



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

“Caracterización geofísica del subsuelo entorno a los tanques de almacenamiento de sistema Lerma-Cutzamala de la 2ª sección del bosque de Chapultepec. Una evaluación geotécnica del sitio”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A:

ARIANNA VEGA DÍAZ

Director de tesis: Dr. Martín Cárdenas Soto



Ciudad Universitaria

México D.F. 2013



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.

# ÍNDICE

## RECONOCIMIENTO Y AGRADECIMIENTOS

## RESUMEN

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>5</b>
2.1. El bosque de Chapultepec y su relación con el agua	6
2.1.1. Sistema Lerma-Cutzamala	7
2.2. Geología	11
2.3. Zonas minadas	12
<b>3. ESTRUCTURA DE VELOCIDADES A PARTIR DE MÉTODOS SÍSMICOS</b>	<b>14</b>
3.1. Sísmica activa: perfiles de velocidades	14
3.1.1. Instrumentación	14
3.1.2. Geometría y adquisición de datos	15
3.1.3. Procesamiento y perfiles	16
3.1.3.1. Perfil de onda compresional	16
3.1.3.2. Perfil de ondas superficiales	19
3.2. Sísmica pasiva: método de autocorrelación espacial	21
3.2.1. Arreglo de cuatro estaciones	21
3.2.1.1. Instrumentación	21
3.2.1.2. Geometría y adquisición de datos	22
3.2.1.3. Procesamiento y resultados	22
3.2.2. Arreglo de geófonos	23
3.2.2.1. Instrumentación	23

3.2.2.2. Geometría y adquisición de datos	23
3.2.2.3. Procesamiento y resultados	24
<b>4. RESPUESTA SÍSMICA DEL SITIO</b>	<b>27</b>
4.1. Instrumentación	28
4.2. Geometría y adquisición de datos	29
4.3. Procesamiento de datos	30
4.4. Resultados	31
4.4.1. Respuesta sísmica de los tanques	31
4.4.2. Respuesta sísmica alrededor de los tanques	33
<b>5. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>35</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>38</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>40</b>
<b>ANEXOS</b>	

# Reconocimiento

Al proyecto “ESTUDIOS GEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS Y GEOTÉCNICOS PARA CARACTERIZAR Y DETERMINAR LA PRESENCIA DE INESTABILIDADES EN EL SUBSUELO EN LOS TALUDES DE LA 2A SECCIÓN DEL BOSQUE DE CHAPULTEPEC” FONDO MIXTO CONACYT-GDF (0121119), por facilitar los datos de este estudio.

# Agradecimientos

A Irene y Petra por su amor, comprensión y apoyo en cualquier momento de mi vida.

A Mario B. y mis hermanos (Mario y Alan) por creer y confiar en mí.

A Ricardo y su familia por alentarme a seguir en este camino.

A la UNAM, mi alma Mater, por mi formación, mi desarrollo profesional y permitirme durante mi estancia, conocer el verdadero valor de la amistad.

A Martin Cárdenas y David Escobedo, por su dedicación y conocimientos brindados desde el Servicio Social hasta la culminación de esta tesis.

A Leonardo Guzmán, Enrique Elizalde y Martin Vidal por darse tiempo para revisar esta tesis y enriquecerla con sus conocimientos.

Gracias a mis compañeros de la facultad y a mis amigos: Alma, Araceli, Consuelo, Daniel, Elizabeth, Guido, Héctor, Horacio, Jacob, Jesús, Joel, José, José P., Juan, Julián, Lizbeth, Mayra, Nelly, Olaf, Orlando porque desde que los conocí han estado conmigo en este trayecto de mi vida. ¡Los amo!

# Resumen

En la 2ª sección del bosque de Chapultepec se encuentran los tanques de almacenamiento pertenecientes al sistema Lerma-Cutzamala. Esta obra comenzó su funcionamiento a partir de 1951, desde entonces son una línea vital para los capitalinos almacenando 50,000  $m^3$  de agua potable. A cercanías de estos tanques, en el 2006 se presentó un colapso afectando la estructura del Lago Mayor.

En este trabajo se explora la estructura del subsuelo bajo y entorno a los tanques con el propósito de contar con parámetros geotécnicos que permitan conocer su estado actual y sirvan como base a estudios posteriores. Para ello se realizaron 5 tendidos de refracción sísmica y 4 arreglos de sísmica pasiva para utilizar los métodos de cocientes espectrales H/V y SPAC a fin de caracterizar la respuesta sísmica de los tanques y el sitio.

Los resultados indican que en los primeros 10 metros las velocidades corresponden a material de relleno. A mayor profundidad se encontró un estrato de arena limosa con espesor indefinido. La correlación entre pares de estaciones permitió estimar velocidad de fase para un arreglo de sismómetros y una línea de sensores. Las líneas de sensores permitieron estimar dos curvas de dispersión de velocidad de fase indicando que en frecuencias bajas las velocidades son de 300 m/s y en frecuencias altas tiende a valores de 500 m/s. Los cocientes espectrales H/V indican consistencia en las estructuras de los tanques y alrededor de éstos, indicando que tanto las estructuras como el subsuelo tendrán reducidos efectos de interacción suelo-estructura ante sollicitaciones sísmicas.

# Abstract

In the second section of Bosque of Chapultepec are storage tanks which belong to Lerma-Cutzamala system. The tanks started to operate in 1951, these are very important for Mexico City citizens, because store and distribute 30 % [SACM] of drinking water. Near to this storage tanks, in 2006 presented subsidence affecting the structure of Lago Mayor.

The present thesis studies approaches prospect the structure down and around of subsoil to acquire geotechnical parameters that permits to know its current state and help in subsequent studies. Made 5 spreads and 4 arrays of passive seismic where performed using H/V and SPAC methods to calculate seismic response of those tanks and subsoil.

This study concludes at 10 meters velocities are landfill. At more depth exist silty sand with indefinite layer. The method SPAC calculated phase velocities for arrays of seismometers and geophones. The geophones calculate two dispersion curves. Spectral ratios H/V show consistency in tanks and structures around them, indicating that both structures have reduced as the effects of subsurface soil-structure interaction to seismic events.



# Capítulo 1

---

## Introducción

---

En este trabajo se caracteriza el subsuelo entorno a los tanques de almacenamiento en la segunda sección del bosque de Chapultepec a través de métodos geofísicos implementados en la prospección sísmica tal como correlación de estaciones y periodo fundamental. En los capítulos siguientes se hablará de cada uno de estos métodos, la adquisición de datos y sus resultados.

Cuando los mexicas se instalaron en la ciudad México-Tenochtitlán en el ex-Lago de Texcoco, construyeron calzadas con la finalidad de estar comunicados con pueblos vecinos; diques, con los cuales controlaban inundaciones; acueductos donde transitaba agua fresca; canales, para que las canoas transportaran los frutos y flores que sembraban en las chinampas, palacios y escuelas e inclusive tenían un mercado muy grande y concurrido (González, L., 2009).

Sus estructuras se construyeron encima de estratos de arcillas, este tipo de subsuelo coadyuvaba a que sus templos se deformaran y con el pretexto de la fiesta del Fuego Nuevo conmemorada cada 52 años, éstas se modificaban (Santoyo-Villa, *et al.*, 2005). A la llegada de los españoles a México-Tenochtitlán quedaron asombrados por la gran ciudad, tras ser conquistada e invadida ésta fue desecada.

Para edificar los inmuebles a mediados de los años 40's se necesitaron materiales para construcción, los cuales se obtuvieron al poniente de la Ciudad de México, abriendo minas para extraer toba cementada. Las delegaciones Magdalena Contreras, Cuajimalpa, Álvaro Obregón y Miguel Hidalgo tienen vestigios de estas galerías (Santoyo-Villa, *et al.*, 2005).

La delegación Álvaro Obregón ha sufrido de colapsos por la presencia de estas minas, las cuales se han manifestado dentro de las casas o afloran en las calles, alterando la

seguridad e integridad física de los colonos. Este suceso se debe en parte al incremento urbano entre 1960 y 1970. Los habitantes se instalaron sobre las zonas minadas y con el transcurso de los años, las cavidades causaron hundimientos en la superficie. Cabe mencionar que en estas delegaciones subsisten espesores con gran variedad de materiales volcánicos para fabricar concreto, asimismo son desconocidas las trayectorias y algunas ubicaciones de los antiguos túneles y oquedades (Lugo, J. *et al.*, 1995).

Sin duda, uno de los riesgos geológicos más frecuentes en la ciudad de México es por subsidencia del suelo, por ejemplo:

- En noviembre de 2007 la aparición de una cavidad de aproximadamente 3 m de diámetro por 6 m de profundidad afectó el fraccionamiento Los Álamos, Lomas Verdes, en el municipio de Naucalpan.
- También ese año, pero en octubre, 3 vehículos cayeron dentro de una grieta en la colonia Ampliación Granada, en la delegación Miguel Hidalgo, este boquete lo ocasionó las lluvias y los trabajos de construcción de un conjunto habitacional.
- En julio de 2009 hubo un socavón aproximadamente de 7 mil metros cuadrados por 30 metros de profundidad en la zona de Santa Fe, Cuajimalpa, llevándose una parte de la prolongación Paseo de la Reforma; y se especula una posible afectación a un tramo de la autopista México-Toluca por este evento.
- En ese mismo año pero en mayo, un boquete con casi 25 metros de profundidad por 12 metros de longitud, en la Avenida del Parque, colonia Nápoles, esto sucedió por la lluvia y la inadecuada manipulación de una máquina retroexcavadora, por lo tanto Protección Civil del Distrito Federal decidió desalojar 14 inmuebles cercanos. ([www.eluniversal.com.mx/notas/602104.html](http://www.eluniversal.com.mx/notas/602104.html), consulta: 24-ene-12).

Un caso muy mencionado fue el 26 de junio del 2006 en la segunda sección del Bosque de Chapultepec, una grieta en las lozas interiores de la parte norte del Lago Mayor provocó el vaciado total de éste, 20 mil metros cúbicos se fugaron por una grieta, cuyas dimensiones fueron de 15 metros de diámetro y 13 metros de profundidad, este boquete incremento su tamaño conforme se filtraba el agua, hasta llegar a la lumbrera 16 (SACM, 2006).

Las autoridades del Bosque, instituciones y empresas como: Proyecto Civil Integral S.A. de C.V., la Secretaría del Medio Ambiente, la empresa Consorcio Iuyet S.A. de C.V., el Instituto Politécnico Nacional, Seismocontrol S.A. de C.V., el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, realizaron estudios alrededor del Lago Mayor con la finalidad de determinar las causas del hundimiento en el interior, mediante estudios de mecánica de suelos y métodos geofísicos.

El dictamen técnico del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) señala que el colapso lo provocaron las filtraciones de agua en el fondo a través de las losas impermeables del lago, conforme el líquido se colaba, éste se comunicó con la mina más próxima y el relleno se fue lixiviando.

Finalmente, al no tener mayor conocimiento de las cavernas bajo toda la segunda sección del Bosque, se sugiere recopilar información de los hundimientos que afloran en la superficie y realizar estudios que determinen la presencia de éstas, para que en un futuro se tome decisiones para el bienestar de la gente que diariamente visita el Bosque de Chapultepec (SACM, 2006).

Ahora bien, en la segunda sección del Bosque de Chapultepec se encuentran diversos centros culturales, recreativos y de convivencia, por citar algunos existen 3 de los 7 más importantes museos de nuestro país, dos lagos artificiales y sus diversas fuentes. Además existe el Cárcamo de Dolores donde se recibe el flujo del Sistema Lerma, el líquido se acumula en cuatro tanques de almacenamiento de 50,000  $m^3$  de agua potable y son una línea vital para la gente que vive en la zona metropolitana de la ciudad de México (GCM, 2011).

Por otra parte, el subsuelo sometido a esfuerzos tienden a sufrir deformaciones ya sea por descenso del nivel freático, minería subterránea y túneles, fugas de agua, extracción de petróleo o gas, consolidación de suelos blandos, entre otras fuentes variadas.

Al paso del tiempo, las estructuras posiblemente presenten agrietamientos a corto o largo plazo, tal fue el caso de los tanques de almacenamiento a un costado de “La Cantera”, ubicados en la esquina de Av. Aztecas y Av. Madrigal delegación Coyoacán, después de su construcción bajo uno de los dos tanques existentes, se manifestó una

fisura debido a que se construyó encima de una cavidad lo cual provocó que se fugara el agua entre el basalto. Al combinar los efectos gravitacionales y antropogénicos se puede presentar un estado de esfuerzos inestables en los materiales existentes bajo y alrededor de los tanques de almacenamiento de la segunda sección del Bosque de Chapultepec.

Puesto que la segunda sección del bosque de Chapultepec se encuentra dentro de las delegaciones con vestigios de cavernas las cuáles se han manifestado en sitios donde la gente diariamente lo visita además la grieta que propició la fuga de agua en junio 2006 en el Lago Mayor, de ahí que se debe caracterizar el subsuelo entorno a los tanques para determinar el estado de los materiales que los rodean, la existencia de cavernas o la presencia de fugas.

El objetivo principal de esta tesis es caracterizar mediante métodos geofísicos la estructura del subsuelo entorno a los tanques de almacenamiento de la segunda sección del Bosque de Chapultepec, como objetivo secundario es realizar una evaluación geotécnica del sitio.

Para cumplir el objetivo de este trabajo se realizaron diversas técnicas de prospección sísmica entorno a los tanques de almacenamiento, entre estos se realizó tendidos de refracción sísmica para obtener el espesores someros además de las propiedades que relacionan la deformación elástica. Así mismo, se exploró la estructura del subsuelo bajo dichos tanques mediante la dispersión de ondas superficiales obtenidas mediante sísmica pasiva, también se evaluó la respuesta de sitio mediante cocientes espectrales H/V para determinar la respuesta del suelo y la estructura de los tanques.

# Capítulo 2

## Antecedentes

El bosque de Chapultepec ha sido el centro recreativo y cultural con mayor importancia desde nuestros antepasados hasta la actualidad, un lugar con una rica historia relacionada con el agua y que por siglos ha distribuido este líquido vital a la ciudad.

En la época del Porfiriato, el secretario de hacienda José Yves Limantour (1854-1935), creó un grupo para rediseñar y ampliar el bosque. En este proceso se sembraron más árboles y prados, se crearon calzadas y colinas artificiales, se colocaron estatuas y lagos artificiales y se construyó el Restaurante Chapultepec donde asistía la gente selecta de esa época (Fernández, A., 1988). Muchas de estas obras perduran hasta nuestros días.

El Bosque de Chapultepec se encuentra al poniente de la ciudad de México en la delegación Miguel Hidalgo, sus coordenadas geográficas extremas están entre  $99^{\circ}10'40''$  y  $99^{\circ}14'15''$  de longitud Oeste y  $19^{\circ}23'40''$  y  $19^{\circ}25'45''$ . El bosque, pulmón de la metrópoli, está dividido en tres secciones ilustradas en la figura 2.1 y que se describen muy brevemente a continuación.

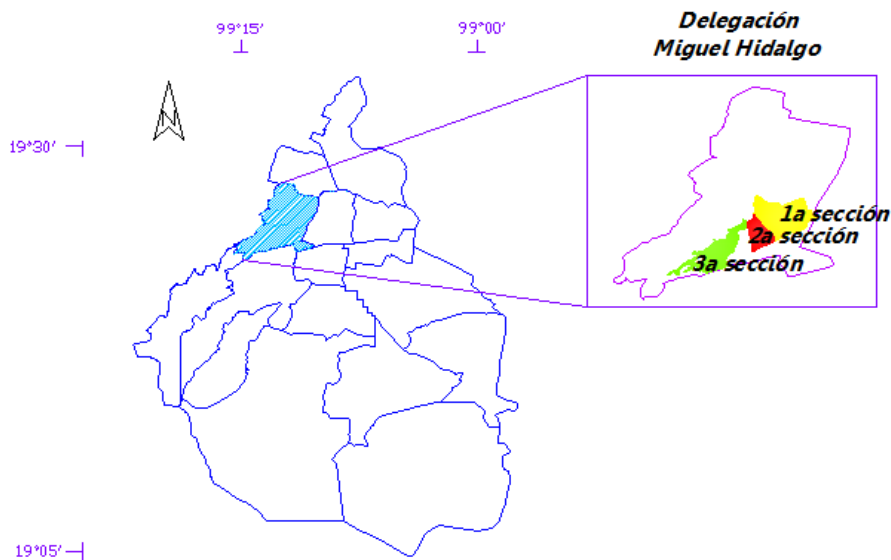


Figura 2.1. Ubicación del bosque de Chapultepec y sus tres secciones.

