



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEDICIONES DE MICROTREMORES
PARA ESTIMAR EL ORIGEN DEL AGRIETAMIENTO EN LA
DELEGACIÓN IZTAPALAPA, D.F., MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

ESPINOSA VILLALPANDO LUIS ANGEL

TUTOR:

M. EN C. JAVIER LERMO SAMANIEGO

2011





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.

DEDICATORIAS

A Dios, por acompañarme todos los días y llenar de luz mi camino.

A mis papás, Mario Fernando y María del Rosario,

por el infinito amor que me han dado,

por el ejemplo de valentía y perseverancia que siempre he visto

en ustedes, pero sobre todo el apoyo incondicional que me brindan

aún cuando las decisiones que tome no las crean convenientes,

sin embargo; confían en mí, y están siempre disponibles

para decirme esa pequeña frase “sigue esforzándote”.

Las palabras no bastan para externar mi profundo agradecimiento

por ustedes papás, sólo me resta decirles: gracias, los amo.

A mis hermanos Aldo y Marifer, por todos los momentos

de felicidad que me brindan aún estando lejos de mí,

presentes a mi lado de cierta manera; a pesar

de los momentos difíciles por los que hemos pasado, siempre

seremos hermanos y sabemos que nos tenemos siempre

en el pensamiento y en el corazón incondicionalmente.

Y a todos mis grandes amigos q nunca me dejaron darme

por vencido en momentos críticos de mi vida, gracias por

sus palabras que siempre reconfortan mi alma haciéndome

sentir como en casa, ustedes se han convertido

en parte de mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Hace más de cinco años que mi vida por completo. Jamás había tenido la intención, ni la más profunda sensación de vivir solo. Si desde un principio hubiese conocido todos los problemas que me afrentarían, quizá nunca lo hubiera intentado. No obstante, momentos felices siempre han llegado a mi vida opacando por completo a los momentos difíciles.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de cursar la licenciatura. El estar estudiando en la máxima casa de estudios, me ha dejado como lección que las cosas que realmente valen la pena, merecen de esfuerzo, dedicación y disciplina. Las dificultades o sacrificios a los que me he enfrentado, no son nada comparados con las satisfacciones, tanto profesionales como personales que he conseguido.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por el apoyo de una beca, la cual me permitió desarrollar este trabajo de tesis y por todo lo que he aprendido a lo largo de estos dos años como becario.

Los consejos y el apoyo del Maestro Javier Lermo, mi director de Tesis, quien desde antes de estudiar la licenciatura ha venido guiando parte de mi formación no solamente académica, sino como persona, ya que siempre he sentido profunda admiración por él. Ver su ejemplo me ha puesto metas por cumplir y otras ya alcanzadas gracias a su dirección. De gran aprendizaje resultó para mí que la realización de esta Tesis no haya tenido resultados inmediatos; en ocasiones no encontraba una clara explicación a los resultados obtenidos, pero mi tutor siempre fue paciente ante mis dudas de novato y escuchaba de manera atenta los problemas surgidos a lo largo de esta Tesis.

A todos mis compañeros y amigos del instituto que me brindaron su apoyo para la toma de las mediciones de ruido ambiental. Agradezco a mis grandes amigos que se cruzaron en mi camino a lo largo de la licenciatura y que siempre me brindaron su apoyo, aún sin tener conocimientos de ingeniería.

La familia Serra Montalvo y Lermo Peña, siempre me brindó techo y pan cuando más lo necesité, esas atenciones impagables, siempre las atesoraré.

A todos mis profesores que colaboraron en mi formación académica, principalmente los ingenieros: Cafaggi, Mancilla, Nikté y Narcia. Gracias por compartir muchos de sus conocimientos conmigo. Y en especial a la Ingeniera Norma Legorreta y a la Pedagoga Celia por sus consejos, como el que me externó en un momento crítico: “Los parámetros que te pongan, los logras y los superas”.

ÍNDICE

Resumen

- 1. Introducción... 1**
 - 1.1. Antecedentes... 3
 - 1.1.1. Extracción de agua y sus efectos... 3
 - 1.1.2. Mecanismos de generación de grietas... 6
 - 1.2. Objetivos... 9
 - 1.3. Plan de trabajo desarrollado...9
 - 1.4. Alcances... 9
 - 1.5. Metodología...10
 - 1.5.1. Método espectral de Nakamura... 11
 - 2. Condiciones geológicas-geotécnicas del sitio... 13**
 - 2.1. Antecedentes geohidrológicos... 14
 - 2.2. Agrietamiento... 17
 - 2.3. Colonia Lomas de San Lorenzo, Iztapalapa... 17
 - 2.3.1. Sondeos geotécnicos... 19
 - 3. Medición de microtemores, procesado y análisis... 22**
 - 3.1. Resultados colonia Lomas de San Lorenzo... 24
 - 3.2. Detalle en la delegación Iztapalapa... 30
 - 3.2.1. Colonia Agrícola Oriental... 33
 - 3.2.2. Colonia Santa María Aztahuacán... 33
 - 3.2.3. Análisis de los periodos dominantes de la delegación Iztapalapa... 39
 - 4. Discusión de resultados... 41**
 - 5. Conclusiones... 44**
 - 6. Referencias... 46**
- Anexo A. Técnicas de exploración... 48**
- Anexo B. Valores y localización de los puntos analizados... 49**
- Anexo C. Gráficas de los cocientes espectrales... 65**

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1** Flujo en las capas del subsuelo provocado por el bombeo de agua subterránea... 2
- Figura 1.2** Distribución de pozos para extracción de agua en el Valle de México. Los puntos amarillos son de CONAGUA y los puntos rojos son del Gobierno del Distrito Federal... 2
- Figura 1.3** Distribución espacial de las velocidades de hundimientos del subsuelo (metros/año). (Auvinet, 2007)... 4
- Figura 1.4** Modos básicos de grietas... 6
- Figura 1.5** Configuraciones del lecho rocoso que pueden generar agrietamientos (Pacheco, 2007)... 8
- Figura 1.6** Proceso del agrietamiento por fracturamiento hidráulico... 8
- Figura 1.10** Condiciones geométricas para la aplicación de la técnica de Nakamura... 11
- Figura 2.1** Mapa geológico del Distrito Federal (INEGI)... 13
- Figura 2.2** Compresibilidad de materiales en la Cuenca del Valle de México. Puntos rojos: sitios identificados con agrietamiento. Línea verde: límite delegacional. (Auvinet 2007)... 15
- Figura 2.3** Orografía de la Delegación Iztapalapa. (Gobierno de la Ciudad de México)... 16
- Figura 2.4** Colonia Lomas de San Lorenzo y su influencia geomorfológica... 17
- Figura 2.5** Zonificación geotécnica del Valle de México (TGC, 2007)... 18
- Figura 2.6** Localización de los sondeos geotécnicos en la colonia Lomas de San Lorenzo, Iztapalapa... 20
- Figura 3.1** Procesamiento con el programa DEGTRA. Componentes horizontales (ventana 1 y 3), componente vertical (ventana 2). Acelerogramas (parte izquierda) y sus espectros de Fourier... 23
- Figura 3.2** Promedio de cocientes espectrales (línea anaranjada). Frecuencia dominante... 23
- Figura 3.3** Mapa de isoperiodos y distribución espacial de las grietas (existentes e inferidas) en Lomas de San Lorenzo Iztapalapa... 25
- Figura 3.4** Distribución de periodos a lo largo del perfil A-A'... 26
- Figura 3.5** Perfil B-B'. Comparativo de sondeos geotécnicos y periodos... 27
- Figura 3.6** Perfil C-C'. Comparativo de sondeos geotécnicos y periodos... 27
- Figura 3.7** Grietas localizadas, Auvinet (2009) 57 grietas aproximadamente, Carreón (2009) 158 grietas aproximadamente... 30

Figura 3.8 Zona Norte Peñón del Marqués. Superior izquierda: medición con acelerógrafo en las grietas presentes, sobre Av. Zaragoza. Superior derecha e inferior izquierda: daños en la carpeta asfáltica. Inferior derecha: tamaño del desnivel presente a simple vista... 31

Figura 3.9 Distribución espacial de los puntos de medición de microtremores en la delegación Iztapalapa (424 puntos). Lomas de San Lorenzo (cuadro anaranjado), Agrícola Oriental (cuadro Verde), Aztahuacán (cuadro azul)... 31

Figura 3.10 Valores de periodo dominante de los puntos de medición (424 puntos) y topografía de la región... 32

Figura 3.11 Mapa de isoperiodos en la colonia Agrícola Oriental, con grietas existentes e inferidas. Perfiles EE' y DD'... 34

Figura 3.12 Mapa de isoperiodos en la colonia Santa María Aztahuacán, con grietas existentes e inferidas. Perfiles FF'... 35

Figura 3.13 Perfil D-D'. Comparativo del perfil de periodo dominante y la configuración del lecho rocoso... 36

Figura 3.14 Perfil E-E'. Comparativo del perfil de periodo dominante y la configuración del lecho rocoso... 37

Figura 3.15 Perfil F-F'. Comparativo del perfil de periodo dominante y la configuración del lecho rocoso... 38

Figura 3.15 Mapa temático de isoperiodos de la delegación Iztapalapa... 40

Figura 4.1 Zonificación del probable origen del agrietamiento en la delegación Iztapalapa... 43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Profundidad a la que se localizó la roca en cada sondeo (TGC, 2007)... 19

Tabla 3.1 Espesor del suelo y sus velocidades de onda de corte a lo largo del perfil B-B' de la figura 3.5... 29

MEDICIONES DE MICROTREMORES PARA ESTIMAR EL ORIGEN DEL AGRIETAMIENTO EN LA DELEGACIÓN IZTAPALAPA, D.F., MÉXICO

Resumen. En la delegación Iztapalapa, al igual que en otras regiones del territorio nacional que presenten condiciones geohidrológicas similares, se ha intensificado el fenómeno de subsidencia a causa de la sobreexplotación del acuífero compuesto por depósitos aluviales y lacustres; dicho fenómeno se caracteriza por la generación de hundimientos diferenciales consecuente al agrietamiento. Las grietas por lo general aparecen en las zonas de transición abrupta en las que el espesor de las capas de arcilla cambia considerablemente en distancias cortas y en lugares donde se encuentran estructuras geológicas enterradas. En este trabajo se presenta una metodología para estimar el origen del agrietamiento en Iztapalapa, integrando conocimientos de geofísica, geología y geotecnia para su validación. Se analizaron registros de microtemores aplicando el método espectral de Nakamura, el cual ayuda a inferir características del suelo. La primera etapa consistió en encontrar los patrones existentes entre los periodos dominantes y las grietas presentes de curvas de isoperiodos, en la colonia Lomas de San Lorenzo, apoyándose en los sondeos geotécnicos disponibles. Dichos patrones ayudaron a identificar zonas con el mayor potencial para que se genere agrietamiento. Una vez validado el método, se aplicó la misma metodología para toda la delegación Iztapalapa, con relaciones directas entre los cambios bruscos de periodo dominante y las grietas que hasta la fecha se han mapeado.

Palabras clave: subsidencia, grietas, el método de Nakamura

MICROTREMOR MEASUREMENTS FOR ESTIMATING THE ORIGIN OF THE CRACKING IN IZTAPALAPA, DF, MEXICO

Abstract. In Iztapalapa, as in other regions of the country having similar geohydrological characteristics, the phenomenon of subsidence has intensified due to overexploitation of the aquifer consists of alluvial and lacustrine deposits, this phenomenon is characterized by the generation of differential subsidence and then there's cracking. Cracks usually appear on the abrupt transition zones where the thickness of the clay layers varies considerably over short distances and in places where there are buried geological structures. This thesis presents a methodology to estimate the origin of cracking in Iztapalapa, integrating knowledge of geophysics, geology and geotechnical engineering for the validation of the method. Microtremor records were analyzed using the spectral method of Nakamura, which helps to infer soil characteristics. The first step was to find patterns between the dominant periods of cracks isoperiodos curves, in Lomas de San Lorenzo, based on the available geotechnical soundings. These patterns helped to identify areas with the greatest potential for cracking. The method is applied, once it was validated, for all Iztapalapa, with direct links between the abrupt changes of period and the mapped cracks to date.

Key words: Subsidence, cracks, Nakamura's method

1. Introducción

La mayor parte de la ciudad de México se encuentra en lo que solía ser una serie de lagos interconectados dentro de la Cuenca del Valle de México. Materiales del lecho lacustre se presentan en series de suelos extremadamente blandos y arcillosos, que son producto de la hidratación y degradación de los derrames volcánicos, materiales piroclásticos transportados desde las partes altas de la cuenca por las corrientes de agua o directamente de los glaciares de los volcanes, o por acción eólica. Estos suelos son geológicamente muy jóvenes y son conocidos por su extremadamente alto contenido de agua y compresibilidad. Capas de materiales tales como cenizas y vidrio microvesicular piroclástico, también están presentes. El producto de las erupciones volcánicas tuvieron lugar durante el Pleistoceno superior; otros materiales que se encuentran son diversificaciones de materia orgánica y microfósiles.

Uno de los problemas a los que se enfrentan actualmente la urbanización, en distintas zonas del país, es el agrietamiento el cual se hace cada vez más notorio y su aparición es más recurrente. La zona exlacustre de la cuenca del Valle de México, ha sido afectada por dicho fenómeno principalmente en los pasados 4 años. El agrietamiento va a la par, en su mayoría, de la subsidencia o hundimiento del terreno, fenómeno causado por la compactación de los sedimentos en zonas donde se extrae agua mediante bombeo profundo, sobrepasando la cantidad de reserva de los acuíferos (figura 1.1). Al ser bombeada el agua por un periodo largo, las capas formadas por sedimentos reducen su volumen de manera significativa y al no ser el suelo rocoso una malla homogénea, se produce el hundimiento diferencial. Alrededor del 70% del agua distribuida en el Valle de México se obtiene mediante explotación de los acuíferos (figura 1.2) y el 30% restante se conduce desde el sistema de potabilización Cutzamala. La extensión de la mancha urbana ha hecho al terreno impermeable incapaz de recuperar su nivel freático estable.

En la delegación Iztapalapa recientemente se ha incrementado, principalmente, la aparición de fallamientos superficiales los cuales presentan un movimiento relativo entre dos bloques que se desplazan verticalmente (hundimientos superficiales) cuya dirección es paralela al plano de fallamiento, presentando en la superficie escarpes de altura y longitud de desarrollo variable a lo largo de la delegación. A este fenómeno, a lo largo de esta tesis, se le denominará grieta o agrietamiento.

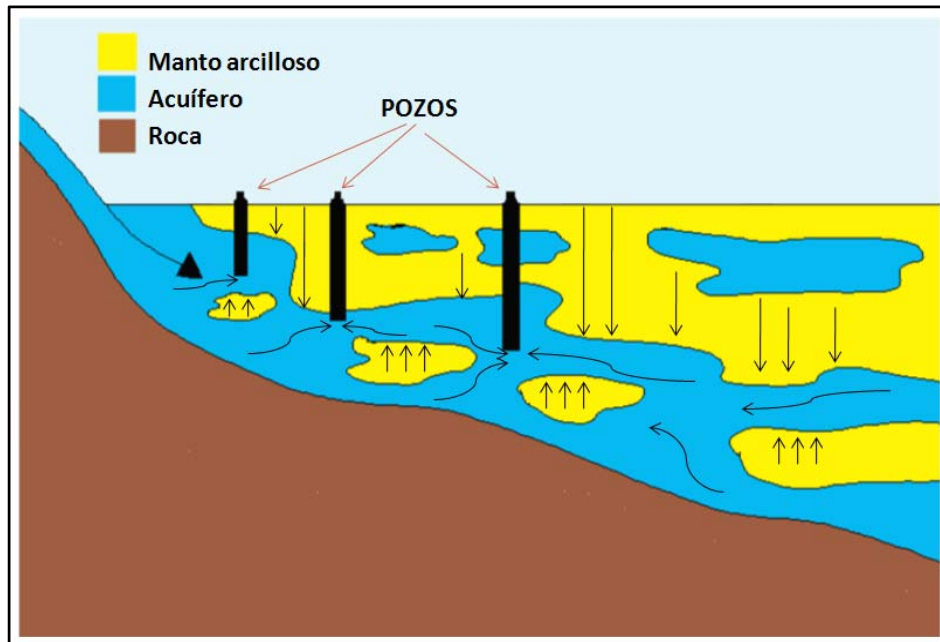


Figura 1.1 Flujo en las capas del subsuelo provocado por el bombeo de agua subterránea.

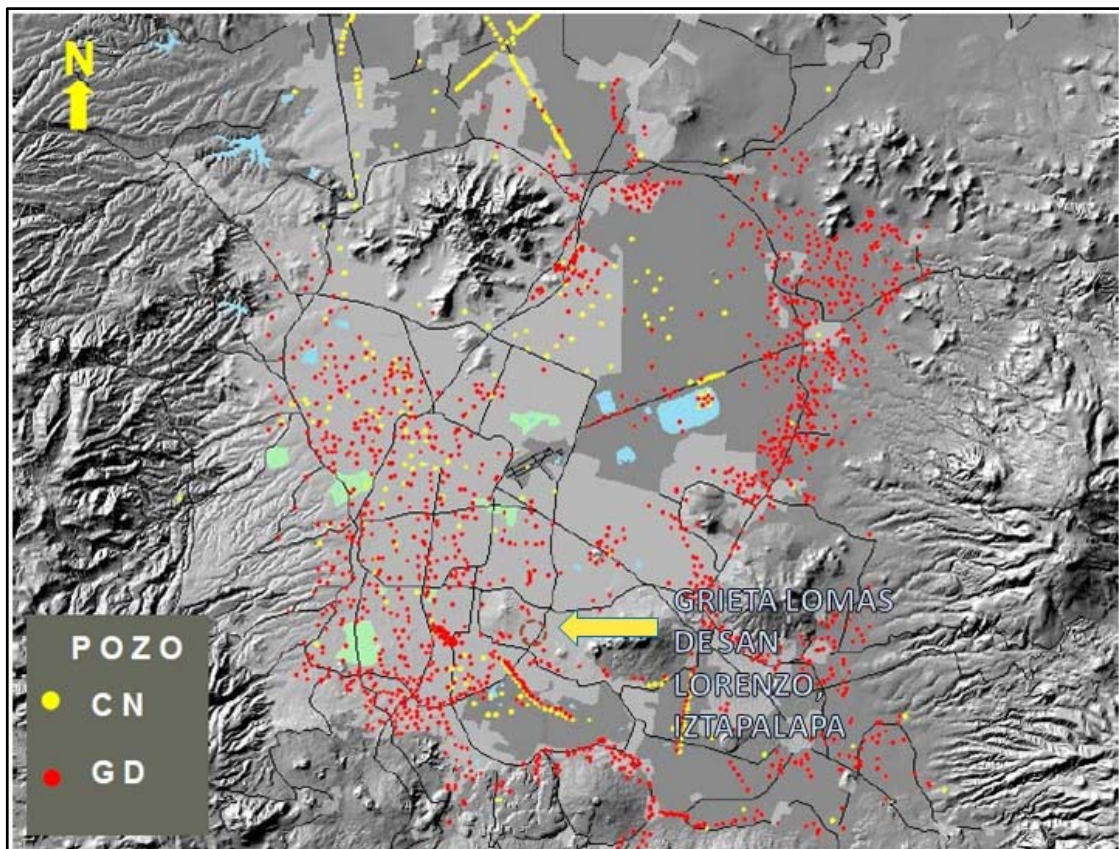


Figura 1.2 Distribución de pozos para extracción de agua en el Valle de México. Los puntos amarillos son de CONAGUA y los puntos rojos son del Gobierno del Distrito Federal.

1.1 Antecedentes

En este apartado se mencionarán los efectos que ha traído consigo el crecimiento poblacional en la cuenca del Valle de México en la que se encuentra Iztapalapa.

1.1.1 Extracción de agua y sus efectos

Los lagos de la Cuenca del Valle de México fueron secados gradualmente, comenzando en el siglo XVI, hasta hoy en día que el sistema lacustre es prácticamente inexistente. El agua de los lagos era salada, no apta para el consumo humano, así que el agua potable, en tiempos de los antiguos Aztecas, se obtenía de pozos artesianos, situados en los islotes en medio de los lagos. Una vez agotada estas fuentes de agua, fue traída por acueductos, algunos prevalecieron aún después de la conquista española. Con el crecimiento de la mancha urbana, las fuentes de agua superficiales se distanciaban cada vez más, por lo que la posibilidad de obtener agua de pozos locales se hizo cada vez más atractiva.

Desde la segunda mitad del siglo XIX el crecimiento de la ciudad de México impuso una fuerte demanda de agua potable trayendo consigo la explotación de escurrimientos superficiales. Así mismo los acuíferos fueron presionados a tal grado que comenzó una nueva fase en la forma de abastecer agua a la población mediante bombeo de pozos profundos. Al paso del tiempo con el crecimiento exponencial de la ciudad, a finales del siglo XX, este método de explotación se intensificó hasta alcanzar notables volúmenes de explotación.

A la par de la extracción intensificada de agua en la Cuenca del Valle de México, fueron detectándose hundimientos en la superficie del suelo en la toda la región baja de la Cuenca de velocidades variables de 3 a 5 (cm) por año a inicios del siglo XX, pasando a 45 (cm) por año en el mismo siglo. En términos generales el patrón de respuesta del suelo ante estas demandas hidrodinámicas, consiste en un abatimiento de la presión piezométrica que provoca esfuerzos efectivos en la masa de suelo, los que a su vez inducen procesos de consolidación que en la frontera del medio se manifiestan como hundimientos.

Teniendo la teoría de consolidación de Terzaghi como base, la relación entre el crecimiento demográfico y la cantidad de agua extraída de acuíferos fue así como se determinó el hundimiento regional creado por Carrillo (Carrillo, 1948), más tarde estos trabajos fueron extendidos por Marsal y Mazari (Marsal y Mazari, 1959). Los datos recogidos por Tamez (1992) muestran que desde 1900 hasta 1920 la tasa de sedimentación en el centro de la ciudad de México fue de 3 (cm/año), por la década de 1940 la tasa fue de 13 (cm/año) y a principios de los 50 llegó a 26 (cm/año). Los pozos de extracción de agua en el centro de la Ciudad de México fueron prohibidos y la tasa de sedimentación bajó. A finales de los años 70's y principios de los 80's nuevos pozos

fueron puestos en funcionamiento en la periferia de la ciudad, sobre todo cerca de las colinas que rodean la ciudad en el norte y en el sur. Las tasas de asentamientos se incrementaron nuevamente en la zona central de la Ciudad de México, estas tasas actualmente van de 7 a 10 (cm/año) aunque se tienen registros, en la periferia de la ciudad, de lugares que presentan un tasa de hundimiento o sedimentación que exceden los 30 (cm/año) (Mazari, 1996). Hay zonas en las afueras, hacia los bordes de la del lecho rocoso en el antiguo lago donde el suelo se asienta 40 a 60 (cm/año) (Santoyo et. al., 2005). El hundimiento total en los últimos 100 años respecto a un punto de referencia fuera de la zona del lago, ha llegado a 10 (m) en el centro de la Ciudad de México y a 13.5 (m) por lo menos en dos lugares dentro de la cuenca (Auvinet, 2009). El fenómeno de subsidencia así como sus efectos podrían ser mitigados si el bombeo de agua se redujera o incluso prohibido completamente de la ciudad, pero esto no es posible. La figura 1.3 se tiene la distribución de las velocidades de hundimientos en el Valle de México, mostrando en el punto rojo la colonia Lomas de San Lorenzo, Iztapalapa; pudiéndose observar que hay un cambio abrupto referente a los hundimientos.

