

Capítulo 3. Agrietamientos

a. Introducción

Las primeras apariciones de grietas en la ciudad de México fueron documentadas por Roberto Gayol en 1925. Este trabajo fue el precursor de toda una serie de investigaciones que posteriormente se desarrollarían sobre este tema que sigue siendo, a pesar de tantos años, un problema de actualidad y de sumo interés. Correspondió al Dr. Nabor Carrillo (1947) sentar las bases formales acerca de la aparición de agrietamientos por extracción de agua. Sus investigaciones motivaron a otros a adentrarse en este vasto tema, desarrollando algunas teorías, sobre todo empíricas, sobre las causas y factores que generaban la aparición de nuevas grietas en superficie. A partir de dichas investigaciones, en 1968 las autoridades de la ciudad prohibieron la apertura de nuevos pozos, teniendo como resultado la muy notable disminución de los hundimientos. Dado que la ciudad siguió creciendo, para 1973 fue indispensable crear nuevos y más profundos pozos en la periferia de la ciudad, siendo las planicies de Chalco y Xochimilco zonas aptas para abastecer a la población de la ciudad. No pasó mucho tiempo para comenzar a notarse las consecuencias que hoy son evidentes, fracturamientos que afectan casas y pavimentos, inundaciones por hundimiento del suelo. A raíz de esto actualmente las zonas de mayor hundimiento se localizan en Ciudad Nezahualcóyotl y hacia el norte del Distrito Federal.

b. Antecedentes

La Cuenca de México estuvo formada por cinco lagos someros, encadenados de norte a sur, siendo estos Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco. Esta cuenca sufrió una gran transformación a principios del siglo XIX cuando se tomó la decisión de drenarla artificialmente hacia el río Tula, con el objeto de secar los grandes cuerpos de agua y dar paso al subsuelo del lago para el asentamiento de la población que llegaba del interior del país para radicar en una ciudad incipiente. Algunas fuentes de abastecimiento de agua, eran los aún pocos pero existentes manantiales. Estos por un tiempo fueron suficientes para satisfacer la demanda de la población; pero la constante y cada vez más acelerada inmigración de la población, hicieron que estos desaparecieran. Ante esto, fue necesario buscar nuevas fuentes de agua. La solución fue la perforación de pozos artesianos con gastos del orden de 1.5 lt/seg, resultando una magnífica salida al problema del abastecimiento del agua. El crecimiento de la ciudad obligó a la proliferación desmedida de pozos, y fue en ese momento cuando empezaron a notarse los primeros hundimientos por la explotación no racionalizada de los acuíferos.

En 1953 la ciudad de México cubría 240 km² de la superficie total de la Cuenca de México, siendo el 3%, mientras que en 1980 había aumentado a 980 km², equivalente al 14%. En esos años, se construyó un sistema de drenaje profundo para eliminar la torrencial escorrentía que generaban miles de kilómetros cuadrados de asfalto y concreto, por lo que con este sistema de drenaje se acabaron de secar casi todos los antiguos lechos del lago. En los recientes años, y ante los pocos o

nulos espacios disponibles para habitar, la población inmigrante se ha visto en la necesidad de poblar las laderas de la cuenca y las faldas de las sierras que la circundan. Ante ello, la recarga de los mantos freáticos se ha visto interrumpida, ya que cada vez son menos las áreas verdes para la infiltración del agua.

Una de las principales consecuencias del déficit entre bombeo y recarga del acuífero de la Cuenca de México son los hundimientos graduales o súbitos de la superficie. A este fenómeno se le conoce como *subsistencia*. Al bombear, se presenta un abatimiento del nivel freático, lo cual se refleja en la disminución del contenido de agua de las arcillas que formaban el antiguo lecho de los lagos. Al perder su contenido de agua, las arcillas y los sedimentos orgánicos se compactan, dando como resultado una disminución del volumen del suelo, la generación de hundimientos, asentamientos y acomodamientos graduales de los rellenos. Los descensos del nivel del terreno dependen de la velocidad local a la que se extrae agua del subsuelo y de la profundidad y naturaleza de los sedimentos. En algunas partes los hundimientos han sido del orden de entre 8 a 10 m aproximadamente entre 1898 y 2002 (Figura 3.1), lo cual ha propiciado la generación de grietas de tensión, que se propagan a la superficie, manifestándose en el deterioro del pavimento, guarniciones y edificaciones, lo que genera un riesgo importante para la población.

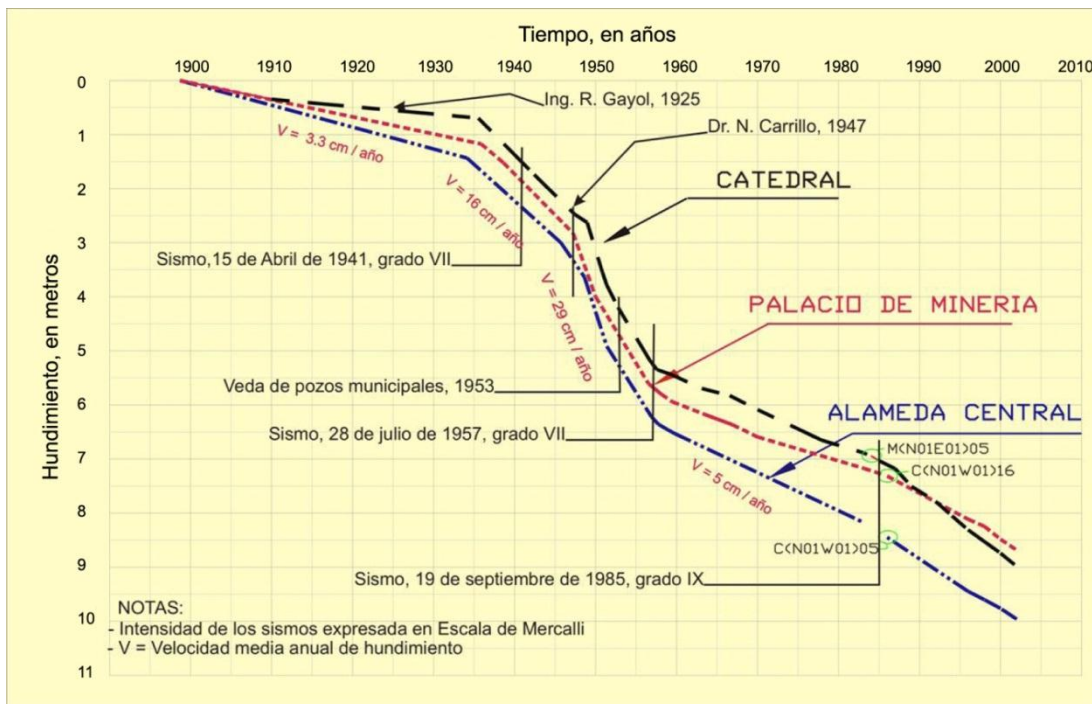


Figura 3.1. Evolución de los hundimientos en la ciudad de México para el periodo 1898 – 2002.

