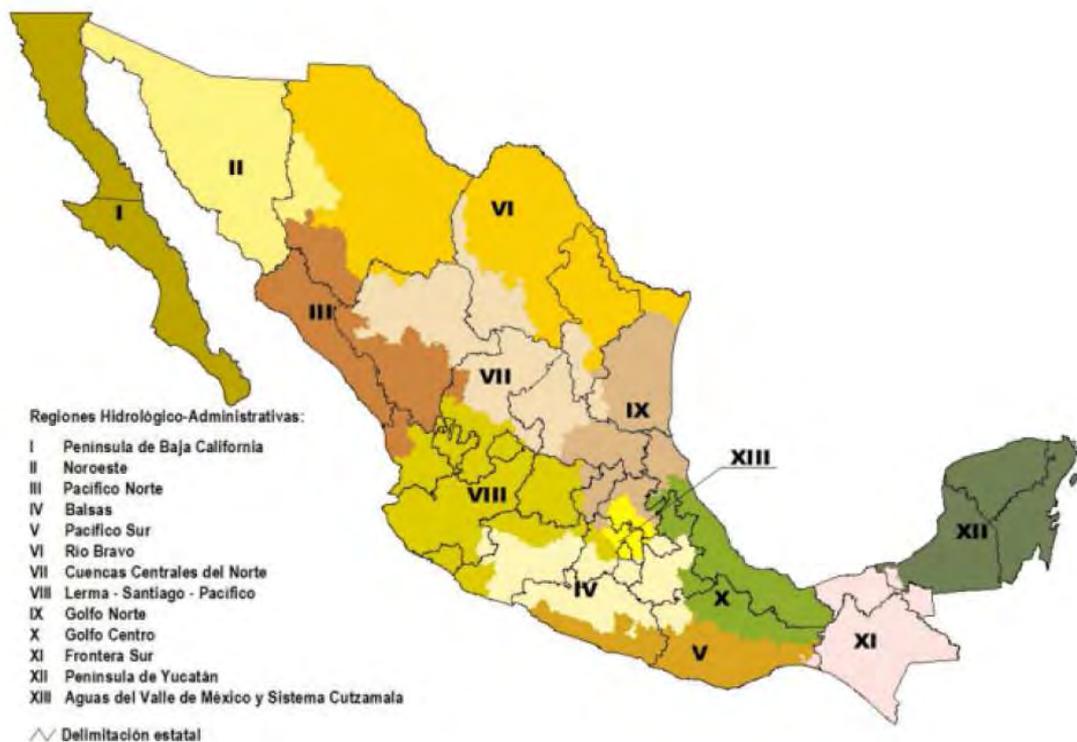


Figura 9. Regiones Hidrológicas Administrativas.

Tomado de: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lec/fernandez_r_r/apendiceB.pdf

Para 1976 la demanda de agua en la Ciudad de México sigue creciendo y la extracción local incrementaba el hundimiento del suelo, asimismo se presentaron muchos problemas regionales por el agua, pues en el valle del río Lerma el descenso del nivel del agua subterránea también era cada vez más profundo. Esto originó buscar otras fuentes de agua y condujo al proyecto Cutzamala (Figura 10).

En 1976 se inicia allí otra de las obras de abastecimiento hidráulico más importantes del país, el aprovechamiento del agua almacenada en 8 presas localizadas en la cuenca alta del río citado, la mayoría empleadas anteriormente para la generación de electricidad (DGCOH, 2002).

El sistema Cutzamala fue planeado en varias etapas. Una de las mayores dificultades que se debía vencer no era tanto la distancia a cubrir para conducir el agua, (alrededor de 130 km), sino que algunas presas se localizaban en cotas muy por abajo de ésta, lo cual implicó una considerable inversión para elevar el líquido por bombeo. La primera etapa de la obra consistió en tomar el agua de la presa Victoria y conducirla por un primer acueducto de 2.5 m de diámetro y 77 km de longitud, atravesando las sierras de Las Cruces, en el poniente de la ciudad. Fue inaugurada en 1982 y reportó inicialmente 4 m³/s (DGCOH, 2002).

Con la edificación de la planta potabilizadora y el acueducto central se crearon las condiciones para aumentar el abastecimiento con el líquido de las presas restantes. Los trabajos correspondientes comprenden la segunda y tercera etapa y concluyen en 1992. Al proyecto Temascaltepec se le conoce como la cuarta etapa del sistema Cutzamala. Se trata del más reciente programa para aumentar los caudales de agua destinada a una urbe que sigue creciendo.

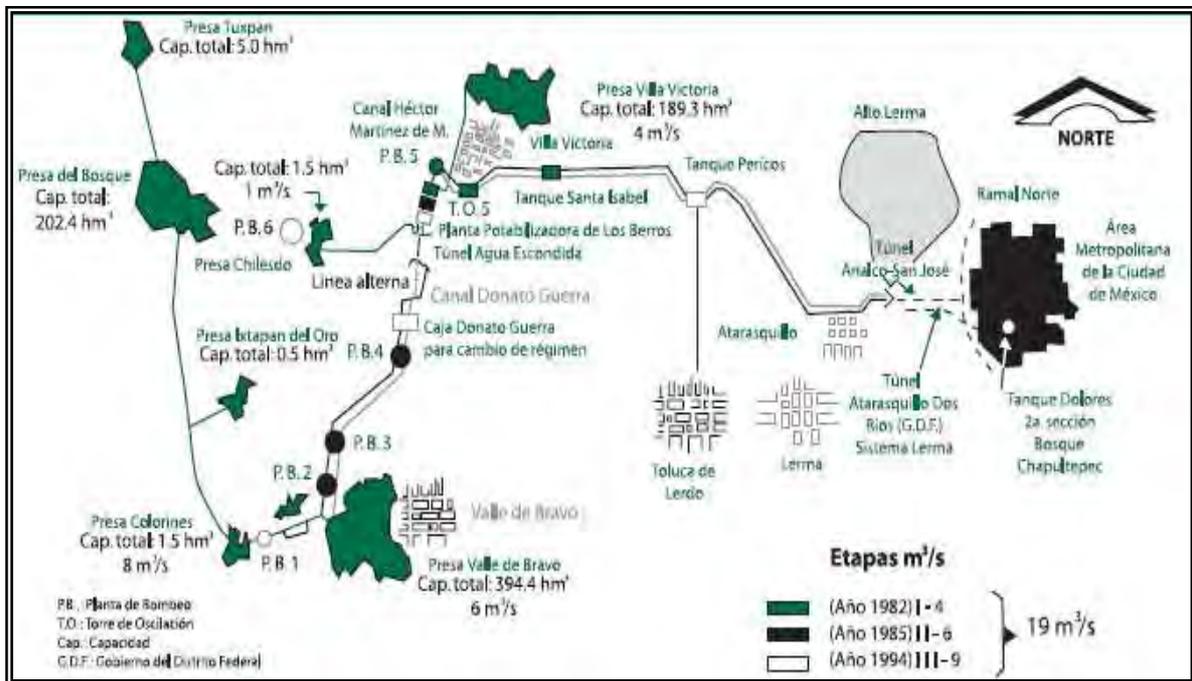


Figura 10. Proyecto Cutzamala. Tomado de <http://www.metropoli.org.mx>

El proyecto es controvertido, como lo han sido todas las grandes obras hidráulicas. Consiste en ampliar en 5 m³/s la capacidad de abastecimiento mediante la derivación de una parte del agua del río Temascaltepec para conducirla hasta la Presa Valle de Bravo. Dicha operación se haría construyendo una presa de 400 hectáreas llamada El Tule, cerca al poblado de Temascaltepec. De ella se conduciría el líquido a través de un túnel, elevándolo aproximadamente 450 m hasta Valle de Bravo (DGCOH, 2002).

Para fines de los años ochenta se hizo impostergable disponer de un sistema más racional de distribución del agua procedente del Cutzamala. Se concretizó con el Macrocircuito y el Acuaférico. Se trata del más reciente sistema de acueductos en la historia hidráulica de la ciudad. El objetivo de ambas obras es lograr una distribución más equitativa del líquido construyendo un circuito perimetral de 120 km. alrededor de la zona metropolitana. Hacia el norte y el oriente (municipios conurbados del Estado de México), se denomina Macrocircuito, y las obras están a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CNA). Hacia la parte sur de la ciudad se denomina Acuaférico y su responsable es el GDF (DGCOH, 2002).

La construcción del Macrocircuito se inició en 1980 y consiste en una tubería de menor dimensión que la del Acuaférico, pues no rebasa un metro de diámetro. Se tiene previsto construir 110 kilómetros desde Huixquilucan hasta el volcán Teutli en Milpa Alta, pasando por Naucaplan, Atizapán, Coacalco y Ecatepec.

Por lo que respecta al Acuaférico, tiene diferencias fundamentales respecto al Macrocircuito. En primer lugar se trata de un acueducto de concreto de 5 metros de diámetro con capacidad de 25 m³/s. Se inició igualmente en 1980 desde el mismo túnel en Huixquilucan, y se extiende en forma subterránea por toda la serranía del Ajusco hasta el Volcán Teutli, en Milpa Alta, cerrando así el circuito perimetral (DGCOH, 2000).

A principios de 1997, se había construido 32 kilómetros hasta el poblado de San Francisco Tlanepantla, en la Delegación Xochimilco; falta el tramo restante, de 10 kilómetros, hasta Milpa Alta. A lo largo del trazo del Acuaférico ya concluido se han edificado enormes depósitos cercanos a los poblados semirurales, con la finalidad de abastecerlos del líquido; destacan San Andrés Totoltepec, el Ajusco y Topilejo. El tramo ahora en construcción dotará igualmente de agua a San Salvador Cuauhtenco, San Pedro Actopan y Milpa Alta (DGCOH, 2000).

1.7 METODOLOGÍA

El estudio se dividió en tres etapas:

1. Recopilación de información.

Se realizó la búsqueda de documentos y revistas de la zona, de estudios realizados por instituciones como INEGI, UNAM, DGCOH actual (SACM) y CAEM.

Se obtuvieron datos que apoyaron al análisis de las causas del hundimiento en san Andrés Mixquic como:

- Información geográfica, geológica y social.
- Evolución histórica de los bancos de nivel (1985-2005).
- Densidad de pozos de extracción (58 pozos).
- Caudal de pozos de extracción de la zona de estudio.
- Cortes litológicos de los pozos.

2. Recorrido de campo.

En esta etapa se realizó un levantamiento topográfico de la zona de estudio para registrar grietas y deformaciones del terreno.

- Se registraron las grietas y se midió la separación de estas.
- Se registraron los daños a la infraestructura urbana.
- Se construyó un perfil topográfico con teodolito.
- Se aplicó una encuesta para saber la percepción del peligro por hundimiento a los habitantes.

3. Análisis e interpretación de la información recopilada

En la etapa final se realizaron los cálculos de extracción de agua, se elaboraron mapas, perfiles, gráficas y modelos en 3D, con los cuales se llegó a determinar cuál es la causa de que ejerce mayor peso en el hundimiento y agrietamiento en San Andrés Mixquic.

II POBLACIÓN

2.1 POBLACIÓN EN LA DELEGACIÓN TLÁHUAC

La delegación Tláhuac ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos tiempos, aumentando de 64,419 habitantes en el año de 1970 a 302 483 habitantes para el año 2000. Su crecimiento con respecto al Distrito Federal pasó de 0.19% a 3.52% del total de la entidad federativa. Se puede mencionar que la población se triplicó en 30 años (Figura 11).

El poblado con mayor índice de crecimiento es Zapotitlán con 56 mil habitantes, estas cifras son alarmantes si se compara el crecimiento del pueblo de San Andrés Mixquic o San Nicolás Tetelco que no rebasa los 12 mil habitantes. El pueblo de Zapotitlán presenta un 100% de área urbana mientras que estas dos últimas comunidades presentan un 60% de área agrícola.

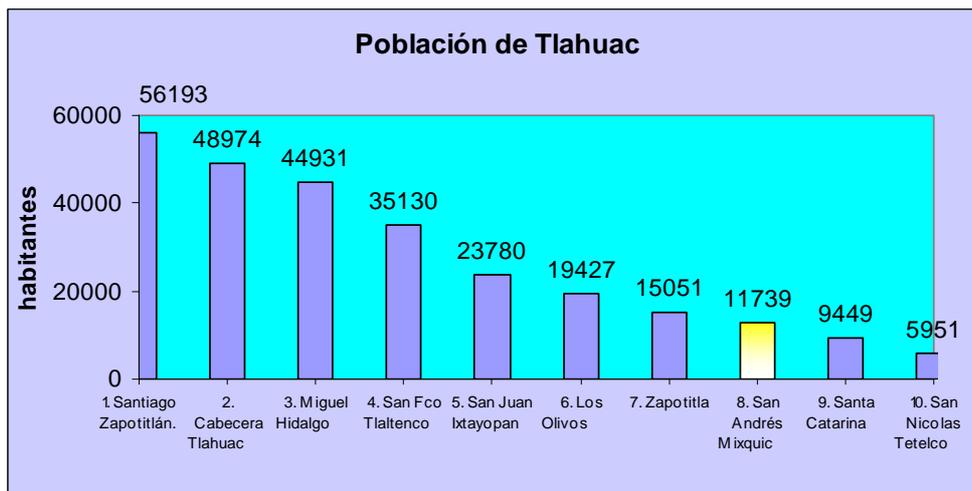


Figura 11. Población en la Delegación Tláhuac. Adaptado del censo de población y vivienda INEGI, 2000

En el año 2005 la población del pueblo de San Andrés Mixquic, fue de 12,525 habitantes, de los cuales 6,142 (48.97%) son del sexo masculino y 6,383 (51.03%) son del sexo femenina (Figura 12) y ocupan un total de 2,218 casas de las cuales 2213 son propias, en promedio 5.3 habitantes por casa. Los materiales ocupados para la construcción varían en concreto y otros materiales diferentes a la tierra en un 98% (INEGI, 2005).

Actualmente la población de San Andrés Mixquic tiene un ritmo de crecimiento acelerado 2.6% si comparamos la tendencia que tenía en 1920-30 y creció su población en 10 años 300 personas, para 1940-50 800 personas y para 1990-95 1000 personas en tan solo 5 años, este crecimiento se ve reflejado a ultimas fechas, ya que para el periodo del 2000-2005 tiene un incremento de 800 habitantes.

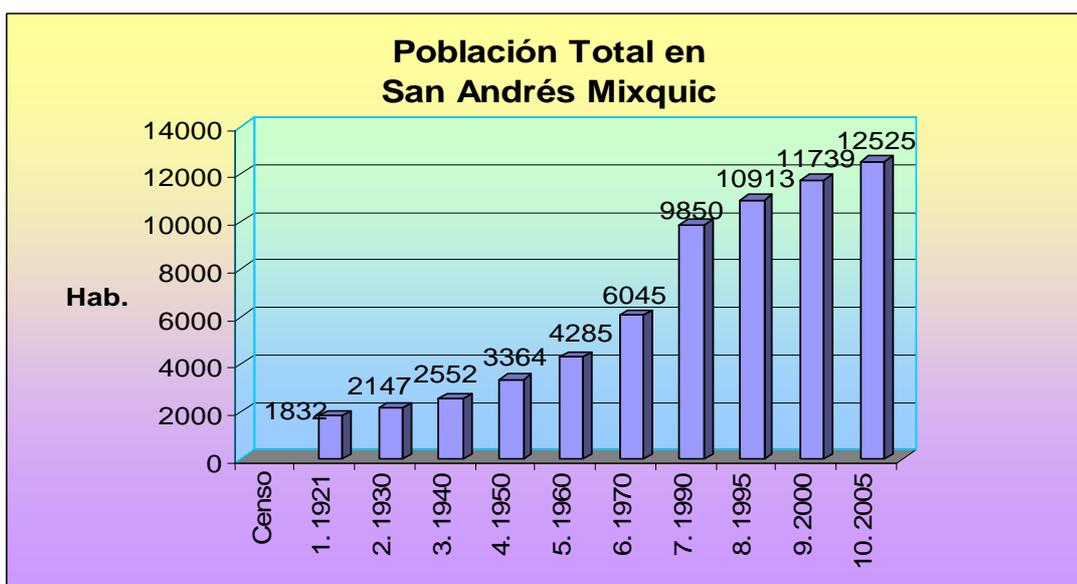


Figura 12. Crecimiento poblacional en San Andrés Mixquic (INEGI, 2005).

A partir de 1970 la población en San Andrés Mixquic presenta un crecimiento considerable, pasa de 6 045 a 12 525 en 35 años.

La Figura 13 muestra la distribución poblacional en los 5 barrios de San Andrés Mixquic, el barrio de San Bartolomé en donde habita el 36% del total, en el barrio de San Miguel un 26% (no se incluye los asentamientos irregulares) y el tercer barrio es San Agustín que presenta un 20% del total.

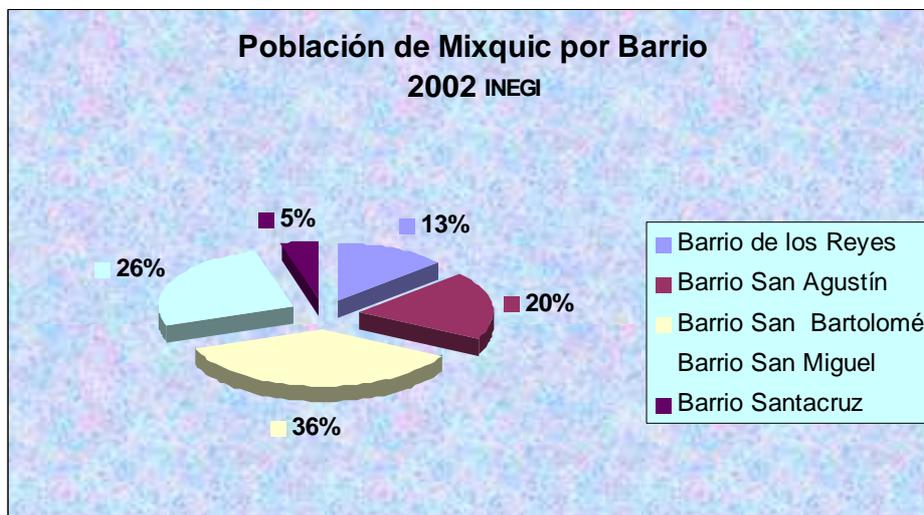


Figura 13. Población por Barrio en San Andrés Mixquic para el año 2000. Adaptado de INEGI, 2005. la población en San Andrés Mixquic se agrupa con mayor fuerza en los barrios de San Miguel, San Bartolomé y San Agustín con un 36 , 26 y 20% respectivamente , mientras que los barrios de menor concentración son Santa Cruz y los reyes.

Los recientes asentamientos de población presentan una tendencia hacia la periferia del pueblo de San Andrés Mixquic, tal es el caso de El vado, El Sapo, San Ignacio y Santa Cruz, estas nuevas colonias en su mayoría son ocupadas por inmigrantes, la mayor incidencia es de la delegación Iztapalapa (Citlalli Jiménez comunicación verbal, 2006).

El incremento poblacional en el pueblo de san Andrés Mixquic se puede apreciar de manera visual si observamos la Figura 14 en la cual, se representa el mapa de densidad de población; En 1977 con puntos pequeños y grandes para 1997, los polígonos representan el área urbana, para 1977, polígono amarillo y de rojo para 1997.

En 20 años el área urbana ha crecido al doble, para el caso de las casas aisladas representadas con punto rojos tienen una distribución hacia los cuatro puntos cardinales, de tal manera que pareciera que se está uniendo la urbanización con los pueblos vecinos respectivamente.

La distribución de la población es central, y al menos 30 casas se encuentran en la periferia, el crecimiento es hacia la parte oriental, sobre la calzada Mixquic-Chalco.

La zona urbana es modificada y la densidad poblacional se expande hacia la periferia abarcando las zonas con uso agrícola, estos asentamientos en su mayoría son considerados como irregulares.

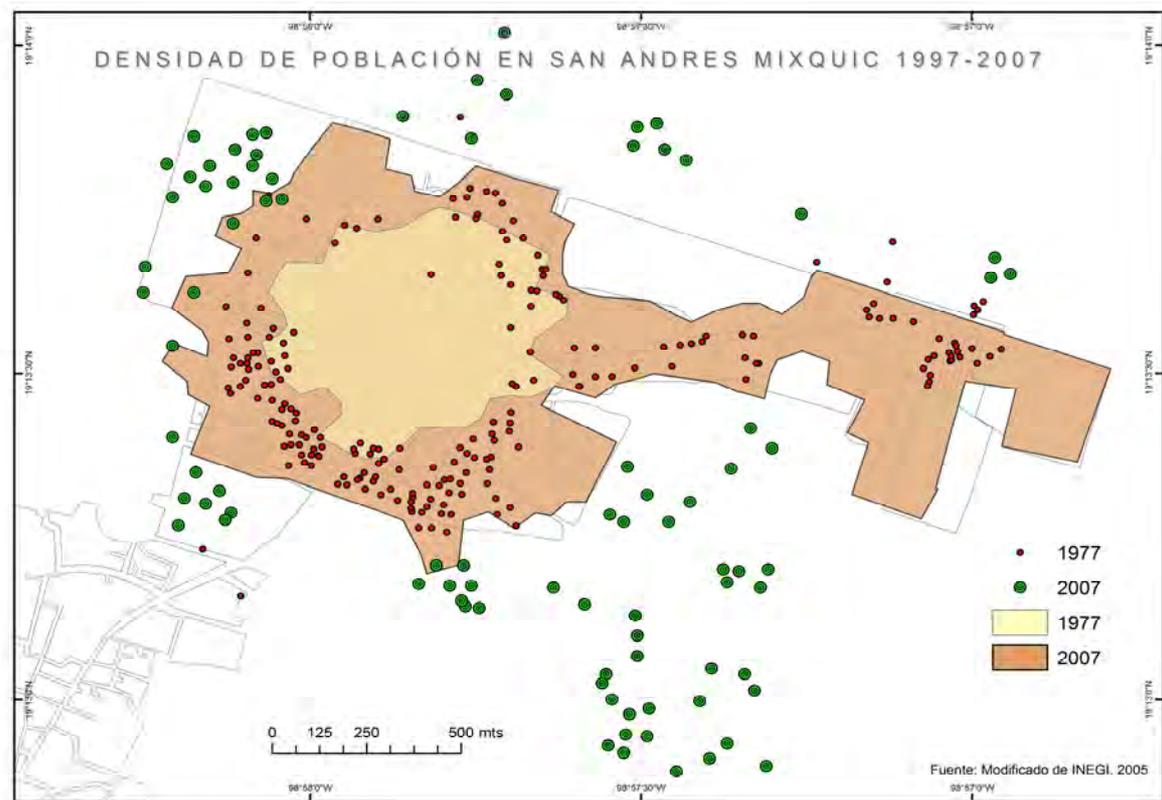


Figura 14. Evolución urbana en el pueblo de San Andrés Mixquic (1977-1997) Adaptado de INEGI, 1977-97. La creciente demanda de zonas habitables se hace evidente al interpolar dos imágenes de la misma zona, en el cual se aprecia el crecimiento urbano que ha tenido la zona de estudio.

En la figura 14 se observa el ritmo de crecimiento que tiene el pueblo de San Andrés Mixquic, ya que para 1970 Mixquic contaba con 6,045 habitantes y en un lapso de 35 años suman 12,525, un poco más del doble para el 2005.

2.2 INCREMENTO DE LA ZONAS URBANAS (ZONAS IRREGULARES)

En la delegación Tláhuac, se han registrado 30 asentamientos irregulares que pretenden establecerse de manera oficial, se estiman 2,075 viviendas en un área de 156.7 has, de las cuales 344 se ubican en suelo de conservación (Programa Delegacional Tláhuac, 1995) Algunos de estos asentamientos se localizan en zonas no aptas para el crecimiento urbano como la Sierra de Santa Catarina y en el entorno a los poblados rurales, Mixquic, en donde existen cuatro zonas.

El Programa General de Ordenamiento Ecológico dice que estas zonas irregulares se encuentran localizadas dentro del suelo de conservación ecológica del Distrito Federal, en las cuales existen asentamientos humanos irregulares y construcciones ilícitas en contravención de los mencionados programas así como de las Leyes Ambiental y de Desarrollo Urbano.

En esta delegación se contemplan las alternativas para poder dar solución a los asentamientos irregulares dentro del pueblo de San Andrés Mixquic; es por eso que realiza estudios de la posible incorporación de los asentamientos irregulares dentro de este programa, la delegación considera las principales zonas como Santa Cruz, San Bartolomé, Axolocalco en el Barrio de la Santa cruz, Alhelí, El Vado en San Agustín, y San Ignacio de Loyola en San Miguel, el Sapo, y la Habana (Figura 15).

El pueblo de San Andrés Mixquic tiene una densidad de 112 hab/ha; y debido a las circunstancias de crecimiento que prevalecen en la zona, la mancha urbana se está expandiendo hacia la periferia del pueblo, ocupando las zonas chinamperas y de conservación ecológica. De esta manera ha generado graves problemas tanto ambientales como sociales.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS IRREGULARES

Las características de las zonas irregulares se describen a partir de recorridos del pueblo de San Andrés Mixquic (Figura 16).

En la zona de San Ignacio de Loyola, localizado en la parte sur del barrio de San Miguel, ubicado al sureste de Mixquic, el agua potable es conducida mediante mangueras de plástico de aproximadamente una pulgada de diámetro; en el lado suroeste se pueden observar construcciones de casas habitación de uno y dos niveles, en ambos lados del canal, existen parcelas de cultivo en las que destaca el cultivo de brócoli. Carecen de drenaje, la energía eléctrica la tienen de manera clandestina e insuficiente.

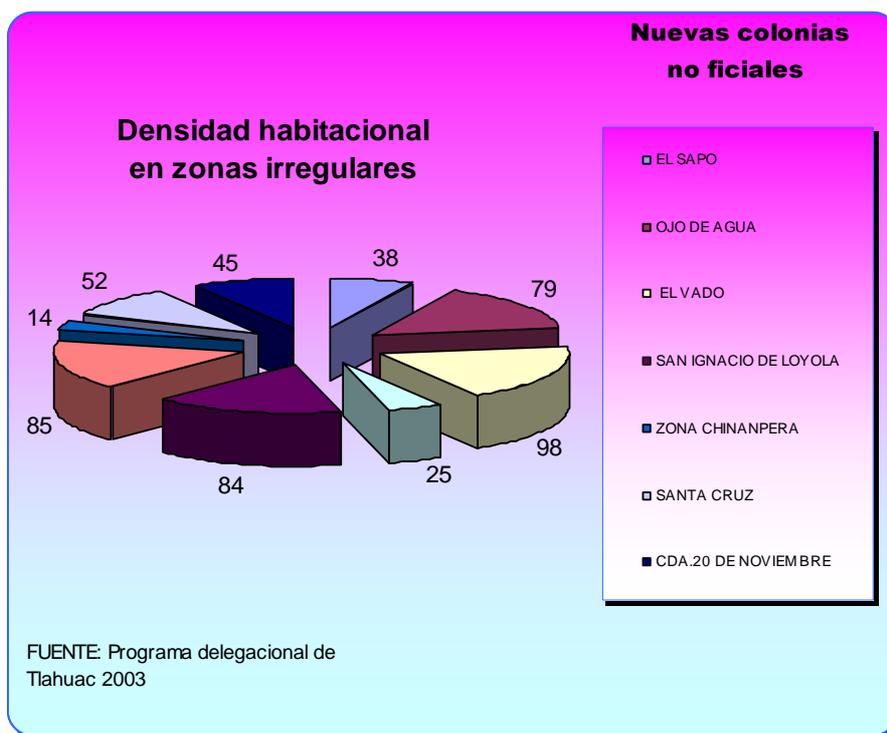


Figura 15. Densidad habitacional en zonas irregulares. Fuente: Adaptado del Programa delegacional Tláhuac, 2003. Las nuevas viviendas que actualmente se construyen en la periferia del pueblo no cuentan con servicios.

San Ignacio de Loyola, es un asentamiento muy reciente y tiene un mayor índice de crecimiento con 84 casas.

El paraje llamado “El Vado” presenta las mismas condiciones que los anteriores, se ubica en la periferia del barrio de San Bartolomé, ahí se observa acumulación de cascajo y basura en los canales. Existen algunas construcciones de uno, dos y tres niveles, en diferentes etapas de construcción, en este sitio existen algunas parcelas con cultivos de hortalizas.

El Sapo, es una nueva colonia en donde las condiciones sanitarias tampoco son favorables, en general presentan una deficiencia de servicios. Las construcciones en su mayoría son de lámina y madera.

El aumento poblacional en zonas de reserva ecológica causan graves daños a los recursos naturales, ya que se pierden espacios verdes, mientras la mancha urbana va ocupando áreas importantes, cubriendo el suelo con cemento y asfalto u otro material, dificultando la filtración hidráulica natural en la región, por una parte, mientras que por otra, las nuevas construcciones no cuentan con la infraestructura hidráulica adecuada para abastecerse de agua potable, ni se cuenta con alcantarillado apto para desalojar las aguas residuales y existe un sistema de fosas sépticas contaminando de manera directa los mantos acuíferos. Además, el crecimiento semiurbano sumado es un factor importante para una acelerada desecación de canales aun existentes y cuerpos de agua.

Se observa que en las zonas de asentamiento irregular han tenido problemas de hundimiento de terreno por que algunas casas presentan una inclinación considerable, sin embargo, esto no es una limitante para continuar con las construcciones.

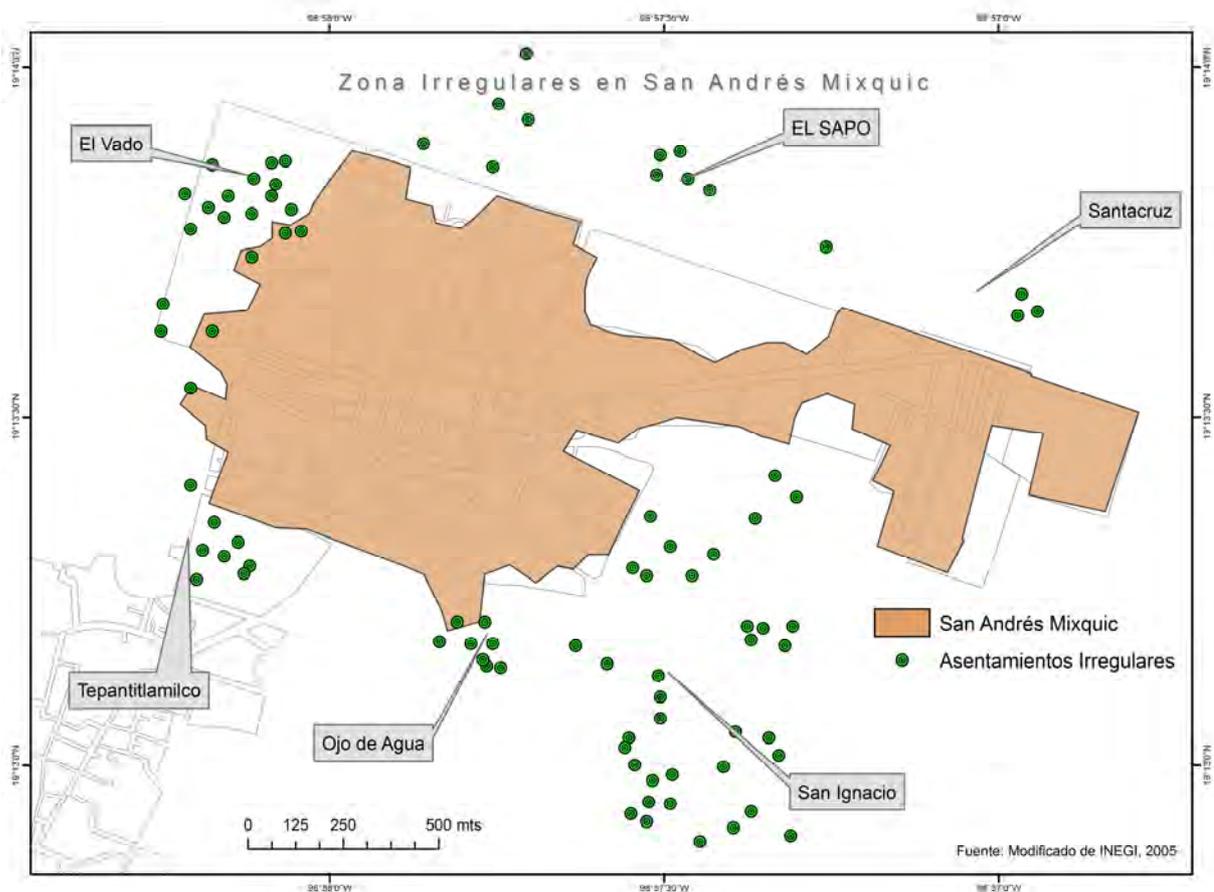


Figura 16. Zonas irregulares dentro del pueblo de San Andrés Mixquic. Adaptado de INEGI, 2005.