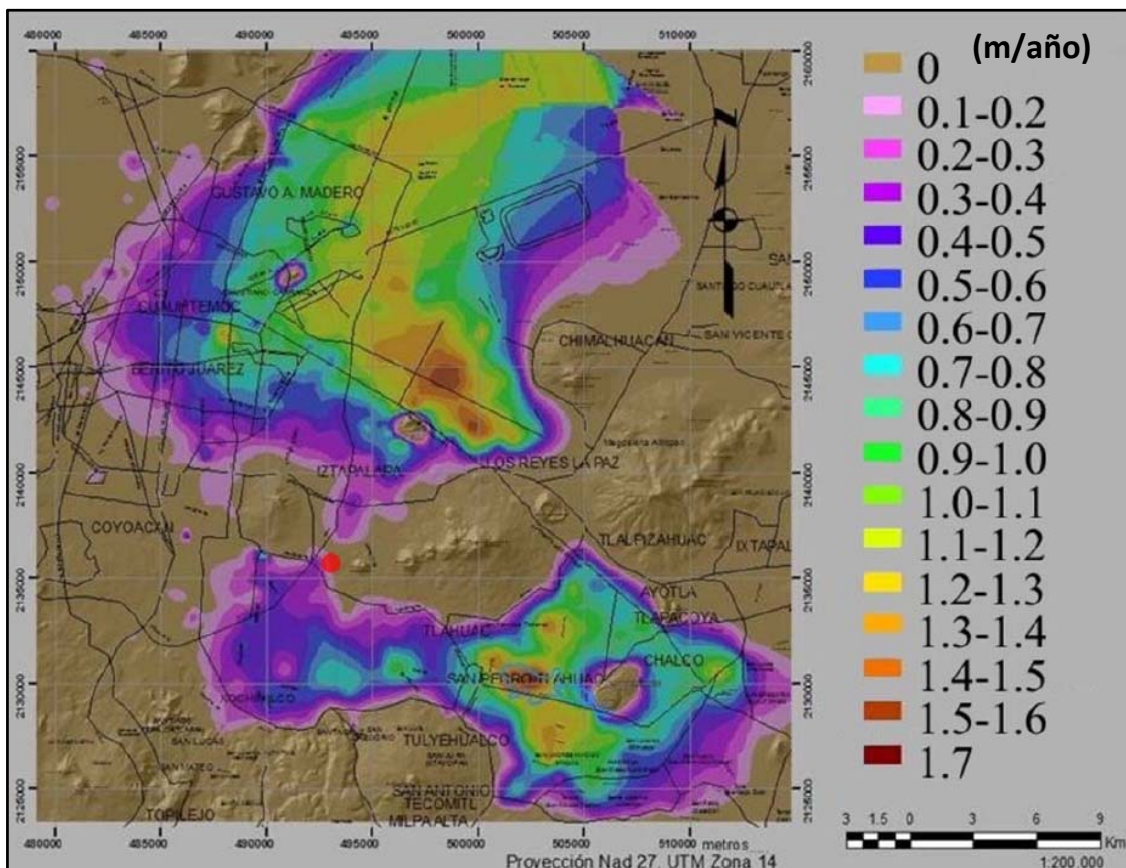


Figura 1.3 Distribución espacial de las velocidades de hundimientos del subsuelo (metros/año). (Auvinet, 2007)

La variación y velocidad de los hundimientos en la delegación Iztapalapa dependen en gran medida de la cercanía a formaciones rocosas. Registros oficiales muestran que en las dos últimas décadas del siglo XX (Uteza et. al, 2001), en las partes más bajas del territorio delegacional los hundimientos alcanzan 13 cm anuales en sentido transversal y de 6 a 10 cm en dirección longitudinal (NS) a lo largo del Anillo Periférico. Al norte del cerro del Peñón del Marqués estos hundimientos varían de 6 a 22 cm por año en una distancia muy corta. Mientras que al sur alcanzan 6 cm por año, al oriente y poniente en las vecindades inmediatas varía de 6 a 10 cm por año. En el pie de monte de la Sierra de Santa Catarina se han detectado hundimientos que van de 3 a 10 cm anuales, mayores a medida que se alejan de la sierra. Finalmente al sur del Cerro de la Estrella y de la Sierra de Santa Catarina, en la zona conocida con El Molino, rumbo a Xochimilco, los hundimientos varían entre 6 y 10 cm anuales.

La evolución de estos desplazamientos verticales en las vecindades de los lomeríos significa el desarrollo de hundimientos diferenciales de consideración en franjas muy delgadas. El suelo de esta zona, y proximidades, se ve sujeto a esfuerzos de tensión que al rebasar su resistencia fallan, formándose grietas de distinta anchura, longitud y profundidad. En estas franjas transicionales es frecuente encontrar materiales cuyas propiedades estratigráficas son muy cambiantes tanto en sentido vertical como horizontal, haciendo así una aparición y evolución de agrietamientos más complejos. La explotación de los acuíferos trae consigo la consolidación del suelo, debido a la diferencia de propiedades estratigráficas, con lo que pueden hundirse de diferente magnitud a ambos lados de las grietas, formando desniveles. Algunos sitios presentan bloques que simulan un desplazamiento vertical entre ellos, debido a la complejidad con la que se generan algunas grietas.

1.1.2 Mecanismos de generación de grietas

El agrietamiento aparecerá en suelos cada vez que existan condiciones que den lugar a una tensión lo suficientemente grande para generar deformaciones. Fisuras y grietas en las masas arcillosas también pueden aparecer a lo largo de superficies, con fallas potenciales, donde se concentran tensiones tangenciales, por ejemplo en laderas, detrás de muros de contención, en zapatas u otros elementos de cimentación.

Hay tres diferentes modos básicos de grietas, cada uno asociado a condiciones de tensión diferentes, como se ilustra en la Figura 1.4, en el primer modo la tensión tiende a generar fuerzas verticales en direcciones 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 en el sólido. El tercer modo involucra desplazamientos perpendiculares al frente de la grieta y a los planos de corte en los que ésta se desarrolla.

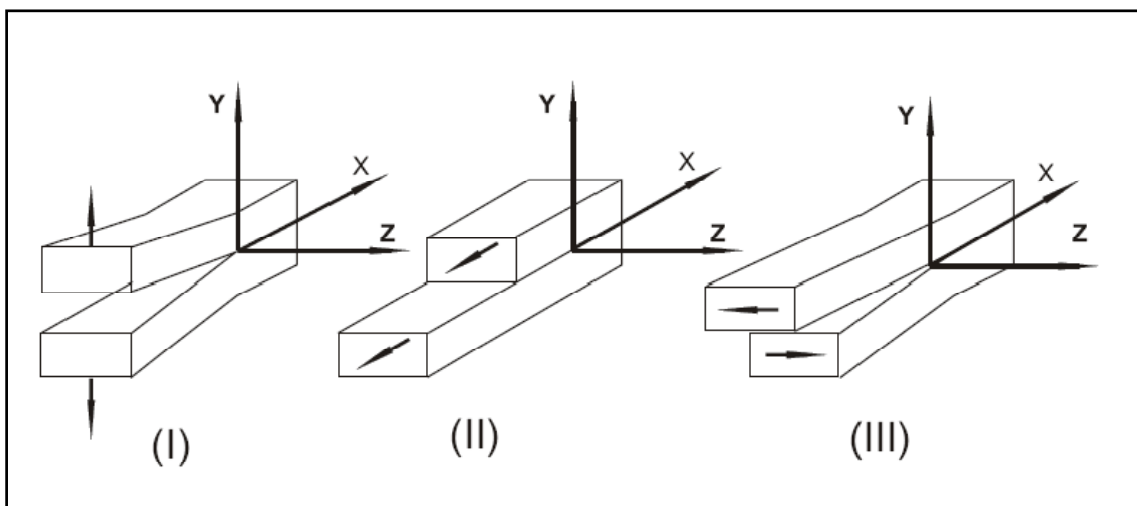


Figura 1.4 Modos básicos de grietas.

El agrietamiento en el suelo también se verá influido por la estratigrafía, sedimentación o mecanismos de transporte. La morfología del medio ambiente también puede influir en la aparición de algún modo de agrietamiento anteriormente mencionado.

Los mecanismos más comunes que dan lugar a tensiones de tracción y grietas en la cuenca de México han sido estudiados previamente (Auvinet, 2008):

Grietas asociadas a transición abrupta. Grietas y fisuras pueden aparecer con frecuencia en zonas de transición abrupta localizadas principalmente en los límites del antiguo sistema de lagos, donde el espesor de las capas arcillosas interestratificadas con arenas limosas cambia drásticamente en distancias cortas. 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 1.5).

Agrietamiento por estructuras geológicas enterradas. 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 1.5).

Grietas por heterogeneidad estratigráfica. 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.

Agrietamiento por 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 (ver figura 1.6). Las condiciones para la propagación de estas grietas se pueden establecer utilizando los conceptos de Griffith, como se ha descrito por Auvinet y Arias (1991) y Auvinet (2008).

Grietas por evapotranspiración. Este tipo de grietas pueden aparecer debido a 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. Los otros tres se pueden combinar con los otros para estimular el crecimiento y propagación de grietas; debe tenerse en cuenta que el hundimiento regional en la Cuenca de México no se detendrá en un futuro próximo, lo que significa que el agrietamiento se seguirá produciendo y que no hay medidas prácticas que se puedan tomar para evitarlas.

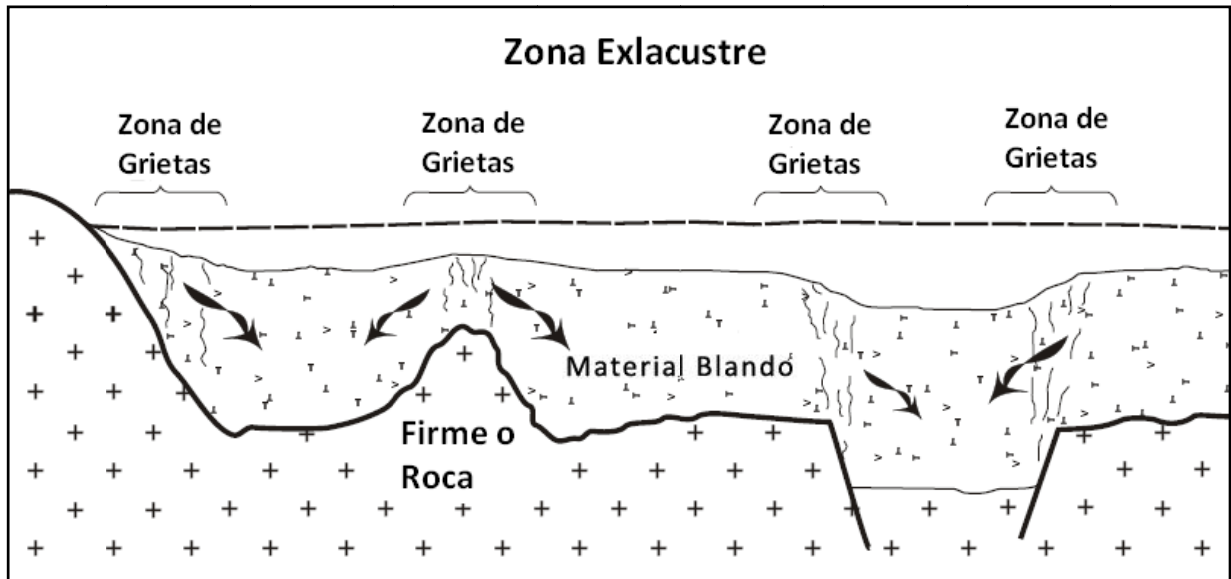


Figura 1.5 Configuraciones del lecho rocoso que pueden generar agrietamientos (Pacheco, 2007).

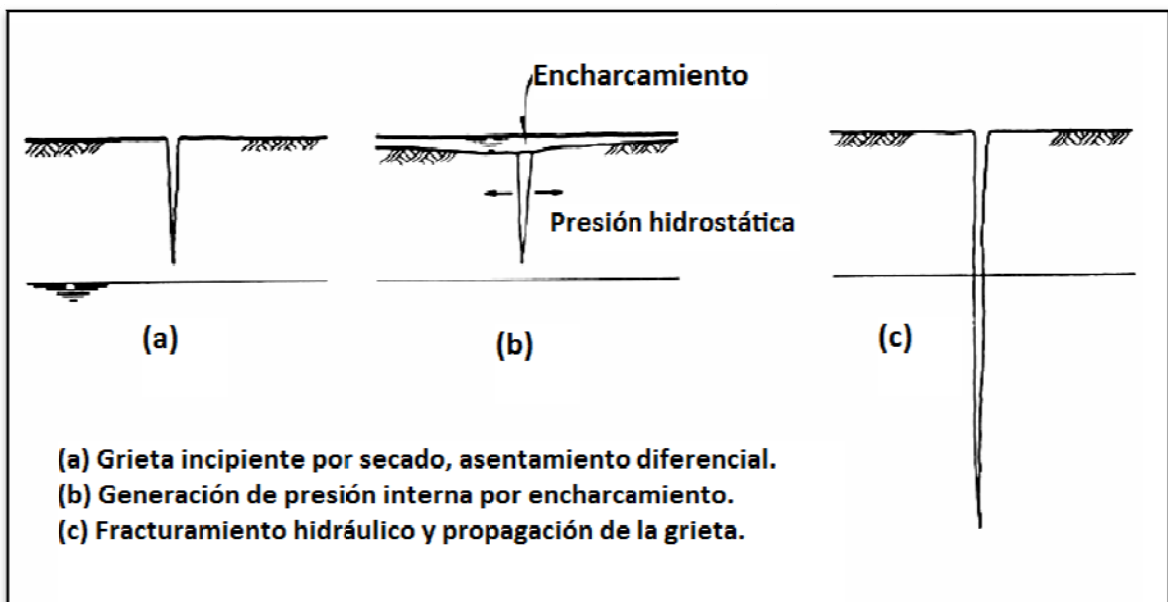


Figura 1.6 Proceso del agrietamiento por fracturamiento hidráulico.

1.2 Objetivos

Los objetivos de la presente tesis son:

- Determinar el origen de las grietas en la colonia Lomas de San Lorenzo, Iztapalapa; Distrito Federal y posteriormente realizar distintas campañas de medición de microtemores en la delegación Iztapalapa.
- Analizar los cambios bruscos de los periodos dominantes obtenidos con los registros de microtemores
- Identificar los lugares susceptibles a presentar agrietamiento para señalar las zonas en riesgo potencial y los posibles crecimientos de las grietas existentes en dicha zona.

1.3 Plan de trabajo desarrollado

- Recopilación, organización y estudio de información relacionada con el tema de agrietamiento.
- Recopilación y organización de información geológica, geotécnica y geomecánica de la delegación Iztapalapa, así como la ubicación de las grietas existentes.
- Elaboración de hipótesis del origen de las grietas existentes, basadas en la geología y geomorfología de la región.
- Registro, análisis e interpretación de mediciones de microtemores, extrayendo el periodo dominante del sitio medido, haciendo uso del método espectral de Nakamura.
- Calibración de las expresiones usadas en trabajos de Ovando y Arias (1992) para el cálculo de la velocidad de onda de corte.
- Realizar un mapa de isoperiodos, en la zona de San Lorenzo y de esta manera validar el método propuesto, para posteriormente, realizar un mapa de toda la delegación Iztapalapa.
- Determinar zonas de posible aparición de agrietamiento y seguir monitoreando las grietas existentes.

1.4 Alcances

En esta tesis de investigación se pretenden identificar los distintos orígenes de agrietamiento que se tienen en la delegación Iztapalapa, así como las zonas probables a presentar nuevos agrietamientos. Sin embargo en la zona sur del Cerro de la Estrella se tienen pocas mediciones de microtemores y estudios de agrietamiento.

1.5 Metodología

Se utiliza la metodología sismológica generada recientemente en torno al campo persistente de ruido sísmico, también llamado de vibración ambiental o de microtemores. Las ondas así generadas tienen trayectos repetitivos dentro de la formación geológica de interés y captan información del medio, la cual puede extraerse posteriormente mediante procedimientos analíticos adecuados.

Los microtemores o ruido ambiental se han estudiado desde comienzos del siglo pasado, Omori (1909) fue el primero en inferir que existían vibraciones naturales en el suelo que no correspondían a las sísmicas. En los 50's surgieron metodologías de microtemores diversas lideradas por investigadores japoneses para el estudio de las propiedades dinámicas del suelo. Los microtemores son vibraciones aleatorias inducidas en las masas de suelo y roca por fuentes naturales y artificiales. Este tipo de información es utilizada principalmente para el estudio de las propiedades y formas de las capas superficiales.

Los registros de microtemores (ruido ambiental) se realizarán con un acelerómetro K2 de Kinematics, configurado para tomar un registro de 180 segundos.

Diferentes fuentes que originan el ruido ambiental o ambiental:

- Fuentes naturales: principalmente el oleaje, el viento, la presión atmosférica y la actividad volcánica.
- Fuentes artificiales: el tráfico vehicular, el paso de peatones, maquinaria industrial, etc.

Los microtemores se caracterizan por contener básicamente ondas superficiales del tipo Rayleigh y Love (Aki, 1957, Kuroiwa, 2002) las cuales permiten caracterizar las estructuras geológicas de los suelos.

Los microtemores se presentan en un rango de frecuencia entre 0.01 a 30 (Hz), aunque el rango de valores de interés están entre 0.1 a 10 (Hz); en este rango parte de la energía se transmite como ondas Rayleigh, cuyas velocidades de propagación se pueden estimar y medir con arreglos instrumentales, como es el caso de la metodología propuesta, y así conocer las características de los parámetros elásticos de la corteza terrestre. Los microtemores pueden correlacionarse con las condiciones geológicas locales. Los periodos dominantes menores a 0.2 (s) son característicos de suelo duro o rocas, mientras q los periodos superiores a 0.2 (s) representan depósitos más blandos como arcillas.

1.5.1 Método espectral de Nakamura

En lo que respecta a la presente tesis, se analizarán las mediciones de microtremores de acuerdo con la teoría de la propagación de ondas en medios elásticos, en la cual el periodo dominante es proporcional al espesor del suelo sometido a la vibración ambiental (H) e inversamente proporcional a la velocidad con la que se propagan las ondas sísmicas a través del medio en cuestión (V_S). En este caso interesan las ondas de corte u ondas distorsionales (Lermo et al., 1993, 1994).

Nakamura propuso este método (1989) basado en relacionar los espectros de Fourier de las componentes horizontales y verticales (H/V) del registro de microtremores registrados en superficie. Este es uno de los métodos más utilizados de microtremores debido a su bajo costo y simplicidad en la toma de datos con un sensor de tres componentes (canales). Dicho método permite conocer la frecuencia fundamental y en algunos casos la amplificación relativa; para el estudio en cuestión, se tomó el valor de la frecuencia con la mayor amplificación relativa. Posteriormente a dicho valor es necesario aplicarle el inverso para inferir las características geomorfológicas del lugar en el que se hace la medición.

La técnica de Nakamura asume que la relación espectral relativa a la componente vertical, proporciona una aproximación a la función de transferencia en el sitio. El procedimiento es el siguiente: se supone un depósito de suelo homogéneo por encima de un semiespacio rígido (ver figura 1.10). Las literales V_B y H_B representan los espectros de amplitud de Fourier de los movimientos verticales y horizontales en la base del depósito, V_S y H_S son los mismos espectros de movimientos registrados en la superficie del depósito.

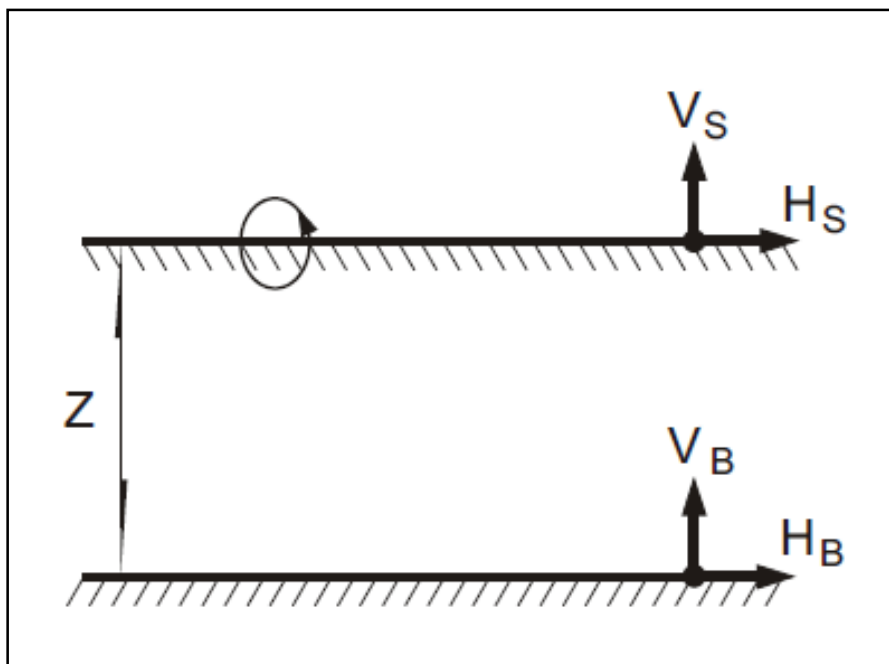


Figura 1.10 Condiciones geométricas para la aplicación de la técnica de Nakamura.

Nakamura propuso que la fuente de los efectos puede ser representada por la relación espectral de las componentes verticales de los movimientos en la base del depósito y en la superficie.

$$A_S = \frac{V_S}{V_B} \dots\dots\dots (1.1)$$

Donde:

A_S : es la función de frecuencia

Los efectos de sitio (S_E) están representados por:

$$S_E = \frac{H_S}{H_B} \dots\dots\dots (1.2)$$

Donde:

H_S : es la amplitud del espectro de Fourier de la componente horizontal de movimiento en la superficie.

H_B : es la amplitud del espectro de Fourier de la componente horizontal de movimiento en la base del estrato sedimentario.

Esta expresión define una función empírica entre la base y los movimientos más altos en el sitio de suelo blando. Los efectos de las fuentes pueden explicarse a través de un cociente de modificación del espectro:

$$S_M = \frac{S_E}{A_S} = \frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}} = \frac{\frac{H_S}{V_S}}{\frac{H_B}{V_B}} \dots\dots\dots (1.3)$$

Nakamura verificó experimentalmente que:

$$\frac{H_B}{V_B} = 1 \dots\dots\dots (1.4)$$

Haciendo las sustituciones necesarias:

$$S_M = \frac{H_S}{V_S} \dots\dots\dots (1.5)$$

Esto implica que la función de transferencia de las capas superiores del suelo se puede obtener de microtrepidaciones o microtremores registrados en la superficie y que la componente vertical conserva las características de los materiales que se encuentran en la base de los depósitos.