Hasta el momento sólo se ha mencionado que los agrietamientos son causados por la sobreexplotación de acuíferos, puesto que es el enfoque a estudiar en este trabajo. Cabe mencionar, que además de esta causa, existen otras causas más que los generan. A continuación se mencionan algunos casos.

Observaciones realizadas en campos agrícolas, constataron que la extracción de agua a gran escala para riego produjo numerosas fisuras lineales. Se concluyó que eran ocasionadas por abatimientos del agua subterránea (Poland y Davis, 1969; Figueroa Vega, 1978).

Varios autores asociaron la formación y apertura de grietas después de una severa tormenta (Leonard, 1929; Heindl y Fetch, 1955; Pashely, 1961; Robinson y Peterson, 1962; Winikka, 1964; Holtzer, 1976). Pero Carpenter en 1999 presentó una explicación a que los agrietamientos se generan casi de forma instantánea después de una lluvia torrencial. Considera que los agrietamientos generan una zona de debilidad en la superficie y que cuando se presenta una fuerte lluvia, el agua se infiltra a través de la zona de grietas, erosionándola y haciendo que su tamaño aumente en cuestión de minutos (figura 3.3).

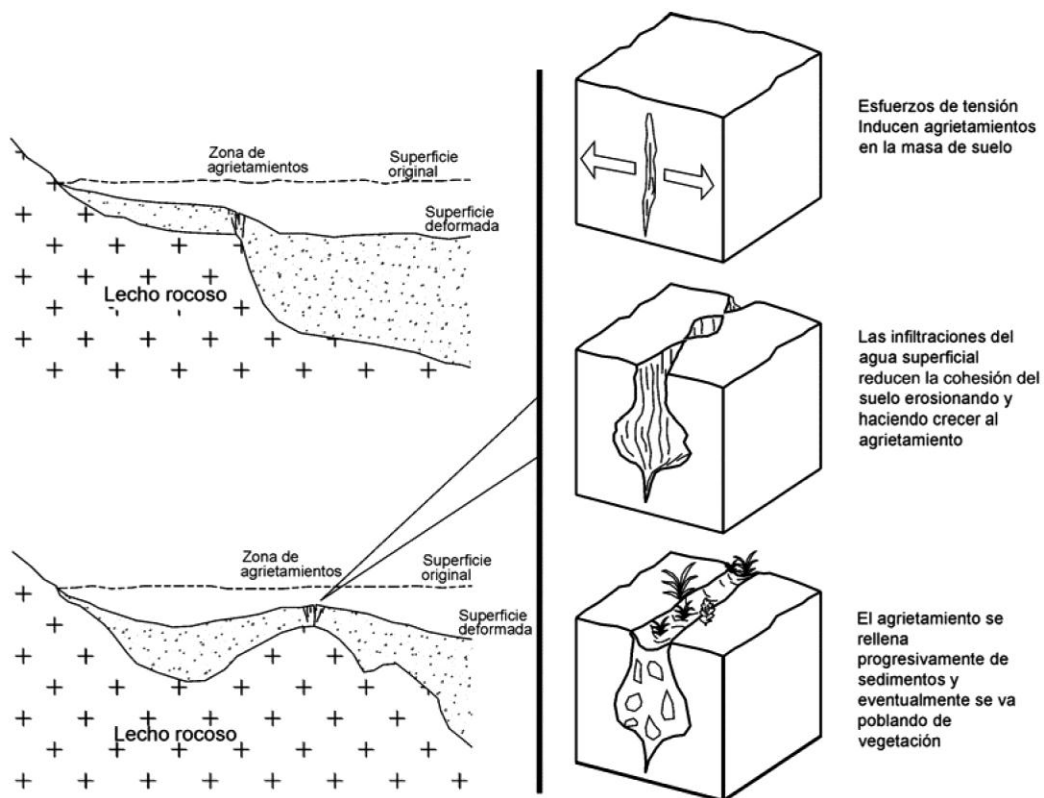


Figura 3.3. Esquema de la generación de agrietamientos después de una lluvia torrencial. Adaptado de Carpenter (1999).

Lee, Keneth y Strauss en 1969, encontraron que la remoción de materiales del subsuelo, pudiendo ser éstos agua, petróleo, gas o sólidos, ocasiona el hundimiento de la superficie. Posteriormente, Melgoza (1978) atribuye en sus estudios que los agrietamientos son generados por la presencia de rellenos artificiales en proceso de compactación, existiendo una diferencia de compresibilidad entre el suelo y el relleno. Kreitler (1976) describe los hundimientos y grietas en Texas y la forma en que un sistema preexistente de fallas puede controlar la aparición de las grietas, por reactivación o por extrapolación de las antiguas. También describe la forma en que las fallas pueden actuar como barrera al flujo subterráneo, induciendo la formación de escalones

piezométricos que favorece la aparición de hundimientos diferenciales bruscos en la superficie. Arias y Auvinet (1990) apoyados en la mecánica de fracturas, interpretaron algunos casos de agrietamiento en el valle de México, de los cuales se desprende que las presiones hidráulicas que se desarrollan por acumulación brusca de agua de lluvia dentro de grietas preexistentes favorecen la propagación de las mismas.

De las anteriores teorías para explicar el origen de los agrietamientos, estas se pueden clasificar en dos grupos principalmente, uno con relación al origen geológico y otro asociado a flujos de agua.

La generación de grietas de origen geológico están asociadas con:

- a) Cambios laterales y verticales en la sedimentología y estratigrafía de la secuencia sedimentaria (Zeevaert, 1953; Marsal y Mazari, 1959; Larson, 1984); o por interdigitación de flujos de lava del cuaternario y piroclastos con los sedimentos lacustres (Ortega *et. al.*, 1993; Zawadzki, 1996).
- b) Control estructural: por la topografía del basamento (Auvinet y Arias, 1991; Larson, 1984) o la morfología de la capa dura.
- c) Tectónica, donde fallas geológicas preexistentes pueden ser reactivadas (Klireiter, 1976; Melgoza, 1978; Garduño *et. al.*, 1997).

