



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

EVALUACIÓN DE LAS GRIETAS DE LA CUENCA DE  
MÉXICO ORIGINADAS POR LA MORFOLOGÍA DE LA ROCA  
BASAL USANDO MEDICIONES DE MICROTREMORES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA

José Antonio Martínez González

TUTOR

M. en C. Javier Francisco Lermo Samaniego





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ***Agradecimientos***

*Me gustaría empezar agradeciendo a mi alma mater, mi Universidad que me ha acogido por más de una década entre sus brazos. Me vio entrar en sus aulas cuando aún era un niño con un alma endeble y moldeable, y observó salir de ellas a un ser humano que tiene la convicción de lo que quiere.*

*A mi Facultad de Ingeniería y a mis maestros, por enseñarme todo lo que un ingeniero necesita para ser un profesional y orgulloso representante de esta gran facultad.*

*A toda mi familia que ha estado apoyándome incondicionalmente, que han estado ahí cuando más necesitaba de una palabra de aliento o un abrazo, porque sin saberlo no me han dejado hundirme en medio de la tempestad. A todos ellos mis más sinceras gracias.*

*Al CELE que me permitió encontrar una de mis grandes pasiones así como conocer a mucha gente valiosa en mi vida y sobre todo “trovare al mio grande amore della vita mia”.*

*Quiero agradecer a todas las personas que colaboraron en las campañas de vibración ambiental, en especial a “mi chaparrita” Roxana, al “oye viejo” Joel, a Luis Ángel, y mis amigos Juliancito, Chucho, Juanito y Mina, así como a todos los compañeros.*

*De igual manera a Javier Lermo por haberme regalado su confianza y amistad, así como sus consejos y su gran visión para este trabajo.*

*Al Dr. Sandoval por regalarme su amistad, por enseñarme los puntos finos de la geotecnia, pero sobre todo por dejarme ver la gran persona que es.*

## ***Dedicatorias***

*A mi madre y a mi hermana, que han sido mi bastión, el soporte y el motivo de seguir adelante con esto que se llama vida. A toda mi familia González por todo el amor que me han entregado.*

*A te amore, a te Claudia per tante cose che hai fatto nella mia vita. Per diventare un migliore uomo, da insegnarmi un sacco di cose che avevo lasciato di vedere e sentire, per tutte quelle cose che ho scoperto grazie te. Perché sei diventata nella mia forza interna da riuscire le cose che in questo attimo ho. Grazie mille amore mio da stare insieme a me.*

*A mi abuelito Chilo que ha sido un gran ejemplo para mí, de que todo en esta vida es posible aun cuando parezca complicado.*

***Fata Viam Invenient***

*(El destino se abre  
sus rutas)*

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
a. Antecedentes	2
b. Objetivos	3
c. Alcances	3
d. Desarrollo de la tesis	4
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>5</b>
DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	
a. Ubicación geográfica	5
b. Características geológicas y geotécnicas de la zona de estudio	6
b.1. Geología histórica	6
b.2. Estratigrafía	7
b.3. Aspectos geotécnicos	9
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>11</b>
ADQUISICIÓN Y PROCESADO DE DATOS	
a. Introducción	11
b. Metodología	14
c. Adquisición de datos	15
d. Procesamiento de datos	17
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>21</b>
AGRIETAMIENTOS	
a. Introducción	21
b. Antecedentes	21
c. Mecanismos de generación de agrietamientos	24
d. Subsistencia y agrietamientos en la Cuenca de México	27
e. Caso de agrietamiento en la Colonia del Mar, Tláhuac, D.F.	30
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>38</b>
MICROTREMORES	
a. Introducción	38
b. Observaciones sobre el mapa de periodos predominantes de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo	68
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>49</b>
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>60</b>
<b>ANEXOS</b>	

## Resumen

El fenómeno del hundimiento regional ha ocasionado en los últimos años la aparición de agrietamientos en diversas zonas de la ciudad de México, afectando y poniendo en riesgo a sus habitantes. En este trabajo se presenta una recopilación de los agrietamientos reportados en mapas, trabajos y artículos. De igual manera se evalúa el caso de un agrietamiento localizado en la delegación Tláhuac mediante registros de microtemores, encontrándose que estos son generados por la presencia de un derrame volcánico en profundidad proveniente de la sierra de Santa Catarina. Se modeló el efecto que ha tenido el hundimiento en los últimos 20 años. Con base en esta ecuación se actualizaron los registros que se tenían de ese año para generar con base en 1010 datos una nuevo mapa de periodos dominantes para las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

## Introducción.

### a. Antecedentes

El Área Metropolitana de la ciudad de México (AMCM) está ubicada dentro de la Cuenca de México. Esta cuenca de tipo endorreico, es una unidad hidrológica cerrada de aproximadamente 7000 km<sup>2</sup>; estuvo formada por cinco lagos someros, encadenados de norte a sur, siendo estos Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco. Los dos lagos del sur, Chalco y Xochimilco, y los dos del norte, Zumpango y Xaltocan, eran algo más elevados, por lo que sus aguas escurrían hacia el cuerpo de agua central más abajo, Texcoco, llevando consigo sedimento principalmente arcilloso, que fue acumulándose en la parte central por más de 700,000 años (Urrutia-Fucugauchi, 1995).

No fue sino hasta 1796 que con la construcción del canal de Guadalupe, que conectaba al río Tula con el lago de Texcoco, que las áreas lacustres de la cuenca comenzaron a achicarse rápidamente para posteriormente desaparecer, dando paso al subsuelo lodoso del fondo del lago. Posteriormente con el desarrollo industrial a finales del siglo XIX y principios del siglo XX que se vivió en la ciudad de México, comenzó un proceso de inmigración masiva desde el campo a la ciudad en busca de empleo en las nuevas fábricas. Como consecuencia de ello, la población pasó de 700,000 en el año de 1920 a 25 millones de habitantes, y a un 30% de la industria del país (INEGI-INE, 2000). Fue por ello que a mediados del siglo XIX se inició la explotación del acuífero, pero entre 1940 y 1960 esta actividad se incrementó en la zona centro de la ciudad de México, generando hundimientos anuales hasta de 50 centímetros (Hiriart y Marsal, 1969) que se reflejaron en daños a las obras de drenaje y construcciones, y la aparición de fracturas en la superficie del terreno. Ante esto, en 1968 las autoridades de la ciudad prohibieron la apertura de nuevos pozos, teniendo como resultado la muy notable disminución de los hundimientos.

La incesante demanda de agua, propició la apertura de nuevos y más profundos pozos en zonas periféricas y cercanas a la ciudad, particularmente hacia la zona de Ecatepec, Xochimilco y Chalco. La transferencia de los pozos a las zonas mencionadas, tuvo numerosos impactos negativos asociados al hundimiento y fracturamiento del terreno (Ovando y González, 1990; Lugo *et al.*, 1996; Zawadsky, 1996; Escobar, 2004; Aguilar *et al.*, 2006; entre otros) haciéndose aún más evidente este problema.

Existen diferentes enfoques al estudio del origen de las fracturas en el interior de la AMCM, las cuales se pueden clasificar de acuerdo con la disciplina y métodos utilizados: (1) geotécnico, (2) hidráulico, (3) geológico, e (4) hidrogeológico.

El aspecto más estudiado es, sin duda, el de tipo geotécnico, por su estrecha relación al comportamiento del suelo y obras civiles, donde ha tenido mayores implicaciones y costos. Desde el punto de vista geotécnico e hidráulico, Carrillo (1947), demuestra numéricamente que el hundimiento de la ciudad de México se debe a la extracción del agua subterránea e infiere que la formación de fracturas es un proceso asociado. Juárez-Badillo (1969) y Alberro y Hernández (1990)

sugieren el origen de las fracturas por la desecación de las arcillas en tiempo de secas, seguido por inundaciones en temporadas de lluvia, y desarrollan soluciones analíticas para demostrar dicho proceso. Por su parte, Hiriart y Marsal (1969), sugieren que el fracturamiento de los sedimentos de la ciudad de México puede ser el resultado de la subsidencia. Melgoza (1978), describe la evolución y agrietamiento asociado al intenso bombeo de agua subterránea. Juárez-Badillo y Figueroa-Vega (1984) desarrollaron las bases de la formación de fracturas debido a fuerzas de filtración en el acuífero. Figueroa-Vega (1987, 1989), propone mecanismos de generación de fracturas por la extracción de agua subterránea, los que analiza por medio de soluciones analíticas. Juárez-Luna *et al.* (2002) sugieren un modelo de fracturamiento para los sedimentos lacustres.

Desde el punto de vista geológico-geofísico, De Cserna *et al.* (1988) explican el fracturamiento por la presencia de estructuras regionales delimitadas por fallas en el subsuelo y actividad neotectónica. Trabajos geofísicos, como los de la Comisión Federal de Electricidad después de los sismos de 1985 (Benhumea y Vázquez, 1988), destacan la diferenciación del subsuelo hasta aproximadamente 500 m de profundidad en Chalco y Xochimilco, con lo que fue posible asociar cambios significativos entre las capas más superficiales y los eventos preexistentes al depósito de sedimentos lacustres, características hidrogeológicas y morfología de la roca basal. Entre los estudios geofísicos más recientes se tiene el de Krivochieva y Chouteau (2002) donde realizan estudios magneto-telúricos (MT) y electromagnéticos (TDEM) en la región de Santa Catarina con objeto de delimitar la geometría del acuífero y confirmar la continuidad de los flujos basálticos entre el volcán y la cuenca sedimentaria. Otros estudios geofísicos reportados por Rodríguez-Castillo (1987), Chouteau *et al.* (1994) y González-Morán (1992), Delgado-Rodríguez (1995), se han enfocado a definir estructuras en el subsuelo que pudieran estar asociadas a alguno de los mecanismos sugeridos por la litología, geotecnia e hidráulica.

## **b. Objetivos**

Los objetivos generales de esta tesis son:

1. Cuantificar y clasificar los agrietamientos.
2. Identificar los posibles lugares de crecimiento y aparición de grietas para la colonia Del Mar, Tláhuac, Distrito Federal, mediante registros de vibración ambiental (técnica de Nakamura).
3. Explicar la relación que tiene la presencia de agrietamientos dentro de la zona de Lago.
4. Elaborar un mapa de la localización de los agrietamientos existentes dentro de la Cuenca de México. Además, desarrollar una base de datos mediante de un Sistema de Información Geográfica (GIS) para agrietamientos y periodos dominantes.
5. Proponer una actualización del mapa de periodos dominantes para la ciudad de México.

## **c. Alcances**

Los alcances de este estudio son:

Aplicar el método de vibración ambiental o microtremores para evaluar zonas que presentan agrietamientos, así como proponerlo como una herramienta para predecir futuros casos de apariciones de grietas.

Dado que se ha observado que en algunas zonas de la Cuenca presenta variaciones de los periodos dominantes ocasionados al hundimiento regional, se elaboró un mapa actualizado de valores de periodo dominante del subsuelo para la ciudad de México, haciendo uso de registros de microtremores y datos de aceleración recientes, aplicando la técnica de Nakamura.

**d. Desarrollo de la tesis**

Esta tesis consta de una introducción y 5 capítulos, distribuidos de la siguiente manera:

La introducción toca los puntos a desarrollar, así como los objetivos y alcances a los que se llegó. En el capítulo 1 se describen de una manera sintetizada las características geológicas y geotécnicas de la zona de estudio. El capítulo 2 describe la metodología empleada para la adquisición y procesamiento de los datos.

En el capítulo 3 se menciona el estado del arte del fenómeno de agrietamiento. Además se describe el impacto actual de la presencia de grietas en la Cuenca de México, siendo estas generadas por el fenómeno del hundimiento regional. Por último se presenta el estudio de la colonia Del Mar, delegación Tláhuac, que presenta serios agrietamientos en buena parte de este sitio.

En el capítulo 4 se mencionan algunas observaciones acerca del vigente mapa de isoperiodos contenidas en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. En el capítulo 5 se detalla el análisis de los resultados obtenidos en este estudio. Finalmente en el último capítulo se indican las conclusiones a las que se ha llegado al terminar este trabajo.

## Capítulo 1. Descripción de la zona de estudio

### a. Ubicación geográfica

La Cuenca de México tiene una extensión territorial de 9,766.66 km<sup>2</sup>, se localiza al Sur de la Altiplanicie Mexicana, en el centro de una zona volcánica denominado eje neovolcánico o faja volcánica transmexicana, la cual se extiende en dirección este-oeste, atravesando la República Mexicana. El área de estudio se encuentra localizada dentro de ésta cuenca, entre las coordenadas 98.85° y 99.30° longitud oeste, y 19.20° y 19.60° latitud norte, con un área de 2,091.10 km<sup>2</sup>. Dicha cuenca está rodeada principalmente en la porción occidental por una serie de sierras siendo estas la Sierra del Chichinautzin y de Las Cruces, en la porción SE se localiza la Sierra de Santa Catarina y al Norte la Sierra de Guadalupe. Dentro de la cuenca existen cuerpos volcánicos sobresalientes por su tamaño como son los Cerros de Chapultepec, Tepeyac, San Miguel, Peñón del Marqués, Chiquihuite, de la Estrella y el Peñón de los Baños.

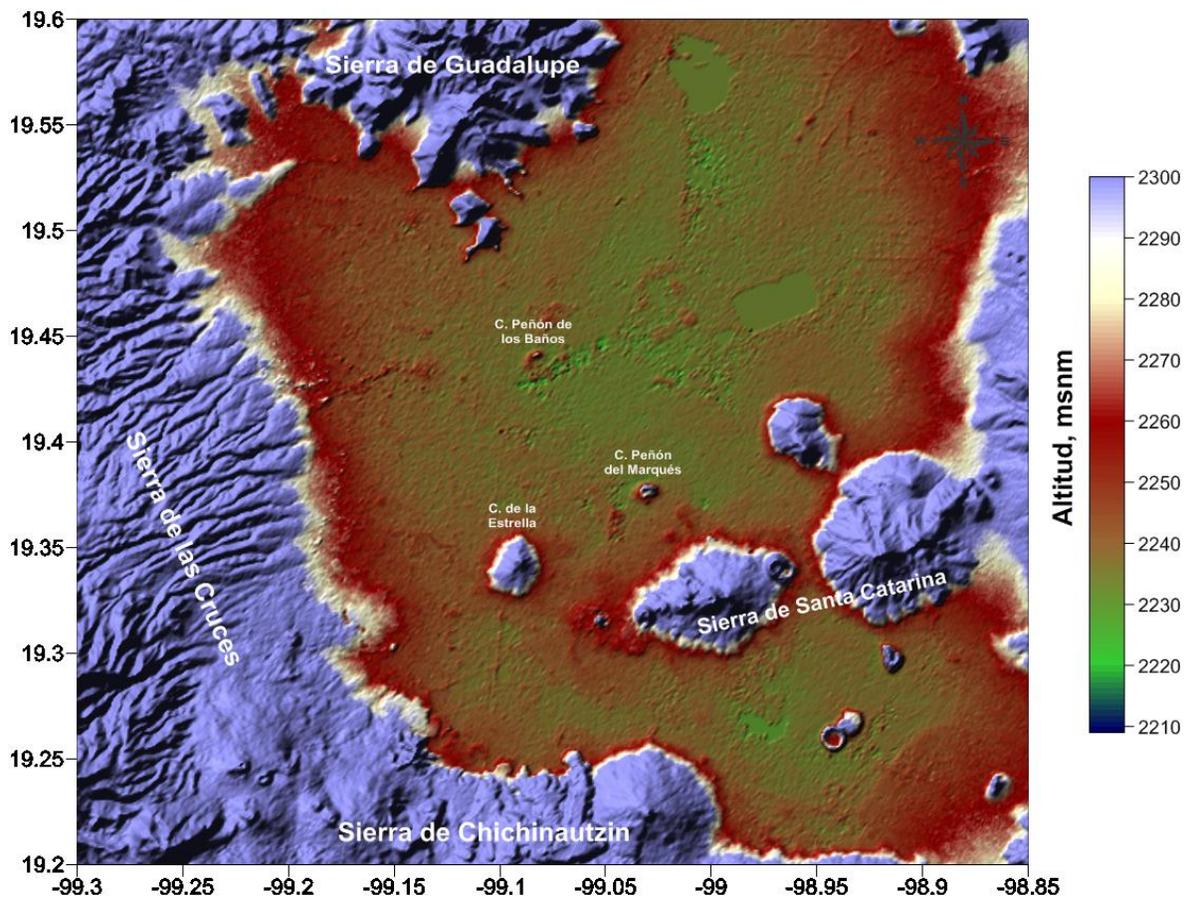


Figura 1.1. Modelo digital de elevación de la zona de estudio y ubicación de las sierras que delimitan dicha zona (Adaptado de USGS).

**b. Características geológicas y geotécnicas de la zona de estudio****b.1 Geología histórica**

En este apartado se tocará de forma sintetizada la geología histórica de la Cuenca de México, ya que se considera una parte importante para entender el origen de los suelos, sus propiedades físicas y su distribución espacial en dicha cuenca, así como el porqué de la presencia de irregularidades existentes dentro del subsuelo, como son la presencia de intercalaciones de estratos de arena y lentes de materiales gruesos.

La condición actual del relleno Cuaternario de la Cuenca de México es el resultado de procesos geológicos, volcánicos y tectónicos que se inician en el Terciario Medio, a mediados del Oligoceno. En el Mioceno Medio, el basamento volcánico del Terciario Medio, representado por la formación Xochitepec, es afectado por dos sistemas de fracturas y fallas, creando hundimientos escalonados, así como fosas y pilares. Posteriormente, en el Mioceno Superior se forma la Sierra de Guadalupe, siendo originada por una fosa dirigida al SE. Antes del Pleistoceno los ríos existentes dentro de la cuenca drenaban hacia el Sur, rumbo al río Amacuzac. A fines del Plioceno se produjeron fracturas con una dirección predominante W-E, por las cuales tuvieron acceso grandes efusiones de basalto que construyeron la Sierra de Chichinautzin en el Cuaternario hace 700,000 años, de acuerdo a mediciones paleomagnéticas. Durante el Plioceno Inferior se creó la Sierra de Las Cruces al Oeste. Ésta época se caracterizó por la intensa actividad volcánica que dio origen a materiales piroclásticos que se depositaron al pie de esta sierra.

La aparición de estas dos sierras provocó que la cuenca que drenaba hacia el Sur se convirtiera en una cuenca cerrada. De esta manera el agua que escurría de las sierras se fue almacenando en varios lagos, depositándose así el material que arrastraban dichas aguas. Simultáneamente, la parte central de la cuenca se fue rellenando con acarreo limo-arenoso y emisiones de cenizas y pómez provenientes de los volcanes del Sur.

El Pleistoceno se caracterizó por tener climas variantes y extremos, pasando de calurosos a fríos. En esta época se tuvieron cuatro glaciaciones a las que posteriormente sobrevinieron lapsos de clima caluroso, terminándose esto hace 10,000 años. Para el Holoceno o Reciente, el clima ha sido moderado tendiendo a caliente. De lo anterior se deriva que la Cuenca de México, desde su cierre en el Sur por los basaltos de la Sierra de Chichinautzin, ha pasado por dos períodos de glaciación y dos interglaciales (Tabla 1.1). Producto de estas glaciaciones se tienen depósitos de arenas como en Zona de Lomas y la aparición de barrancas como son las de la Magdalena, de Santa Rosa y de la Cañada, productos de la erosión glacial.

Tiempo (años antes de hoy)	Evento geológico
$10^4$	Holoceno - Reciente
$80 - 10 \times 10^3$	4° Glaciación:
$100 - 80 \times 10^3$	3° Interglacial
$300 - 100 \times 10^3$	3° Glaciación
$400 - 600 \times 10^3$	2° Gran Interglacial
?	2° Glaciación
?	1° Interglacial
$\sim 900 \times 10^3$	1° Glaciación

Tabla 1.1. Duración de los periodos glaciales e interglaciales que afectaron el proceso de sedimentación dentro de la Cuenca de México.

A finales del Plioceno y hasta hará algo más de 100,00 años se vivió una gran actividad volcánica dentro de la cuenca. Cerros como Chapultepec, Tepeyac y San Miguel, el Peñón del Marqués, la Sierra de Santa Catarina, el volcán Xitle dieron origen a una gran cantidad de material volcánico como lavas, brechas, cenizas, pómez, lahares calientes y fríos. Todo este material fue rellenando paulatinamente la cuenca, creando un caos estratigráfico que caracteriza al subsuelo de la Cuenca de México.