2. Condiciones geológicas-geotécnicas del sitio

La delegación Iztapalapa se encuentra dentro del Valle de México, el cual forma parte del Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana extendiéndose en dirección este-oeste, atravesando la República Mexicana.

La roca ígnea extrusiva cubre el 70% de la superficie centro-sur de Iztapalapa, estos afloramientos corresponden al periodo cuaternario (60 millones de años aproximadamente), formados por la solidificación del magma en la superficie de la corteza terrestre. La parte norte en su mayoría son suelos aluviales y lacustres, representando el 30%.

En la figura 1.11 se muestra la geología del Distrito Federal, con el cual se pueden inferir algunas de las causas, a grandes rasgos, del agrietamiento en Iztapalapa.



Figura 2.1 Mapa geológico del Distrito Federal (INEGI).

2.1. Antecedentes geohidrológicos

La delegación Iztapalapa se encuentra al sureste de la Cuenca del Valle de México, originada posteriormente a una intensa actividad volcánica en la que aparecieron un conjunto de sierras formando entre sí un vaso de almacenamiento natural donde se depositaron rellenos cuaternarios. Entre la aparición de las sierras de Las Cruces al poniente de la cuenca y de Río Frío al oriente de Edad Pleistocénica y el cierre de la cuenca al Sur durante el Cuaternario Superior, correspondiente a la Sierra de Chichinautzin, existían dos grandes valles que drenaban hacia el sur en el Río Amacuzac. El más grande corría paralelo a la Sierra de las Cruces y pasaba por lo que ahora es Xochimilco, mientras que el menor corría paralelo a las faldas de la Sierra Nevada hasta llegar a Cuautla. Durante la formación de estos valles se formaron acarreos aluviales que llegaron a un espesor de hasta mil metros. Con el cierre de la cuenca comenzaron a formarse depósitos lacustres que descansan sobre los aluviones, depósitos provenientes de actividad volcánica, como cenizas, transportados por acción del aire o del agua.

Es así como se formaron los lagos de la parte sur de la cuenca. Los basaltos de la Sierra de Chichinautzin impidieron el paso de las corrientes de agua convirtiéndose en el vaso de almacenamiento en la zona de Xochimilco. El azolve paulatino dio lugar a los primeros rellenos aluviales en el valle, estos azolves están formados por material volcánico rebajado, interestratificados con tobas que se mezclan con depósitos netamente lacustres hacia las partes centrales de la cuenca. Al mismo tiempo se formó el Chichinautzin, surgió la Sierra de Santa Catarina; el último afloramiento de la Sierra de Santa Catarina corresponde al Cerro de la Estrella. Durante este mismo periodo geológico se edifica el cuerpo norte del Cerro del Peñón del Marqués el que a su vez había iniciado su periodo formativo 700 mil años atrás al levantarse el cuerpo sur. A lo largo del cuaternario finalmente, tras erupciones volcánicas, se desarrolló la formación de los depósitos provenientes de la sedimentación de cenizas arrojadas por esas erupciones en medios lacustres y que dio origen a los potentes depósitos arcillosos blandos, formación que se alternó eventualmente con suelos aluviales y emisiones de arenas también de origen volcánico en toda la zona exlacustre de Texcoco.

Iztapalapa se asienta sobre suelos de diferente naturaleza: al oriente suelos compactos que forman parte de estructuras montañosas de la Sierra de Santa Catarina, la cual evoluciona al suroeste culminando con el Cerro de la Estrella, mientras que al poniente predominan los suelos de consistencia muy blanda; también hacia el poniente se levanta el cerro del Peñón del Marqués. Al norte de esta sierra se encuentra la zona exlacustre de Texcoco, y al sur se sitúa el exlago de Chalco-Xochimilco.

Entre el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina existe una gran depresión rellena por potentes depósitos de suelos de consistencia muy blanda (ver figura 2.2).

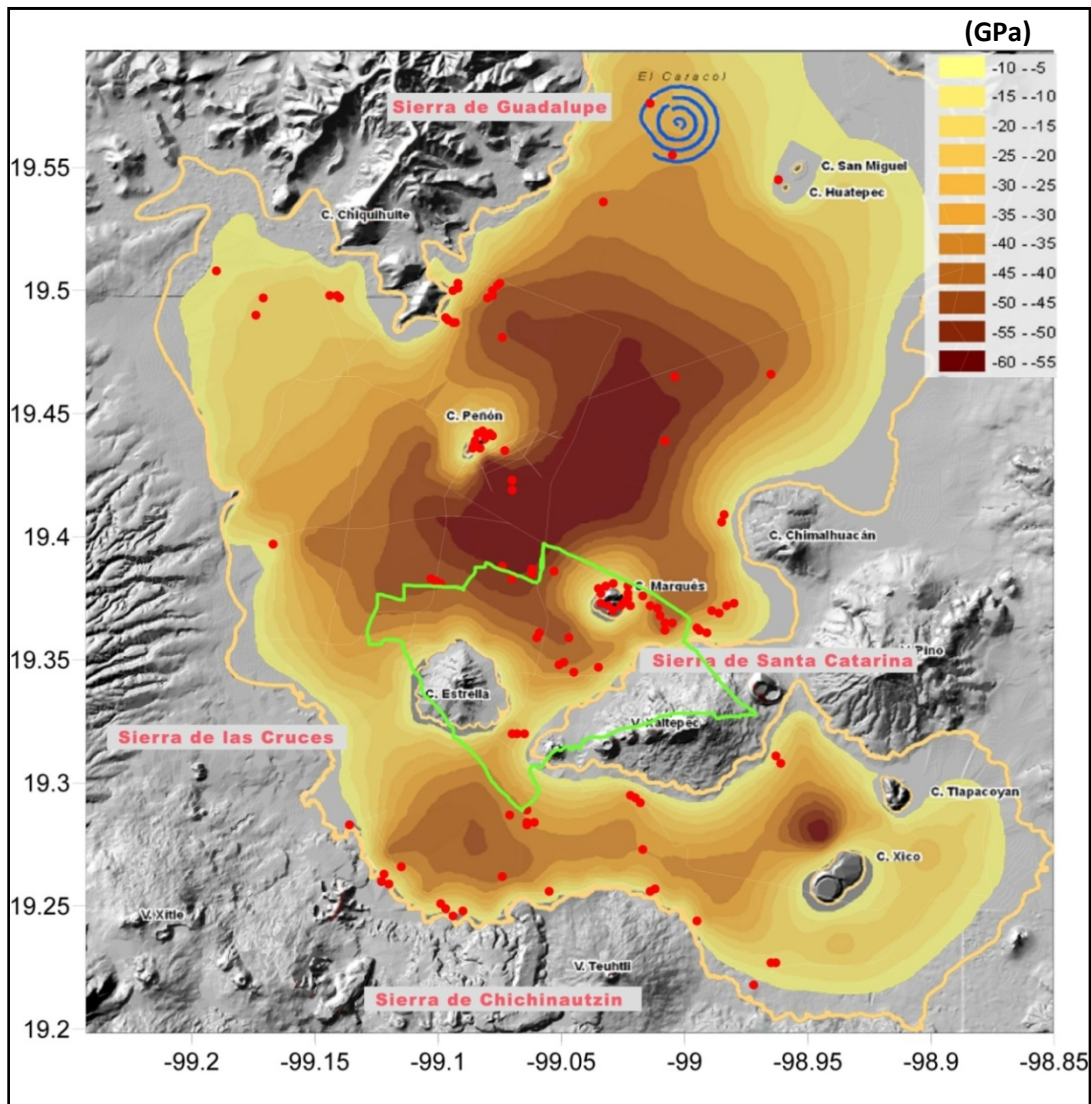


Figura 2.2 Compresibilidad de materiales en la Cuenca del Valle de México. Puntos rojos: sitios identificados con agrietamiento. Línea verde: límite delegacional. (Auvinet 2007)

En las franjas en donde sucede el contacto entre los suelos compactos propios de las estructuras montañosas y los materiales blandos que dominan el subsuelo de la planicie, existe una gran heterogeneidad estratigráfica sobre todo en los sitios en donde la caída de los cerros es pronunciada.

La Sierra de Santa Catarina corre paralela a la Sierra de Chichinautzin teniendo su base en la Sierra Nevada localizada al oriente de la Cuenca del Valle de México. La integran entre otros, los cerros de la Estrella, Tehualqui, Xaltepec, Peñón, El Pino y Chimalhuacán. Estudios geológicos informan de la escasa presencia de rellenos en el pie de monte debido a que no pueden lograrse arrastres importantes por lo corto de los tramos y lo inclinado de la ladera. En las cercanías del cerro Tehualqui y la actual zona del Reclusorio Oriente se aprecian pendientes de tal consideración entre el contacto de fragmentos de basalto de este cerro y los depósitos arcillosos de la planicie lacustre, mientras que en las faldas del cerro no existen arcillas. En las vecindades del Reclusorio pueden encontrarse espesores de arcillas superiores a los 60 metros. Aún más hacia el centro de la planicie, se presume la existencia de irregularidades en el relieve del lecho rocoso o manto basal sobre el que descansan los depósitos arcillosos, lo que hace más compleja su evolución geotécnica. Por lo tanto se espera la presencia de una transición abrupta y de condiciones irregulares en el relieve del manto sobre el que se encuentran los materiales compresibles. En la figura 2.3 se tiene la localización de las estructuras montañosas en Iztapalapa y la zona de planicie, perteneciente a la antigua zona lacustre.

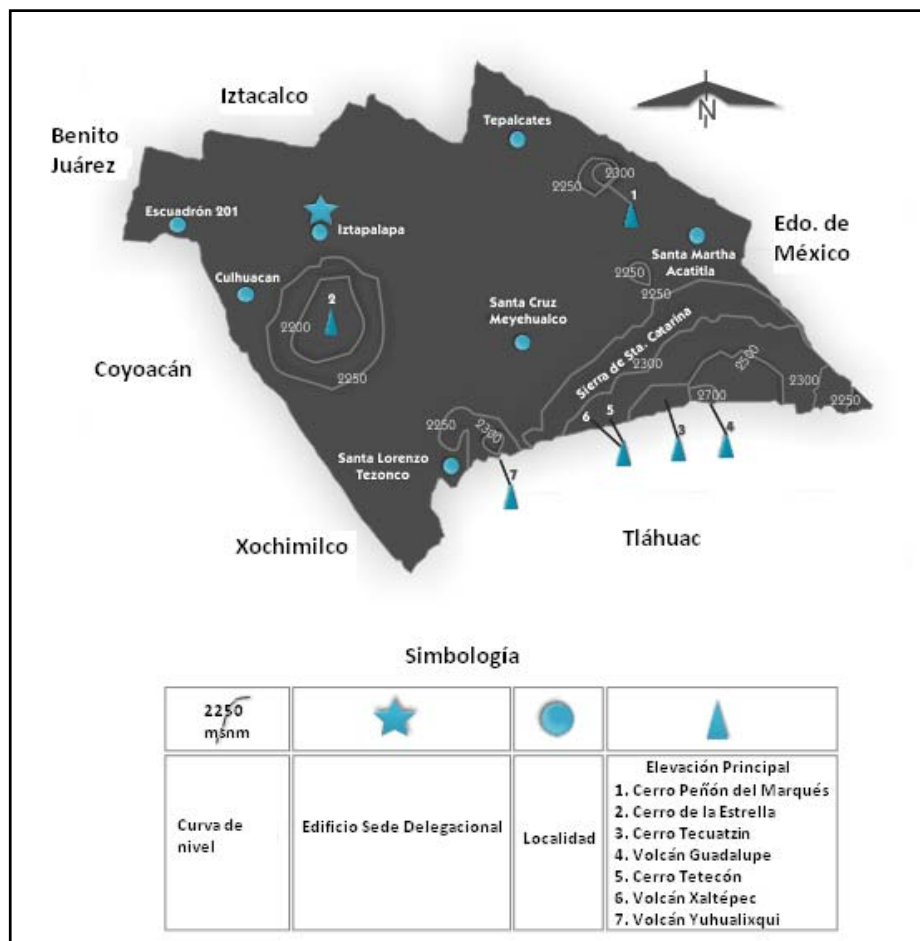


Figura 2.3 Orografía de la Delegación Iztapalapa. (Gobierno de la Ciudad de México)

2.2 Agrietamiento

En las zonas de transición abrupta, donde entran en contacto los suelos lacustres del Valle de México con los domos volcánicos que los confinan, se desarrolla un gradual y continuo hundimiento diferencial con la consecuente aparición de grietas en la superficie. Este fenómeno está íntimamente relacionado con el proceso de consolidación de los suelos blandos, a su vez incrementado por la explotación de los mantos acuíferos.

Con el hundimiento regional, se presentan grietas de tensión hacia las fronteras de la zona lacustre, las que comúnmente siguen trayectorias semejantes a curvas de nivel topográfico delimitando formaciones arcillosas. Lluvias torrenciales han sido los disparadores de este tipo de agrietamiento, aunque se pueden presentar sin su efecto. En ocasiones se manifiestan periódicamente en la misma zona, con cambios de posición o crecimiento subsecuentes hacia el centro de la zona lacustre. La explotación desmedida de los acuíferos ha originado y acelerado el hundimiento regional de la superficie del terreno debido a la pérdida de presión en el agua intersticial, lo que contribuye a la consolidación de los estratos arcillosos altamente compresibles.

2.3 Colonia Lomas de San Lorenzo, Iztapalapa

El primer caso de estudio, en esta tesis, es la socavación aparecida en el mes de julio del 2007, en la calle Vista Hermosa intersección con Guadalupe Victoria, por el flujo de agua en una grieta que atraviesa la Col. Lomas de San Lorenzo, en la delegación Iztapalapa. El socavón fue de 15.0 m de longitud y 7.0 m de profundidad aproximadamente, la repentina aparición de este, causando la muerte de joven cayendo en el mismo, con todo y el vehículo que conducía.

La colonia Lomas de San Lorenzo se encuentra al SE del Valle de México, al oriente la limita el Cerro de la Estrella y al poniente la Sierra de Santa Catarina (fig. 2.4).

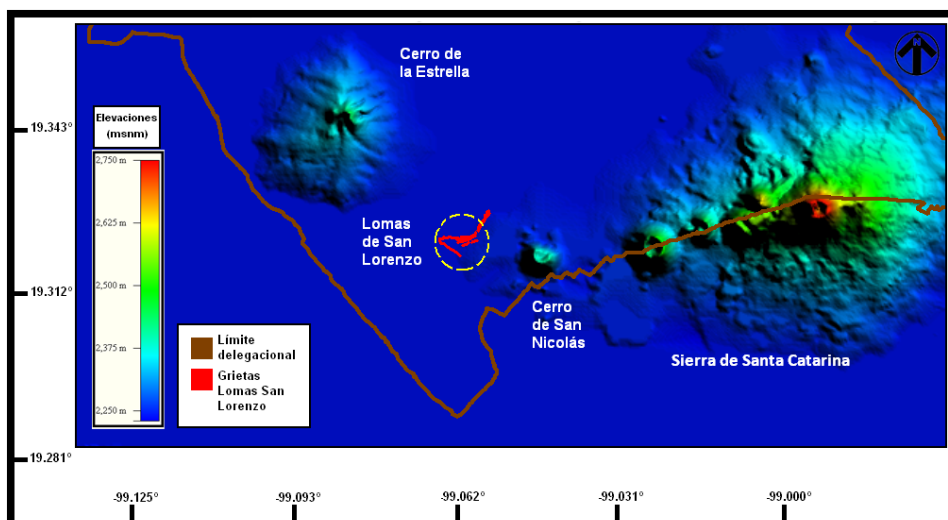


Figura 2.4
Colonia Lomas de San Lorenzo y su influencia geomorfológica.

De acuerdo a la zonificación geotécnica de la Ciudad de México, se localiza en la Zona de Transición Abrupta (figura 2.5), en la cual existe un contacto de los materiales sedimentados con roca volcánica. La estratigrafía de estas zonas por lo regular está integrada por una serie arcillosa de baja resistencia y alta deformabilidad, intercalada por numerosos lentes duros provenientes de materiales erosionados de los cerros circundantes y cubierta por una costra superficial dura, producto de las últimas emisiones volcánicas.

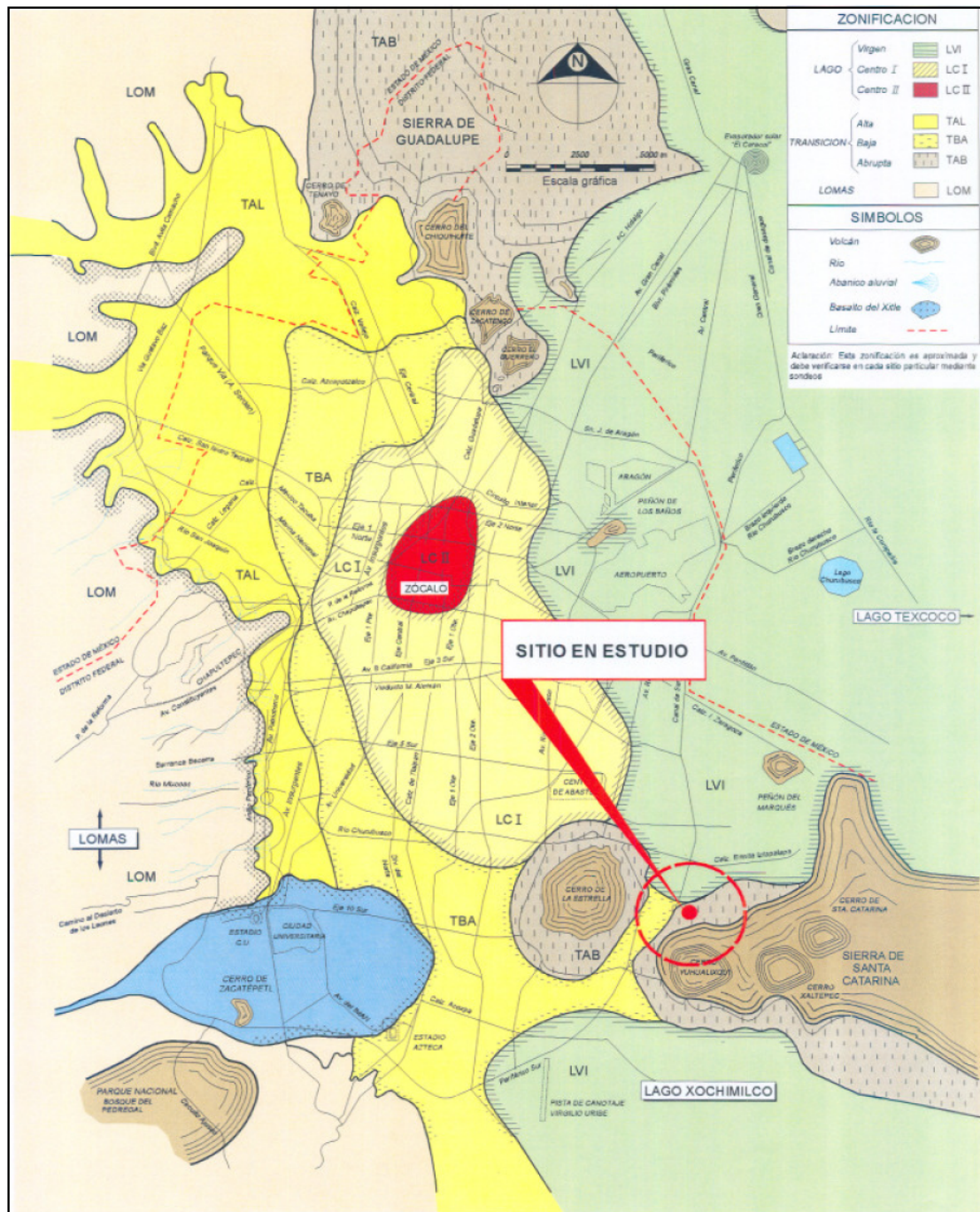


Figura 2.5 Zonificación geotécnica del Valle de México (TGC, 2007)

2.3.1 Sondeos Geotécnicos

Autoridades del Gobierno del Distrito Federal realizaron un mapeo de grietas de la colonia Lomas de San Lorenzo para así identificarlas y posteriormente implementar algunas acciones para mitigar sus efectos (TGC Geotecnia, 2007). Para ello se llevó a cabo una campaña de exploración con métodos indirectos como son: georadar, sísmica de refracción y sondeos geoeléctricos, a partir de los cuáles se definió la trayectoria principal de la grieta y demás grietas secundarias. A su vez la Dirección General de Obras Públicas encargó a TGC Geotecnia, la realización de sondeos de exploración profunda.

La figura 2.6 muestra la distribución espacial de la grieta y los sondeos ejecutados, en la colonia Lomas de San Lorenzo, empleando distintas técnicas de exploración descritas en el *Anexo A*.

En la tabla 2.1 se indican las profundidades a las que se encontró material firme o roca en cada uno de los sondeos, los cuales se utilizarán posteriormente para realizar perfiles en los que se tienen cambios más abruptos de espesor: SEP-1, SEP-4, SEP-2, SEP-3, SCE-4, SCE-3, SC-7A, SC-4, SC-1.

Profundidades alcanzadas en cada uno de los sondeos (TGC Geotécnica, 2007):

Sondeo	Profundidad a la que se encontró la roca (m)	Sondeo	Profundidad a la que se encontró la roca (m)
SC-1	20.40	SCE'-5	22.00
SC-2	30.60	SCEA-1	67.00
SC-3	30.40	SCEA-2	30.00
SC-4	6.360	SCEA-3	13.00
SC-5	30.20	SEP-1	70.00
SC-6	12.00	SEP-2	30.00
SC-7	15.60	SEP-3	14.00
SC-4A	9.82	SEP-4	38.00
SC-6A	27.55	SM-1	20.25
SC-7A	30.00	SM-2	12.00
SCE'-4	20.00	SM-3	35.00
SCE-2	30.00	SCE-3	25.00
SCE-4	97.00	SCE-5	23.00
SCE-6	98.00	SCE-7	95.00
SCE-1	40.00		

Tabla 2.1 Profundidad a la que se localizó la roca en cada sondeo (TGC, 2007)

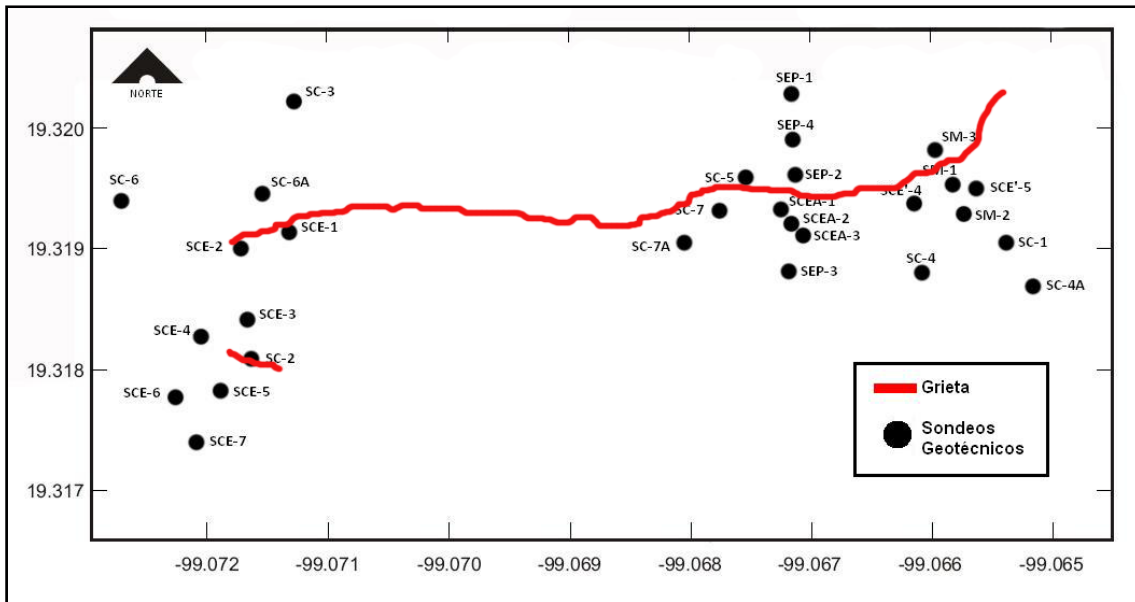


Figura 2.6 Localización de los sondeos geotécnicos en la colonia Lomas de San Lorenzo, Iztapalapa.