La generación de grietas asociadas al flujo de agua son:

- a) Desecación por evaporación (Juárez-Badillo, 1962; Holzer, y Davis, 1976, Alberro y Hernández, 1990).
- b) Fuerzas de filtración (Lofgren, 1972; Juárez-Badillo y Figueroa, 1984; Alberro, 1990).
- c) Fracturamiento hidráulico (Alberro, 1990).
- d) Abatimientos diferenciales en el acuífero (Holzer y Davis, 1976; Holzer, 1984; Figueroa, 1989).
- e) Interacción acuífero-acuitardo (Carrillo, 1947; Marsal y Mazari, 1959; Lee y Shen, 1969).

c. Mecanismos de generación de grietas

Existen tres diferentes modos básicos de grietas, asociados a condiciones de tensión diferentes, como se presenta en la figura 3.4. En el primer modo la tensión tiende a generar fuerzas en direcciones verticalmente contrarias, separándose súbitamente dando como resultado dos regiones. El segundo modo ocurre cuando dos porciones de un continuo se deslizan a lo largo de planos tangentes debido a esfuerzos cortantes, creando una discontinuidad. El tercer modo involucra desplazamientos perpendiculares al frente de la grieta y a los planos de corte en los que ésta se desarrolla.

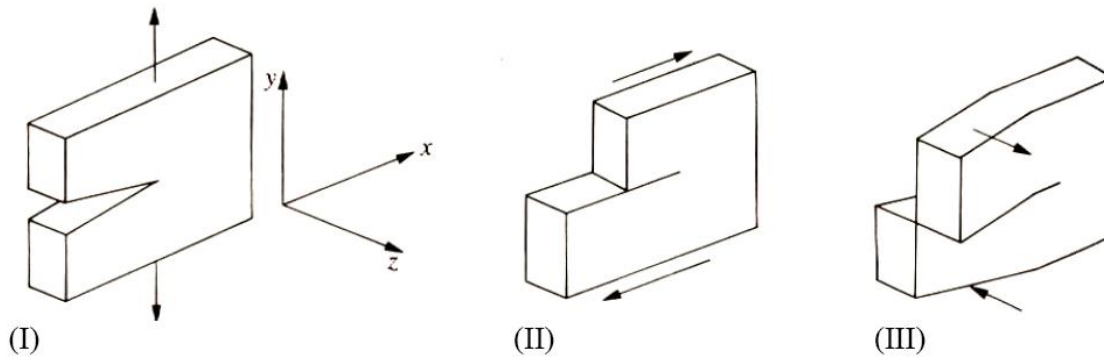


Figura 3.4. Diferentes modos de fractura.

Auvinet (1991) ha identificado cinco mecanismos diferentes de generación de grietas en los suelos de la zona metropolitana del Valle de México, los cuales son:

- **Grietas de transición brusca.** Grietas y fisuras pueden aparecer con frecuencia en zonas de transición abrupta localizadas principalmente en los límites del antiguo lago, donde el espesor de las capas arcillosas interestratificadas con arenas limosas cambia drásticamente en cortas distancias.. el bombeo de agua crea asentamientos diferenciales debido a una disminución del nivel piezométrico en la zona de transición, y seguido a esto se presenta el agrietamiento (Figura 3.5).
- **Grietas por estructuras geológicas sepultadas.** Flujos de lava volcánica así como depósitos arcillosos se presentan a lo largo de antiguos lagos. La consolidación de los depósitos blandos que cubren dichas estructuras geológicas dará lugar a asentamientos diferenciales que a su vez inducen tensiones y por lo tanto, grietas (Figura 3.6).
- **Grietas de fracturamiento hidráulico.** Cuando el agua penetra al interior de una pequeña fisura, las concentraciones de tensión pueden provocar un crecimiento de dicha fisura. Este tipo de fenómeno es recurrente en tiempos de lluvias (Figura 3.7). Las condiciones para la propagación de estas grietas se pueden establecer utilizando los conceptos de Griffith, como se ha descrito por Auvinet (1991, 2008) y Arias (1991).
- **Grietas por irregularidades estratigráficas.** Las variaciones en las propiedades del suelo, principalmente la compresión, puede inducir asentamientos diferenciales como consecuencia del hundimiento regional y, por tanto, se generan tensiones de tracción y grietas cuando el suelo está sometido a consolidación regional.
- **Grietas por evapo-transpiración.** Este tipo de grietas pueden aparecer debido la contracción del suelo durante las estaciones secas, o por la pérdida de humedad de las raíces de plantas y árboles. Este proceso puede producir un zigzagueo en estratos superiores. Estas grietas se extienden por lo general hasta sólo un par de metros.

Los dos primeros mecanismos son una consecuencia directa del hundimiento regional, siendo los más destructivos. El resto de los casos se pueden combinar con los primeros para estimular el crecimiento y propagación de las grietas.

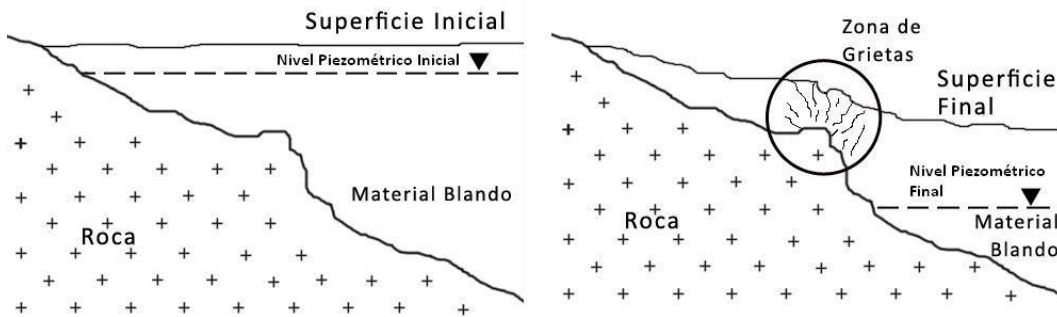


Figura 3.5. Grietas generadas por transición brusca.