La demanda de espacios habitables es un tema relevante en la zona de estudio, esta imagen revela la expansión de nuevas colonias que se están formando de forma irregular cambiando así el uso de suelo y modificando el entorno ambiental.

III. MARCO FÍSICO

3.1 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se hizo con base en los tres factores que influyen en el hundimiento y son perjudiciales para la zona de estudio (Figura 17).

A) Ubicación de pozos. Toma en cuenta la densidad de estos, y la extracción influye en el hundimiento del suelo, lo cual se detalla en el siguiente capítulo. Sólo se menciona que se encuentra un total de 58 pozos en un área de 15 Km² aproximadamente. En el pueblo de San Andrés Mixquic no existen, sin embargo, hay en los pueblos colindantes. De esta manera se consideraron los más cercanos al pueblo de San Andrés y se trazó una poligonal que incluye 58 (Tabla 4.3).

B) Red de Bancos de Nivel. La zona de estudio cuenta con una red de bancos de nivel construidos y monitoreados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM).

C) Presencia de grietas. Por ser un problema de gran importancia es necesario cambiar la escala, por ello, para este caso se tomó en cuenta la mayoría de las grietas que existen en la delegación Tláhuac, abarcando un área superior a los 15 Km², aunque relativamente pequeña se aprecia la continuidad y discontinuidad que presentan las grietas.

El pueblo de San Andrés Mixquic se ubica al oriente del Distrito Federal, en la parte sur de la delegación Tláhuac, las coordenadas geográficas que delimitan al pueblo de San Andrés Mixquic son: 19° 13' 50" y 19° 13' 00" latitud Norte; 98° 58' 10" y 98° 56' 30" longitud oeste, se encuentra a una altura de 2240 msnm, tiene una superficie aproximada de 3 km², la delegación Tláhuac está integrada por 7 pueblos de origen prehispánico; San Nicolás Tetelco, San Juan Ixtayopan, San Pedro Tláhuac, Santa Catarina Yecahuitzotl, Santiago Zapotitlán y San Francisco Tlaltenco,

algunos localizados muy cerca de la ribera de los antiguos Lagos de Chalco y Xochimilco (Figura 18).

San Andrés Mixquic limita al sur con el pueblo de San Nicolás Tetelco, al oeste con San Antonio Tecomitl, al noroeste con San Juan Ixtayopan, al norte con San Martín Xico, al noreste con el pueblo de San Lorenzo Chimalpa, al sureste con Santa Catarina Ayotzingo.

3.2 SUELOS

Mixquic es una zona lacustre por su origen, donde la disolución de elementos minerales y posterior evaporación dio como resultado suelos salinos. Tiene su origen en la acumulación de sales derivadas de la disolución de minerales acarreados fluvialmente que al evaporarse el agua precipitan. Asimismo, el lago de Chalco tiene un comportamiento de área de descarga de aguas subterráneas que aporta sales hacia la superficie y al descender el nivel del agua precipitó sales. Actualmente en la zona agrícola (Mixquic) se cultiva con especies tolerantes a la salinidad y se obtienen rendimientos adecuados. Para el riego se utilizan aguas tratadas que llegan del canal de Amecameca y de un sistema de canales construidos por los dueños de los terrenos.

El tipo de suelo que predomina es de solonchak sódico por tener más de 15% de sodio con profundidad de 20 a 50 cm. de la superficie.

En general, gran parte del suelo en la delegación de Tláhuac es de uso agropecuario dividido aproximadamente en 658 hectáreas de ejido y 499 de pequeña propiedad, de las cuales 1058, corresponden a chinampería (Programa Delegacional de Tláhuac, 1990).

3.3 VEGETACIÓN

La vegetación en la delegación Tláhuac presenta cuatro asociaciones: i) pradera, ii) zonas boscosas consideradas en el estrato arbóreo son pocas y pequeñas, iii) extensas áreas de cultivos permanentes, especialmente las zonas este y sur (Mixquic), donde se cultivan de forma cíclica, maíz, espinaca, romerito y acelga, y en forma perenne: alfalfa, peral, higo, cilantro, y nogal, entre otras, y iv) vegetación acuática, con lírio, chichicastle y ninfa.

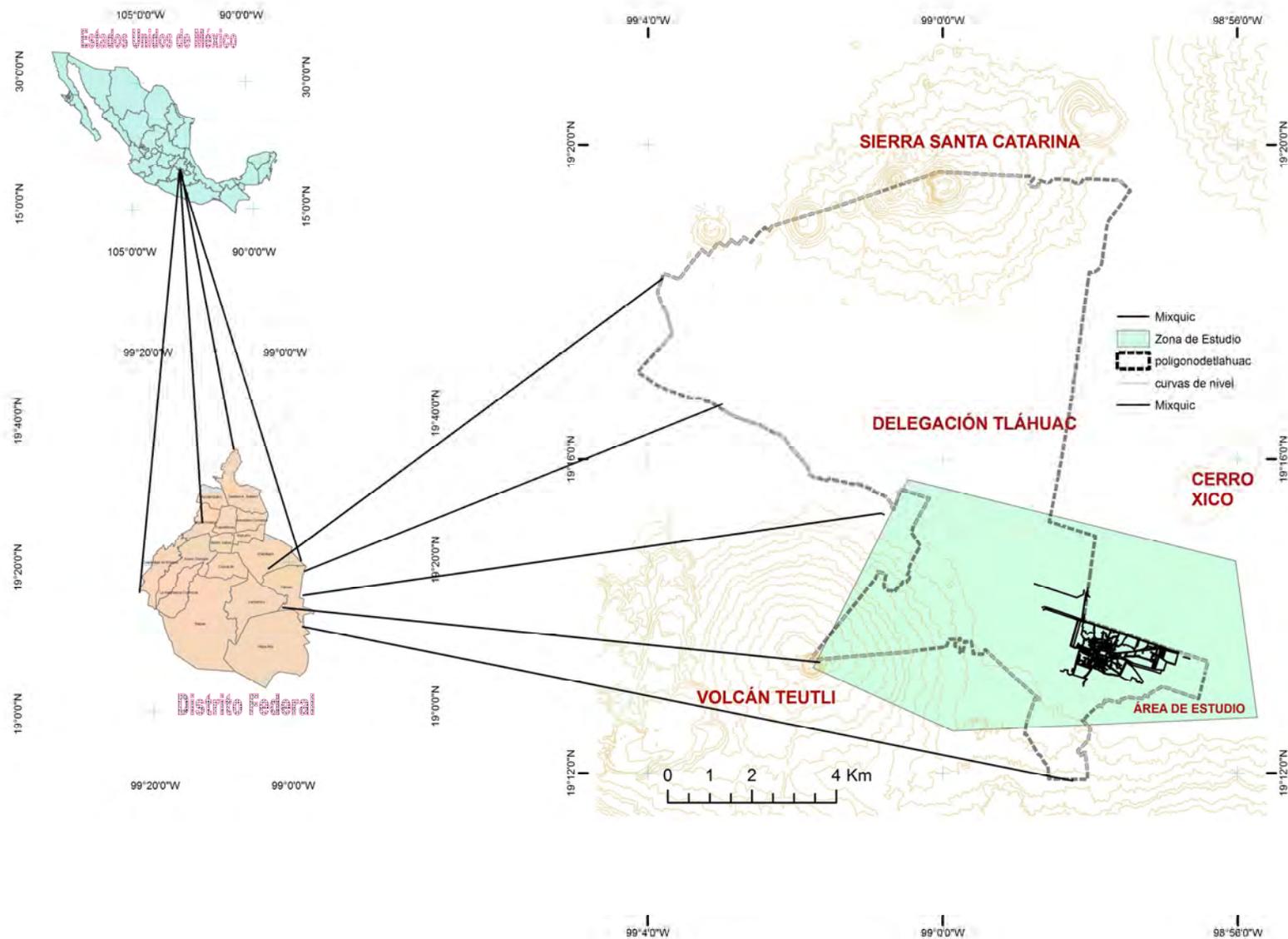


Figura. 17 Localización del área de estudio.

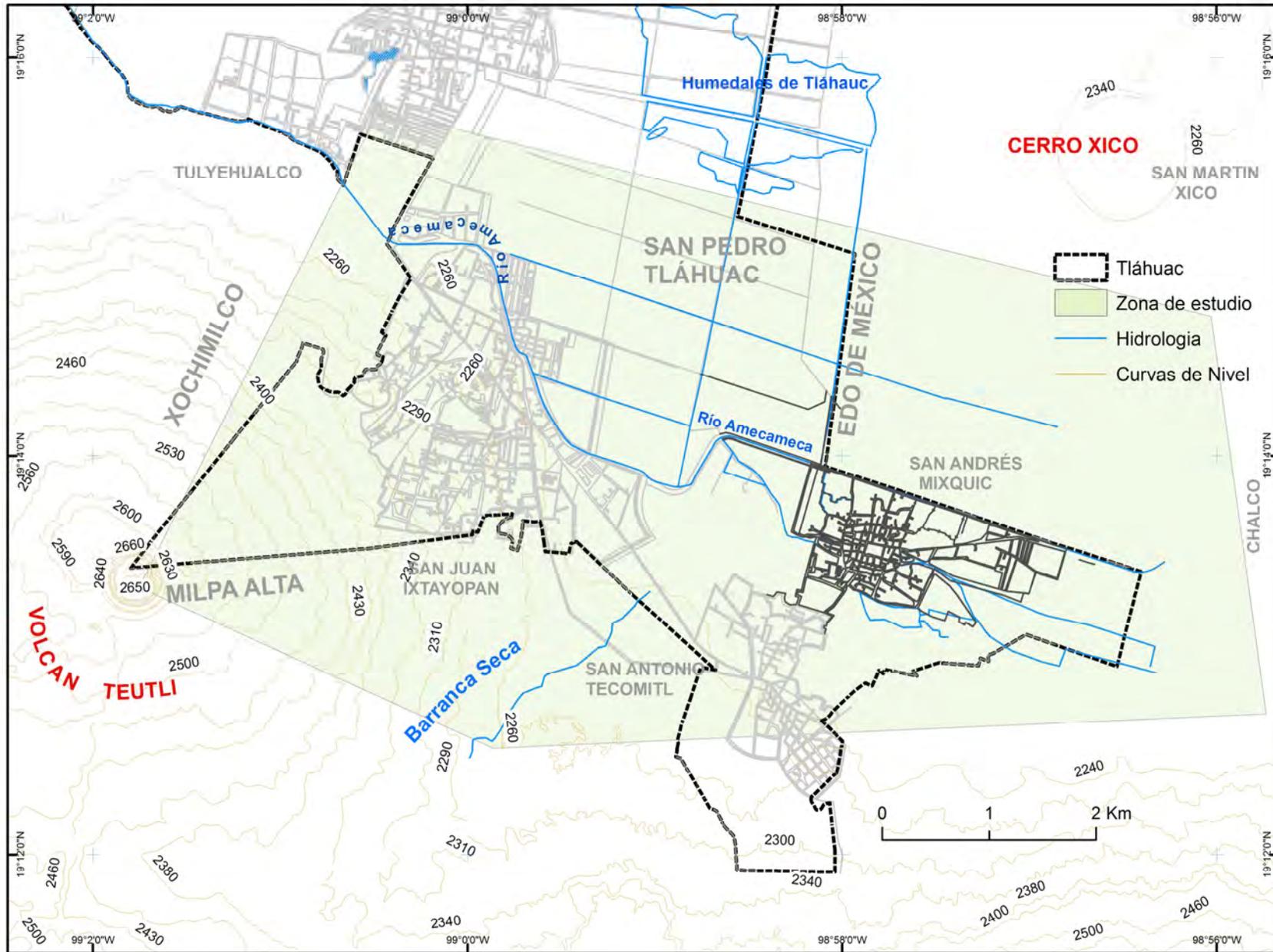


Figura. 18 Delimitación del área de estudio.

3.3.1 ZONAS CHINAMPERAS

Cuentan los relatos de los abuelos que Mixquic estaba integrado por un sistema de canales y zonas chinamperas, nos dicen que “las principales avenidas y calles que hoy existen en el pueblo, anteriormente eran canales muy importantes; ya que se utilizaban para transportar las mercancías en canoas. Calles como Abasolo, Brasil, General Anaya, Río Amazonas y Canal del Norte. En general el pueblo estaba conformado sólo por la parte central y todo alrededor era agua, que en algunas ocasiones se podía pescar la trucha, ranas, acociles y otras variedades animales. Era maravilloso el mundo que conocí” (Zenaida Yescas Ibarra comunicación verbal, 2008).

La extensión de canales dentro de la Delegación Tláhuac es utilizada básicamente para la agricultura y se estima en 8 km² y suman alrededor de 50 las hectáreas de chinampas en producción. A partir del 2002 se ha presentado con mayor intensidad la urbanización en terrenos cercanos a las chinampas y canales (zonas irregulares). La existencia de canales y por tanto de chinampas, está en función de que se respete y defiendan las áreas protegidas contra la expansión urbana, ya que la presión poblacional que se ejerce en esta comunidad es muy importante.

3.3.2 AGRICULTURA

El 33.5% (2,860 ha) de la superficie de Tláhuac es urbana y el 66.5% (5,674 ha), es de conservación ecológica. Las condiciones naturales permiten una gran actividad agrícola.

Los principales cultivos en San Andrés Mixquic se dividen en dos tipos: cultivo de riego y cultivo de temporal. En el primero encontramos romeritos, espinacas, brócoli, acelga, coliflor, apio, rabanitos, alcachofa, alfalfa, calabaza y frijol. Mientras que los de temporada son el maíz (Figura 19). El cultivo de riego se obtiene principalmente del agua extraída de los canales utilizados para riego y de las plantas de tratamiento aledañas.

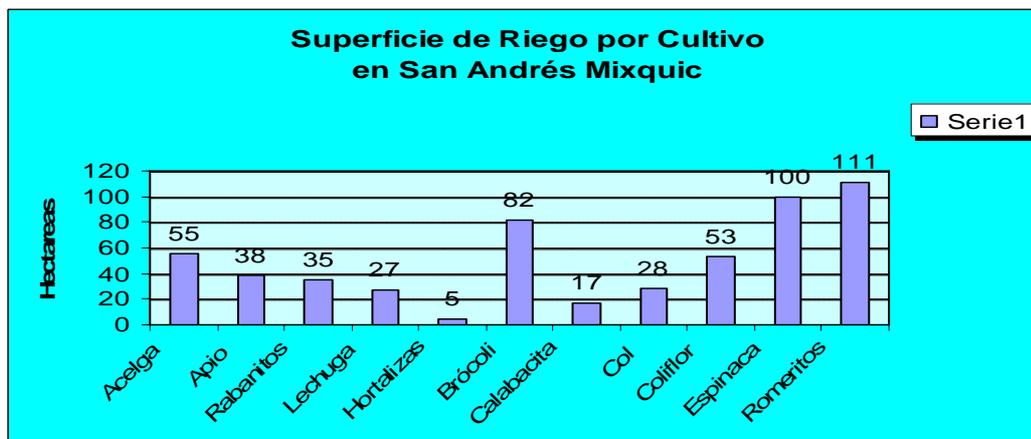


Figura 19. Tipos de cultivo en San Andrés Mixquic. INEGI (2001).

3.4 CLIMA

El tipo de clima predominante en la zona de Mixquic es Cwbg, es decir, templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano (García, 1988). La temperatura media anual es de 16.9°, la precipitación pluvial según registros del (SNM, 1982-1992) anual acumulada mínima fue de 365.9 mm en el año de 1982 y la máxima de 728.7 mm en 1992, la lluvia promedio es de 533.8 mm., siendo los meses de junio a agosto las mayores precipitaciones (Figura 20).

En la tabla 1 se presentan datos de 4 estaciones climatológicas, (Chalco, Milpa alta, Xochimilco y Tláhuac) en la cual la temperatura varía entre 14 y 20° media anual, siendo la zona más calurosa el poblado de Chalco, con valores medios anuales de 26.4 °C mientras que en la zona de Tláhuac y en Xochimilco se registran 16.9 y 15.3 °C media anual respectivamente.

La zona de Xochimilco registra mayor precipitación que va de 62 mm como mínima y máxima de 124.6 mm mensual, en Tláhuac se presentan lluvias de 43 mm media mensuales, con lluvias máximas de 68.7 aproximadamente (SIACON, 2000).

Tabla 1. Datos de climatología de la zona de estudio. SNM (SIACON, 2000)

ESTACIÓN	ANUAL	PRECIPITACIÓN	TEMPERATURA	EVAPORACIÓN
		En mm	En °C	En mm
CHALCO	MÍNIMA	10.8	23	
	MÁXIMA	74.1	28	156.2
	MEDIA	49.2	26.4	128.3
MILPA ALTA	MÍNIMA	3.4	12.2	105.8
	MÁXIMA	26.3	16.9	194.7
	MEDIA	15.6	15.3	144.4
XOCHIMILCO	MÍNIMA		12.8	96.4
	MÁXIMA	124.6	17.4	166.9
	MEDIA	64.1	15.3	124.3
TLÁHUAC	MÍNIMA		14.6	77.4
	MÁXIMA	68.7	20.4	139.2
	MEDIA	43.5	16.9	113.6

3.5 GEOLOGÍA

La cuenca de México es una altiplanicie rodeada de montañas volcánicas pliocuaternarias endorreica. Su altitud varía de 2 240 msnm en el S, a 2 390 al N, y la mínima de 80 km, de este a oeste, los límites son La Sierra Nevada al SW, la Sierra Chichinautzin al Sur, la Sierra de Tepoztlán-Tezontlalpan al NW y Pachuca, Chiconautla y Tepozán al N y NE.

De acuerdo con Mooser (1975) la cuenca de México se formó al cerrarse el antiguo valle de México (Cuaternario Tardío) cuando existía un sistema fluvial que drenaba hacia el sur. Una intensa actividad volcánica, dio origen a la Sierra Chichinautzin, compuesta por rocas andesítico-basálticas, la cual cerro el drenaje natural, dando paso a la formación de lagos (Fries, 1960). Los detritos de acarreo fluvial, volcánico y lacustre sepultaron la topografía original.

La zona de estudio se encuentra en la parte suroriental de la cuenca de México, dentro de la delegación de Tláhuac (Figura 21) esta limitada por la Sierra de Santa Catarina al N, el volcán Teutli al SE y el cerro Xico al E.

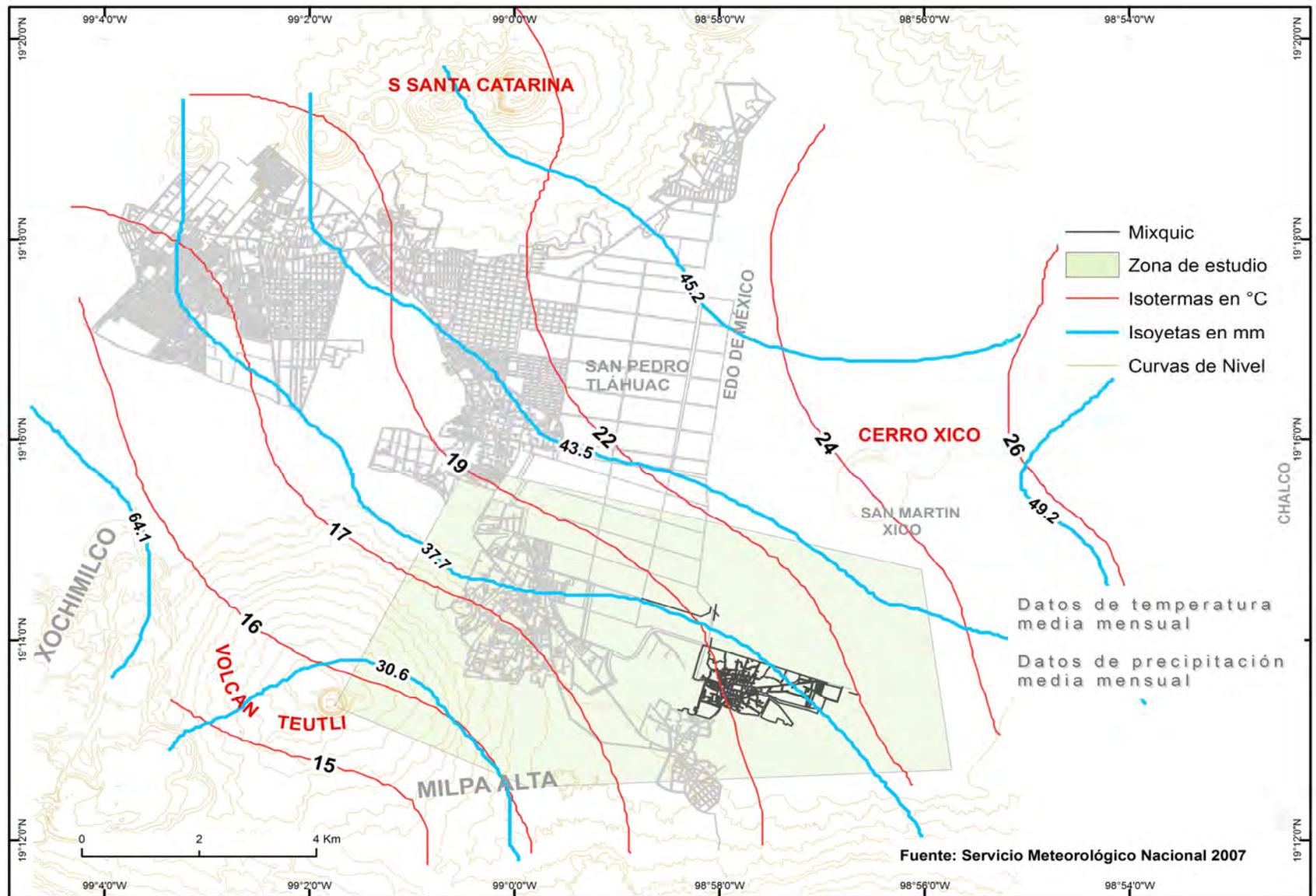


Figura. 20 Temperatura y Precipitación en la Delegación Tláhuac promedio mensual en °C y mm respectivamente

Fuente: Elaborado con datos del SMN, 2009

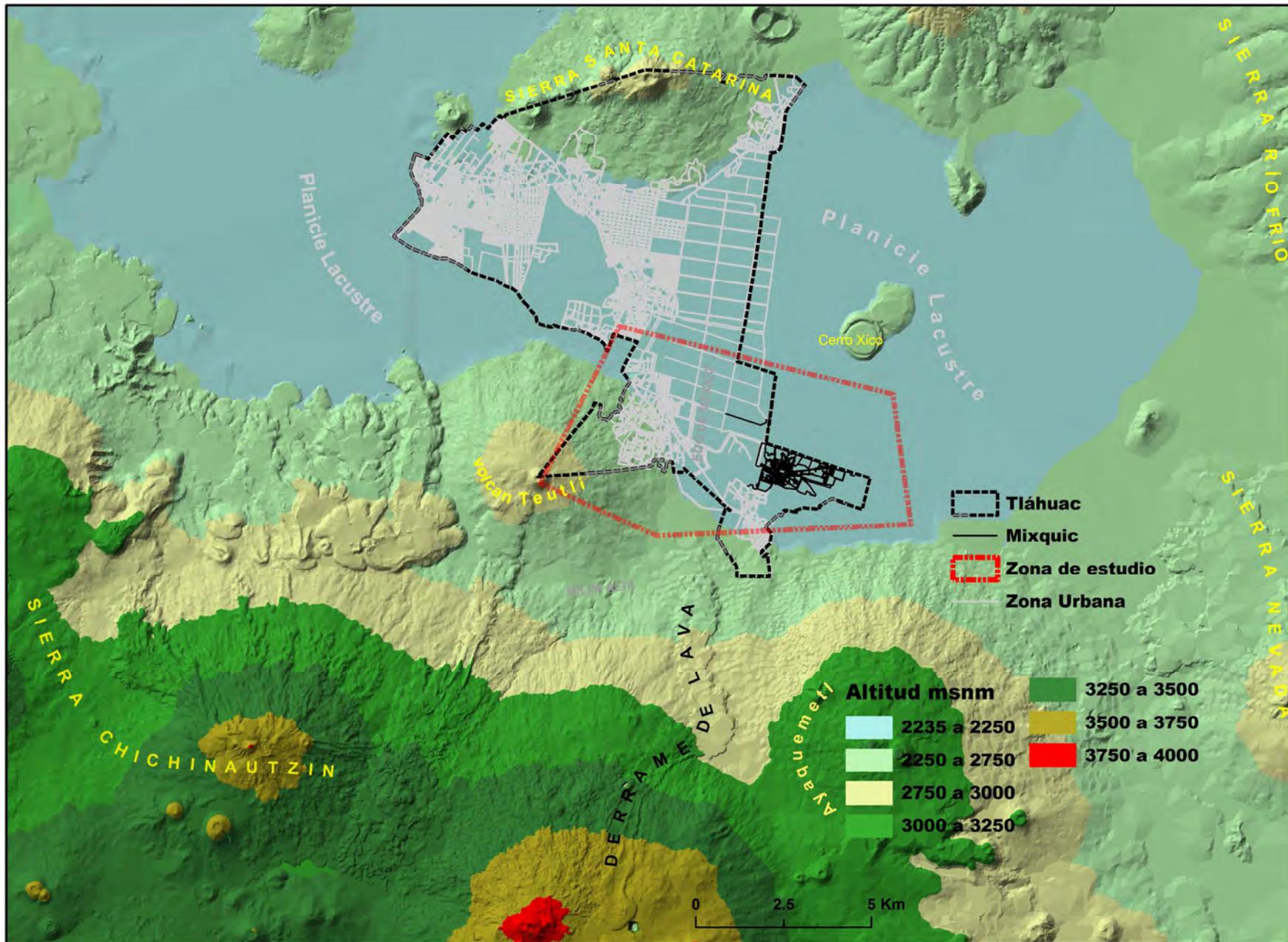


Figura. 21 Relieve de la delegación Tláhuac D.F.

3.5.1 INFLUENCIA GEOLÓGICA EN LA AFECTACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

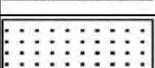
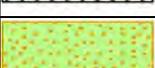
La litología de la zona de estudio está constituida por diferentes materiales, los cuales fueron agrupados como basalto, tezontle, gravas, arenas medias, arenas finas y arenas muy finas (Tabla 2).

Para analizar la litología del área de estudio se realizó la extrapolación de los cortes litológicos con respecto a pozos cercanos: Xico, Tec-9, Tec-5, Tulyehualco-1, Tulyehualco-4, y MSC-12 (Figura 23) con los cuales se construyó el perfil litológico general (Figura 24) y 3 secciones litológicas (Figuras 25, 26 y 27). La información utilizada fue proporcionada por el SACM (2008).

En la parte superior de la planicie existen depósitos lacustres limo-arcillosos (Huizar, 1993) que cubren la parte central de la zona de estudio, es decir, hacia el oeste del cerro Xico el espesor que se presenta varía entre los 200 m y va disminuyendo hacia la parte E, hacia la zona de transición del volcán Teutli en donde la composición litológica principal es basalto (Rodríguez y González, en Huizar, 1993) interpretan hasta 400 m de espesor de material arcilloso cerca de esta zona.

En las laderas del volcán Teutli el paquete de roca volcánica supera los 200 m. de espesor, donde se intercala con arenas medias, tezontle, arenas finas que forman horizontes delgados a una profundidad de 100 m.

Tabla 2. Grupos de suelos en el área de estudio. Elaborado con datos de DGCOH, 2009.