Con los resultados de los sondeos efectuados en el entorno de la grieta desarrollada en Lomas de San Lorenzo (TGC-3376, 2007), se ratifica que es de transición abrupta, en la que el contacto de la roca volcánica con los suelos finos lacustres tiene una frontera muy inclinada. Ejemplo de ello son las variaciones de espesor abruptas en distintos perfiles geotécnicos transversales la grieta mostrados posteriormente.

Suelos. El espesor varía de 12.7 (m), en la parte sur de la grieta, a 80.1 (m), en la parte norte, constituidos por una costra superficial de arena limosa de color negro, a la que le subyacen limos y arcillas con lentes de arena limosa, arena y ceniza volcánica. Los suelos finos son principalmente limos de alta compresibilidad, su consistencia y espesor difieren ampliamente en todos los sitios; la arena volcánica de grano fino a medio y de color negro. Entre los sondeos SEP- 1 y SEP-4 (figura 2.6) se tiene el mayor estrato de suelos compresibles y de baja resistencia, cuyo espesor varía de 80.1 a 19.0 (m), en una distancia de 45 (m). Las menores resistencias de punta obtenidas con el cono eléctrico, se presentan hacia el sondeo SEP-1, en los primeros 25.0 (m) se tiene un promedio de 5.0 (kg/cm²), a partir de esa profundidad y hasta la máxima explorada, la resistencia varía de 10.0 a 15.0 (kg/cm²), sin considerar los lentes resistentes.

Los materiales que predominan entre los sondeos SEP-2 y SEP-3 son limos y limos arenosos con una mayor resistencia y menor compresibilidad, las resistencias de punta mínimas son de 12.5 (kg/cm²), siendo por lo regular mayores a 25.0 (kg/cm²).

Roca. Es un basalto en colores negro y gris oscuro, cuyos porcentajes de recuperación son en su mayoría del 100 %, los RQD (Rock Quality Designation) varía entre 90 y 95 %, con valores aislados de 60 y 80 %, lo que lo describe como un basalto de buena a muy

buena calidad. Es una roca porosa y muy sana, por lo tanto no es un material apropiado para realizar ensayos de permeabilidad. En ensayos de compresión simple realizados en muestras representativas, se obtuvieron resistencias variables entre 294 y 634 (kg/cm^2), y pesos volumétricos de 2.4 a 2.6 (t/m^3).

Los sondeos revelan que los materiales de baja plasticidad endurecidos y humedecidos en época de estiaje y lluvias, respectivamente, forman la corteza superior del suelo. Siguiendo la estratigrafía se encuentran arcillas lacustres muy blandas de alta compresibilidad interestratificadas con paquetes de sedimentos de arenas y ceniza volcánica. La profundidad y el grosor de los materiales más duros varían considerablemente. Debajo de los materiales antes mencionados se tiene roca basáltica.

3. Medición de microtemores, procesado y análisis

Los periodos dominantes pueden ser fácilmente identificados mediante funciones empíricas de transferencia, a partir de mediciones de microtemores obtenidas en los sitios donde la relación de la onda de velocidad cortante es lo suficientemente grande. Como se describió en el capítulo 1.5.1, el periodo dominante está relacionado con las condiciones del suelo a través de la siguiente relación elástica:

$$T_0 = \frac{4H}{V_s} \dots\dots\dots (3.1)$$

Donde T_0 es el periodo dominante, H es el espesor del estrato compresible, V_s es la velocidad de onda de corte.

En el contexto de grandes masas de suelos compresibles atravesando un proceso de consolidación, como en la Ciudad de México, la distribución espacial de los periodos dominantes puede ser usada como un parámetro indicativo para la localización de zonas con posible agrietamiento. Como se ha mencionado con anterioridad, las grietas aparecen en lugares sustentados sobre materiales exlacustres como arcillas de alta compresibilidad, que cambian de espesor abruptamente en distancias cortas, como en las zonas de transición, o en presencia de estructuras geológicas enterradas. Bajo estas circunstancias, los cambios en los periodos dominantes se deben principalmente por los cambios de espesor de los suelos arcillosos (H), mientras que los cambios en la velocidad promedio de onda de corte son inversamente proporcionales a los periodos dominantes. Por otra parte, también se ha encontrado que la variación de la media de velocidad de ondas sísmicas de los materiales arcillosos en las zonas de transición también se ve influenciada por el efecto del endurecimiento del material, provocado por el proceso de consolidación regional inducida por la explotación de los acuíferos.

En consecuencia, conocer la distribución espacial de los periodos dominantes en una determinada región ayuda a identificar las zonas posibles a presentar agrietamiento mediante el reconocimiento y la caracterización de los patrones con los que cambian los periodos dominantes.

El procedimiento con el que se procesaron los registros de microtemores, método de Nakamura, se basa en obtener tres componentes de un registro de vibración ambiental, longitudinal, trasversal y vertical (figura 3.1). Se generan cocientes de los espectros de Fourier de las componentes horizontales (longitudinal y trasversal) entre el espectro de la componente vertical (Lermo et al., 1993, 1994). Se promedian distintos cocientes espectrales de un mismo punto de medición. El periodo dominante se obtiene al aplicar el inverso de la frecuencia dominante; es decir la que tiene la mayor frecuencia en el rango de interés (figura 3.2).

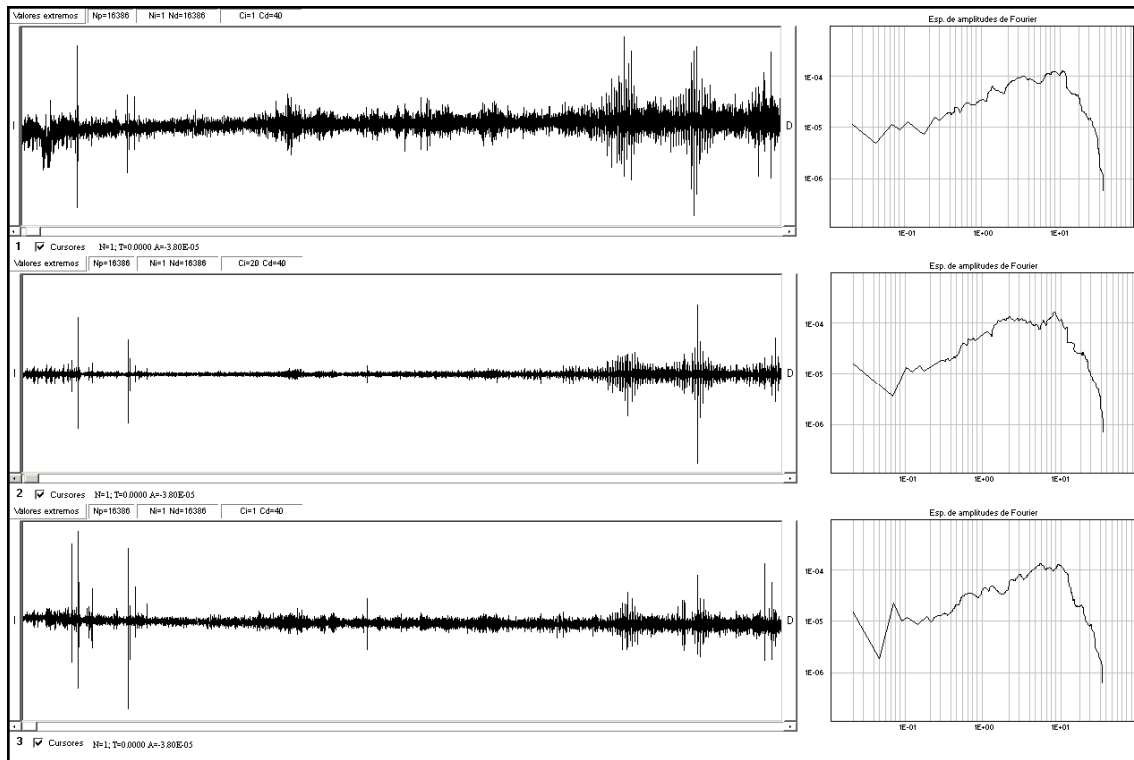


Figura 3.1 Procesamiento con el programa DEGTRA. Componentes horizontales (ventana 1 y 3), componente vertical (ventana 2). Acelerogramas (parte izquierda) y sus espectros de Fourier.

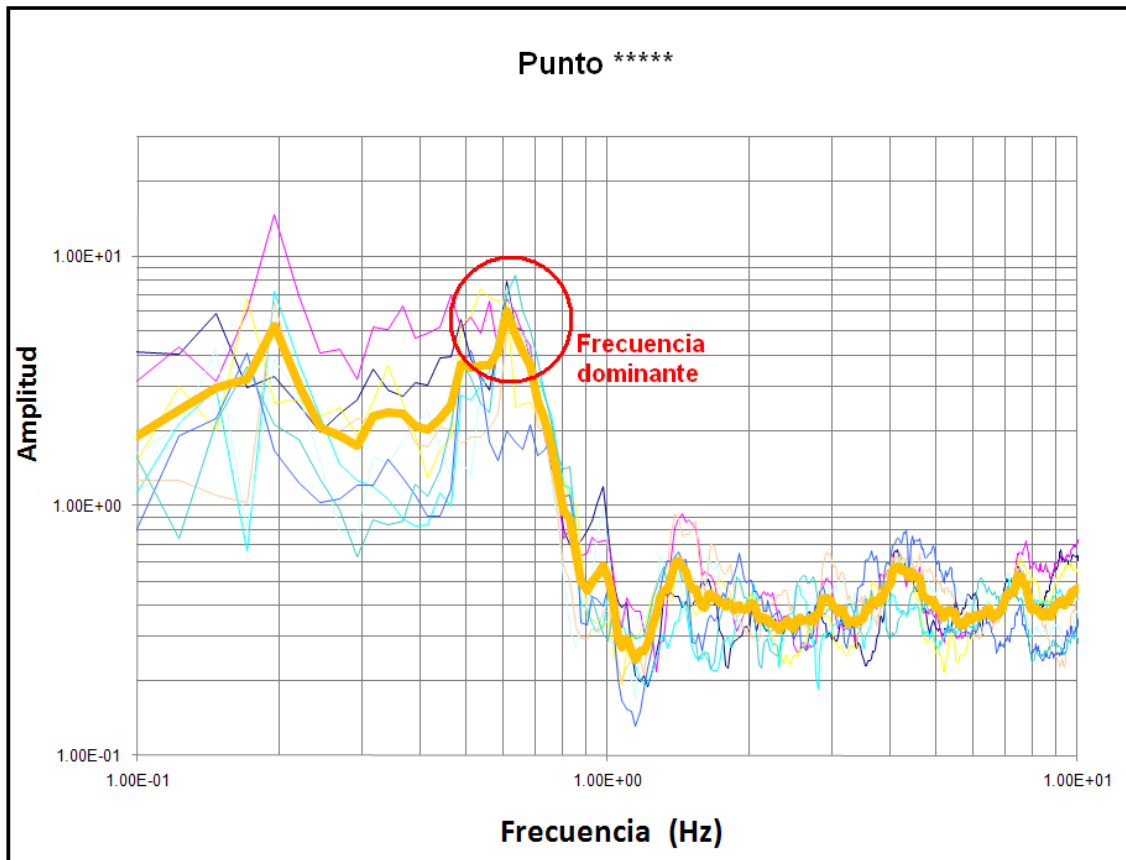


Figura 3.2 Promedio de cocientes espectrales (línea anaranjada). Frecuencia dominante.

3.1 Resultados colonia Lomas de San Lorenzo

Se realizaron dos campañas de mediciones de microtemores en la colonia Lomas de San Lorenzo, la primera en agosto del 2009 (47 mediciones) y la segunda en octubre (76 puntos). Las mediciones se tomaron a ambos lados de la grieta principal, tratando de encontrar los cambios bruscos por los que se genera el agrietamiento en dicha zona, a lo largo de una distancia aproximada de 1 kilómetro. Otros puntos fueron tomados en los puntos donde se han realizado sondeos geotécnicos, para poder calibrar el modelo propuesto en la presente tesis.

Los periodos dominantes se obtuvieron de las medidas de microtemores, haciendo uso de la técnica de Nakamura. La figura 3.3 resume dichos resultados, con los que se generó un mapa de isoperiodos, a partir de funciones de transferencia, S_M (ec. 1.5) aplicadas a cada punto. Es evidente (ver figura 3.3) que los cambios los cambios en los periodos dominantes más bruscos, se encuentran cerca de la grieta principal. La zona de San Lorenzo presenta periodos que van desde 0.10 (s), parte alta del derrame, hasta periodos de 2.50 (s), zona de depósitos exlacustres.

Se generaron 3 perfiles diferentes AA', BB' y CC', los cuales tienen los valores de los periodos dominantes en el eje de las ordenadas y en las abscisas la distancia, para poder apreciar el cambio brusco que se tiene en el límite del derrame y la zona de materiales blandos. Los perfiles BB' y CC' cuentan con los sondeos geotécnicos de la zona. (Ver figura 3.4, 3.5, 3.6)

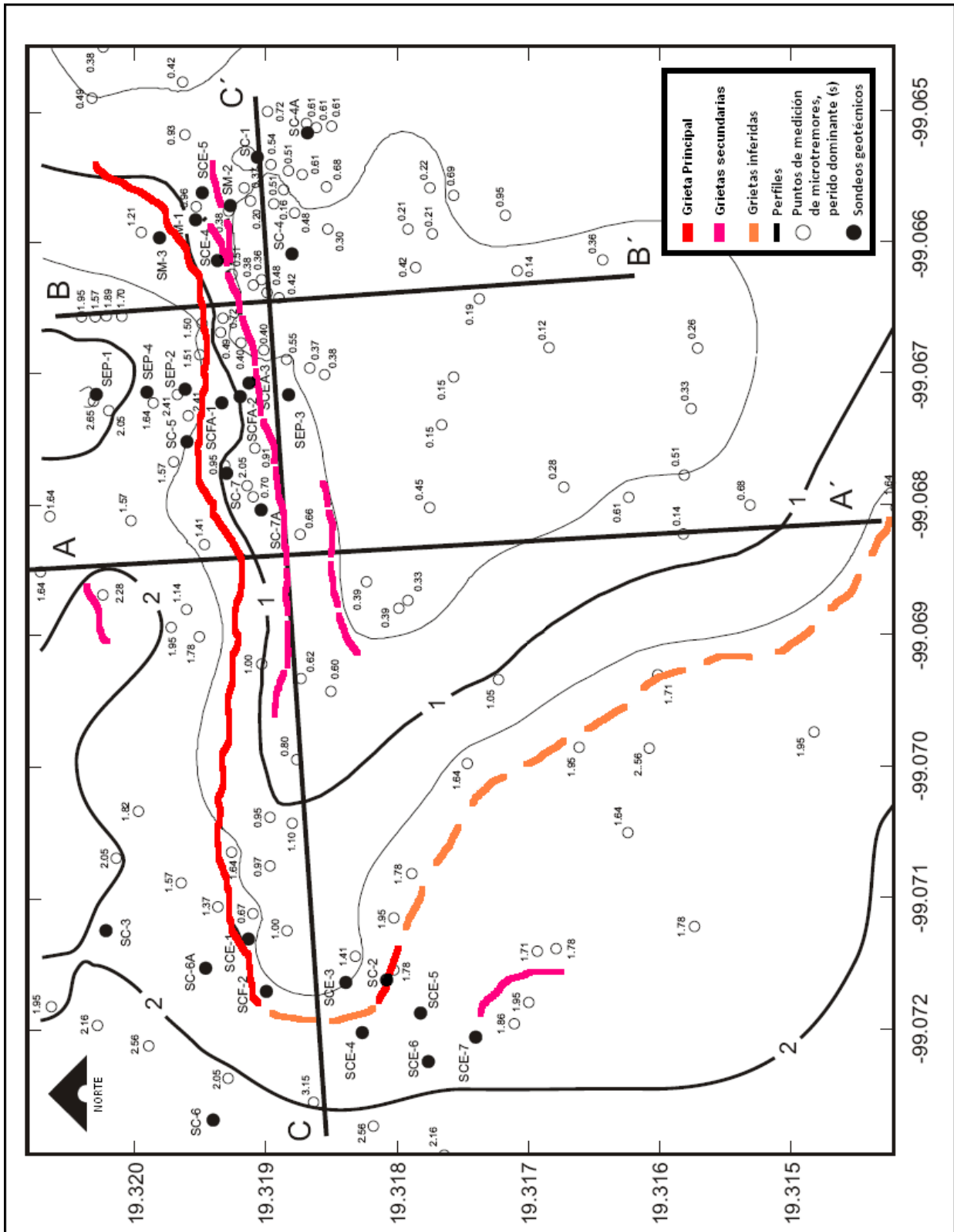


Figura 3.3 Mapa de isoperiodos y distribución espacial de las grietas (existentes e inferidas) en Lomas de San Lorenzo Iztapalapa.

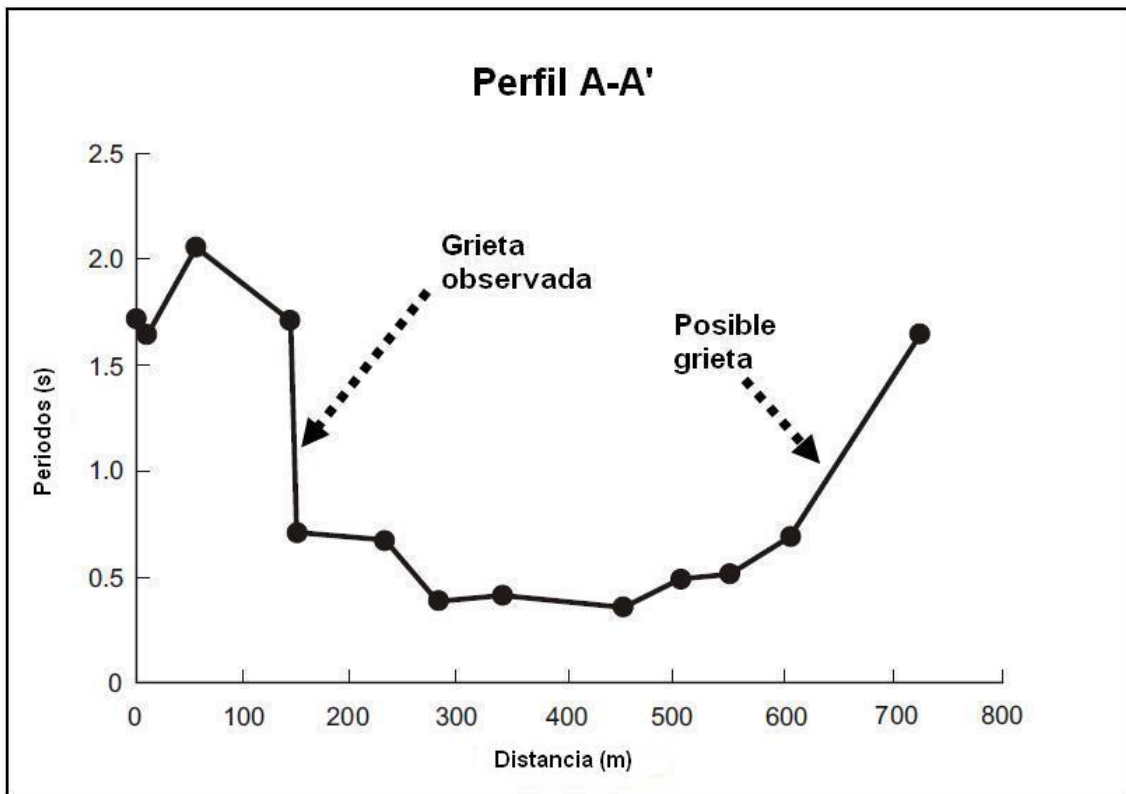


Figura 3.4 Distribución de periodos a lo largo del perfil A-A'.

La figura 3.4 muestra la variación espacial del periodo dominante del perfil denominado AA'. Entre los 0 y 150 metros el perfil se mantiene en valores propios de materiales exlacustres o blandos. Claramente el perfil tiene un cambio brusco entre 150 a 160 metros, cambiando su periodo de 1.5 a 0.5 segundos. De 160 a 620 metros el periodo dominante mantiene un valor aproximadamente constante (0.5) lo que muestra que en ese rango nos encontramos con la presencia de material rocoso cercano a la superficie. El punto en el que se da un cambio abrupto de gradientes, coincide bastante bien con la ubicación de la grieta.

Los perfiles geotécnicos de pruebas de campo coinciden con los perfiles de periodo dominante, como se indica en la parte inferior de la figura 3.5 y la figura 3.6, al comparar los perfiles de espesor de suelo y los periodos de los estratos, se observa claramente la proporción que se guarda en cada uno de los puntos.