La primera sección está conformada por el Zoológico “Alfonso L. Herrera”, los Baños de Moctezuma, el Auditorio Nacional, Museo Nacional de Historia (Castillo), Museo de Arte Moderno, Museo Tamayo Arte Contemporáneo, Museo Antropología e Historia, Museo del Caracol, Casa del Lago “Juan José Arreola”, diferentes fuentes como la de Nezahualcóyotl, de las Ranas, un Lago Mayor y Menor y áreas deportivos.

En 1962 se inaugura la segunda sección diseñada por Leónides Guadarrama, en ella existe el Museo Tecnológico de la CFE, el Papalote Museo del Niño, el Museo de Historia Nacional, la pista de atletismo “El Sope”, La Feria de Chapultepec, los restaurantes “El Lago” y “Meridien”, dos lagos artificiales: “Lago Mayor y “Lago Menor”, distintas fuentes como: “Xochipilli”, “Las Ninfas”, “Tláloc”, y el Cárcamo de Dolores siendo éste último de nuestro interés.

La tercera sección, abierta en 1974, está integrada fundamentalmente por áreas verdes, se encuentra el Foro Orquesta de los Animalitos, Fuente de Cri Cri y un espacio para espectáculos culturales denominado “Teatro Alfonso Reyes”.

## **2.1. El bosque de Chapultepec y su relación con el agua**

Durante el reinado de Moctezuma I (1440-1469 d.C.) Chapultepec fue el alojamiento y recreo de los entonces gobernantes pero, Nezahualcóyotl señor de Texcoco, mientras habitó el “cerro del Chapulín”, construyó su palacio en la cima, plantó ahuehuetes, canalizó albercas además llevó a cabo el diseño y construcción del acueducto elevado de piedra, donde se repartía el agua de los manantiales de Chapultepec hacia la gran Tenochtitlán, esta obra hidráulica era de doble vía con la finalidad de dejar un ducto libre mientras el otro se limpiaba (Campos, R. 1988).

Los antiguos manantiales de agua dulce en Chapultepec, mejor conocidos como los baños de Moctezuma, se almacenaban en tres estanques (albercas) conectados entre sí, las cuales controlaban el flujo para que éste se repartiera mediante gravedad a través del acueducto hacia la ciudad de México-Tenochtitlán (Moreno, M. *et al* 2002). Se tiene información de tres albercas que existieron en Chapultepec: de Los Llorones, la de Moctezuma y de Los Nadadores. La alberca mayor la de Llorones fue la que más agua

surtía a la ciudad. Durante cuatro siglos éstas abastecieron a la metrópoli pero con el paso del tiempo disminuyeron sus caudales. Finalmente se derribó gran parte de los casi 4 kilómetros de longitud del acueducto dejando una fracción de éste sobre lo que hoy es la avenida Chapultepec (Pineda, R. 2000), figura 2.2.



*Figura 2.2. Vestigios del acueducto edificado por Nezahualcóyotl sobre lo que hoy es la avenida Chapultepec.*

### **2.1.1. Sistema Lerma-Cutzamala**

Durante la presidencia de Manuel Ávila Camacho se iniciaron las obras del sistema Lerma, una obra de captación de agua de la laguna Lerma que surtía el líquido al Valle de México. La construcción inició en 1943 y concluyó en 1951. Al aumentar la población este sistema se volvió insuficiente, por lo que en 1972 arrancó la construcción de una obra adicional, el Sistema Cutzamala (GDF, 2005).

El sistema Lerma capta las aguas de los manantiales que afloran de la laguna Lerma en el Valle de Toluca, Estado de México a través del acueducto superior del valle de Toluca (24.3 km), el Túnel Atarasquillo y Dos Ríos (14.3 km) atravesando la Sierra de las Cruces dirigiéndose hasta Chapultepec hacia cuatro tanques de regulación y al acueducto

inferior en el Valle de México (21.4 km). Después el agua se eleva por la tubería hasta 2700 msnm antes de llegar a la Sierra de las Cruces donde el fluido se conduce por gravedad hacia los tanques de almacenamiento en el Valle de México.

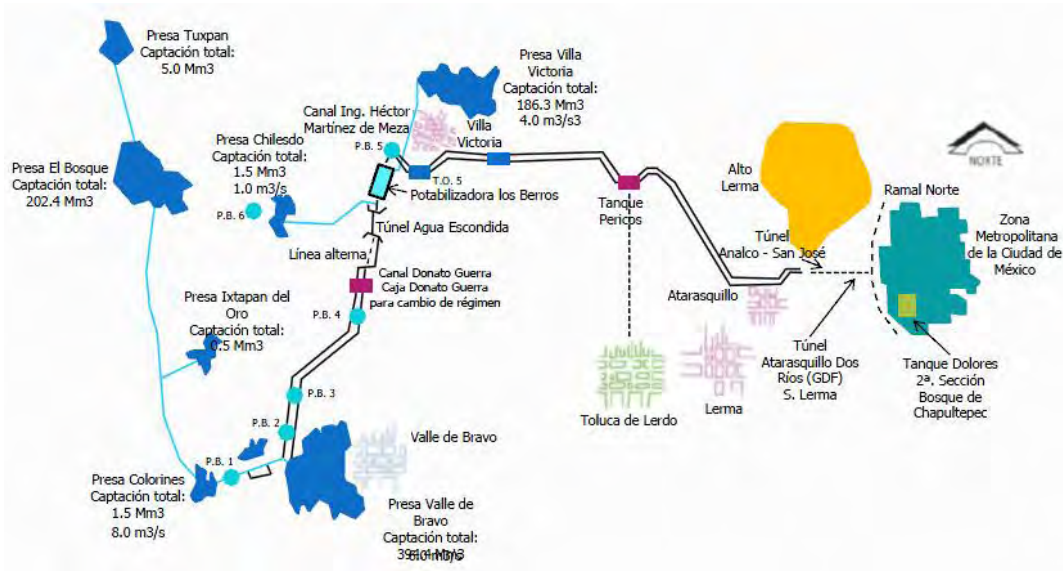


Figura 2.3. Trayecto del sistema Lerma-Cutzamala. Al final del trayecto en cuadrado color verde la ubicación de los tanques de almacenamiento. CONAGUA 2011

El ramal norte del sistema Lerma envía el líquido a la cámara alta (figura 2.4) ubicado en la segunda sección del Bosque de Chapultepec, de ahí el fluido se distribuye en cuatro tanques donde se almacena éste, de aquí el agua desciende hacia la cámara baja hacia la condesa. Dentro de esta última cámara se cuenta con un vertedor de excedencias tipo embudo.

Los tanques de almacenamiento del Cárcamo de Dolores se ubican: al norte con el Lago Mayor, al este con la Feria, el Museo Tecnológico de la CFE y el Museo “El Papalote”, al oeste con el Lago Menor y al sur con la avenida Constituyentes como se muestra en la figura 2.4.

Estos tanques tienen capacidad de  $50\,000\ m^3$ , dimensiones de  $100\ m$  de diámetro y  $10\ m$  de profundidad. El techo de cada uno de los tanques es de tipo cónico, usualmente ésta cubierta se usa para tanques de gran diámetro, el cual se observa a simple vista puesto



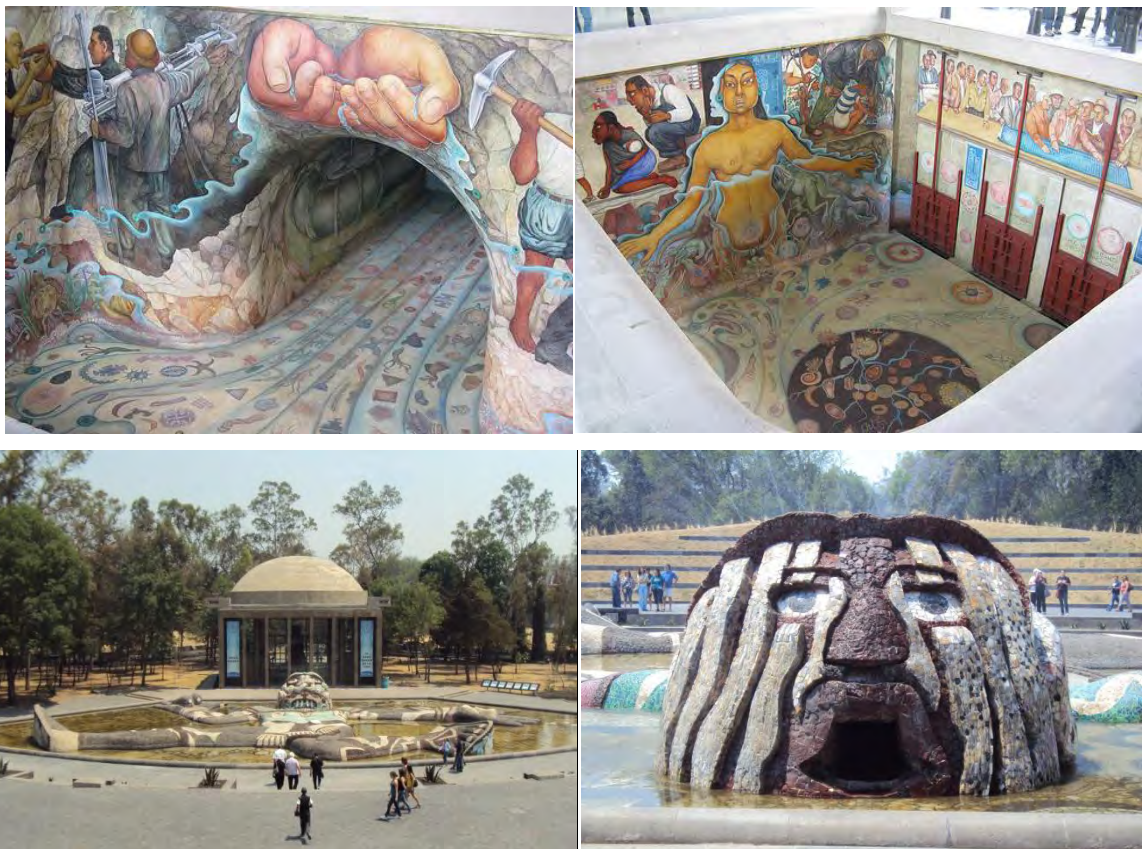
que el tanque esta semienterrado, son soportados por una estructura compuesta de columnas y traveses para formar polígonos además cuentan con una entrada en el techo para realizar limpieza o revisiones al interior del tanque. También cada tanque tiene su chimenea de ventilación en la parte superior y al centro con la finalidad de que al interior no se genere presión interna al ser vaciado o llenado.

En los siguientes capítulos e imágenes se utiliza la numeración de los tanques de acuerdo a los planos de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) en 1987 con número de archivo AP-T-11-4 realizados por el Ing. Mario Solano González según contrato 7-33-1-0118, tal como se enumeran en la figura 2.4.



Figura 2.4. Ubicación de los cuatro tanques de almacenamiento en la segunda sección del bosque de Chapultepec, la numeración de éstos va de norte a sur según los planos de DGCOH.

Es importante mencionar que en la cámara alta denominada “El Cárcamo” existe una obra de Diego Rivera donde, en algún tiempo, su cámara almacenó agua. Aún se pueden apreciar cuatro puertas en el interior las cuales se conectaban con cada uno de los tanques. En 1951 el arquitecto Ricardo Rivas invitó al pintor para realizar estas obras emblemáticas “El agua: origen de la vida” y la fuente de Tláloc, se pueden observar en la figura 2.5, con el paso del tiempo el agua fue deteriorando dicho mural provocando la clausura del paso del líquido a través de la cámara y como alternativa construyeron túneles alrededor de éste para desviar el agua. Esta pintura se abandonó por dieciocho años hasta el 2010 fue restaurada y actualmente es un museo (Cruz, A. 2011).



*Figura 2. 5. Las obras de Diego Rivera “El origen de la vida” (fotos superiores) y la “Fuente de Tláloc” (fotos inferiores), ambas obras se ubican a un costado del cárcamo de Dolores en la segunda sección del Bosque de Chapultepec.*

## 2.2. Geología de la zona de estudio

Para la comprensión de la geología en la Zona Poniente del Distrito Federal; es importante hacer mención de los eventos volcánicos que se suscitaron en el cerro San Miguel. En el año de 1996 Mooser et al, resaltaban las largas fallas curvas que surcan a las lomas del Poniente de la Ciudad, estas fallas corresponden a un gran arreglo de origen común, lo cual se comprobó cuando se estableció que las fallas curvas del sureste del cráter del cerro de San Miguel (cerro La Palma) son la continuación de las primeras y que juntas representan colapsos.

Así se logró comprender que este escudo volcán complejo a través de su vida ha ido creciendo y a la vez colapsando, erupción tras erupción, emitiendo los flujos piroclásticos de toba Cuquita (aproximadamente 600,000 años de antigüedad), Xolopo (430,000 años de antigüedad) y Arenas Azules (270,000 años de antigüedad).

En la figura 2.6 se muestran las trazas de estas elipses vulcanotectónicas; cuyo máximo producto volcánico es el Ajusco. La estructura circular mayor la forma el colapso Ajusco-Salazar-Río Hondo que cruza el Valle del Tezontle. La estructura circular intermedia la forma del Ajusco-Cuajimalpa-Tacubaya; es de expresión morfológica extraordinaria y acusa hundimientos de unos 20 metros al sur de la carretera México-Toluca aproximadamente por el kilómetro 16. A medida que se acerca uno al centro de los colapsos resultan elipses menores. Una de ellas es por la que pasa por la barranca de Hueyatla y otra, de menor tamaño, la que se encuentra en el Valle de Monte Alegre, pasa por el borde este del cráter de la Palma y se prolonga a través de varios círculos a la Barranca de la Magdalena Contreras. Una variante del trazo puede haber continuado al cerro del Judío, este último un domo que podría ligarse a colapsos tempranos del sistema de hundimientos.

Desde una vista regional se puede observar que la barranca de Magdalena Contreras parece formar hoy el núcleo de todos los colapsos, junto con el Valle de Monte Alegre que es su continuación en el sur. Con relación a estos colapsos interesa notar su relativa juventud; son todos posteriores a los desplazamientos del arco Chichinautzin, cuyas fallas, las de Santa Catarina y Padierna, cortan solamente al elemento más antiguo del



Cerro San Miguel situado al sur de la Magdalena Contreras (tomado de la Facultad de Ingeniería, 2011).