## b.2 Estratigrafía

Una vez cerrada la cuenca, esta comenzó a azolverse rápidamente con depósitos provenientes de la sedimentación de ceniza volcánica transportada por el aire o por corrientes de agua hacia los lagos de la cuenca. Las partes centrales de la cuenca alejadas de los bordes, fueron llenándose con depósitos limo-arenosos, los cuales se interestratificaron con suelos y capas de ceniza y pómez provenientes de las erupciones volcánicas originadas principalmente en el Sur. En las laderas de las sierras se depositaron materiales como grava y arena; y hacia el Sur se interestratifican con basaltos provenientes de las erupciones de estas sierras.

Dependiendo de las condiciones climáticas, húmedas o secas, glaciales o interglaciales, los lagos iban creciendo o reduciéndose. Así, los depósitos lacustres en el centro de la cuenca, por el área al NW de Chimalhuacan, alcanzaron un espesor de 70 a 80 m. Tal espesor disminuye al E y al W, acusando debajo del Zócalo unos 60 m y desapareciendo al pie de las Lomas de Chapultepec. Intercalados en la formación de arcillas lacustres aparece entre 30 y 40 m una capa dura debajo de gran parte de la Ciudad de México, la cual desaparece hacia el centro del vaso de Texcoco. Esta capa es testigo de una época seca en la que se redujeron considerablemente los lagos centrales.

En las zonas altas se encuentran domos dacíticos, lavas andesíticas y grandes depósitos de basalto en la zona Sur.

Al pie de las sierras y por el cambio brusco de la pendiente en los ríos, se localizan grandes depósitos aluviales de composición muy variable y estratificación cruzada o lenticular, manifestación de una dinámica erosiva muy prominente en los diferentes periodos de lluvia intensa alternados con otros muy secos.

Las partes bajas, entre las sierras y principalmente en la región central de la cuenca, predominan las formaciones lacustres constituidas por ceniza volcánica, intercaladas con pómez, arenas finas y limos. Estos depósitos cubren o aparecen intercalados con estratos de origen aluvial, o bien, se encuentran en contacto con las formaciones pétreas típicas de las zonas altas. En general estas formaciones lacustres son de baja resistencia al corte y alta compresibilidad.

Finalmente, en la zona de lago aparecen generalmente cinco estratos principales, denominados a partir de la superficie del terreno; costra superficial, formación arcillosa superior, capa dura, formación arcillosa inferior y depósitos profundos. Las características más importantes de cada estrato se definen a continuación.

- *Costra Superficial (CS)*. Compuesto por depósitos areno-arcillosos o limosos con abundancia de restos arqueológicos, o bien, rellenos artificiales que en algunos sitios de la ciudad llegan hasta 10 m de espesor.
- *Formación Arcillosa Superior (FAS)*. Suelos que formados por el arrastre y sedimentación de ceniza volcánica de tamaño ultrafino; está constituida por arcilla de alta compresibilidad, de varios colores, de consistencia blanda a media, su espesor oscila entre 15 y 32 m y contiene lentes delgadas de arena.
- *Capa Dura (CD)*. Se le atribuye un espesor de aproximadamente 3 m y una composición de suelos limo-arenosos compactos o rígidos, cementados con carbonato de calcio.
- *Formación Arcillosa Inferior (FAI)*. Compuesta por arcilla volcánica semejante a la de la Formación Arcillosa Superior, pero más comprimida y resistente, en espesores de 4 a 14 m.
- *Depósitos Profundos (DP)*. Depósitos de arena con grava separados por estratos de limo o arcilla arenosa.

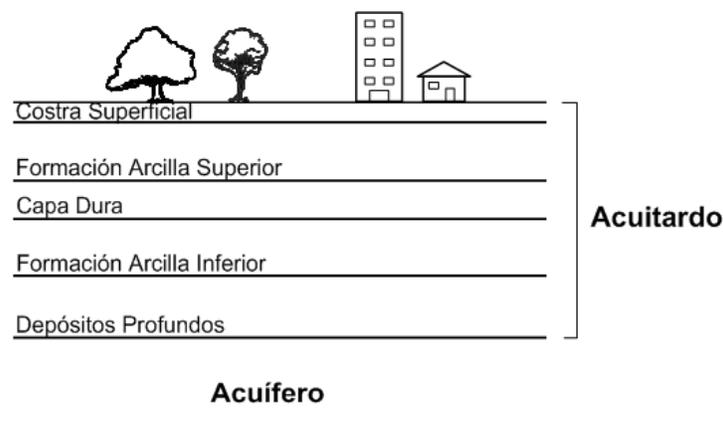


Figura 1.2. Mapa esquemático de la distribución de los estratos que conforman a la zona de lago.

### b.3 Aspectos geotécnicos

Como resultado de una gran cantidad de sondeos de penetración (Figura 1.3), realizados en zonas de la Ciudad de México y Texcoco por Marsal y Mazari (1959), estos investigadores propusieron dividir a la Ciudad en 3 zonas desde un punto de vista estratigráfico.

La primera de ellas, la Zona de Lomas fue originada por la actividad de la Sierra de las Cruces. Está constituida por terrenos compactos, areno-limosos, con alto contenido de grava unas veces y con tobas pumíticas bien cementadas otras; por algunas partes esta zona invade los derrames basálticos del Pedregal.

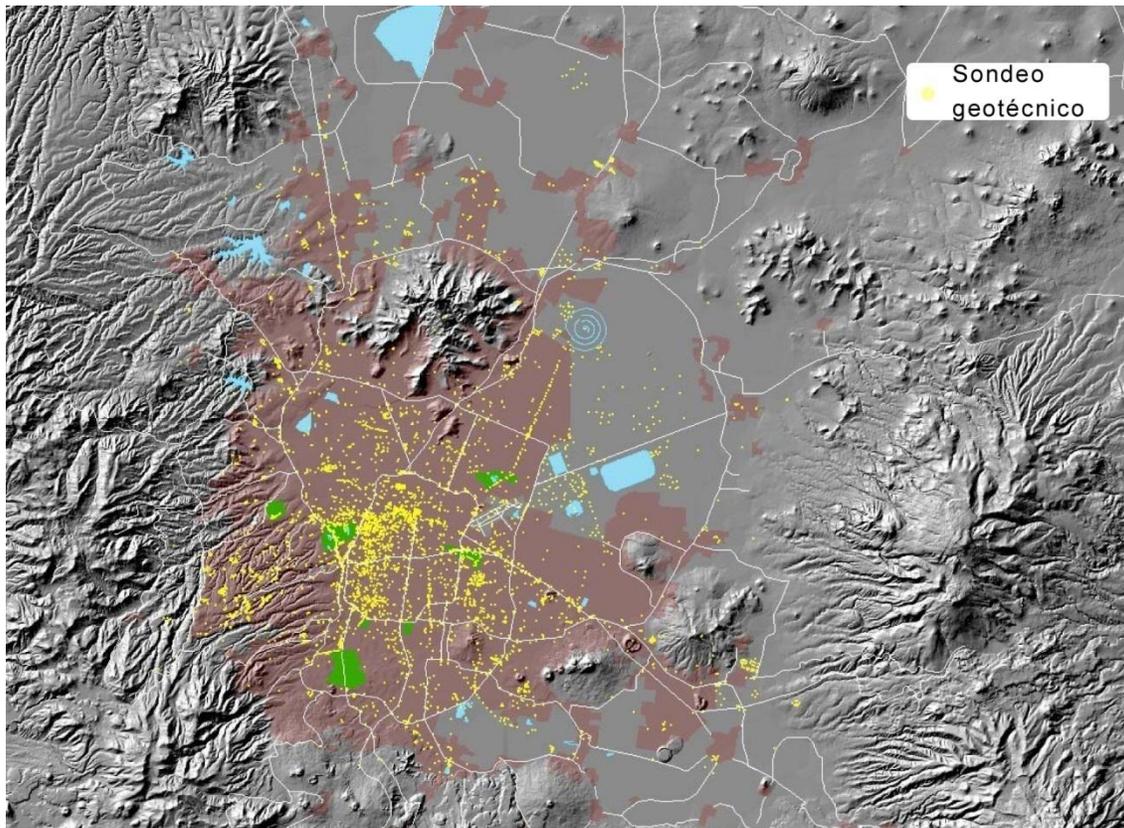


Figura 1.3. Distribución espacial de los sondeos geotécnicos en Ciudad de México y Texcoco.

La Zona de Transición, se localiza entre las serranías del poniente y el fondo del lago de Texcoco, presenta una gran variación de la estratigrafía de un punto a otro. En general aparecen depósitos superficiales arcillosos o limosos, orgánicos, cubriendo arcillas volcánicas muy compresibles que se presentan en espesores muy variables, con intercalaciones de arenas limosas o limpias, compactas. Todo el conjunto yace sobre mantos potentes, principalmente de arena y grava.

La Zona del Lago está compuesta principalmente de arcillas de alta compresibilidad. A través de diversos sondeos en ésta zona, se define la estratigrafía típica de esta zona, exhibiendo los siguientes estratos:

- 1) Depósitos areno-arcillosos o limosos o bien rellenos artificiales de hasta 10 m de espesor.
- 2) Arcillas de origen volcánico, altamente compresibles, con intercalaciones de pequeños lentes de arena.
- 3) La primera capa dura, de unos 3 m de espesor, constituida por materiales arcillo-arenosos o limo-arcillosos muy compactos. Esta capa suele localizarse a una profundidad del orden de 33 m.
- 4) Arcillas volcánicas de características semejantes a las del inciso 2, aunque con una estructura más compacta, con un espesor de entre 4 a 14 m.
- 5) Estratos alternados de arena con grava y limo o arcilla-arenosa.

En algunos sitios, a partir de 65 m, se ha encontrado un tercer manto arcilloso compresible.

## Capítulo 2. Adquisición y procesado de datos

### a. Introducción

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se tenían hasta el año 2007 contabilizadas y localizadas 120 zonas de agrietamientos, según lo indica el informe “Evaluación y control de riesgos geotécnicos en la Zona Metropolitana del Valle de México” elaborado para la Secretaria de Obras del Gobierno del Distrito Federal por parte del Instituto de Ingeniería. En dicho informe se presenta un mapa general de la zona de estudio en donde se señala de forma puntual en color rojo, los sitios en los cuales existe la presencia de agrietamientos (Figura 2.1). Ésta lámina presenta la desventaja de no mostrar la dirección de propagación de las grietas y su longitud. Sin embargo, permite estimar solamente para algunos sitios una dirección preferencial de propagación.

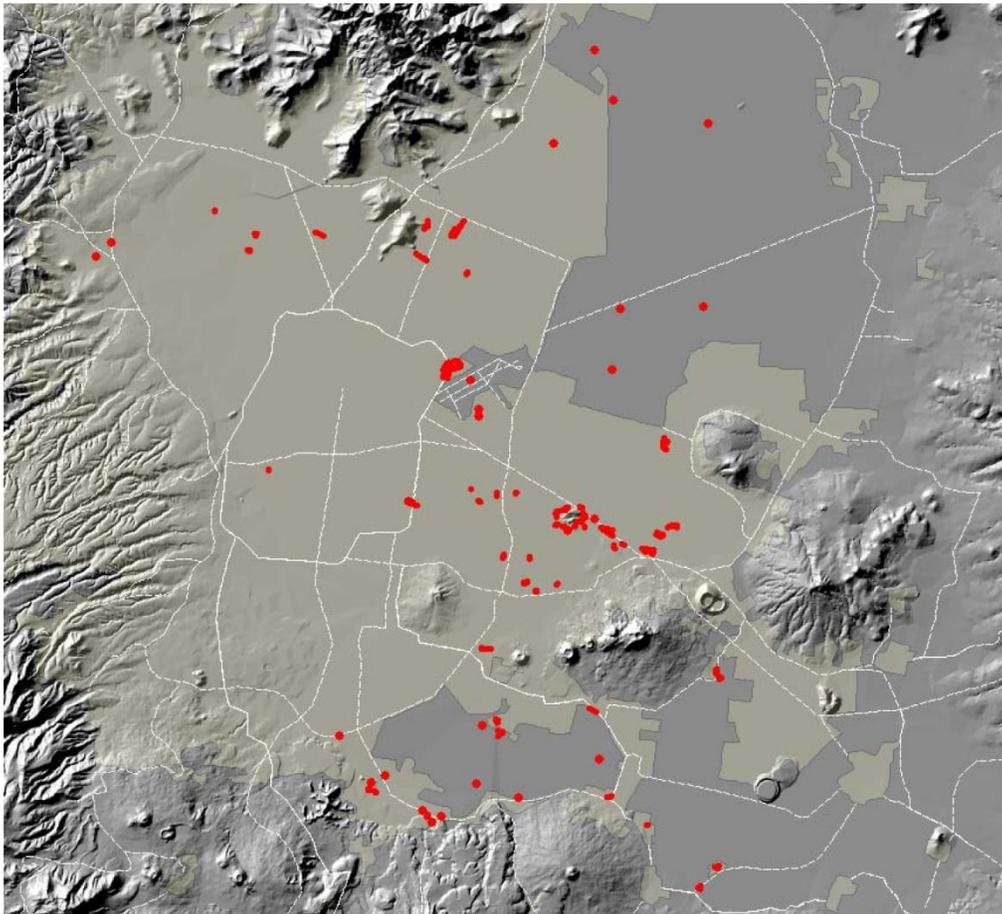


Figura 2.1. Distribución espacial de los sitios identificados en el informe para el GDF (Auvinet *et al*, 2007)

Posteriormente, en la XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos (2008), se da a conocer el mapa de contorno de igual espesor del acuitardo de una parte de la Cuenca de México, el cual fue

construido con base en la información de más de 10,000 sondeos geotécnicos, de los cuales solamente 246 alcanzan la profundidad de los depósitos profundos (Figura 2.2). Se denomina acuitardo al material que se encuentra entre la superficie del terreno y los depósitos profundos, en general es arcilla de alta compresibilidad, baja resistencia y permeabilidad muy baja. De ésta manera, la Costra Superficial, la Formación de Arcilla Superior, la Capa Dura y la Formación de Arcilla Inferior conforman al *acuitardo*. Y al material que se localiza debajo en los depósitos profundos se denomina *acuifero*. Sobre el mapa de acuitardo se sobreponen los sitios de agrietamientos, mismos que se presentan en la figura 2.1

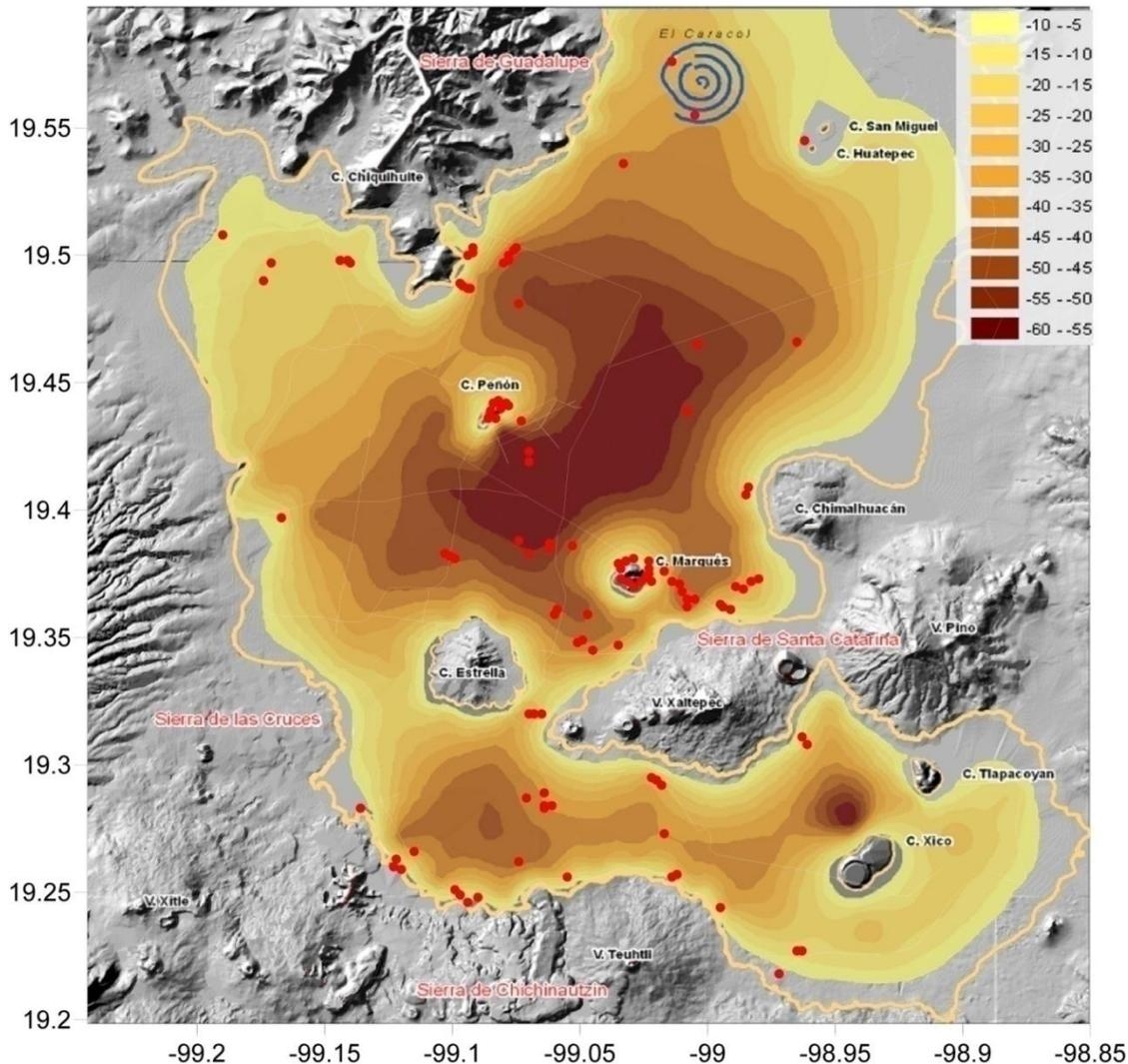


Figura 2.2. Mapa de contorno del espesor de igual acuitardo, m. Las zonas más oscuras representan los mayores espesores de arcilla. Los puntos en rojo presentan los sitios de agrietamiento. Modificada de Juárez M., *et al.*, 2007.

En la figura 2.3 se identifican los mismos sitios de agrietamientos superpuestos en el mapa de periodo dominante del suelo del reglamento vigente de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2004).

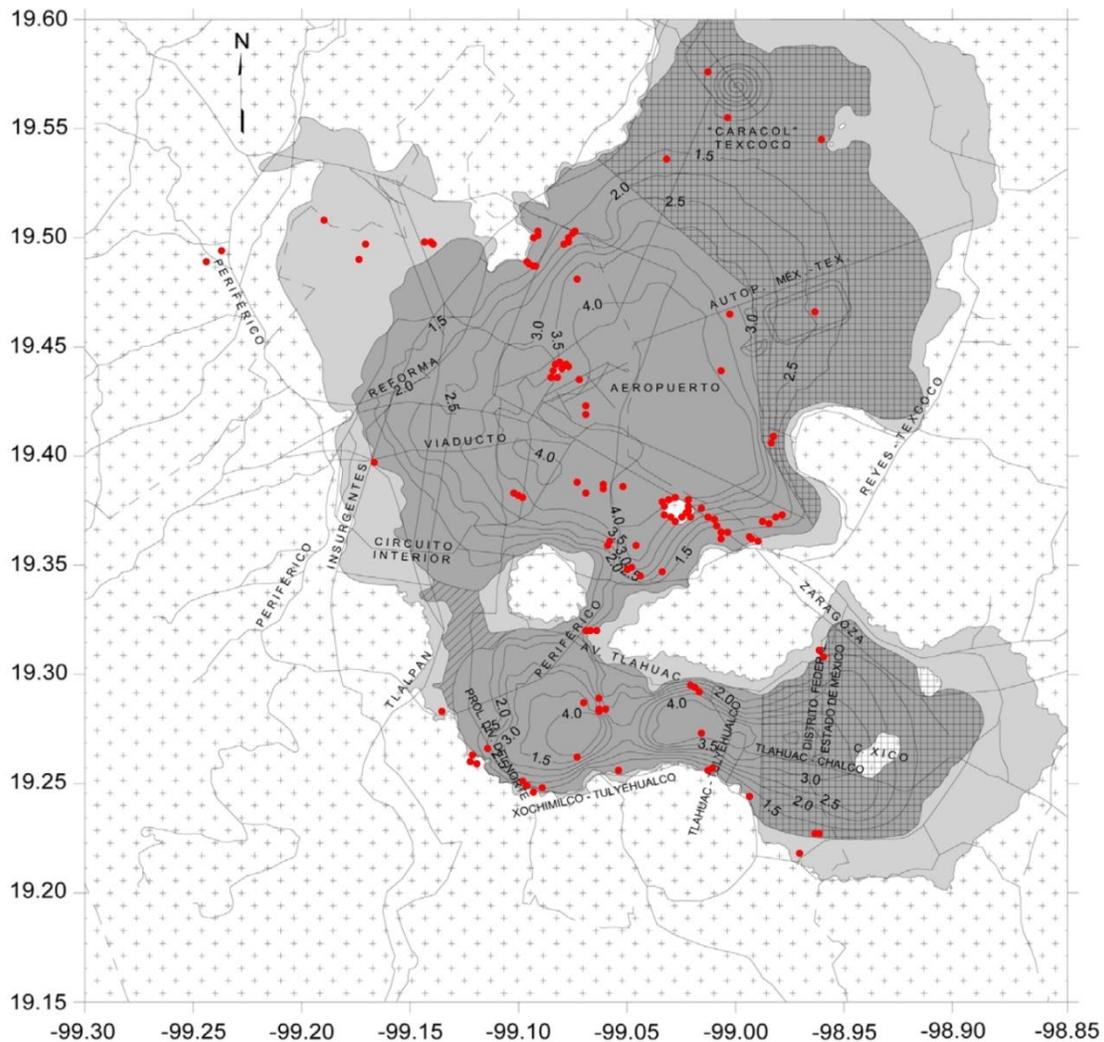


Figura 2.3. Mapa de periodo dominante,  $T_s$ , contenido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, 2004. Los puntos en rojo representan la localización de los sitios de agrietamiento.