BASALTO		BASALTO, BASALTO CON TEZONTLE, GRAVA DE BASALTO
TEZONTLE		TEZONTLE, TEZONTLE CON LAPILLI, ARENA CON TEZONTLE, PÓMEZ CON TEZONTLE Y PÓMEZ
GRAVA Y BOLEO		ARENA GRUESA, ARENA CON PÓMEZ, GRAVAS, ARENAS GRUESAS Y MEDIANAS, GRAVA Y ARENAS CON ARCILLA, GRAVA Y BOLEO, GRAVA Y ARENAS GRUESAS
ARENAS MEDIAS		LAPILLI, ARENAS FINAS, ARENAS GRUESAS Y LAPILLI, ARENAS FINAS Y VIDRIO VOLCÁNICO
ARENAS FINAS		ARENAS FINAS Y MEDIANAS CON ARCILLA, ARENAS FINAS, ARENAS FINAS CON ARCILLA LACUSTRE, ARENAS FINAS Y MEDIANAS
ARCILLAS		ARCILLA LACUSTRE, ARCILLA LACUSTRE CON ARENAS Y TOBAS, ARCILLA LACUSTRE CON ARENAS
ARENAS MUY FINAS		CENIZA VOLCÁNICA, CENIZA CON LAPILLI, CENIZA VOLCÁNICA CON ARCILLA, CENIZA CON ARENAS, ARENA Y CENIZA VOLCÁNICA

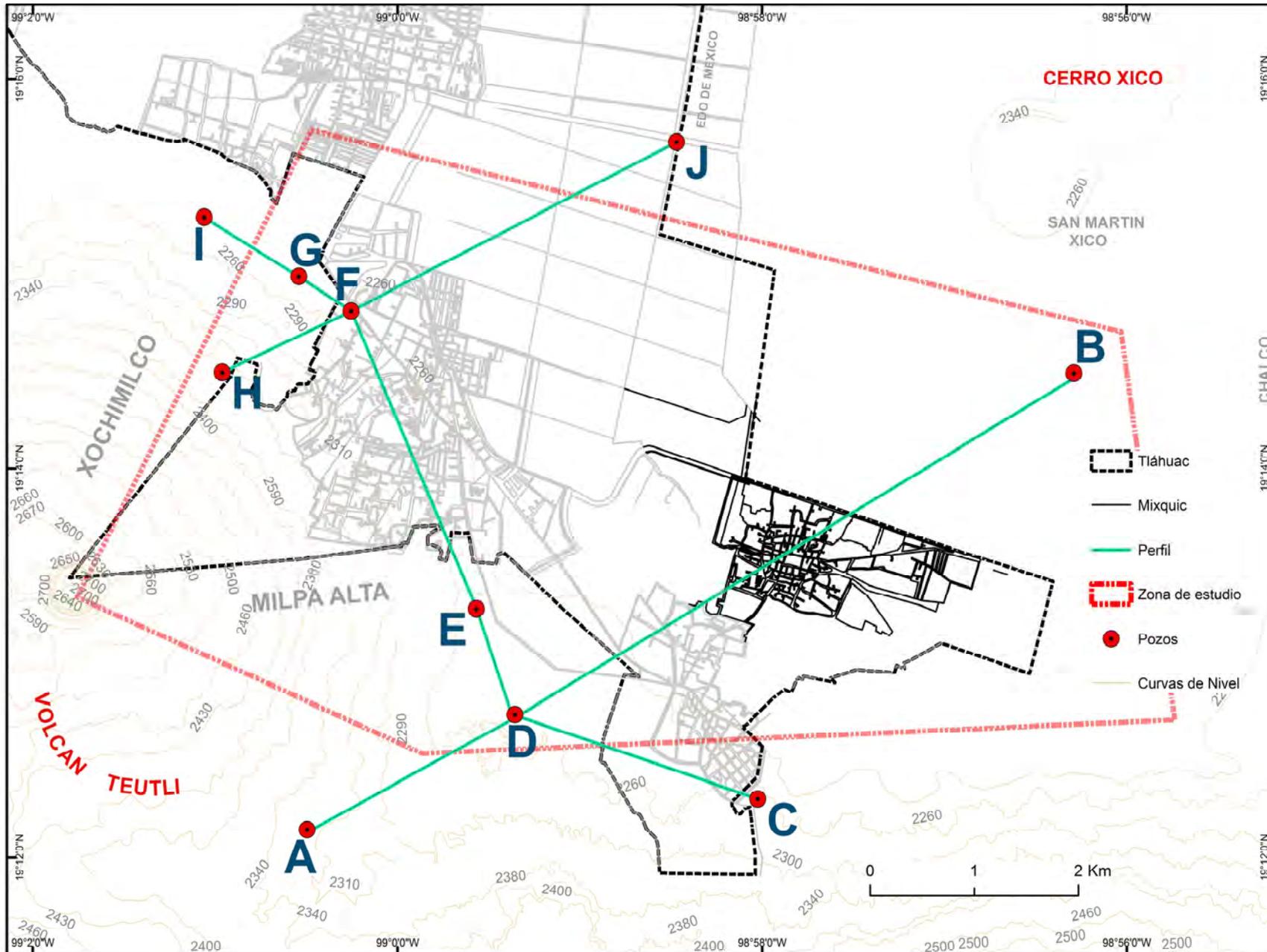


Figura 23. MAPA DE SECCIONES LITOLÓGICAS

Fuente: Elaborado con datos de la DGCOH, 2009

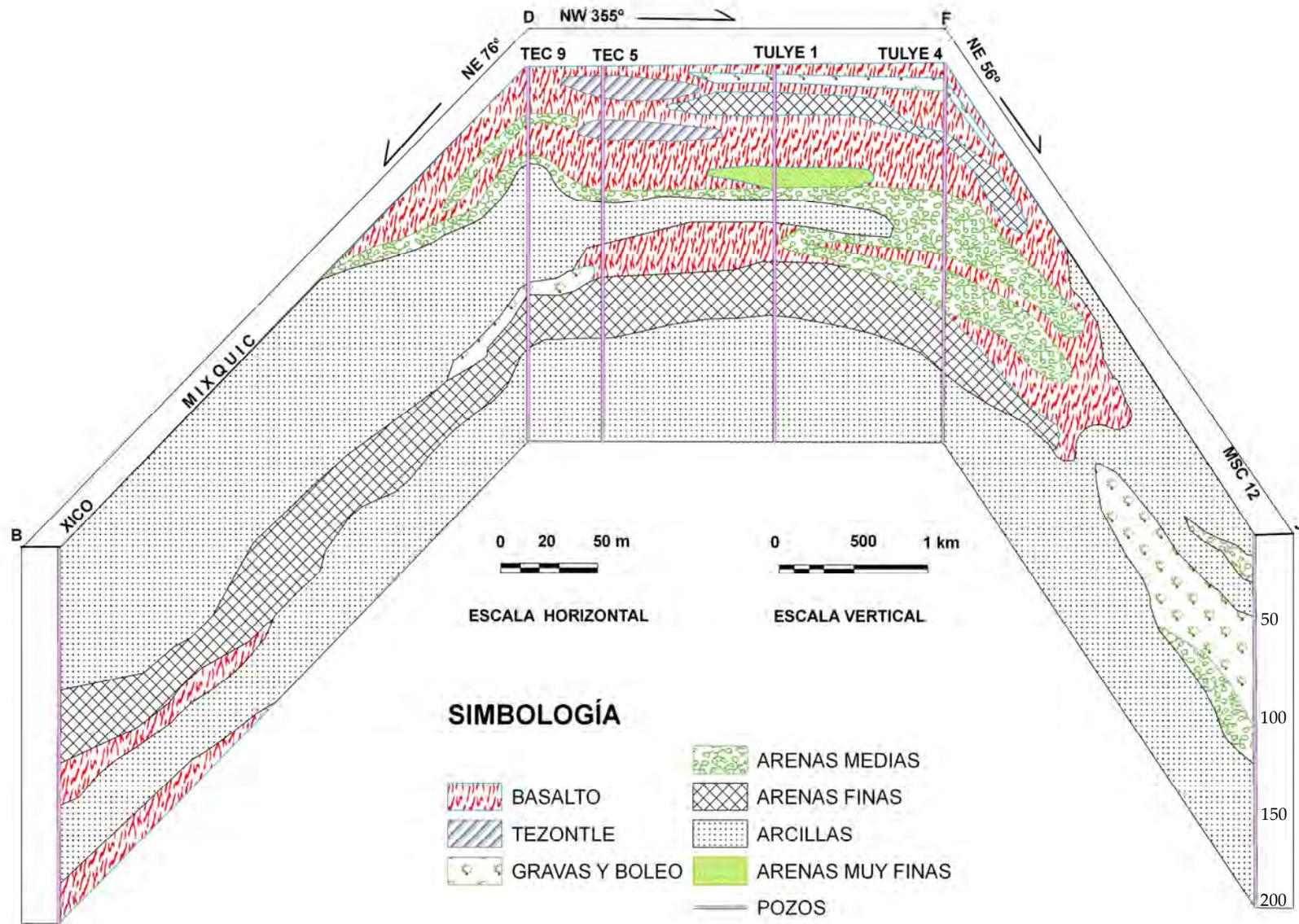


Figura 24. PERFIL LITOLÓGICO

Fuente: Elaborado con datos de la DGCOH, 2009

Con base en esta información y como lo muestra la Figura 24 el pueblo de San Andrés Mixquic está construido sobre un paquete arcilloso con un espesor de 190 m. La sección B-D muestra como se intercalan arenas finas y medias, con dos horizontes de lavas situadas a una profundidad de 150 y 200 m.

En la parte central del perfil se localiza una interestratificación de materiales duros y blandos como los demuestran los cortes litológicos de los pozos Tulyehualco 1y 4, Tecomitl 5 y 9, sección D-F, en la cual encontramos gravas y boleos en superficie que descansan sobre basaltos (Sierra Chichinautzin) entre 40-60 m. Por debajo de estos, encontramos estratos de material blando como arenas finas y arcillas.

En la sección H-F (Figura 25) se presentan un fuerte espesor de arcillas intercaladas por gravas y boleos, dicha sección está sobre el ramal Mixquic-Santa Catarina con espesores de más de 200 m. Se aprecian las laderas del volcán Teutli, sección lograda con los pozos Cerrillos, perforados a 250 m de profundidad, en la sección se presentan los primeros 150 m. de roca volcánica, los cuales se intercalan con lentes de arenas finas y arcillas que van aumentando su espesor hacia las partes bajas. El pozo S-13 registra un lente de arenas finas a 50 m. de profundidad. Estas condiciones geológicas determinaron a esta región como una zona de excelente filtración, así como para extraer agua.

El paquete arcilloso disminuye hacia las faldas del volcán Teutli, donde se encuentran los pueblos San Antonio Tecomitl, Santiago Tulyehualco y hacia la Sierra Santa Catarina, mientras que hacia los humedales de Tláhuac, el espesor de arcilla se incrementa.

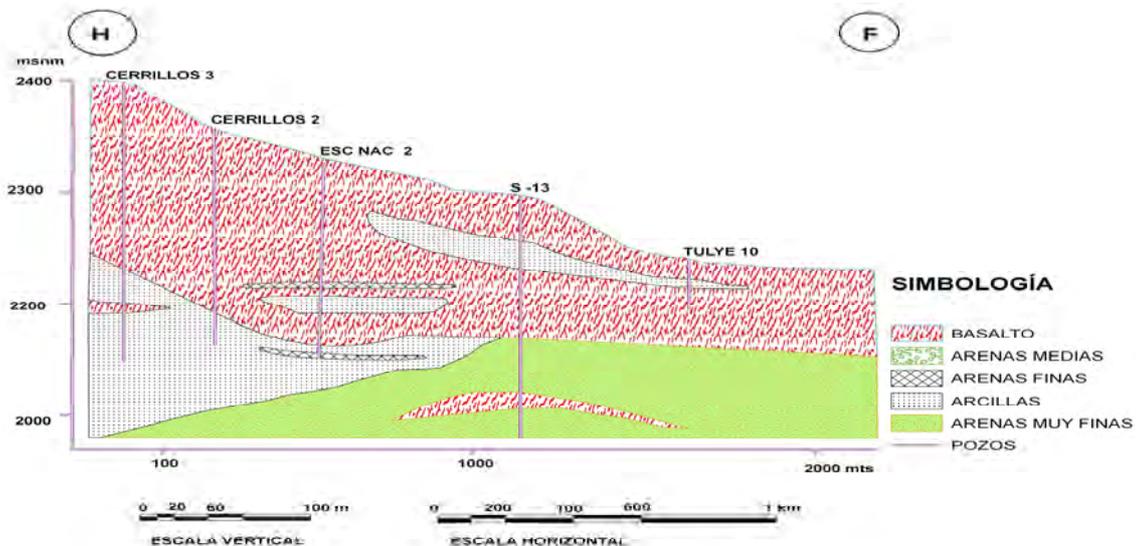


Figura 25. Sección litológica (H-F) Fuente: Elaborado con datos de la DGCOH, 2009.

La Figura 26 corresponde a la zona de transición donde se localiza el pueblo de San Nicolás Tetelco, a 1.5 km. al S de San Andrés Mixquic. Esta zona presenta en la parte superior un paquete de roca volcánica y por debajo de este, se localiza un horizonte de arcilla de 80 m de espesor, el cual presenta lentes de arenas, gravas y boleos.

Los pozos Tec-12 y 15 dan evidencia en la parte superficial de material susceptible a compactarse, como es el tezontle, gravas y boleos, seguida por un paquete de basalto y por debajo de este se localiza material arcilloso de alta compresibilidad. Bajo estas condiciones estratigráficas la presencia de grietas en superficie solo sería posible por fallas geológicas o fracturas.

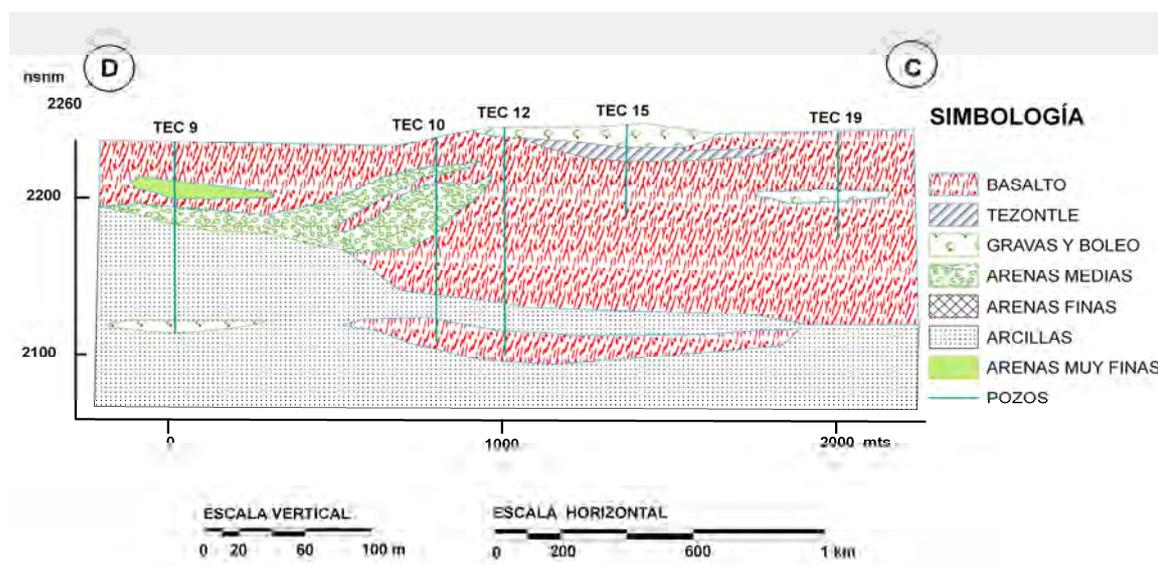


Figura 26. Sección Litológica (D-C) Elaborado con datos de la DGCOH, 2009

La Figura 27 pertenece a la ladera E del volcán Teutli, aquí se presenta un horizonte de arenas finas abarcando todo el perfil, y otro de roca volcánica con intercalaciones de arenas que van de media, fina y muy fina. El paquete de roca volcánica esta cubierto por material arcilloso-limoso de hasta 30 m. de espesor, donde el acuífero confinado abastece agua para el consumo y riego. Enseguida encontramos otra capa espesa de roca volcánica con algunas intercalaciones de arenas muy finas y gravas con boleos. El área presenta dos horizontes superficiales bien definidos, los cuales nos permiten interpretar que es posible que ocurra el mecanismo de compactación si se registra una acelerada extracción de agua de la zona alta de Milpa Alta.

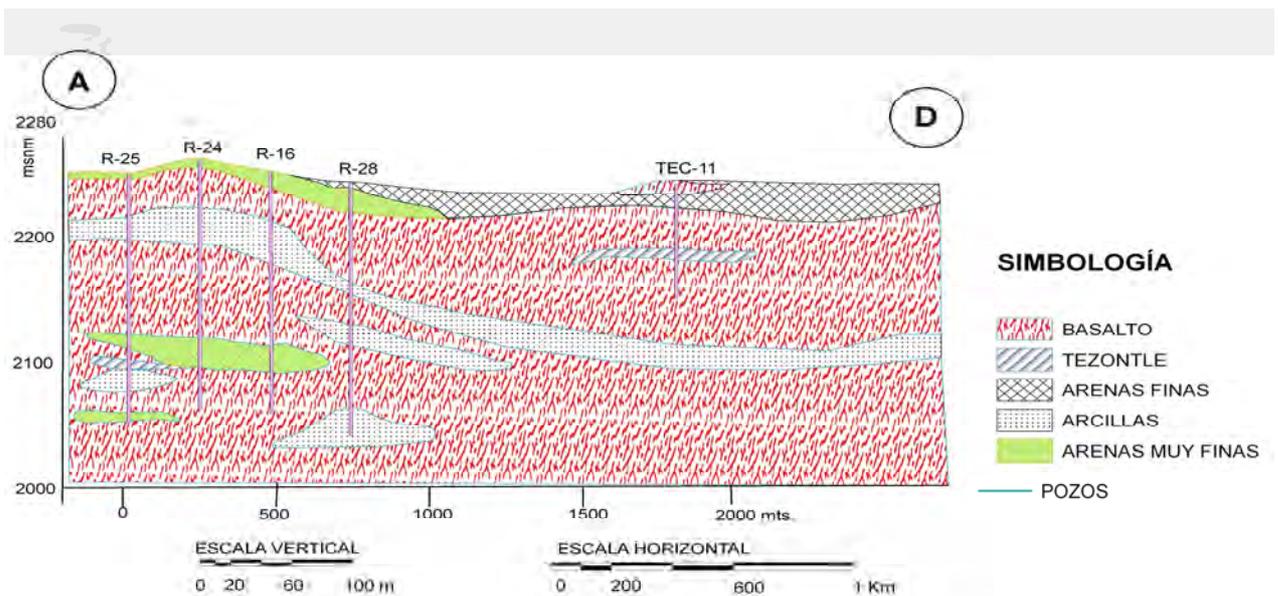


Figura 27. Sección litológica (A-D). Elaborado con datos de la DGCOH, 2009

Por otra parte, el Gobierno del Distrito Federal en el 2008 realizó el estudio de mecánica de suelos en el pueblo de San Andrés Mixquic, para la construcción de la “Casa de la Cultura”, este estudio consistió en dos perforaciones, una a cielo abierto a 3 m de profundidad y otra con perforación estándar a 20 m.

Este estudio de mecánica de suelos fue realizado por la empresa Grupo de Ingeniería OPALO S.a. de C.V., reconociendo tres condiciones típicas:

- 1) Progresiva, en la que la formación rocosa aparece cubierta por depósitos de origen aluvial, a su vez subyacentes a la capa mas reciente de arcilla lacustre.
- 2) Interestratificada, característica de regiones en la que las fase aluvial y lacustre se suceden en forma alternada, dando lugar a las intercalaciones de mantos blandos arcillosos con otros de matriz granular contaminados por finos, generalmente duros y más resistentes.
- 3) Abrupta, que se distingue por los depósitos lacustres, están en contacto con las formaciones rocosas, con interfase de suelo residual.

El contenido natural de agua del limo plástico es muy variable y presenta un valor entre 25% a 390%. A la profundidad promedio de 8 m se detectó un lente de un metro de espesor en promedio formados por arenas pumíticas muy compactas (Tabla 3).

En la perforación a cielo abierto a una profundidad de 2.7 m. se encontró relleno de limo arenoso café oscuro con roca de basalto poroso de color gris oscuro con basura de compactidad media.

Tabla 3. Contenido de agua en el suelo de san Andrés Mixquic. OPALO, 2008

Penetración estándar		Sondeo Mixto		Pozo a cielo abierto	
Profundidad en m	% de agua en mm	Profundidad en m	% de agua en mm	Profundidad en m	% de agua en mm
Hasta 2.4	25	1.8	35	< a 2.7	35
2.4 a 3.6	25	1.8 a 3.6	180	< a 1.2	41
3.6 a 9.6	60 /390	3.6 a 5.10	250	1.2 a 2.5	82
9.6 a 10.8	70	5.10 a 6.60	30		
10.8 a 19.8	110	6.60 a 10.00	130		
		10.0. a 20.0	210		

La profundidad de los pozos estuvo limitada por la dureza del material, y durante los trabajos geotécnicos no se encontró el nivel freático (OPALO, 2008).

Para corroborar la información precedente, se elaboró el modelo digital del terreno (MDT) utilizando los SIG Arc Gis 9.2 a partir de las curvas de nivel sucesivas a 20 m (Figura 28), con la finalidad de detectar alguna evidencia de rasgos morfológicos asociados al hundimiento del terreno.

En dicho MDT se observa una colada de lava proveniente del volcán Tlaloc, al S de la delegación de Milpa Alta, a 2 km. al SW del pueblo de san Andrés Mixquic; tiene 7.17 km de longitud, proviene del cono, su anchura varía entre 0.7 km en las partes mas altas (3690 msnm) y 3.3 km en la zona de contacto con la planicie, formando un delta de material volcánico (2240 msnm). Debido a su génesis y de acuerdo con J. L. Blanco y Rodríguez L. (2002) esta estructura es de andesita-basáltica del Holoceno, el grado de desarrollo del suelo es joven y su formación se debe en gran parte al movimiento aluvio-coluvial.

De esta manera se puede inferir que tal vez esta colada de lava no termine en la zona de contacto con la planicie, debido a que la arcilla lacustre debió cubrirla y posiblemente continúe hacia el pueblo de San Andrés Mixquic, y es muy probable que un 40 % del pueblo se encuentre sobre esta colada de lava.

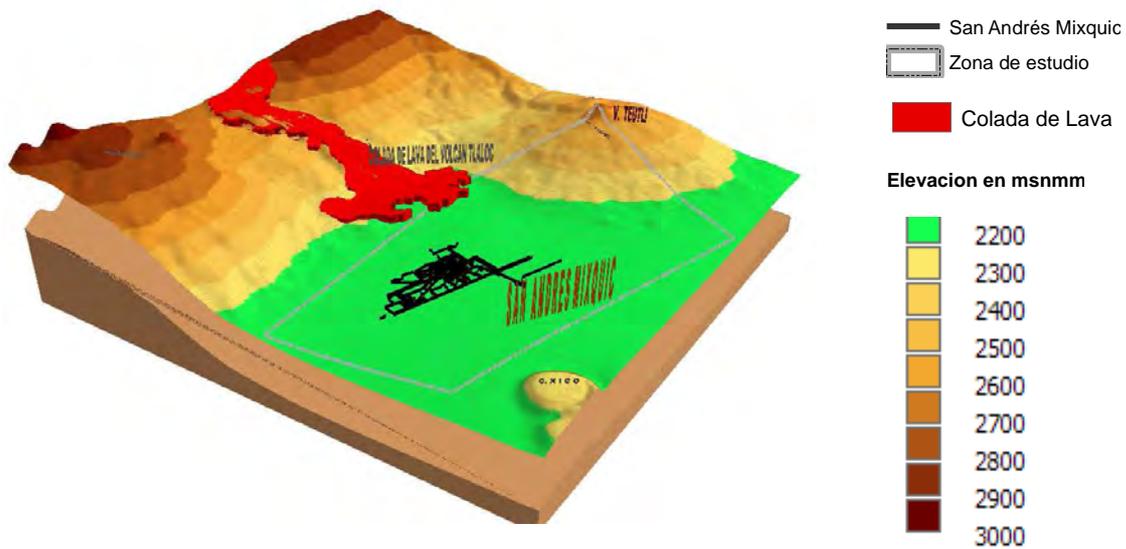


Figura 28. MDT de la zona de estudio, en la cual se aprecia la colada de lava proveniente del volcán Tlaloc.

Si estas condiciones litológicas son verdaderas se puede mencionar que incrementarán las probabilidades de que estén ocurriendo hundimientos diferenciales en el suelo de San Andrés Mixquic, esto es debido a la diferencia que hay entre materiales blandos intercalados con material volcánico de mayor dureza.

La cuestión geológica se acentúa con mayor fuerza si se acumulan los factores catalizadores del hundimiento, como es la extracción de agua subterránea por medio de pozos, ya que a mayor extracción de agua se abaten los niveles piezométricos, dando como resultado la perdida de humedad en el material arcilloso, a lo que sigue un proceso de comprensibilidad en el material dando origen a movimientos del suelo en mayor o menor medida, de acuerdo con el material que lo subyace (Figura 29).



Figura 29. Modelo conceptual de la zona de estudio

IV HIDROLOGIA

4.1 EVOLUCION DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA A PARTIR DE 1960 - 1995

Para entender la evolución de la infraestructura que ha tenido la cuenca de México se tomaron datos obtenidos del estudio de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, la Comisión Hidrológica del Valle de México (DGCOH, 1960). En el cual dice que “para el abastecimiento de agua en el Distrito Federal en 1960 se contaba con diversos sistemas de distribución, la mayor parte de estos sistemas se encontraban dentro del Valle de México.”

- A) *Acueducto Xochimilco*, que conduce el agua de la captación de los manantiales denominados San Luís No 5, 6 y 7, Santa cruz, Nativitas y La Noria, así como los caudales de Huipulco y Coapa.
- B) *Acueducto Lerma*, conduce el agua que recibe la Ciudad de México, las captaciones se denominan: galerías de Almoloya, Manantiales de Texcaltenco y manantiales de Ameyalco, aparte del campo de pozos profundos a lo largo del acueducto en el valle de Lerma su caudal es de 2 m³/s
- C) *Acueducto Chiconautla*, éste transporta el caudal de 2.7 m³/s que se capta en los pozos de la región de Chiconautla y de Ecatepec, en la cuenca de México.
- D) *Acueducto Peñón*, captan agua de la región de Peñón de Marqués, su caudal de 5 m³/s
- E) *Acueducto Leones*, a través de éste llega el agua del Desierto de los Leones aunque son numerosos los manantiales aportan caudal bajo de 3 m³/s, se divide en dos ramales denominados ramal de Tacubaya y ramal de Mixcoac.
- F) *Acueducto menores*, en este grupo se involucran los caudales de Fuentes Brotantes, Monte Alegre, San Bartolo Ameyalco, Tulmeac y Magdalena Contreras, que proporcionan agua a zonas restringidas y cuyos caudales son de 0.3 m³/s bastante precarios frente a los sistemas de abastecimiento.
- G) *Pozos municipales*, en este renglón están comprendidos todos los pozos que se han perforado por cuenta del DDF (hoy en día Gobierno) dentro de los límites de los mismos y que son operados para el abastecimiento

de agua de la ciudad. Se tenía una lista de 241 pozos municipales dentro de los límites del Distrito Federal, de los cuales 170 se encuentran operando en la actualidad; 12 se han reportado como agotados; 51 se encuentran parados definitivamente por diversos motivos; 5 parados indefinidamente y de 3 no hay información.

- H) Pozos particulares, hay 971 registrados para 1960, en funcionamiento legal y se sabe que existen muchos más que no están registrados oficialmente. Estos pozos no están conectados a la red de abastecimiento de la ciudad solamente abastecen la demanda de los predios donde están ubicados, sea para su uso industrial, agrícola o doméstico con 10 m³/s (Sainz, 1960).

De este volumen y para esta fecha el abastecimiento de agua para el D.F, era de 21.8 m³/seg. En la Tabla 4 se muestra la cantidad de infiltración de agua y la cantidad de extracción de la misma en 1960, en la que se encuentra un déficit considerable de la extracción de volumen de agua (DGCOH, 1960). *Se está extrayendo, aproximadamente un caudal doble del que se debería de extraer*, para no sobreexplotar sus propios recursos y en los municipios del estado de México, el déficit es del orden de 4 %, también se deduce que las recargas de agua natural conjunta en el Distrito Federal se extrae 156.7 % mientras que en los municipios se extrae 22.9 %.

Tabla 4. Déficit hidráulico en el año 1960 (DGCOH, 1960).

Localidad	Infiltración anual en mm ³	Extracción anual en mm ³	Déficit anual en mm ³
Distrito Federal	157	315	158
Municipios del Edo. de México	44	46	2
SUMA	201	361	160

Aun cuando se suspendiese totalmente el bombeo de agua del subsuelo en los citados municipios, el déficit continuaría siendo del 56.7 % y los niveles piezométricos continuarían descendiendo hasta agotarse el agua en la profundidad económicamente explotada. El efecto que produce la extracción actual del agua del subsuelo en los municipios, se refleja en el factor tiempo, es decir, que esa extracción del agua reducirá el tiempo en que se agotarán las reservas existentes. De aquí, que esa medida extrema no eliminaría el problema de la Ciudad de México, sino que, solamente retrasaría su evolución (Sainz, 1960).

Para 1994 el sistema hidráulico que se registra está a cargo de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH), es el siguiente (Tabla 5).

La DGCOH Agrupa a 5 sistemas

- A) Sistema Norte: los pozos ubicados son Azcapotzalco y Chiconautla.
- B) *Sistema Sur: los pozos ubicados son sur Coyoacán, sur Milpa Alta- Tláhuac, sur Tlalpan y sur Xochimilco.*
- C) Sistema Oriente: Está constituido por 80 pozos ubicados en las delegaciones de Iztapalapa, Iztacalco y Venustiano Carranza.
- D) Sistema Poniente: se encarga de vigilar el funcionamiento de los pozos ubicados en Álvaro Obregón, Cuajimalpa y parte de Miguel Hidalgo.
- E) Sistema Centro: Se ocupa de las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez y Miguel Hidalgo.

Tabla 5. Caudal de los pozos de extracción (DGCOH, 1995).

SISTEMA	SUB SISTEMA	CAUDAL m ³ /S	CAUDAL EN m ³ /S	EN OPERACIÓN
NORTE	POZOS DE LA RED CHICONAUTLA	1.050	0.913 .411	27 28
SUR	COYOACÁN MILPA ALTA- TLAHUAC TLALPAN XOCHIMILCO	- 1.622 2.648	4.061 1.39 1.346 2.283	92 29 50 48
ORIENTE	POZOS A LA RED PLANTA ORIENTAL PLANTA SANTA CRUZ MEYEAHUALCO	-0.185 -0.068	2.513 0.068 0.037	50 2 -1
PONIENTE	POZOS A LA RED	0.453	0.241	13
CENTRO	POZOS A LA RED	1.911	1.750	54
	TOTAL		16.016	394

De los 571 pozos perforados operan 460, con un caudal global de 16.42 m³/s. Con la solicitud de la CNA de parar los pozos con el equivalente de 4 m³/s provenientes de la cuarta etapa del sistema Cutzamala.

La gran mayoría de los pozos fueron perforados en los años 80 aproximadamente. El 60% del total, tienen más de 20 años, a pesar de su mantenimiento, el número de pozos se ha rebasado, o están en el límite de su vida útil. La infraestructura con la que cuenta La ciudad de México en la actualidad se menciona a continuación.

El sistema Aguas del Sur, con 315 pozos perforados en la actualidad, es la mayor zona de extracción de agua por medio de pozos profundos que a partir de 1980 comienzan a acentuarse con mayor fuerza los hundimientos en las zonas de Iztapalapa, Coyoacán y Tláhuac (Figura 30).

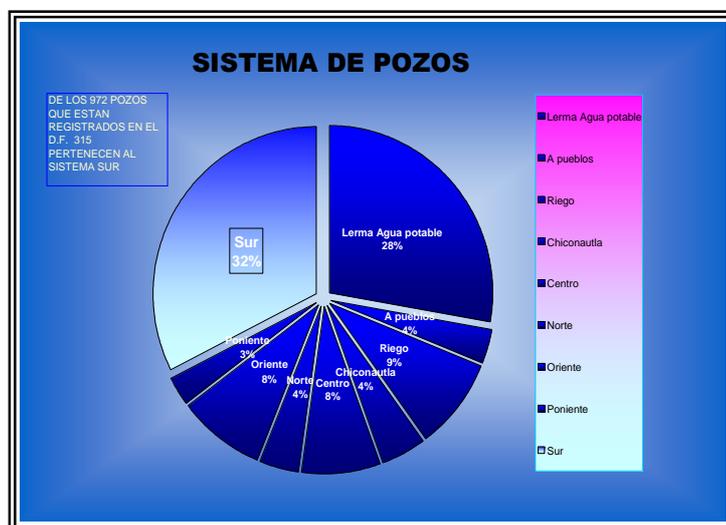


Figura 30. Sistema de pozos dentro del D.F.

A simple vista (Figura 30) se aprecia la gran cantidad de pozos que se encuentra ubicados en la zona sur, 315 de los cuales 229 están en operación, sin embargo, para la zona norte operan tan sólo 27 pozos. Esto es evidente por los efectos que ha tenido esta parte de la ciudad.

La evolución que presenta el sistema hidráulico está en función de la demanda de agua para la población, y se refleja en el equipamiento de la infraestructura. En tan sólo 30 años (1960-1990) la extracción de agua va del orden de los 11.8 m³/s a los 16.2 m³/s.

Por otra parte la ciudad ha dividido las operaciones del sistema de drenaje a cargo de la Comisión Nacional de Aguas y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, y en ambos casos se han visto deficiencias en el abasto y distribución de líquido. A pesar de que se cuenta con una infraestructura amplia, no es suficiente, por una parte se encuentra la vida útil de los pozos y por la otra encontramos las anomalías que presenta el subsuelo de la ciudad.

4.2 AGUA SUPERFICIAL

En la delegación Tláhuac existen algunos canales y cuerpos de agua importantes, el río de mayor extensión es el Amecameca, también existen aún canales y cuerpos de agua muy importantes para las zonas chinamperas, de esta manera se configura el sistema hidrológico de la zona de estudio (Figura 18).

El Río Amecameca es el segundo más largo de la cuenca de México con 72 Km de longitud, nace en las faldas del volcán Iztaccihuatl y terminaba en el Zócalo capitalino. Pasa por Amecameca, Tenango del Aire, Temamatla, San Pablo Atlazalpa, Chalco, Mixquic, Tláhuac, Xochimilco, Coapa, La Viga, Ixtacalco, y a partir de allí es conducido hasta el canal de desagüe, a través del canal Río Churubusco. El río conserva su cauce natural hasta Tulyehualco.

Los canales son utilizados básicamente para la agricultura, se estima en ocho km. y suman alrededor de 50 hectáreas de chinampas en producción. La existencia de los canales en San Andrés Mixquic, depende de que se mantengan las áreas protegidas y la expansión urbana no se incremente, es decir, mientras no cambie el uso del suelo, ya que la presión poblacional que se ejerce en esta comunidad es muy importante debido a que pone en peligro la conservación de las zonas chinamperas.

A partir del 2002 se ha presentado con mayor intensidad la urbanización en terrenos cercanos a las chinampas y canales “zonas irregulares” (Programa delegacional, 2005).

4.3 AGUA SUBTERRÁNEA

En la región del Cinturón Volcánico Transmexicano se ha identificado una evidencia que sugiere una continuidad hidráulica subterránea entre cuencas vecinas, como es el caso de la Ciudad de México.

En general, el proceso de recarga y descarga de flujos intermedios y regionales que se presentan en zonas montañosas y planicies respectivamente, han marcado un comportamiento hidrogeológico debido a que en las planicies de las cuencas se ha incorporado material geológico muy fino (gran cantidad de agua, >300%) las condiciones naturales de descarga existentes hacen que el agua subterránea tenga una carga vertical ascendente, la cual empuja a los granos de material sedimentario (Carrillo y Madery, 2005).