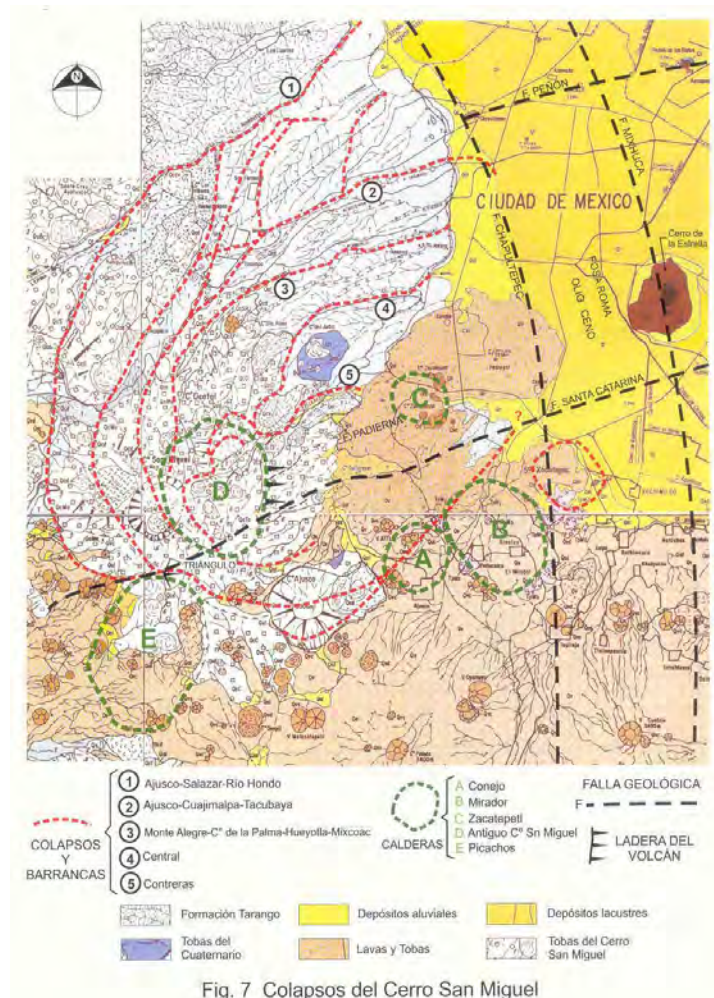


Fig. 7 Colapsos del Cerro San Miguel

Figura 2.6. Colapsos del Cerro San Miguel al Poniente del Distrito Federal

### 2.3. Zonas minadas

Como ya se había mencionado en el capítulo 1, las tobas contribuyeron a levantar muros desde la época colonial, debido a que se encontraban en bloques ligeros y por su baja densidad. Para encontrar éstas, se abrían galerías siguiendo los estratos de manera inconsistente y desordenada dando origen a laberintos ocultos con diferentes niveles. Existen algunas galerías con pilares que resisten los techos, pero otras cuentan con techos planos porque la toba es resistente.

De estos techos se desprenden partículas las cuales se van acumulando en la parte inferior de la cavidad, este proceso es paulatino hasta que, de cierta forma, la cavidad sube y cuando se encuentra cerca de la superficie puede provocar un colapso, a este desarrollo se le denomina granear (Santoyo-Villa, *et al.*, 2005). Este tipo de obras mineras aún existen en el subsuelo de la 2ª sección del bosque de Chapultepec, de ahí su interés por parte de GDF en encomendar a la Facultad de Ingeniería de la UNAM estudios geológicos y geofísicos del subsuelo en esta sección.

# Capítulo 3

---

## Estructura de velocidades a partir de métodos sísmicos

---

A fin de caracterizar la estructura del subsuelo en los alrededores de los tanques de almacenamiento ubicados en la segunda sección del bosque de Chapultepec, se describe la aplicación de dos experimentos con sísmica activa y sísmica pasiva, con los cuales se analizaron tanto las ondas precursoras como las ondas superficiales.

### 3.1. Sísmica activa: Perfiles de velocidades

La técnica implementada contribuye a la caracterización de la estructura somera con la ayuda de perfiles de onda compresional y ondas superficiales mediante el método convencional de refracción sísmica, ver Anexo1, se profundizó cerca de 10 metros.

#### 3.1.1. Instrumentación

En la recopilación de datos del primer experimento se utilizó el sismógrafo Geometrics modelo Strataview propiedad de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, consta de 24 canales a los cuales se les conectaron geófonos verticales de 4.5 Hz, el equipo sísmico utilizado para este proyecto se observa en la figura 3.1. La fuente de energía sísmica fue por percusión utilizando una placa metálica y un marro de 10 libras.



*Figura 3.1. Equipo sísmico implementado para la sísmica de refracción, vista del modelo Strataview.*

### **3.1.2. Geometría y adquisición de datos**

El levantamiento de sísmica de activa se llevo a cabo junto a los tanques 3 y 4 en la segunda sección del Bosque de Chapultepec, como se observa en la figura 3.2, se realizaron 5 tendidos de 36 *m* cada uno y de forma continua siendo la línea completa de 172.5 *m*, con una distancia igual a 1.5 *m* entre geófonos y offset de 1 *m*.

La señal sísmica se muestreo a intervalos de 0.125 *ms*, con un total de 8192 muestras (1024 *ms*). Se aplicaron 5 golpes a lo largo de cada tendido conforme a la geometría que se observa en la figura 3.2. Al finalizar el primer tendido se utilizó el último geófono como primer geófono de la segunda línea y así sucesivamente.

La línea del tendido corta dos caminos peatonales, por lo que los geófonos se abrieron a 3 *m* en el tendido 1 entre los geófonos 22 y 23, en el tendido 2 entre los geófonos 17 y 18 por último en el tendido 4 entre los geófonos 11 y 12. En el anexo 2 se observan las coordenadas UTM inicial y final de cada tendido.

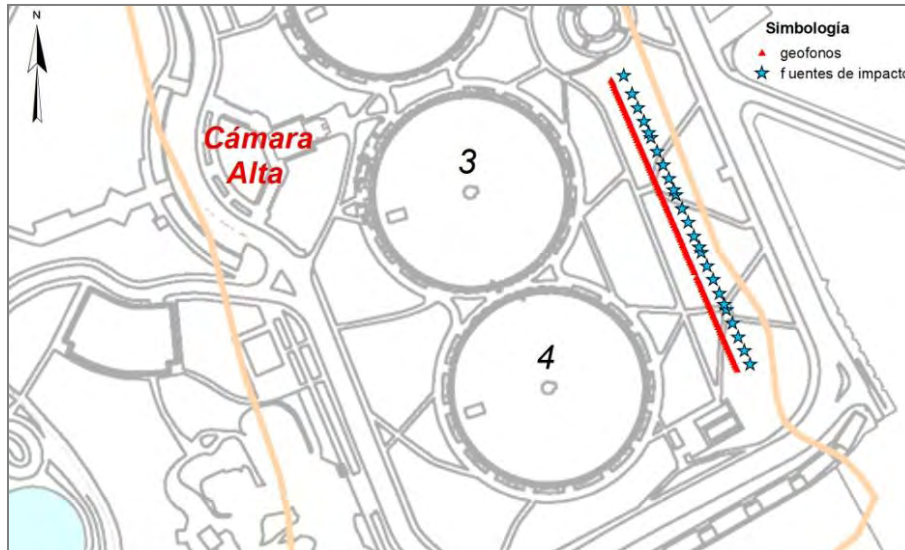


Figura 3.2. Ubicación y geometría del tendido sísmico a lo largo de los tanques de almacenamiento. La línea de color rojo indica la colocación de los geófonos y con estrella azul la ubicación de cada uno de los golpes.

### 3.1.3 Procesamiento y perfiles

Los datos obtenidos se procesaron mediante el software comercial Geogiga Seismic Pro 6.0® ([www.geogiga.com](http://www.geogiga.com)) propiedad de la Facultad de Ingeniería, este software contiene un paquete de módulos para procesar diversos datos sísmicos. Para el procesamiento de los datos de sismica activa se utilizaron dos módulos: *DWTomo* y *SurfacePlus* para obtener perfiles de velocidad de onda compresional y ondas superficiales respectivamente.

#### 3.1.3.1. Perfil de onda compresional

Para obtener el perfil de la onda compresional, se propuso un modelo inicial del subsuelo al cual se le aplica un algoritmo de inversión lineal generalizada con la finalidad de reducir la diferencia entre los tiempos observados para los primeros arribos y los calculados a partir del modelo (Hampson *et al* 2008).



Las dromocrónicas correspondientes a los valores de tiempo experimental y estimados junto a los tanques de almacenamiento se observan en la figura 3.4.a. Se analizó en una sola línea todos los tendidos de refracción sísmica por ello se pueden apreciar los 25 golpes realizados a lo largo del tendido. Se muestran las curvas de tiempo de viaje solo para arribos visibles.

El perfil de velocidades  $V_p$  se observa en la figura 3.4.b (11 iteraciones con 1.68 % de error). Se observa una estructura del subsuelo hasta los 10 *m* de profundidad. La primera capa se trata de materiales de relleno con velocidades que fluctúan entre los 300 y 400 *m/s* con un espesor de entre 3 y 4 *m*. La segunda capa tiene velocidades entre 1200 y 1500 *m/s* con un espesor indefinido asociado a la arena limosa.

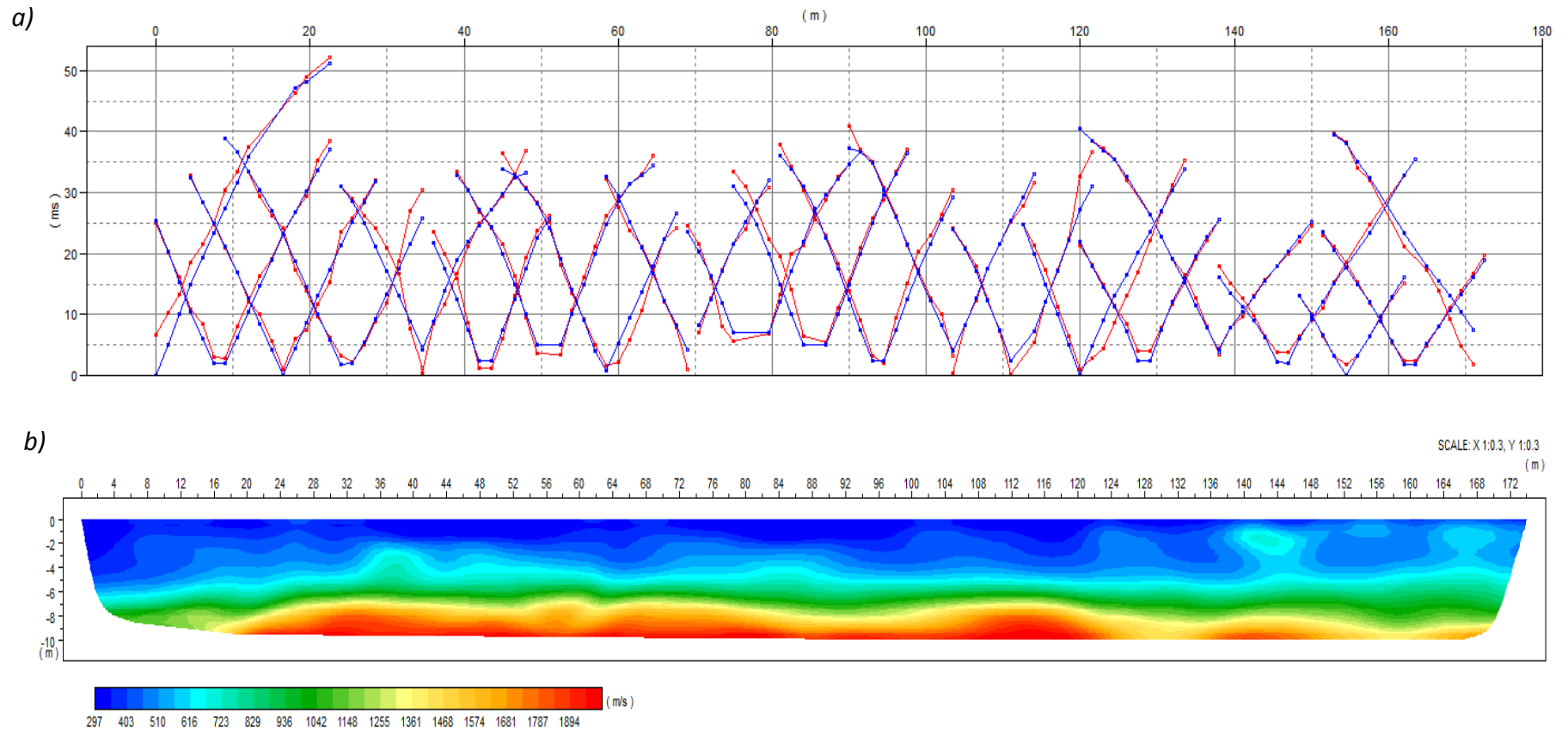


Figura 3.3. a) Curvas tiempo-distancia, de color azul las curvas picadas manualmente y de color rojo el mejor ajuste que da el programa. b) Modelo de velocidad de ondas compresionales correspondiente al estudio de refracción junto a los tanques de almacenamiento en la segunda sección de Chapultepec. la escala de colores indica los valores de  $V_p$  en (m/s).

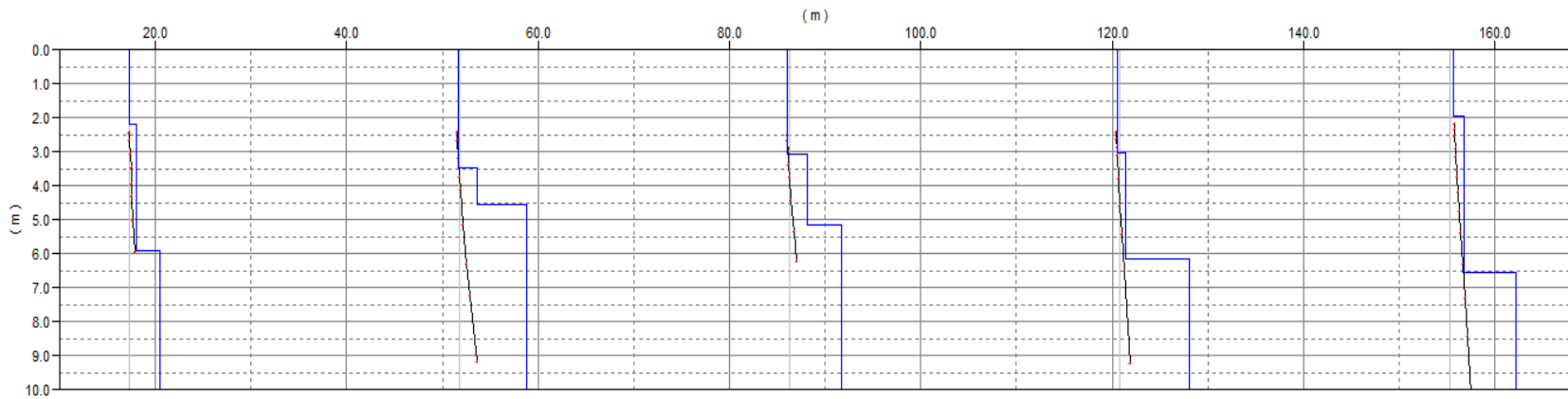
### 3.1.3.2. Perfil de ondas superficiales

Para obtener el perfil de velocidades de corte  $V_s$ , se utilizó el software comercial Geogiga Seismic Pro 6.0®, en el módulo *SurfacePlus* utilizando los registros anteriores analizando los trenes de ondas superficiales para obtener las curvas de dispersión manualmente mediante análisis espectral de ondas superficiales (SASW) (Heisey *et al*, 1982), para la inversión de estas curvas se utilizó Algoritmos Genéticos (Goldberg, 1989).

La imagen 3.5 muestra en a) las curvas de dispersión generadas por la velocidad de fase y en b) el correspondiente modelo de velocidad de las ondas de corte donde se observa después de 10 iteraciones con error de 1 %, una capa somera de un grosor de aproximadamente 5 m con velocidad de 178 m/s, seguida de una capa con velocidad mayor a 240 m/s de la cual se desconoce su espesor.