De las figuras anteriores, se observa que existe una relación entre la aparición de este fenómeno de agrietamiento y con los límites entre los cambios de las curvas de periodo dominante y de espesor de acuífero. Muchos de estos agrietamientos se localizan en las partes bajas de los cuerpos montañosos que rodean a la ciudad de México y a los alrededores de las anomalías geotécnicas como el Peñón de los Baños y el Peñón del Marqués, precisamente en la zona definida como *transición abrupta*. Los casos de agrietamiento que resultan más interesantes son los que se localizan dentro de la zona de lago, donde en superficie no existe presencia de cuerpo rocoso alguno que pueda originarlo.

En este estudio se evaluó un caso de agrietamiento en la colonia Del Mar, comprendida dentro de la delegación Tláhuac, y que dista aproximadamente a 3 km de la Sierra de Santa Catarina, así como en sus alrededores utilizando registros de microtremores y aplicando la técnica de los Cocientes Espectrales para una sola estación (Nakamura, 1989).

**b. Metodología**

Los métodos sísmicos que utilizan el ruido ambiental como fuente, en los últimos años han tenido un auge en la aplicación de trabajos de ingeniería civil y sismológicos, para caracterizar la estratigrafía de un sitio así como para determinar la frecuencia natural de vibración del terreno o edificios. La técnica de campo consiste en medir las componentes longitudinal, transversal y vertical del movimiento oscilatorio de las ondas superficiales mediante tres sensores, nivelados y orientados hacia el norte geográfico, durante un periodo de tiempo definido. En cada sitio medido se lleva un registro el cual contiene el nombre del punto, hora, ubicación, coordenadas geográficas (GPS) y observaciones.

El procesamiento de los datos comprende en tomar lapsos o ventanas de 40 segundos de la señal y aplicarles el espectro de Fourier para cada una de las componentes horizontales y verticales, en un mismo intervalo de tiempo. Posteriormente se realiza el cociente espectral entre las componentes horizontales y vertical para obtener como resultado una función de transferencia empírica, la cual presenta un máximo absoluto en el dominio de las frecuencias, el cual indica la frecuencia dominante del suelo. Para el procesamiento de datos se emplea el programa computacional DEGTRA A4 ver. 4.0.

Los fundamentos teóricos sobre los cuales se sustenta ésta técnica, se detallan en el Anexo 1.

El inicio de la investigación consistió en georreferenciar la imagen de la figura 2.1. La georreferenciación se llevó a cabo tomando como punto de partida, para obtener una mejor precisión, todas las intersecciones de las vialidades marcadas con líneas en blanco y buscando dichas intersecciones en Google Earth para obtener sus coordenadas. La georreferenciación se realizó con el programa ArcGis 9.2. Una vez referenciada la imagen, se procedió a obtener las coordenadas geográficas de cada grieta marcada en rojo, con el fin de crear una base de datos en un sistema de información geográfica GIS.

Posteriormente se agruparon en familias las grietas con el siguiente criterio: los puntos que están muy próximos entre sí, de tal manera que pueden hacerse uno; o si su distribución espacial presenta una tendencia; se identifican como una familia de grietas. Con base a este criterio se obtuvieron 56 familias de grietas (Figura 2.4). En este trabajo se escogieron las familias 48, 49 y 50, localizadas entre los límites de las delegaciones Iztapalapa y Tláhuac.

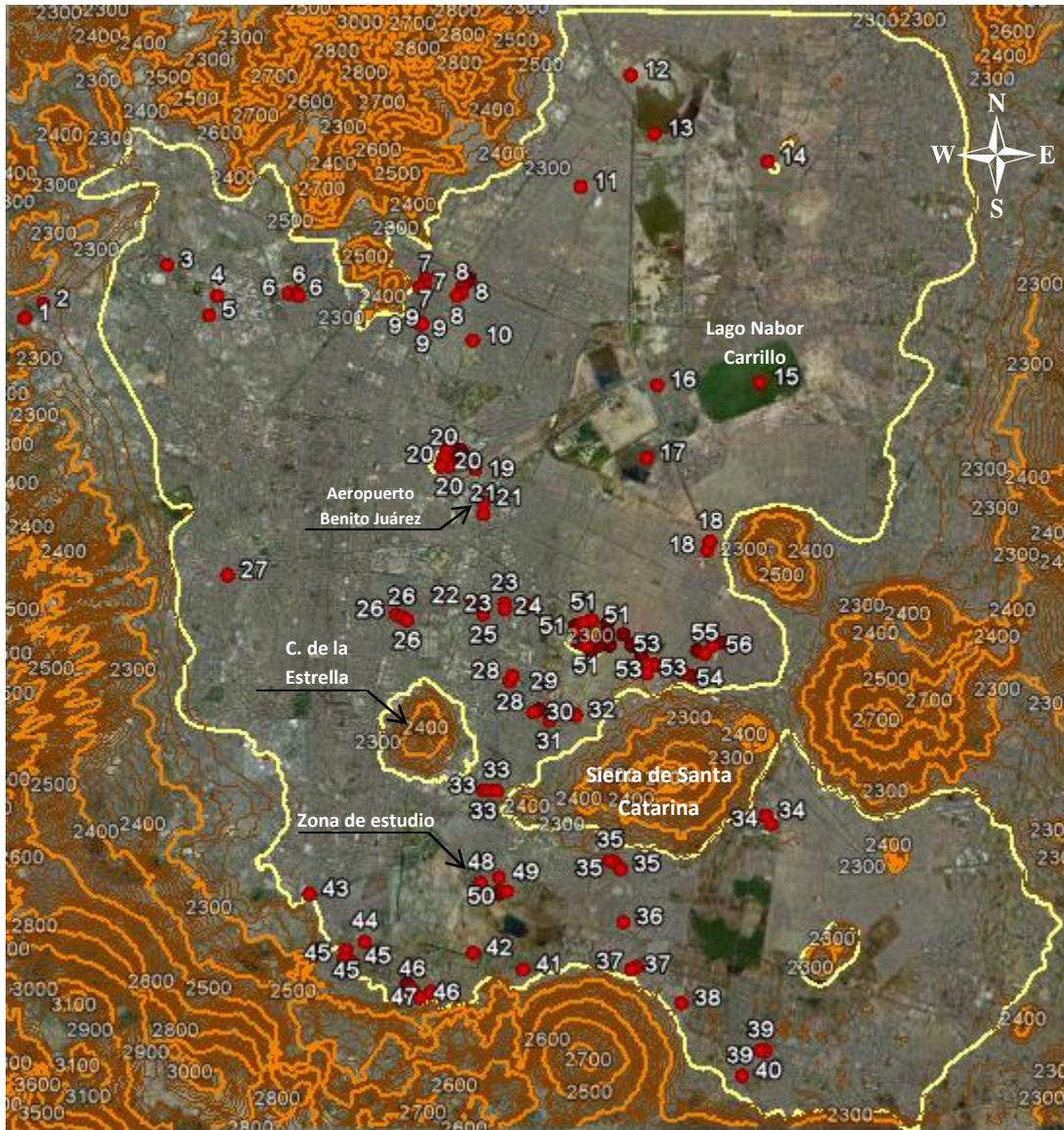


Figura 2.4. Localización y agrupamiento en familias de las grietas en la zona de estudio. La línea amarilla representa los límites de la zona de Lago.

### c. Adquisición de datos

En la adquisición de los registros de microtremores se utilizó 1 acelerómetro Kinematics Altus-K2, que cuentan con 3 sensores electrónicos para registrar las componentes Norte-Sur, Vertical y Este-Oeste, respectivamente. En cada punto se tomó una medición con duración de 180 segundos. El intervalo de muestreo de la señal fue de 100 muestras por segundo. La campaña de adquisición de datos duró un día, obteniéndose un total de 37 mediciones de vibración ambiental (Figura 2.5). La ubicación de los puntos se da antes, sobre y después de una grieta, para en la etapa de procesado de datos, analizar el cambio en los valores de periodo del subsuelo. En la figura 2.5 se muestra la distribución espacial de las mediciones tomadas, en marcas azules y su respectivo nombre, dentro de las instalaciones Agrupamiento Fuerza de Tarea y en línea negra la

delimitación de éste. En líneas rojas se representan las grietas que afectan a estas instalaciones, así como a las calles que están alrededor. Cabe mencionar que las grietas que se localizan dentro de las instalaciones fueron mapeadas con un GPS de mano eTrex de Garmin, producto de la inspección visual del terreno. Además se tomaron los rumbos de los agrietamientos y se tomaron fotografías para conformar un archivo fotográfico. Las grietas comprendidas en la delegación Iztapalapa fueron tomadas del plano del Centro de Monitoreo de Fracturamiento del Subsuelo de la delegación Iztapalapa.

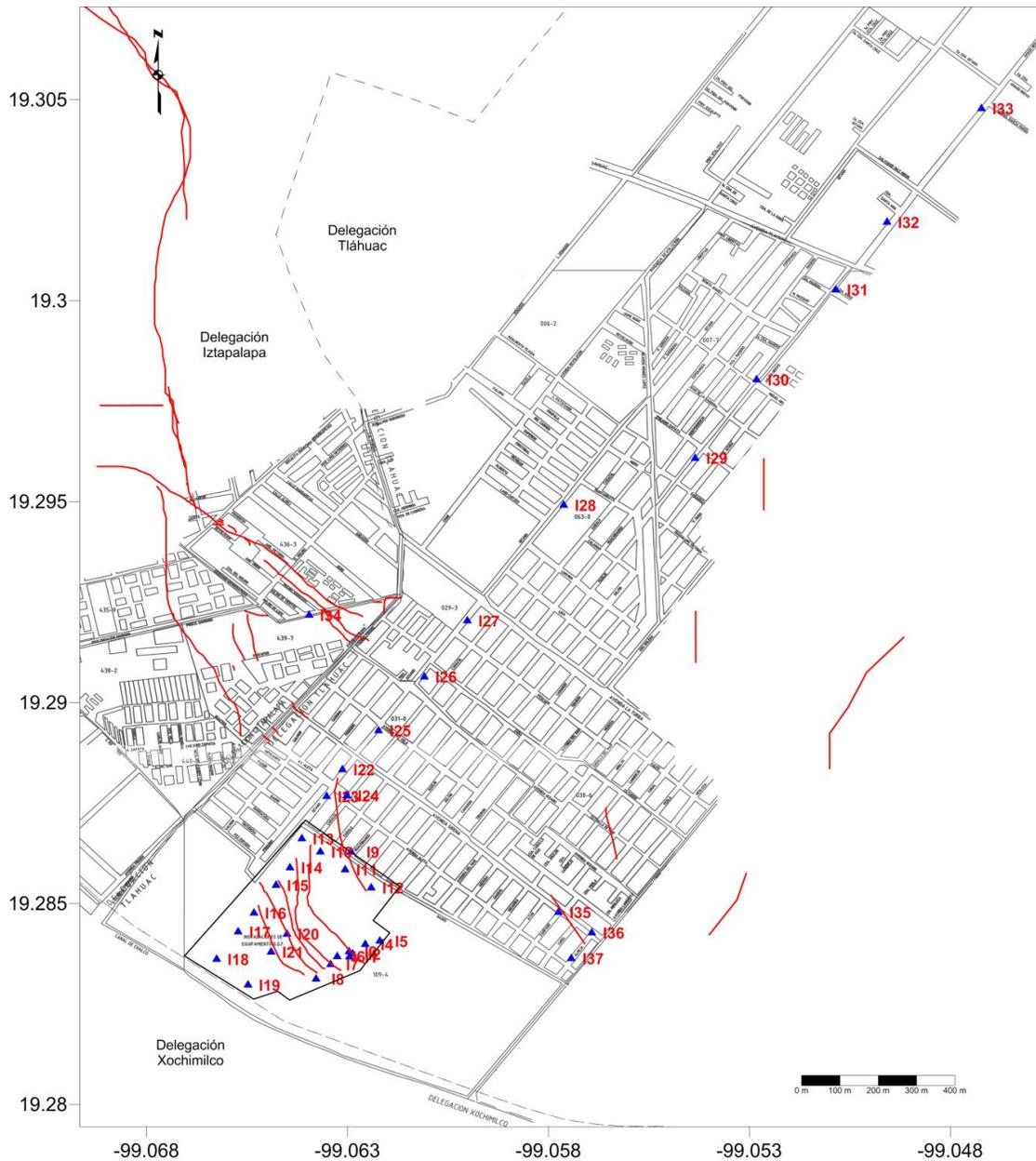


Figura 2.5. Localización espacial de los datos tomados en el plano de la colonia Del Mar, Tláhuac, así como de las grietas que afectan a la zona.

En el Anexo 2 se presenta una tabla con los valores de periodo dominante así como las gráficas de las Funciones de Transferencia para los 37 puntos. Las líneas azules representan cada subventana y la línea en rojo el promedio de éstas.

**d. Procesamiento de los datos**

Las señales registradas fueron transferidas a una PC. Se utilizó el programa KW2ASC.exe, para convertir las señales de su formato EVT a un formato ASCII, que contiene los datos de un evento registrado en sus tres canales, generando tres archivos de salida.

Una vez que se tienen las señales en formato ASCII, fueron visualizadas y analizadas con el programa DEGTRA A4 Ver. 4.0 (Ordáz y Montoya, 2002), como se muestra en la figura 2.6.

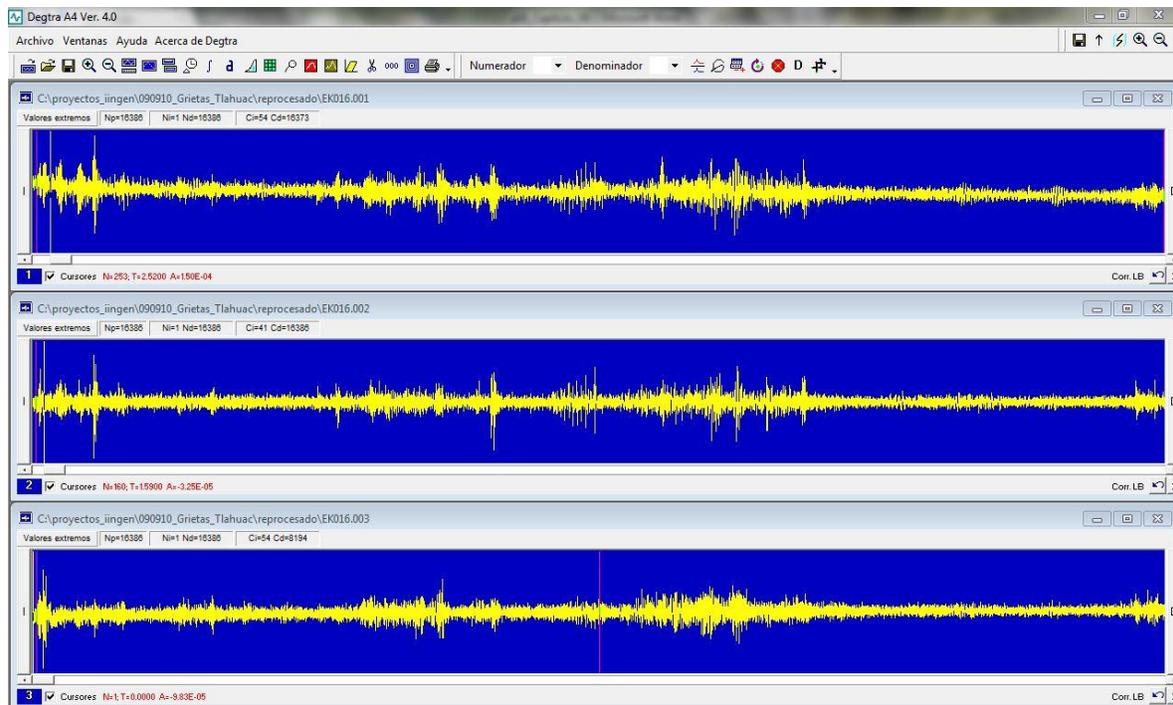


Figura 2.6. Visualización de un registro de microtremores. En la primera ventana se visualiza la componente N-S, en la segunda ventana la componente vertical y por último, en la tercera ventana la componente E-W.

En cada uno de los diferentes puntos se consideraron 4 subventanas de señal de 40 segundos para resaltar las bajas frecuencias. A cada subventana se le corrigió por línea base, para luego calcular el espectro de Fourier. Se seleccionó la misma ventana en cada pareja de registros correspondientes al mismo muestreo, esto es, la misma ventana en tiempo para la componente N-S y Vertical. Posteriormente se aplicó el cociente espectral de ambas señales para obtener la Función de Transferencia Empírica (FTE). En la figura 2.7 se presenta un ejemplo de una subventana seleccionada con su respectivo espectro de Fourier y su función de transferencia. Lo anterior se realiza también para la componente E-W y Vertical. Por lo tanto, se obtiene un total de

ocho funciones de transferencia para cada uno de los registros, que son guardados en formato TXT.

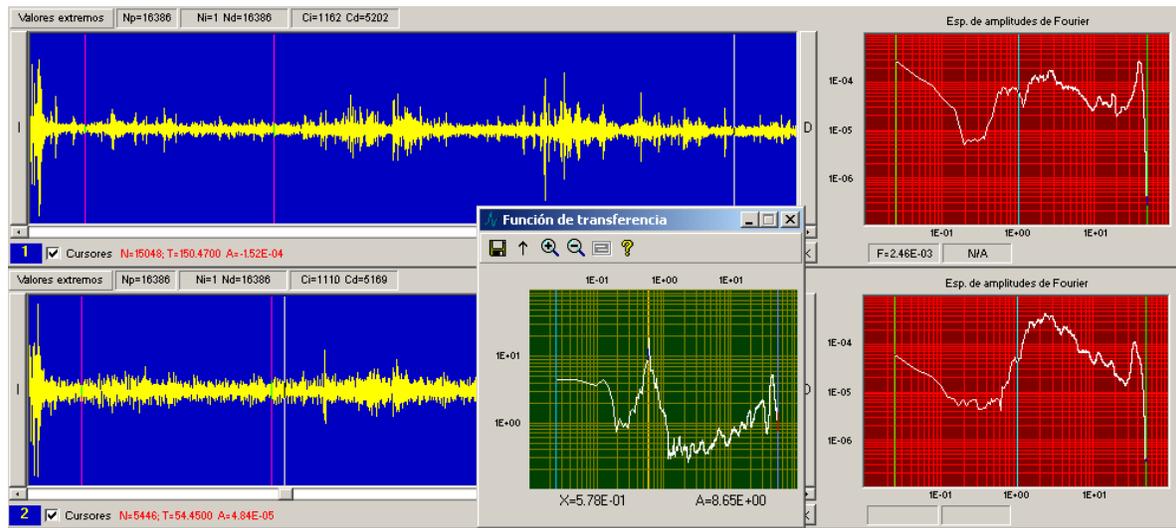


Figura 2.7. Ejemplo de un registro de microtremor. En la ventana 1 se presenta la componente N-S y en la ventana 2 la componente Vertical. Las subventanas están delimitadas entre líneas color rosa y ambas corresponden al mismo intervalo de tiempo de la señal. Del lado derecho se tiene el espectro de Fourier de cada subventana. El recuadro en verde indica la FTE, resultado del cociente espectral de la subventana 1 entre subventana 2.