4.4 ABASTO DE AGUA EN LA DELEGACION TLÁHUAC

El sistema de agua potable está integrado por medio de pozos, tanques de regulación, rebombeos, redes de distribución, garzas y una planta potabilizadora. La red hidráulica tiene capacidad para dotar de agua a un 98% de sus habitantes. Los pozos existentes dentro de la delegación forman parte de dos acueductos (Chalco-Xochimilco y Tláhuac-Netzahualcóyotl) y abastecen a 56,000 tomas domiciliarias.

El Acueducto Chalco-Xochimilco, atraviesa la Delegación Tláhuac de sur a norte, su diámetro es variable, 22,340 m de largo, entrega agua a las colonias circundantes. En la parte sur aportan los pozos Tulyehualco y Santa Catarina un total de 170 l/s.

El acueducto Tláhuac-Netzahualcóyotl cuenta con 10 pozos, atraviesa la delegación de poniente a oriente y sale por Santa Catarina. Este acueducto está operado por la Gerencia de Aguas de Valle de México (GAVM), por lo que no entrega agua a Tlahuac, sin embargo, la DGCOH, actualmente el Sistema de Agua de la Ciudad de México (SACM), opera 5 pozos con un caudal de 210 l/s y 6 tanques de almacenamiento, cuya capacidad es de 2,490 m³, dichos tanques son abastecidos mediante rebombeos o directamente por el acueducto Chalco-Xochimilco.

La planta potabilizadora Santa Catarina recibe agua de los pozos Santa Catarina y una vez potabilizada la inyecta al acueducto Chalco-Xochimilco.

El abastecimiento de agua para el poblado de San Andrés Mixquic se efectúa mediante los tanques Tetelco I y II con una capacidad de 220 m³ cada uno y estos son abastecidos por el rebombeo Tetelco. Tal rebombeo está ubicado en la colonia La Conchita y tiene una capacidad para bombear hasta 250 l/s.

En la delegación se cuenta con una capacidad instalada máxima de 1,720 l/s en los rebombeos y de estos 600 l/s son enviados a la delegación de Iztapalapa.

La distribución del agua se realiza mediante las redes primarias y secundarias, de la primera existe en la delegación 52.58 m de tubería de 0.76 m. de diámetro y el resto de la red tiene diámetros de 30 m y menores y una longitud de total de 479 Km. Las zonas que no cuentan con una red de distribución, son abastecidas por hidrantes públicos y carros tanque, así mismo se cuenta con dos garzas para el llenado de los carros tanques que se localizan en San Nicolás Tetelco y San Juan Ixtayopan.

4.5 LOCALIZACIÓN DE POZOS EN LA ZONA DE ESTUDIO Y REGIONES HIDROLÓGICAS.

Se consideran los pozos dentro de una superficie aproximada de 15 km². La primera limitante para realizar el análisis consiste en que los pozos salen de funcionamiento y esto origina la interrupción en el registro de datos continuos, otra limitante para el análisis es que dentro del pueblo de San Andrés Mixquic no hay pozos perforados y la concentración de pozos se localiza en las zonas de transición (Figura 32). Se muestra la densidad de pozos hacia las faldas del volcán Teutli, localizado en la delegación de Milpa Alta.

Por su ubicación, los pozos se agruparon en tres regiones. En la región I. Tecomitl-Tetelco (zona de transición); región II, Teutli-Tulyehualco (escurrimiento) y la región III, Mixquic- Santa Catarina (sobre la planicie), MSC- 1 al 14 (Tabla 6).

Tabla 6. Densidad de pozos en la zona de estudio por regiones. Recopilación del SACM y CAEM 2009

DENSIDAD DE POZOS QUE TIENEN INFLUENCIA EN LA ZONA DE ESTUDIO						
PUEBLO	POZOS	Año de Perforación	Nivel Estático en m	Nivel Dinámico en m	Elevación En m	Caudal l/s
	Tec- 10	1963	9.00	28.56	2245	112
	Tec- 11	1972	11	50.60		62.06
	Tec- 12	1972	20.05	23.45		182
	Tec- 13	1972	21.82	26.06		226
	Tec- 14	1963				41
Tecomitl- Tetelco Región I	Tec- 15	1971	17.24	17.90		230
	Tec- 16	1971				29
	Tec- 17	1972	24.08	42.92		169
	Tec- 18	1964	8.7	24.85	2246	99
	Tec- 19	1962	18	33.45	2251	52
	Tec- 20	1972	10.11	25.52		81
	Tec- 5	1972	38.95	43.62		135
	Tec- 6	1963	21.15	21.45		202
	Tec- 7	1972	36.75	37.05		56.60
	Tec- 8	1972	43.75	46.82		133
	Tec- 9	1963			2245	
	R- 18	1984	93.16	119.83		66.52
	R-11	1984	91.84	101.94	2246	56.41
	R- 22	1984				77

	R- 24	1986	93.04	98.05		79.81
	R- 25	1984	116	128.05		81.83
	R- 28	1985	62.58	72.85		76
	Tulye- 1	1962	13	13	2251	214
	Tulye- 3	1972	32.50	32.51		175
	Tulye- 4	1962	11.3	11.53	2245	180
	Tulye- 5	1972	22.60	22.66		182
	Tulye- 6	1963	8.40	9.12		240
Teutli-Tulyehualco Región II	Tulye- 7	1994				
	Tulye- 8	1963	12.65	13.10	2250	255
	Tulye- 9	1972	31.70	32.15		131
	Tulye- 10	1962	10	10.7	2246	241
	Cerrillos- 1	1980	89.53	93.44		77
	Cerrillos- 2	1981	83.50	88.00		83
	Cerrillos- 3	1989	117.50	123.48		77
	Escudo Nacional 2	1984	105.88	108.00		74
	S- 13	1985	74.62	76.48		75
	Santa Catarina -14					80
	Santa Catarina -13					75
	Santa Catarina -12					75
Santa-Catarina Mixquic	Santa Catarina -11	1972				75
Región III	Santa Catarina -10					80
	Santa Catarina -9					85
	Santa Catarina -8					70
	Santa Catarina -7					75
	Santa Catarina -6					80
	Santa Catarina -5					70
	Santa Catarina -4					75
	Santa Catarina -3					71
	Santa Catarina -2					70
	Santa Catarina -1					75

La tabla anterior muestra que los pozos Tecomitl son los más viejos. En los años 70 y 80 se perforaron cuando se estableció la veda a la extracción de agua

subterránea en las zonas norte y centro. Muchos de ellos ya no operan en la actualidad debido a que presentaron deterioro en la calidad del agua, no apta para el consumo humano o por que se agotó el agua. Ejemplo de ello son los pozos Tecomitl 1, 2, 3, 4 y 5 que para 1990 ya no extraen.

Para conocer las características hidráulicas de dichas regiones y para saber cuál ha sido más explotada, se analizó la información del periodo comprendido de 1990 a 2006. Los intervalos que se utilizaron para la interpretación de los datos son a cada 5 años, el caudal de los pozos se calculó en millones de metros cúbicos (Mm³) y para poder visualizar la información disponible fue necesario extrapolar datos en la tabla aplicando un promedio en los periodos donde no hubo registro (Tabla 7).

La funcionalidad de un pozo radica en la cantidad y calidad del agua que extrae y la cancelación puede ser por diversos factores, por ejemplo, el pozo Tec- 5, fue perforado en 1972, y aportaba 11 l/min (litros por minuto), para 1991 incrementó a 69 l/min y para 1992 su caudal fue de 84 l/m. Sin embargo, en 1993 dejó de operar. Como este pozo, otros más presentan la misma historia, algunos de ellos son; Tec- 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, que dejaron de operar en 1990 por diversas razones, en algunos caso por mala calidad de agua o por que se agotó el agua. La DGCOH tiene una normatividad referente al paro de pozos, por lo que si un pozo sale de operación, este debe ser remplazado por otro que aporte el mismo caudal.

4.5.1 REGIÓN I Tecomitl-Tetelco.

Los pozos que se encuentran en esta región son 21. Sin embargo, solamente se tomaron en cuenta 15 para el análisis: Tec- 5, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17 y 20; R- 11, 18, 22, 24, 25 Y 28. Para 1990 la extracción en promedio fue de 1.68 Mm³/año, su caudal disminuye hasta 1.2 Mm³ en 2006, en promedio, debido a la calidad del agua. Estos pozos abastecen a los poblados de San Antonio Tecomitl y San Andrés Mixquic, excepto los "R", que forman parte del denominado "Sistema Aguas del Sur" para el abastecimiento de la delegación de Milpa Alta, la extracción de agua de los (Tec) es bombeada hacia los tanques Tetelco I y II, con capacidad de almacenamiento de 220 m³ cada uno.

4.5.2 REGIÓN II Teutli- Tulyehualco

En la región II existen 27 pozos, de los cuales se consideraron 12 para el análisis, Tulyehualco 1 al 10, Cerrillos 1 y 2, debido a que solamente de estos pozos se obtuvo información de extracción. Los Cerrillos son los pozos con mayor profundidad, 200 y 250 m respectivamente, esto es debido a que se encuentran en las laderas del volcán Teutli. Esta región mantiene una extracción anual promedio de 20.19 Mm³.

4.5.3 REGIÓN III Mixquic-Santa Catarina

La información para esta región fue proporcionada por el SACM, integra 14 pozos denominados Ramal Mixquic-Santa Catarina. Solamente se tiene caudales de extracción para el periodo de 2003, 2004, 2005 y 2006, con una extracción promedio por pozo de 75 l/min. Con la finalidad de homogenizar la base de datos se aplicó la extrapolación de los caudales sacando un promedio hacia el periodo de 1990 a 2002, la localización de esta batería de pozos es sobre la planicie a 3.5 km. al norte del pueblo de Mixquic, la separación entre pozos es de 500 m.

TABLA 7. Datos de extracción por regiones hidrológicas en Mm³. Modificado del SACM (2009)

AÑO	REGIÓN 1	REGIÓN 2	REGIÓN 3
1990	25297128	23678280	33112800
1991	25738632	22716432	30905280
1992	22971031	20855808	33112800
1993	24143436	20792736	35320320
1994	23573160	21294684	30905280
1995	21851820	21299940	33112800
1996	21885984	24966000	35320320
1997	21575880	22424724	33112800
1998	20727036	20905640	35320320
1999	20811132	19476108	33112800
2000	19560304	18874296	35320320
2001	19725768	17728852	35320320
2002	17085416	19129212	35320320
2003	14905915	18924228	32650272
2004	18351324	18848016	27877824
2005	17865194	15268680	25733376
2006	19801980	16185100	25733376
TOTAL	355871140	343368736	551291328

4.6 EVOLUCION DE LA EXTRACCION DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

En la Figura 31 se grafica el caudal de extracción de agua subterránea por regiones con la finalidad de determinar que región ha sido la de mayor extracción

Para 1990 la extracción de agua anual total en las 3 regiones en Mm³ fue de 82. En la región I fue de 25, mientras que en la región II 23 y en la región III 33.

De los 65 pozos que operaban en 1990, para 1995 quedaron 41, ya que los pozos Tec- 1 al 6 y R-22 dejaron de extraer agua, esto significa una disminución de caudal extraído.

En 1995, la extracción de agua subterránea registra una tendencia en la disminución, ya que la región I extrajo 21 Mm³, en dos años hubo una disminución de 4 Mm³, mientras que en la región II disminuyó 2.4 Mm³ respecto a 1990, en la región III se mantiene constante el caudal con 30 Mm³.

Para el 2000 de manera paulatina se registra la reducción de la extracción de agua subterránea en la zona de estudio, en la región I se registra 19.5 Mm³, para la región II; 18.87 Mm³ y en la región III; 35.3 Mm³/año.

Sigue la tendencia a disminuir los caudales para el año de 2005, ya que la región I suma un total de 17.8 Mm³, en la región II, pasa de 18 a 15.2 Mm³ y en la región III, con 25.7 Mm³.

Los registros de extracción en el 2006 presentan un ligero incremento en la región I, ya que pasa de 17 a 19 Mm³, esto sucede en las tres regiones, pues para la región II, se incrementa de 15 a 16 Mm³, y en la región III, se registra constante con 25 Mm³/año.

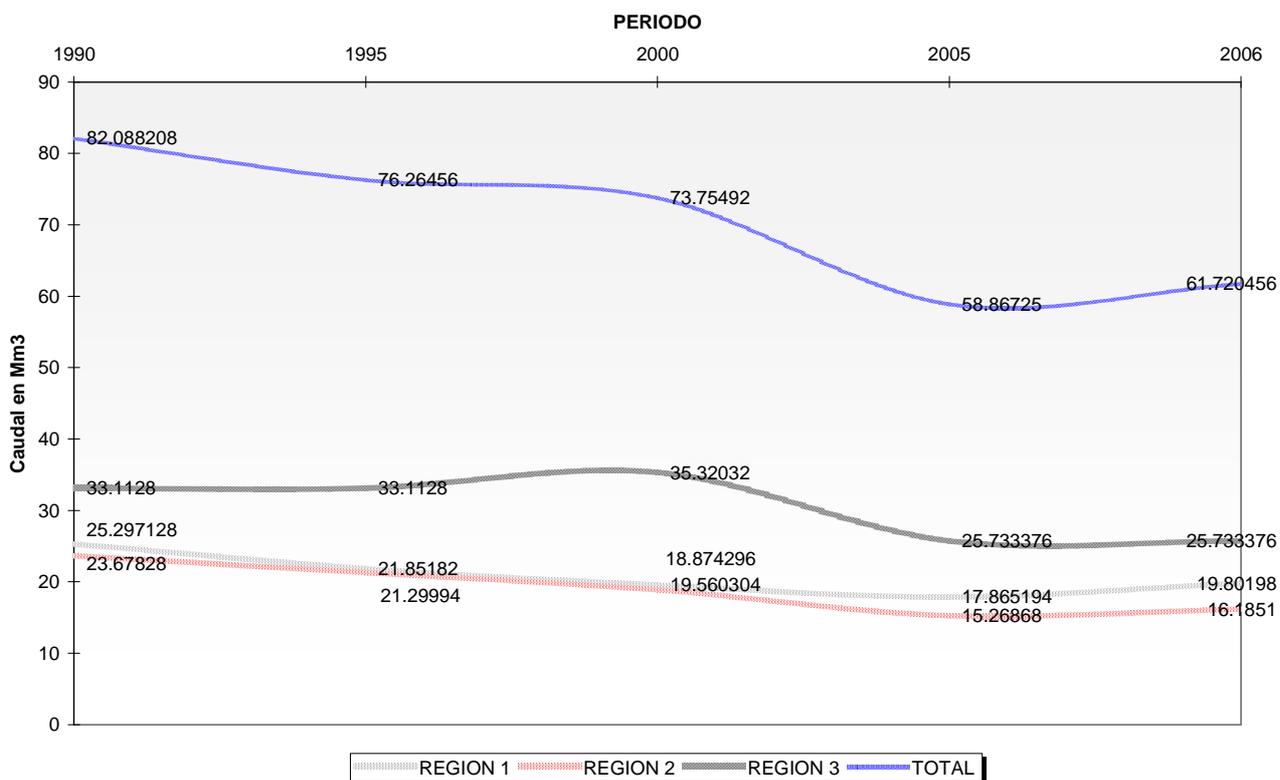


Figura 31. Evolución de la extracción de agua subterránea en la zona de estudio para el periodo 1990-2006. Modificado del SACM 20009. En general los caudales tiene una tendencia en disminuir el aporte de agua, sin embargo, la cantidad de extracción es considerable e importante para el abasto. La gráfica presenta una extracción casi homogénea en las tres regiones analizadas, siendo la zona III la de mayor aporte.

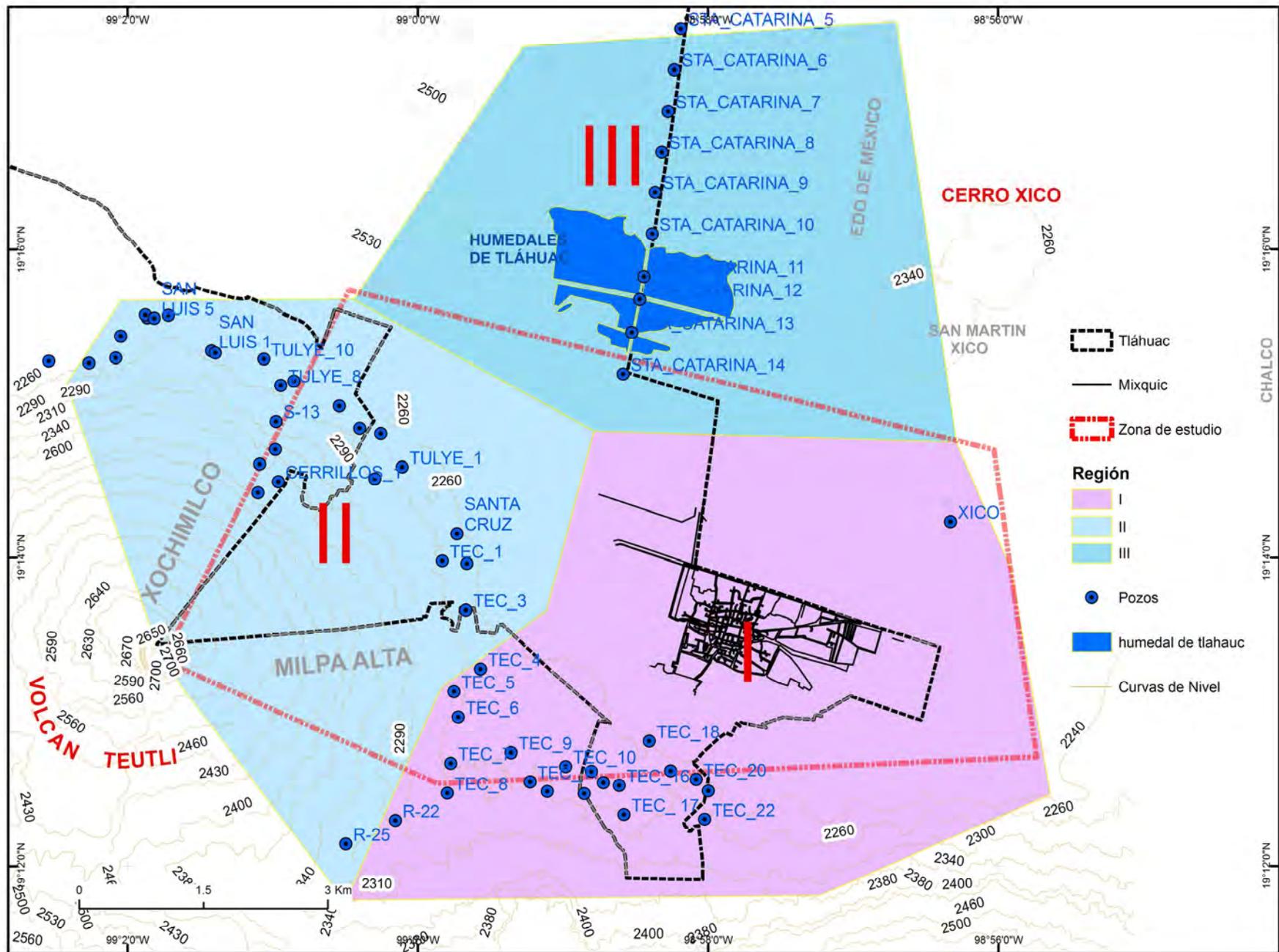


Figura 32. Localización Pozos y zonificación del agua subterránea

En términos globales se tiene una extracción de 1 250, 531,204 Mm³/ en 16 años, de estos corresponden 355,871,140 Mm³ a la región I para la región II 343,368,736 y la región III 551,291,328 Mm³ (Figura 33).

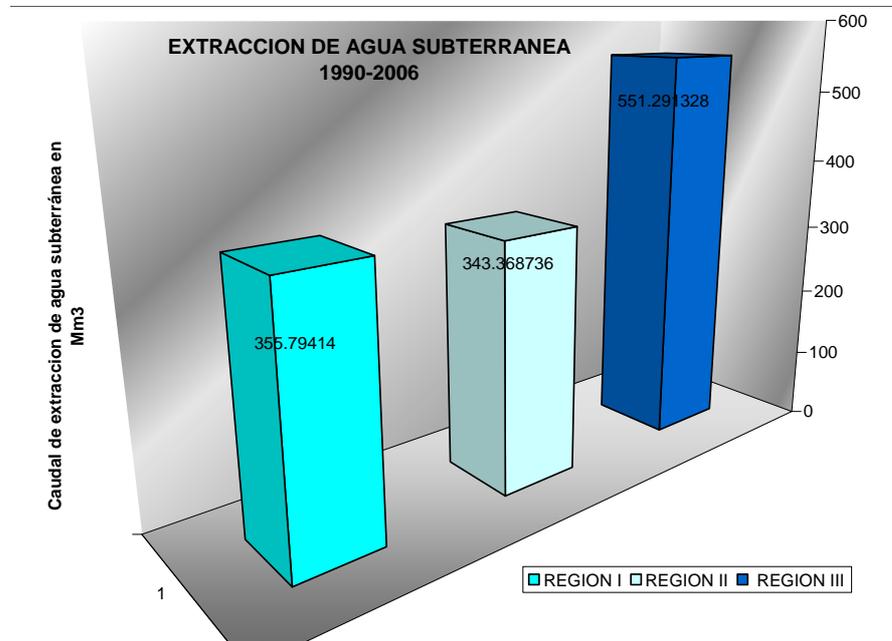


Figura 33. Extracción total de agua subterránea en la zona de estudio. De acuerdo al análisis realizado la región III es la que más agua subterránea ha extraído, con 551 Mm³/16 años. Modificado del SACM (2009).

4.7 EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES PIEZOMETRICOS.

Para 1985 el nivel del agua subterránea en la parte sur de la Ciudad de México fluctuaba entre 30 y 40 m de profundidad alrededor de Xochimilco, en la zona de Chalco para esta fecha se encontraba entre 10 y 25 m de profundidad, mientras que para la zona de Mixquic el nivel piezométrico estaba a 22 m. Para 1990 la profundidad del nivel de agua alrededor de Xochimilco fue entre 30 y 50 m, de profundidad, de 10 y 30 m. en Valle de Chalco y Mixquic registra 26 m aprox. Para el año 2001 los niveles están a una profundidad de 30 a 50 m. y en el pueblo de San Andrés Mixquic ahora es de 30 m. Tabla 8 y Figura 35.a, b, c y d (DGCOH, 2005).

La tabla siguiente muestra que en el periodo comprendido entre 1990-1995 ocurrieron los mayores descensos en los niveles estáticos dentro de la zona de estudio, esto debido a la extracción de agua. En un lapso de 16 años el nivel piezométrico se abatió 15 m. es decir 1.06 m/año, y hasta 22 m. en la zona norte de Chalco, zona donde los abatimientos han sido los más importantes.

La evolución de la elevación del nivel estático varió de 2215 en 1985 a 2205 para 2001 esto es igual a 10 m de abatimiento.

Tabla 8. Evolución del nivel estático en la zona de estudio (Lasser y Asociados, 2001).

Año	Evolución del nivel estático en la zona de estudio
1985	La profundidad del nivel estático varía entre 10 y 25 m. En la zona de Mixquic está a 22 m y alrededor del volcán Teutli a 25 m de profundidad (Figura 35.a)
1990	La profundidad del nivel estático es de 20 m y 30 m, en la planicie está a 26 m de profundidad, existe un abatimiento del nivel de 4 metros, hacia el Teutli bajo a 5 m de profundidad, ahora son 30 m. (Figura 35.b)
1995	En el plano regional el nivel de agua alcanza una profundidad casi homogénea de 30 m. La zona de Chalco alcanza el mismo nivel que Mixquic; ahora el nivel freático está 10 m más profundo respecto a 1982, mientras que alrededor del Teutli esta a 40 m de profundidad (Figura 35.c)
2001	Para este año el nivel se mantiene a 30 y 40 m de profundidad. En Chalco continúa descendiendo y en Mixquic bajó 5 m más, esto es, 37 m (Figura 35.d)

Al comparar las figuras 35 a, b, c, y d se puede ver, que a pesar de no existir pozos de extracción en Mixquic, este padece el efecto de la extracción de agua, pues al bombearla en las inmediaciones de este pueblo, origina que el agua subterránea fluya en forma casi radial, pues a partir de aquí existen pozos en Chalco, Tetelco, Tecomitl, Milpa Alta, Tulyehualco, Santa Catarina y San Luís. Hacia el cerro de la Estrella, es posible que tal extracción catalice el fenómeno de subsidencia y agrietamiento, pues el nivel de agua desciende en promedio 1.06 m/año.

Aunado a la constitución geológica de arcillas lacustres, el volumen de la extracción local ha disminuido, sin embargo, el efecto regional de subsidencias sigue latente (Figura 34).

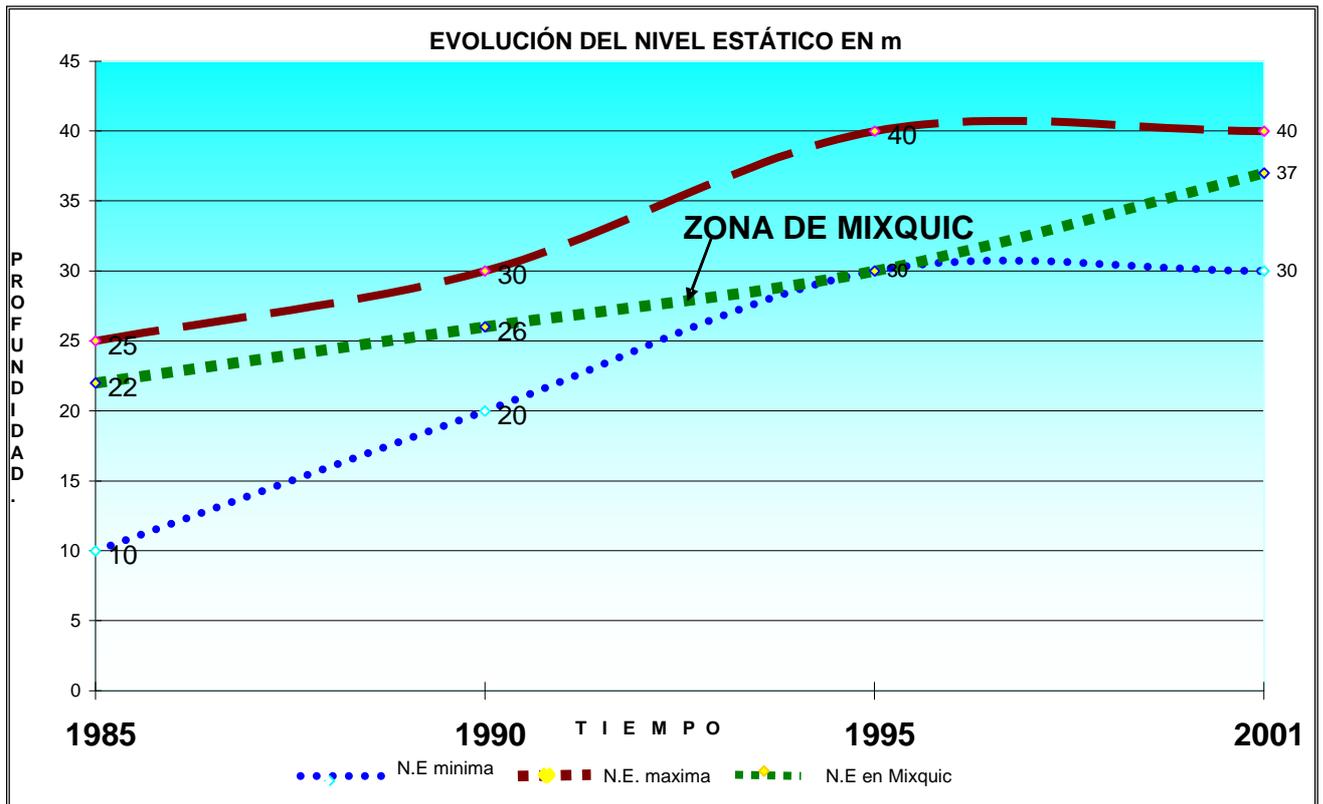
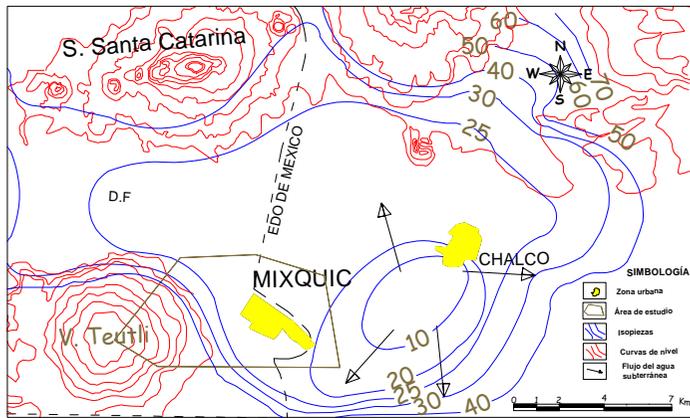
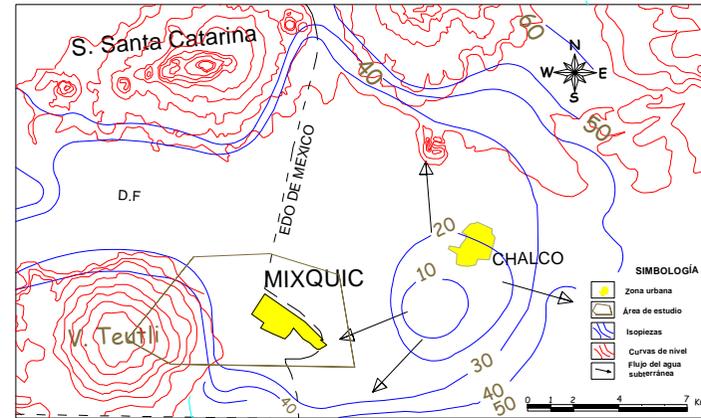


Figura 34. Dinámica del nivel estático en 16 años (Adaptado del SACM, 2009). Los niveles estáticos de la zona de estudio sí presenta un descenso de entre 10 a 30 m en 20 años, y en general gran parte de la planicie lacustre presenta en superficie deformaciones en el suelo debido a la pérdida de presión hidrostática.



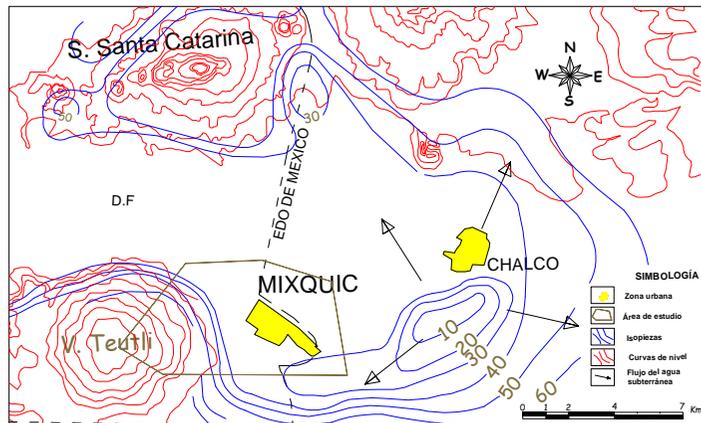
FUENTE: Lasser y Asoc.

Figura 35.a Nivel piezométrico 1985



FUENTE: Lasser y Asoc.

Figura 35.b Nivel piezométrico 1990



FUENTE: Lasser y Asoc.

Figura 35.c Nivel Piezométrico 1995

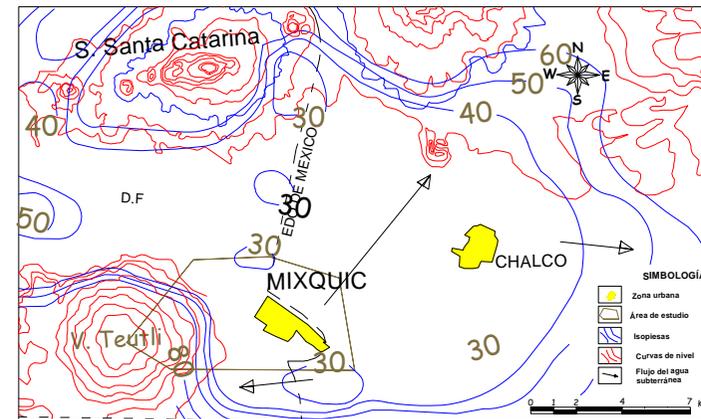


Figura 35.d Nivel Piezométrico 2001

Figura 35. Evolución Nivel estático para los periodos 1985, 90, 95 y 2001 (a, b, c y d)

Fuente: Adaptado de Lasser y asociados, 2001.