De acuerdo a la estratigrafía general y a los perfiles de velocidades registrados en el pozo no. 14 denominado Chapultepec, el cual es parte de la red de monitorio sísmico del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), indica que en el perfil de velocidades de onda S se encuentra arena a partir de los 5 m hasta 12 m de profundidad con una velocidad de 200 m/s lo cual concuerda con el valor obtenido después de 5 m el perfil obtenido en 3.5. El primer estrato está asociado a materiales de relleno puesto que la velocidad es del orden de 178 m/s.

a)



b)

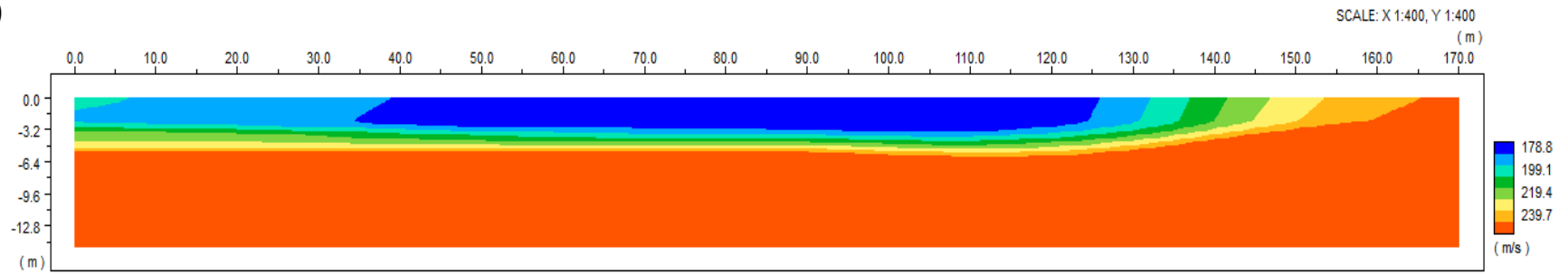


Figura 3.4. a) Curvas de dispersión de color rojo y su mejor ajuste en color azul. b) Modelo de ondas de corte junto a los tanques de almacenamiento en la segunda sección de Chapultepec. La escala de colores indica los valores de  $V_s$  en (m/s)

## 3.2. Sísmica pasiva: Método de Autocorrelación espacial

A fin de obtener una estructura de velocidad a mayor profundidad, se utilizó la correlación en el dominio de la frecuencia con el método SPAC, Spatial Autocorrelation Method (Aki, 1957) mediante el procedimiento de la correlación entre pares de estaciones propuesta por Chávez-García *et al* (2005), ver Anexo 3.

En este segundo experimento se realizaron dos arreglos instrumentales, en el primer arreglo se emplearon sismómetros triaxiales de banda ancha y en el segundo se utilizaron los dos sismógrafos modelo Strataview y Seistronix, los equipos pertenecen a la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En ambos casos se registró ruido ambiental y, en el mejor de los casos, se obtuvieron curvas de dispersión.

El procesamiento de datos que se utilizó para cada arreglo instrumental de ésta sección con el método SPAC fue el siguiente:

1. Registro de ruido ambiental en cierto tiempo
2. Correlación del ruido entre pares de estaciones para ventanas de 20 segundos
3. Conformación de los coeficientes de correlación
4. Ajuste de la función de Bessel de orden cero
5. Obtención de la curva de dispersión

### 3.2.1. Arreglo de cuatro estaciones

Este fue el primer arreglo distribuido a cercanías de los tanques de almacenamiento colocando cuatro estaciones, ver la figura 3.5.

#### 3.2.1.1 Instrumentación

Para el registro de vibración ambiental se utilizaron 4 sismómetros de banda ancha Guralp Systems modelo 6TD propiedad de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, los equipos se conectaron a las antenas de GPS para tener el tiempo absoluto del registro, con un muestreo de 200 Hz durante 5 horas.

### 3.2.1.2 Geometría y adquisición de datos

Esta técnica se aplicó para los registros de ruido ambiental distribuidos a mayor distancia donde el cruce de las ondas pasa por los tanques de almacenamiento, como se observa en la figura 3.6. La distancia entre estaciones fue; AB es de 475 m, BI de 470 m, BG de 300 m y GI de 435 m. En el anexo 4 se observa las coordenadas UTM para estas cuatro estaciones.

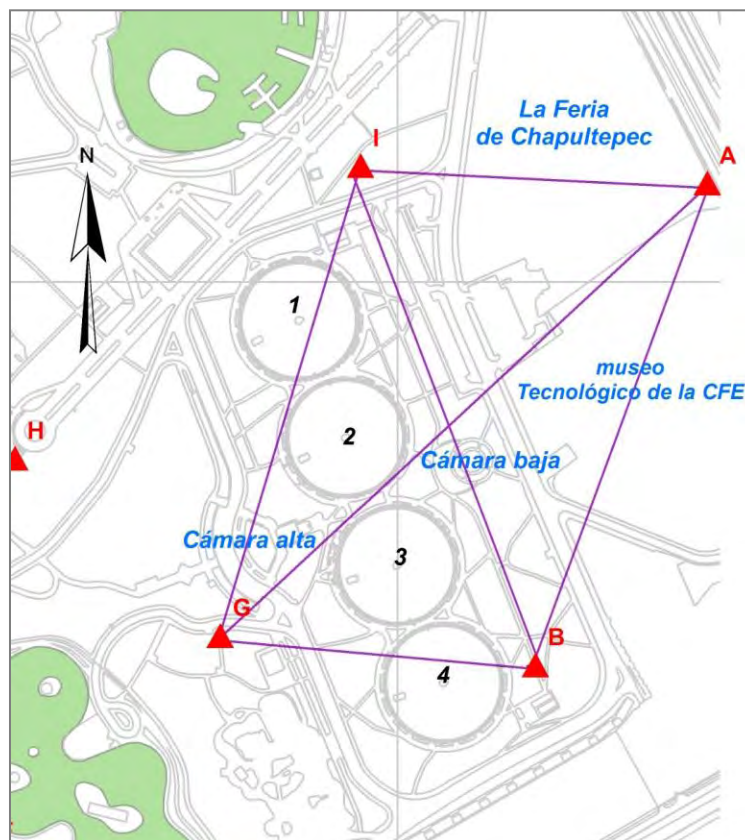


Figura 3.5. Distribución de las cuatro estaciones que pertenecen a un arreglo grande. Los triángulos de color rojo indican la posición de los equipos y las líneas negras el trayecto de los rayos.

### 3.2.1.3. Procesamiento y resultado

Aplicando el método SPAC (Aki, 1957) fue posible estimar las curvas de dispersión para estas cuatro estaciones mediante el módulo *Surface Plus* del software GEOGIGA. Sin

embargo, estas curvas presentan una inversión de velocidades por lo cual no fue posible tener un resultado aceptable.

### **3.2.2. Arreglo de geófonos**

Este fue el segundo arreglo distribuido a los alrededores de los tanques de almacenamiento colocando geófonos para el registro, ver figura 3.6.

#### **3.2.2.1 Instrumentación**

En la recopilación de datos del segundo arreglo se utilizaron dos sismógrafos; Geometrics modelo Strataview y Seistronix EX-6, ambos propiedad de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El primero consta de 24 canales y el segundo de 72 canales a los cuales se les conectaron geófonos verticales de 4.5 Hz.

#### **3.2.2.2 Geometría y adquisición de datos**

El arreglo de sísmica pasiva fue rodeando los tanques de almacenamiento utilizando los dos sismógrafos. Se realizaron dos experimentos, el primero consistió en colocar los geófonos alrededor de los tanques 3 y 4 empezando de lado este hacia el oeste colocando primero el sismógrafo de 72 canales seguido del otro equipo de 24 canales, se conectaron de tal forma que cuando se da el golpe los dos se activen y registren al mismo tiempo.

El otro experimento se llevo a cabo con la misma secuencia de equipos pero ahora en los tanques 1 y 2 colocando los geófonos de norte a sur, para visualizar mejor esta geometría se cuenta con la figura 3.6. En el anexo 5 se observan las coordenadas del inicio y final de cada uno de los arreglos para el experimento de sísmica pasiva. Ambos experimentos se registraron durante 10 segundos.

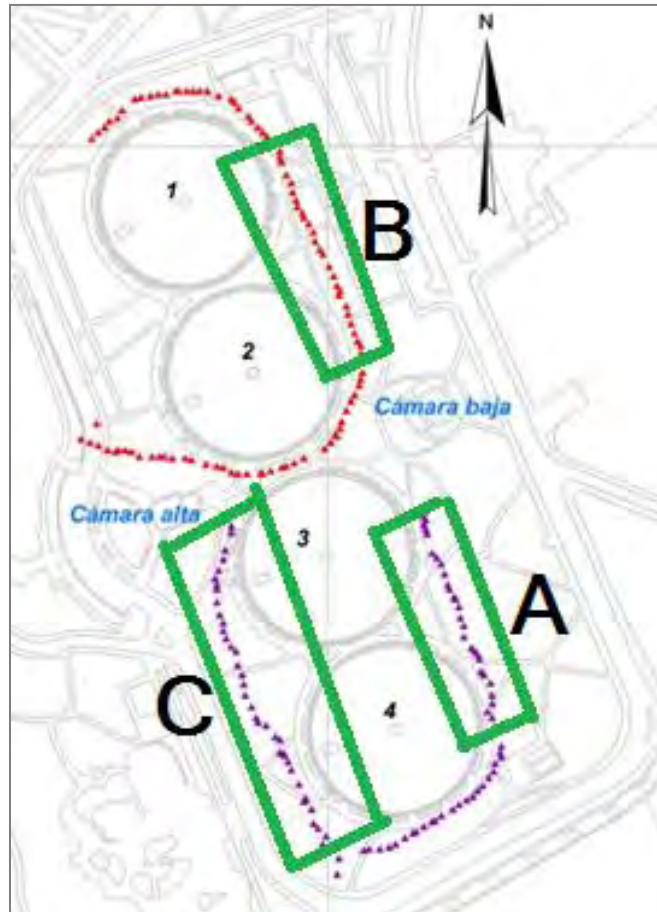


Figura 3.6. Ubicación y geometría de los dos experimentos realizados alrededor de los tanques, de color morado el primer experimento y de color rojo el segundo experimento, en ambos casos los triángulos indican la posición de los 96 geófonos. Los rectángulos verdes indican la separación de los geófonos para obtener la curva de dispersión, para cada curvas se analizaron en A 30 datos, en B 32 registros y en C 45 datos.

### 3.2.2.3 Procesamiento y resultado

El procesamiento de datos se utilizó nuevamente el módulo *Surface Plus* del software GEOGIGA.

Las curvas de dispersión para estas tres separaciones se observa en las imágenes siguientes de la figura 3.8, para el recuadro marcado con A la curva correspondientes es en 3.8.a, para el rectángulo indicado por la letra B su curva correspondiente es en 3.8.b y 3.8.c corresponde a C.



En la figura 3.8.a se observa claramente el contenido de energía lo cual permitió picar la curva de dispersión con facilidad, a partir de 4.5 *Hz* el valor de la velocidad es aproximadamente de 570 *m/s* cercano al valor que reporta Yamashita Architecs & Engineers Inc. Oyo Corporation (1996) de 600 *m/s* para arenas compactas.

Respecto a las altas frecuencias, a partir de 7.5 *Hz* hasta 9 *Hz*, se mantiene la velocidad constante alrededor de 280 *m/s*, lo cual concuerda con la velocidad de onda de corte obtenida para capas someras obtenidas por refracción.

En 3.8.b se observa similitud con los resultados vistos en 3.8.a. La curva de dispersión a partir de 6 *Hz* con velocidades de 500 *m/s* y desde 8 hasta 11 *Hz* la velocidad de fase se presenta a 300 *m/s*, de igual manera los valores concuerdan con resultados en refracción para *V<sub>s</sub>*.

El otro paquete de sensores correspondientes a 3.8.c no fue posible estimar una curva de dispersión.

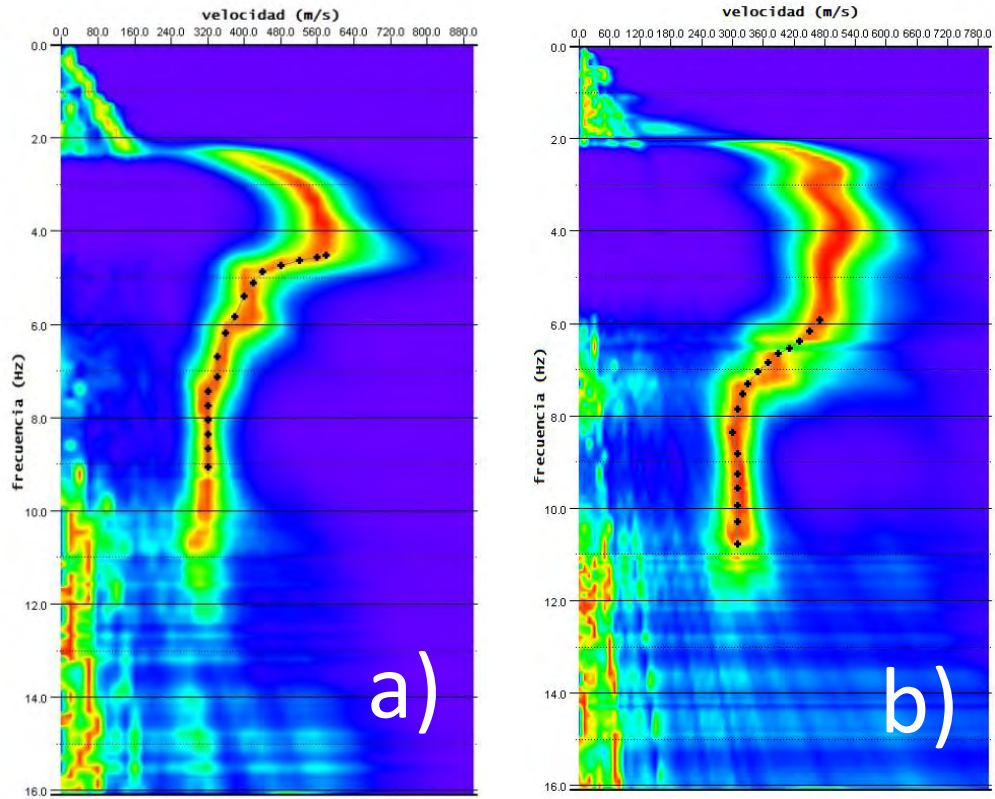


Figura 3.7. Curvas de dispersión de velocidad de fase correspondientes al experimento realizado alrededor de los tanques de almacenamiento. Los puntos negros indican la curva de dispersión picada manualmente.

# Capítulo 4

---

## Respuesta sísmica del sitio

---

En este capítulo se analizó registros de vibración ambiental mediante el método de cocientes espectrales H/V las estaciones se distribuyeron en dos arreglos instrumentales, esto con la finalidad de conocer la respuesta de sitio; frecuencia característica y amplificación relativa entorno a los tanques de almacenamiento en la segunda sección del bosque de Chapultepec.

De acuerdo a la zonificación geotectónica por Santoyo-Villa, *et al* (2005) el bosque de Chapultepec se encuentra dentro de la zona de Lomas o zona firme, en este sitio predominan lahares y tobas andesíticas de la edad del Pleistoceno (Servicio Geológico Mexicano, 1997. Segunda Edición. Carta Geológico-Minera Ciudad de México E14-2. Escala 1:250,000), como resultado del monitoreo de vibración ambiental en la segunda sección del bosque Cárdenas, *et al* (2011) encontró frecuencias en 1.5 y 3 Hz para este sitio.

Ahora bien, como se había mencionado en el capítulo 1, los tanques de almacenamiento son parte del sistema Lerma el cual comenzó el traslado del agua desde 1951. Actualmente se desconoce el estado estructural de los mismos, tomando en cuenta, su edad y los temblores ocurridos en la Ciudad de México es posible que haya un grado de afectación, ya sea por daños originados por desplazamientos diferenciales, o por efectos de interacción fluido-estructura (oleaje) ([www.inglesa.com.mx/](http://www.inglesa.com.mx/)).

Por ejemplo, en 1983 el sismo de Colinga, Argentina ocasionó daños severos en las paredes y la base de los tanques que almacenaban aceite (Manos *et al*, 1985). Los daños por actividad sísmica se manifiestan principalmente en la base y en el fondo del tanque, lo cual se puede presentar como una deformación homogénea hacia abajo del nivel central en el fondo y en las paredes, daños en la cubierta y columnas internas además de dañar las tuberías cercanas a la cimentación.

A continuación se procederá a describir la instrumentación, adquisición de datos los arreglos instrumentales, el procesamiento de los datos y el análisis de resultados para la determinación de frecuencia característica y amplificación relativa asociada a la estructura de los cuatro tanques de almacenamiento en la segunda sección del bosque.