En la figura 2.8 se presenta un ejemplo de un archivo de salida en formato TXT que contiene la información de la función de transferencia empírica obtenida. Estos archivos de salida son guardados con un formato en específico: el número de punto, su componente y el número de subventana. En este caso el nombre del archivo, de la relación N-S y Vertical, es "p12n1". Para el caso de la FTE para la componente E-W, el nombre del archivo es "p12e1". Estos archivos son editados, borrando la primera línea, para poder ser graficados con el programa MATLAB con un código programado para ésta tesis. En la figura 2.9 se presenta un ejemplo de las gráficas que genera el código mencionado. Las líneas azules representan cada subventana y la línea en color rojo el promedio de estas. A todos los espectros se les aplicó un suavizado simple de 3 puntos. En el Anexo 5 se muestra el código programado en MATLAB que las genera dichas gráficas.

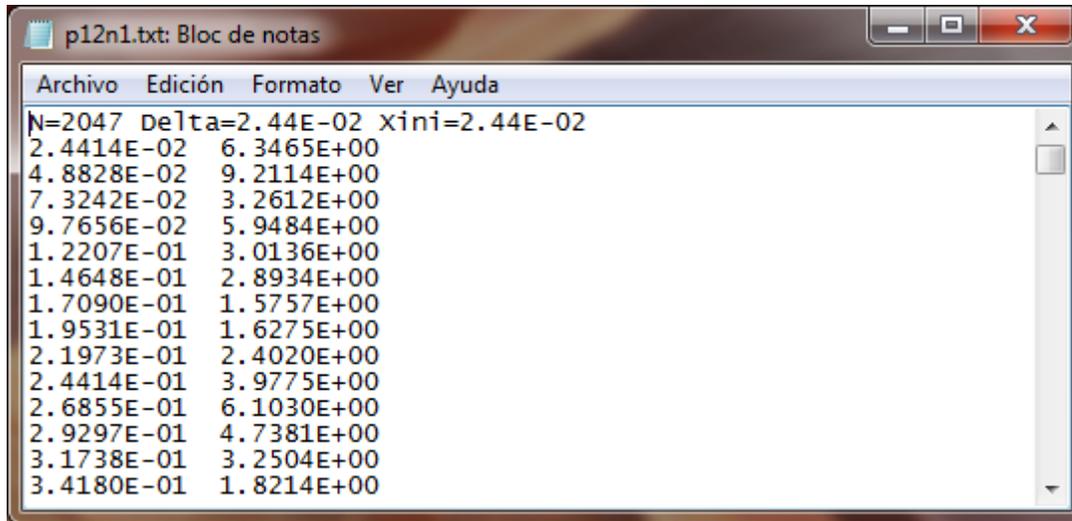


Figura 2.8. Ejemplo de un archivo de salida de una función de transferencia. En la primera línea se muestra la información del archivo. La columna de la izquierda representa las frecuencias con su correspondiente amplitud.

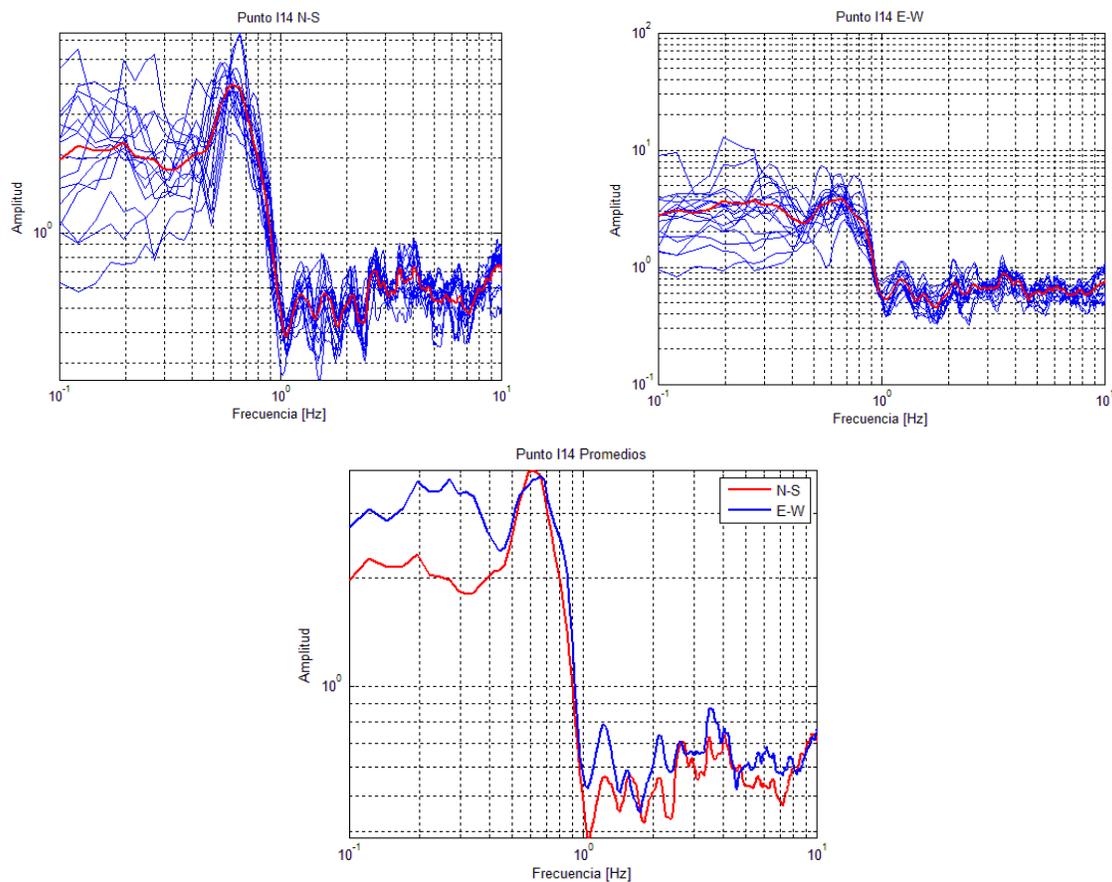


Figura 2.9. Funciones de Transferencia de las componentes Norte – Sur, Este – Oeste y promedio de éstas.

Por último, para cada FTE promedio se identificó su frecuencia dominante, para después promediarlas y obtener el valor promedio del punto l1 periodo dominante ( $T_0$ ). Por ejemplo, en la figura 2.9, la FTE promedio es de 0.6 [Hz] ( $T_0 = 2.7$  segundos).

Para generar los mapas de isoperiodos se usó el programa Surfer 9. El método de interpolación usado fue Kriging. Este método fue utilizado pues presenta una buena resolución ya sea que se utilice con una baja o alta densidad de puntos; además de ser uno de los métodos más utilizados para generar interpolaciones en el ámbito ingenieril.

## Capítulo 3. Agrietamientos

### a. Introducción

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

### b. Antecedentes

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

En 1953 la ciudad de México cubría 240 km<sup>2</sup> de la superficie total de la Cuenca de México, siendo el 3%, mientras que en 1980 había aumentado a 980 km<sup>2</sup>, equivalente al 14%. En esos años, se construyó un sistema de drenaje profundo para eliminar la torrencial escorrentía que generaban miles de kilómetros cuadrados de asfalto y concreto, por lo que con este sistema de drenaje se acabaron de secar casi todos los antiguos lechos del lago. En los recientes años, y ante los pocos o

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

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

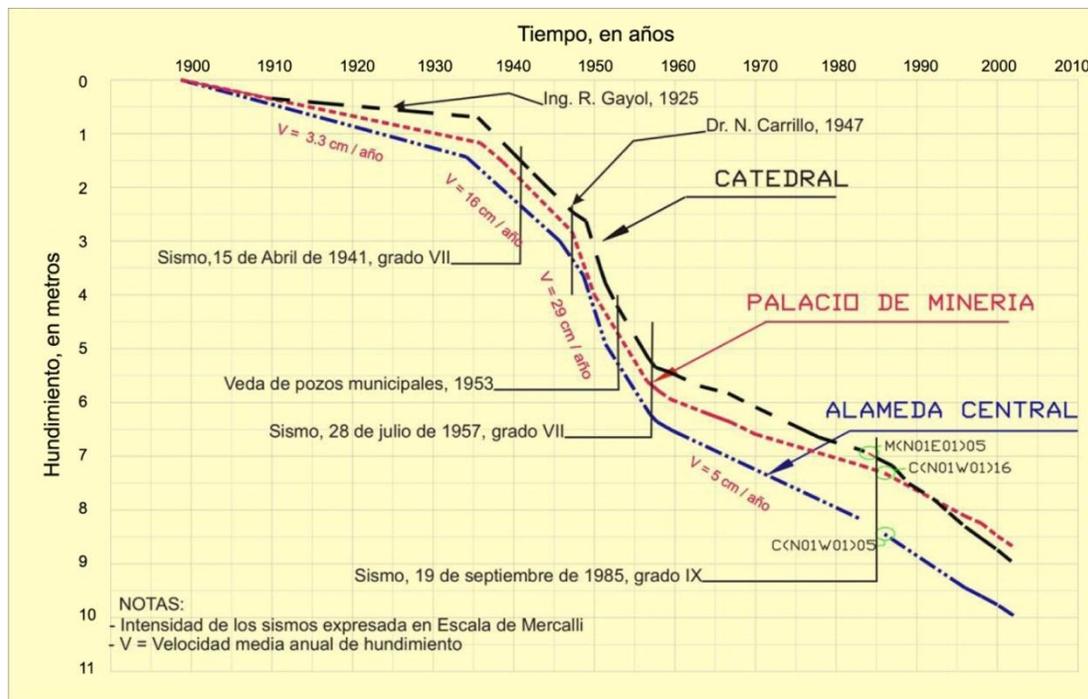


Figura 3.1. Evolución de los hundimientos en la ciudad de México para el periodo 1898 – 2002.

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

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

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

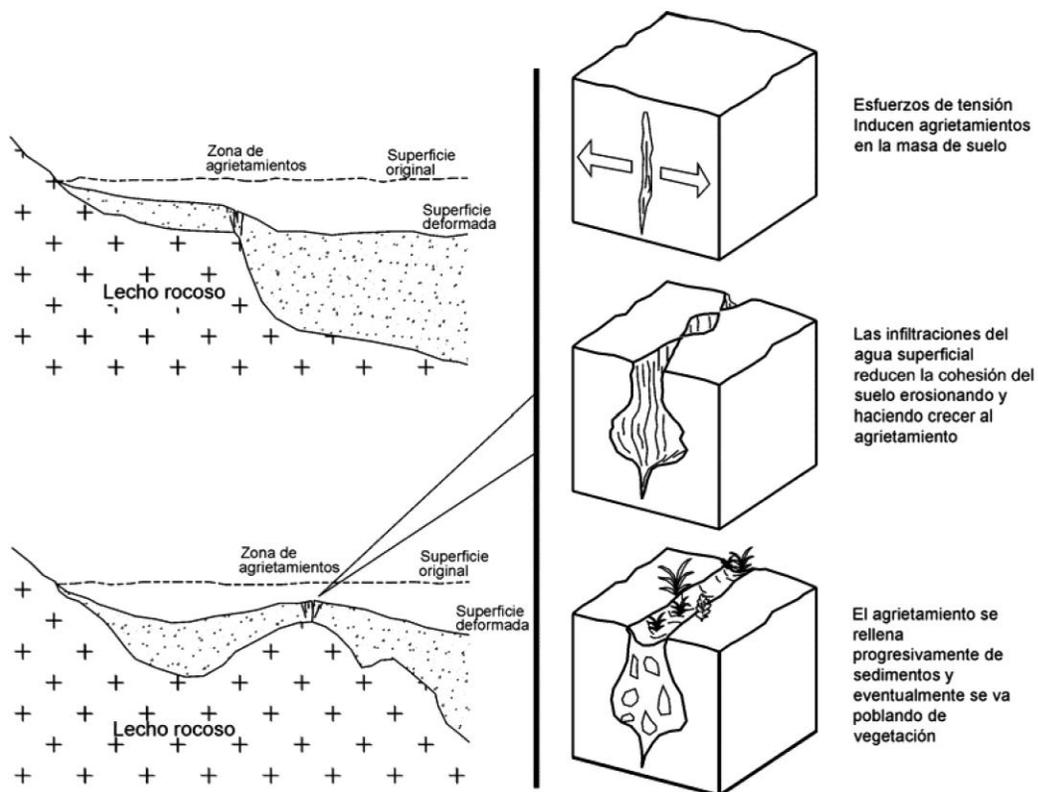


Figura 3.3. Esquema de la generación de agrietamientos después de una lluvia torrencial. Adaptado de Carpenter (1999).

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

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

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

La generación de grietas de origen geológico están asociadas con:

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

La generación de grietas asociadas al flujo de agua son:

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

### **c. Mecanismos de generación de grietas**

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

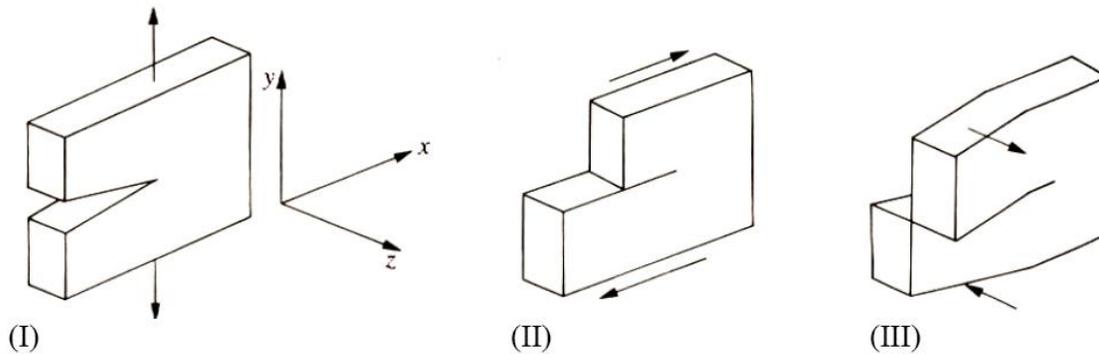


Figura 3.4. Diferentes modos de fractura.

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

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

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

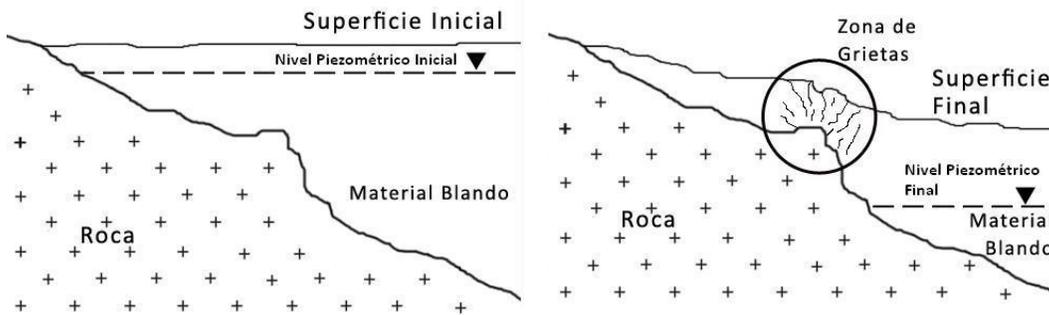


Figura 3.5. Grietas generadas por transición brusca.

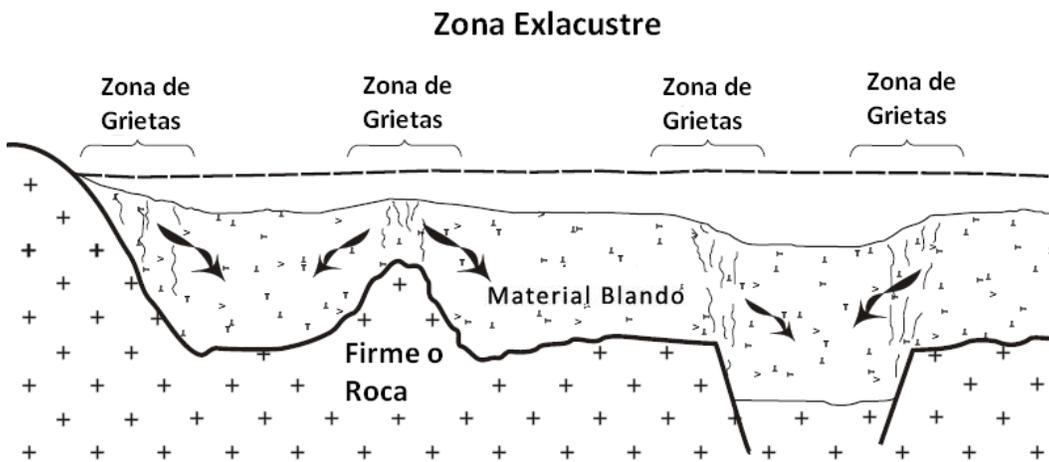


Figura 3.6. Modelo de generación de grietas por presencia de estructuras sepultadas.

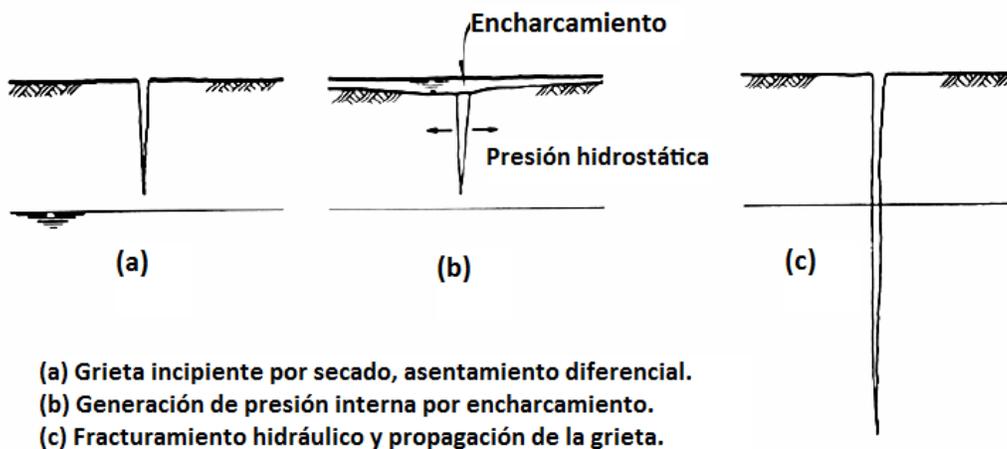


Figura 3.7. Grietas generadas por fracturamiento hidráulico.

**d. Subsistencia y agrietamiento en la Cuenca de México**

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

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

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

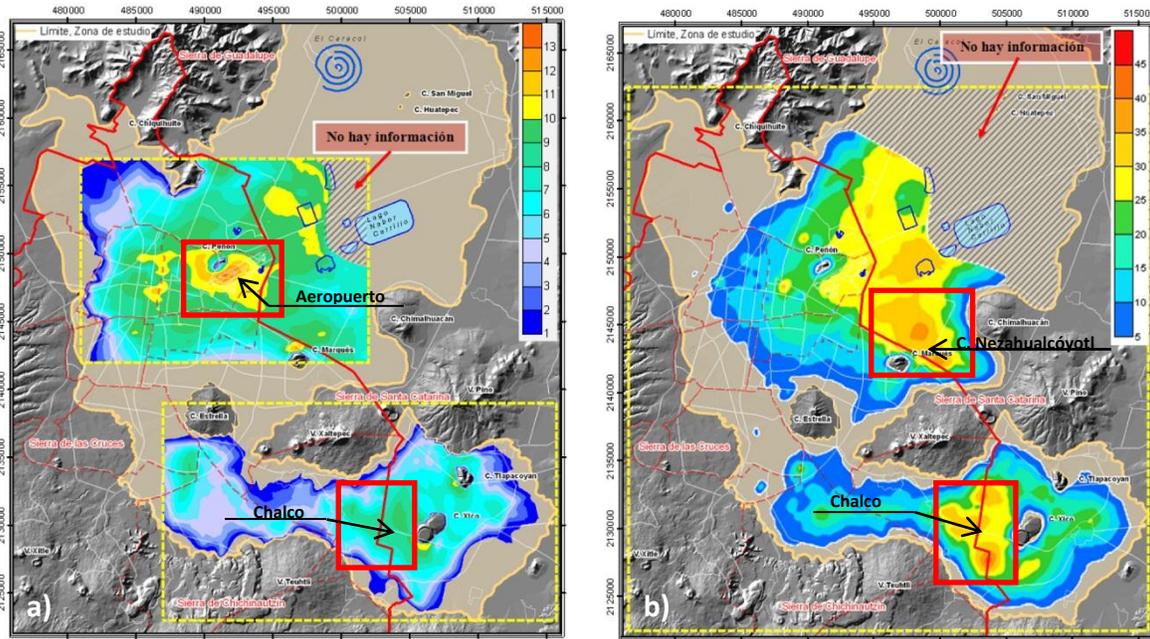


Figura 3.10a, hundimiento regional absoluto (m), 1862 - 2005 , figura 3.10b, velocidades de hundimiento (cm/año), 2000 - 2005. (Méndez, 2008).

