

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.

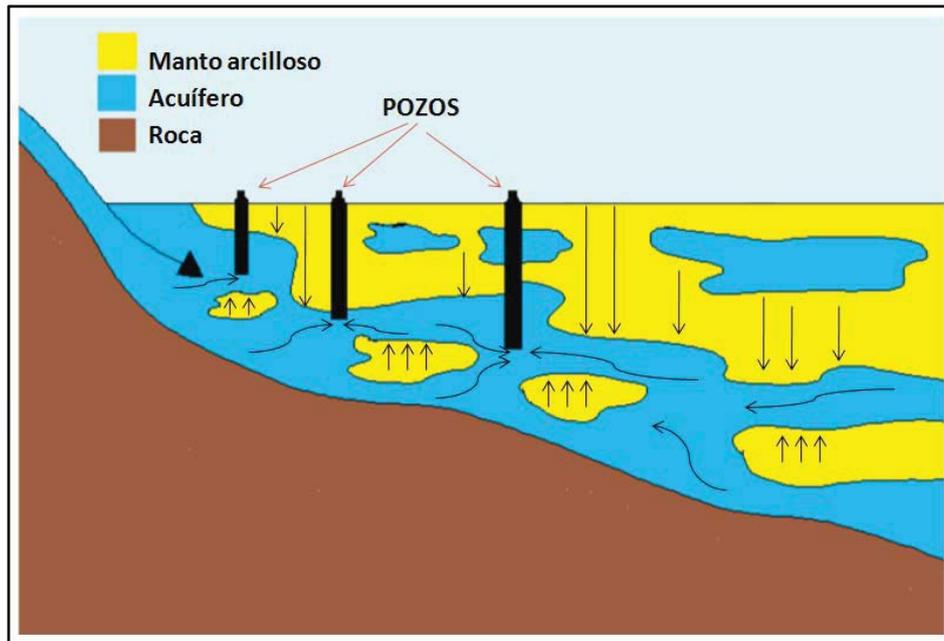


Figura 1.1 Flujo en las capas del subsuelo provocado por el bombeo de agua subterránea.