#### 4.1. Instrumentación

Para el registro de vibración ambiental se utilizaron 4 sismómetros de banda ancha Guralp Systems modelo 6TD propiedad de la Facultad de Ingeniería de la UNAM (ver figura 4.1). En algunos arreglos se conectaron las antenas de GPS para tener el tiempo absoluto del registro, con un muestreo de 200 Hz, ventanas de tiempo de 1 hora y en otros equipos con registro de 20 a 40 minutos.

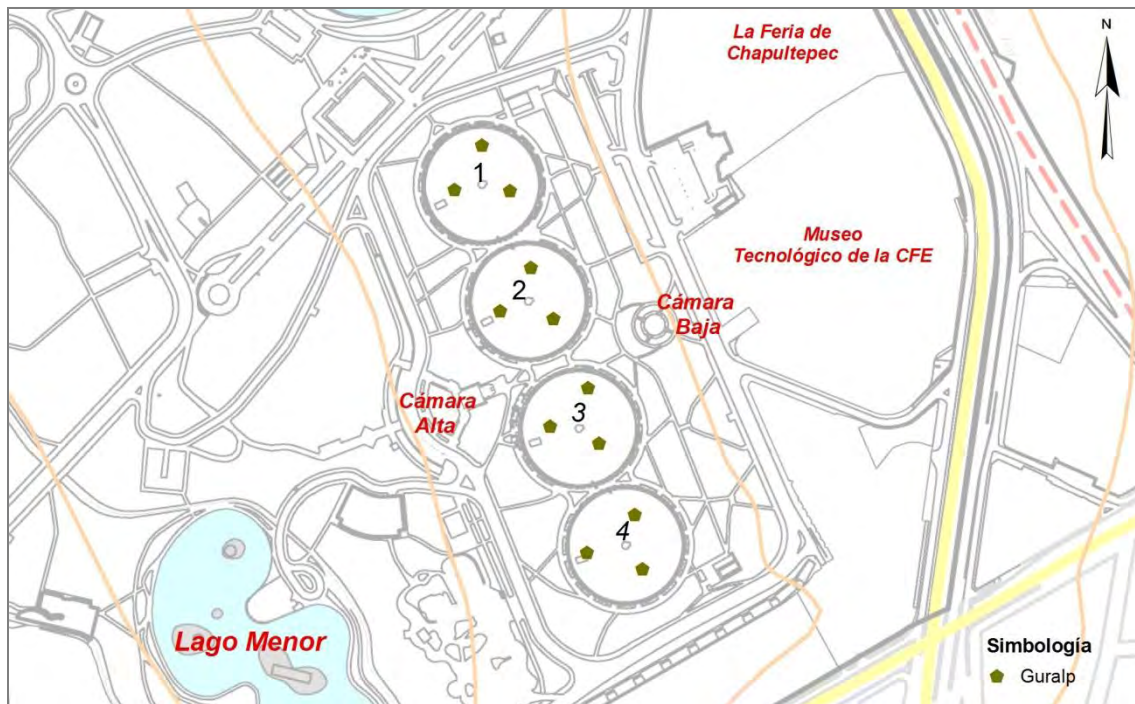
Dentro de las campañas de adquisición se ocuparon acelerómetros K2 Kinematics propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM, esto con la finalidad de reunir más puntos de registro en toda la segunda sección. El acelerómetro se conectó a sismómetros analógicos Guralp 40T, el primero registra la aceleración del suelo en tres canales internos y el segundo registra la velocidad del suelo en tres canales externos con un muestreo de 200 Hz.



*Figura 4.1. Equipo implementado para registro de vibración ambiental.*

## 4.2. Geometría y adquisición de datos

El primer arreglo instrumental consistió en colocar sobre cada uno de los tanques los sismómetros en tres puntos con una distancia igual entre sí alrededor de las chimeneas de ventilación, como se observa en la figura 4.2. Para tener controlado el tiempo y aprovechar el día, se coordinó para que los tres equipos grabaran de manera simultánea colocando los equipos primero en el tanque 4 y así sucesivamente hasta el tanque 1.

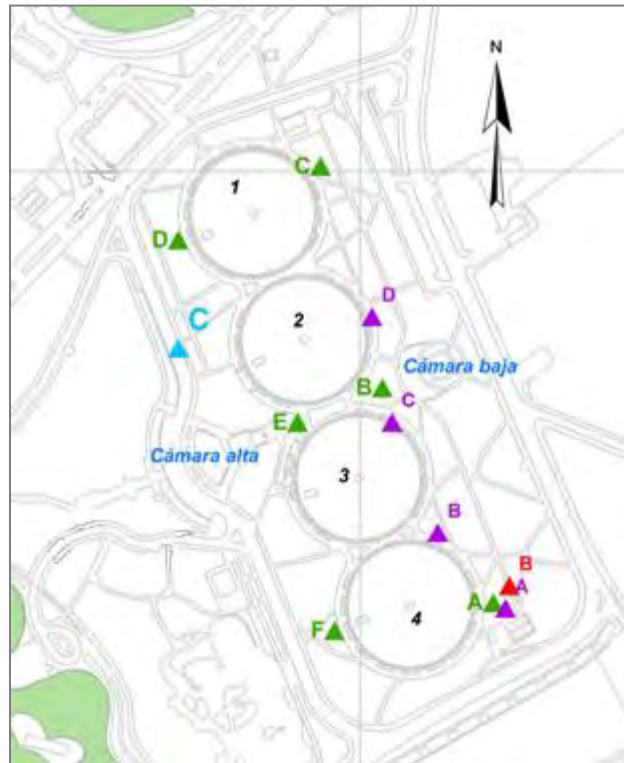


*Figura 4.2. Distribución del equipo para registrar vibración ambiental, los pentágonos representan la posición de las estaciones sobre los tanques de almacenamiento en la segunda sección del Bosque de Chapultepec.*

El segundo experimento se realizó alrededor de los tanques, estos datos fueron adquiridos en diferentes campañas de registro y en diferentes arreglos, sus coordenadas están en el anexo 8. En la figura 4.3 se pueden observar estas estaciones, para las cuales se utilizaron diferentes ventanas de tiempo de registro:

- En los triángulos de color verde (A, B, C, D, E, F), se registró 20 minutos utilizando el mismo sismómetro en cada punto.

- b) En el triángulo de color azul (C), ventanas de tiempo de registro de 5 horas con un acelerógrafo.
- c) En los triángulos de color morado (A, B, C, D), se registró 1 hora colocando 4 sismómetros simultáneamente.
- d) En el triángulo de color rojo (B), ventana de tiempo de registro de 5 horas con un acelerógrafo.



*Figura 4.3. Distribución del equipo para registrar vibración ambiental, los triángulos representan la posición de las estaciones, todos los datos fueron registrados alrededor de los tanques de almacenamiento en la segunda sección del Bosque de Chapultepec.*

### 4.3. Procesamiento de datos

En el procesamiento de los registros de tiempo de cada estación se utilizó el software libre llamado GEOPSY (Wathelet et al., 2008), mediante la técnica de cocientes espectrales H/V, ver Anexo 6. Se calcularon los espectros de amplitud de Fourier para ventanas de 20 s de duración no traslapadas.

Posteriormente este programa calcula los cocientes espectrales de las componentes horizontales entre las componentes verticales en cada punto registrado, finalmente se grafica la amplitud contra la frecuencia, tal como se observan en las gráficas de las figuras 4.4 y 4.5.

## **4.4. Resultados**

A continuación se muestran los resultados de los dos experimentos.

### **4.4.1. Respuesta sísmica de los tanques**

En la figura 4.4 se muestran la distribución de los equipos tal como se observó en la figura 4.2, además se grafican los cocientes espectrales H/V promedio correspondientes a cada tanque y de cada equipo.

En la respuesta del tanque 1 (figura 4.4.a) se observan dos picos en 8 Hz y 12 Hz con una amplificación de 0.5 en los tres equipos, sólo en la curva promedio correspondiente al equipo 6952 se observa que el pico en 12 Hz amplifica hasta 2.5. En el tanque de almacenamiento 2 (figura 4.4.b) se tiene un pico en 8 Hz y otro en 12 Hz con una amplificación de 0.5, después 12 Hz la curva promedio correspondiente al equipo 6952 se amplifica hasta 2. En el tanque 3 (figura 4.4.c) las curvas promedio amplifican 0.5 en 8 Hz después de 10 Hz las curvas amplifican pero la curva correspondiente al equipo 6952 decae. En las curvas promedio de la figura 4.4.d correspondiente al tanque 4 se contempla un pico en 8 Hz con amplificación mayor a 0.5 las curvas ascienden en 12 Hz y de ahí se presentan variaciones en las tres curvas.



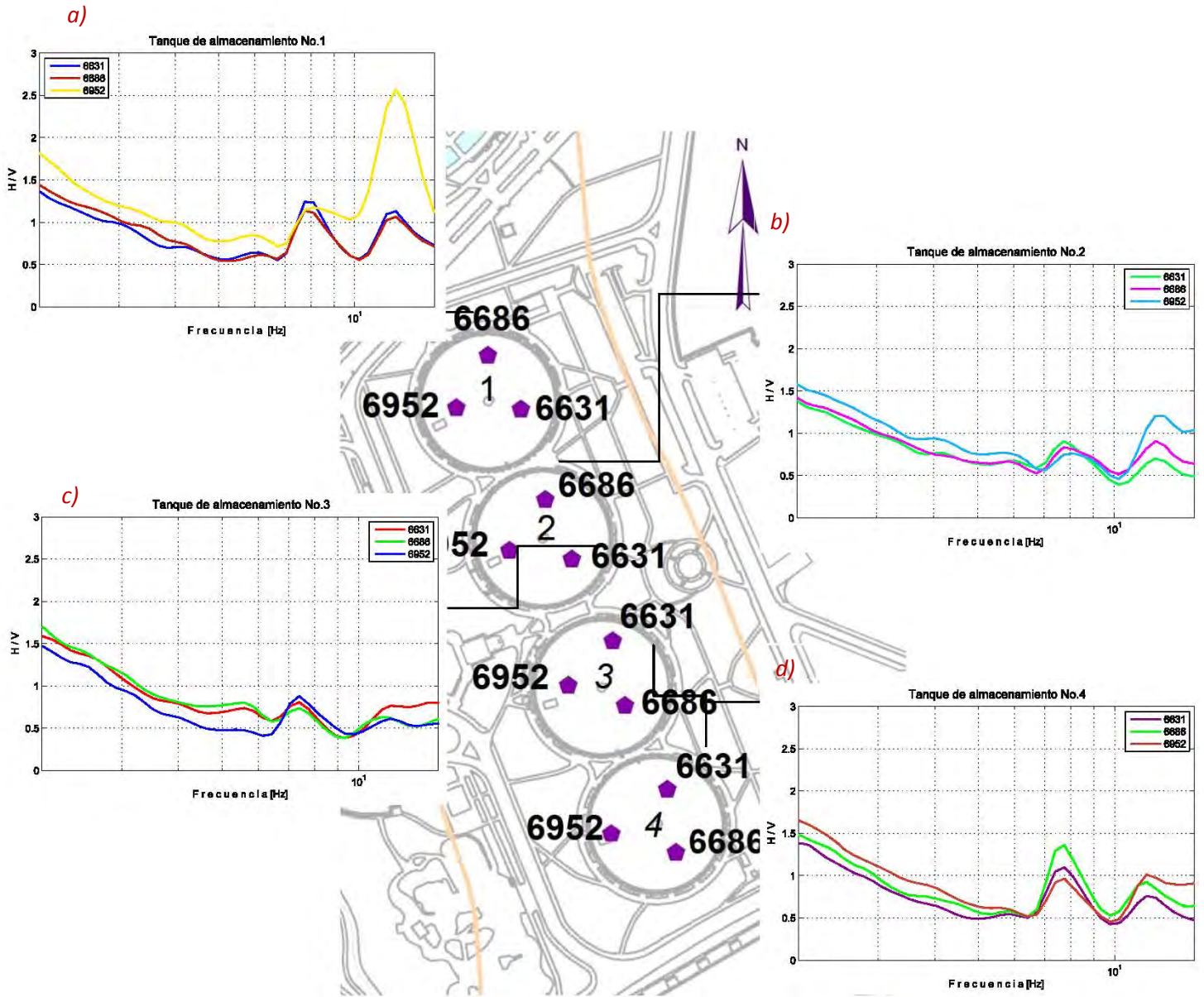


Figura 4.4. Cocientes espectrales  $H/V$  de cada estación distribuidos en los cuatro tanques. En cada gráfica se indica con diferentes colores las curvas promedio  $H/V$  y su número correspondiente de equipo.

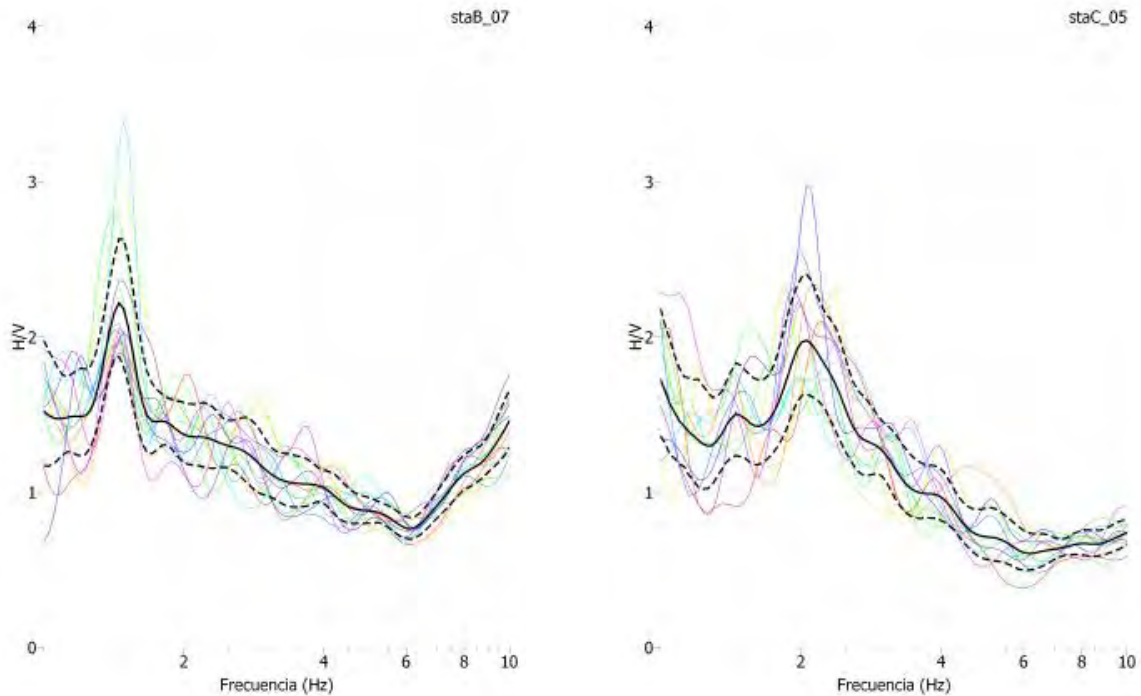


Con los resultados anteriores se observa una consistencia tanto en las curvas de las estaciones como en la de los arreglos en un pico de 8 Hz con muy poca amplificación. Estos resultados muestran que se trata de estructuras muy consistentes pese a que no se sabe si la respuesta medida es la misma desde que se construyeron o si se han realizado estudios de la respuesta de sitio en los tanques.

#### **4.4.2. Respuesta sísmica alrededor de los tanques**

En las figuras 4.5 se observan dos de las frecuencias dominantes del suelo alrededor de los tanques de almacenamiento de dos puntos indicados en la figura 4.3. El rango de frecuencias en el que se encuentran las 13 estaciones para este sitio es entre 1.5 y 2 Hz con amplificación no mayor a 4. En el anexo 7 se observan las graficas que se obtuvieron para cada punto y en el anexo 8 las coordenadas de cada una de las estaciones.