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

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

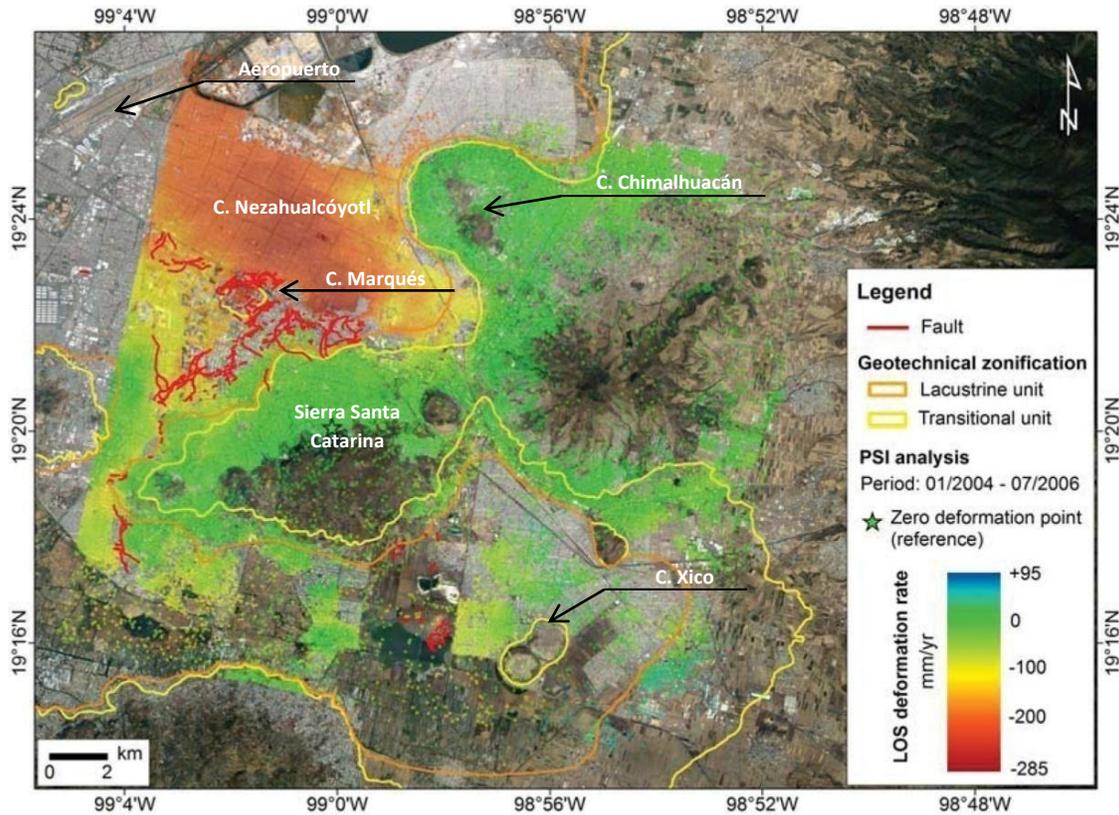


Figura 3.11. Subsidencia del sureste de ciudad de México. Las líneas en rojo representan las grietas existentes en Iztapalapa, Tláhuac y Chalco. Las líneas en amarillo y naranja representan la zonificación geotécnica vigente (GDF, 2004) (Cabral, *et. al*, 2010).

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

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

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



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

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

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

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

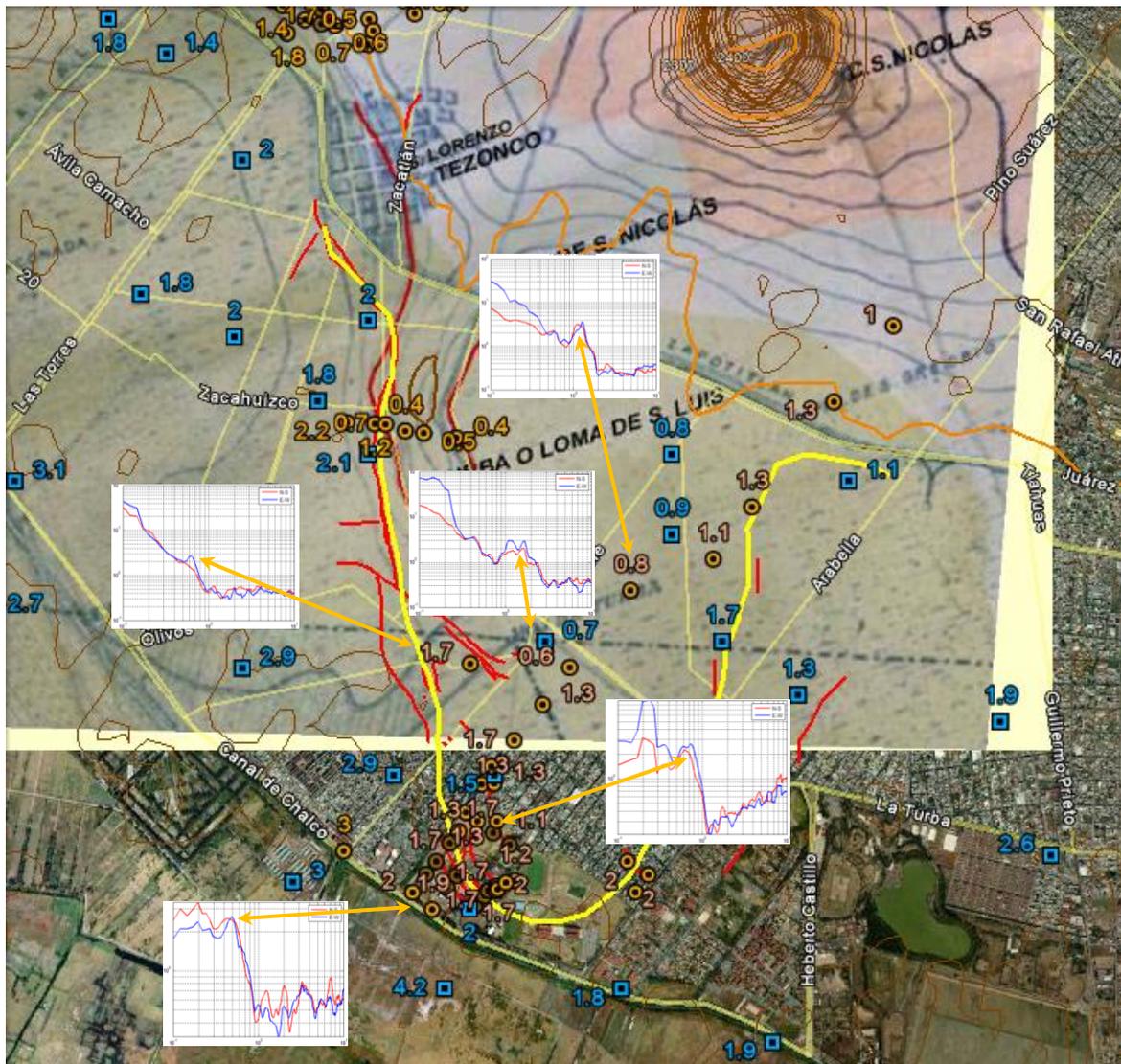


Figura 3.14. Localización espacial del derrame volcánico de la Sierra de Santa Catarina delimitado con línea amarilla. Las líneas en rojo representan los agrietamientos existentes en la parte oriente de la delegación Iztapalapa y poniente de la delegación Tláhuac. Las líneas en café y naranja corresponden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

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

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



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

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



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



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

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

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

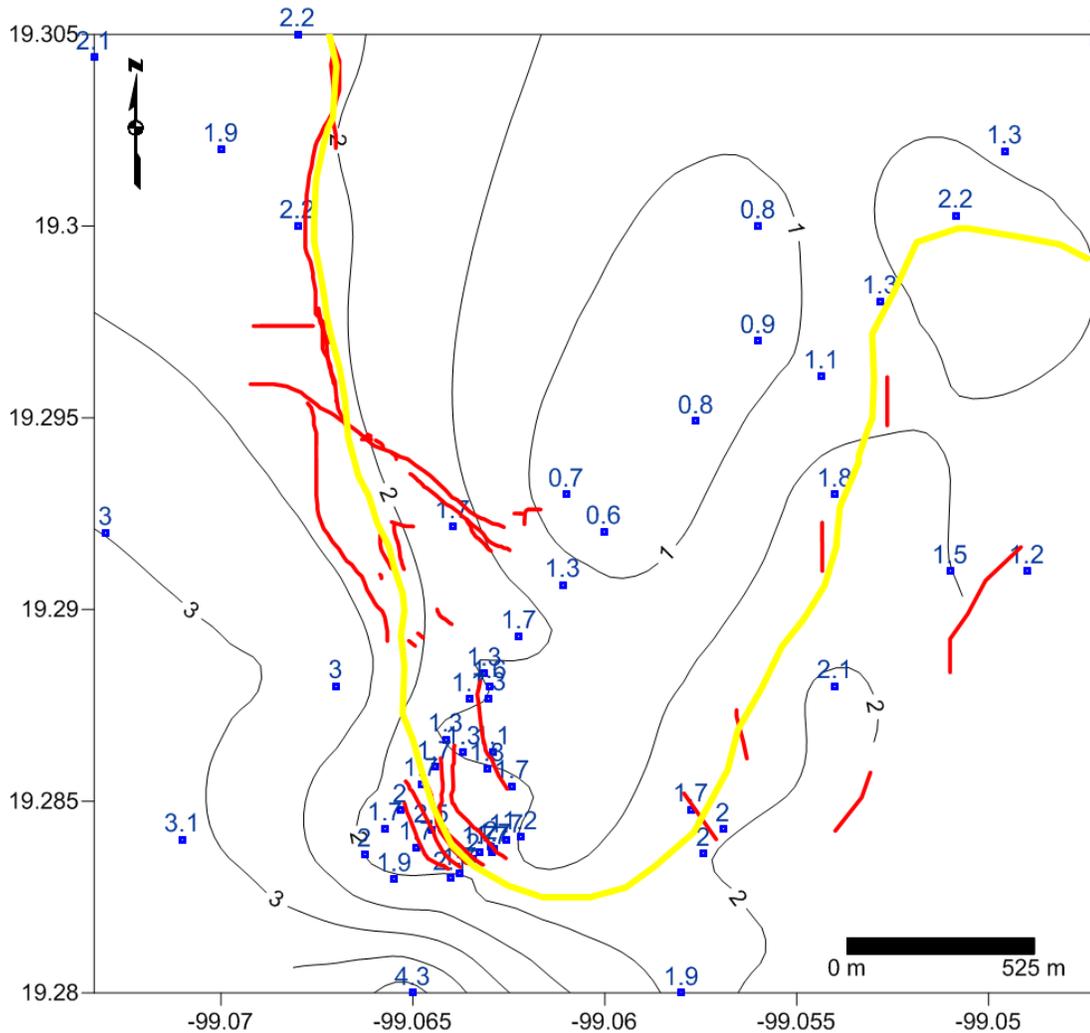


Figura 3.18. Mapa regional de la zona estudiada. En la esquina inferior izquierda se localiza el predio estudiado a detalle. En la parte central se visualiza en colores claros los valores mínimos comprendidos entre 0.6 y 0.8 s. asociados a zona de transición. En superficie esta zona presenta un cambio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

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

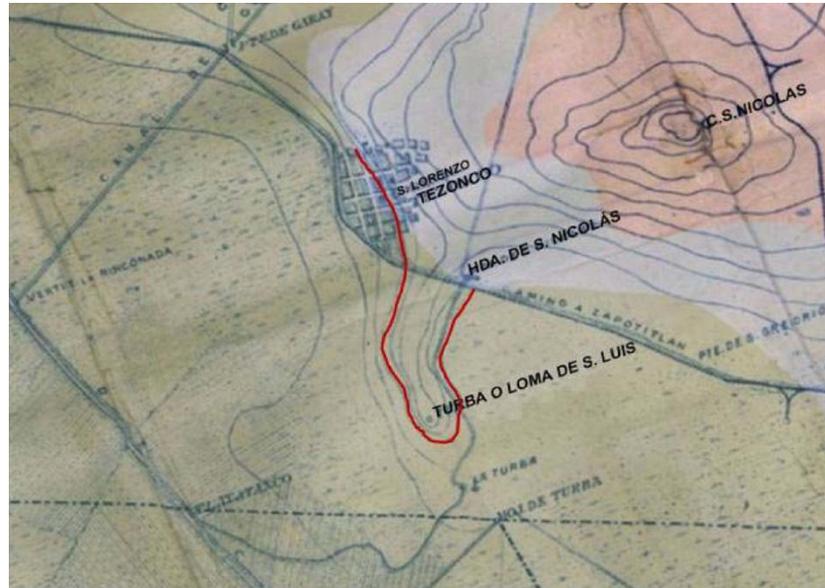


Figura 3.19. Sección del Plano de la ciudad de México de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1927. La forma de la anomalía está representada en línea roja.

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

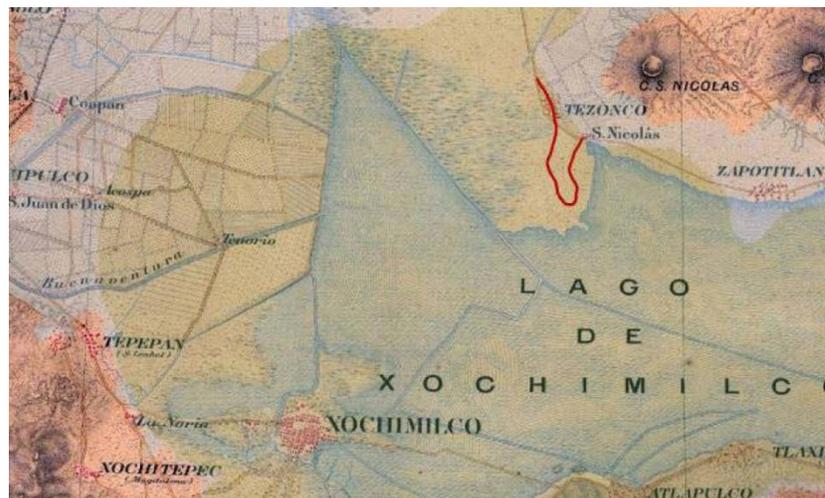


Figura 3.20. Sección del plano corográfico de Fernández Leal, 1899. La forma de la anomalía está representada en línea roja.

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

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



## Capítulo 4. Microtremores

### a. Introducción

De las diferentes técnicas que utilizan microtremores, la de Nakamura (1989) ha tenido bastante aceptación debido a su fácil implementación tanto en el trabajo de campo como en el procesamiento de los datos. La instrumentación consiste en un acelerómetro triaxial con el cual se registran microtemblores en superficie, su procesamiento es simple, consistiendo en la determinación de los espectros de Fourier de las componentes Horizontal (H) y vertical (V), y finalmente realizar la relación espectral H/V, lo cual según Nakamura da la función de transferencia aproximada del subsuelo. En este capítulo se expondrán algunas observaciones sobre el actual mapa de periodos dominantes de las N.T.C. para Diseño por Sismo para el Distrito Federal, también se describirá los cambios observados en los valores de periodo del suelo en un periodo de tiempo de veinte años.

### b. Observaciones sobre el mapa de periodos predominantes de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo

El fenómeno del hundimiento regional no sólo ha generado la aparición de agrietamientos en superficie así como la reducción del espesor en el subsuelo de la ciudad de México, sino que también ha causado cambios en los valores de periodo dominante del suelo. El trabajo realizado por Lermo y Chávez en 1992 “Estimación de periodos dominantes y amplificación relativa en zonas faltantes del DF”, sentó las bases para la generación de un prototipo de mapa de periodos dominante, construido mediante 502 datos de microtremores y aceleración que dan una estimación de los efectos locales de los suelos al ser sometidos a las ondas sísmicas (Figura 4.1). Esta información sirvió como base para, posteriormente generar el mapa vigente de periodos dominantes de las N.T.C. por Diseño para Sismo, mediante algunas modificaciones.

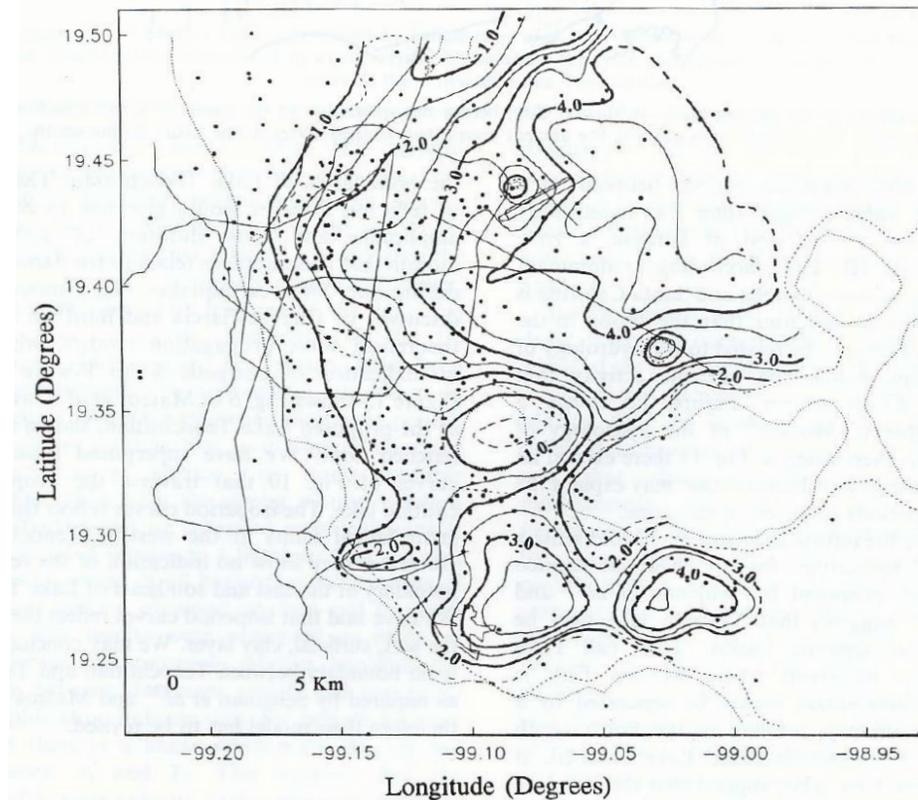


Figura 4.1. Propuesta de mapa de isoperiodos para la ciudad de México (Lermo y Chávez, 1992).

En 2004 se hace público el mapa vigente para Diseño por Sismo, el cual siendo analizado detalladamente, presenta inconsistencias sísmicas, principalmente alrededor del Peñón de los Baños y el Peñón del Marqués, en donde las curvas de isoperiodo 3.0s a 4.0s prácticamente cruzan por debajo a estos cuerpos montañosos, lo cual desde el punto de vista ingenieril es ilógico (Figura 4.2). Es de esperarse tener curvas de isoperiodo alrededor de los cerros que sobresalen en el interior de la zona de lago, a semejanza de las curvas de igual profundidad de la figura 2.2. De esta manera, se tendría una configuración similar para las curvas de isoperiodos alrededor de esas anomalías geotécnicas. Esto se justifica porque existe una relación entre el espesor de suelo y el valor de periodo dominante.