V ANÁLISIS DEL HUNDIMIENTO

La vulnerabilidad de la zona de estudio depende de una serie de agentes que a continuación se mencionarán. De esta manera podremos entender los efectos del hundimiento de San Andrés Mixquic. ¿Qué agente perturbador ejerce mayor influencia en la generación de grietas?, ¿Cuál es la dinámica geológica?, ¿Qué dirección predomina en las grietas?, ¿Cuál es el modelo de hundimiento que presenta la zona de estudio? y ¿Hasta dónde puede afectar el hundimiento a los habitantes cercanos a las zonas de fractura? Son algunas de las preguntas a las que daremos respuesta con el análisis e interpretación de los datos disponibles.

Los agentes perturbadores que podemos mencionar como posibles causantes del hundimiento en la zona de estudio son dos básicamente: **A)** La geología superficial que se ha mencionado en el capítulo III. Y **B)** Extracción de agua subterránea, que se analizó en el capítulo IV. Ya que la falla Perú aparece después del temblor de 1985 (información verbal, 2007) y a la fecha sigue activa, su desplazamiento (varía entre 15 y 59 cm de escalonamiento).

5.1 HUNDIMIENTO Y AGRIETAMIENTO EN SAN ANDRÉS MIXQUIC

El hundimiento de la Ciudad de México se registra por medio de una red de bancos de nivel (B.N.) localizados en el espacio con información de coordenadas X, Y y Z, es decir, latitud, longitud y altitud. En ellos se mide la altura del terreno sobre el nivel del mar (cota) en un momento determinado; las cotas son el resultado de la diferencia entre dos periodos. El movimiento que presentan estas cotas, por lo regular marca un descenso del terreno y en algunas ocasiones la medición puede contener errores debido a factores como mala interpretación de los datos, reposición de la placa, mala calibración del instrumental utilizado, entre otras.

5.2 SEGUIMIENTO DE NIVELACIONES REALIZADAS POR LA DGCOH (1986-2005)

El seguimiento de los bancos de nivel es realizado por varias instituciones; en el presente trabajo se utilizan los datos que posee el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, en particular la Oficina de Estudios Especiales que

proporcionó datos de 1986 a 2005, para estos estudios las mediciones datan de los años 1985, 87, 89, 92, 94, 96, 98, 2000, 02 y 05. Se conservó la nomenclatura del Sistema de Aguas para referirse a los bancos de nivel.

En la zona de estudio existen 138 bancos de nivel (Figura 37), estos se agruparon en líneas o ejes con la finalidad de abarcar la zona de estudio 15 Km. aproximadamente.

De esta manera se designaron los Ejes 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5' y 6-6'. En dirección E-W y Los Ejes A-A', B-B', C-C', D-D', E-E' y F-F'. De N-S (Figura 38). Con los datos de estos ejes se crearon gráficas que representan la evolución de hundimiento que han tenido los bancos de nivel para el periodo de 20 años, de esta manera se puede interpretar la dinámica que presenta la zona de estudio. A continuación se expone de una manera sistemática por medio de ejes.

Eje 1-1

Formado por 7 bancos de nivel (Figura 36) se ubican en la parte N del pueblo de San Andrés Mixquic, su orientación es E-W estos bancos están sobre la calzada Tláhuac- Chalco, a 3 Km., al norte del pueblo de San Andrés Mixquic, cerca de los humedales de Tláhuac. En este eje se presentan bancos que registran movimiento descendente de hasta 6.9 m en 20 años, tal es el caso del **B (S14E11)01** que para 1985 esta a una cota de 2235.885 msnm. Para el 2000 presenta un descenso de 5.14 m. en 2005 tiene una de 2229.345 msnm, se ha hundido 6.54 m. en 20 años esto equivale a 32 cm por año. Si tenemos en cuenta a la ciudad de México se hunde entre 10 y 15 cm por año, este banco lo hace al doble de la Ciudad de México.

Los mayores descensos que registran los bancos de nivel se presentan en la parte central de este eje, es decir, que el mayor hundimiento se presenta hacia el E, muy cerca de los humedales de Tláhuac. Los bancos de mayor altura están hacia la parte W, cerca del poblado de San Pedro Tláhuac, las nivelaciones para el año de 1985 eran alrededor de 2236 msnm, sin embargo para 2005 se registran 2231 msnm. Por lo tanto, el eje 1-1, presenta un cono de hundimiento hacia la parte central.

La inestabilidad del terreno que presentan estos bancos de nivel quizá se puede asociar a la cercanía de la batería de pozos (Mixquic-Santa Catarina) que extraen un importante caudal de agua (70 Mm³/año). Por otra parte, se tiene en cuenta que en esta área existe un importante paquete lacustre del antiguo lago de Chalco-Xochimilco. Razón por la cual todos los bancos de nivel que integran el eje 1-1 están ubicados sobre arcilla, material muy susceptible a la consolidación.

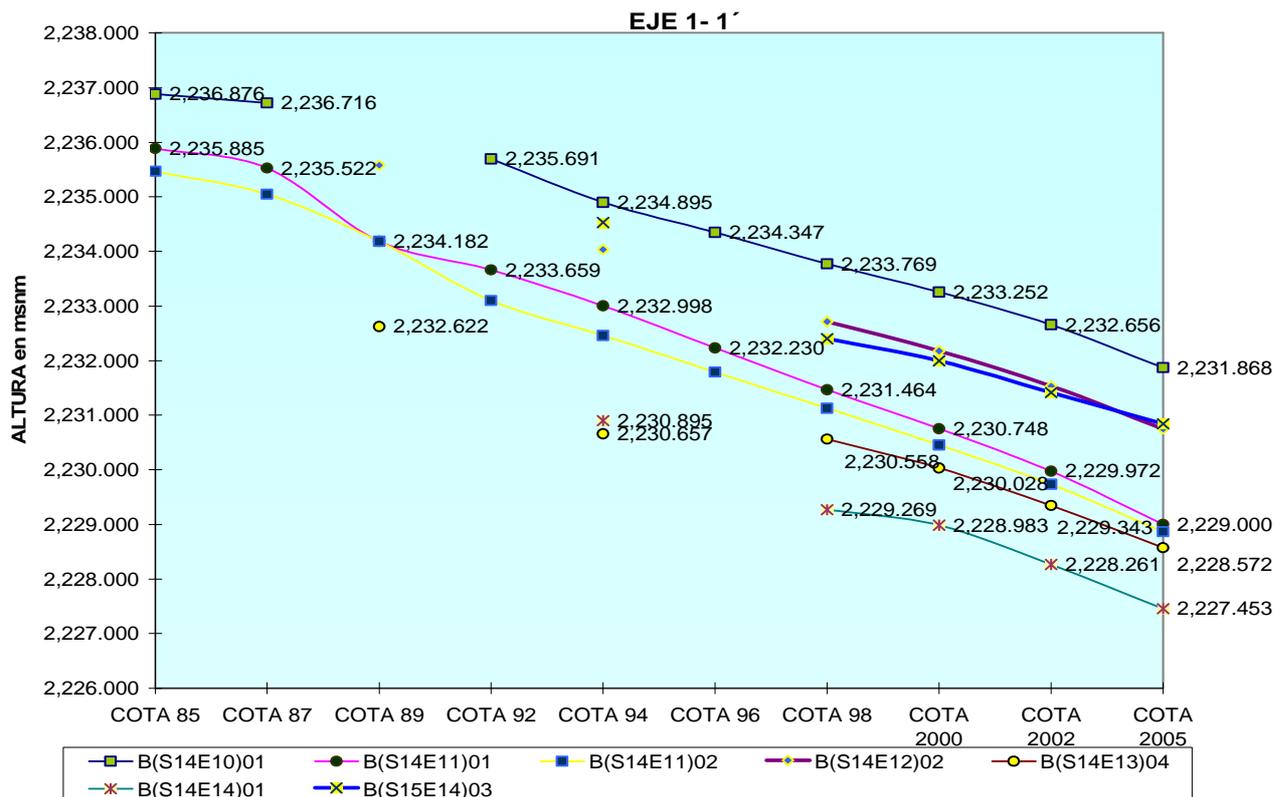


Figura 36. Eje 1-1' con 7 bancos de nivel es el eje con mayor inestabilidad dentro de la zona de estudio, en el cual se registra un descenso en el terreno que va de 4 a 7 m. La tendencia de todos los bancos de nivel sigue un comportamiento homogéneo y simétrico en su descenso durante los 20 años de registro. Elaborado con datos de la DGCOH, 2009.

Eje 2-2

Formado por 8 bancos de nivel, su orientación es E-W, en este eje se registran hundimientos de hasta 5 m, tal es el caso de banco B (S14E11)01, con una cota de 2,335.885 msnm para 1985 y de la 2,229.00 msnm para la fecha 2005. Sin embargo, existen bancos de nivel donde el movimiento es casi nulo. Por ejemplo; el banco de nivel P (S11E18)02 con 2,254.495 msnm en 1985 y en 2005 2,254.294 msnm, es decir 2 cm de hundimiento en 20 años. Este banco está instalado sobre las laderas del Volcán Teutli, como es de esperarse a medida que los bancos de nivel se ubican lejos de las laderas del volcán Teutli, mayor es el hundimiento (Figura 39).

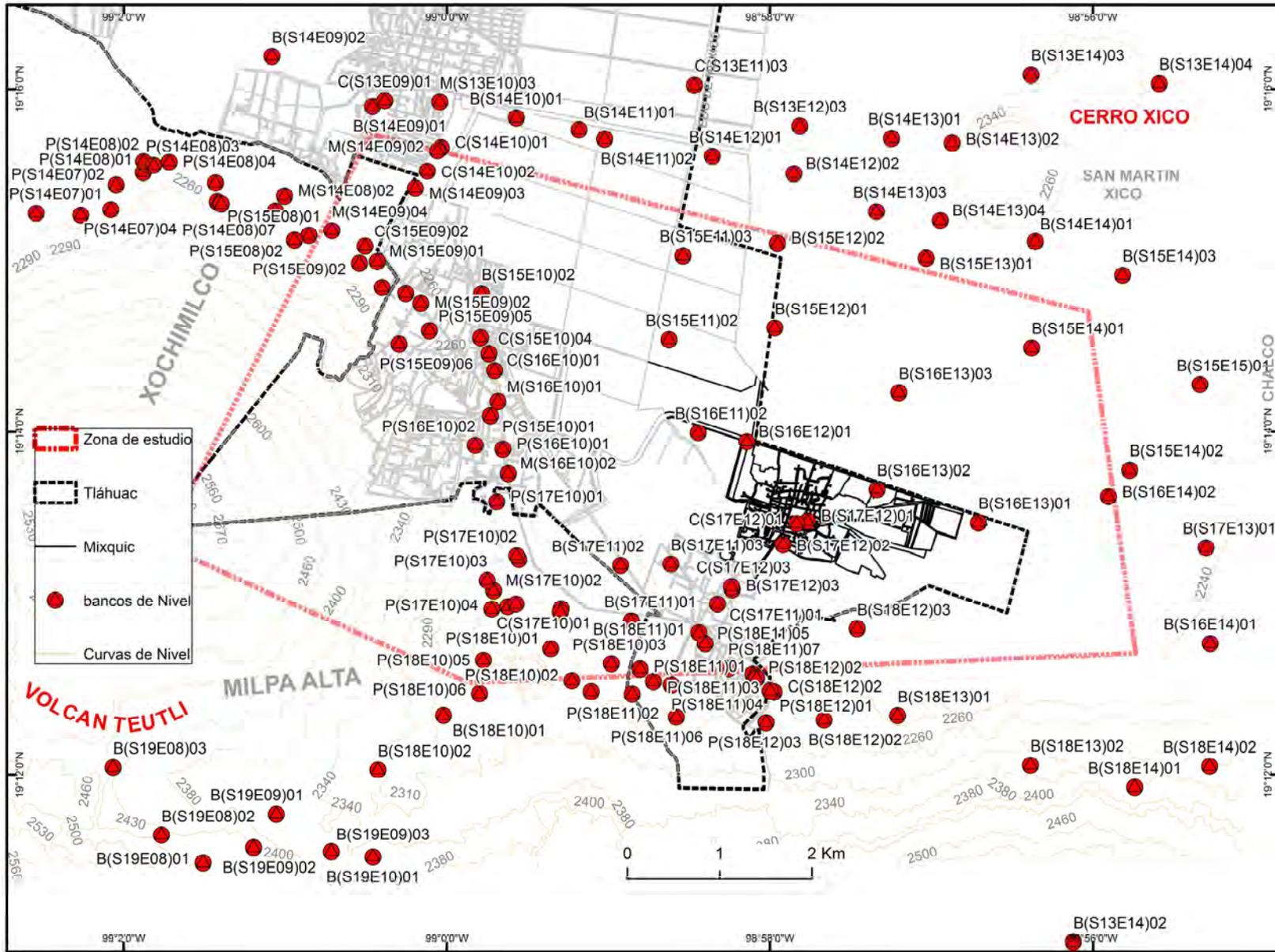


Figura 37. Localización de bancos de nivel en la zona de estudio. Modificado del SACM, 2009.

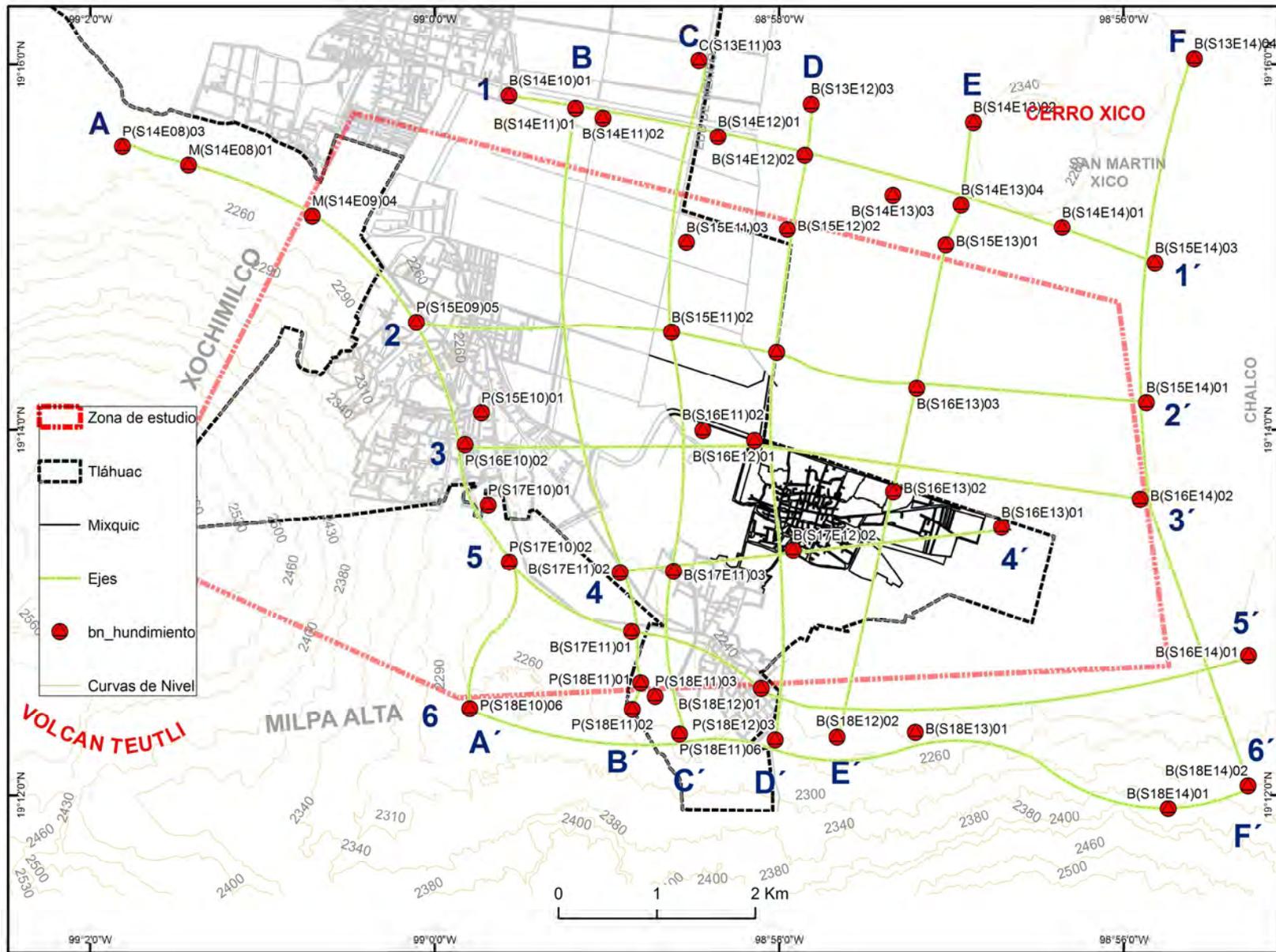


Figura 38. Ejes que contienen las gráficas para evaluar la evolución de hundimiento en la zona de estudio Modificado del SACM, 2009.

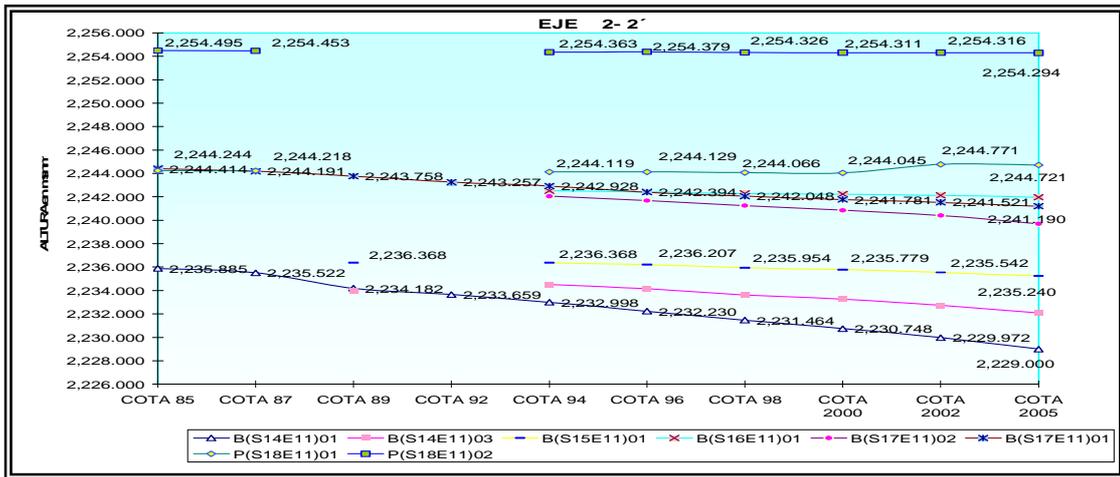


Figura 39. Eje 2-2' ubicado sobre material arcilloso en la parte E y hacia el W sobre roca volcánica, se puede apreciar las diferencias que existen en función del material donde se encuentre instalado. Elaborado con datos de la DGCCH, 2009.

Eje 3-3'

Comprende 4 bancos de nivel (Figura 40) ubicados en la parte central del área de estudio, su orientación es E-W, en esta zona, los bancos de nivel registran hundimientos de hasta 3 m en las partes bajas, mientras que para las partes altas el movimiento es nulo, la tendencia es muy similar a la que presenta el eje 2-2'. La evolución de este eje es importante, ya que los bancos de nivel están instalados sobre el pueblo de San Juan Ixtayopan, lugar donde se han registrado algunas grietas que pueden relacionarse con la geología del lugar. El banco de nivel que registra un descenso mayor es el B (S16E12)01, con 3.2 m en 9 años.

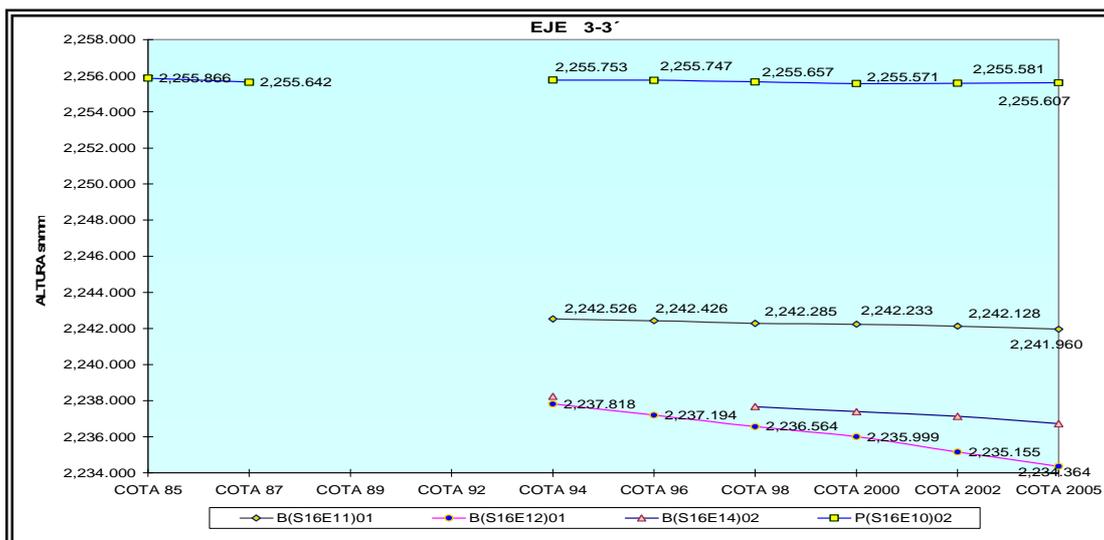


Figura 40. Eje 3-3'. Eje central de la zona de estudio, cualquier movimiento aunque pareciera insignificante podría dañar la infraestructura existente. Elaborado con datos de la DGCCH, 2009.

Eje 4-4´

Dispuesto en dirección E-W, atraviesa los poblados San Antonio Tecomitl y San Andrés Mixquic, comprende 6 bancos de nivel, sin embargo, sólo se muestran los 3 más representativos de la evolución de hundimiento que ha tenido el poblado de San Andrés Mixquic; en la Figura 41 se registran hundimientos de 1.5 a 3 m. en 20 años. Existe una tendencia de hundimiento considerable, el banco de nivel con mayor hundimiento es el B (S17E11)02, que en 1994 estaba a 2,242.54 msnm y en 2005 fue de 2,239.710 msnm. Esto es, 2.34 m. en tan solo 11 años, esto equivale a 21 cm/año.

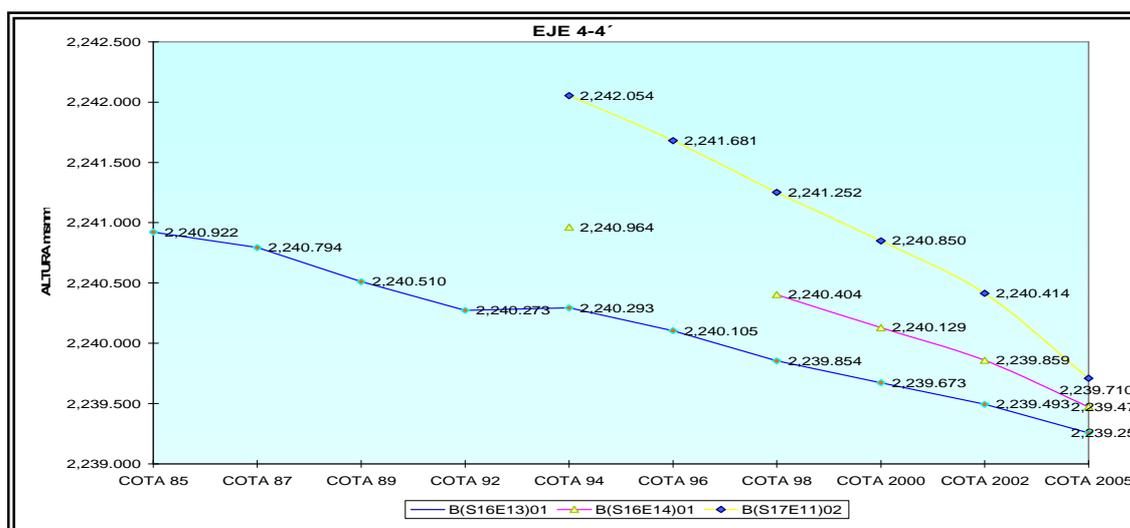


Figura 41. Eje 4-4´ Tendencia de hundimiento que prevalece en San Andrés Mixquic. Elaborado con datos de la DGCOH, 2009.

Los bancos de nivel B (S17E12)01 y B (S14E14)01, presentan una tendencia casi homogénea en su hundimiento. Excepto el banco de nivel B (S17E12)01 que presentó durante 1992 una relativa estabilidad descendente y en 1999 continúa con su hundimiento de 8 cm/año. En general se puede decir que estos bancos de nivel se mueven a un ritmo de 11 cm/año. Y en 20 años ha descendido 1.66 cm. Pareciera que el hundimiento no es tan alto como en el eje 1-1´, sin embargo, es muy importante ya que afecta de manera directa a la población, y los movimientos en esta zona por mínimos que sean, pueden causar severos daños a las construcciones.

Eje 5-5 y 6-6´

Los bancos de nivel que conforman los ejes 5-5´ y 6-6´ están instalados sobre roca volcánica, por tal motivo, tienen movimiento poco perceptible, en promedio es inferior a 5 cm/año. Y su evolución es muy semejante para todos a lo largo de los 20 años de registro.

Eje A-A'

En este eje existen ocho bancos de nivel, con orientación N-S. Contiene los bancos existentes en la ladera E del volcán Teutli y debido a su ubicación no presentan hundimiento del terreno, ya que están sobre roca volcánica. Como se presenta en la Figura 42, no hay movimientos descendentes en 20 años, la mayoría de los bancos lo hacen a un ritmo poco perceptible, en promedio se hunde 1 cm en 20 años.

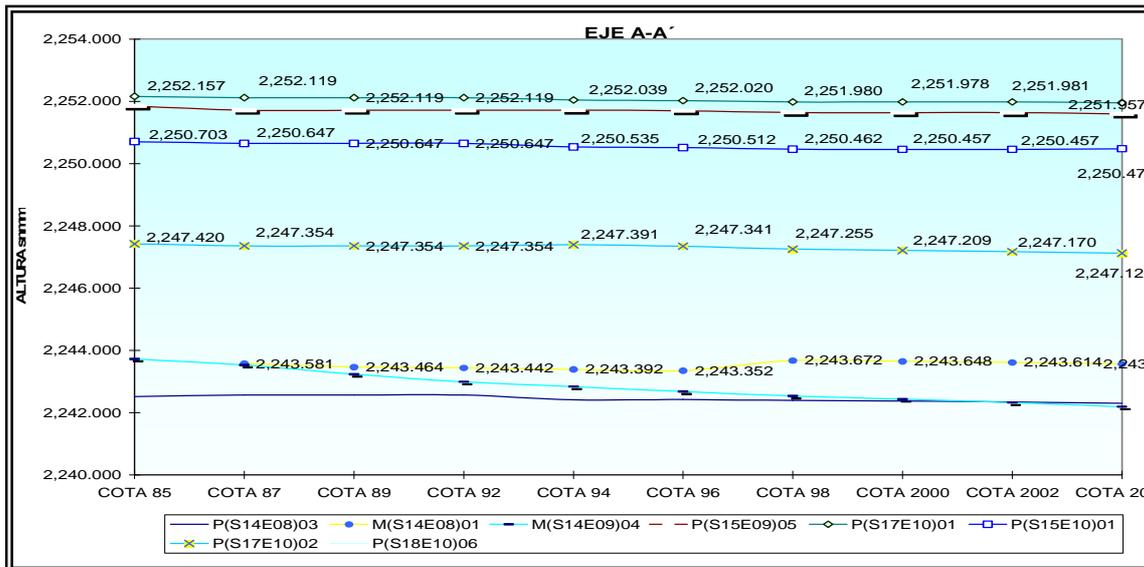


Figura 42. Eje A-A' El hundimiento es poco perceptible a lo largo de 20 años, ya que está asentado sobre roca volcánica del Teutli. Elaborado con datos de la DGCOH, 2009.

Eje B-B'

Está formado por 8 bancos de nivel, su orientación es de N-S, el hundimiento que presenta es heterogéneo y va desde los 6 m. en 20 años, registrados en el banco de nivel B(S14E11)01, hasta los 2 cm. en 20 años en el banco P(S18E11)02 ubicado al N (Figura 43) también hay bancos de nivel que tienen un movimiento medio de 3 m en 20 años, como es el caso del banco P(S18E11)02 ubicado casi al centro del eje.

En las gráficas se aprecian los diferentes ritmos de hundimiento que existen sobre el área de estudio, la dirección de hundimiento es de N-S y NE.

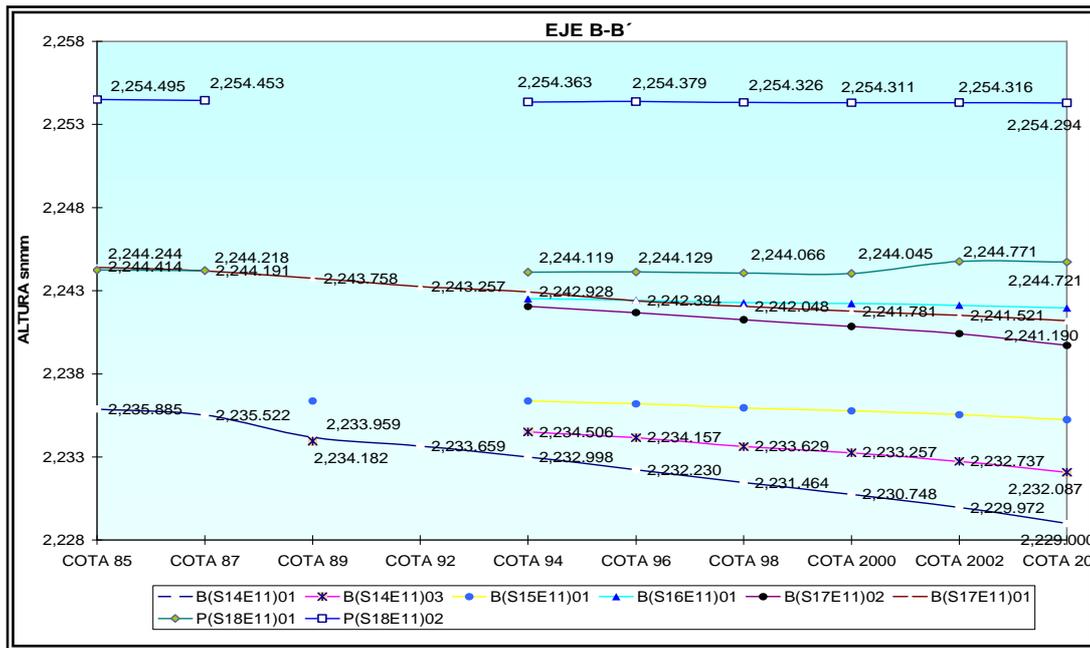


Figura 43. Eje B-B' Los bancos de nivel se mueven de una manera heterogénea, es decir, que el suelo de la zona de estudio está constituido por diferentes materiales a profundidades diferentes. Esto es la causa de hundimientos heterogéneos. Elaborado con datos de la DGC0H, 2009.

Eje C-C'

Conformado por 5 bancos de nivel situados en la planicie, dentro de la zona chinampera de Tláhuac, en promedio se hunden 2 m en 20 años, sin embargo, hay algunos que presentan un movimiento rápido y en tan sólo 2 años se hunden 3 m, tal es el caso del banco de nivel B (S17E11)03, el cual registra un cota para 1994 de 2,240.510 msnm y en 1996 2,237.552 msnm, es decir, 3 m. de diferencia y para el 98 su movimiento fue ascendente con 2,238.287 (Figura 44) El historial del banco de nivel B (S15E11)03 es similar en su movimiento descendente.