Los valores de cada estación tanto ubicados en la parte norte de los tanques se tiene frecuencias de 1.5 Hz, en el centro se tiene la frecuencia de 2 Hz y al sur, de lado de La Feria, se presentan frecuencias de 1.5 Hz y de lado de la fuente de 1.7 Hz, de estos últimos datos se observa que al sur de los tanques de lado este caen tres registros en el mismo punto de los cuales dos son en 1.5 y otro en 1.8 esto es posiblemente a que fue el primer sensor instalado y no fue calibrado correctamente.



*Figura 4.5. Cocientes espectrales H/V obtenidos alrededor de los tanques de almacenamiento en la 2da sección, de lado izquierdo el cociente espectral obtenido en la estación B del arreglo 7 con amplificación no mayor a 4 en 1.5 Hz, de lado derecho el cociente espectral con un pico en 2 Hz con amplitud menor de 3. En ambas curvas se observa con líneas de colores el cociente espectral de las ventanas en 40 s, así como la línea negra continua el promedio y la línea discontinua la desviación estándar.*

En la figura 4.5 se observan dos de las curvas que se obtuvieron, la de lado derecho es un resultado en donde se juntan los tres puntos, se observa de forma angosta y esta frecuencia se observa al norte y sur de los tanques. De lado derecho se observa el cociente espectral con un pico en 2 Hz y es la respuesta en medio de los tanques a pesar de que se tienen dos estaciones con poco tiempo de registro y otra con mayor registro se pudo observar la frecuencia característica en 2 Hz. Los puntos que quedan intermedios a los lados del tanque número 2 (figura 4.3) dan frecuencias de 1.8 Hz.

Los resultados anteriores concuerdan con las frecuencias de zona de lomas, a pesar de que en esta zona de estudio relativamente pequeña se tiene diferencias en las frecuencias. En contraste con los resultados por Cárdenas et al 2011 donde se encontró frecuencias de 3 Hz en esta zona no se encontró más de 2 Hz Revisa todas las referencias.

# Capítulo 5

---

## Integración de resultados

---

Como parte del proyecto financiado por el Instituto de Ciencia y Tecnología del D.F. y el CONACYT, se han realizado estudios geofísicos en gran parte de la segunda sección del bosque de Chapultepec, entre ellos levantamientos sísmicos como se ha visto en este trabajo y estudios de tomografía eléctrica.

Para fines de complementar este trabajo se ha integrado la imagen de una sección de tomografía eléctrica que se ubica a un costado de los tanques de almacenamiento de lado de La Feria y los museos (figura 5.1). Así mismo se refinan resultados presentados en los capítulos anteriores.

Puesto que el objetivo secundario de esta tesis es una evaluación geotécnica, se estimó los parámetros físicos los cuales se calcularon para cada estrato que se observó en los perfiles de velocidad obtenidos en el capítulo 3. Las fórmulas para obtener los módulos se observan en el Anexo 9.

La tabla 5.1 muestra los valores de densidad para cada estrato. Los valores densidad se estimaron mediante pruebas de Densidad relativa de los sólidos  $G_s$  en el laboratorio de mecánica de suelos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, ver Anexo 10. Las muestras se obtuvieron de una oquedad que se manifestó cerca de la fuente de Las ninfas y la pista El Sope, con una extensión de 2  $m$  de diámetro y 10  $m$  de profundidad.

En esta oquedad descendieron un grupo de espeleólogos y estudiantes, en los primeros 2  $m$  se encontraron materiales de relleno, debajo de éstos se observó una capa más competente cuyo espesor es más de 10  $m$  a este le corresponde una densidad de  $\rho=2.56$ . Los estratos subsecuentes con espesores más pequeños entre 30 cm a 50 cm con valores de 2.63 y 2.60.

<b>Densidad relativa de sólidos</b>  <b>G<sub>s</sub></b>	1	2	3	4
	2.56	2.63	2.60	2.60

Tabla 5.1 Valores de densidad obtenidos de cada estrato.

La tabla 5.2 muestra los valores obtenidos para cada una de las dos capas identificadas en las secciones de velocidad, debido a la profundidad que se obtuvo en los perfiles se asume que la densidad es la misma para los primeros 12 m de profundidad.

Los valores obtenidos para los módulos dinámicos corresponden a materiales competentes. Con lo que respecta a la relación de Poisson el valor de 0.33 corresponde a materiales blandos y  $\sigma=0.48$  indica materiales saturados.

estrato	Densidad relativa de sólidos	Velocidades		Relación de Poisson	Módulo de Rigidez	Módulo de Young	Módulo de Volumen
	G <sub>s</sub>	V <sub>p</sub> [m/s]	V <sub>s</sub> [m/s]	$\sigma$	G [MPa]	E [MPa]	k [MPa]
1	2.56	400	200.0	0.33	1.02	2.68	2.3
2	2.56	1300	300.0	0.48	1.60	4.74	41.11

Tabla 5.2 Módulos dinámicos del subsuelo obtenidos de velocidades de onda P y S.

En la figura 5.1 se observa la tomografía eléctrica que corresponde a un arreglo Wenner-Schlumberger con una extensión horizontal de 470 m orientada SE-NW. La integración de esta tomografía eléctrica ayudó a identificar zonas saturadas de agua y a definir estructuras geoelectricas profundas. En el anexo 11 se observan las coordenadas UTM del inicio y final de la sección de la tomografía eléctrica. Los valores de alta resistividad (en rojo) aproximadamente de 2000 *Ohm·m* se asocian a las tuberías que existen bajo los tanques en los primeros 10 m. También se observan dos zonas de baja resistividad (en azul) menores a 10 *Ohm·m* posiblemente sean acumulaciones de agua en la arena limosa.

Se observa otra anomalía de 80 *Ohm·m* casi a la mitad del horizonte a mayor profundidad la cual se asocia a una antigua tubería que se conectaba a la ex casa de máquinas.

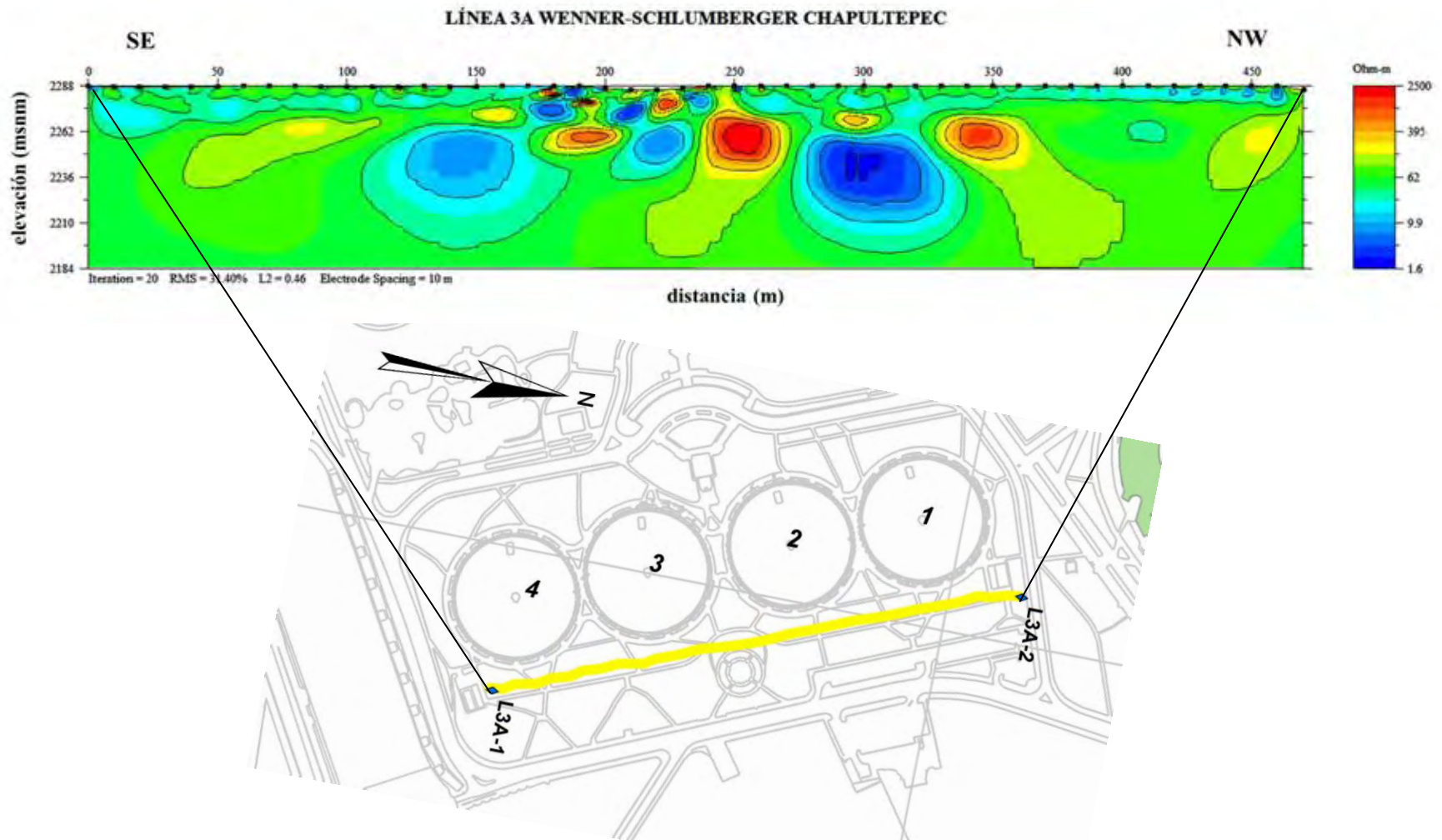


Figura 5.1 a) imagen de tomografía eléctrica, b) ubicación de la sección de tomografía eléctrica a un costado de los tanques de almacenamiento en la segunda sección del bosque de Chapultepec.

# Capítulo 6

---

## Conclusiones y recomendaciones

---

En este trabajo se realizó un estudio de sismica activa y pasiva entorno a los tanques de almacenamiento del Cárcamo de Dolores de la 2ª sección del bosque de Chapultepec. El objetivo principal de esta tesis fue caracterizar mediante métodos geofísicos la estructura del subsuelo entorno a los tanques de almacenamiento de la segunda sección del Bosque de Chapultepec y como objetivo secundario fue realizar una evaluación geotécnica del sitio.

Los resultados de este estudio muestran:

- La estructura del subsuelo que los primeros 10 *m* de profundidad están conformados por material de relleno y arena limosa. Los primeros 5 *m* presentaron velocidades de corte de 200 *m/s*. Bajo este estrato se encontraron velocidades de 300 *m/s*, que de acuerdo a los módulos dinámicos y la relación de Poisson, el material es competente y saturado de agua
- Para profundidades mayores a los 10 *m* utilizamos 4 pares de estaciones de sismómetros triaxiales de banda ancha que registraron ruido ambiental. Por las trayectorias de éstos arreglos y se observa una estructura con inversión de velocidades cuyo modelo no fue simple de obtener mediante la inversión de la curva de dispersión.
- El método SPAC aplicado a una línea de sensores con respuesta en frecuencia de 4.5 *Hz*, muestra que las curvas de dispersión sugieren valores de velocidad en la parte superficial de 280 *m/s* y en la parte más profunda velocidad de 400 *m/s*. Valores que están de acuerdo a los reportados en el estudio previo de sonda suspendida.
- La evaluación de la respuesta sísmica de cada uno de los tanques y entorno a éstos, muestra que las frecuencias son consistentes entre cada una de ellos (8 *Hz*) y prácticamente se encuentran circundados por materiales competentes,

cuyas frecuencias de vibrar están entre 1.5 y 2 Hz con amplitudes no mayores a 4.

- El nivel de saturación de agua es comprobado por una tomografía eléctrica que profundizó 30 m. Se observan zonas de alta resistividad en los primeros 10 m correspondientes a las tuberías de los tanques, entre 15 m existen zonas de baja resistividad asociados a acumulaciones de agua.
- Los resultados descritos anteriormente muestran que tanto las estructuras y el subsuelo en su entorno son estables.

### **Sugerencias y recomendaciones**

- Se sugiere caracterizar con mayor detalle las zonas saturadas observadas en la tomografía eléctrica.
- Realizar monitoreo continuo de las frecuencias de vibrar de estos tanques, pues lo que se reporta en este estudio son lo que hasta el momento se encuentra en la literatura.
- En el caso de determinar la flexibilidad de las paredes de los tanques y su anclaje en la base de éste, se debe realizar un modelo numérico de interacción fluido-estructura empleando el Método del Elemento Finito.

# Bibliografía

- Aguayo Camargo, J.E., Martín Córdoba S., Sánchez Díaz F. *Evolución Geológica de la cuenca de México en Simposio sobre tópicos geológicos de la cuenca del Valle de México*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. 1989.
- Campos R. (1988). *Chapultepec. Su leyenda y su historia*. Departamento del distrito Federal. Secretaria General de Desarrollo Social Comité Interno de Ediciones Gubernamentales.
- Cárdenas-Soto M., Chávez-García F.J. y Reyes Pimentel T.A. (2011) *Estudio de la respuesta sísmica en la zona de la 2ª sección del bosque de Chapultepec* Memorias del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes-Aguascalientes 2011.
- *Ciudad de México crónica de sus delegaciones*. Gobierno de la ciudad de México. 2007
- Cruz, Antimio. *Ariel Guzik inunda con sonido el Cárcamo de Dolores* en Emequis, núm. 255, mayo 2011, pág. 56
- Estrada Luis A. (2008) *Apuntes de Prospección Sísmica*.
- Flores-Estrella H.C., Lomnitz-Aronsfrau C. y Yussim-Guarneros S. (2004) *Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC*. Boletín Informativo de la Unión Geofísica Mexicana, A.C. GEOS, Vol. 24, No.3, p. 438-445, 2004
- González y González, Luis. *Viaje por la historia de México*. México, D.F. Editorial Clío. 2009.



- Granda-Sanz A., Granda-París T. y Madrid-Contreras A. (2005) “El método de la Sísmica Pasiva: una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en zonas urbanas” International Geophysical Technology, S.L.
- Guerrero, Verónica. “De cómo se rescató un bosque” en ¿Cómo ves?, núm. 84 p. 10.
- Manilla Aceves A.A. (2003) Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. Publicación técnica No. 229. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte.
- Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Guía de diseño de redes de agua potable con uno o varios tanques y fuentes de abastecimiento. CNA, Diciembre 2007.
- Marroquín, M. Memoria de las obras de provisión de aguas potables para la ciudad de México. Sistema Lerma. 1951
- Metrópolis, Radiografía de la megaurbe. Gobierno de la ciudad de México. Marzo 2011
- Muñoz-Martin A. y Carbo-Gorosabel A., (2006) “Resultados y experiencias de aplicación del método de Refracción por Microtremor (Sísmica Pasiva) para la investigación geofísica de las nuevas líneas de metro en Madrid (España)” en Geogaceta No. 40, p. 51-54.
- Reynolds J.M., (1997). An Introduction to Applied and Environment Geophysics. Editorial Wiley.
- SACM. Proyecto ejecutivo de línea interconexión de los tanques Dolores a la avenida paseo de la reforma y calzada Chivatito, en la 1er sección del Bosque de Chapultepec. Delegación Miguel Hidalgo. Octubre, 2008.

- Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., León, E., 2005, *Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México*. México D.F., TGC geotecnia S.A. de C.V., 171 p.
- Vela, Enrique. "*La ciudad de México vista desde el agua*", en *Arqueología Mexicana*, núm. 71, enero-febrero 2005, p. 80
- Ruiz Naufal V.M. "*Los jardines de Chapultepec y sus reflejos novohispanos*", en *Arqueología Mexicana*, num. 57, Septiembre-octubre 2002, p. 42-47
- Yauri, S. 2006. *Microtremores*. Compendio de trabajos de investigación del Instituto Geofísico del Perú, Vol. 7, p. 43-56.

# ANEXOS

## Anexo 1

La sismica de refracción estudia la respuesta del terreno cuando se propaga a través de él una onda de compresión producida por medios mecánicos en la superficie, dando información de las características geomecánicas de la zona que se va a estudiar.