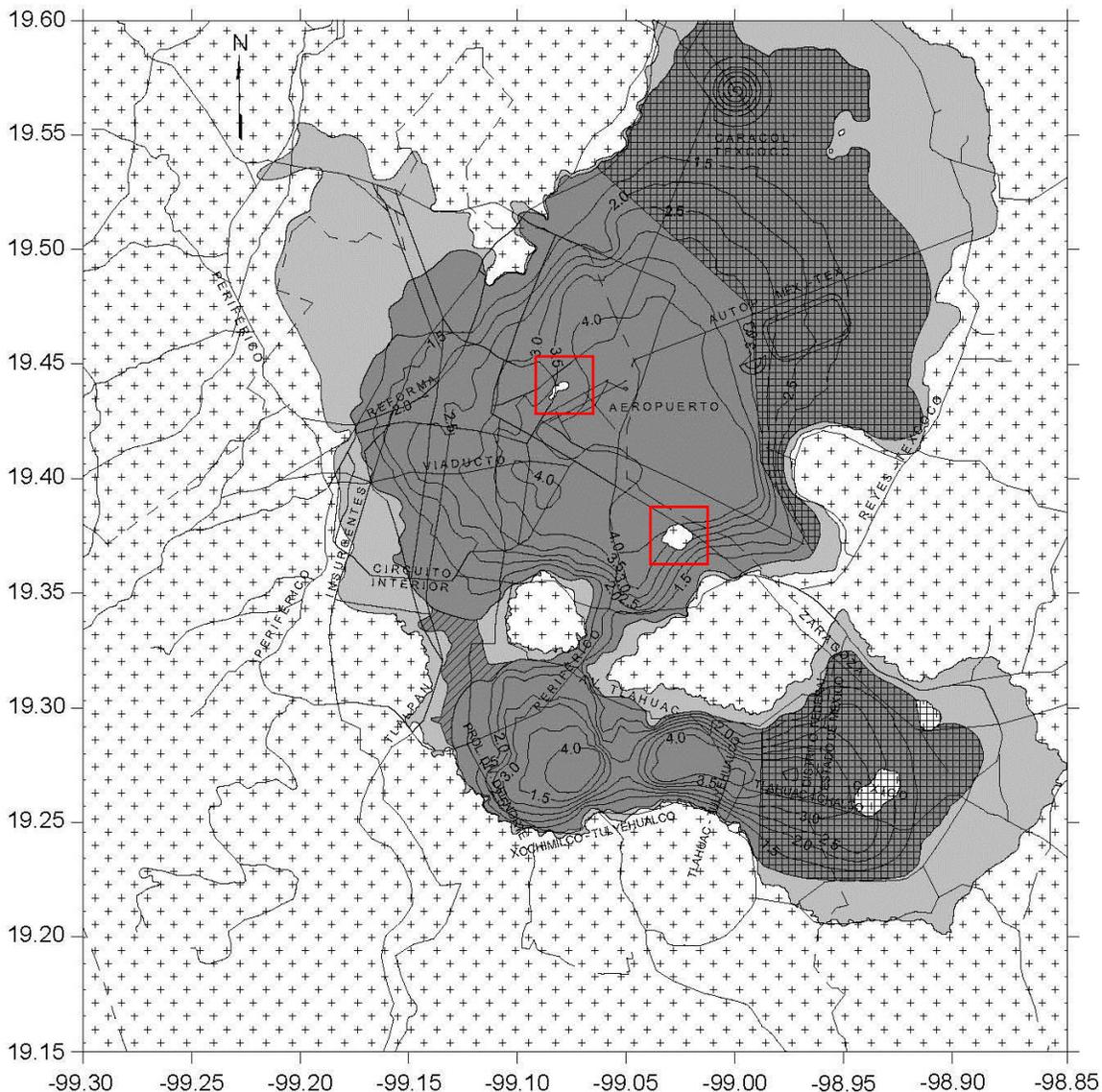


Figura 4.2. Mapa de periodos predominates del suelo vigente para las N.T.C., 2004. Las zonas en recuadro rojo presentan las inconsistencias citadas.

En la figura 4.3, se presenta la topografía y la morfología de los cuerpos montañosos que rodean a la ciudad de México. En esta lámina se puede observar la transición entre los cuerpos montañosos y la zona de lago, marcada por una franja de amplitud variable en color rojo, la cual en algunas zonas presenta una mayor extensión, lo cual representa una transición lenta a los depósitos de lago. Por el contrario, las zonas con una transición más rápida hacia los depósitos blandos está representada por una franja mucho más delgada. Nótese como la forma de esta franja en rojo coincide con la geometría de la línea en negro, la cual marca el límite entre la zona de loma, caracterizada por valores máximos de periodo de 0.5s y la zona de transición (0.6s a 1.0s). Esta línea se obtuvo del actual reglamento de periodos predominantes.

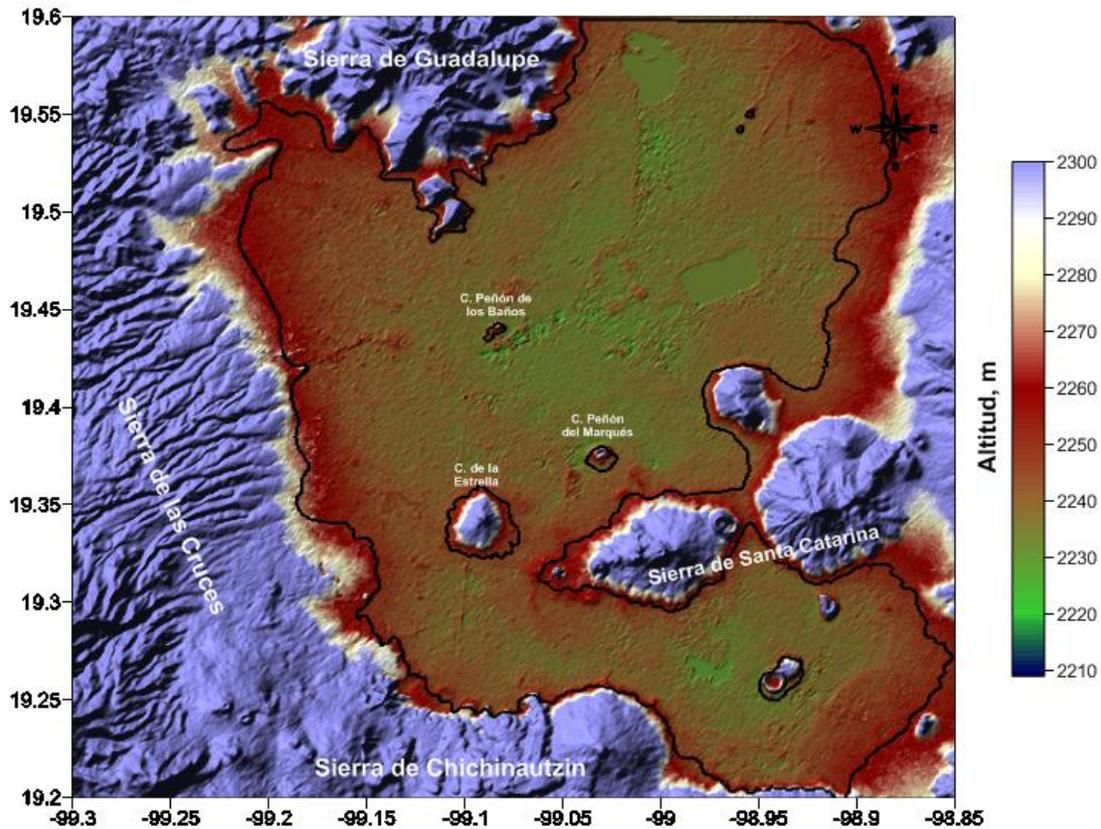


Figura 4.3. Morfología de la ciudad de México.

Los límites 0.5s y 1.0s del vigente reglamento fueron establecidos con base en 87 datos contenidos en el estudio de Lermo *et. al.* (1992), cantidad que es claramente insuficiente para marcar un límite confiable con un bajo grado de incertidumbre. La mayor concentración de los datos, comprendidos entre 0.3 y 1.0 s. se localizan en la parte poniente, dejando a muchas otras zonas desprovistas de información, como lo es la zona sur, oriente y norte. En la figura 4.4 se muestra la distribución de los 87 datos que sirvieron como base para proponer los límites 0.5s y 1.0s. Se observa que de este total de datos, tan sólo 13 tienen valores entre 0.3s a 0.5s y están distribuidos erráticamente por toda la ciudad de México. En cambio se tienen 74 datos con valores entre 0.6s a 1.0s concentrados principalmente en la zona noroeste del Distrito Federal. Se aprecia como para la zona oriente se tienen apenas dos datos con valor máximo de 0.5s y ninguno para valores máximos de 1.0s; para la zona sur un dato de 0.5s y siete datos con valor máximo de 0.9s. En la zona noroeste de esta lámina, se aprecian tres valores entre 0.6s y 0.7s los cuales están en zona de loma, cuando su valor representa que pertenecen a zona de transición. De igual forma sucede con más valores hacia el sur.

Por lo anterior se concluye que el límite  $T_0 = 0.5s$  prácticamente no existe para ninguna zona de la Cuenca de México y que este fue impuesto mediante geotecnia. El límite  $T_0 = 1.0s$  es medianamente representativo para la zona noroeste del Distrito Federal, en cambio para el resto de la cuenca no representa las características sísmicas del suelo.

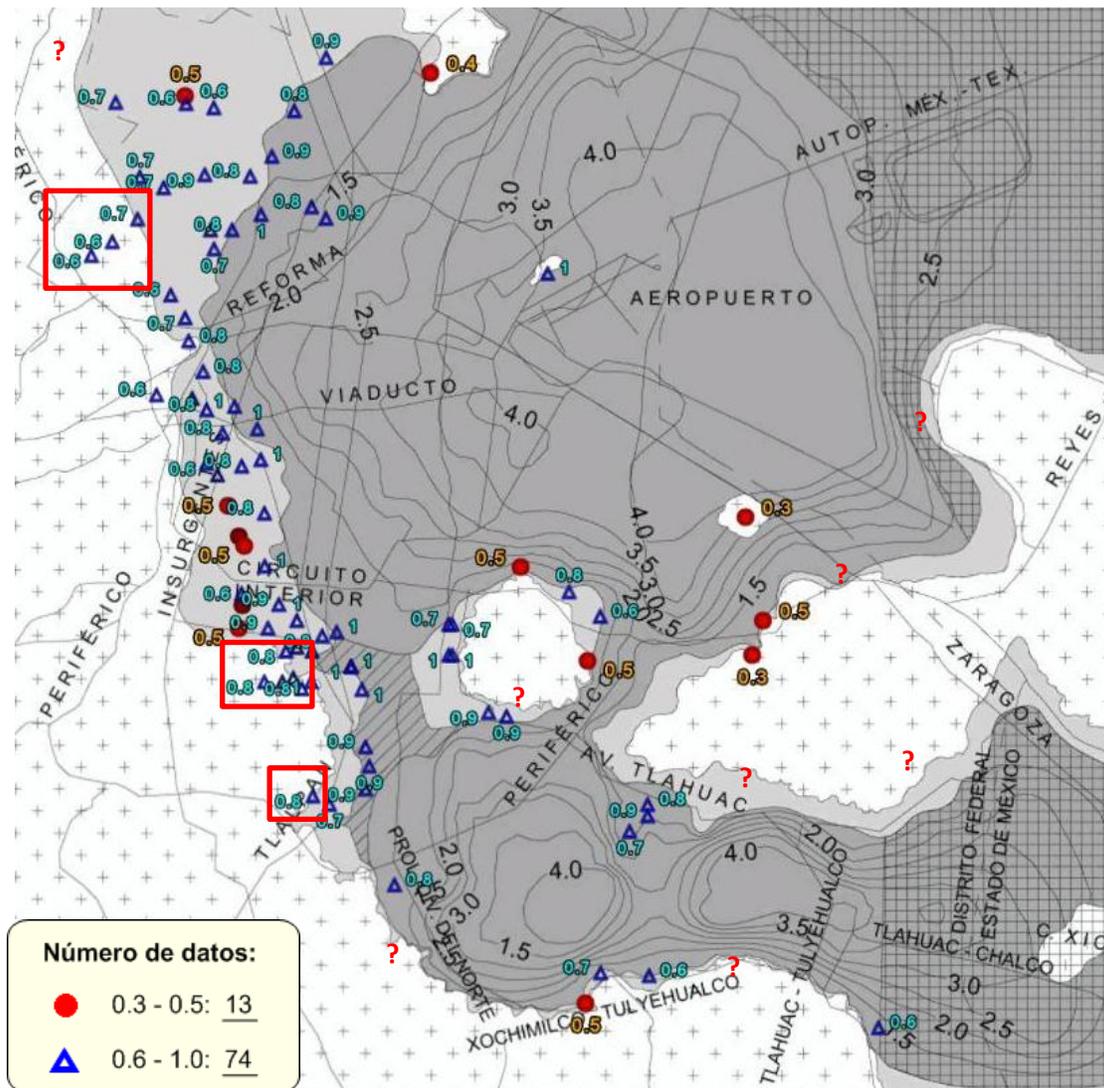


Figura 4.4. Distribución y localización de los datos de microtremores comprendidos entre 0.3 y 1.0 s.

En noviembre de 2010, se realizó una campaña de adquisición de datos de microtremores en 24 sitios instrumentados con acelerómetros en ésta ciudad. Las estaciones en donde se realizaron estas mediciones se presentan en la figura 4.5 y los datos en la Tabla 4.1. En las primeras columnas se muestra la clave de la estación acelerométrica y la institución que la administra. La tercer y quinta columna muestran los periodos dominantes del suelo obtenidos con datos de aceleración o sismos para el año de 1992 y 2010, respectivamente. La cuarta y sexta columna corresponden a las amplitudes relativas de las razones espectrales para los datos de aceleración citados anteriormente. La octava y novena columna indican el periodo dominante del suelo obtenido con mediciones de microtremores, de igual manera para los años 1992 y 2010, respectivamente.

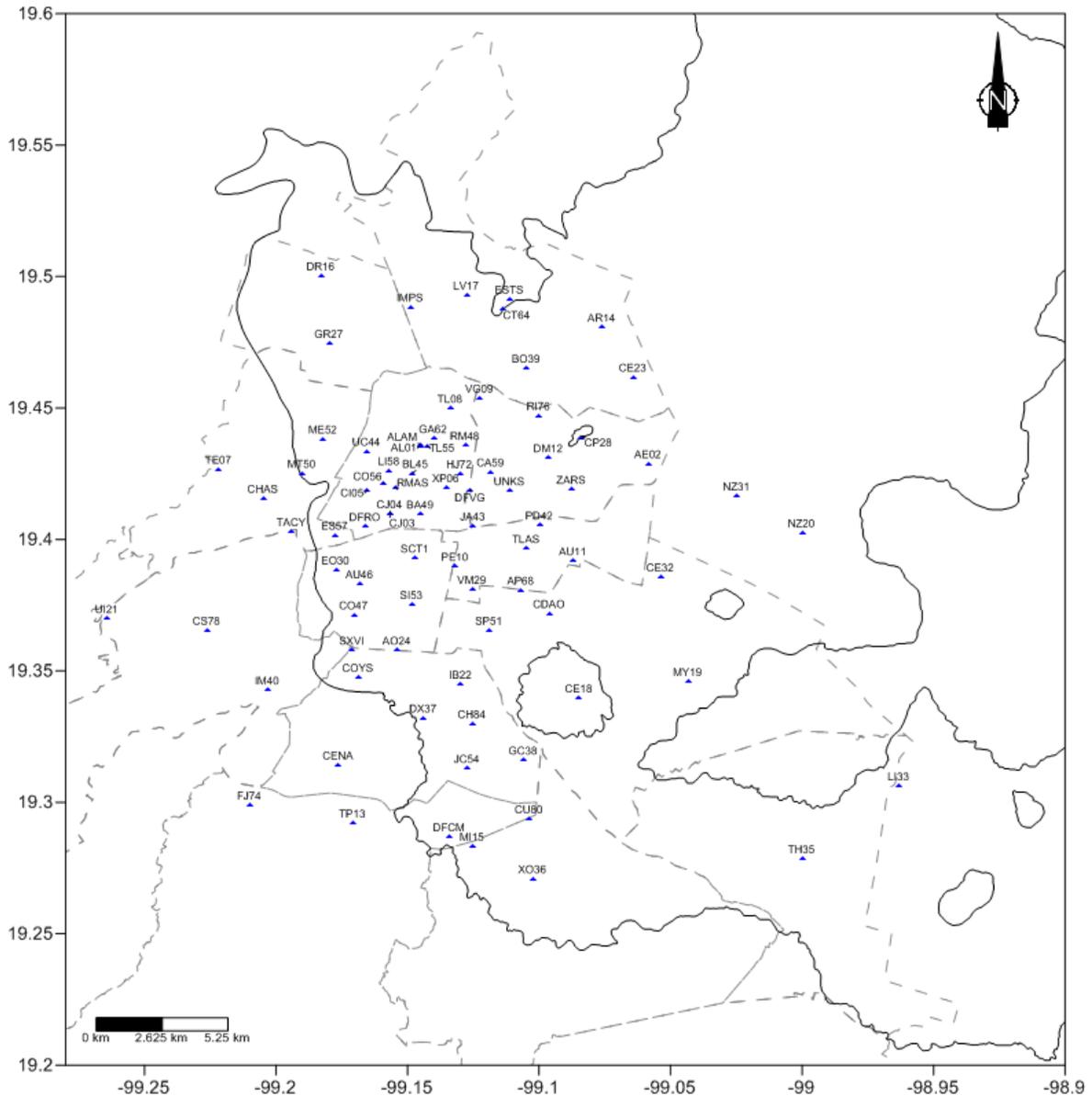


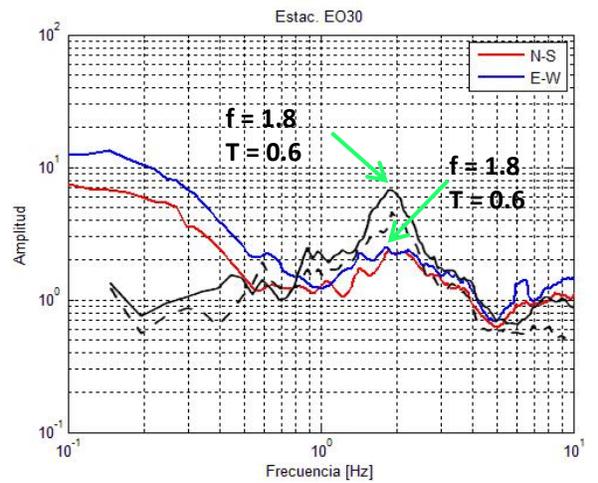
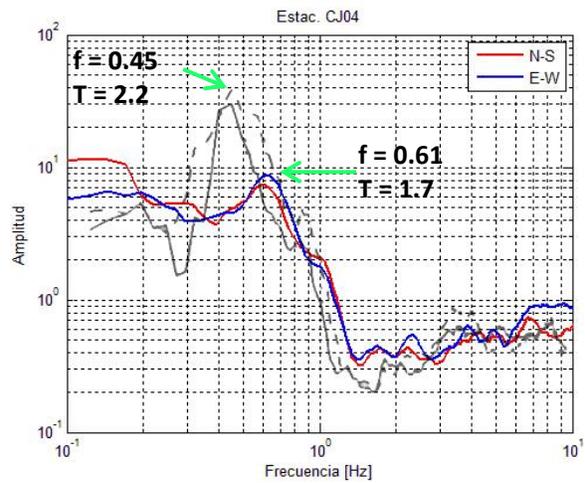
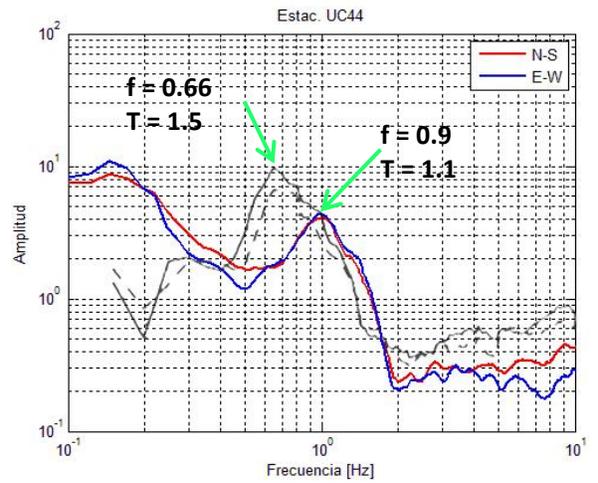
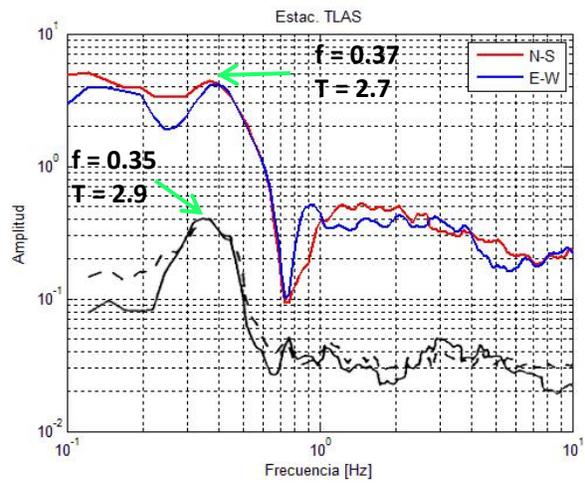
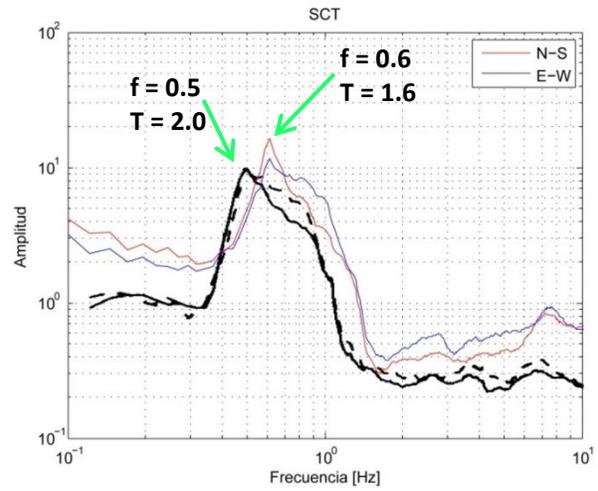
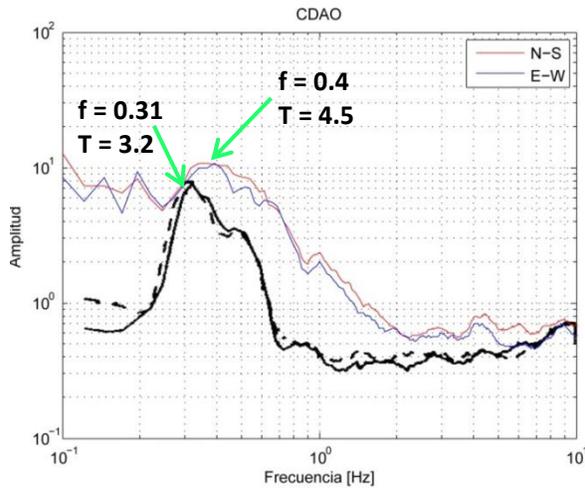
Figura 4.5. Localización de las estaciones acelerométricas presentes en la Ciudad de México.