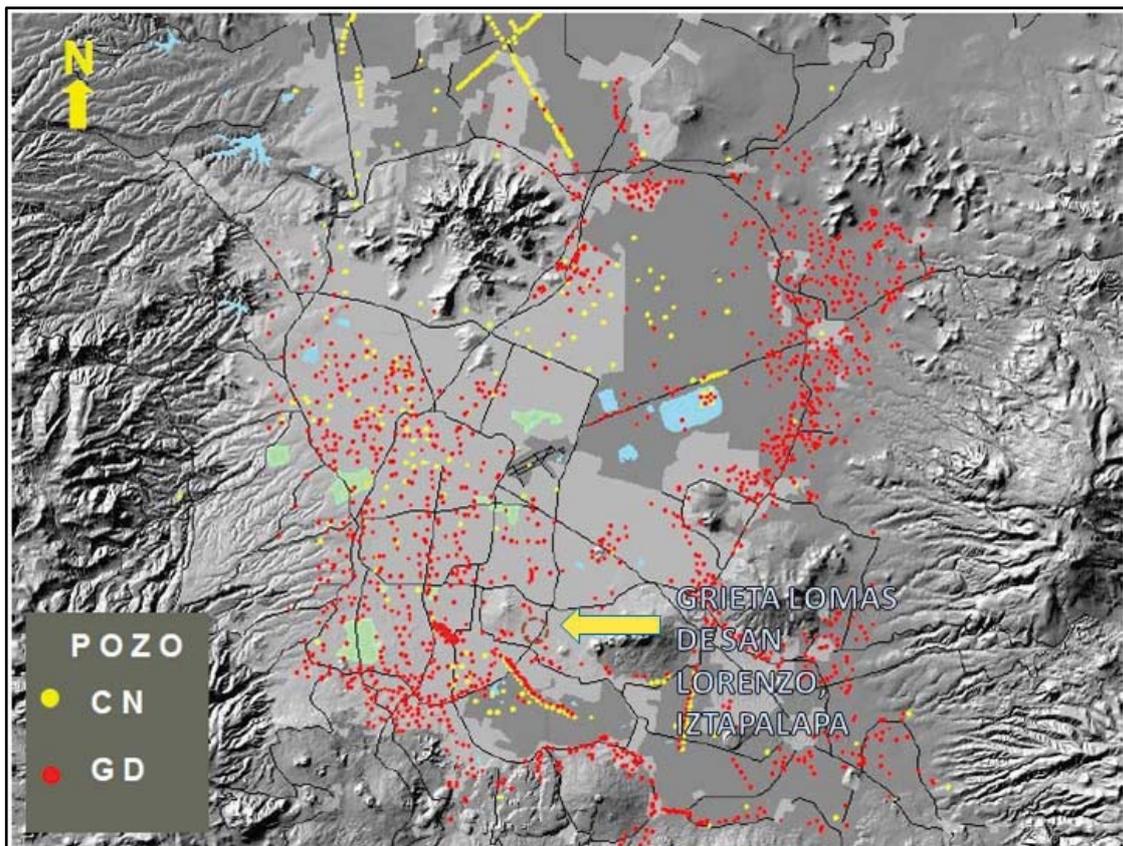


Figura 1.2 Distribución de pozos para extracción de agua en el Valle de México. Los puntos amarillos son de CONAGUA y los puntos rojos son del Gobierno del Distrito Federal.

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 observa que hay un cambio abrupto referente a los hundimientos.

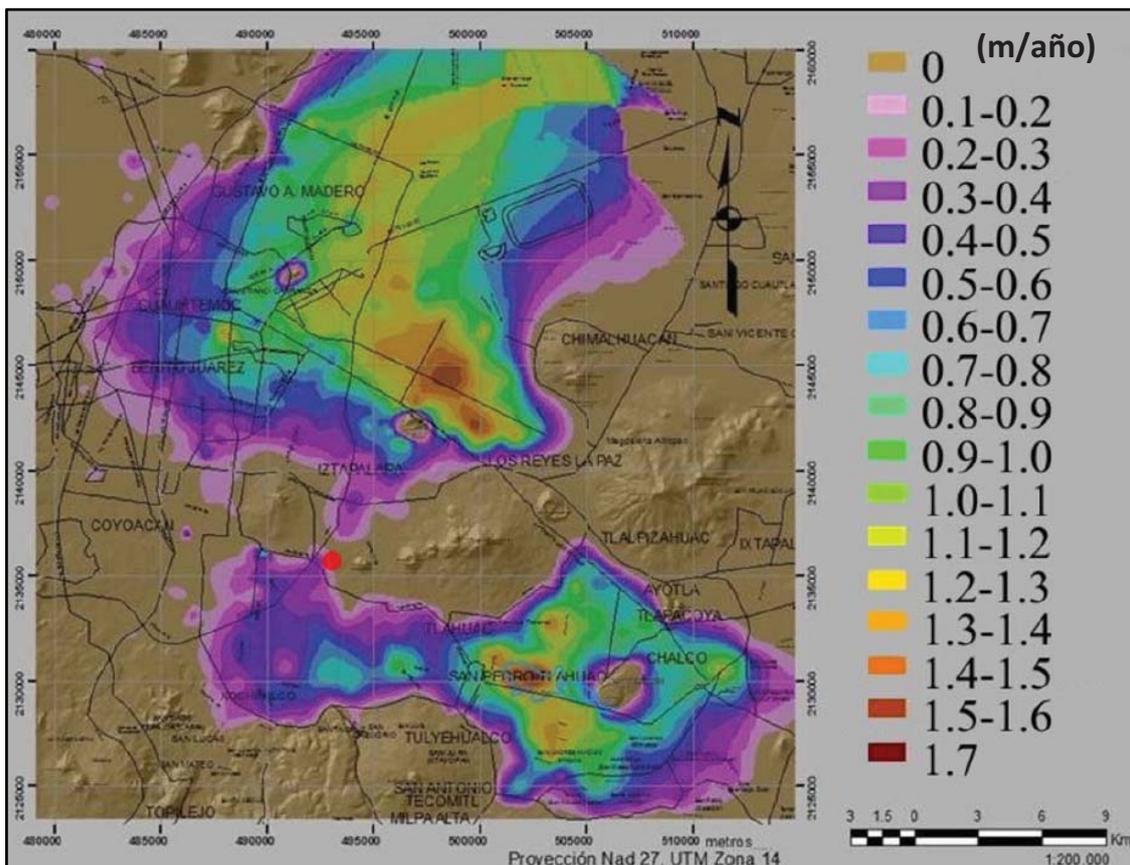


Figura 1.3 Distribución espacial de las velocidades de hundimientos del subsuelo (metros/año). (Auvinet, 2007)

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.