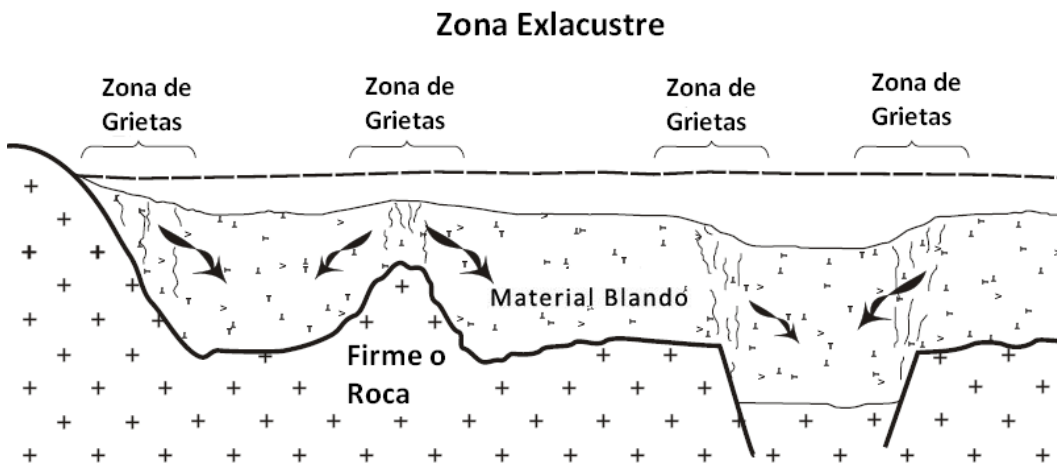
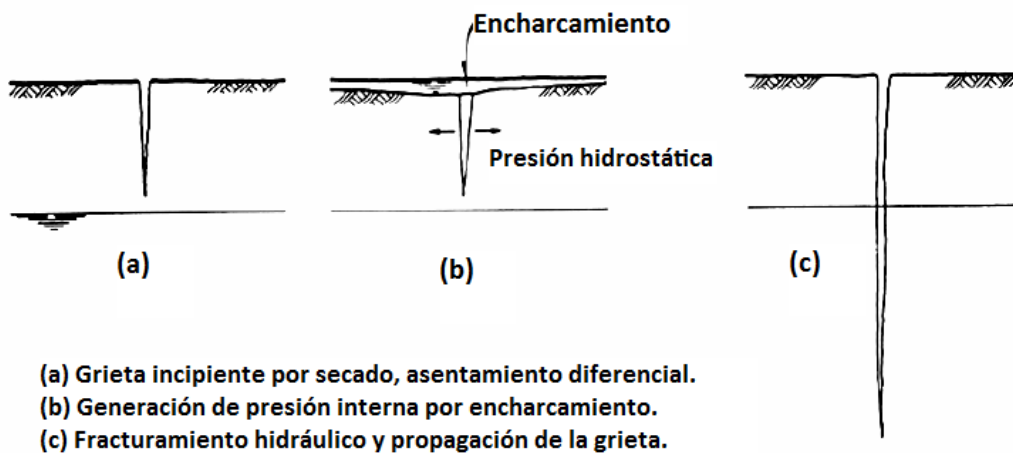


Figura 3.6. Modelo de generación de grietas por presencia de estructuras sepultadas.



- (a) Grieta incipiente por secado, asentamiento diferencial.
- (b) Generación de presión interna por encharcamiento.
- (c) Fracturamiento hidráulico y propagación de la grieta.

Figura 3.7. Grietas generadas por fracturamiento hidráulico.

d. Subsistencia y agrietamiento en la Cuenca de México

La subsidencia es un hundimiento gradual o súbito de la superficie terrestre ocasionada por movimientos de los materiales del subsuelo. Para el caso de la ciudad de México se debe a la consolidación del subsuelo arcilloso. Esto se explica, cuando se extrae agua de los mantos freáticos, el nivel piezométrico original se abate, decayendo en profundidad. Al no existir agua que rellene el espacio entre poros del suelo, viene un reajuste en la disposición de los granos que conforman la estructura del subsuelo, implicando una disminución en el volumen de éste.

El hundimiento regional que presenta la zona lacustre de la cuenca de México es una fuente de riesgos importante, que se manifiesta en daños a los servicios municipales y a edificios, además de la inundación periódica de ciertas aéreas en periodos de lluvias y la generación de agrietamientos. El hundimiento tiene además incidencia en la respuesta sísmica de la zona lacustre.

Méndez *et. al.* (2008) estudiaron la evolución del hundimiento regional en el valle de México mediante nivelaciones de bancos de nivel distribuidos dentro del Distrito Federal y en la zona del ex-lago de Texcoco. Con este análisis estimaron que el hundimiento acumulado para un periodo de tiempo comprendido entre 1862 a 2005 fue del orden de 13m y se localiza en la zona del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, Figura 3.10a. En la zona del centro de la Ciudad de México se tienen hundimientos de aproximadamente 11m. Al sur del cerro de la Estrella, al poniente y sur del cerro de Xico, al norte del cerro del Marqués y entre el cerro del Peñón y el lago Nabor Carrillo se observan hundimientos de 9m a 10m. La zona lacustre que colinda con la zona de lomas presenta el menor hundimiento, lo cual indica que la magnitud de hundimiento está directamente relacionada con el espesor del acuitardo. Con esta información realizan además un análisis de velocidades de hundimiento regional. Concluyen que la zona del ex-lago de Texcoco y la zona de Chalco presentan las mayores velocidades de hundimiento con tasas de 30 a 35 cm/año, para un periodo de 2000 a 2005, Figura 3.10b.

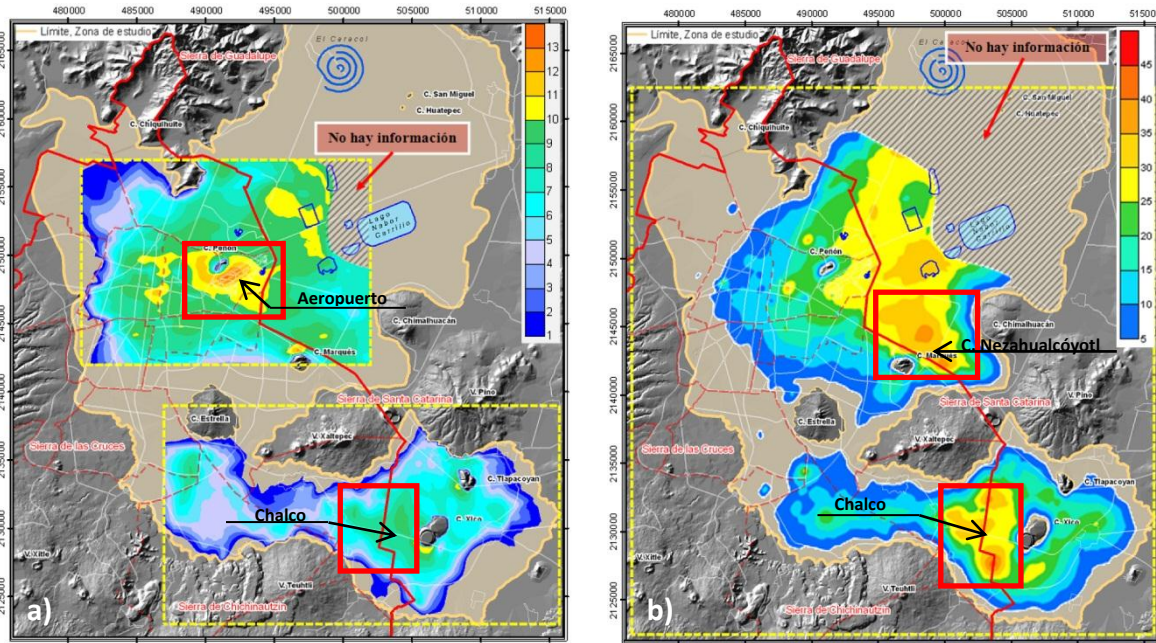


Figura 3.10a, hundimiento regional absoluto (m), 1862 - 2005 , figura 3.10b, velocidades de hundimiento (cm/año), 2000 - 2005. (Méndez, 2008).