En la toma de datos se empleó un acelerómetro Kinematics Altus K2, se orientó hacia el norte y fue nivelado. La posición del acelerómetro fue de algunos cuantos metros con respecto a la estación acelerométrica (Figura 4.6). En cada estación se tomaron tres registros, cada uno de 180 segundos. Su procesado fue idéntico al que se menciona en el capítulo 4, con 4 ventanas por componente; con un total de 24 ventanas por sitio. Todas las señales de cada componente por separado se graficaron y se promediaron, para obtener la señal promedio. Así mismo se analizaron los registros de aceleración de todas las estaciones de la red del CIRES y para las estaciones SCT y CDAO del Idel. Los registros analizados refieren a eventos registrados en el año 2009 y 2010. Se empleó la técnica de Nakamura para el procesado de estos registros. Los espectros tanto de microtremores y sismos se presentan en el Anexo 3.



Figura 4.6. Localización espacial del acelerómetro con respecto a las estaciones acelerométricas.

En las siguientes imágenes que conforman la figura 4.7, se muestra la comparación entre diez razones espectrales obtenidas con registros de microtremores en las cuales se aprecia en líneas negras, el periodo dominante del subsuelo para el año 1992 (Lermo, 1992), mientras que las líneas a color representan el espectro para el año de 2010. Se aprecia claramente un corrimiento generalizado para todas las razones espectrales hacia la derecha. Por citar alguno, para el sitio CDAO se tiene cambio de periodo de 0.1 Hz, en cambio para el sitio UC44 el cambio de periodo fue de 0.24 Hz, y para el sitio EO30 se tuvo una nula diferencia en periodo. Además se observa que tanto los espectros en negro y color, para cada uno de los sitios, presentan gran similitud entre sí conservando sus principales formas características. Este corrimiento se puede traducir en que el subsuelo en casi 20 años ha presentado una disminución en su espesor y un aumento en la velocidad de la onda de cortante.



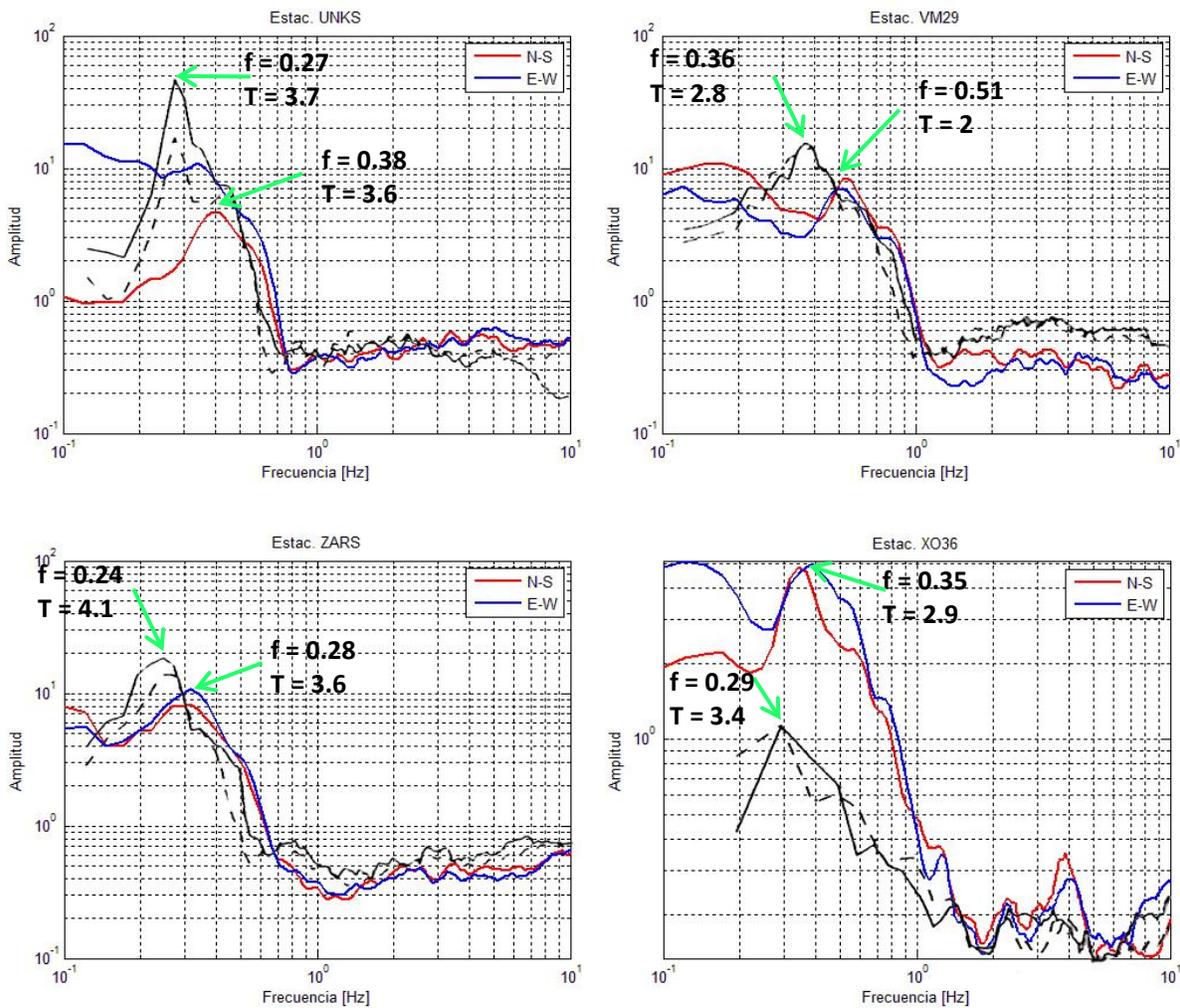


Figura 4.7. Comparativo entre la señal de 1992 (línea en negro) y 2010 (línea a color) para el sitio CDAO.

Por lo anterior, se concluye que es necesario actualizar la información de la que se dispone, ya que los valores de vibración ambiental con los que se cuenta ya no son representativos de las condiciones actuales que presenta la Cuenca de México, y en especial la ciudad de México. Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo para el Distrito Federal, entonces resultan ser obsoletas y de igual forma, no representativas, por lo cual es necesario actualizar dicho mapa y apegado a las condiciones reales del terreno, con el fin de evitar daños que podrían derivar en pérdidas humanas en el caso de presentarse un futuro sismo. En el próximo apartado se presenta una propuesta para la actualización del N.T.C. para Diseño por Sismo.

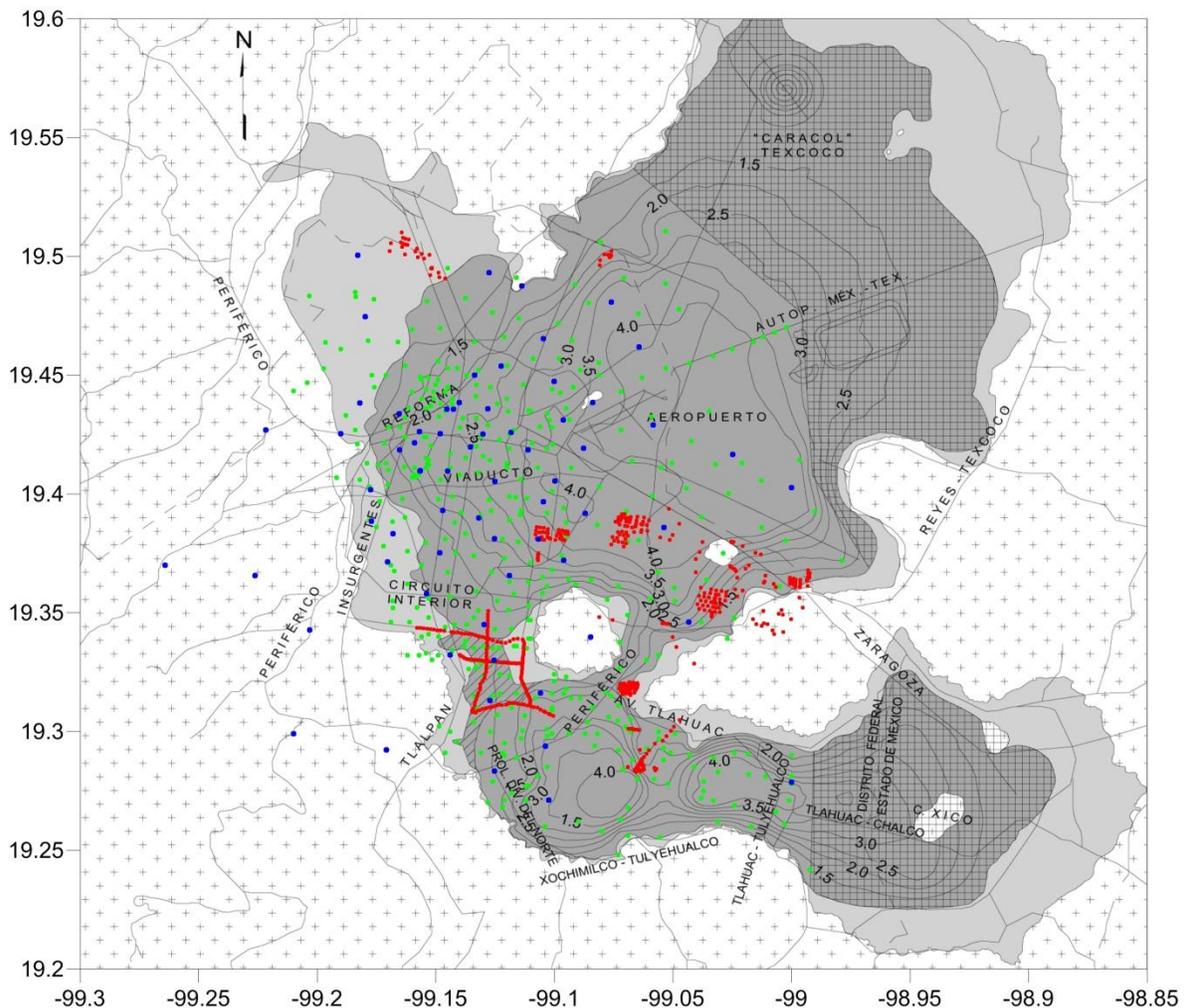
		TÉCNICA DE NAKAMURA							
INSTITUCIÓN	ESTACIÓN ACCELEROGRÁFICA	DATOS DE ACELERACIÓN					MICROTREMORES		
		1992		2010		DIFERENCIA ( $T_{A0} - T_{A1}$ )	1992	2010	DIFERENCIA ( $T_{M0} - T_{M1}$ )
		$T_{A0}$	$Ar_{A0}$	$T_{A1}$	$Ar_{A1}$		$T_{M0}$	$T_{M1}$	
CIRES	AL01	2.1	22	1.8	20	0.3			
CIRES	AE02	5.3	26	4.8	31	0.5			
CIRES	CJ03	2.1	11	2	15	0.1			
CIRES	CJ04	2.1	13	2	15	0.1	2.2	1.7	0.5
CIRES	CI05	2	13	1.9	16	0.1			
CIRES	XPO6	3.3	18	2.9	15	0.4			
CIRES	TE07			0.4	1				
CIRES	TL08	2.2	17	1.6	15	0.6	2.2	1.6	0.6
CIRES	VG09	2.8	19	2.5	22	0.3			
CIRES	PE10	2.7	14	2.2	18	0.5			
CIRES	AU11	4.5	18	4	19	0.5			
CIRES	DM12	4	31	3.4	73	0.6		2.7	
CIRES	TP13	0.6	4	0.6	2	0			
CIRES	AR14	4	20	3.7	17	0.3			
CIRES	MI15	1.5	15	1.3	12	0.2	1.4	1.1	0.3
CIRES	DR16	0.6	7	0.6	7	0			
CIRES	LV17	1.3	12	1.3	11	0			
CIRES	CE18	0.6		0.6	10	0			
CIRES	MY19	3	13	2.7	13	0.3	2.8	2.5	0.3
CIRES	NZ20	5	15	4.6	11	0.4			
CIRES	UI21			0.5	2				
CIRES	IB22	1.5	18	1.5	14	0	1.4	1.3	0.1
CIRES	CE23	4.8	40	4.3	14	0.5			
CIRES	AO24	1	14	0.9	13	0.1			
CIRES	GR27	0.8	13	0.8	16	0		0.7	
CIRES	CP28			0.6	5				
CIRES	VM29	3.1	24	2.5	16	0.6	2.8	2	0.8
CIRES	EO30	0.6	7	0.6	6	0	0.6	0.6	0
CIRES	NZ31	5.5	12	4.1	64	1.4			
CIRES	CE32	4.5	17	4.1	21	0.4	4.2	3.4	0.8
CIRES	TH35	5	15	3.9	10	1.1			
CIRES	XO36	3.8	40	3.7	19	0.1	3.4	3.3	0.1
CIRES	DX37	1	10	1	10	0			
CIRES	GC38	1.9	23	1.6	21	0.3			
CIRES	BO39	2.9	12	2.6	26	0.3		2.2	
CIRES	IM40			0.6	4				
CIRES	PD42	4.5	26	4	28	0.5			
CIRES	JA43	3.2	27	2.9	20	0.3			
CIRES	UC44	1.5	10	1.4	18	0.1	1.5	1.1	0.4
CIRES	BL45	2.6	10	2.2	17	0.4			
CIRES	AU46	0.9	7	0.9	13	0			
CIRES	CO47	0.5	5	0.5	6	0			
CIRES	RM48	3.2	11	3	19	0.2			
CIRES	BA49	2.8	24	2.6	20	0.2		2.4	

CIRES	MT50	0.6	6	0.6	6	<b>0</b>	0.7	0.7	<b>0</b>
CIRES	SP51	2.3	19	2	18	<b>0.3</b>		1.7	
CIRES	ME52	0.9	10	0.9	12	<b>0</b>			
CIRES	SI53	1.4	12	1.2	14	<b>0.2</b>			
CIRES	JC54	1.2	18	1.1	16	<b>0.1</b>	1.1	1.1	<b>0</b>
CIRES	TL55	2.1	14	1.7	26	<b>0.4</b>			
CIRES	CO56	2.3	16	2.1	23	<b>0.2</b>			
CIRES	ES57	0.9	10	0.8	14	<b>0.1</b>			
CIRES	LI58	2.4	12	2.1	56	<b>0.3</b>			
CIRES	CA59	3.2	22	3.1	15	<b>0.1</b>		2.6	
CIRES	GA62	2.3	12	1.9	15	<b>0.4</b>			
CIRES	CT64			0.5	2				
CIRES	AP68	3.6	15	3.2	25	<b>0.4</b>			
CIRES	HJ72	2.9	19	2.8	13	<b>0.1</b>			
CIRES	FJ74			0.4	6				
CIRES	RI76			3.6	16				
CIRES	CS78			0.3	1				
CIRES	CU80	2.9	29	2.9	14	<b>0</b>			
CIRES	CH84	1.5	29	1.3	33	<b>0.2</b>		1.1	
CENAPRED	CENA								
CENAPRED	COYS								
CENAPRED	TLAS						2.9	2.7	<b>0.2</b>
CENAPRED	ZARS						4.1	3.6	<b>0.5</b>
CENAPRED	UNKS						3.7	2.6	<b>1.1</b>
CENAPRED	RMAS								
CENAPRED	ESTS								
CENAPRED	CHAS						0.5		
CENAPRED	IMPS								
IDEI	SCT1	2	11	1.9	13	<b>0.1</b>	2	1.6	<b>0.4</b>
IDEI	TACY								
IDEI	CDAO	3.6	13	2.9	24	<b>0.7</b>	3.2	2.5	<b>0.7</b>
IDEI	DFCM								
IDEI	DFRO	1.4							
IDEI	DFVG	2.9							
IDEI	ALAM								

Tabla 4.1. Relación de las estaciones acelerométricas medidas. La columna  $T_{A0}$  y  $T_{M0}$  muestra los periodos para 1992. Los datos de la columna  $T_{A1}$  y  $T_{M1}$  representan los valores recientes, año 2010. Las columnas con números en negro indican el cambio de periodo en 18 años.

## Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

La figura 5.1 presenta el resumen de toda la información recopilada, a partir de los datos de aceleración y de microtremores, sobre el mapa actual del N.T.C. para Diseño por Sismo. Cada punto del mapa representa una medición. Los puntos en color rojo representan la información obtenida en las últimas campañas de microtremores, entre el año 2009 y 2010. Los puntos en color azul representan los sitios analizados con datos de aceleración más recientes. El resto de la información, en puntos verdes, fue tomada del trabajo de Lermo *et. al.* (1992) y que además han servido de base pues tienen una distribución espacial en prácticamente la totalidad del Distrito Federal.



estos sitios es de 33, localizados en distintas zonas de la ciudad de México. En la figura 5.2 se presenta el análisis de estos lugares. Esta lámina representa el cambio en la respuesta dinámica de los suelos por efecto del hundimiento regional para un periodo de tiempo de 20 años. La ubicación de estos datos se presentan en el Anexo 4.

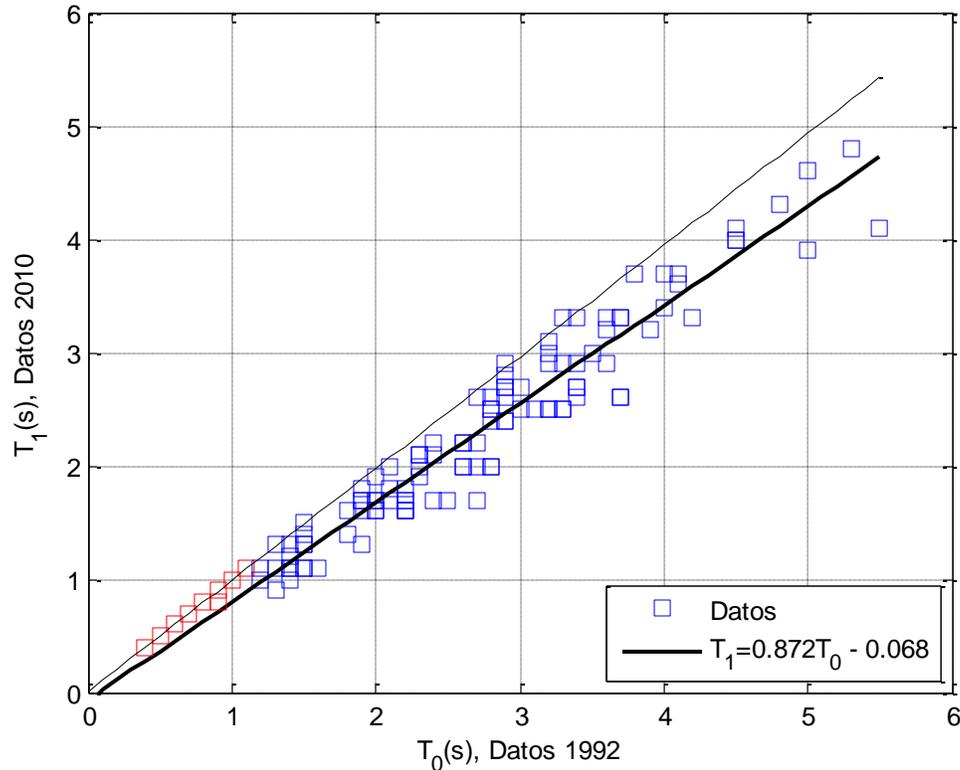


Figura 5.2. Comparativo entre los valores de periodo para el año 1992 y 2010 en 33 sitios de ciudad de México.