El método solo emplea las ondas refractadas, pero sólo se observan las primeras llegadas de las ondas (Onda P) ya que son las más rápidas.

La liberación de la energía necesaria se realiza mediante percusión, a lo largo de la superficie se instalan los receptores que captarán las oscilaciones por las sucesivas ondas que vayan arribando.

La representación gráfica de los tiempos que tardan las ondas en alcanzar los geófonos está en función de las distancias al origen de las fuentes y se le denomina “dromocrónicas”. La gráfica está compuesta a su vez de varias gráficas que representan cada una de las ondas que se generan:

- La onda directa es la primera recta que parte del origen de coordenadas, viaja por la capa más superficial desde el origen de la fuente de energía hacia los geófonos. Se rige por la ecuación  $t = x/V_1$  donde  $V_1$  es la velocidad de la primera capa.
- La onda refractada es la segunda recta, representa la interface entre la primera y la segunda capa. Su ecuación es  $t = T_1 + x/V_2$  donde  $V_2$  es la velocidad de la segunda capa y  $T_1$  es el tiempo en el origen de la primera capa. Aquí se verifica la Ley de Snell:  $\text{sen } i_c = V_1/V_2$  donde  $i_c$  es el ángulo de incidencia.
- La onda reflejada, la última en llegar. Su ecuación es  $t^2 = t_0^2 + x^2/V_1^2$  donde  $t_0$  es la ordenada de la curva reflejada en el origen.

Las velocidades de las distintas capas, se obtienen como la inversa de las pendientes de las rectas de la onda directa y la refractada. El espesor de la primera capa se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$H = \frac{x_B}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad 1$$

Donde:

$H$  = espesor de la capa

$X_B$  = la abscisa del primer “codo” de la dromocrónica (Cross-Over Point)

$V_2$  y  $V_1$  = velocidades respectivas de la primera y segunda capa

La forma de las dromocrónicas aporta gran información respecto a la estructura geológica del subsuelo.

## Anexo 2

Se tienen las coordenadas del inicio y final del tendido de refracción sísmica. Recordando que al terminar un tendido el último geófono se dejó para que a partir de éste se iniciara el siguiente tendido.

<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>	
479454.04	2146393.69	2297	inicio
479440.29	2146425.33	2299	
479426.53	2146456.97	2299	
479412.95	2146488.68	2299	
479385.56	2146552.01	2299	
479399.25	2146520.35	2300	final

## Anexo 3

### Fundamentos teóricos de Correlación Espacial (SPAC)

Este método fue presentado por Aki en 1957 y parte de dos hipótesis: debe estar constituido por ondas dispersivas que se propagan en la superficie libre y el campo de ondas debe ser estacionario en tiempo y espacio.

El método permite estimar la velocidad de fase de las ondas que cruzan el arreglo siempre y cuando cuente con registros sísmicos de distintas estaciones espaciadas a una distancia constante y formando parejas de estaciones a lo largo de diferentes acimuts.

El método considera un campo de ondas formado por la superposición de ondas propagándose en diversas direcciones en un plano horizontal, no polarizado y propagándose con una velocidad constante  $c$ . Siendo la función de autocorrelación:

$$\phi(\xi, \eta, t) = \overline{u(x, y, z)u(x + \xi, y + \eta, t)} \quad 1$$

en donde  $u(x, y, z)$  y  $u(x + \xi, y + \eta, t)$  representan los registros de ruido ambiental obtenidos en dos lugares en superficie  $u(x, y, z)$  y  $u(x + \xi, y + \eta, t)$ . La barra superior indica el promedio de la función de autocorrelación espacial y  $t$  el tiempo. Considerando que el campo de ondas es estacionario, Aki (1957) muestra que el promedio acimutal de la función de autocorrelación se escribe:

$$\bar{\phi}(r) = \frac{1}{2\pi} \int \phi(r, \psi) d\psi \quad 2$$

Donde  $r$  y  $\psi$  son coordenadas polares definidas por:

$$\xi = r \cos \psi \quad \text{y} \quad \eta = r \sin \psi \quad 3$$

Por otra parte Aki (1957) muestra que el promedio acimutal de la función de autocorrelación espacial  $\bar{\phi}(r)$  y el espectro de densidad de potencia de un campo de ondas  $\phi(\omega)$  donde  $\omega$  es la frecuencia angular quedando así:

$$\bar{\phi}(r) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \phi(\omega) J_0\left(\frac{\omega}{c} r\right) d\omega \quad 4$$

donde  $J_0$  es la función de Bessel de primera especie y de orden cero. El argumento de la función de Bessel se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\omega}{c} r = kr = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad 5$$

En donde  $k$  representa el número de onda y  $\lambda$  la longitud de onda. Si se le aplica un filtro pasa bandas a las señales, entonces el espectro de potencia queda como:

$$\phi(\omega) = P(\omega_0) \delta(\omega - \omega_0) \quad 6$$

$P(\omega_0)$  es el espectro de densidades de potencia a una frecuencia  $\omega_0$  y  $\delta$  es la función delta de Dirac. Por lo que el promedio acimutal de la función de autocorrelación se escribe como:

$$\bar{\phi}(r) = \bar{\phi}(r, \omega_0) = P(\omega_0) J_0\left(\frac{\omega_0}{c(\omega_0)} r\right) \quad 7$$

De acuerdo con Aki (1957) el coeficiente de correlación es:

$$p(r, \omega_0) = \frac{\phi(r, \psi, \omega_0)}{\phi(0, \psi, \omega_0)} \quad 8$$

como  $P(\omega_0)$  no depende de la posición, el coeficiente de autocorrelación finalmente se escribe:

$$p(r, \omega_0) = J_0\left(\frac{\omega_0}{c(\omega_0)} r\right) \quad 9$$

Con lo que respecta a la incógnita de la velocidad de fase, se estima el promedio acimutal de la autocorrelación espacial para varias estaciones separadas a una distancia  $r$ .

De acuerdo a Chávez-García *et al* 2005, se puede conocer la velocidad de fase a través de una inversión se la ecuación 9. El problema a resolver es un problema no lineal por lo que se puede expresar por una matriz de la siguiente forma:

$$d_0 = g(p) \quad 10$$

donde  $d_0$  es el conjunto de datos, por ejemplo los coeficientes de correlación para todas las distancias y frecuencias,  $p$  es el conjunto de parámetros que se desean invertir para este caso los valores de velocidad de fase para todas las frecuencias y  $g$  es la función que relaciona las observaciones con los parámetros que fueron invertidos, en este caso la función  $J_0$  de orden cero.

Considerando la velocidad de fase de una curva de dispersión de la forma:

$$c(f) = Af^{-B} \quad 11$$

Donde  $f$  es la frecuencia y  $A, B$  son constantes. Al elegir esta función expresamos la forma final que tendrá la curva de dispersión de velocidad de fase. Para la solución, se utiliza el valor inicial del parámetro  $p$  en la iteración  $k + 1$ , como valor estimado para la iteración  $k$ . A continuación se muestra la ecuación para estimar los valores de  $p$

$$p_{K+1} = p_0 + c_{p_0 p_0} G_k^T (c_{d_0 d_0} + G_k c_{p_0 p_0} G_k^T)^{-1} [d_0 - g(p_k) + G_k (p_k - p_0)] \quad 12$$

donde  $p_k$  y  $p_{k+1}$  son los parámetros que resultan de la inversión en la etapa  $k$  y  $k + 1$  respectivamente,  $c_{p_0 p_0}$  es la matriz de covarianza de los parámetros,  $c_{d_0 d_0}$  es la matriz de covarianza de los datos,  $g(p_k)$  es la función de Bessel de orden cero y de primer tipo. Evaluada con los parámetros que resultan de la iteración  $k$  y  $G_k$  es la matriz que contiene las derivadas parciales de los datos ( $d_0$ ) con respecto a los parámetros ( $p_k$ ). El superíndice  $T$  indica la matriz transpuesta. Para este caso dado la ecuación 9, los elementos de la matriz  $G_k$  toman la siguiente forma:

$$\frac{\delta g(p)}{\delta c(\omega)} = \frac{\omega r}{c^2(\omega)} J_1\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) \quad 13$$

Para obtener la curva de dispersión como función de la frecuencia se sugiere utilizar la siguiente expresión como una matriz de covarianza de los parámetros:

$$c_{p_0 p_0}(\omega, \omega_0) = \sigma^2 \exp\left[\frac{-1(\omega - \omega_0)^2}{2\Delta^2}\right] \quad 14$$

La anterior expresión indica que la matriz de covarianza para los parámetros del modelo a una frecuencia  $\omega_0$  es suavizada con un filtro que depende de  $\sigma$ , el máximo cambio aceptado para cada parámetro  $p$  entre dos iteraciones y  $\Delta$  el ancho de la ventana de la frecuencia. El uso de esta matriz de covarianza para los parámetros de un modelo inicial genera una solución con un nivel de probabilidad aceptable. Cualquier otra solución puede sugerir una baja probabilidad de ser correcta.

## Anexo 4

A continuación se observan las coordenadas de las coordenadas UTM de cada una de las cuatro estaciones del arreglo más grande.

estación	x	y	z
A	479594	2146842	2283
B	479436	2146399	2298
G	479146	2146426	2307
I	479275	2146858	2298

## Anexo 5

En este anexo se muestran las coordenadas UTM del inicio y final del levantamiento de sísmica pasiva para el arreglo de geófonos distribuidos alrededor de los tanques.

Primer experimento					
	geófono	x	y	z	Equipo
inicio	Gtan01	479370	2146520	2271	Seistronix
final	Gtan72	479279	2146376	2304	
inicio	Gtan73	479276	2146378	2305	Strataview
final	Gtan96	479248	2146511	2304	
Segundo experimento					
inicio	Gti01	479160	2146756	2295	Seistronix
final	Gti72	479268	2146544	2297	
inicio	Gti73	479267	2146544	2298	Strataview
final	Gti96	479163	2146576	2297	

## Anexo 6

### Fundamentos teóricos de Cocientes Espectrales H/V

El método de H/V, consiste en tomar del registro en superficie un promedio de la componente vertical y la componente horizontal, éste fue implementado por Nakamura (1989). El método estima el periodo fundamental del suelo, que en gran parte influye la velocidad superficial de la onda S, mediante cocientes espectrales. Este método relaciona los espectros de Fourier de las componente horizontal (norte-sur, este-oeste) y vertical del registro en superficie.

El método de cocientes espectrales H/V se deduce de una función de transferencia de capas superficiales. En siguiente esquema se muestra las bases para explicar esta técnica.

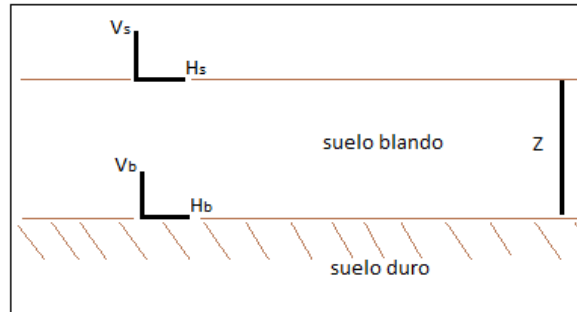


Figura 1. Esquema que representa las bases para explicar la técnica de Nakamura. Modificada de Lermo y Chávez-García 1994.

En el anterior esquema se supone un suelo blando sobre un suelo firme o roca, con esta hipótesis y trabajando en el dominio de las frecuencias, se involucran cuatro espectros en el problema:  $V_s$  y  $H_s$  son espectros de Fourier de las componentes vertical y horizontal en la superficie,  $V_b$  y  $H_b$  son espectros de Fourier de las componentes vertical y horizontal en la semiespacio. De acuerdo a Nakamura, la función de transferencia se expresa como:

$$S_E = \frac{H_s}{H_b} \quad 1$$

Se asume que la componente vertical del tremor refleja el efecto de las fuentes locales, el cual no ha sido amplificado por capas superficiales, el efecto de las ondas Rayleigh ( $A_s$ ).

Se expresa en la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{V_s}{V_b} \quad 2$$



Por lo que en la función de efecto de sitio será:

$$S_m = \frac{S_E}{A_s} \quad 3$$

Pero si  $H_B/V_B$  es igual a la unidad, la función de sitio corregida por el término de la fuente, queda como:

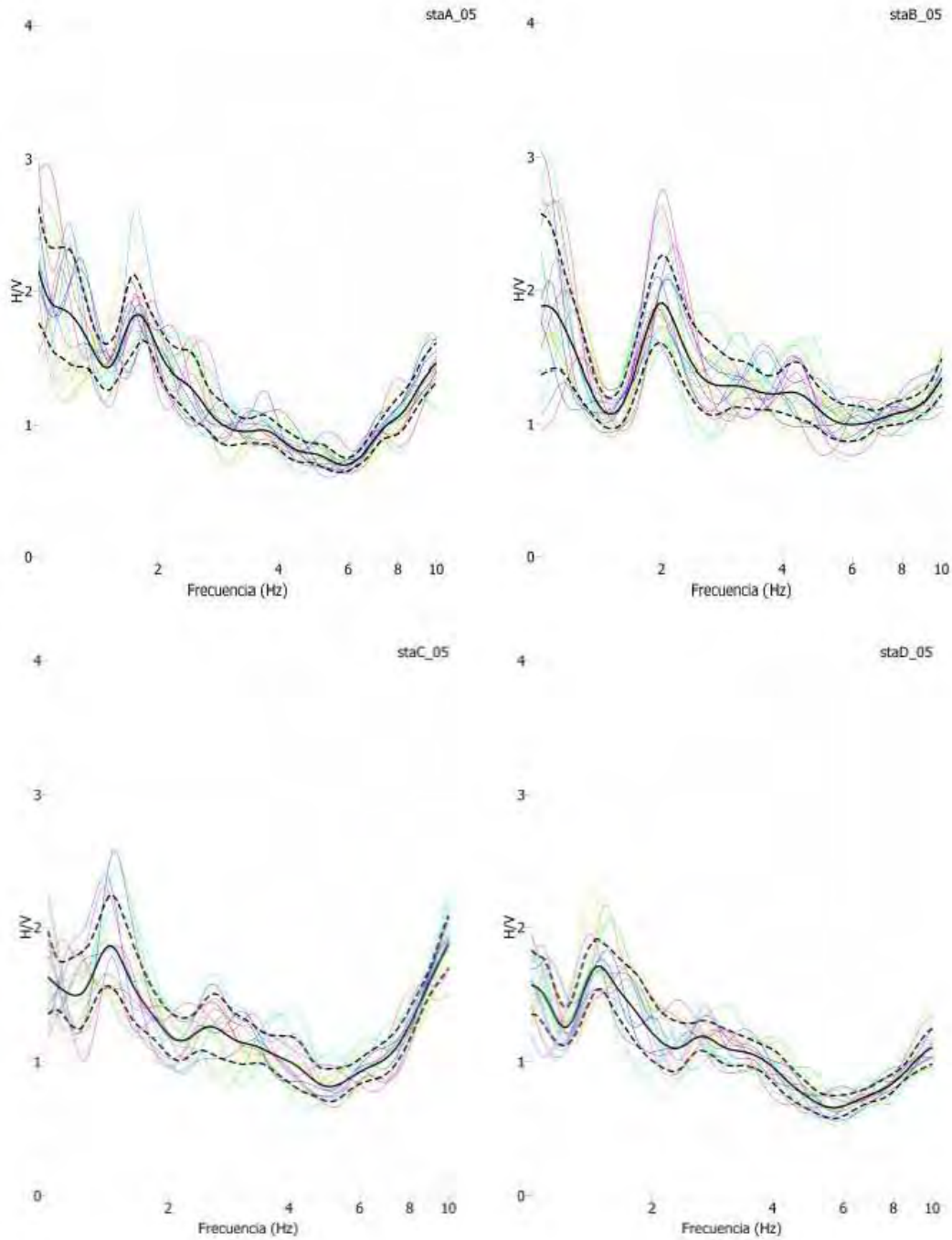
$$S_m = \frac{H_s}{V_s} \quad 4$$

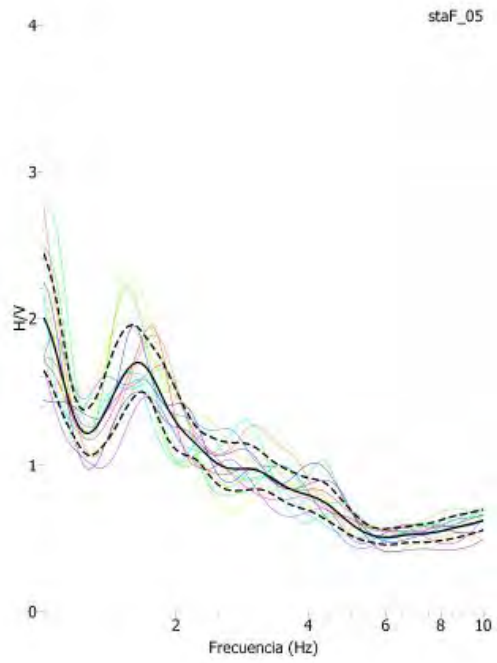
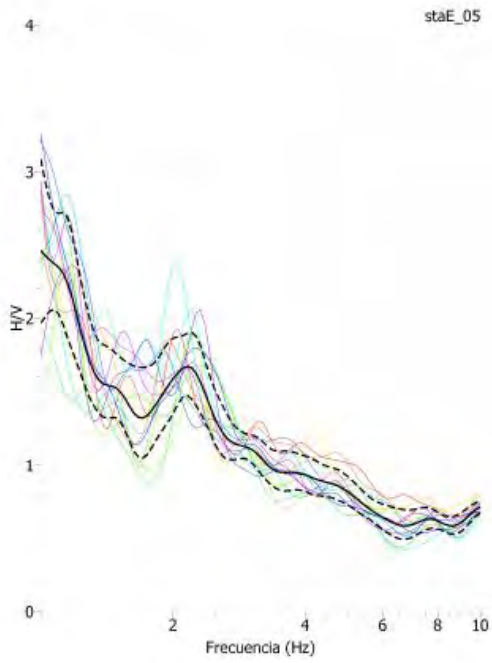
Con lo anterior se deduce que en la función de transferencia la componente vertical registrada en la superficie mantiene las características de la componente del semiespacio.