De las imágenes anteriores se resalta que a pesar de que la zona del aeropuerto ha presentado el mayor hundimiento en más de un siglo, zonas al noreste del cerro del Marqués, en la parte de Ciudad Nezahualcóyotl, y la zona de Chalco, están teniendo tasas muy elevadas de velocidad de hundimiento, lo que implica que en el futuro habrá una reducción considerable en el espesor de los sedimentos blandos, lo que pudiera traer la aparición de agrietamientos de considerables dimensiones.

Cabral, *et. al.* (2010) presenta un mapa a detalle de la subsidencia de la zona oriente de la ciudad de México utilizando interferometría, analizando Iztapalapa, Ciudad Nezahualcóyotl y Chalco (Figura 3.11) para el periodo de enero, 2004 – julio, 2006. Esta lámina presenta gran detalle ya que muestra los límites de las zonas de Transición y de Lago; las grietas existentes en la delegación Iztapalapa, Tláhuac y Chalco, así como las principales avenidas. Se observa claramente como en la zona de Loma la deformación del subsuelo por efecto del hundimiento es nulo, marcado en color verde. El máximo hundimiento (28.5 cm/año) se localiza en la parte de ciudad Nezahualcóyotl, entre el aeropuerto, cerro del Marqués y cerro de Chimalhuacán. Se puede apreciar como las grietas tienen un comportamiento casi paralelo a las curvas de nivel en profundidad de la sierra de Santa Catarina.

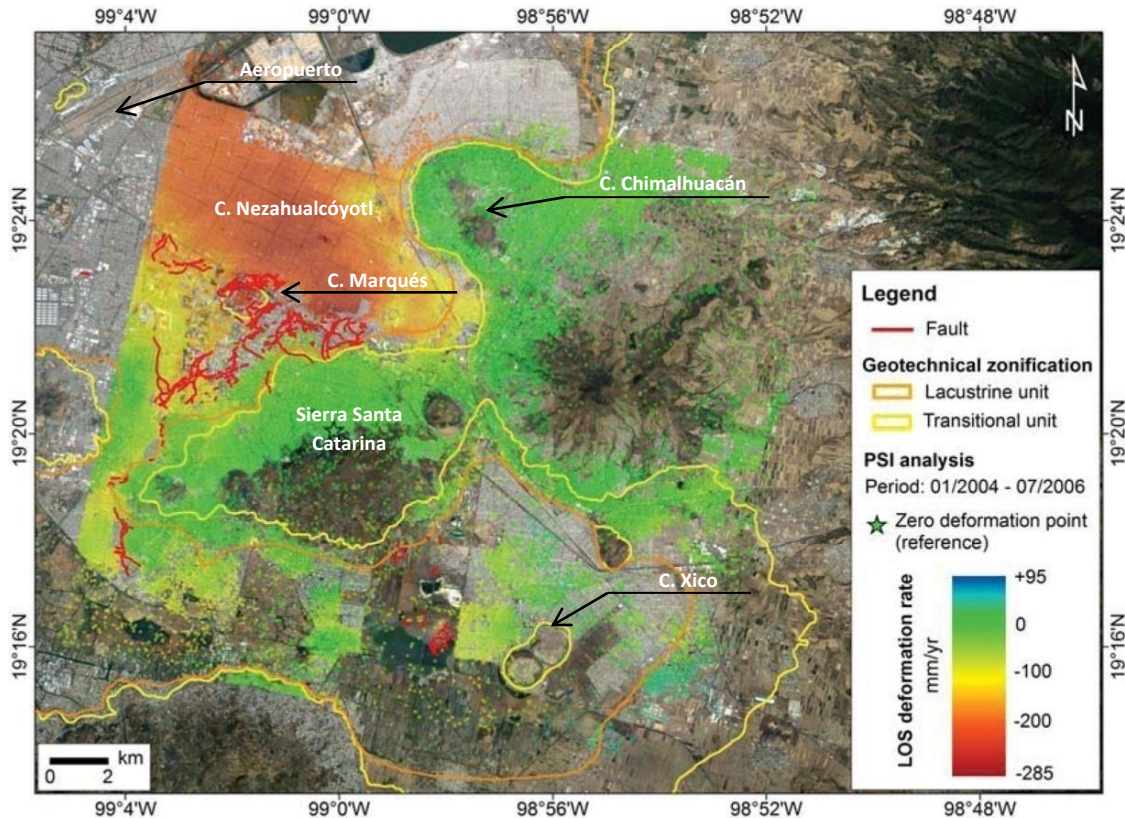


Figura 3.11. Subsidencia del sureste de ciudad de México. Las líneas en rojo representan las grietas existentes en Iztapalapa, Tláhuac y Chalco. Las líneas en amarillo y naranja representan la zonificación geotécnica vigente (GDF, 2004) (Cabral, *et. al*, 2010).

De las imágenes anteriores se resalta que mediante varias técnicas, estas definen prácticamente las mismas zonas con tasas de hundimiento similares. Este hundimiento tan acelerado está provocando la generación de agrietamientos cerca de los bordes de los cuerpos montañosos, en donde se están generando esfuerzos de tensión. Esto se aprecia por el paralelismo que existe entre la distribución de los agrietamientos y las curvas de nivel en profundidad de la Sierra de Santa Catarina. Lo anterior sustenta que el fenómeno de agrietamiento está ligado con el hundimiento regional, sobre todo en la parte oriental de la ciudad de México.

Por lo anterior, se realizó la recopilación de información sobre la existencia de agrietamientos en planos y artículos científicos. En la figura 3.13 se presenta el mapa final obtenido mediante la recopilación de esta información. Se aprecia claramente que un importante número de agrietamientos se localizan en la parte oriente del Distrito Federal, principalmente en la delegación Iztapalapa. Se resalta que de estas, una buena cantidad se localizan en la zona de lago y el resto alrededor del cerro de Marqués, en la zona de transición abrupta. Tal es el caso de las grietas que se localizan hacia el norte de la ciudad, al pie de la Sierra de Santa Catarina, al centro a las orillas del Peñón de los Baños, y en el sur al pie de loma de la Sierra del Chichinautzin. Las curvas de nivel, en color naranja, ayudan a tener una mejor perspectiva de la morfología del terreno y como influye en la aparición de agrietamientos.