El movimiento descendente que se pudiese registrar no afectaría de manera directa a la población, ya que es una zona agrícola, y es poco probable que ocasione algún riesgo directo. Sin embargo, es importante tener en consideración las mediciones del eje, ya que su movimiento se ubica cerca del pueblo de San Andrés Mixquic y el paraje Tepantitlamilco en el pueblo de Tetelco. En donde el hundimiento del terreno se manifiesta con mayor fuerza y es muy probable que de construir casas en esta área, a futuro, la población se encontrará vulnerable ante el movimiento constante del suelo que se registra en la zona.

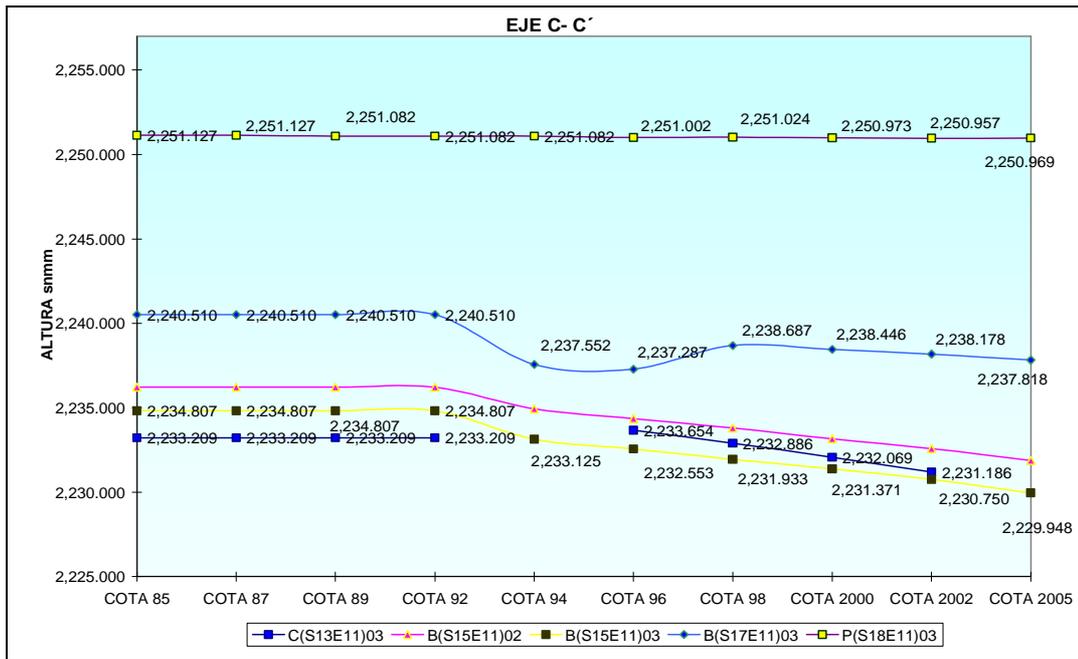


Figura 44. Eje C-C', los bancos de nivel comienzan a tener variaciones de movimiento entre banco y banco, debido a la diferente consolidación que tiene el suelo. Elaborado con datos de la DGCOH, 2009.

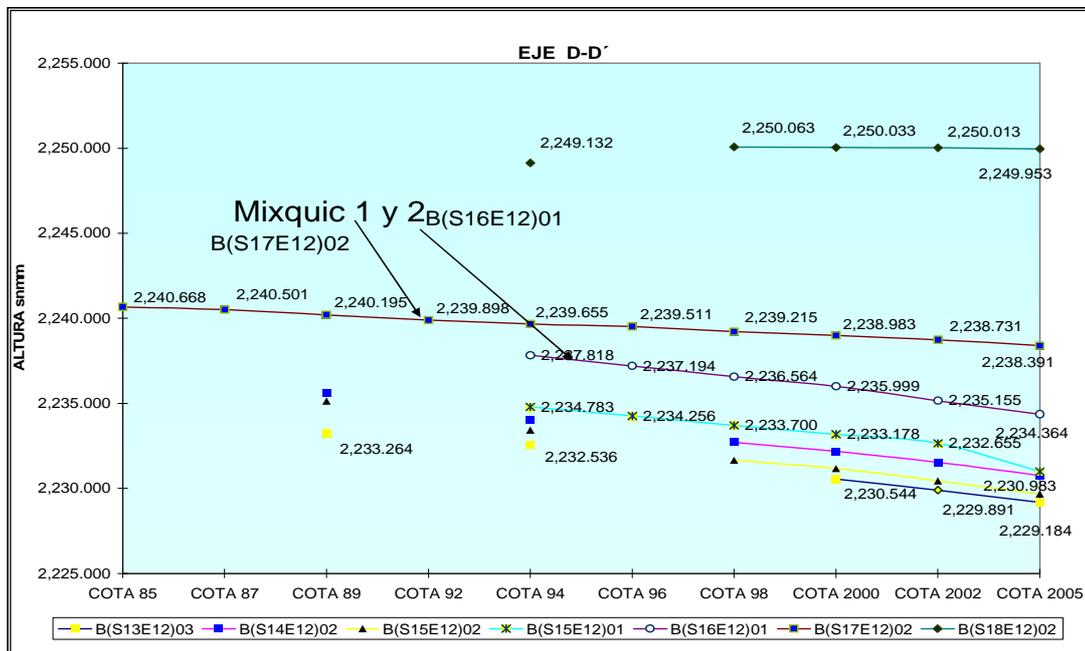


Figura 45. Eje D-D' los bancos de nivel se mueven de una manera similar con un promedio de 16 cm/año. Elaborado con datos de la DGCOH, 2009.

Eje D-D'

Agrupar 7 bancos de nivel ubicados en dirección N-S, el mayor hundimiento que se registra en estos bancos de nivel desciende en dirección NE y varía entre 3 y 5 m. sobre los humedales de Tláhuac. El banco B (S14E12)02 para 1989 registró 2,235.57 msnm y en 2005, 2,230.746 msnm. Un total de 4.8 m en 16 años. Los de menor movimiento los encontramos hacia el S, con 0.9 m en 20 años. El promedio de hundimiento de este eje en 20 años es de 2.95 m, el hundimiento medio se localiza cerca del pueblo de San Andrés Mixquic, ya que el banco de nivel B (S16E12)01 en 1989 se encontraba a una altura de 2,234.364 msnm y en el 2005 registra 2,237.818 msnm, en total 3.45 m de hundimiento en 16 años. Mientras que el banco B (S17E12)02 ubicado dentro del pueblo de San Andrés Mixquic, registro un hundimiento de 2.27 m en 20 años, es decir 11 cm por año (Figura 45).

Eje E-E'

Formado por 8 bancos de nivel orientados de N a S, el principal hundimiento que se registra es entre los bancos B(S14E13)04, B(S15E13)01 y B(S16E13)03 entre 2 y 4 m, y hacia el NE el hundimiento es homogéneo. En la Figura 46 se aprecia dos tipos de hundimiento, los bancos ubicados a una elevación mayor a 2,245 msnm presentan hundimiento (menor a 1 m en 20 años), y los bancos de nivel ubicados sobre la planicie a 2,220 msnm, presentan hundimiento mayor a 3.5 m en 20 años.

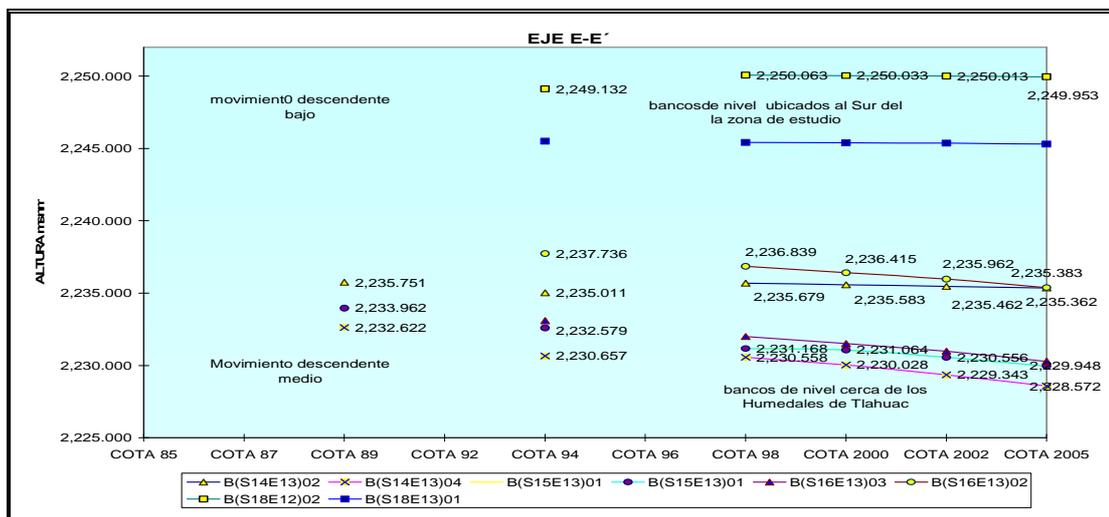


Figura 46. Eje E-E' los bancos de nivel que lo conforman se mueven de una manera similar. Elaborado con datos de la DGCOH, 2009.

De este eje únicamente el banco de nivel B (S16E13)02 está dentro del área de interés en el barrio de Santa Cruz. Con una altura de 2,237.736 msnm en 1994, y su evolución del 2005 fue a 2,235.383 msnm, esta información muestra un hundimiento medio de 2.35 m en 11 años. Es decir 21cm /año.

Si comparamos la evolución de los tres bancos de nivel (B (S16E12)01, B (S17E12)02 y B (S16E13)02) ubicados dentro del poblado de San Andrés Mixquic (Figuras 45) resulta que la velocidad de hundimiento es heterogénea y a medida que los bancos de nivel se acercan a los humedales de Tláhuac presentan mayor velocidad de hundimiento. El análisis de la información de los registros de los bancos de nivel antes mencionados, se infiere que el hundimiento varía entre los 11 y 21 cm/año, dando un promedio de 16 cm/año.

La dirección del hundimiento converge hacia la parte NE, es decir hacia los humedales y la zona de Chalco Edo. De México.

Eje F-F'

Sobre este eje se presentan 4 bancos de nivel, orientados en dirección N-S, los registros de este eje son a partir de 1994, el mayor hundimiento se presenta en el banco B (15E14)03, con 1.6 m en 11años, la dirección del hundimiento es hacia el E del pueblo de San Andrés Mixquic. Y el registro de menor hundimiento lo tiene el banco de nivel B (S16E14)02 con 0.7 m (Figura 47).

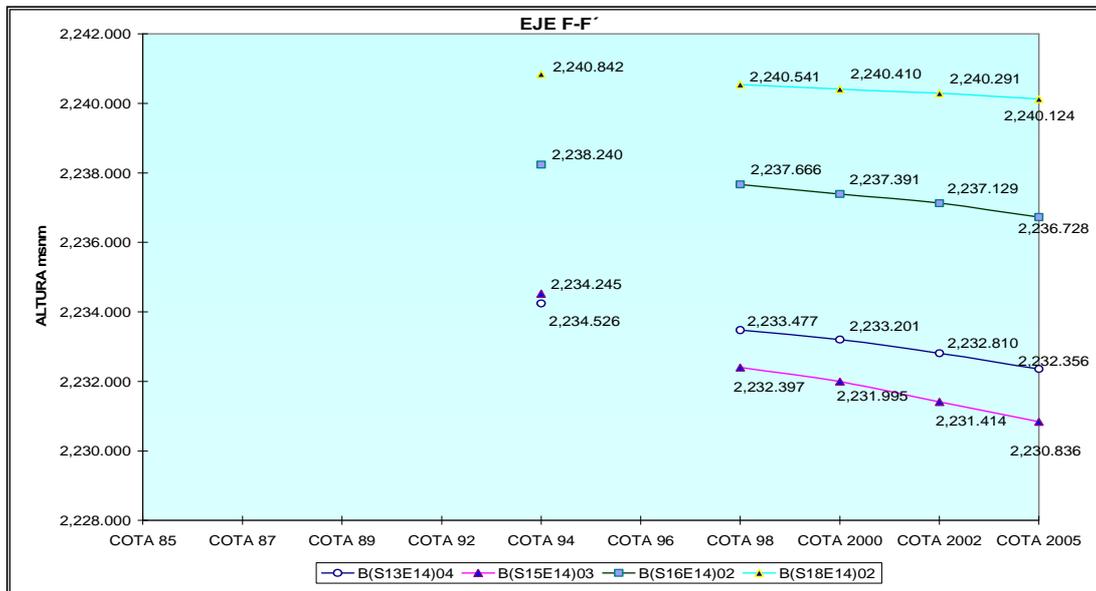


Figura 47. Eje F-F' bancos de nivel con hundimiento homogéneo, ubicados al E del pueblo de Mixquic. Elaborado con datos de la DGCOH, 2009.

5.3 ZONIFICACIÓN DEL HUNDIMIENTO EN LA ZONA DE ESTUDIO

La zonificación del hundimiento se elaboró en función de los valores registrados en 138 bancos de nivel para el periodo 1985 al 2005. Como se observó en las graficas anteriores, muchos bancos de nivel no tenían registro desde 1983 a 1996, en tal caso y para representar los datos de una manera más adecuada se recurrió al método de extrapolación cuando no tenían registro, se aplicó un promedio y se proyectó la secuencia del comportamiento de cada banco.

Los rangos tienen una ligera variación con respecto a los datos de las graficas anteriores, pero en términos generales son adecuados para representar la zonificación del hundimiento en el área de estudio, esta zonificación se da en función a los valores máximos y mínimos que presentan dichos bancos. Cabe aclarar que el hundimiento mayor que se tiene en la Figura 36 eje 1-1' es de 6.9 m/20 años y el que se obtuvo con la extrapolación de promedio dio un registro de 7.8 m/20 años.

La base de datos se maneja en el software Arc Gis 9.2. Los rangos se etiquetaron como hundimiento alto, medio y bajo (Tabla 9). De esta manera se obtuvo la visualización de la zona de estudio en 3D y el mapa de zonificación de hundimiento (Figura 48 y 49) respectivamente.

Tabla 9. Rango de hundimiento en la zona de estudio Adaptado de DGCOH, 2009

DATOS	Hundimiento bajo en m	Hundimiento Medio en m	Hundimiento Alto en m
SIN EXTRAPOLAR	0.01 a 1.5	1.6 a 3.5	3.6 a 6.9
EXTRAPOLADOS	0.01 a 2.2	2.3 a 5.2	5.3 a 7.8

5.3.1 HUNDIMIENTO ALTO

La zona que registra el mayor hundimiento es la parte NE del pueblo de San Andrés Mixquic, con un valor máximo de hasta 7.8 m/20 años. Los bancos de nivel se ubican dentro del área de los humedales de Tláhuac, sobre la calzada Tláhuac- Chalco, estos bancos corresponden a los ejes 1-1' y 2-2'.

El hundimiento alto se localiza sobre la planicie, en donde hay principalmente actividad agrícola. Está expuesta a inundaciones periódicas, esto lo hace aún más vulnerable a la deformación del suelo.

A la fecha, el hundimiento del suelo representa un riesgo mínimo directo a la población, pues no existe en esta zona construcciones de viviendas. Esta zona se ubica espacialmente en la parte central de la delegación de Tláhuac, pero considero que a futuro pueden crearse viviendas, las cuales serán muy vulnerables a los hundimientos.

El hundimiento promedio que presenta esta zona es de 29 cm/año, un total de hundimiento de 7.816 m en 20 años. Los bancos de nivel con mayor hundimiento en 20 años son: B (S15e14)03 con 7.816 m, B (S14E13)04 con 7.543 y B (S14E11)01 con 7.434, B (S15e12)02 con 7.012, B (S14E11)02 con 7.348 y B (S14e12)02, con 6.906.

5.3.2 HUNDIMIENTO MEDIO

Corresponde a los ejes de 3-3', 4-4' y D-D', E-E', mismos que pasan por los pueblos de San Andrés Mixquic, San Juan Ixtayopan y San Antonio Tecomitl. Es la zona con mayor vulnerabilidad ante el movimiento del suelo, por tratarse de asentamientos humanos. Este movimiento del suelo se refleja por grietas en bardas, pisos, techos e infraestructura pública y civil.

El hundimiento promedio registrado es de 16 cm/año, esto es igual a 3.20 m/20 años, como se vio en las figuras. El movimiento de los bancos de nivel es casi homogéneo, los que están cerca de las laderas del volcán Teutli se mueven menos, mientras aquellos localizados en la planicie tienen un descenso constante hasta la fecha.

El hundimiento medio se extiende de NW a SE en dirección a Chalco, Edo. de México, desde los pueblos de San Juan Ixtayopan y San Pedro Tláhuac, cubriendo prácticamente toda la zona de estudio asentada sobre la planicie.

5.3.3 HUNDIMIENTO BAJO

El suelo descansa sobre derrames de basalto. La Figura 42 muestra la estabilidad de estos bancos de nivel con líneas casi horizontales y con variaciones en cm. En esta gráfica se aprecia la evolución de su hundimiento, mientras aquellos de la planicie se hunden a razón de m, cerca de las laderas del volcán el hundimiento es de cm.

De acuerdo con las graficas se puede decir que conforme los bancos de nivel se alejan de las elevaciones topográficas, se vuelven más inestables, por lo que la región de mayor inestabilidad es la zona central, donde se ubican los humedales de Tláhuac a 3 km al norte del pueblo de San Andrés Mixquic.

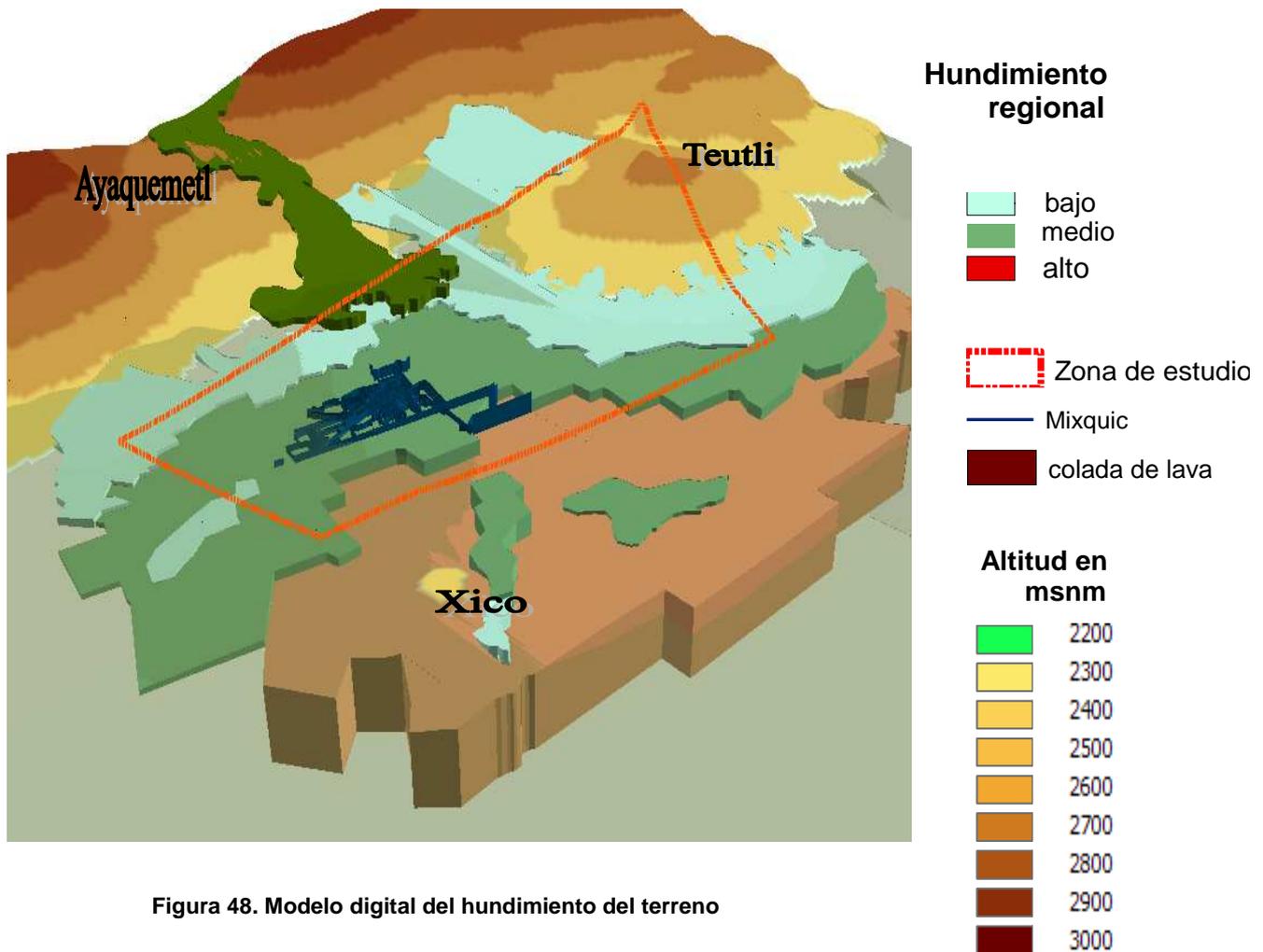


Figura 48. Modelo digital del hundimiento del terreno

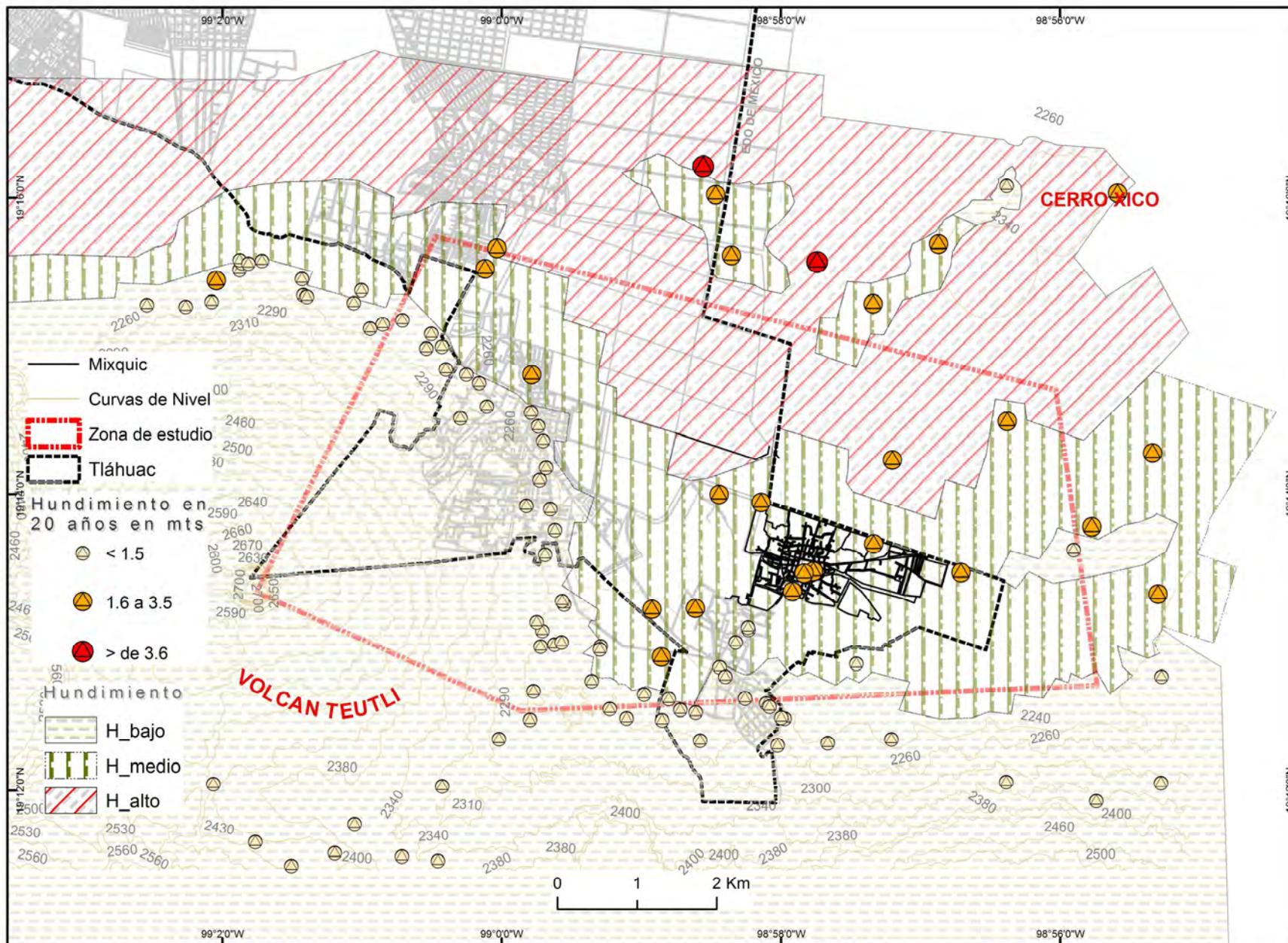


Figura 49. Zonificación del hundimiento en la zona de estudio
 Elaborado con datos de la DGCOH, 2009

VI ANÁLISIS CONSTRUCTIVO

El agrietamiento del suelo en la cuenca de México es muy común, de acuerdo con varios autores como Fries (1960), Bloomfield (1975), Nakamura (1977), Vázquez y Jaimes (1984), Sheridan and Wohletz (1983), Mota-Sánchez en De Cserna *et al.* (1988). Los cuales han descrito ampliamente las fallas localizadas en la cuenca de México.

En la Figura 50 se muestra un recorte de la sección del plano estructural regional de Vázquez y Jaimes (1989), en el cual se puede identificar la distribución de las fallas cercanas a la zona de estudio, como de la Sierra Santa Catarina, de la Sierra Chichinautzin y de la Sierra de las Cruces. Las fallas de interés para la zona de estudio son el alineamiento de Topilejo- Xico, es del plioceno-Cuaternario, algunas fallas forman pequeños grabens, el rumbo preferente es este-oeste.

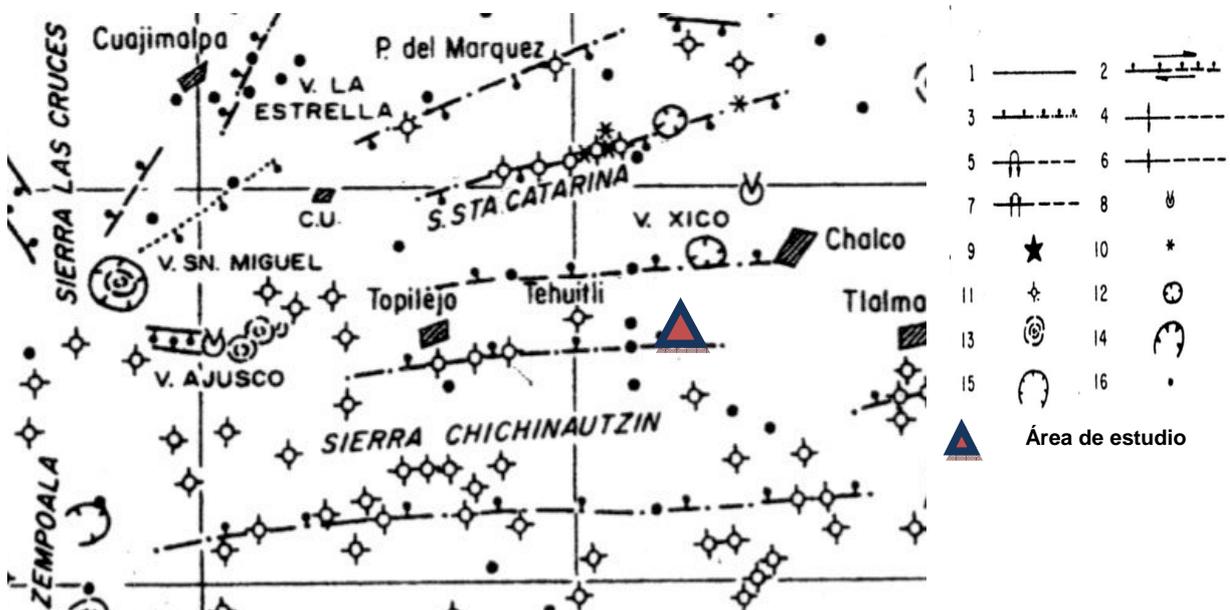


Figura 50. Plano estructural regional de la cuenca de México. 1.- Fractura, 2.- Falla normal, línea discontinua en donde está sepultada, 3.- Falla normal, con líneas punteadas y discontinuas donde está inferida, 11.- cono freático magmático, 14.- caldera, 15.- volcán colapsado, 17.- según Mota Sánchez elipse de deformaciones del Eoceno Tardío-Oligoceno temprano. Fuente: Vázquez y Jaimes 1989.

Las fallas normales sepultadas han sido observadas en bancos de material, y otras, inferidas con base en la alineación de conos cineríticos monogenéticos. Son los casos de Santa Catarina con el volcán El Pino; el alineamiento al sur de Topilejo con el E el Volcán Teutli. La dirección de desplazamiento de estas es de oeste-este a lo largo de la planicie de Chalco (SHCP, *op. cit*). Implica la existencia de un relleno granular; en consecuencia, proponen un graben llamado de Chalco.

La información precedente refuerza el análisis de la fractura Perú, tema principal de esta investigación, ya que es el resultado de procesos multifactoriales, dos de ellos, los más importantes son la geología superficial y la extracción de agua subterránea. De acuerdo con el análisis realizado, estos factores están ocasionando severos daños a la infraestructura en la parte S de la Delegación Tláhuac.

El siguiente paso consistió en realizar recorridos de campo en la zona de estudio, con la finalidad de recabar la mayor cantidad de información sobre la situación actual que prevalece en el pueblo de San Andrés Mixquic, para saber cómo y a cuanta población está afectando la fractura Perú.

6.1 DISTRIBUCIÓN DE GRIETAS EN SAN ANDRÉS MIXQUIC

En 1996 la DGCOH (ahora el SACM) realizó un censo de grietas que afectan la infraestructura urbana, como los sistemas hidráulicos, sin embargo, no todas las grietas pueden ser registradas, ya que en algunos casos son tapadas o reparadas por las autoridades, efecto que dura poco tiempo y esto hace imposible tener un catálogo bien definido de todas la grietas que existen en el Distrito Federal.

En el 2002 la DGCOH retoma el censo de 1996 y considera a la Delegación Tláhuac como un área susceptible a la presencia de grietas. En particular la Colonia del Mar al NW de la delegación de Tláhuac y el poblado de San Andrés Mixquic al S-E, y menciona que en la mayoría de los casos las grietas constituyen un sistema asociado a terrenos de cultivo que antiguamente fueron chinampas.