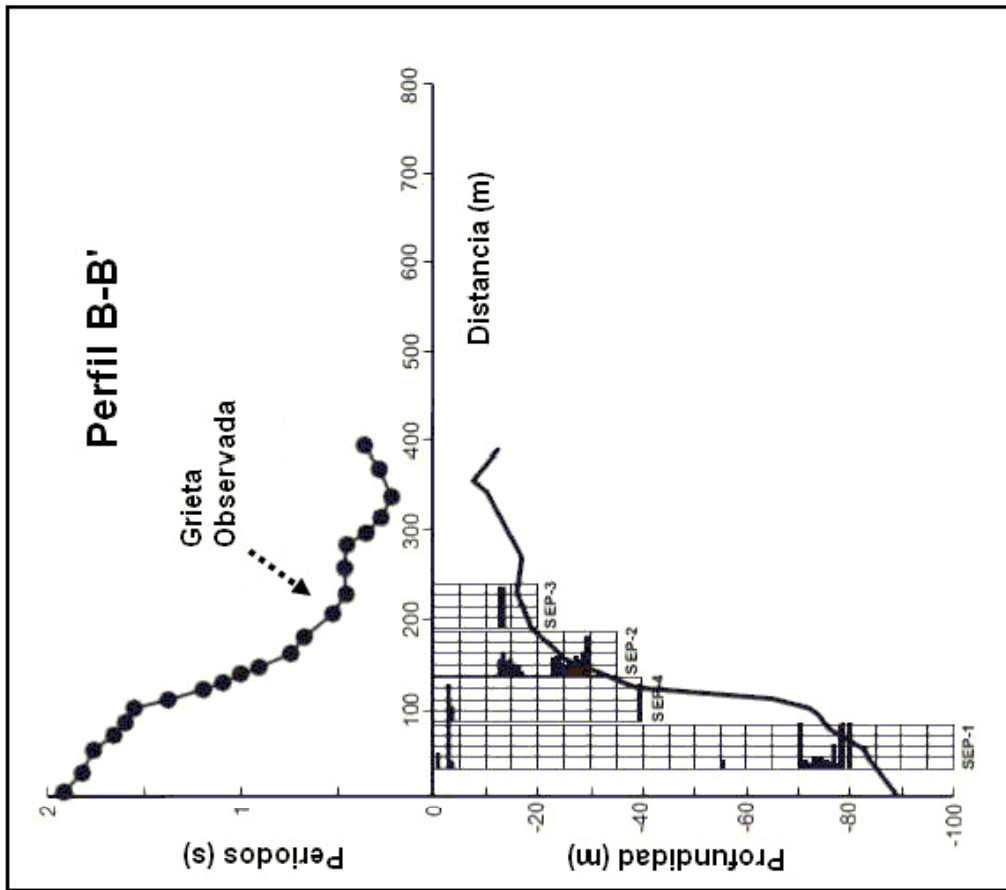


Figura 3.5 Perfil B-B'. Comparativo de sondeos geotécnicos y periodos.

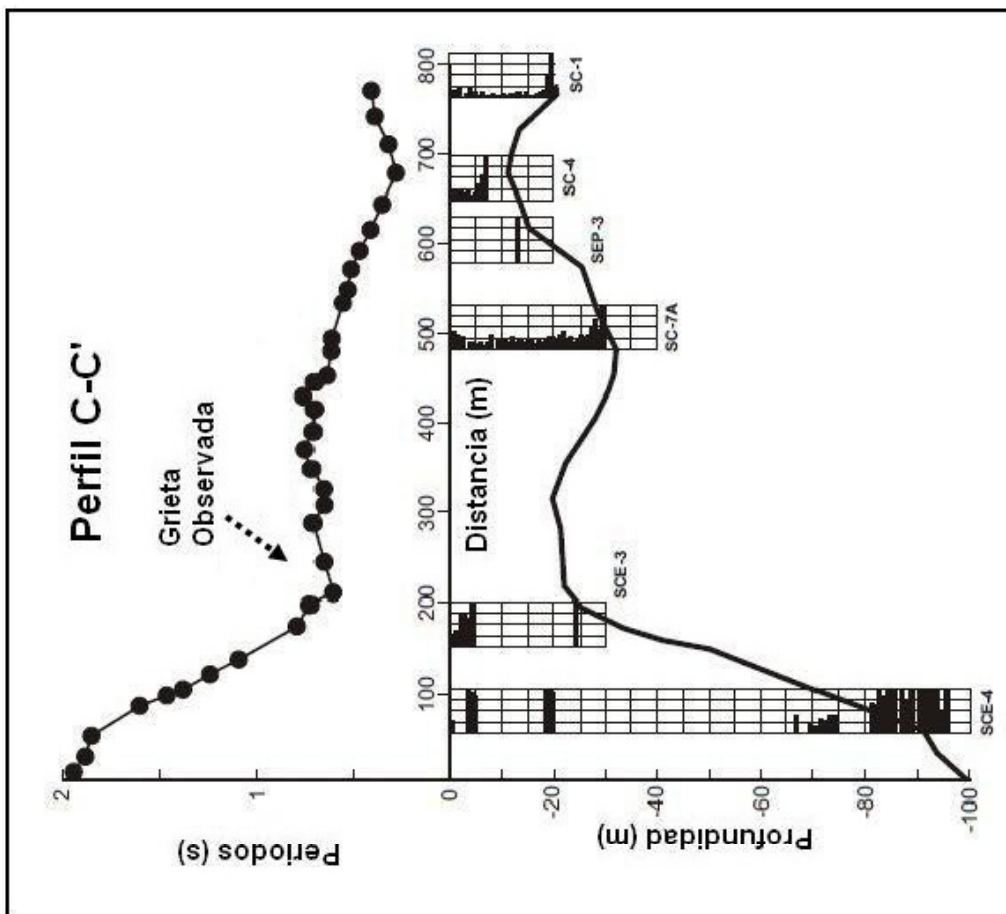


Figura 3.6 Perfil C-C'. Comparativo de sondeos geotécnicos y periodos.

La parte superior de la figura 3.5 y figura 3.6 muestran los periodos dominantes a lo largo ejes perpendiculares a la grieta principal. Nuevamente, los cambios repentinos de pendiente en los perfiles mencionados, coinciden con la localización de las grietas existentes; ocurriendo en un periodo de 1.5 segundos.

La comparación de los perfiles anteriores, corrobora que el periodo dominante depende más del espesor de capa que de la velocidad de onda de corte. De hecho, si ocurre un cambio de espesor abrupto, los valores de la velocidad de onda de corte de las arcillas lacustres no muestran un gran cambio en la vecindad de grietas presentes en la zona de estudio. Caso contrario de los valores de periodo dominante los cuales tienen cambios abruptos al cruzar el agrietamiento. Distintos valores de velocidad de onda de corte fueron estimados a partir de la información de las pruebas de penetración de cono (CPT *Cone Penetration Test*) realizadas por TGC Geotecnia en el 2007. De la figura 3.3 se tomaron los sondeos geotécnicos (CPT); las velocidades de onda de corte para arcillas blandas, se estimaron con la expresión:

$$V_s = \eta \sqrt{\frac{q_c}{N_{kh}\gamma_{ref}}} \dots\dots\dots (3.2)$$

En donde V_s es la velocidad de onda de corte en m/s; η es una constante que depende del tipo de suelo que para este caso es de 23; q_c es la resistencia a la penetración medida en una prueba de penetración de cono; N_{kh} es un coeficiente de correlación igual a 9.5 y γ_{ref} es el peso volumétrico del suelo. La discusión de los valores de las constantes en la ecuación 3.2 se ha presentado en otros trabajos (Ovando y Romo, 1992).

Las velocidades de onda de corte promedio (\bar{V}_s) mostradas en la tabla 3.1 fueron obtenidas utilizando la siguiente expresión:

$$\bar{V}_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}} \dots\dots\dots (3.3)$$

Donde:

\bar{V}_s : es la velocidad de onda de corte promedio.

H : es el espesor total del estrato compresible.

h_i : es el espesor de cada uno de los estratos.

V_i : es la velocidad de cada uno de los estratos.

La tabla 3.1 muestra las velocidades de onda de corte promedio calculadas con las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, haciendo uso de los resultados de las pruebas de penetración de cono, en el perfil B-B' (figura 3.5).

Sondeo	Espesor del suelo (m)	Vs promedio (m/s)
SEP-1	70.00	89.00
SEP-2	30.00	130.00
SEP-3	14.00	147.00
SEP-4	38.00	89.00

Tabla 3.1 Espesor del suelo y sus velocidades de onda de corte a lo largo del perfil B-B' de la figura 3.5.

Como se observa en la tabla, la velocidad de onda de corte promedio sobre la grieta o cerca de ella (SEP-4) es casi la misma que la zona que tiene un espesor de suelo arcilloso más profundo (SEP-1). En el extremo sur las arcillas son más delgadas y duras (SEP-1) y (SEP-2). Así mismo estas arcillas se intercalan con lentes arenosos relativamente duros, limos y arenas limosas. Por lo tanto, las ondas de corte son considerablemente más altas.

3.2 Detalle en la delegación Iztapalapa

En base a los resultados de las mediciones de microtemores en la colonia Lomas de San Lorenzo, se procedió recabar las grietas que han aparecido en toda la delegación Iztapalapa, de Auvinet (57 grietas) y Carreón (158), su distribución espacial se muestra en la figura 3.7. Una vez validado el método propuesto en esta tesis, se diseñaron 2 nuevas campañas de mediciones, tratando de abarcar la mayor parte de los puntos que han sido señalados por autoridades delegacionales, como zonas de riesgo en la delegación Iztapalapa. Algunas de las colonias más afectadas han sido: Ermita Zaragoza, Ejército de Oriente, zona ISSSTE y zona Peñón del Marqués (ver figura 3.8), Concordia Zaragoza, Santa Martha Acatitla, San Lorenzo Xicoténcatl, Santa María Aztahuacán, Agrícola Oriental, Jacarandas, Cananea, Francisco Villa y Los Ángeles. La campaña de mediciones de microtemores iniciaron en octubre del 2010 (179 puntos) y finalizaron en diciembre del mismo año (53 puntos).

La distribución espacial de los puntos se muestra en la figura 3.9, añadiendo los puntos en la colonia Lomas de San Lorenzo y registros realizados con anterioridad (Lermo, 1998), sumando en total 424 puntos.

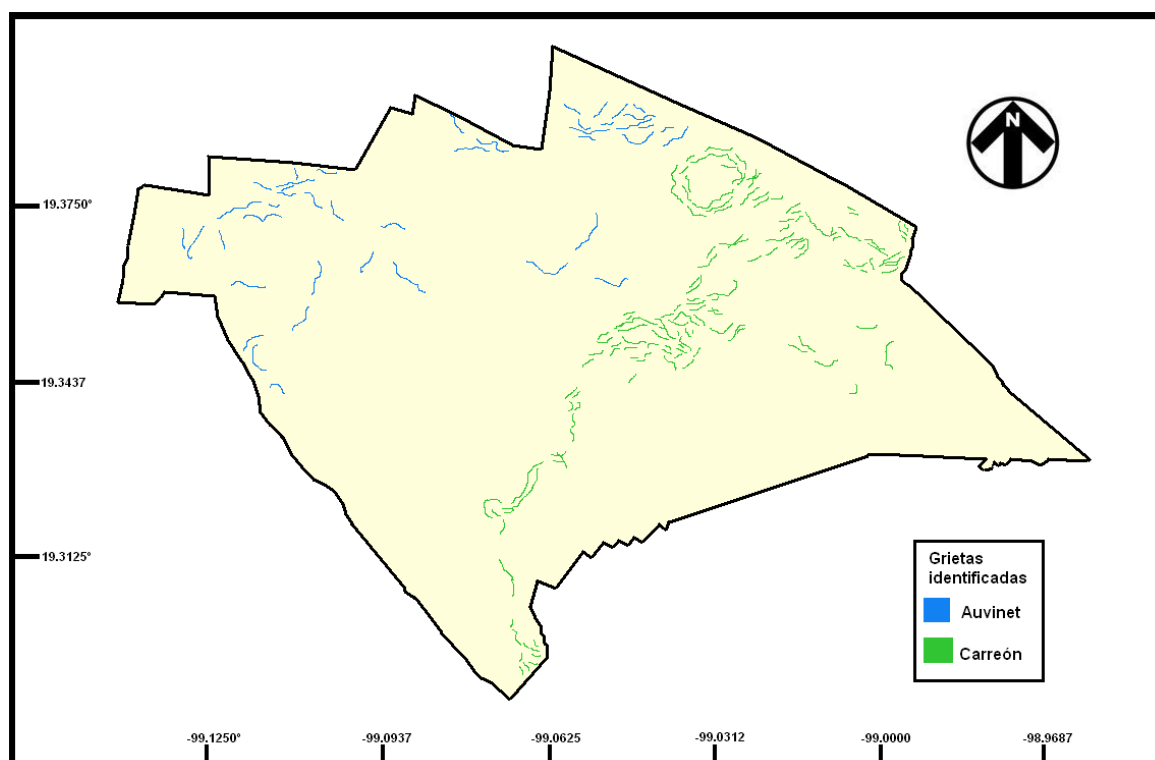


Figura 3.7 Grietas localizadas, Auvinet (2009) 57 grietas aproximadamente, Carreón (2009) 158 grietas aproximadamente.



Figura 3.8 Zona Norte Peñón del Marqués. Superior izquierda: medición con acelerógrafo en las grietas presentes, sobre Av. Zaragoza. Superior derecha e inferior izquierda: daños en la carpeta asfáltica. Inferior derecha: tamaño del desnivel presente a simple vista.

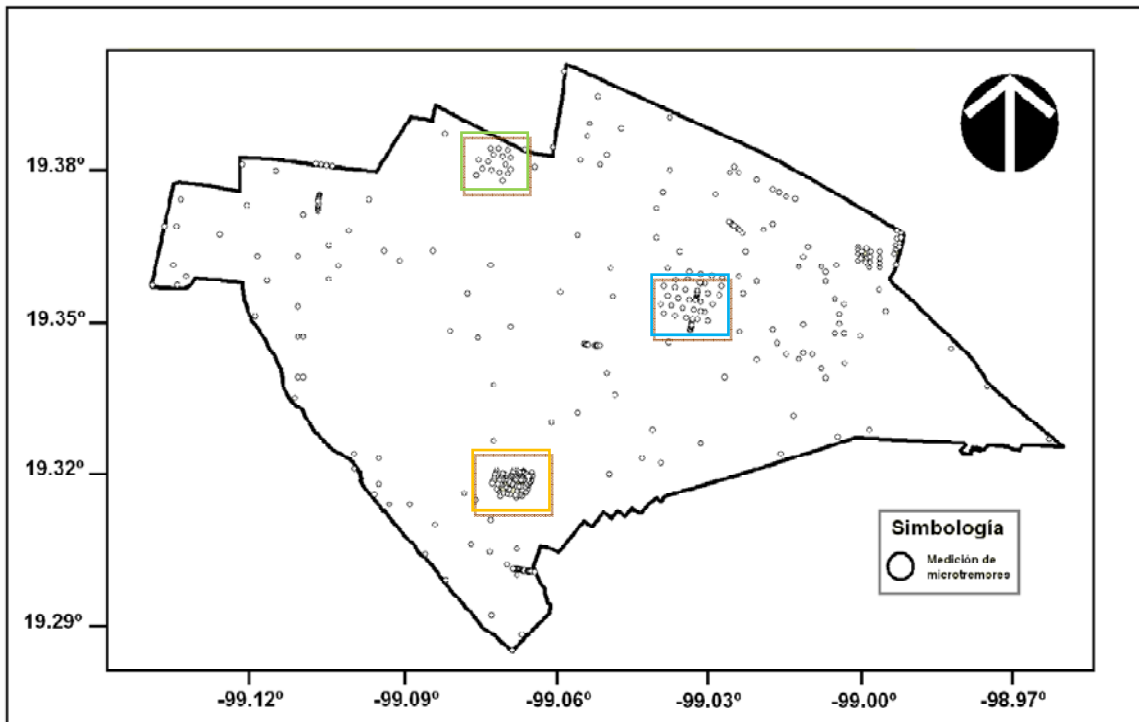


Figura 3.9 Distribución espacial de los puntos de medición de microtremores en la delegación Iztapalapa (424 puntos). Lomas de San Lorenzo (cuadro anaranjado), Agrícola Oriental (cuadro Verde), Aztahuacán (cuadro azul)

Los periodos dominantes obtenidos, aplicando los mismos criterios de los resultados en Lomas de San Lorenzo, muestran que las grietas aparecen en zonas en las inmediaciones de cambios fuertes de periodo. Los valores de los periodos dominantes a lo largo de la delegación se encuentran en la figura 3.10, la cual también muestra la topografía de la región.

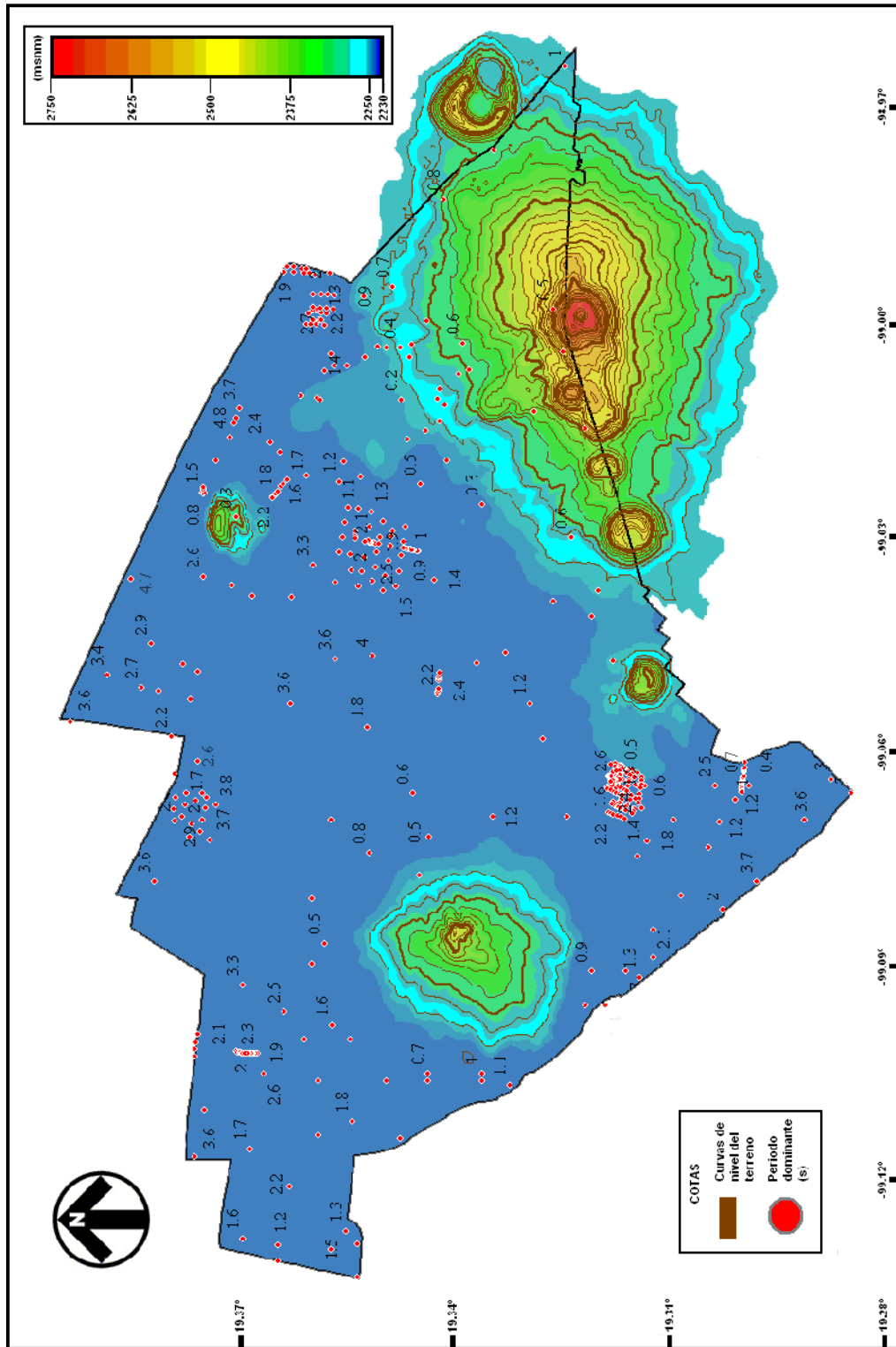


Figura 3.10 Valores de periodo dominante de los puntos de medición (424 puntos) y topografía de la región.

Con la información resultante se generaron dos mapas de isoperiodos en la colonia Agrícola Oriental (ver figura 3.11) y en la colonia Santa María Aztahuacán (ver figura 3.12), los cuales muestran la distribución espacial de las grietas existentes así como distintos perfiles que las cruzan perpendiculares, abarcando los lugares con cambios considerables de periodo dominante. Haciendo uso de la ecuación 3.1 se calculó el espesor del suelo compresible (H) teniendo como datos el periodo dominante, y con un valor promedio de velocidad de onda de corte de 80-100 (m/s).

3.2.1 Colonia Agrícola Oriental

La figura 3.13 muestra el perfil DD' el cual cruza una grieta que surgió en verano del 2008 en la colonia Agrícola Oriental, la grieta tiene un ancho de 1.5 (m) y se extiende a lo largo de 1.5 (km). La parte superior muestra el perfil de los resultados de las mediciones, empezando en un periodo de 3.5 (s) alcanzando valores de 2.0 (s) manteniendo una pendiente negativa a lo largo de 300 (m) y teniendo un repunte para llegar nuevamente a un periodo 3.5 (s). Este cambio brusco se presenta a lo largo de una longitud de 50 (m) muy cerca de la grieta presente. En la parte inferior de la figura se muestra la configuración del lecho rocoso calculado, teniendo un cambio evidente, similar a la trama de periodo dominante. En la figura 3.14 se tiene el perfil EE' de periodos dominantes y su configuración del lecho rocoso, mostrando que las grietas originadas en esa zona, tienen una vecindad de 100 (m) respecto al punto de quiebre. Las 2 configuraciones anteriores difieren de los perfiles hechos en Lomas de San Lorenzo, en dónde las grietas se generan sobre periodos de 1.5 (s), mientras que en la Agrícola Oriental han aparecido en periodos de 2.5 (s) aproximadamente.

3.2.2 Colonia Santa María Aztahuacán

En la colonia Santa María Aztahuacán se tiene una grieta principal la cual se extiende a lo largo de 1.7 (km) con una profundidad de 1 a 2 (m) y sus diferentes ramificaciones. Los desniveles sobre el asfalto llegan a una altura de casi un metro. La figura 3.15 muestra las tramas de periodos dominantes y de la configuración del lecho rocoso del perfil FF', mostrando un comportamiento estable a lo largo de 500 (m), permaneciendo horizontales, pero una vez que hay un cambio de pendiente abrupto se genera el agrietamiento aproximadamente a 100 (m) de distancia de dicho cambio, en un periodo de 1.5 (s).