Ahora se tienen la dirección de propagación de las grietas, su localización en un plano de calles así como longitud. Toda esta información se encuentra contenida en un SIG en el programa informático Google Earth v.6.0.



Figura 3.13. Recopilación final de las grietas existentes en la Cuenca de México.

e. Caso de agrietamiento en la Colonia Del Mar, Tláhuac

En la lámina de la figura 3.14 se presenta una propuesta sobre la forma, localización y extensión espacial de un derrame volcánico proveniente de la actividad de la Sierra de Santa Catarina que está generando severos agrietamientos en la delegación Tláhuac. A esta conclusión

se llegó mediante el análisis la información recopilada en campo, esto es, en base a las observaciones topográficas, la tendencia de los agrietamientos, así como por la configuración de los datos obtenidos y la información bibliográfica. Ésta estructura enterrada es el producto del análisis e interpretación de 59 registros de microtremores tomados en la zona, 37 de ellos tomados en noviembre, 2010 y el restante recopilados del trabajo de Lermo *et. al.* (1992). De lo anterior se corrobora que existe una relación entre las zonas cuyos valores de periodo comprenden entre 2s y 2.5s y la aparición de agrietamientos. Este derrame tiene una longitud de aproximadamente 2.5km, tomando como base las faldas de la sierra, como lo marca la figura 3.14, y como punto final el extremo suroriente del predio estudiado que colinda con la avenida Canal de Chalco. En las siguientes líneas se describe la problemática de esta zona.

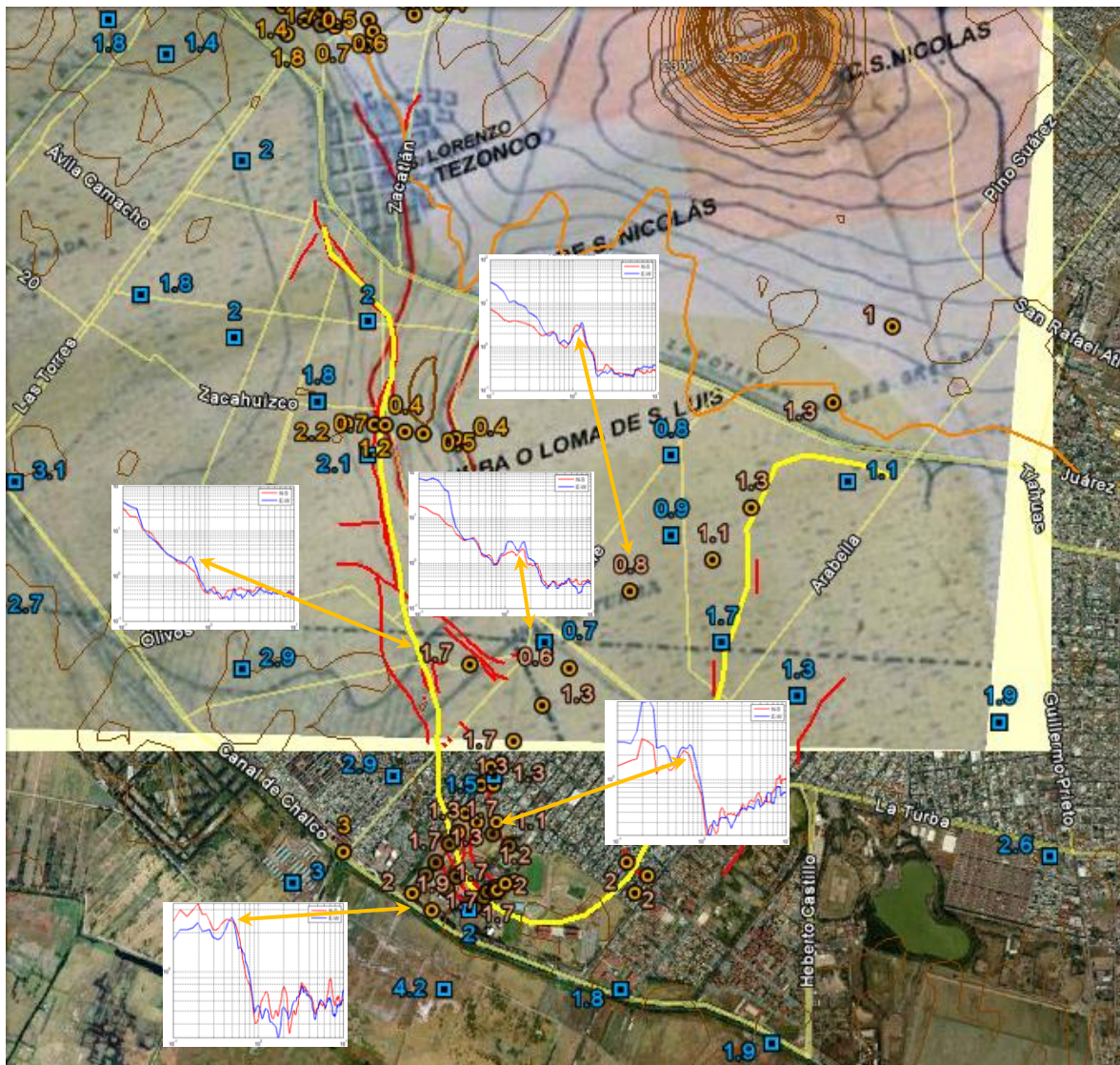


Figura 3.14. Localización espacial del derrame volcánico de la Sierra de Santa Catarina delimitado con línea amarilla. Las líneas en rojo representan los agrietamientos existentes en la parte oriente de la delegación Iztapalapa y poniente de la delegación Tláhuac. Las líneas en café y naranja corresponden a las curvas de

nivel. Se sobrepuso el mapa de 1927 como referencia. Los puntos en azul corresponden a Lermo (1992) y el resto de ellos se adquirieron para este estudio.

Dentro de las instalaciones del Agrupamiento Fuerza de Tarea Sector 48, localizado en la colonia Del Mar, se observó una familia de grietas con una orientación preferencial NW30° que están afectando prácticamente a todo el terreno ya que lo cruzan en su extensión, provocando afectaciones a la infraestructura como edificios y caminos. La ausencia de construcciones en el sitio permitió la fácil identificación de las grietas que cruzan al predio (Figura 3.15).



Figura 3.15. Zona de estudio. Las líneas en azul delimitan al predio. Las líneas en rojo muestran las grietas que afectan la zona de estudio.