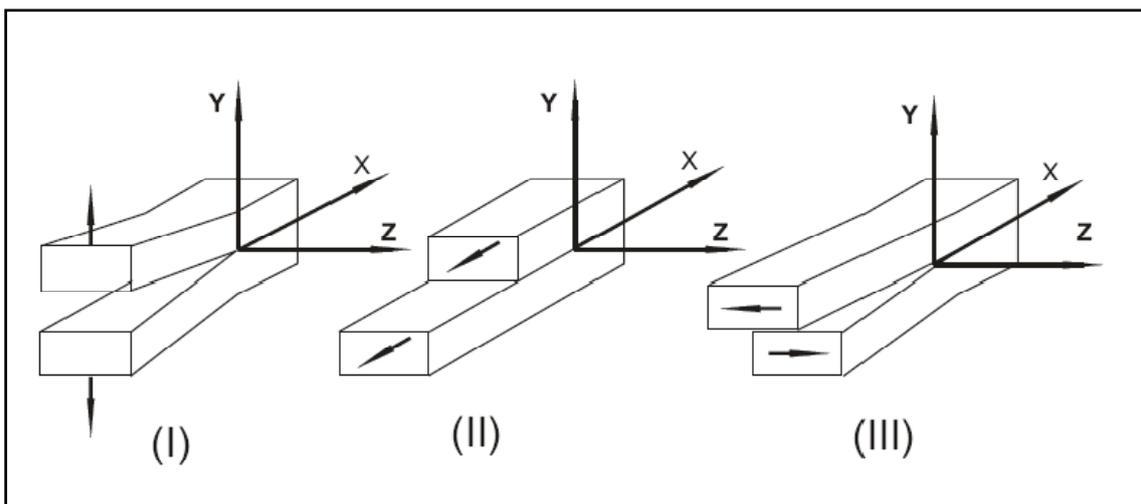


Figura 1.4 Modos básicos de grietas.

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.

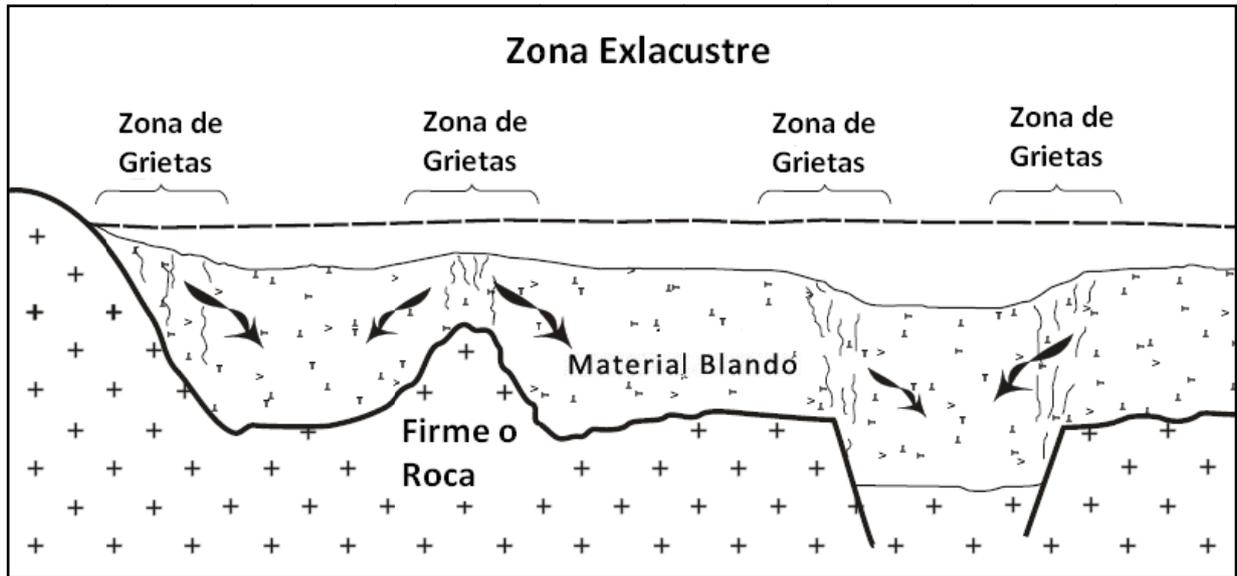


Figura 1.5 Configuraciones del lecho rocoso que pueden generar agrietamientos (Pacheco, 2007).