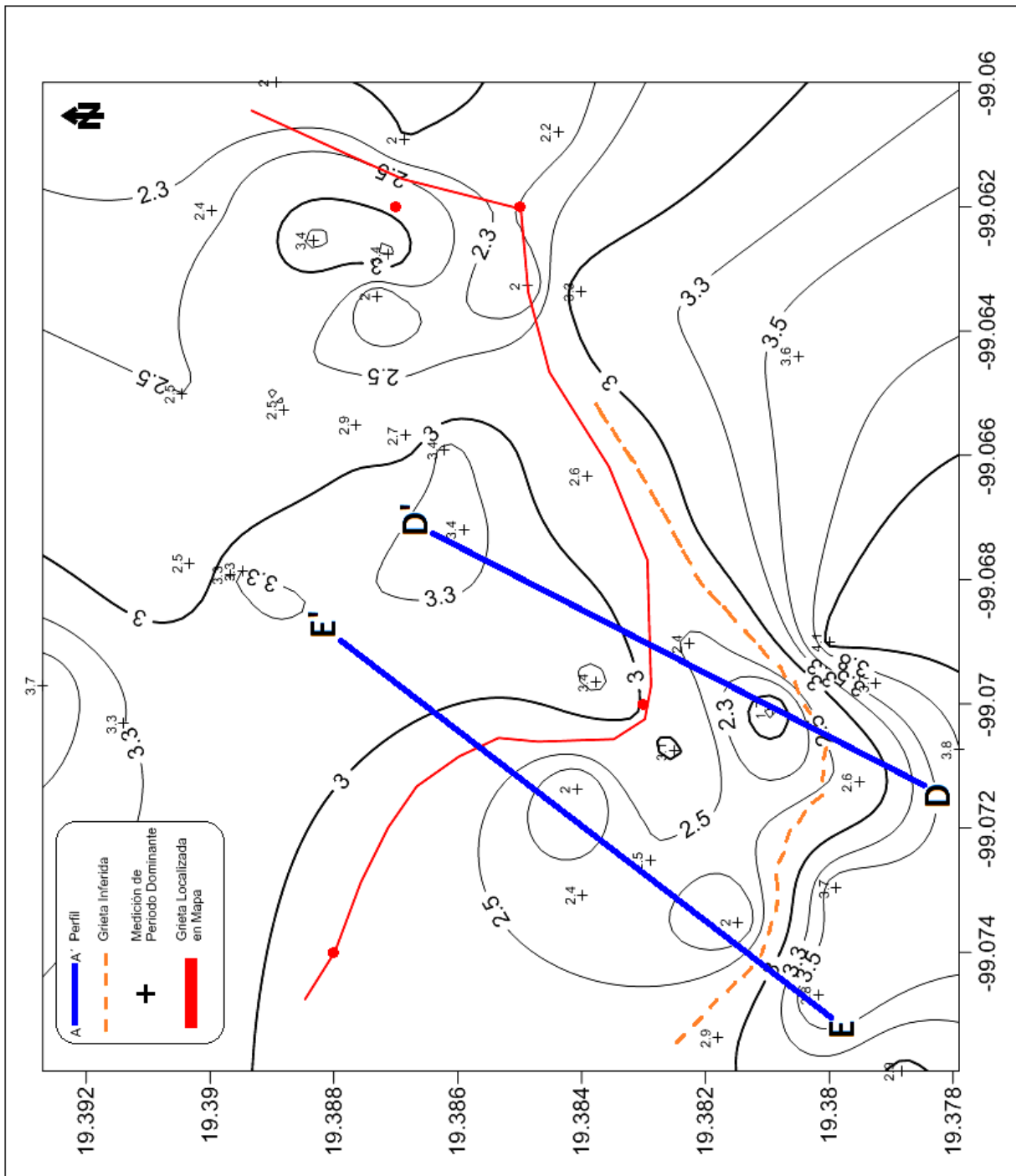


Figura 3.11 Mapa de isoperiodos en la colonia Agrícola Oriental, con grietas existentes e inferidas. Perfiles EE' y DD'.

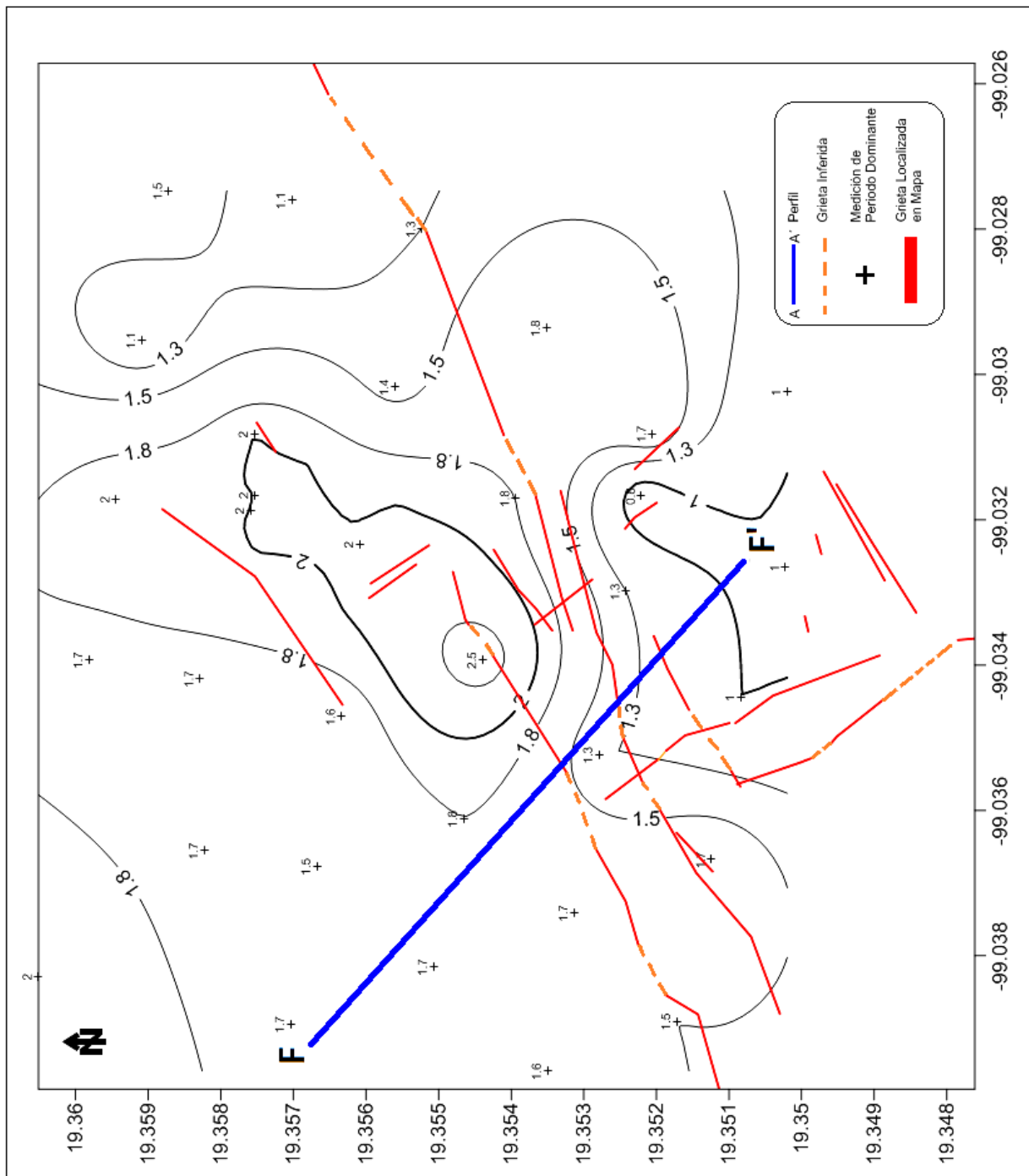


Figura 3.12 Mapa de isoperiodos en la colonia Santa María Aztahuacán, con grietas existentes e inferidas. Perfiles FF'.

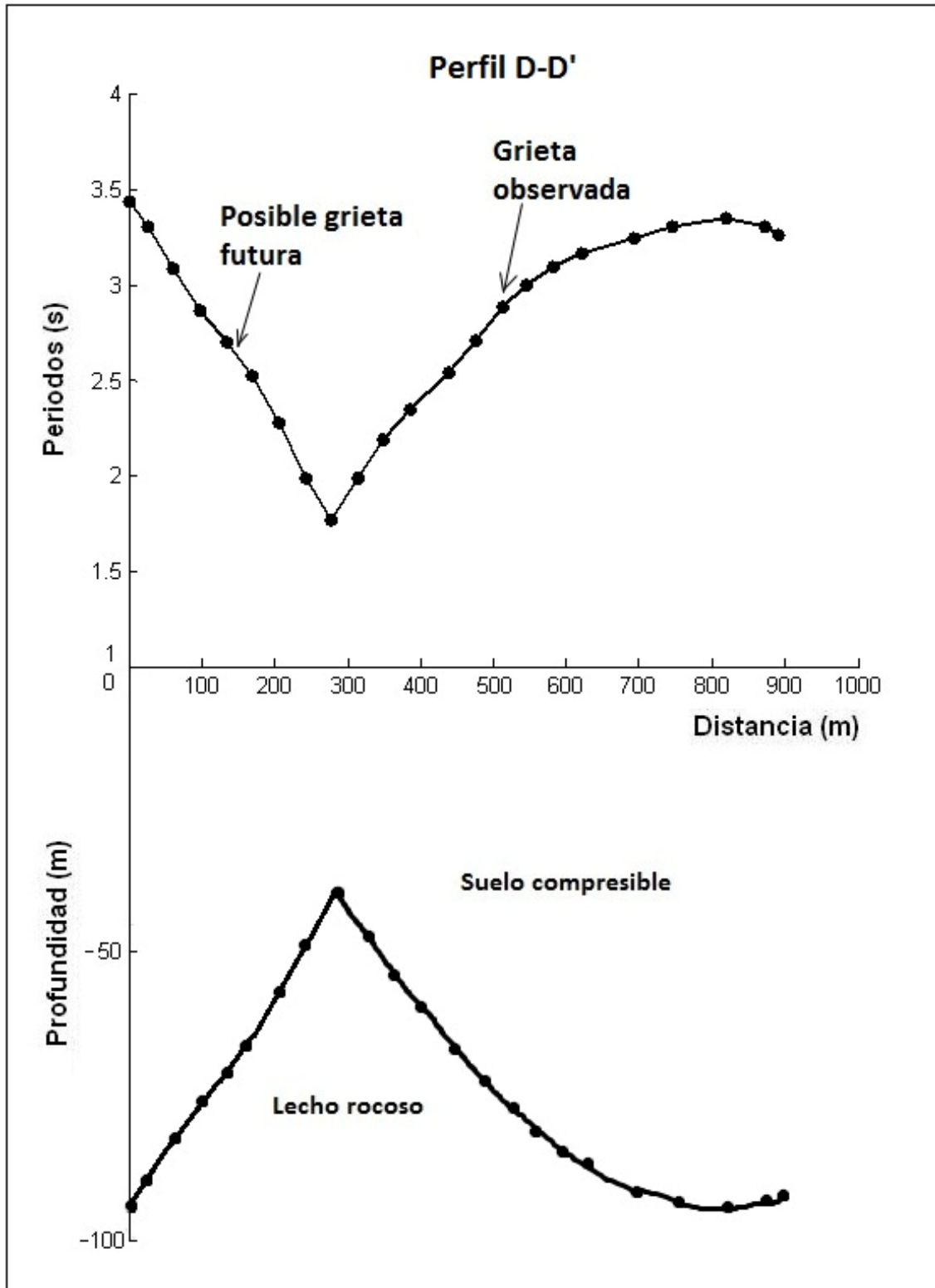


Figura 3.13 Perfil D-D'. Comparativo del perfil de periodo dominante y la configuración del lecho rocoso.

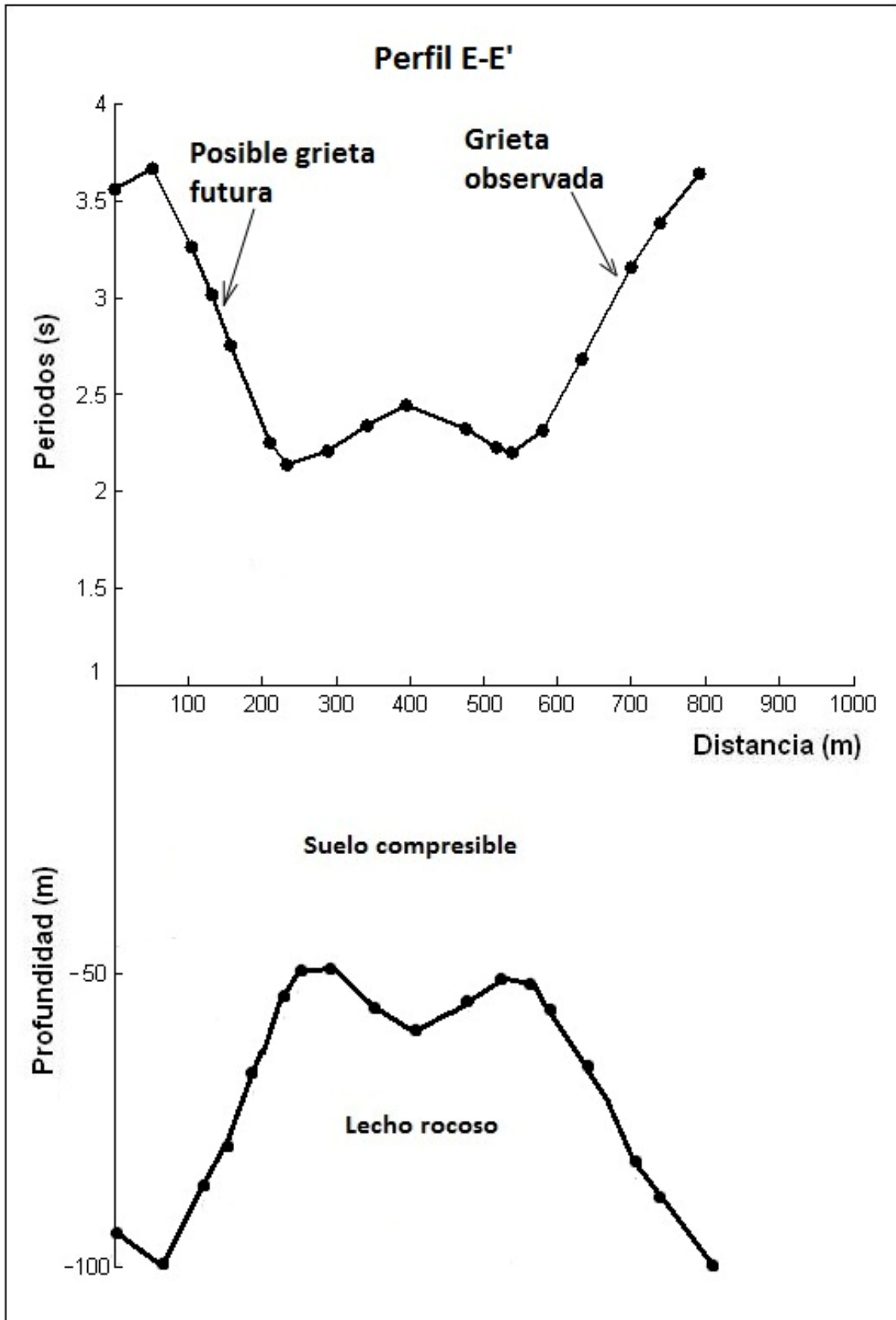


Figura 3.14 Perfil E-E'. Comparativo del perfil de periodo dominante y la configuración del lecho rocoso.

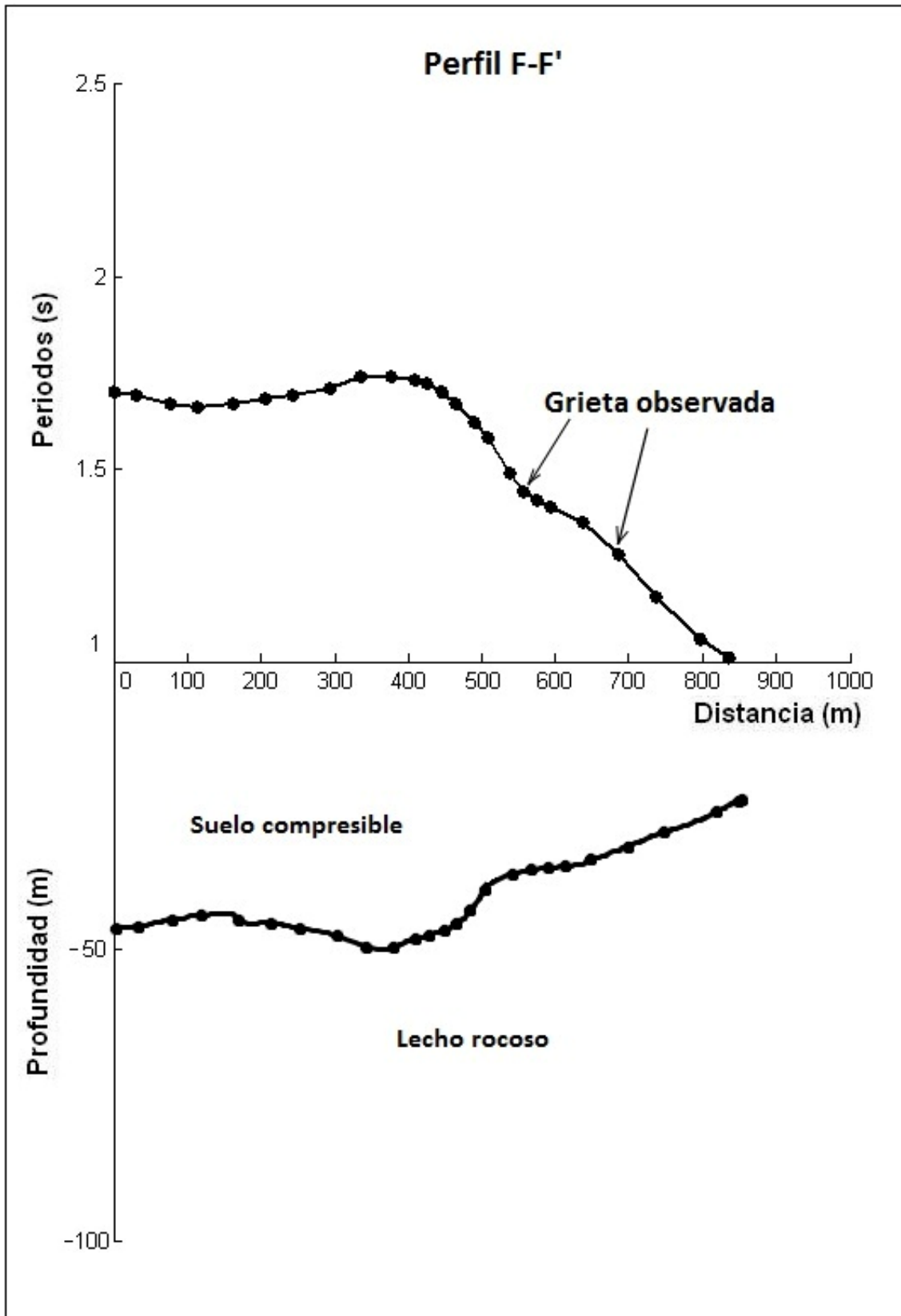


Figura 3.15 Perfil F-F'. Comparativo del perfil de periodo dominante y la configuración del lecho rocoso.

3.2.3 Análisis de los periodos dominantes de la delegación Iztapalapa

Actualmente el fenómeno de agrietamiento del suelo es un problema que no está totalmente claro, por lo que una vez que se comprobó que las grietas presentes en la delegación Iztapalapa se encuentran en la cercanía de zonas de transición, cambiando abruptamente su periodo dominante, se generó un mapa temático de los periodos y de las grietas existente, haciendo uso de los 424 puntos de periodo dominante (los valores su localización se encuentran el *Anexo B* y algunas gráficas de los cocientes espectrales, frecuencias dominantes, en el *Anexo C*). Este mapa tiene como finalidad dar una posible descripción del origen del agrietamiento en Iztapalapa, así como zonas susceptibles a presentarlo, basándose en los perfiles descritos anteriormente y observando el patrón de ocurrencia (ver figura 3.15).

El análisis de los periodos muestra que las grietas han aparecido, sustancialmente, en zonas en las que hay dos cambios importantes de periodo, el primero cuando se tiene una transición abrupta de 1 a 2 segundos en una longitud de 200 metros, presentes al centro, este, sureste y noreste de la delegación, representando suelos compresibles no tan profundos que se encuentran entre 4 y 60 metros de profundidad. Y el segundo cambio entre 2 y 4 segundos en una longitud aproximada de 250 metros perpendicular a las curvas de isoperiodos, en la parte centro y norte de Iztapalapa, significando la presencia de suelos compresibles más profundos de 40 a 100 metros o más de profundidad.

Colonias que presentan cambios de periodos de 1 a 2 segundos en 200 metros:

- Barrio de San Pablo
- Barrio de San Lucas
- El Santuario
- Ejército de Oriente
- Zona ISSSTE
- Santa Martha Acatitla Sur
- Lomas de San Lorenzo Xicoténcatl
- Santa Cruz Meyehualco
- Jacarandas Cananea

Colonias que presentan cambios de periodos de 2 a 4 segundos en 250 metros:

- Santa María Aztahuacán
- Central de Abasto
- Santa Martha Acatitla Norte
- Chinampac Juárez
- Vicente Guerrero
- San José Aculco

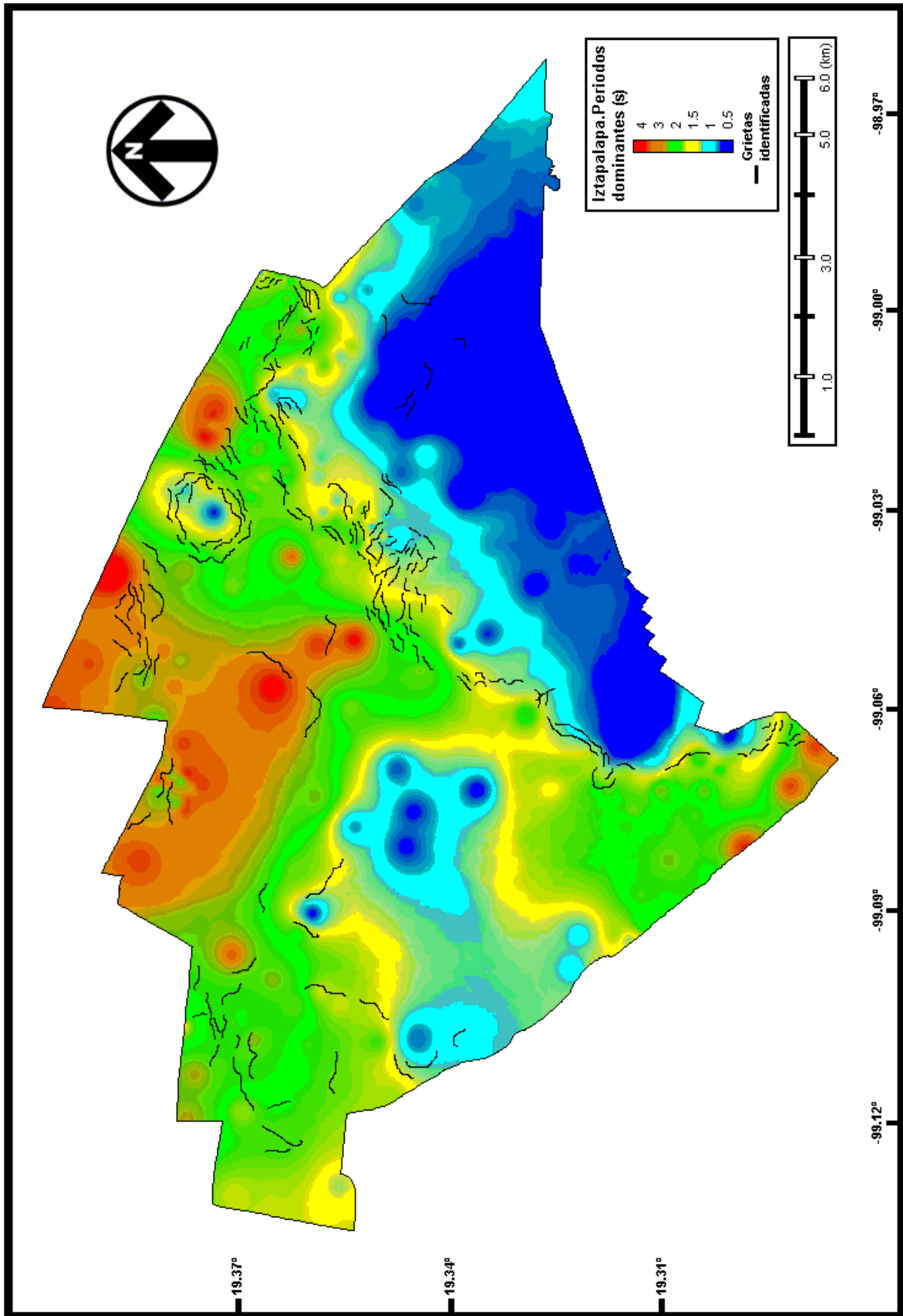


Figura 3.15 Mapa temático de isoperiodos de la delegación Iztapalapa.