Estas grietas, refiere el personal que labora ahí, comenzaron a activarse en un lapso de 10 años, afectando estructuralmente a las construcciones por las cuales atraviesa, Figura 3.16. Es conveniente mencionar que este sistema de grietas no sólo afecta a este lugar, ya que fuera de él, tanto hacia el noroeste, entre los límites de la delegación Tláhuac e Iztapalapa, y al noreste, se halló la continuidad de éstas, afectando a casas e infraestructura urbana, Figura 3.17. En un recorrido por la colonia del Mar se encontraron daños estructurales a las construcciones e infraestructura. En la calle Almeja se localiza un escalón claramente marcado, que por la magnitud de su asentamiento diferencial (40 cm) ha impedido el tránsito local de los vehículos además de afectar la entrada de casas, asegurando la gente que ahí reside, las afectaciones suceden intempestivamente, asentándose el suelo en un cierto lapso de tiempo.



Figura 3.16. Afectaciones en las instalaciones del Agrupamiento Fuerza de Tarea. Se verifica la presencia de escalones; algunos han sido rellenados con asfalto para paso vehicular.



Figura 3.17 a, b, c. Afectaciones que han provocado los agrietamientos en la colonia Del Mar.

En base a las mediciones realizadas, en la figura 3.18 se presenta el mapa de isoperiodos zonal, en el cual se observa el comportamiento del subsuelo en la zona. En la figura 3.19 se presenta el mapa a detalle de la zona de estudio. En este mapa se observa que la zona está caracterizada por un rango de valores comprendido entre 1.1 y 2.5 s. Los valores más altos se encuentran de la zona

media hacia el suroeste. El valor más bajo se localiza en el centro de la figura con un valor de 2.5s. Hacia el norte se tienen valores de 1.7s. que caracterizan a buena parte del predio; y hacia el norte se tienen valores de 1.3s.

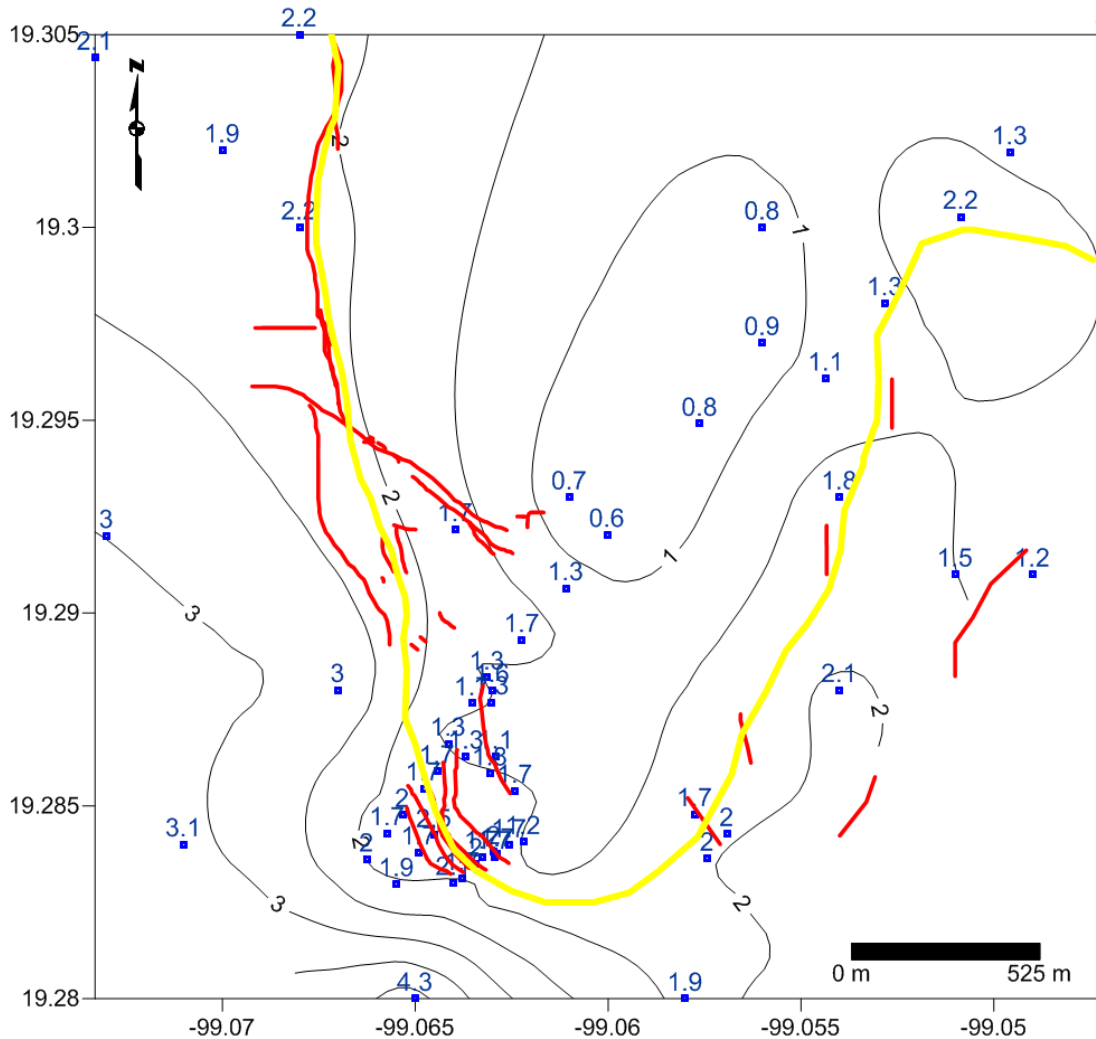


Figura 3.18. Mapa regional de la zona estudiada. En la esquina inferior izquierda se localiza el predio estudiado a detalle. En la parte central se visualiza en colores claros los valores mínimos comprendidos entre 0.6 y 0.8 s. asociados a zona de transición. En superficie esta zona presenta un cambio topográfico.

En una búsqueda bibliográfica sobre la presencia de agrietamientos en esta zona, se encontraron un par de imágenes que hacen referencia a una anomalía geotécnica en esta zona. En el Plano de la ciudad de México de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas que data de 1927, se identifica una anomalía geomorfológica que es consecuencia de la actividad volcánica de la Sierra de Santa Catarina, la cual asemeja forma de escollera se adentra en lo que ahora es el ex lago de Xochimilco (Figura 3.19).