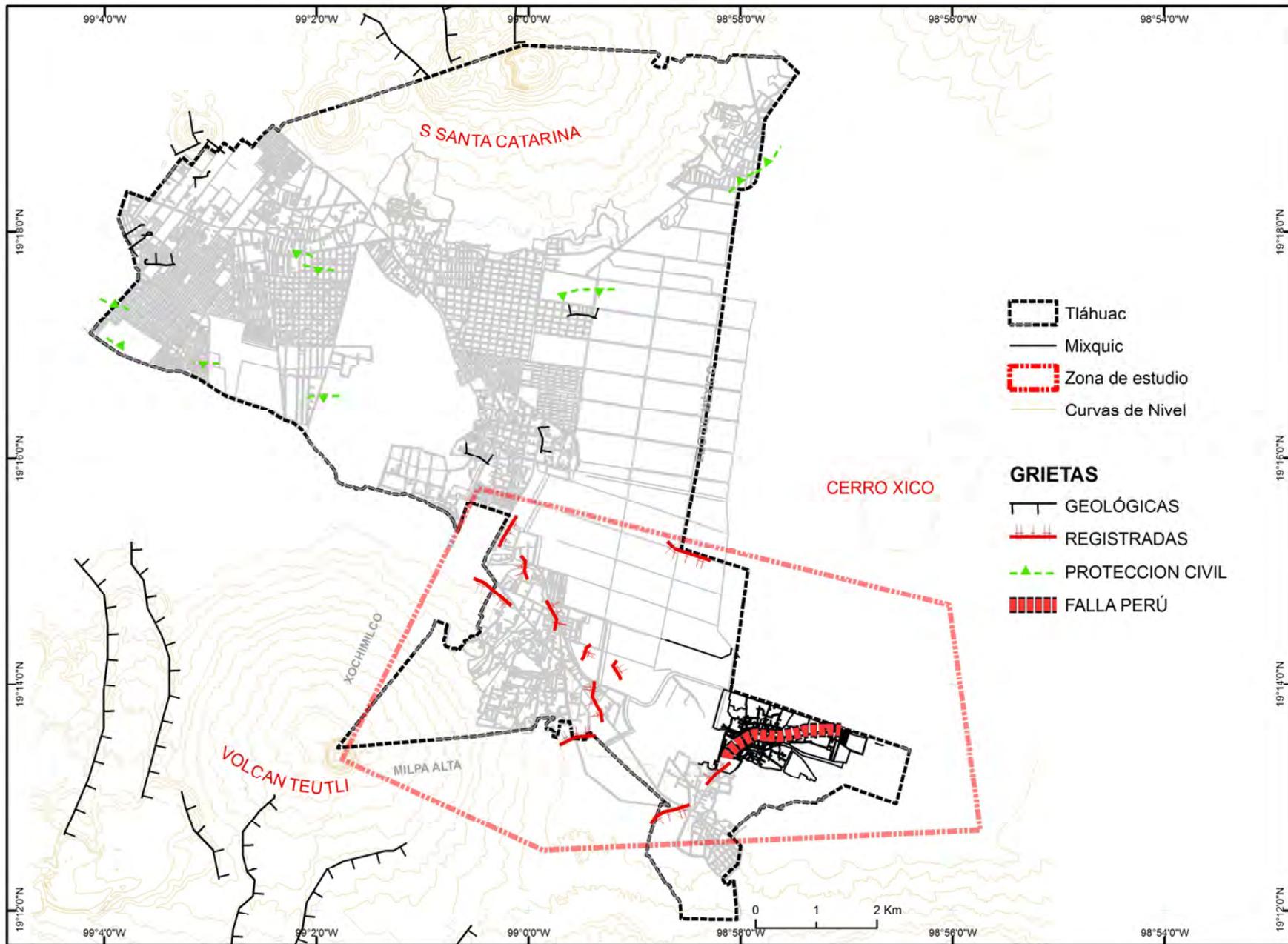


Figura 51. Mapa de grietas en la Delegación Tláhuac. Adaptado de INEG y Protección civil Tláhuac 2008.

6.2 LA FALLA PERU (DGCOH)

Esta falla se localiza en el costado N de la iglesia de San Andrés Mixquic, los daños que ha causado se observan en el panteón de la misma, donde se tiene un escalón desplazado verticalmente 70 cm (Consultores en geología, 2002).

Esto es lo que se conoce de esta fractura, sin embargo, la investigación de la fractura Perú tiene su propia configuración y no está instrumentada. Se presenta su configuración con apoyo en el plano de grietas que se generó con la información disponible (Figura 51), en la cual se compilan grietas geológicas (falla) de mayor extensión y grietas inducidas por el hundimiento con un tamaño inferior, registradas por Protección Civil y las que se registraron durante los recorridos de campo.

6.3 DIAGNÓSTICO DE LA FALLA “PERÚ”.

La falla Perú tiene una orientación de 260°, una longitud aparente de 650 m y 85 cm de ancho aproximadamente, con base en el recorrido que se realizó, se puede relacionar con algunas grietas a su alrededor con casi la misma dirección. Para el análisis de esta falla se recorrió el área de estudio en dos direcciones donde se registran daños de NW y NE a partir del panteón del pueblo.

La falla Perú presenta su máximo hundimiento al costado W del panteón con 1.66 m, la consolidación registrada en un periodo de 20 años, esto equivale a 80 cm/año¹ y su desplazamiento vertical varía entre 20 y 60 cm de escalonamiento sobre la calle Medellín, el movimiento de la falla es de modo II “grieta por cortante” (Figura 53).

Hacia la parte NW del panteón de San Andrés Mixquic afecta al tianguis ubicado de forma permanente frente a la iglesia, en la calle Medellín; se visualizan daños a las viviendas sobre la calle Nuevo México; la falla se divide en dos direcciones, una al NE 20° con longitud de 45 m, llega a la calle Morelos originando daños sobre la calle y casas cercanas, y la otra sigue hacia la calle Medellín con dirección 258°. Sobre la calle Nuevo México con 20°, la falla pasa por debajo de las casas y se observa de nuevo en la calle Emiliano Zapata.

Las casas construidas en estas dos calles presentan un alto riesgo, debido al movimiento del suelo, los daños se presentan en la cimentación y estructura de las viviendas. La falla toma una dirección de 80° y llega a la calle General Anaya,

¹ Medición inferida con respecto a la información del los bancos de nivel

hacia la colonia la Francia, y sigue hacia el paraje llamado Tepantitlamilco, se asume que esta falla no queda limitada en esta área, sino que tiene una continuidad intermitente hasta el pueblo vecino de San Nicolás Tetelco, atravesando el paraje Tepantitlamilco. La calle Maya, Av. Emiliano Zapata y 5 de Mayo, y afecta las casas que encuentra a su paso.

Para corroborar la continuidad de la falla Perú, del pasado 9 de mayo del 2005, se registró una grieta sobre algunos terrenos ubicados en la Av. Tetelco-Tecomitl, que afecta la tubería del riego, la carretera principal y 6 viviendas. Las dimensiones de esta grieta fueron de 45 m de longitud, y de 3 a 4 m de profundidad y de una anchura variable de 0.5 m a 1.5 m; el movimiento que tuvo fue de modo III “grieta de cortante por torsión” con una dirección de S 30°² (Figura 58), es decir que posee la misma dirección que la falla Perú a tan sólo 3 Km. de ésta.

Hacia la parte NE del panteón de San Andrés Mixquic, la falla Perú continúa con una orientación de 110°, y 92 m de longitud, las construcciones más afectadas están sobre la calle Perú y La Av. Plutarco Elías Calles, asimismo registran severos daños en las calles como Netzahualcóyotl, Josefa Ortiz de Domínguez, Lázaro Cárdenas, Cda. Ilhuilcamina, Cjon. Las Águilas, Cuauhtémoc y Canal Seco. Todas presentan cuarteaduras sobre la calle, banquetas y las bardas. En este sector es donde la falla presenta movimiento vertical en las bardas del panteón (parte trasera), aunque la mayoría de las grietas son tapadas rápidamente e impiden de manera directa medir su desplazamiento, se pudo medir la separación que hay en las bardas, entre 1 a 45 cm de separación indicando la dirección del movimiento.

6.4 INFRAESTRUCTURA AFECTADA POR LA FALLA “PERÚ”.

Hasta ahora, los especialistas en mecánica de suelos y ciencias de la Tierra no han resuelto en definitiva el problema del agrietamiento, como es la predicción y un tratamiento definitivo. Únicamente se puede dar a conocer la magnitud del problema y la forma en que está ocurriendo, en un proceso paulatino, lento pero constante y debido a su magnitud, debemos analizar y evaluar los procesos de estas incidencias. Ya que el temor social por la inestabilidad del suelo es permanente, y a pesar de estar conscientes de la consolidación del suelo, los habitantes están parcialmente limitados para tomar medidas de mitigación, debido a factores como:

² Esta grieta fue rápidamente rellenada porque afectaba la carretera Tetelco-Tecomitl la cual estuvo inutilizada por más de 9 horas.

- a) Falta de información técnica con respecto al hundimiento del suelo en esta región.
- b) Ausencia de respuesta comunitaria ante la situación.
- c) Programas de apoyo a localidades ante contingencias de este tipo por parte del gobierno.

Cada vez que se presenta el problema (colapso de construcciones por hundimiento o grietas), se limitan a reconstruir, rellenar y tratar de reparar los daños, cuando se cuenta con recursos económicos; en caso contrario, el daño permanece por largo tiempo, representando un riesgo para las personas. La medida más económica y común para las autoridades es tapar las fallas, quedando, así resuelta temporalmente la problemática. Dejando así la incertidumbre de dónde, cómo y cuándo se manifestará nuevamente y que magnitud tendrá.

Para conocer y evaluar cuantitativamente la magnitud del problema, se realizaron recorridos por las zonas afectadas y se elaboró un anexo fotográfico de las zonas con mayor riesgo. Durante el recorrido se midió el movimiento en algunas bardas, se colocaron fichas de yeso, sin embargo, muchas de estas marcas se perdieron porque la gente las destruye.

De esta forma, los daños se clasificaron en 3 categorías, de acuerdo con el tamaño de la grieta, fractura o falla y el grado de importancia o peligrosidad que presenta (Tabla 10).

Tabla 10. Clasificación de daños por agrietamiento

Categoría	Tamaño de abertura de la grieta	Daño	Descripción
A)	Mayor a 15 cm	Mayor	Los daños afectan a las estructuras y cimentaciones de las construcciones. En algunos casos se recomienda demolición del inmueble dañado. Las dimensiones que presentan las grietas son de más de 20 cm. de separación entre las zonas de contacto.
B)	6 a 14 cm	Medio	En donde las cimentaciones y estructuras aún conservan una estabilidad aceptable, en este grupo se recomienda reforzar las construcciones ya sea con muros o pilotes que ayuden a soportar el movimiento del suelo.
C)	1 a 5 cm	Menor	En este caso se consideraron la presencia de cuarteaduras en las bardas y pisos, estos daños pueden repararse a base de cemento u otro material para construcción. Las dimensiones que presentan las grietas son del orden de los 1 a 5 cm.

Para conocer el grado de daño que presentan las viviendas del pueblo de Mixquic, se realizaron recorridos de evaluación. Se georeferenciaron 13 puntos de observación con la finalidad de cubrir la mayor parte el pueblo (Tabla 11).

Los daños más severos que se presentan en la zona de estudio con base en la Tabla 11 se ubican en dos sectores:

- i) Hacia el SSW, sobre las calles Perú, Medellín, Nuevo México, Av. Independencia, Zaragoza y General Anaya
- ii) En la parte ESE, en las calle Plutarco Elías Calles, Brasil, Callejón Águilas, Josefa Ortiz y Canal Seco.

Con esta información y clasificación se elaboró el mapa de riesgos del pueblo de San Andrés Mixquic (Figura 69).

Punto 1. En este punto se encuentra la zona de mayor afectación por la falla Perú, se ubica el tianguis del pueblo. Aquí comienza la fractura con un hundimiento promedio de 18 cm. al año, la diferencia de alturas en el escalonamiento es de 15 a 50 cm. Esta fractura es una de las de mayor riesgo, a lo largo de ella hay dinámica poblacional en todo el día (Figura 52). Esta zona es donde se localiza la mayor afectación en el área de estudio.

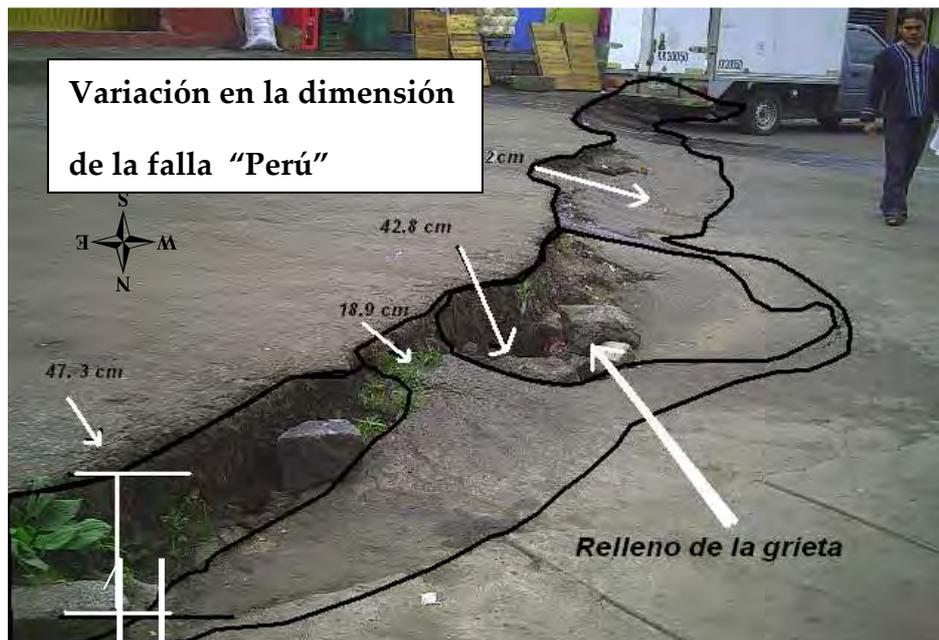


Figura 52. Vista E-W de la Falla Perú, que afecta directamente al tianguis ubicado en la calle Medellín.

Tabla 11. Daños por agrietamiento en 13 puntos de observación dentro del pueblo de San Andrés Mixquic.

Obs	Coordenadas Geográficas		Categoría	Calles	Observación
	X	Y			
1	19°13'31.66"	98°57'53.95"	A	Av. Independencia Medellín	Zona de mayor Riesgo, en este punto se encuentra ubicado el panteón de San Andrés Mixquic y al costado W el Tianguis, lugar que está afectado directamente por la falla
2	19°13'31.62"	98°57'55.85"	A	Medellín Nuevo México	Este punto es la continuación de la falla Perú donde se refracta y daña severamente algunas de las casas en sus cimentaciones.
3	19°13'30.42"	98°57'56.25"	A	Nuevo México	La calle Nuevo México queda prácticamente dividida a la mitad, con un escalonamiento de entre 10 y 20 cm dañando algunas construcciones.
4	19°13'23.83"	98°57'56.55"	B	Av. Independencia Abasolo	La calle prolongación Abasolo queda sumida 1.7 m con respecto a la Av. Independencia.
5	19°13'31.74"	98°58'8.85"	B	Flipe Ángeles Embarcadero	Aquí se considera riesgo medio, ya que algunas bardas están en malas condiciones y propensas a un desplome.
6	19°13'26.88"	98°58'7.08"	A	General Anaya Ignacio Zaragoza	Algunas casas se encuentran sumidas con respecto a la carretera, estos daños han sido a través de varios años ya que las construcciones son viejas.
7	19°13'21.56"	98°57'57.36"	B	Las Rosas Av. Independencia	Ubicado en la entrada del pueblo de San Andrés Mixquic, en la cual se registra un descenso de nivel de suelo de hasta 1.7 m. en 20 años y ha dañado algunas bardas de los dos lados de la carretera las Rosas
8	19°13'18.37"	98°58'0.81"	C	Mixquic - Tetelco	Es un punto medular en el registro del hundimiento, ya que esta carretera une a Mixquic con Tetelco y es donde se ha registrado severos daños en la carretera y a recientes fechas las casas instaladas cerca de ésta están teniendo movimientos considerables que pudieran presentar un alto riesgo en los próximos años.
9	19°13'6.78"	98°57'51.23"	C	Ojo de Agua	Se encuentra en el barrio de San Miquel, lugar donde se encontraba un centro recreativo y a las recientes fechas ha quedado reducido a un lugar baldío.
10	19°13'23.77"	19°13'23.77"	C	Av. Narciso Mendoza Pról. Abasolo	No se percibe un riesgo, ya que no hay presencia de movimientos.
11	19°13'31.04"	98°57'47.83"	A	Josefa Ortiz de Domínguez Av. Plutarco Elías Calles	La parte trasera del panteón donde continuamente ha sido reconstruido, es una zona con un alto grado de vulnerabilidad en el movimiento del suelo. Las calles que se encuentran cerca de este lugar presentan las mismas condiciones afectación.
12	19°13'38.31"	98°57'48.53"	B	Canal del Norte Lázaro Cárdenas	La calle Canal del Norte queda por debajo de la Av. Plutarco a 1.6 m y algunas casas presentan daños en las bardas.
13	19°13'28.73"	98°57'39.43"	B	Laguna de San Miguel cerrada Canal Seco	Principalmente se aprecia el deterioro de la Laguna de San Miguel, ya que ha perdido su nivel freático reflejado en la superficie de este cuerpo de agua.

La falla tiene orientación de 260°, su escalonamiento varía entre 16 a 50 cm para el año 2006 y el hundimiento con respecto a la Av. Independencia es de 1.66 m de diferencia, en tanto el hundimiento regional es de 2.01 m. en 20 años. En esta imagen la flecha gruesa señala los rellenos que la gente agrega con el fin de que no sea tan alto el escalonamiento, el cual mide 47.3 cm.

En la (Figura 52) se muestra el tipo de desplazamiento que tiene la fractura Perú, el cual es de modo II, es decir cortante, con un escalonamiento que varía entre los 15 y 50 cm; se aprecia el hundimiento que tiene la calle Medellín con respecto a la Av. Independencia que es de 1.66 m. Esto coincide con los datos registrados que posee el SACM.



Figura 53. Vista E de la calle Medellín con respecto a panteón.

Las Figuras 54.a y 54.b fueron tomadas en el año de 1947 y 2004 respectivamente, y muestran la evolución del hundimiento; la Figura 54.a muestra la iglesia con su arquitectura intacta, y también se observa del lado izquierdo una casa de adobe, en la cual no se aprecia deformaciones en el suelo; la Figura 54.b muestra el escalón producto la extracción del agua subterránea.

En 1947 la extracción de agua era casi nula, sin embargo, a partir de 1980 comienza la perforación de pozos en la zona sur de la Ciudad de México. Zonas como Tláhuac, Xochimilco, Milpa Alta y Chalco quedan comprometidas a aportar de agua para la Ciudad, en promedio proporcionan 18.28 m³/s.

En 1985 se registra una falla (Figura 54.a) incipiente, y en 20 años ha tenido una dinámica constante, ahora con 80 cm de diferencia de altura con respecto a la carretera principal, aunque a nivel regional este movimiento ha sido mayor, ya que los bancos de nivel registran hasta 2 m.

El levantamiento topográfico realizado se acompañó de una encuesta relativa al problema en cuestión. Algunos de los comentarios que se recopilaron respecto

a la percepción del peligro son: “desde que yo me acuerdo mi casa no tenía cuarteaduras, pero desde hace \pm 15 años me he dado cuenta que mi patio se está hundiendo; yo creo que es porque el sismo de 1985 dejó muy débil el suelo y por eso se esta hundiendo” (vecina del barrio de San Agustín).



Figura 54.a

Figura 54.b

Figura 54.a y 54.b. En estas dos imágenes se visualiza la dinámica de suelo en San Andrés Mixquic en el periodo de (1945-2005).

“Esto se debe a que el gobierno ha mandado a construir muchos pozos cerca de aquí, para llevarse el agua, y esto sí afecta directamente a nuestro pueblo, por que una parte de mi casa se hundió y tuvimos que tirar dos cuartos y volver a hacer otros, pero más altos que los anteriores, no obstante esto no se detiene, porque no tienen ni 5 años y ya se está viendo los daños”.

“yo creo que sí corro muchos riesgos, pero como siempre he vivido aquí, como que te familiarizas que tu casa esté hundida”.

Punto 2. Casas afectadas, las viviendas están en malas condiciones, el dueño de una casa comentó que reconstruyó sus bardas y se volvieron a dañar. Las casas prácticamente se despegaron de la del vecino por la fractura (Figura 55). Este es el punto de refracción de la falla (cambio de dirección a 20°) (Figura 56). Esta zona es considerada de daños mayores.



Figura 55. Casa del Sr. Carlos Benítez, se inclina hacia el lado caído de la falla



Figura 56. Bifurcación de la falla, muestra la inclinación del terreno.



Figura 57. Continuación de la falla Perú

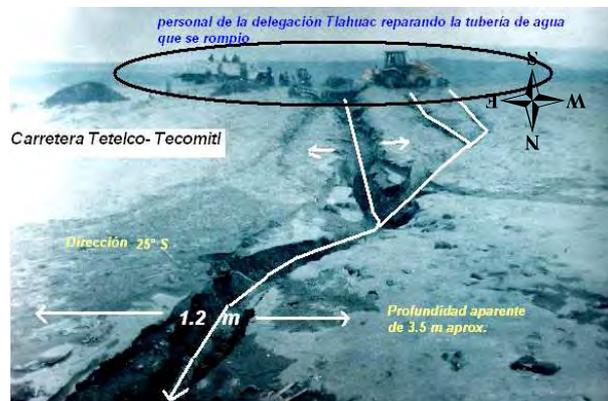


Figura 58. Grieta sobre terrenos Tetelco (2005)



Figura 59. Hundimiento del paraje Tepantitlamilco anteriormente esta zona estaba cubierta de agua el hundimiento que presenta es de 2.3 de diferencia el zaguán es de 12 cm hace mas de 30 años.



Figura 60. Daños en las bardas de Tepantitlamilco actualmente la separación del agua

Punto 3. En la Figura 57 se muestra la fractura con una dirección S 20°, por lo que se puede relacionar con la grieta que apareció en San Nicolás Tetelco, cuya dirección fue de S 25°. (Figura 58), durante el recorrido se pudo apreciar que en el paraje Tepantitlamilco hay hundimiento de 2.3 m con respecto a la carretera Mixquic-Tetelco (Figura 59), y si recorremos esta misma dirección se aprecia nuevamente que la grieta afecta las casas ubicadas entre la Av. Emiliano Zapata y 5 de Mayo y se prolonga hasta la carretera Tetelco-Tecomitl (Figura 60) que presentan fuerte afectación, al grado que es necesario reparar.

Punto 4. Se observa un desnivel del terreno, el punto está localizado entre Av. Independencia y Francisco Montes de Oca, el desnivel es producto de hundimiento regional que ha tenido la zona, de acuerdo con comentarios de los habitantes del lugar. Lo que ahora es la colonia La Francia era una laguna y el desnivel que se aprecia es de 2.11 en 34 m de distancia. Se considera como una zona de daños intermedios (Figura 61).

Punto 5. Se ubica en la periferia de la zona urbana, en la calle Felipe Ángeles en este sitio se observa presencia de grietas e inclinación en las bardas de algunos vecinos, por lo general estas bardas son viejas.

Punto 6. Corresponde a una casa con hundimiento en La colonia la Francia, en el Barrio de San Agustín (Figura 62), de un metro, con respecto a la carretera inmediata. Esta construida con ladrillo y presenta un desplazamiento estructural; se aprecia el hundimiento de toda la casa, reflejado en la puerta de la entrada. Se clasifica este lugar como daños mayores.

Punto 7. Se registran daños en las bardas en ambos lados de la carretera, donde hay construcciones que presentan desnivel del terreno, En esta área se realizó un trabajo topográfico y se presenta el dibujo con las medidas de los puntos nivelados, resultan 2 m de salto (Figura 63).

En la Figura 64 se muestra un desnivel del suelo, en promedio de 2.11 m en tan sólo 25 m de distancia, esta parte es la entrada del pueblo, cerca de la fuente. Este punto se utilizó como representativo del hundimiento.

Punto 8. En 1999 una porción de la carretera Mixquic-Tetelco se colapsó en dirección hacia los canales, con una longitud de 48 m y hasta los 40 cm de anchura (Información verbal). Corresponde con la traza de una tubería hidráulica, la cual fue también afectada.

Punto 9. El Ojo de Agua, hace más de 20 años fue un lugar turístico, en la actualidad está invadido por asentamientos irregulares, no queda gran cosa de ello. Por comunicación oral de vecinos, en el Ojo de Agua existía un manantial, hace 20 años y debido al sismo comenzó a perder nivel de la misma (Figura 65). Los daños se ven reflejados en el piso y algunas bardas de contención.



Figura 61. Desnivel del terreno a razón de 2.11 m a 48 m del la Av. Independencia.



Figura 62. Casa hundida sobre la calle General Anaya en la Francia



Figura 63. desnivel del terreno a razón de 1.99 m en la entrada de Mixquic.

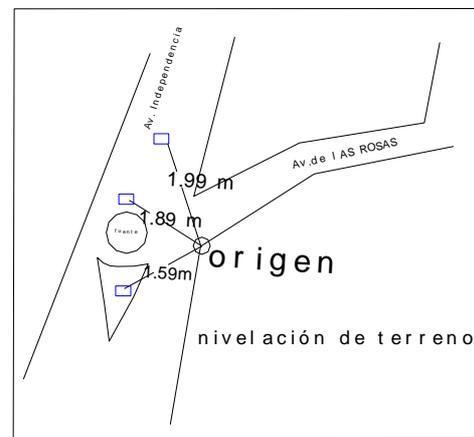


Figura 64. Nivelación del terreno en la entrada de San Andrés Mixquic



Figura 65. Ojo de agua, antiguo sitio turístico



Figura 66. colapso de la barda trasera del panteón de Mixquic

Punto 10. Este sitio es de poca relevancia por la presencia de las grietas, pero es importante registrarlos ya que servirá para generar el plano de riesgo en San Andrés Mixquic.

Punto 11. Es un sitio afectado directamente por la dinámica de la falla Perú, del lado izquierdo se aprecian las bardas posteriores del panteón que han sido reconstruidas en más de una ocasión (Figura 66).

Punto 12. La percepción del hundimiento es muy poca, a excepción de la entrada del Río Amecameca, las grietas se aprecian sobre la carretera, por el momento representan un daño menor.

Punto 13. Laguna de San Miguel. Los daños que aquí se aprecian son al ambiente, al igual que el Ojo de Agua, la laguna presenta un alto grado de deterioro, aunque las casas no presentan agrietamiento. En la figura 67 se muestra cómo ha descendido el nivel de agua, junto con la contaminación de basura en su interior.

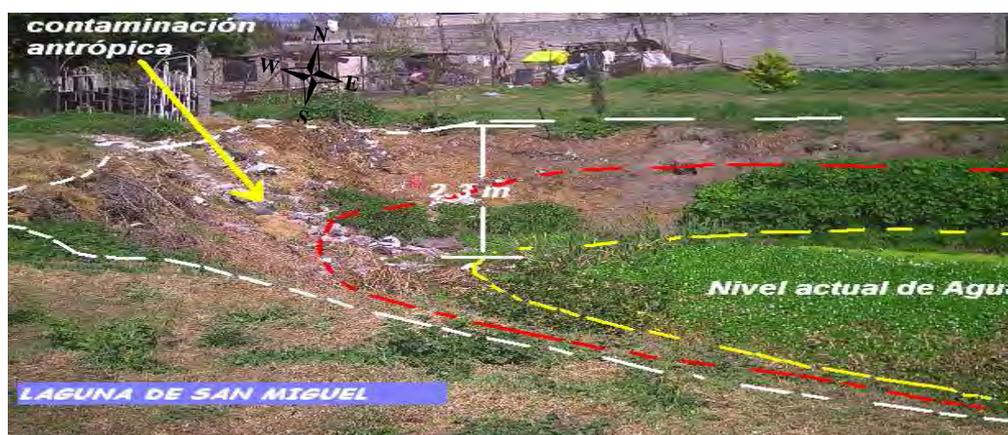


Figura 67. Laguna de San Miguel con un grave deterioro

6.5 ZONIFICACIÓN DEL RIESGO POR HUNDIMIENTO Y AGRIETAMIENTO EN EL PUEBLO DE SAN ANDRÉS MIXQUIC

Con la información precedente se procedió a obtener una zonificación del riesgo por hundimiento y agrietamiento.

Se tomaron los 13 puntos de observación anteriormente descritos (Tabla 11) y se generó el mapa de riesgos por hundimiento y agrietamiento en el pueblo de San Andrés Mixquic (Figura 69).

Esta zonificación del riesgo se complementó con la realización de 5 nivelaciones del terreno, con la finalidad de obtener las diferencias de altura alrededor del pueblo (Figura 68).

Daños mayores

Sobre el plano se identifica con polígonos de color rojo, el área de mayor afectación, la cual abarca 9 manzanas; está orientada de W a E, atravesando el pueblo de San Andrés Mixquic, los daños afectan a las calles Av. Plutarco Elías Calles, Perú, Medellín, Nuevo México, Emiliano, Zapata, Zaragoza, Av. Independencia, Netzahualcóyotl, Callejón Ilhuilcamina, Josefa Ortiz de Domínguez y Brasil, principalmente (Figura 69).

El 80% de las casas ubicadas sobre estas calles presentan daños en la cimentación, en las bardas algunas grietas alcanzan a medir hasta 42 cm. de separación. Las calles con mayor afectación son Medellín, Nuevo México y Av. Hidalgo. Algunas bardas que requieren demolición están ubicadas sobre Cjon. Las águilas, Av. Plutarco Elías Calles y Av. Hidalgo.

Daños Intermedios

Polígonos de color anaranjado, su distribución es radial, no siguen un patrón lineal alrededor de la grieta Perú, su área de afectación es mayor, debido a su distribución. Las calles afectadas en esta categoría son: Insurgentes, Francisco M. Oca, Pról. Abasolo, Av. De las Rosas, General Anaya y Calzada Tetelco, hacia la periferia del pueblo.

En este grupo se presenta escalonamiento del suelo, sin embargo, esta área se hunde con respecto al panteón se acentúa en dirección N y SW. Los barrios afectados son San Agustín, los Reyes, y la zona de Tepantitlamilco. La zona presenta una fuerte inestabilidad, debido al efecto que se observa en algunas casas construidas sobre estos terrenos que presentan daños severos. Esta zona queda expuesta a futuros hundimientos.

Daños Menores

Los polígonos color verde se distribuyen hacia la periferia del pueblo, en esta categoría la presencia de grietas no representa un peligro considerable, pues aún no son visibles. Sin embargo, la presencia del hundimiento regional afecta las casas ubicadas dentro de áreas de reserva natural (zonas irregulares). Existen casas con una inclinación de hasta 8° en toda la construcción.

La Figura 68 representa el perfil de San Andrés Mixquic, el cual se elaboró con teodolito; se consideraron 6 puntos de medición a partir de cotas arbitrarias para determinar la diferencia de alturas entre puntos, para determinar la geometría del pueblo a partir del segmento A al segmento B.

El pueblo San Andrés Mixquic presenta una diferencia de altura de 1.66 m en 1000 m de S a N, (A-B) resulta una geometría convexa del suelo, la cresta esta sobre la parte central del pueblo, mientras que la de menor altura se localiza hacia la periferia.

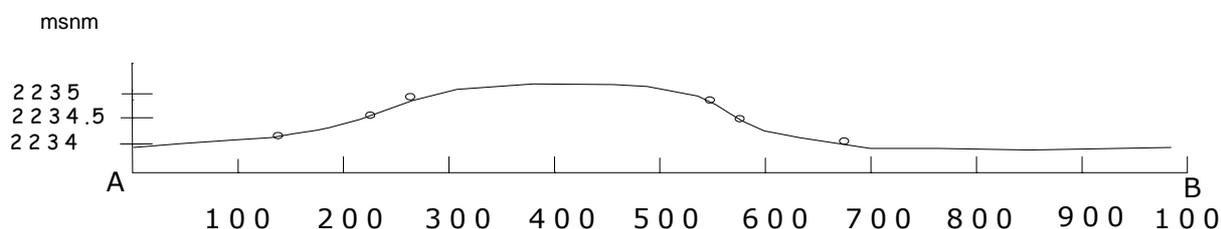


Figura 68. Perfil topográfico del pueblo de San Andrés Mixquic.

6.6 INTERPRETACIÓN INTEGRAL DEL HUNDIMIENTO

Como resultado de la interpretación conjunta de los datos de extracción de agua subterránea y los valores del hundimiento registrado en los bancos de nivel, se puede decir que a partir de 1985 en el poblado de San Andrés Mixquic se ha manifestado el proceso de agrietamiento y subsidencia del terreno; el hundimiento ha afectado al 60% de la infraestructura urbana.

De acuerdo con los resultados, se considera que el hundimiento tiene su origen en la forma en que la estructura geológica responde a la acción de extracción de agua subterránea de manera excesiva, así como la actividad sísmica. Es decir, la consolidación de las arcillas predominantes en la zona de estudio.

Como se explicó en el capítulo cuatro, la extracción de agua se realiza con 58 pozos distribuidos alrededor del poblado de San Andrés Mixquic, y para 1990 aportaron un caudal de 82 Mm³/año, y para el 2006 solo 41 pozos suman 61.7 Mm³/año. Se observa que para el lapso de 16 años, existe una disminución de 21 Mm³ en el volumen extraído, sin embargo, el hundimiento del suelo sigue manifestándose. Cabe mencionar que dentro del pueblo de San Andrés Mixquic no existe pozo alguno, ya que estos se ubican a 2.5 km a la redonda agrupados en las tres regiones que se muestran en la Figura 32. De esas tres zonas, la mayor extracción se realiza en la región III, con 551 Mm³/ en 16 años.