4. Discusión de resultados

De los párrafos anteriores se desprende que los mecanismos de grietas en la delegación Iztapalapa están determinados principalmente por la morfología de los materiales más duros que subyacen a los materiales compresibles que fueron depositados. Se pudo observar que el periodo dominante depende de los espesores de los estratos compresibles y de su rigidez o su compresibilidad. Los patrones en los cuales varían los periodos dominantes, pueden ser usados para inferir la morfología de los materiales subyacentes y de esta manera identificar zonas potenciales a presentar agrietamiento, para un número aceptable de posibles situaciones.

En la figura 3.3 en la colonia Lomas de San Lorenzo, el patrón que se observa entre las curvas de isoperiodos y la formación de las grietas, en el que la grieta se encuentra a lo largo de la curva de 1.5 (s), dicho patrón fue usado para indicar la localización de posibles grietas futuras.

Se muestra la variación de algunos patrones de periodo dominante que se pueden presentar a priori de una campaña de mediciones de vibración ambiental en la delegación Iztapalapa (zona de transición). El primero corresponde a una estructura geológica enterrada la cual producirá cambios de periodo dominante, como se ilustra en la figura 3.13, en la colonia Agrícola Oriental; una vez que el nivel piezométrico es abatido se generarán hundimientos diferenciales sobre la estructura, el ancho de influencia se presentará sobre la cima de la estructura, dentro de la cual se generará un fracturamiento ya que no se forma escarpe en la superficie del lecho rocoso.

Así mismo la figura 3.14, en la colonia Santa María Aztahuacán, muestra una configuración del tipo horst, en la que al bajar el nivel piezométrico el ancho de influencia se presentará sobre los hombros de la estructura y por efecto de los desplazamientos horizontales de las partículas, se genera una zona de tensión sobre el horst y en los extremos, una zona de compresión.

En la figura 3.15 se observa otra de las posibles configuraciones que pueden generar grietas superficiales, la cual consiste en una zona de talud en el lecho rocoso. La geometría de esta configuración queda definida por el estrato del acuífero sobre la parte menos profunda del suelo compresible, del estrato de la parte más profunda y de la longitud de la pendiente del talud. Si el nivel del agua se abate se producen hundimientos diferenciales, los cuales producen una componente horizontal en las partículas del relleno, que al no ser uniformes estos desplazamientos horizontales se generan zonas de deformación de tensión y compresión. En la zona de compresión se generan agrietamientos que pueden desarrollar un escarpe en la superficie dependiendo del espesor del estrato en la parte del lecho rocoso y de su inclinación.

En la figura 4.1 se muestran nuevamente los periodos y las grietas existentes en la delegación Iztapalapa. El patrón que guardan las grietas en la zona B y los periodos dominantes, de 1 a 2 segundos, muestra que existe un talud en el lecho rocoso notorio en el que la transición a la zona exlacustre se da abruptamente. La zona C, en donde se encuentra el Cerro de la Estrella, no muestra agrietamiento aparente, aún cuando tiene un cambio de 1 a 2 segundos de periodo, similar a la zona B; probablemente a que la velocidad del derrame fue más lenta en comparación con la zona B y la transición no es tan abrupta; sin embargo en esa zona se tienen pocas mediciones y puede ser que esa zona no cuenta con amplios estudios de agrietamiento. En la zona D estamos en presencia de una zona más profunda en la que los agrietamientos, como se mencionó anteriormente, se deben principalmente a estructuras enterradas o por configuraciones del tipo horst o tipo graben. En la parte NE, denominada zona A, encontramos agrietamientos que probablemente están asociados a un cambio de periodo en el talud del lecho rocoso, a su vez en esa zona nos encontramos con lo que antiguamente fue una amplia región chinampera (Menéndez et al., 2010), la cual genera anomalías geotécnicas en el suelo, este agrietamiento no sigue un patrón de isoperiodos similar a los descritos en las otras zonas.

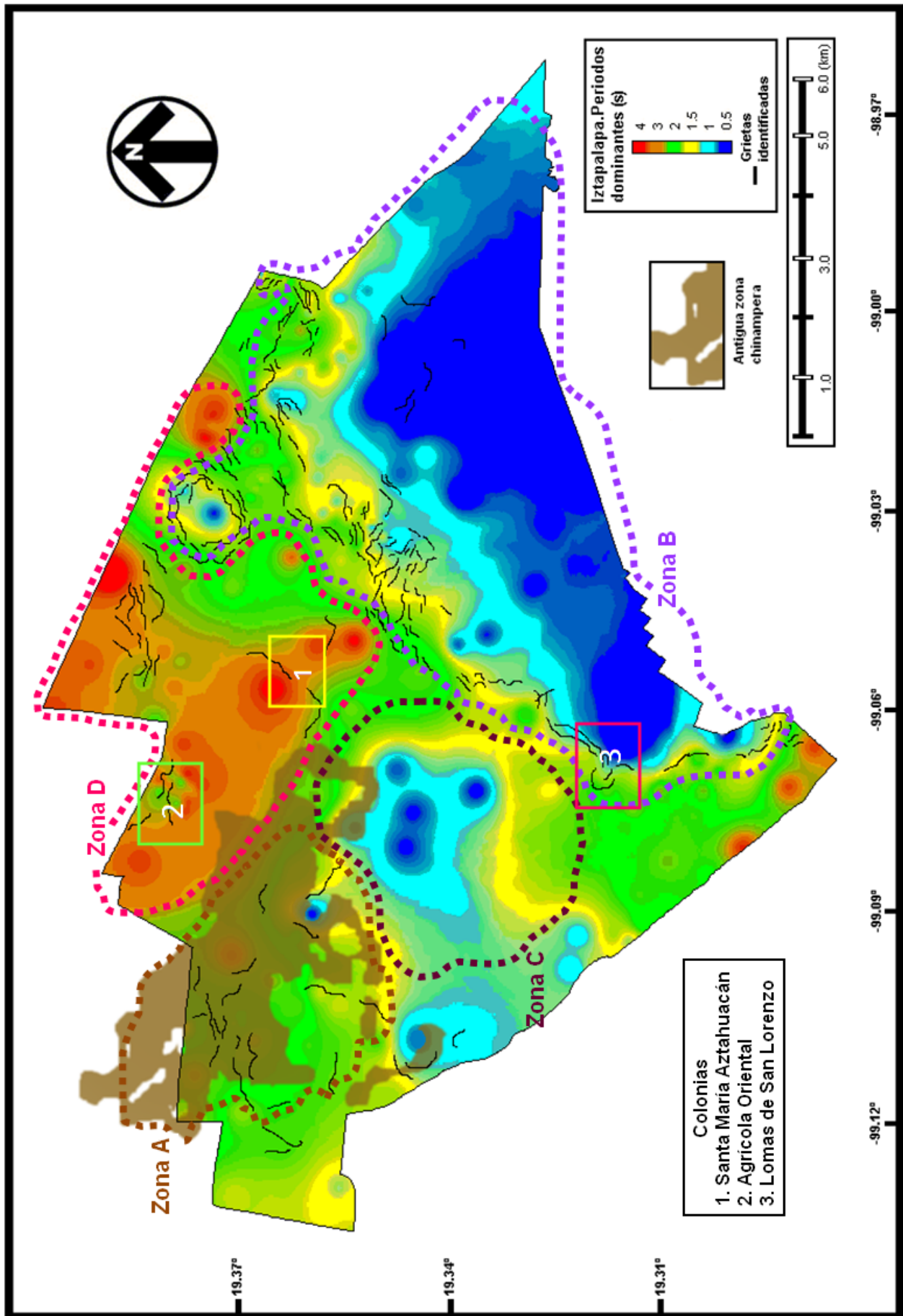


Figura 4.1 Zonificación del probable origen del agrietamiento en la delegación Iztapalapa.

5. Conclusiones

A lo largo de las últimas décadas, una gran cantidad de grietas han aparecido en los bordes del antiguo lago de la cuenca del Valle de México en la zona de transición, donde el espesor de las arcillas suaves varía considerablemente en distancias relativamente cortas. Estructuras geológicas enterradas como abanicos aluviales o aluviones pueden aparecer sobre todo en la parte inferior de las colinas que rodean el lago, así como en la zona de transición. Estas estructuras geológicas enterradas contribuyen a la aparición de grietas, ya que generan un estado de tensión en la superficie de los estratos arcillosos cuando éstos se compactan por la presión resultado de la explotación del acuífero subyacente.

Analizando los patrones en los cuales los periodos dominantes cambian espacialmente, se pueden identificar zonas propensas a presentar agrietamiento, como se presenta en el capítulo 3. El periodo dominante, el cual varía dependiendo principalmente del espesor total del material compresible, puede determinarse aplicando la técnica de Nakamura para analizar microtemores o vibración ambiental.

En esta tesis se proponen lugares de agrietamiento potencial, en los alrededores de las zonas de transición en la delegación Iztapalapa, se pueden evaluar al observar la distribución espacial y los patrones de variación de periodos dominantes. Esta propuesta se aplicó con éxito en la colonia Lomas de San Lorenzo, una colonia en la zona montañosa en el suroeste de la delegación, comprobando el método propuesto con la geotecnia disponible. En otras colonias (Agrícola Oriental y Santa María Aztahuacán) se aplicó el mismo método obteniendo resultados igualmente exitosos. Posteriormente se aplicó en toda la delegación Iztapalapa localizando las zonas de potencial riesgo por agrietamiento y dando una descripción factible del origen de las grietas existentes.

La idealización simplificada los patrones encontrados puede ser una herramienta útil para evaluar el agrietamiento potencial en otros lugares.

La técnica propuesta en este trabajo, requiere un esfuerzo relativamente pequeño, aunque es necesario el uso de instrumentos de medición especializados, sismógrafos, de preferencia dispositivos de banda ancha. En comparación con sondeos directos para la determinación de la morfología de los suelos duros o del lecho rocoso, esta técnica constituye una alternativa más económica y rápida. Sin embargo, se requieren hacer mediciones más minuciosas para determinar de manera más clara los lugares en riesgo, como se hizo en la colonia Lomas de San Lorenzo (capítulo 3.1).

Por último, es recomendable que para la correcta identificación y localización de zonas con agrietamiento potencial, es necesaria la inclusión de un procedimiento secuencial teniendo, al menos, los siguientes cuatro pasos:

1. Identificar, en términos generales, zonas de agrietamiento potencial en base a la topografía, geología regional y la geomorfología. Identificar procesos antropogénicos que puedan influir en la aparición de grietas, como la subsidencia regional producto de la extracción de acuíferos subyacentes.
2. Aplicar la técnica descrita en esta tesis, con el fin de obtener mapas de periodo dominante y perfiles para conseguir precisión en la delimitación de zonas que un futuro pueden sufrir de agrietamiento.
3. Otras técnicas pueden ser usadas para mejorar la precisión al diseñar la morfología del suelo duro o del lecho rocoso, entre algunas de estas técnicas tenemos perfiles de gravimetría o refracción sísmica.
4. Los resultados de los 3 pasos anteriores se deben calibrar o verificar con perforaciones o sondeos geotécnicos.

El fenómeno de agrietamiento del suelo se debe estudiar más a fondo, ya que hasta la fecha no se encuentran técnicas eficientes para mitigar su efecto en las grietas ya existentes.

6. Referencias

- Lermo, J., Chávez-García, F., 1994, "Are Microtremors Useful In Site Response Evaluation?", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1350-1364.
- Lermo, J., Ovando, E., Espinosa-Villalpando, L., 2010, "Microtremor Measurements to Detect Zones of Potential Cracking In the Basin of Mexico", *IAHS Publication 339* ISSN 0144-7815, *Land Subsidence, Associated Hazards and the role of natural resources development*, México., pp 51-53.
- Marshal, R., Mazari, M., 1959, "El subsuelo de la Ciudad de México", UNAM, México, D.F.
- Vietez-Uteza, L., et al., "Investigación sobre fallas y hundimientos que produzcan movimientos diferenciales y agrietamientos en la superficie del Valle de México significativos para el proyecto de red de distribución de gas en el Distrito Federal", Informe técnico final, México.
- Millán, J., 2005, "Estudio de mecánica de suelos para un conjunto habitacional por construir en la calle el Molino No. 114 colonia La Planta de la delegación Iztapalapa del Distrito Federal", México, D.F.
- Ovando, E., Montiel, J., 1989, "Estudio sobre el problema del agrietamiento en la unidad habitacional Cananea Iztapalapa, D.F.", Unión de Colonos UCISV Libertad, México, D.F.
- Auvinet, G., 1981, "Arietamiento de las arcillas del valle de México", Informe técnico del Instituto de Ingenierías, UNAM, a la Comisión del Lago de Texcoco, México, D.F.
- Auvinet, G. y Arias, A., 1991, "Propagación de grietas", Memoria, Simposio sobre el agrietamiento de suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, pp. 21-32.
- Auvinet, G., 2008, "Fracturamiento de suelos, estado del arte", Memoria, Volumen especial "Conferencias temáticas: Avances recientes", XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, México, pp. 299-318.
- Auvinet, G., 2009, "Land subsidence in Mexico City", Proceedings, ISSMGE TC36 workshop, "Geotechnical engineering in urban areas affected by land subsidence; the cases of Mexico City, Bangkok and other large cities", 9 de Octubre, pp. 3-11, Volume published by ISSMGE TC36, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos and Instituto de Ingeniería UNAM, ISBN 978-968-5350-24-2, México, D.F.
- Lermo, J., Chávez-García, F., 1993, "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 83, pp. 1574-1594.

- Lermo, J., Chávez-García, F., 1994, "Site effect evaluation at Mexico City: Dominant period and relative amplification from strong motion and Microtremor records", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 13, pp. 413-423.
- Méndez, E., Auvinet, G. & Lermo, J., 2008, "Avances en la caracterización geotécnica del agrietamiento del subsuelo de la Cuenca de México", *Memoria, XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Aguascalientes, Vol. 2, pp. 495-502.
- Pacheco, J., 2007, "Modelo de subsidencia del Valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales", *Tesis doctoral*, Centro de Geociencias, UNAM, pp. 253.
- Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., León, E., 2005, "Esquema geotécnico de la cuenca de México", México: TGC Geotecnia. ISBN: 968-5571-06-6.
- Méndez, E., Matus, U., Auvinet, G., Juárez, M., 2010, "Caracterización de anomalías geotécnicas en las zonas lacustre y de transición de la ciudad de México", *Memoria, XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Guerrero, México, pp. 311-321.
- Mazari, M, et al., 1994 "Deformaciones inducidas por chinampas en depósitos lacustres de la Cuenca de México", *Antropológicas* No. 3, pp. 107-121. México.
- González-Jácome, 2005, "Chinampas y Chinamperos: Los horticultores de San Juan Tezompa", *Tesis doctoral*, Universidad Iberoamericana, México, D.F., pp. 64-107.
- TGC-Geotecnia, 2007, "Proyecto para la renivelación de los edificios 1 y 2 de la escuela primaria José Romero y Fuentes, Iztapalapa", PGI-2007-P009-I052, Dirección General de Obras Públicas del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.
- TGC-Geotecnia, 2007, "Reporte preliminar para la renivelación del edificio "H" de la unidad habitacional Benito Juárez, Iztapalapa", PGI-2007-P009-I052, Dirección General de Obras Públicas del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.
- TGC-Geotecnia, 2007, "Ejecución de seis (6) sondeos de muestreo ambiental en las zonas de grietas de la delegación Iztapalapa", TGC 2007-3342, Dirección General de Obras Públicas del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.
- TGC-Geotecnia, 2007, "Reporte parcial de los sondeos de exploración profunda en la colonia Lomas de San Lorenzo, Iztapalapa", TGC 2007-3335, Dirección General de Obras Públicas del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.
- Yauri, S., 2006, "Microtremores", *Instituto Geofísico del Perú*. V. 7, pp. 43 -56, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

Anexo A. Técnicas de exploración

Se describen a continuación las técnicas de exploración empleadas en los sondeos realizados por TGC Geotecnia en la colonia Lomas de San Lorenzo (TGC, 2007):

Sondeo de cono eléctrico. Consiste en hincar un cono a presión con una velocidad controlada, con la finalidad de determinar la variación de resistencia que opone el subsuelo a la penetración de punta, q_c , la interpretación de este parámetro permite definir con precisión cambios en las condiciones estratigráficas y estimar la cohesión y el módulo de deformación volumétrica del suelo, haciendo uso de correlaciones empíricas.

Sondeo de penetración estándar. Los tramos en los que el cono no entró se complementaron con la prueba de penetración estándar, que consiste en hincar un tubo partido de cm de longitud, penetrómetro, mediante los impactos de un martinete cuya masa es de 64 (kg) dejándola caer desde 75 (cm) de altura.

Se hacen cuatro avances de 15 (cm) para el hincado del penetrómetro, contando en cada uno el número de golpes necesarios; la resistencia a la penetración estándar se define como el número de golpes, N, necesarios para penetrar los 30 (cm) intermedios, de 15 a 45 (cm). Los golpes en el primer tramo se desprecian debido a la alteración inducida por la perforación, mientras que el último sirve para muestrear una longitud ligeramente mayor y para detallar la estratigrafía del sitio.

Muestreo con tubo TGC. Sirve para obtener los parámetros de resistencia y compresibilidad del suelo para lo que se necesitan extraer muestras inalteradas de buena calidad, haciendo uso de muestreadores tubulares de pared delgada hincados a presión y velocidad constante.

Muestreo con barril doble giratorio. Para el muestreo del basalto se utilizó el barril doble giratorio, provisto de una broca de diamante en su extremo inferior. El barril muestreador se hace girar mediante una máquina rotatoria, la cual transmite una fuerza de empuje y un movimiento rotatorio a través de una columna de barras de perforación huecas, por cuyo interior circula agua a presión que enfría la corona de corte y extrae el material cortado a la superficie de terreno. Al girar, la corona cortante labra una muestra que penetra en el tubo interior a medida que avanza el barril muestreador. Al extraer el muestreador después de haber perforado una longitud igual a la del barril interior, una trampa interna cónica sujeta a la columna de roca labrada para asegurar su extracción.

Longitud	Latitud	Frecuencia (1/s)	Periodo Dominante [1/Frecuencia] (s)	Punto
-99.0671944	19.3203056	0.38	2.65	A1
-99.0666111	19.3205833	0.51	1.95	A2
-99.0665556	19.3203889	0.64	1.57	A3
-99.0665556	19.3203056	0.53	1.89	A4
-99.0665556	19.3200833	0.59	1.70	A5
-99.0657222	19.3192778	1.71	0.58	A6
-99.0655833	19.3191667	1.30	0.77	A7
-99.0655833	19.3188611	1.95	0.51	A8
-99.0654444	19.3188333	1.95	0.51	A9
-99.0650833	19.3186944	2.12	0.47	A10
-99.0651111	19.3185	1.64	0.61	A11
-99.0655833	19.31775	4.57	0.22	B1
-99.0658889	19.3179167	4.74	0.21	B2
-99.0658889	19.3185278	3.32	0.30	B3
-99.0661111	19.3188056	2.25	0.44	B4
-99.0662889	19.3190444	2.78	0.36	B5
-99.0665667	19.319325	1.40	0.72	B6
-99.0668472	19.3195028	0.66	1.51	B7
-99.0673194	19.3195806	0.42	2.41	B8
-99.0671556	19.319675	0.50	2.00	B9
-99.0672222	19.3198611	0.61	1.64	B10
-99.0672778	19.3201944	0.49	2.05	B11
-99.0680861	19.3206389	0.61	1.64	B12
-99.0681111	19.3200278	0.64	1.57	C1
-99.0676667	19.3196944	0.64	1.57	C2
-99.0676944	19.3193333	1.05	0.95	C3

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.0675556	19.3190833	1.09	0.91	C4
-99.0669444	19.3186667	2.70	0.37	C5
-99.067	19.3185556	2.66	0.38	C6
-99.0680139	19.3177417	2.20	0.45	C7
-99.0679389	19.3162389	1.64	0.61	C8
-99.0679917	19.3153083	1.46	0.68	C9
-99.06785	19.3191361	0.49	2.05	G*2
-99.0687972	19.3196028	0.88	1.14	G*3
-99.0708722	19.3196389	0.64	1.57	E3
-99.0714333	19.3183194	0.71	1.41	E4
-99.0713889	19.3169306	0.59	1.71	E5
-99.0712	19.3157361	0.56	1.78	E6
-99.0684861	19.32075	0.59	1.71	D2
-99.0682972	19.3194583	0.71	1.41	D3
-99.0687167	19.3179167	3.05	0.33	D4
-99.0698389	19.3166167	0.51	1.95	D5
-99.0692889	19.3160111	0.59	1.71	D6
-99.0647722	19.3196361	2.39	0.42	F2
-99.0649944	19.3189944	1.39	0.72	F3
-99.0651139	19.3186222	1.20	0.83	F4
-99.0656306	19.3175667	1.44	0.69	F5
-99.0657889	19.3171667	1.05	0.95	F6
-99.066125	19.3164333	2.78	0.36	F7
-99.0648917	19.3203222	2.03	0.49	G1
-99.0651694	19.3196139	1.07	0.93	G2
-99.065375	19.3191944	2.69	0.37	G3
-99.0653972	19.3189639	1.86	0.54	G4

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.0654778	19.3187222	1.64	0.61	G5
-99.0655694	19.3185389	1.46	0.68	G6
-99.0659278	19.3177361	4.69	0.21	G7
-99.0662056	19.3170861	7.23	0.14	G8
-99.0667972	19.3157167	3.78	0.26	G9
-99.0656722	19.3191278	5.05	0.20	H2
-99.0656944	19.3189444	6.27	0.16	H3
-99.0657639	19.3187806	2.10	0.48	H4
-99.0661833	19.3178556	2.37	0.42	H5
-99.0664222	19.317375	5.18	0.19	H6
-99.0667944	19.3168417	8.33	0.12	H7
-99.0672611	19.3157667	3.00	0.33	H8
-99.0662333	19.3192556	1.95	0.51	I2
-99.0663167	19.3190972	2.64	0.38	I3
-99.0663611	19.3189972	2.08	0.48	I4
-99.0664083	19.3189028	2.39	0.42	I5
-99.0670139	19.3175611	6.74	0.15	I6
-99.0677778	19.3158139	1.98	0.51	I7
-99.0666111	19.3194861	0.67	1.50	J1
-99.0666806	19.3193417	2.03	0.49	J2
-99.06675	19.3191806	2.51	0.40	J3
-99.0668139	19.3190167	2.49	0.40	J4
-99.0670556	19.3188278	1.81	0.55	J5
-99.0673806	19.3176639	6.49	0.15	J6
-99.0678611	19.3167333	3.55	0.28	J7
-99.0682167	19.3158194	6.96	0.14	J8
-99.067925	19.3190917	1.42	0.70	L3