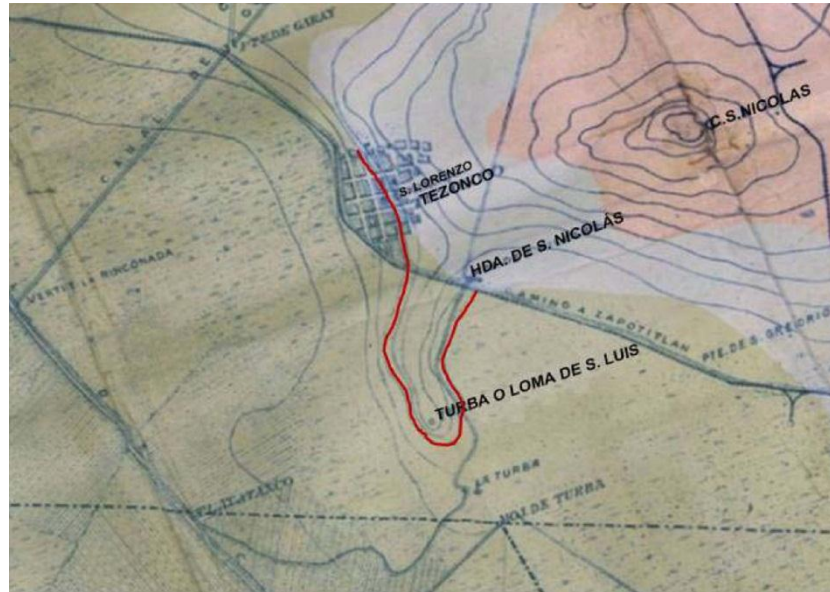


Figura 3.19. Sección del Plano de la ciudad de México de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1927. La forma de la anomalía está representada en línea roja.

De igual manera, Fernández Leal elabora en 1899 un plano corográfico de la ciudad, en el cual hace referencia a esta misma anomalía.

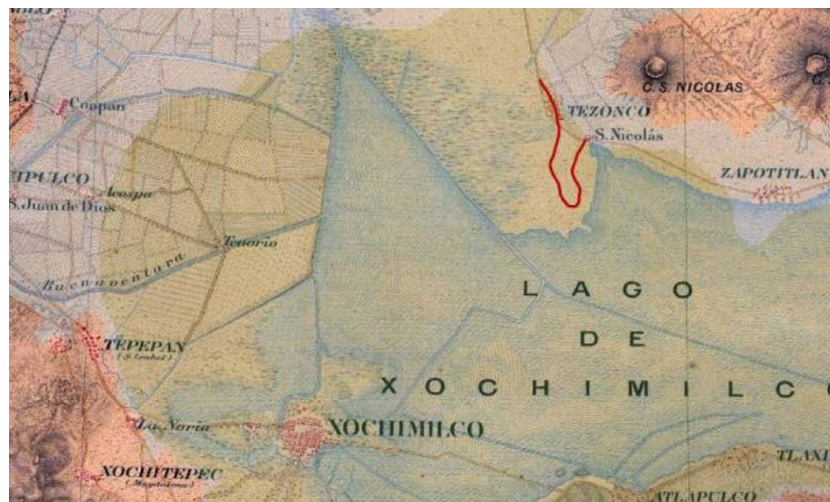


Figura 3.20. Sección del plano corográfico de Fernández Leal, 1899. La forma de la anomalía está representada en línea roja.

Por lo anterior se procedió a la georeferenciación de la figura 3.19; se encontró que esta anomalía geomorfológica se encuentra dentro de la zona de estudio y además presenta un paralelismo entre sus extremos y los agrietamientos marcados en líneas rojas. Esto explica el que se hayan encontrado valores de periodo bajo entre 0.6s y 0.9s.

Otra manera que sustenta la presencia de este derrame se presenta en la figura 3.10 b, en donde esta imagen fue generada mediante los bancos de nivel distribuidos en todo el Distrito Federal

(Figura 3.21). Es importante mencionar la gran similitud en cuanto a la forma del derrame propuesto y las zonas que han presentado una nula compactación, esta área iluminada en color gris. Incluso se corrobora como los agrietamientos también son paralelos a este.

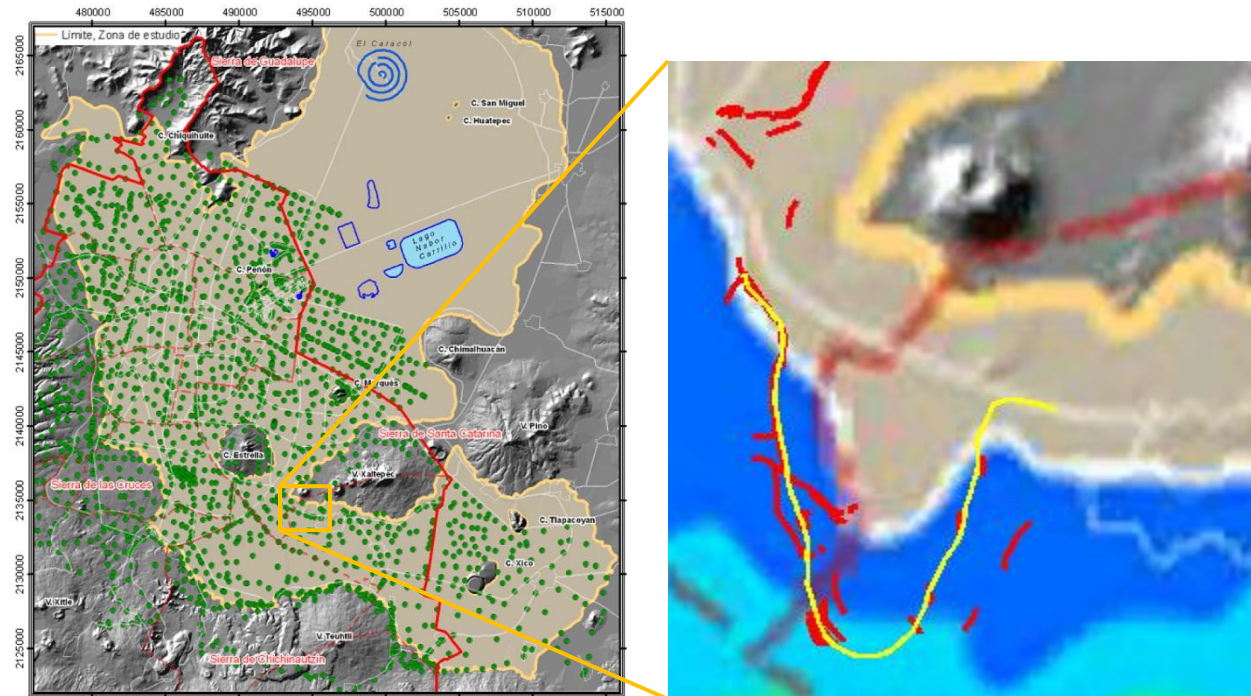


Figura 3.21. Ubicación de los bancos de nivel, 1983-2005.