El bombeo de agua durante ese intervalo de 1985 a 2006, ha ocasionado que el nivel del agua en los pozos analizados, se haya abatido 15 m en 16 años, es decir, casi un metro por año. Definiendo un gradiente hidráulico de forma radial a partir del pueblo de Mixquic, que induce un flujo subterráneo en esas direcciones (Figura 34). Al fluir el agua en esas direcciones deja poros vacíos, los cuales al

estar sujetos al peso de la infraestructura se reducen y por consiguiente el suelo se compacta.

Con base en este análisis se puede decir que la extracción de agua en la zona de estudio no responde de manera directa al hundimiento que se registra en ésta, sin embargo, sí es un catalizador importante en la dinámica del hundimiento, debido a la gran cantidad de extracción agua subterránea que ha generado un cono de abatimiento importante, el cual está afectando directamente al poblado de San Andrés Mixquic.

El tipo de material geológico es el factor que afecta con mayor fuerza el hundimiento en San Andrés Mixquic, ya que como se explicó anteriormente, el pueblo está construido sobre una alternancia de arcilla con materiales de acarreo fluvial y volcánico, a diferentes profundidades de edad reciente.

El pueblo de San Andrés Mixquic está construido sobre un paquete arcilloso con un espesor de 190 m. y se intercalan con arenas finas y medias.

Esta interdigitación se comprueba con el estudio reciente de mecánica de suelos realizado por la empresa OPAL S.A. de C.V, donde se reconoció la existencia de arcillas y aluvión yaciendo sobre una posible colada de lava.

En este estudio se asume que esa colada de lava proviene del volcán Tlaloc, ubicado a 9 km al S de Mixquic, y llegó hasta el pueblo, el cual en un 40% se encuentra asentado sobre esta lava. Debido a esto, el pueblo adquiere una geometría convexa, situando al barrio de San Miguel en la parte de menor hundimiento, y al barrio de San Agustín el de mayor hundimiento (Figura 68).

Los espesores de arcilla disminuyen hacia las elevaciones topográficas, mientras que aumenta hacia los humedales de Tláhuac, es decir, hacia el N del pueblo de Mixquic. A mayor profundidad, continúan los materiales lacustres y a 150 y 200 m existen horizontes de roca volcánica.

La disposición de estos materiales responde a la dinámica del suelo en la zona de estudio y estos movimientos se han registrado con los bancos de nivel, los cuales se pueden medir y zonificar la evolución del hundimiento regional, los datos con los que se cuentan son a 20 años y revelan que la zona de estudio ha descendido hasta 7 m cerca de los humedales de Tláhuac (Figura 48 y 49), mientras que en la zona de Mixquic los hundimientos han sido de 11 cm/año y en 20 años el pueblo ha descendido 1.66 m; el hundimiento es hacia el NE, en dirección al poblado de Chalco, Edo. de México. Esta diferencia de altura se traduce en la presencia de la fractura Perú, ubicada en la calle Medellín, los daños que ha causado esta falla se presentan en las bardas, techos y pisos.

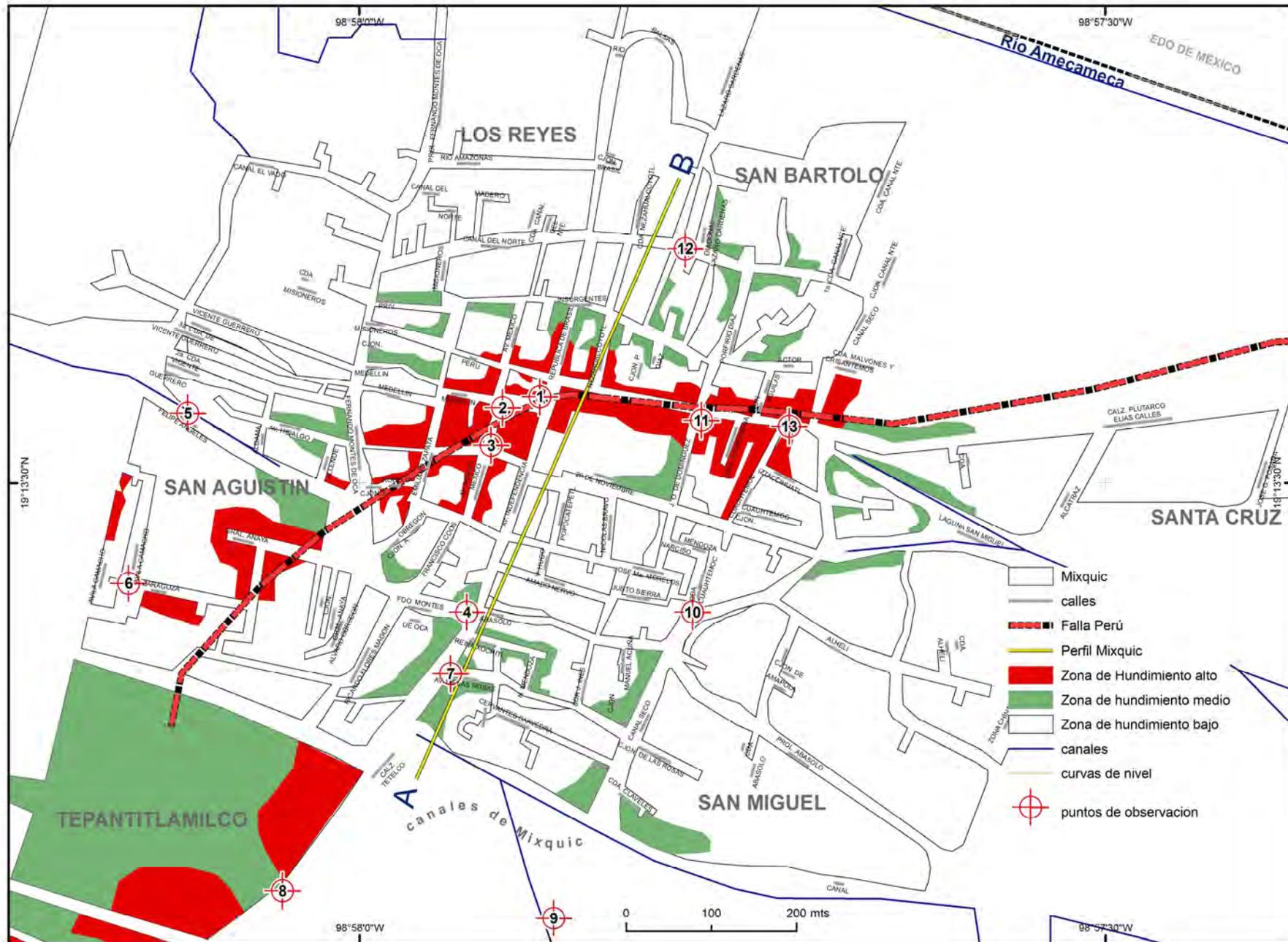


Figura 69. Mapa de riesgo por hundimiento y agrietamiento del suelo en San Andrés Mixquic y el Segmento A- B para determinar la geometría del pueblo

De acuerdo con la gráfica de los bancos de nivel, se puede decir que conforme los bancos de nivel se alejan de las elevaciones topográficas, se vuelven más inestables (Figura 39), por lo que la región de mayor inestabilidad es la zona N de Mixquic, sin olvidar la zona de Tepentitlamilco al S del pueblo, ya que presenta condiciones óptimas para que ocurran futuros hundimientos.

La zonificación del riesgo por agrietamiento y hundimiento revela que el pueblo de San Andrés Mixquic se encuentra atravesado por la fractura Perú en dirección SW a NE, cerca del panteón; el escalonamiento de la fractura es de modo II de cortante (Figura 52), varía entre 15 y 50 cm, con una longitud de aproximadamente 500 m (Figura 53), afecta a 9 manzanas de los barrios de San Agustín y los Reyes, a estas zonas se clasificó con riesgo alto, por el tamaño de las grietas superior a 20 cm de separación alcanzando en algunos puntos (callejón Las Águilas) hasta 42 cm (Figura 69). El riesgo medio se localiza en las inmediaciones de dicha grieta, mientras que el riesgo bajo se presenta en el barrio de San Miguel, es decir, sobre la posible colada de lava.

La acción conjunta de la sismicidad, la interdigitación de los materiales arcillosa-arenas con rocas volcánicas, y los rasgos de flujo de agua subterránea pone en evidencia la dirección en la que aparece la falla.

CONCLUSIONES

El pueblo de San Andrés Mixquic, fue construido en un pequeño islote sobre la planicie lacustre que corresponde a la parte final de un derrame de lava que proviene del volcán Tlaloc a 7 km al S de Mixquic. La colada sobreyace a la secuencia de sedimentos de arenas, limos y arcillas que constituyen la planicie cuyo espesor en conjunto alcanza los 200 m; y hacia la orilla del islote, la lava se interdigita con dichos sedimentos; la planicie tiene elevación de 2,230 msnmm.

Situado al sureste del Distrito Federal, el pueblo de Mixquic comparte con la Ciudad de México problemas de compactación del suelo y agrietamiento y vive una paradoja relacionada con el recurso agua, pues, por un lado es necesario desalojar en tiempos cortos grandes volúmenes de agua residual y aquellas procedentes de la lluvia.

La vulnerabilidad de riesgo por hundimientos y agrietamientos del suelo en San Andrés Mixquic, es como en otras regiones un proceso multifactorial, destacando en este caso tres de ellos; i) La geología, ii) la sismicidad y iii) la extracción de agua. Y se hace evidente a partir de 1985, fecha en que las condiciones lito-estructurales de la zona presentan cambios importantes debido al efecto del sismo de ese año.

i) A partir del sismo de 1985, la geología superficial local muestra cierta deformación, como es el incremento en el hundimiento, la aparición en 1985 de la falla normal en la calle Perú, actualmente activa que presenta un desplazamiento vertical de 80 cm.

Otras grietas, se asocian con características que favorecen el desarrollo de hundimientos y agrietamientos en el suelo, como es el paquete limoarcilloso sobre el cual está el pueblo. La colada de lava podría explicar la heterogeneidad del hundimiento (hundimiento diferencial, con escalonamiento de 1.66 m sobre la calle Perú), ya que no todo el pueblo se hunde de la misma forma (Figura 68) dando una geometría convexa, en la cual, la parte central del pueblo corresponde a la parte más elevada y la periferia, por el contrario, en las partes bajas.

ii) En las orillas, por efecto de sismicidad y extracción de agua subterránea ocasiona la consolidación del material, el cual, se desliza sobre el material resistente (roca); al interactuar las condiciones geológicas existentes (interdigitación de material duros con blandos) y la excesiva extracción de agua subterránea en las inmediaciones del pueblo de San Andrés Mixquic (catalizador del hundimiento) dan como resultado hundimientos regionales y diferenciales, que afectan de manera directa a la población.

iii) El tercer factor, se hace evidente debido al déficit en el suministro externo de agua procedente de los ramales Toluca-Lerma y Sistema Cutzamala, que desde 1951 y 1976 abastecen al D.F. La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) autoriza y construye más de 500 pozos de extracción en la porción sur del Distrito Federal, involucrando a las delegaciones de Coyoacán, Xochimilco, Milpa Alta y Tláhuac.

En particular en las inmediaciones de Mixquic, de 1970 a 1980, se perforaron 58 pozos (Figura 32), cuya extracción entre 1990 y 2006 asciende a $1\ 250\ 531\ 204\ m^3$, de este total en 16 años, corresponden $551\ 291\ 328\ Mm^3$ a la región Mixquic Santa Catarina, $355\ 871\ 140\ m^3$ a la región I y $343\ 368\ 736\ m^3$ a la región II. Ese volumen extraído en 16 años ha ocasionado un descenso del nivel del agua subterránea entre 16 y 20 m, es decir 1.25 m/año en promedio; estableciendo un gradiente hidráulico de forma radial a partir del pueblo de Mixquic, ya que aquí no existe pozo alguno; e induce un flujo subterráneo en esas direcciones (Figura 35) que deja poros vacíos los cuales, al estar sujetos al peso de la infraestructura se compactan y por cambios litológicos se originan grietas.

Para el 2006 sólo quedaban en operación 41 pozos que extraían $61.7 \times 10^6\ m^3$ /año. Es decir, $21 \times 10^6\ m^3$, menos en la extracción. Sin embargo, el hundimiento del suelo sigue manifestándose, y evidencia que la extracción regional también influye en el hundimiento local.

El análisis de los datos de 138 bancos de nivel en la zona de estudio (Figura 37), revelan que los mayores hundimientos se presentan cerca de los humedales de Tláhuac, los ejes que corresponden a esta zona son; los ejes 1-1' y 2-2, área donde se ubica la batería de pozos Mixquic-Santa Catarina, con valores de hasta 7.8 m /20 años, los mayores descensos se registran en los siguientes bancos; B(S14E10)01, B(S14E14)01, B(S14E11)01, B(S14E11)02, B(S14E12)02, B(S14E13)04, y B(S15E14)03.

Un valor medio de 18 a 21 cm/año se registra en el banco B (S17E11)02 (Figura 38), ejes 3-3', 4-4' D-D', y E-E', que cruzan el pueblo de San Andrés Mixquic. Mientras el hundimiento bajo se localiza cerca de las elevaciones topográficas, ahí el hundimiento es casi nulo, con menos de 1 cm/año.

Lo anterior muestra que la zona más afectada por el hundimiento regional es la parte norte de Mixquic siendo mínimo hacia las elevaciones topográficas.

La falla Perú es el rasgo que mayor daños causa a la infraestructura de Mixquic, con su lado oeste hundido que se mueve 80 cm/año en promedio, define una zona de riesgo importante.

De acuerdo con el tamaño de la grieta y la afectación de la infraestructura, los daños se clasificaron en 3 categorías; A) Daños mayores, B) Daños intermedios y C) Daños menores (Figura 69). El barrio de San Agustín presenta afectaciones en 9 manzanas, el 60 % de las casas circundantes a la fractura registran daños en la cimentación. El ancho de las grietas alcanza hasta 42 cm, siendo esta zona la más vulnerable para la población.

Los daños intermedios se localizan de forma radial al pueblo de Mixquic, el área de afectación es mayor, afecta algunos barrios como San Agustín, Los Reyes, San Bartolomé y la parte Sur del Barrio de San Miguel, sin embargo, el ancho de las grietas no supera los 15 cm, es decir que la cimentación están en buen estado y no representa peligro para la población, y por ultimo daños menores; los cuales se presentan con cuarteaduras de entre 1 a 5 cm de separación.

Ante el riesgo del hundimiento del suelo se recomienda como medidas de mitigación lo siguiente:

- a) No construir sobre una grieta
- b) Establecer la naturaleza litológica de la grieta para determinar el material más conveniente para rellenarla, el material convencional es el uso de bentónita con cemento e inyectar junto con grava a baja presión.
- c) Pedir asesoría técnica y no construir más de dos niveles si el terreno presenta algunas deformaciones.
- d) En caso de construir sobre una zona vulnerable al hundimiento se recomienda utilizar las técnicas de construcción de muros separados por la grieta, si la grieta presenta movimiento vertical, se sugiere hacer construcciones elásticas, es decir, ajustables al movimiento. Sin embargo, estos métodos no garantizan su funcionamiento al 100%.

Como quedó expuesto, el problema de la consolidación del suelo es multifactorial, por tanto su solución debe ser el control de todas las variables involucradas, de las cuales, algunas de ellas están fuera del alcance del hombre, y para el caso referente a la extracción de agua, tampoco es posible dejar de hacerlo. Por lo tanto el problema se mitigará de forma natural. Es decir, el hundimiento, cesará una vez que el paquete de sedimentos de arcilla-limo-arena, llegue a su estado de equilibrio (seco).

Sin embargo es necesario monitorear dicho proceso para conocer las medidas temporales para protección de la infraestructura, y por consiguiente la población.

BIBLIOGRAFÍA

- Auvinet G. (1991), "Agrietamiento del Suelo", Memoria de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México, 120 p.
- Bellai S., G. Cuisimano, T. (1992), "El valle de México, consideraciones preliminares sobre los riesgos geológicos y análisis hidrológico de la cuenca de Chalco", Quaderni Instituto Italo-Latino Americano. Serie Scienza No 3. Roma, 96 p.
- Carrillo N. (1947), "Influencia de los pozos artesianos en el hundimiento de la Ciudad de México". Anuario de la comisión Impulsora y coordinadora de la Investigación Científica. México. Tomo II, 245 p.
- Consultores en Geología (2002), "Proyecto de análisis dinámico y diagnóstico de las grietas o fracturas de desecación en la zona Urbana de la Ciudad de México". DDF. México, 43 p.
- Consultores en Hidráulica (2002), "Estudio para determinar el cambio de uso del suelo del agua extraída del acuífero para riego, por agua tratada en el área beneficiada por los pozos Tecomitl N° 3, 4, 5, 16, 18, 19 y 20. DGCOH. México, 165 p.
- DOF (1990), "Programa Delegacional de Tláhuac", Diario Oficial de la Federación. Tecnologías Aplicadas. México.
- DGCOH (1986), "Levantamiento Topográfico en San Andrés Mixquic", DDF. México, 65 p.
- , (2001), "Estudio Topográfico para determinar la problemática del funcionamiento hidráulico de los principales canales de la zona de Tláhuac". SACM. México De Valle J. (1969) "Hidrología Subterránea, Algunos Aspectos", Cia. Mexicana aéreofoto S.A, 68 p.

- Estrada C. (1980), "Hundimientos Diferenciales Causados por el Bombeo en la Zona de Xochimilco". DGCOH. México, 142 p.
- García E. (1987), "Modificaciones al sistema de clasificación de Köeppen". UNAM, México, D.F. 217 p.
- Gümes B. Trejo R. (1977), "Ecología del Humedal de San Pedro Tláhuac", U.A.M México, 46 p.
- Gutiérrez C. (1997), "Un Pueblo rico en magia y tradiciones, las ofrendas a los muertos y sus rituales", Cigumart. México, 93 p.
- González S. (1988), "Tláhuac Prehispánico", Porrúa. México, 98 p.
- Hellan I. (1984), "Introducción al mecanismo de fracturas". McGraw-Hill Book Company. México, 83 p.
- Huizar R. (1993), "Simulación Matemática del Sistema Acuífero de Chalco-Amecameca". Geofísica Internacional, Vol. 32, No. 1, p. 57-79.
- (1999), "Definición del control de la calidad del agua subterránea extraída de la subcuenca de México (Delegación Iztapalapa). Secretaría del Medio Ambiente, Instituto de Geología UNAM, 80 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) (2004), Cartas de: Uso de suelo, Topográfica, Geológica 1:50,000, INEGI Aguascalientes. México, Claves E14A39F4, E14B31D3, E14A49C2 y E14B41A1.
- (1990), Tláhuac Cuaderno Estadístico Delegacional, INEGI Aguascalientes. México, 130 p.
- (2005), Censo de Población y Vivienda, INEGI, Aguascalientes. México, 130 p.
- Ingeniería Urbanística (2002), "Levantamiento topográfico, nivelaciones y sondeos del pozo del colector marginal Ameca, desde Mixquic a la Calzada Monera en la Delegación de Tláhuac", DGCOH. México, 115 p.

- Juárez E. (1969), "Mecánica de Suelos" Tomo III, México. Limusa, p. 329-346.
- (1989), Mecánica de Suelos. Tomo I, México. Limusa. 276, p.
- (1959), "Teorías de grietas de tensión", I congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, México, p. 65-67
- Lasser y asociados (2001), "Estudio para la medición de la red de pozos piloto ubicados en el Distrito Federal y el Valle de Chalco para detectar su evolución y cambios al año 2001", DGCOH. Tomo I, II. 67 p.
- Legorreta J. (1994), "Los Pozos y sus efectos: El hundimiento de la Ciudad" La Jornada ecológica,
WWW.planeta.com/ecotravel/mexico/ecologia/97/0897agua1.html1994 (12/06/2007)
- Lugo J., Pérez A., Rojas M. (1991), "Formación de Grietas en el margen del antiguo lago al oriente de la Cuenca de México". *Geofísica Internacional*. Vol. 30, Núm.2, p. 87-95.
- (1984), "Geomorfología del Sur de la cuenca de México", Serie Varia No 9. Instituto de Geografía, México, 95 p.
- (1989), "Diccionario geomorfológico. Instituto de Geografía México. UNAM, p. 87-111
- Maderey L., Carillo J. (2005), "El recurso Agua en México, Un análisis geográfico". Temas selectos de geografía de México, 128 p.
- Manzanilla L. y López L. (1988), "Atlas Histórico de Mesoamérica", México. Larousse, 200 p.
- Gutiérrez M., González J., Zamorano J. (2005), "La cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales", Coc. Temas selectos de geografía de México I.8.1., Instituto de Geografía. UNAM, p. 17-42.
- Marsal R., Ortiz I. (1956), "Breve descripción del Hundimiento de la Ciudad de México", Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. México, Tomo XIX N° 2, 11 p.

- Marsal R. (1978), "El subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área urbana del Valle de México", Simposio, Instituto de ingeniería, UNAM, p. 41-149.
- , (1952), "Influencia del Bombeo en el Hundimiento de la Ciudad de México". México, DGCOH, p. 1 – 25.
- , (1959-1960), "Estudio a cerca de la influencia relativa que ejerce en el hundimiento de la Ciudad de México en la extracción de agua del subsuelo por medio de pozos profundos", Secretaría de Recursos Hidráulicos, Cap. II, 79 p.
- Martínez M. (2002), "Políticas de extracción de agua del subsuelo mediante el modelo matemático de abatimientos hundimientos" DGCOH. México, p. 1-45.
- Mooser F. (1963), "Historia tectónica de la cuenca de México", Boletín de la Asociación Mexicana Geológica y Petrológica, No.15, p. 239-245.
- , (1975), "Historia Geológica de la cuenca de México", Memoria de las obras del drenaje profundo". Departamento del Distrito Federal. México, p. 9-30.
- Ortega B. (1992) Paleomagnetismo magnetoestratigrafía y paleoecología del cuaternario tardío en el lago de Chalco, Cuenca de México. UNAM, AUCPyP. CCH. Disert. Doct, 167 p.
- Puente M. (1965), "Estudio de la Delegación de Tláhuac", México Distrito Federal. Tesis de Maestría en Geografía México. UNAM, 112 p.
- Pozzo M. A.L (1992) "Monogenetic vulcanism in Sierra Chichinautzin", México. Bull Vulcanologique. V. 45, p. 9-24.
- Romero H., Suárez M. (2001). "Las Arcillas, propiedades y usos". Universidad Complutense Madrid.
<http://www.uclm.es/users/hiqueras/yymm/Arcillas.htm> (15/04/2006)
- SACM, (2007), "Recopilación de Información de los pozos ubicados dentro del Área de influencia de San Andrés Mixquic". Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Dirección Técnica. México, 25 p.
- , (2007) "Recopilación del Historial de los Bancos de Nivel Ubicados dentro del Área de Influencia en San Andrés Mixquic. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Dirección Técnica. México, 165 p.

Soto C., Fuentes L. (1966), "Glosario de términos geográficos". México, UNAM, 232 p.

SNM (2000), Base de Dato de Meteorología estaciones climatológicas Chalco, Milpa alta y Tláhuac, Servicio Nacional de Meteorología. (SIACON), 1970-2000.

SMMS (1991), "Memorias de la reunión sobre agrietamiento de suelo", Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México, 120 p.

TASA, (1995), "Análisis de los efectos y Políticas de Operación de Pozos Profundos en el Distrito Federal", Tecnologías Aplicadas. DGCOH. México, 42 p.

Folleto Informativo de Mixquic (2006), "Mixquic y sus costumbres", México. Patronato del pueblo, 26 p.

Vázquez S. y Jaimes, P. (1989), "Geología de la cuenca de México", Revista Geofísica Internacional, Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. Vol.28, 2, p. 133-190.

Whittonw J. (1984), "Diccionario de geografía física", Alianza. Madrid, 469 p.

Páginas electrónicas consultadas.

http://www.proyectosalohogar.com/images/azt-l_textcoco.jpg

<http://www.agronomiasyciencias>.

<http://www.academianacionaldeciencias> (1995): El Suministro de Agua.

<http://WWW.Metroagostoweb.qxd>

http://www.who.int/csr/ihr/IHR_2005_es.pdf

http://es.wikipedia.org/wiki/geograf%C3%ADa_delDistrito_Federal

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/091/html/sec_13.html

<http://sociedadyaqua.wordpress.com/2008/08/04/las-cuencas-lacustres-del-altiplano-central-lagos-del-valle-de-mexico/>

http://es.wikipedia.org/wiki/Vuelta_a_la_ciudad_lacustre

http://www.ecomundo.com.mx/download/disponibilidad_del_agua_en_la_cuenca_vm.pdf

<http://www.mexicodesconocido.com.mx/notas/3841-Del-desag%FCe-del-Valle-de-M%E9xico-al-drenaje-profundo>

<http://www.metropoli.org.mx>

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lec/fernandez_r_r/apendiceB.pdf

<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/568/56841323.pdf>

GLOSARIO

Abatimientos piezométricos: es el descenso progresivo y no recuperable del nivel del agua subterránea y se traduce en decrementos de los esfuerzos efectivos del suelo, que han dado lugar a hundimientos diferenciales originando en la superficie un efecto de flexión y esfuerzos de tensión. Cuando dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia a la tensión de los materiales superficiales (baja), se producen grietas y corrimientos horizontales (DGCOH, 1986).

Acuífero: La diferencia entre la cantidad de precipitación y la cantidad de agua que fluye por los ríos se infiltra bajo el suelo y forma los acuíferos. La infiltración depende de las características petrofísicas de las rocas como porosidad eficaz, el tamaño de sus granos y la conductividad hidráulica (DGCOH, 1986).

Acuífero cautivo o confinado: Se denomina así al acuífero cuando los materiales permeables están dispuestos entre dos capas impermeables. En estas condiciones el agua está sujeta a una presión considerable (Soto y Fuentes, 1966).

Acuífero abierto o libre: Depósitos que se presentan cuando el manto freático corre de un estrato impermeable que lo limita por la parte superior (Soto y Fuentes, 1966).

Acuitardo: se les denomina a las secuencias de capas de arcillas y arenas lacustres superficiales que alcanzan una profundidad de 100 m, y se caracterizan por su baja conductividad hidráulica (DGCOH, 1986).

Aguas subterráneas: La que se encuentra dentro de la litósfera comprende; el agua de constitución que se incorpora a la roca en el momento de su formación. 2. el agua higroscópica que es retenida por capilaridad y 3. el agua intersticial que llena los espacios, que pueden circular y que falta en los suelos congelados (Soto y Fuentes, 1966).

Arcilla: Roca sedimentaria no cementada, formadas por las partículas más pequeñas, menos de 0.010 mm, en otras clasificaciones menores a (0.001 o 0.005 mm). De minerales arcillosos como montmorillonita, caolín, hidronímicas y otros. Es una roca plástica con el agua forma una plasta de baja presión, puede adquirir cualquier forma conservándola al desecarse (Lugo, 1989).

Falla: zona de ruptura en el sustrato rocoso a lo largo de la cual se produce un desplazamiento. Las **F.** con desplazamiento vertical forman un bloque levantado y otro hundido; cuando la **F.** esta inclinada resulta un bloque debajo y un bloque de alto. Los tipos principales de **F.** son: normal, inversa, de desplazamiento horizontal, y de desplazamiento lateral. Las dimensiones de

desplazamiento varían de algunos centímetros de longitud hasta las fallas profundas que cortan toda la corteza terrestre (Lugo, 1989).

Fracturamiento: Todo cuerpo sólido responde a cargas extremas experimentando grandes deformaciones o fracturamiento. El segundo fenómeno consiste en la pérdida de continuidad entre dos partes del cuerpo. El fracturamiento implica la generación de una grieta y su propagación hasta que se presente la falla general o que se alcance un nuevo estado de equilibrio (DGCOH, 1986).

Grieta: ruptura longitudinal de las rocas o el hielo, sin desplazamiento de las porciones que la separa. Las grietas pueden ser de origen tectónico y no tectónico (intemperismo, compactación, derrumbes, deslizamiento de tierras, etc.) las grietas de desecación son producto de la pérdida de agua; a menudo se hallan dispuestas en forma poligonal (Lugo, 1989).

Grietas poligonales: aquellas que se forman al desecarse y compactarse de lodos arcillosos o calcáreos ricos en agua de infiltración. Las G. p. desmenbrana la superficie de la capa en que se forman porciones poligonales irregulares. Su profundidad no supera unos cm. En las arcillas son conocidas G.p. de profundidad de hasta 3 m y una anchura de unos 10-15 cm, muy pocas veces de 1 m. pueden ser rectas y curvas. En sección transversal se encuentran en escuadra, en forma de V, raras veces con otro aspecto (Lugo, 1989).

Hundimiento: Dislocación de la corteza terrestre que da lugar a la remoción, en el sentido vertical de fragmentos de la misma. Determina dos clases de fracturas en las regiones fracturadas; unas lineales (diferenciales), más o menos paralelas, que producen mesetas escalonadas; y otras concéntricas (regionales) y cortadas por fracturas radiales que forman los llamados campos de hundimiento (Soto y Fuentes, 1966).

Hundimiento Diferencial: puede producir desplazamientos horizontales (escalonamiento), desplomes y alabeo de la superficie del suelo. Las distorsiones de la superficie del suelo generadas por hundimiento regional motiva problemas varios e importantes en la ingeniería de cimentaciones (Soto y Fuentes, 1966).

Hundimiento Regional: es el resultado de diferentes tipos de fenómenos, que tienen lugar en el suelo, el hundimiento regional está relacionado con hundimiento progresivo de la superficie del suelo. En éste no hay fractura, sino un hundimiento de suelo progresivo. Y afecta superficies de cientos de Km² (Soto y Fuentes, 1966).

Manantiales: Surgencia de agua por gravedad a la superficie, composición del agua que varía según la naturaleza del suelo o la roca de su lecho. El caudal de los manantiales depende de la estación del año y del volumen de las precipitaciones. Los manantiales de filtración se secan a menudo en periodos secos o de escasas precipitaciones; sin embargo, otros tienen un caudal

copioso y constante que proporciona un importante suministro de agua local (DGCOH, 1986).

Nivel Freático: Nivel superior de la zona de saturación del agua subterránea de las rocas permeables. Representa la superficie en la que la presión del agua subterránea es igual a la presión atmosférica. La elevación del nivel freático varía estacionalmente según la cantidad de precipitación (Whittonw, 1984).

Piezómetros: Los piezómetros son instrumentos instalados en el subsuelo, cuya función es medir la presión hidrostática natural en el suelo en un punto determinado, a una cierta profundidad (DGCOH, 1986).

Pozo artesiano: pozo realizado perforado hasta un acuífero confinado entre estratos impermeables en una cuenca artesiana. El agua del acuífero se encuentra a presión (presión hidrostática), y una vez alcanzada por el sondeo sube espontáneamente hasta la superficie en la cabeza del sondeo está a un nivel inferior del nivel freático (Whittonw, 1984).

Presión hidrostática: Presión en cualquier punto de un líquido en reposo, se mide por la densidad del líquido multiplicada por su profundidad (Whittonw, 1984).

Red primaria de agua potable: Es el sistema de tuberías y sus accesorios, cuyos diámetros son igual o superiores a 50 centímetros. (DGCOH, 1986).

Red primaria de drenaje: Es el sistema de tuberías y sus accesorios, cuyo diámetro es mayor a 60 centímetros (DGCOH, 1986).

Red secundaria de agua potable: Es el sistema de tuberías y sus accesorios, menores a 50 centímetros de diámetro, en el cual se conectan la toma de los usuarios y que llega hasta la válvula de seccionamiento, localizada aguas abajo del medido (DGCOH, 1986).

Red secundaria de drenaje: Es el sistema de tuberías y sus accesorios, cuyo diámetro es menor a 60 centímetros, en el cual se conectan los tubos de descarga de los usuarios y que llega hasta el límite del predio (DGCOH, 1986).

Zona de recarga: Se define como zona de recarga aquella en la que se infiltra directamente el agua sea esta en forma de lluvia, ríos, lagos o laguna y planicies de inundación, las zonas de recarga y sus diferentes esquemas de flujo están en función directa del tipo de roca expuesto y depende de las características hidráulicas presentes en ellas (DGCOH, 1986).