## Anexo 7

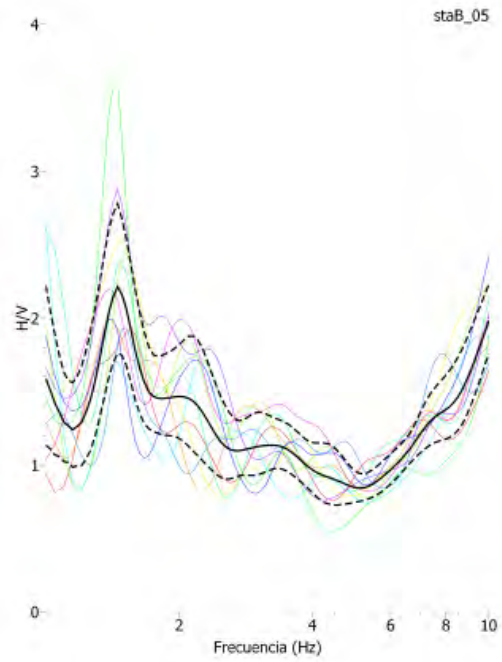
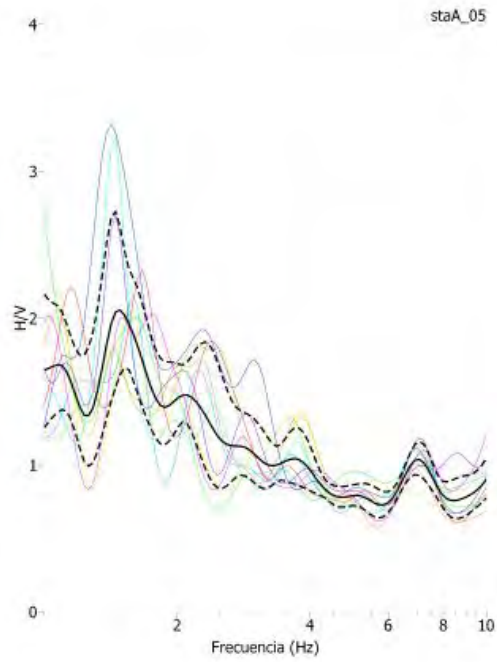
Cocientes espectrales estimados alrededor de los tanques de almacenamiento en la segunda sección del bosque de Chapultepec.

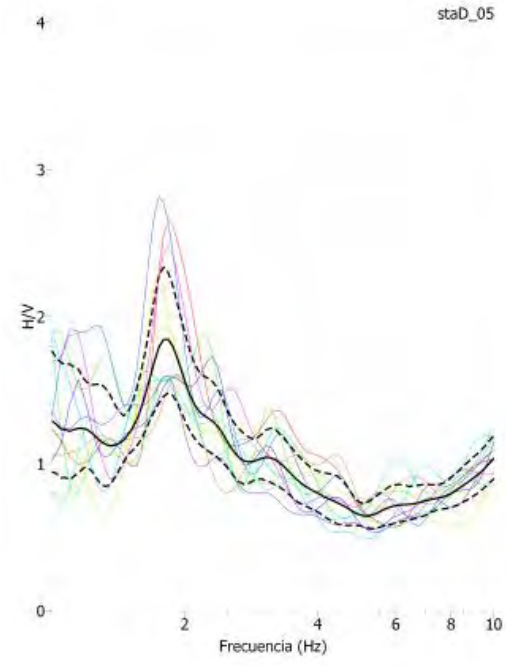
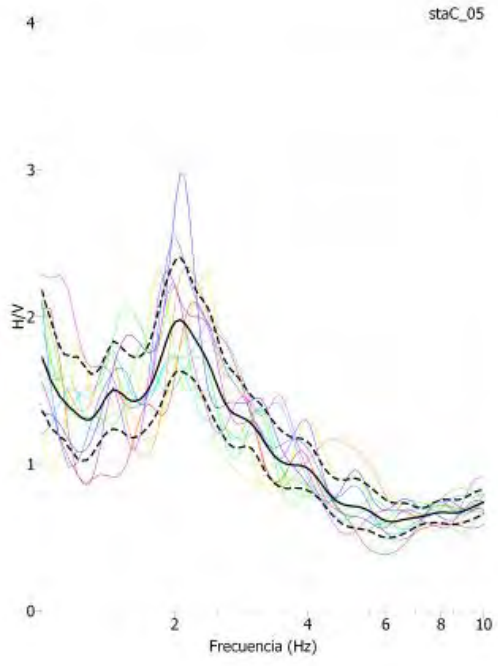
Arreglo 5 con duración de 20 minutos



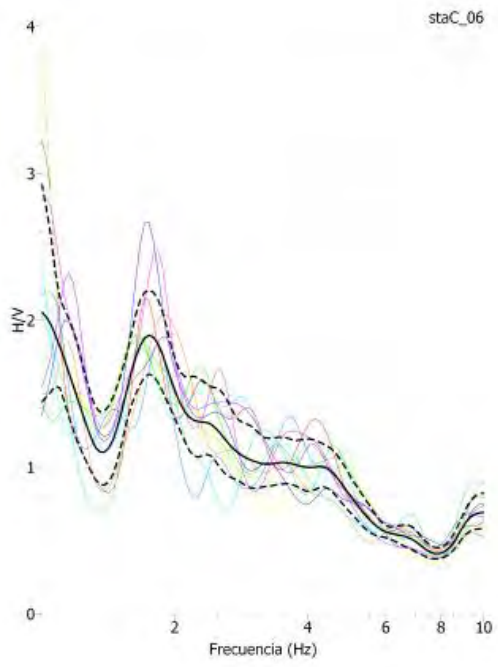


Arreglo 5 con duración de 1hr

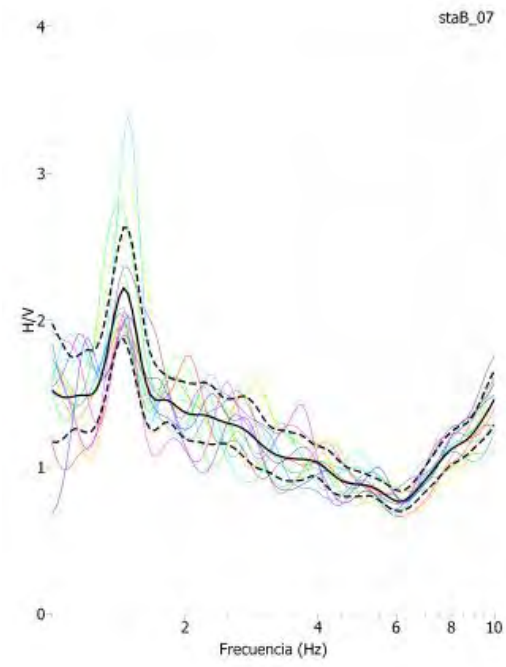




Arreglo 06



Arreglo 07



## ANEXO 8

A continuación se observan las coordenadas de cada una de las estaciones de las cuales se obtuvo los cocientes espectrales. La primera tabla corresponde a los puntos que están alrededor de los tanques. La segunda tabla indica las coordenadas de cada una de las estaciones sobre cada uno de los tanques.

coordenadas					
Duración	Estación	X	Y	Z	frecuencia [Hz]
20 min	A	479422	2146385	2299	1.8
	B	479328	2146567	2303	2
	C	479276	2146756	2301	1.5
	D	479155	2146693	2308	1.5
	E	479256	2146538	2305	2
	F	479287	2146361	2301	1.7
1 hr	A	479433	2146380	2298	1.5
	B	479375	2146444	2301	1.5
	C	479336	2146538	2302	2
	D	479320	2146628	2303	1.8
5 hr	C	479155	2146601	2309	1.8
5 hr	B	479436	2146399	2298	1.5

		coordenadas		
	Equipo	X	Y	Z
Tanque 4	6952	479315	2146377	2301
	6686	479366	2146362	2300
	6631	479359	2146412	2301
Tanque 3	6952	479326	2146478	2302
	6686	479281	2146494	2304
	6631	479316	2146529	2304
Tanque 2	6952	479235	2146600	2305
	6686	479263	2146640	2305
	6631	479284	2146593	2304
Tanque 1	6952	479193	2146712	2306
	6686	479218	2146753	2304
	6631	479244	2146711	2305

## Anexo 9

En este anexo se presentan las fórmulas para obtener los módulos dinámicos a partir de velocidades de  $V_p$  y  $V_s$ .

### Ley de Hooke

La Ley de Hooke que establece que “las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos aplicados”. Por lo que un cuerpo no sufre deformación si no está sujeto a esfuerzos, E. Del Valle (2007).

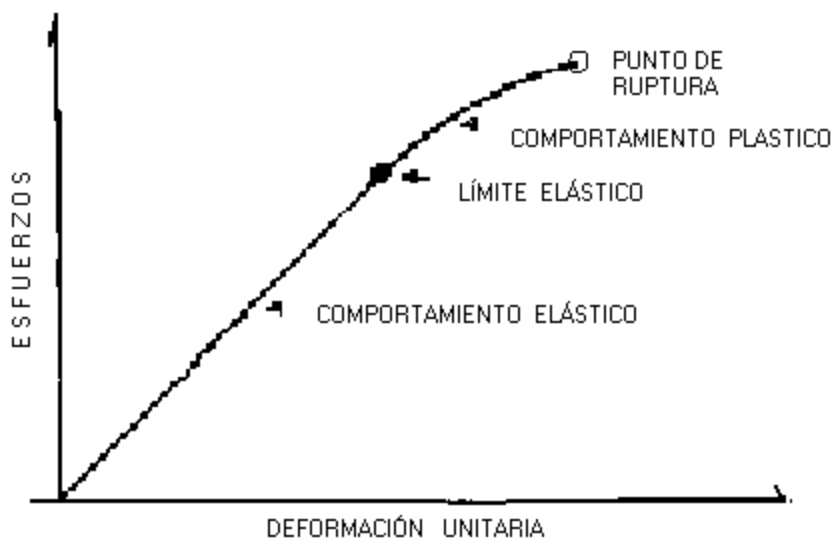


Figura 3.4. Ley de Hooke. Tomada de Del valle, E. 2007.

De la gráfica anterior se observa un comportamiento elástico cuando el esfuerzo incrementa conforme aumenta la deformación unitaria hasta llegar al límite plástico, el comportamiento plástico se observa después del límite plástico donde hay mayores deformaciones al incrementar los esfuerzos y estos alcanzan el punto de ruptura.

El cuerpo se deforma en direcciones longitudinales, puede conservar su volumen o variarlo, las relaciones que cuantifican la deformación de algún material se denominan módulos elásticos y son: el Módulo de Young  $[E]$ , la Relación de Poisson  $[\sigma]$ , la Rigidez  $[G]$  y la Compresibilidad  $[K]$ .

### Relación de Poisson

Se refiere a la variación del diámetro de un cuerpo, con respecto a la elongación del mismo, como respuesta a un esfuerzo perpendicular al diámetro del objeto. A partir de las velocidades de las ondas sísmicas,  $\sigma$  se obtiene como sigue:

$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad 1$$

Módulo de Rigidez

Se refiere a la resistencia de un cuerpo ante un esfuerzo de cizalla. A partir de las velocidades sísmicas se obtiene de la siguiente manera:

$$G = \rho V_s^2 \quad \rho = \text{densidad} \quad 2$$

Módulo de Young

Se refiere a la resistencia que opone un cuerpo ante un esfuerzo extensional. Con ayuda de las velocidades sísmicas, el cálculo de este módulo elástico se reduce a:

$$E = 2G(1 + \sigma) \quad 3$$

Bulk Modulus o Módulo de Volumen

Es la medida de la respuesta de un cuerpo ante un esfuerzo compresional. Para obtener este valor se utiliza la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\frac{1}{3}E}{1-2\sigma} \quad 4$$

## Anexo 10

### Pruebas de laboratorio

Para calcular los módulos elásticos es necesario conocer la densidad del material, en este caso se determinó la densidad de los sólidos ( $S_s$ ) que se encuentran en el área de estudio, extrayendo cuatro muestras de los estratos encontrados en la zona de subsidencia del material, dentro de la oquedad que existe en este parque, las pruebas correspondientes a  $S_s$  se realizaron en el laboratorio de mecánica de suelos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

El equipo implementado para esta prueba es: cuatro muestras, cuatro recipientes, cuatro matraces, dos calentadores, dos charolas, bomba de vacío, báscula, cuatro charolas, termómetro y un horno.



*Figura 1. Vista de las muestras*

La prueba consiste en:

- Colocar 80 g de cada muestra en recipientes y registrarlo en la hoja de control. Esta hoja se anexa.
- Limpiar los matraces con alcohol para no contaminar la prueba, a partir de este paso el matraz no se toca con las manos.
- Colocar la muestra de un recipiente en un matraz y agregar agua



- Prender la bomba de vacío para sacar el aire de la muestra mientras se deja el mismo matraz a baño maría durante 45 min.
- Al terminar el tiempo anterior, se coloca el matraz en la mesa se deja enfriar por 10 min.
- Después del enfriamiento, se toman lecturas de la temperatura con el termómetro dentro del matraz en la parte inferior, media y superior, también se anota en la hoja de control.
- Se toma nuevamente el peso del matraz con la muestra, se registra
- Se coloca la muestra en charolas para poner a secar al horno a 100°.
- Después de 24 hrs. Se toma nuevamente el peso y se realizan los cálculos correspondientes



*Figura 2. Vista del material usado para la prueba de densidad de sólidos en el laboratorio de mecánica de suelos. De lado derecho se observa la toma de lecturas de temperatura. De lado izquierdo las muestras a baño maría.*

## Anexo 11

Se tienen las coordenadas UTM del inicio y final de la tomografía eléctrica.

	estación	x	y	z
inicio	L3A-1	479434	2146377	2298
final	L3A-2	479268	2146812	2299