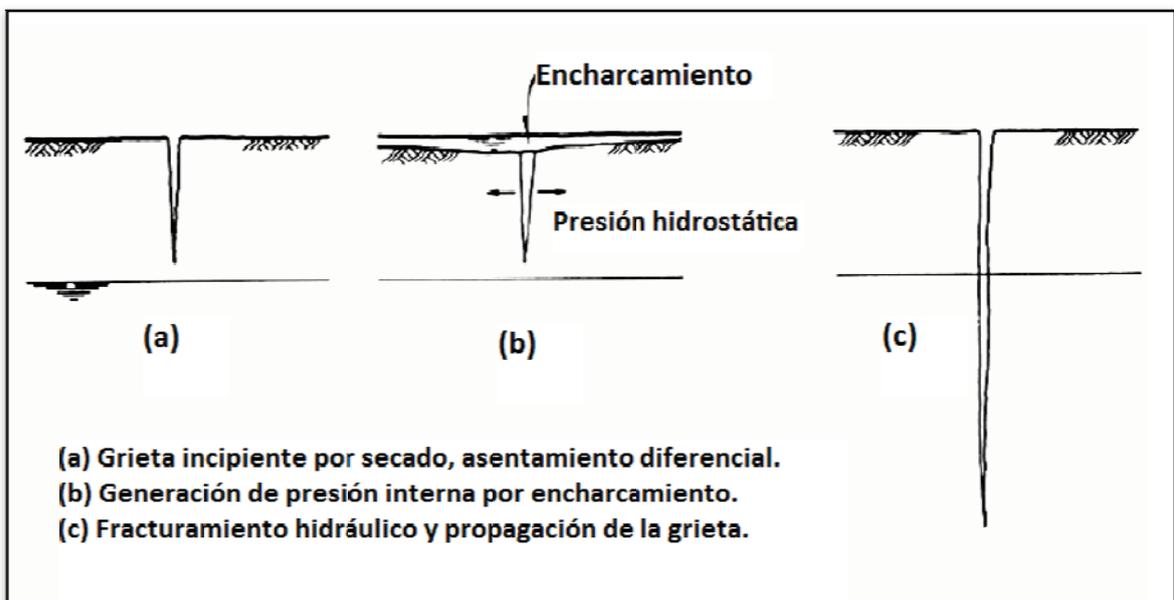


Figura 1.6 Proceso del agrietamiento por fracturamiento hidráulico.

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.

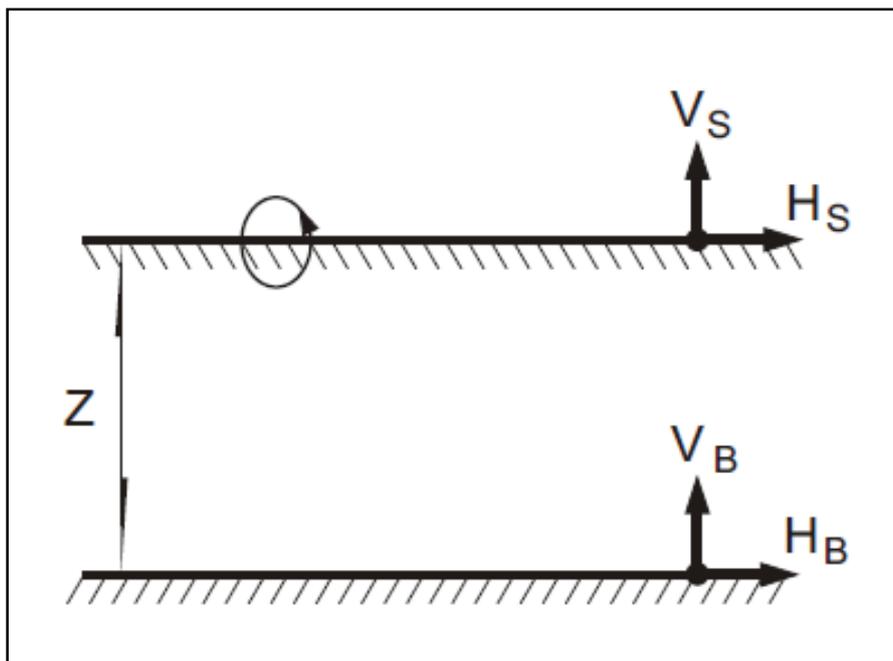


Figura 1.10 Condiciones geométricas para la aplicación de la técnica de Nakamura.

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.