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.0682139	19.3187361	1.51	0.66	L4
-99.0685806	19.3182278	2.59	0.39	L5
-99.0693278	19.317225	0.95	1.05	L6
-99.0698417	19.3160778	0.39	2.56	L7
-99.0687778	19.3179889	2.56	0.39	L11
-99.0659722	19.3198944	0.83	1.21	K1
-99.0685056	19.3207	0.61	1.64	M1
-99.0686722	19.3202333	0.44	2.28	M2
-99.0689222	19.3197083	0.51	1.95	M3
-99.069	19.3195028	0.56	1.78	M4
-99.0692056	19.319025	1.00	1.00	M5
-99.0693222	19.3187306	1.61	0.62	M6
-99.0694111	19.3185	1.68	0.60	M7
-99.0699611	19.3174583	0.61	1.64	M8
-99.0704889	19.3162361	0.71	1.41	M9
-99.0699278	19.3187583	1.25	0.80	N1
-99.070375	19.3189639	1.05	0.95	N2
-99.0704222	19.3187833	0.91	1.10	N3
-99.0708111	19.3178861	0.56	1.78	N4
-99.0713778	19.3167806	0.56	1.78	N5
-99.0703306	19.3199611	0.55	1.82	O1
-99.0706389	19.3192528	0.61	1.64	O2
-99.0707528	19.3189639	1.03	0.97	O3
-99.07115	19.3180222	0.51	1.95	O4
-99.0717833	19.3169861	0.51	1.95	O5
-99.0706917	19.3201361	0.49	2.05	P1
-99.07105	19.31935	0.73	1.37	P2

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.0711139	19.3190944	0.46	2.16	P3
-99.0712444	19.3188222	1.00	1.00	P4
-99.0715444	19.3180278	0.56	1.78	P5
-99.07195	19.3171083	0.54	1.86	P6
-99.0718056	19.3206278	0.51	1.95	Q1
-99.0719583	19.3202806	0.46	2.16	Q2
-99.0721111	19.3198944	0.39	2.56	Q3
-99.0723639	19.319275	0.49	2.05	Q4
-99.0725472	19.3186333	0.32	3.15	Q5
-99.0727361	19.3181833	0.39	2.56	Q6
-99.0657278	19.3195389	1.04	0.96	Y2
-98.993144	19.361317	0.64	1.56	X1
-98.993555	19.363443	0.49	2.05	X2
-98.993223	19.364189	0.61	1.64	X3
-98.993204	19.364985	0.64	1.57	X4
-98.993027	19.366494	0.56	1.78	X5
-98.993027	19.367965	0.54	1.86	X6
-98.992314	19.367567	1.20	0.83	X7
-98.992311	19.366574	0.59	1.71	X8
-98.992537	19.365385	0.54	1.86	X9
-98.992526	19.364727	0.51	1.95	X10
-99.000646	19.364684	0.37	2.73	X36
-99.000678	19.364048	0.46	2.16	X37
-99.000702	19.363322	0.46	2.16	X38
-99.000754	19.362074	0.30	3.33	X39
-98.999161	19.361809	0.37	2.73	X40
-98.998991	19.362599	0.64	1.57	X41

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-98.998668	19.363258	0.59	1.71	X42
-98.998606	19.363782	0.54	1.86	X43
-98.999067	19.364373	0.51	1.95	X44
-98.999991	19.36381	0.44	2.28	X45
-99.000019	19.362906	0.42	2.41	X46
-99.000045	19.362547	0.51	1.95	X47
-98.996403	19.360698	0.78	1.28	X63
-98.996355	19.361592	0.57	1.77	X64
-98.99637	19.362537	0.51	1.95	X65
-98.996351	19.363794	0.42	2.41	X66
-98.998203	19.363819	0.64	1.56	X67
-98.998345	19.362741	0.42	2.41	X68
-98.998371	19.361769	0.61	1.64	X69
-98.998452	19.360759	1.41	0.71	X70
-99.025462	19.369251	0.56	1.78	X11
-99.025597	19.369349	0.61	1.64	X12
-99.025721	19.369467	0.46	2.16	X13
-99.025794	19.369529	0.56	1.78	X14
-99.025906	19.369621	0.59	1.71	X15
-99.026042	19.369723	0.44	2.28	X16
-99.025384	19.369138	0.61	1.64	X48
-99.025131	19.368947	0.56	1.78	X49
-99.024321	19.36841	0.51	1.95	X50
-99.023964	19.368147	0.61	1.64	X51
-99.023409	19.367551	0.59	1.71	X52
-99.032497	19.355221	0.49	2.06	W1
-99.032503	19.355174	0.51	1.95	W2

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.032504	19.355088	0.56	1.78	W3
-99.032537	19.355012	0.61	1.64	W4
-99.032579	19.354764	0.56	1.78	W5
-99.032636	19.354528	0.56	1.78	W6
-99.032702	19.354169	0.56	1.78	W7
-99.032496	19.355258	0.54	1.86	W16
-99.032492	19.355299	0.46	2.16	W17
-99.032483	19.35535	0.49	2.05	W18
-99.03247	19.35544	0.61	1.64	W19
-99.032459	19.355526	0.56	1.78	W20
-99.03243	19.355611	0.49	2.05	W21
-99.032237	19.355734	0.54	1.86	W22
-99.033515	19.349428	1.03	0.97	X30
-99.033484	19.34965	1.12	0.89	X31
-99.033445	19.349898	0.93	1.08	X32
-99.033404	19.350096	0.83	1.20	X33
-99.033383	19.350258	0.61	1.64	X34
-99.033332	19.350511	0.56	1.78	X35
-99.03376	19.348317	1.12	0.89	X76
-99.033713	19.3486	1.07	0.93	X77
-99.033637	19.348929	1.37	0.73	X78
-99.033611	19.349057	1.44	0.69	X79
-99.033587	19.349161	1.32	0.76	X80
-99.03355	19.349284	1.39	0.72	X81
-99.054543	19.345592	0.46	2.16	X59
-99.054272	19.345539	0.39	2.56	X60
-99.054131	19.345502	0.42	2.41	X61

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.053853	19.345454	0.42	2.41	X62
-99.052554	19.345392	0.46	2.16	X25
-99.052232	19.345395	0.61	1.63	X26
-99.052067	19.345356	0.44	2.28	X27
-99.051916	19.34535	0.61	1.64	X28
-99.051454	19.345299	0.51	1.95	X29
-99.106967	19.371854	0.44	2.28	W9
-99.106967	19.372152	0.54	1.86	W10
-99.106962	19.372433	0.44	2.28	W11
-99.106984	19.372645	0.54	1.86	W12
-99.106988	19.372843	0.49	2.05	W13
-99.106969	19.373023	0.54	1.86	W14
-99.106943	19.373253	0.49	2.05	W15
-99.106726	19.374969	0.44	2.28	W23
-99.106777	19.374752	0.44	2.28	W24
-99.106818	19.374564	0.49	2.05	W25
-99.106872	19.374362	0.49	2.05	W26
-99.106919	19.374123	0.46	2.16	W27
-99.106957	19.373955	0.51	1.95	W28
-99.10703	19.373649	0.42	2.41	W29
-99.067303	19.30112	1.46	0.68	X17
-99.067513	19.301131	1.03	0.97	X18
-99.06774	19.301138	0.81	1.24	X19
-99.067999	19.301144	0.59	1.71	X20
-99.068142	19.301152	0.51	1.95	X21
-99.06842	19.301173	0.59	1.71	X22
-99.068679	19.30117	0.59	1.71	X23

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.068851	19.301185	0.46	2.16	X24
-99.067128	19.300998	0.51	1.95	X71
-99.066985	19.300971	2.93	0.34	X72
-99.066887	19.300956	2.37	0.42	X73
-99.066698	19.30092	2.64	0.38	X74
-99.066519	19.300869	2.56	0.39	X75
-99.065952	19.300796	3.22	0.31	X53
-99.065781	19.300785	2.22	0.45	X54
-99.06561	19.30077	3.05	0.33	X55
-99.065478	19.300751	2.73	0.37	X56
-99.065262	19.300724	2.69	0.37	X57
-99.064507	19.300613	2.71	0.37	X58
-99.0302	19.3502	1.00	1.00	T1
-99.0323	19.3505	1.00	1.00	T2
-99.0344	19.3508	1.00	1.00	T3
-99.0367	19.3512	0.59	1.70	T4
-99.0389	19.3517	0.67	1.50	T5
-99.0294	19.3535	0.56	1.80	T6
-99.0317	19.3539	0.56	1.80	T7
-99.0339	19.3544	0.40	2.50	T8
-99.0361	19.3547	0.56	1.80	T9
-99.0382	19.3551	0.59	1.70	T10
-99.0276	19.3570	0.91	1.10	T11
-99.0308	19.3575	0.50	2.00	T12
-99.0317	19.3575	0.53	1.90	T13
-99.0319	19.3576	0.53	1.90	T14
-99.0342	19.3583	0.59	1.70	T15

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.0366	19.3582	0.59	1.70	T16
-99.0308	19.3521	0.59	1.70	T17
-99.0317	19.3522	1.25	0.80	T18
-99.0330	19.3524	0.77	1.30	T19
-99.0352	19.3528	0.77	1.30	T20
-99.0374	19.3531	0.59	1.70	T21
-99.0396	19.3535	0.63	1.60	T22
-99.0280	19.3552	0.77	1.30	T23
-99.0302	19.3556	0.71	1.40	T24
-99.0323	19.3561	0.50	2.00	T25
-99.0347	19.3563	0.63	1.60	T26
-99.0368	19.3567	0.67	1.50	T27
-99.0389	19.3570	0.59	1.70	T28
-99.0275	19.3587	0.67	1.50	T29
-99.0295	19.3591	0.91	1.10	T30
-99.0317	19.3594	0.50	2.00	T31
-99.0339	19.3598	0.59	1.70	T32
-99.0383	19.3605	0.50	2.00	T33
-99.0663	19.3839	0.38	2.60	T65
-99.0608	19.3844	0.45	2.20	T69
-99.0731	19.3840	0.42	2.40	T73
-99.0714	19.3841	0.50	2.00	T74
-99.0697	19.3838	0.29	3.40	T75
-99.0754	19.3818	0.34	2.90	T76
-99.0735	19.3815	0.50	2.00	T77
-99.0701	19.3809	0.59	1.70	T78
-99.0759	19.3788	0.34	2.90	T79

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.0707	19.3779	0.26	3.80	T80
-99.0725	19.3829	0.40	2.50	V1
-99.0708	19.3825	0.32	3.10	V2
-99.0690	19.3823	0.42	2.40	V3
-99.0747	19.3802	0.26	3.80	V4
-99.0730	19.3799	0.27	3.70	V5
-99.0713	19.3795	0.38	2.60	V6
-99.0697	19.3792	0.27	3.70	V7
-99.1075	19.3811	0.71	1.40	V21
-99.1064	19.3810	0.50	2.00	V22
-99.1054	19.3808	0.50	2.00	V23
-99.1042	19.3806	0.48	2.10	V24
-99.069	19.38	0.24	4.10	L1
-99.082	19.387	0.28	3.60	L4
-99.049	19.355	0.25	4.00	L8
-99.038	19.346	0.71	1.40	L9
-99.024	19.348	2.00	0.50	L10
-99.027	19.339	3.33	0.30	L11
-99.056	19.332	0.83	1.20	L12
-99.056	19.367	0.25	4.00	L13
-99.096	19.316	0.77	1.30	L14
-99.095	19.323	1.11	0.90	L15
-99.11	19.339	1.00	1.00	L16
-99.11	19.347	1.43	0.70	L17
-99.111	19.353	0.53	1.90	L18
-99.111	19.363	0.53	1.90	L19
-99.11	19.371	0.38	2.60	L20

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.103	19.361	0.63	1.60	L21
-99.091	19.362	2.00	0.50	L22
-99.094	19.364	0.50	2.00	L23
-99.105	19.365	0.43	2.30	L24
-99.101	19.368	0.40	2.50	L25
-99.097	19.374	0.30	3.30	L26
-99.067	19.288	0.29	3.50	L27
-99.073	19.292	0.29	3.50	L28
-99.082	19.299	0.27	3.70	L29
-99.068	19.3	0.38	2.60	L30
-99.07	19.302	0.45	2.20	L31
-99.086	19.304	0.50	2.00	L32
-99.068	19.305	0.40	2.50	L33
-99.077	19.306	0.45	2.20	L34
-99.084	19.31	0.42	2.40	L35
-99.073	19.311	0.40	2.50	L36
-99.089	19.314	0.45	2.20	L37
-99.093	19.314	0.48	2.10	L38
-99.076	19.315	0.56	1.80	L39
-99.095	19.318	0.59	1.70	L40
-99.1	19.321	0.71	1.40	L41
-99.1	19.324	1.11	0.90	L42
-99.117	19.358	0.56	1.80	L44
-99.133	19.359	0.77	1.30	L45
-99.119	19.363	0.53	1.90	L46
-99.121	19.373	0.59	1.70	L47
-99.111	19.353	0.53	1.90	L48

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.111	19.347	1.43	0.70	L49
-99.111	19.339	1.00	1.00	L50
-99.134	19.374	0.63	1.60	L51
-99.122	19.381	0.37	2.70	L52
-99.1153	19.3797	0.37	2.70	L53
-99.1194	19.3511	0.59	1.70	L54
-99.1264	19.3672	0.53	1.90	L55
-99.0594	19.3558	0.56	1.80	L56
-99.0378	19.3903	0.21	4.70	L57
-99.0586	19.3992	0.29	3.50	L58
-99.1116	19.335	0.91	1.10	L59
-99.0783	19.3163	0.45	2.20	L60
-99.0611	19.3302	0.45	2.20	L61
-99.0691	19.3491	1.67	0.60	L62
-99.0725	19.3375	2.00	0.50	L63
-99.0494	19.3605	0.28	3.60	L64
-99.0358	19.3638	0.30	3.30	L65
-99.0288	19.375	3.33	0.30	L66
-99.0845	19.3639	0.56	1.80	L67
-99.0777	19.3555	1.25	0.80	L68
-99.073	19.3611	0.42	2.40	L69
-99.0644	19.3805	0.28	3.60	L70
-99.105	19.3583	0.63	1.60	L71
-99.0733	19.3044	0.42	2.40	L72
-99.005	19.3611	0.56	1.80	L73
-99.0725	19.3266	0.71	1.40	L74
-99.13499	19.36889	0.61	1.65	Z1

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.13725	19.36889	0.63	1.60	Z2
-99.13556	19.36116	0.67	1.50	Z3
-99.13967	19.35721	0.63	1.60	Z4
-99.13483	19.35721	0.67	1.50	Z5
-99.0498	19.32	1.43	0.70	Z6
-99.0433	19.3231	1.43	0.70	Z7
-99.081	19.3482	1.84	0.54	Z8
-99.0755	19.3469	1.89	0.53	Z9
-99.0485	19.3356	1.85	0.54	Z10
-99.0501	19.3398	1.67	0.60	Z11
-99.0411	19.3286	2.00	0.50	Z12
-99.0317	19.326	1.72	0.58	Z13
-99.0134	19.3315	2.00	0.50	Z14
-99.0034	19.3418	1.72	0.58	Z15
-99.0002	19.3472	1.67	0.60	Z16
-98.9966	19.3563	1.11	0.90	Z18
-98.9953	19.3521	1.43	0.70	Z19
-98.9824	19.3447	1.33	0.75	Z20
-98.9753	19.3373	1.45	0.69	Z21
-98.9631	19.3269	1.05	0.95	Z22
-98.9985	19.3286	1.96	0.51	Z23
-99.0047	19.3273	2.13	0.47	Z24
-99.0159	19.324	1.92	0.52	Z25
-99.0395	19.3221	1.67	0.60	Z26
-99.06899	19.28515	0.33	3.00	Z27
-99.0252296	19.3800161	0.659	1.52	U54
-99.0253716	19.3797822	1.27	0.79	U53

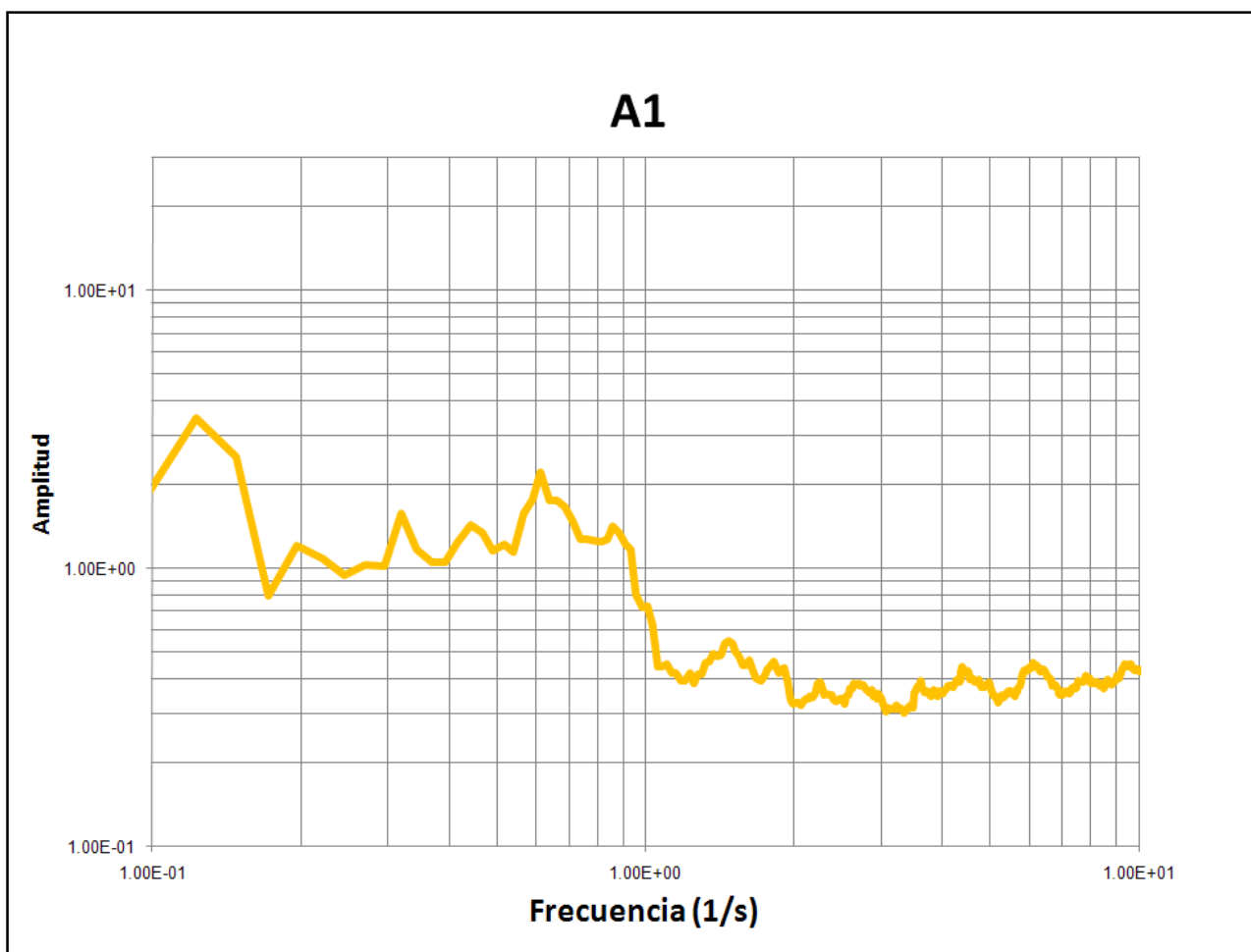
Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.0252126	19.3796567	1.29	0.78	U52
-99.0247666	19.3797073	0.854	1.17	U51
-99.0244793	19.3797478	0.635	1.57	U50
-99.0205783	19.3779327	0.562	1.78	U49
-99.0172095	19.3759737	0.21	4.76	U48
-99.0151658	19.3752642	0.415	2.41	U47
-99.0143491	19.3749847	0.244	4.10	U46
-99.012869	19.3744587	0.269	3.72	U45
-99.0178851	19.3699228	0.537	1.86	U43
-99.0193049	19.3685978	0.415	2.41	U42
-99.022814	19.3646576	0.415	2.41	U41
-99.0236786	19.3599245	0.83	1.20	U40
-99.022937	19.3568521	0.708	1.41	U39
-99.0114095	19.3631687	1	1.00	U37
-99.020657	19.3593188	0.879	1.14	U36
-99.0517363	19.3937436	0.293	3.41	U35
-99.053745	19.3887973	0.366	2.73	U34
-99.0540695	19.3862958	0.415	2.41	U33
-99.0553927	19.3816155	0.342	2.92	U32
-99.051378	19.380573	0.391	2.56	U31
-99.0501943	19.3826888	0.34	2.94	U30
-99.0472636	19.3874488	0.342	2.92	U29
-99.0375795	19.3797149	0.391	2.56	U25
-99.0388117	19.375591	0.488	2.05	U24
-99.0403699	19.3726794	0.562	1.78	U23
-99.0403958	19.3669485	0.488	2.05	U22
-99.0116741	19.3626712	1.2	0.83	U21

Valores y localización de los puntos analizados. Anexo B

-99.0110314	19.3655523	1.39	0.72	U20
-99.0075703	19.3621016	0.83	1.20	U19
-99.0066563	19.360708	0.708	1.41	U18
-99.0067289	19.3588182	0.537	1.86	U17
-99.005478	19.3560959	0.854	1.17	U16
-99.003868	19.3543571	0.537	1.86	U15
-99.0041486	19.3530292	0.732	1.37	U14
-99.0041354	19.3510841	2.51	0.40	U13
-99.0036145	19.3492704	2.37	0.42	U12
-99.0054186	19.3495737	3.13	0.32	U11
-99.0117698	19.350834	6.18	0.16	U10
-99.0073784	19.3409813	3.37	0.30	U9
-99.0080323	19.342481	3.71	0.27	U8
-99.0101166	19.3452251	5.76	0.17	U7
-99.0116116	19.3455986	4.91	0.20	U6
-99.0125222	19.34448	2.05	0.49	U5
-99.0147998	19.345249	3.98	0.25	U4
-99.016241	19.3472638	3.03	0.33	U3
-99.0175182	19.3498888	1.15	0.87	U2
-99.0205482	19.3442623	0.903	1.11	U1

Anexo C. Gráficas de los cocientes espectrales



*Todas las gráficas siguientes tienen la misma escala gráfica logarítmica, como se muestra en la parte superior de esta página. Valores representativos del eje de las abscisas: (0.1, 1.0, 10.0). Valores representativos del eje de las ordenadas: (0.1, 1.0, 10.0, 20, 30).