Se observa en la gráfica que los cambios más significativos se presentan a partir de  $T_0 = 1.2$  s. Se ha observado que para valores menores a  $T_0 = 1.2$  s el cambio ha sido nulo, siendo estas zonas las más estables. De la gráfica anterior se obtuvo la recta de mejor ajuste

$$T_1 = 0.872T_0 - 0.068 \quad 5.1$$

que representa el cambio que han tenido los periodos de dominantes para un lapso de 20 años.

A partir de esta Ecuación se puede calcular la variación de los valores de periodo del suelo y actualizar los datos contenidos en el trabajo de Lermo *et al.*

Es importante mencionar que tras haber realizado las correcciones tanto para los datos para el año de 1990 y la estimación de los valores para el resto de los sitios instrumentados, y tras la integración de ambos conjuntos de datos, se encontró una excelente correlación espacial y nominal entre ellos.

Para fines de comparación, Aguilar (2008) propone una relación que involucra las variables Espesor inicial e Intervalo de tiempo, para calcular en un lapso de tiempo, el valor de periodo dominante por efecto del hundimiento en la ciudad de México (ecuación 5.2)

$$T = \left[ 2.258 - \frac{1.6}{31} \left( \left( \frac{H_0 - 70}{-1.6} \right)^{\frac{1}{0.52}} + \frac{\Delta T}{0.85} \right)^{0.52} \right]^2 + 0.5 \quad 5.2$$

siendo T el periodo de vibración del suelo posterior al tiempo  $\Delta T$  en años y  $H_0$  el espesor inicial (sin efecto de hundimiento) de cada sitio.

Con base en el mapa de acuitardo del capítulo dos, se obtuvo una aproximación de los espesores iniciales de cada sitio instrumentado. En la Tabla 5.2 se presenta un comparativo entre los datos medidos en 2010 y los calculados mediante la ecuación 5.2 para 20 años. Evaluando la Ecuación 5.2 y sustituyendo la variable  $H_0$  al espesor correspondiente de cada sitio, con  $\Delta T=0$ , para el caso del año 1990 se obtuvieron los valores para la cuarta columna de la tabla. Para obtener los valores de la sexta columna, se procedió de igual manera solo que se sustituyó  $\Delta T=20$  para observar el cambio en un lapso de tiempo de 20 años.

Tabla 5.2. Comparativo de los valores de los sitios medidos con microtremores y la ecuación 5.2.

INSTITUCIÓN	ESTACIÓN ACCELEROGRÁFICA	MICROTREMORES			
		1990		2010	
		MEDIDO	CALCULADO	MEDIDO	CALCULADO
CIRES	CJ04	2.2	<b>1.6</b>	1.7	<b>1.6</b>
CIRES	TL08	2.2	<b>1.5</b>	1.6	<b>1.4</b>
CIRES	DM12			2.7	<b>1.2</b>
CIRES	MI15	1.4	<b>1.0</b>	1.1	<b>0.9</b>
CIRES	MY19	2.8	<b>1.8</b>	2.5	<b>1.7</b>
CIRES	IB22	1.4	<b>1.2</b>	1.3	<b>1.2</b>
CIRES	GR27			0.7	<b>0.7</b>
CIRES	VM29	2.8	<b>2.6</b>	2	<b>2.5</b>
CIRES	EO30	0.6	<b>0.5</b>	0.6	<b>0.5</b>
CIRES	CE32	4.2	<b>2.5</b>	3.3	<b>2.4</b>
CIRES	XO36	3.4	<b>2.2</b>	3.3	<b>2.1</b>
CIRES	BO39			2.2	<b>1.5</b>
CIRES	UC44	1.5	<b>1.3</b>	1.1	<b>1.3</b>
CIRES	BA49			2.4	<b>2.0</b>
CIRES	MT50	0.7	<b>0.6</b>	0.7	<b>0.6</b>
CIRES	SP51			1.7	<b>1.8</b>
CIRES	JC54	1.1	<b>0.8</b>	1.1	<b>0.7</b>
CIRES	CA59			2.6	<b>2.4</b>
CIRES	CH84			1.1	0.8
CENAPRED	TLAS	2.9	<b>3.1</b>	2.7	<b>2.9</b>

CENAPRED	ZARS	4.1	<b>3.3</b>	3.7	<b>3.1</b>
CENAPRED	UNKS	3.7	<b>2.9</b>	2.6	<b>2.7</b>
IDEI	SCT1	2	<b>2.2</b>	1.6	<b>2.1</b>
IDEI	CDAO	3.2	<b>2.1</b>	2.5	<b>2</b>

Se aprecia que los valores obtenidos mediante la ecuación 5.2 presenta diferencias bastante considerables en su gran mayoría con los datos medidos (Figura 5.3). De lo anterior se concluye que esta expresión no representa de manera confiable el cambio en la respuesta del suelo en un futuro por la gran dispersión e incertidumbre que se tiene. Esto pudiera deberse esencialmente a que Aguilar toma como base el mapa de las NTC para Diseño y Construcción de Cimentaciones (2004), cuyo espesor máximo es de 70 metros, en tanto que para este trabajo se considera de 60 metros. Otro aspecto a recalcar sería los tipos de interpolaciones usadas y el número de datos manejados, pues al parecer el autor no consideró toda la información de la base de datos, sino que solo se centró en una zona de interés, la zona centro del Distrito Federal.

Por otro lado, el autor en base en su ecuación propuesta, predice la variación de periodo dominante para 50 años. En la figura 5.4 se presenta sus resultados finales. De esta imagen se puede comentar, por citar un ejemplo, que para sitios con periodo de 4.2s cambiaría a 3.4s para un periodo de tiempo de 50 años. En base a los resultados que se han obtenido en este trabajo, se puede comparar con el valor de periodo dominante de la estación CE32 que para 1992 era de  $T_0 = 4.2s$ , mientras que para el año 2010 es de  $T_0 = 3.3s$ , presentado un cambio sumamente crítico de  $\Delta T_0 = 0.9s$  para un periodo de 20 años. Lo anterior indica que el fenómeno del hundimiento está disminuyendo rápidamente el espesor del subsuelo y por ello sus valores de periodo dominante.

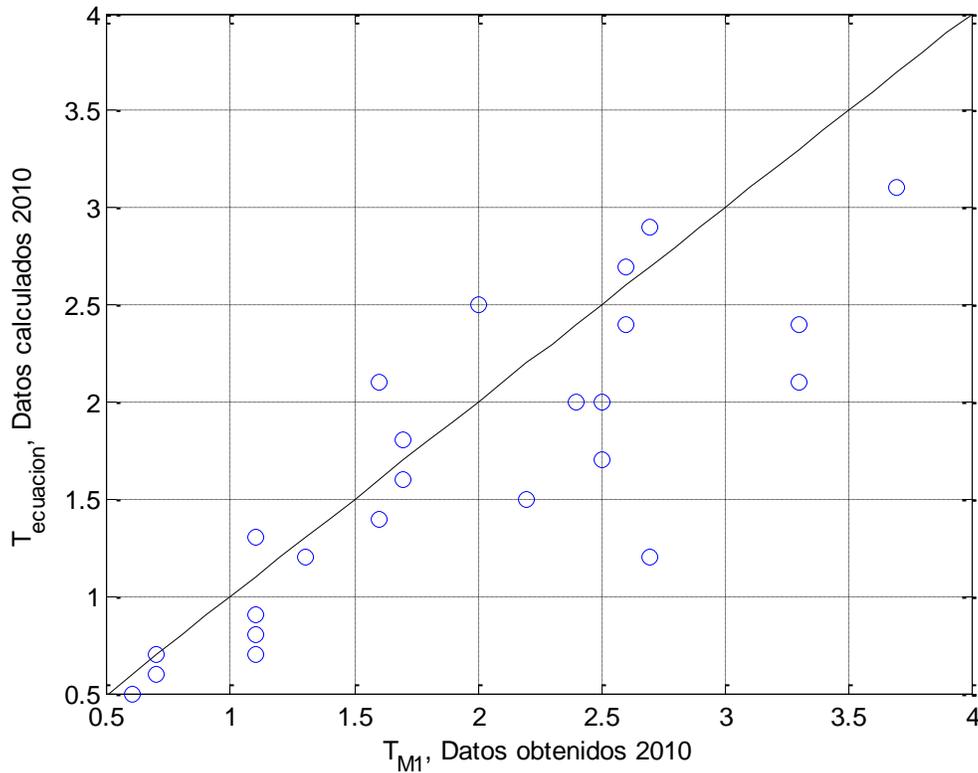


Figura 5.3. Comparativo entre la estimación de periodos dominantes ec. 5.2 y los medidos en 2010.

Tabla 2. Variación del periodo de vibración en 50 años.

Espesor inicial	Periodo de vibración inicial	Espesor reducido	Periodo de vibración modificado
10.0 m	0.60 s	8.3 m	0.57 s
20.0 m	0.92 s	18.0 m	0.84 s
30.0 m	1.44 s	27.6 m	1.29 s
40.0 m	2.16 s	36.9 m	1.92 s
50.0 m	3.10 s	45.7 m	2.67 s
60.0 m	4.25 s	53.1 m	3.44 s
70.0 m	5.60 s	56.7 m	3.84 s

Figura 5.4. Resultados finales del cambio en el valor de periodo dominante para un periodo de tiempo de 50 años (Aguilar, 2008)

Por lo anterior, resulta complicado tratar de predecir el comportamiento dinámico de los suelos para el futuro, y más aún si solo se tiene como punto de partida un conjunto limitado de datos.

Como resultado del análisis anteriormente descrito, en la figura 5.5 se presenta una propuesta de actualización del mapa de periodos dominantes del suelo para la ciudad de México. Este fue generado mediante la actualización de 305 datos aplicando la ecuación 5.1 (Lermo, 1992); las mediciones realizadas entre 2009 – 2010; los registros más recientes de aceleración y microtremores medidos en las estaciones acelerométricas. En total este mapa se realizó a partir de 1010 datos, mismos con los que se dispone en nuestra base de datos.



Ante las observaciones anteriormente citadas, se presentan las siguientes recomendaciones para la generación y obtención de un mapa de isoperiodos más completo, mejor definido y apegado a las características sísmicas de la Cuenca de México.

1.- Realizar campañas de adquisición de datos de vibración ambiental alrededor de los cuerpos montañosos: Sierra de las Cruces al oeste, Sierra de Chichinautzin al sur, Sierra de Guadalupe al norte, Cerro de la Estrella, Sierra de Santa Catarina, Peñón de los Baños y Del Marqués al interior de la Cuenca de México para definir con mayor precisión la curva  $T_0 = 0.5s$ . Se proponen 200 sitios para medición, localizados espacialmente en la figura 5.6. Estos sitios han sido seleccionados en base a la información con la que se cuenta actualmente, contenida en nuestra base de datos SIG-Microtremor, que consta de 1010 datos dentro de la cuenca.

2.- Es necesario actualizar el mapa vigente pues se sabe, que las propiedades del subsuelo se han modificado tanto geotécnica y sísmicamente. Por lo cual es necesario llevar a cabo más campañas de mediciones de vibración ambiental en zonas carentes de información dentro de la ciudad de México, así como en zonas en donde se sabe que el hundimiento presenta una mayor tendencia, según la imagen 3.14. En la figura 5.6 se sugieren las zonas a medir, delimitadas con línea roja.

3.- Realizar mediciones en las zonas del Ex-Lago Texcoco y Chalco.

4.- Se verifica que una de las zonas que ha presentado los hundimientos más críticos está comprendido dentro de Ciudad Nezahualcoyotl, Estado de México; teniendo como consecuencia la aparición de una grieta de importantes dimensiones en la colonia Benito Juárez, dentro de la misma localidad en octubre de 2010. Se propone analizar esta zona mediante campañas de vibración ambiental para definir la magnitud del cambio en las propiedades del subsuelo.

5.- Es necesario realizar mediciones en el resto de los sitios instrumentados con acelerógrafos.

6.- Es necesario realizar mediciones en la zona de Xochimilco, pues la cantidad de información disponible es poca. De igual manera se propone, mediante la adquisición de datos sobre las principales avenidas de la ciudad, corroborar que las estimaciones hechas en éste trabajo son válidas, a manera de calibración. Esta propuesta se presenta, en líneas naranja en la lámina 5.6.

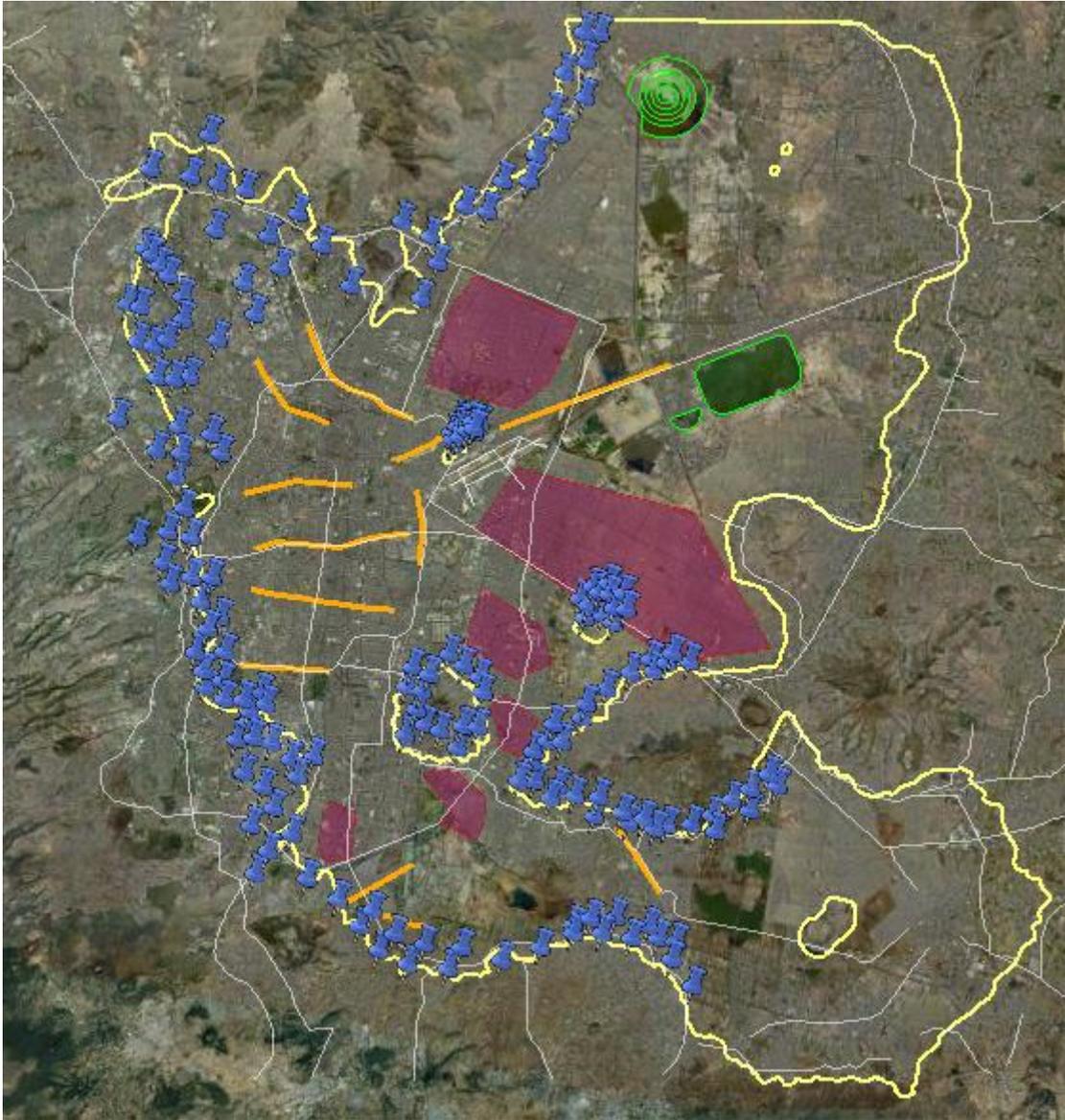


Figura 5.6. Las marcas en azul representan la ubicación y distribución de los sitios propuestos para la actualización de la curva de periodo dominante  $T_0 = 0.5s$ . Las líneas naranjas indican los perfiles a realizar y las áreas sombreadas son sitios con escasa o nula información. La línea amarilla representa el límite de la zona de lago.

Por último, en las siguientes láminas se muestra la diferencia entre el mapa del vigente reglamento y el mapa obtenido, así como su relación con el mapa de acuitardo, respectivamente.

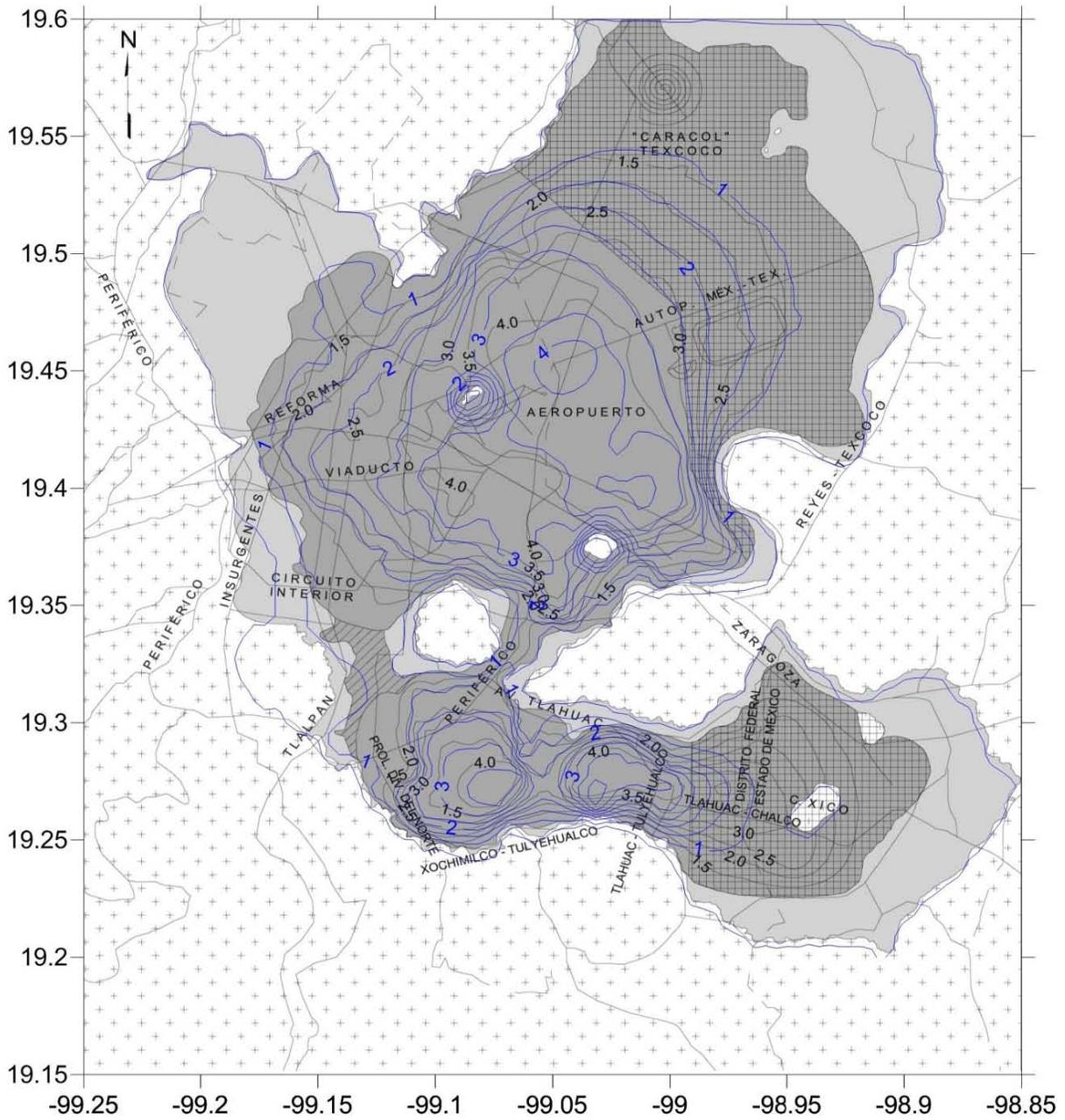


Figura 5.8. Comparativo entre el mapa de periodos dominantes del NTCDS y en líneas azules las nuevas curvas de isoperiodo.

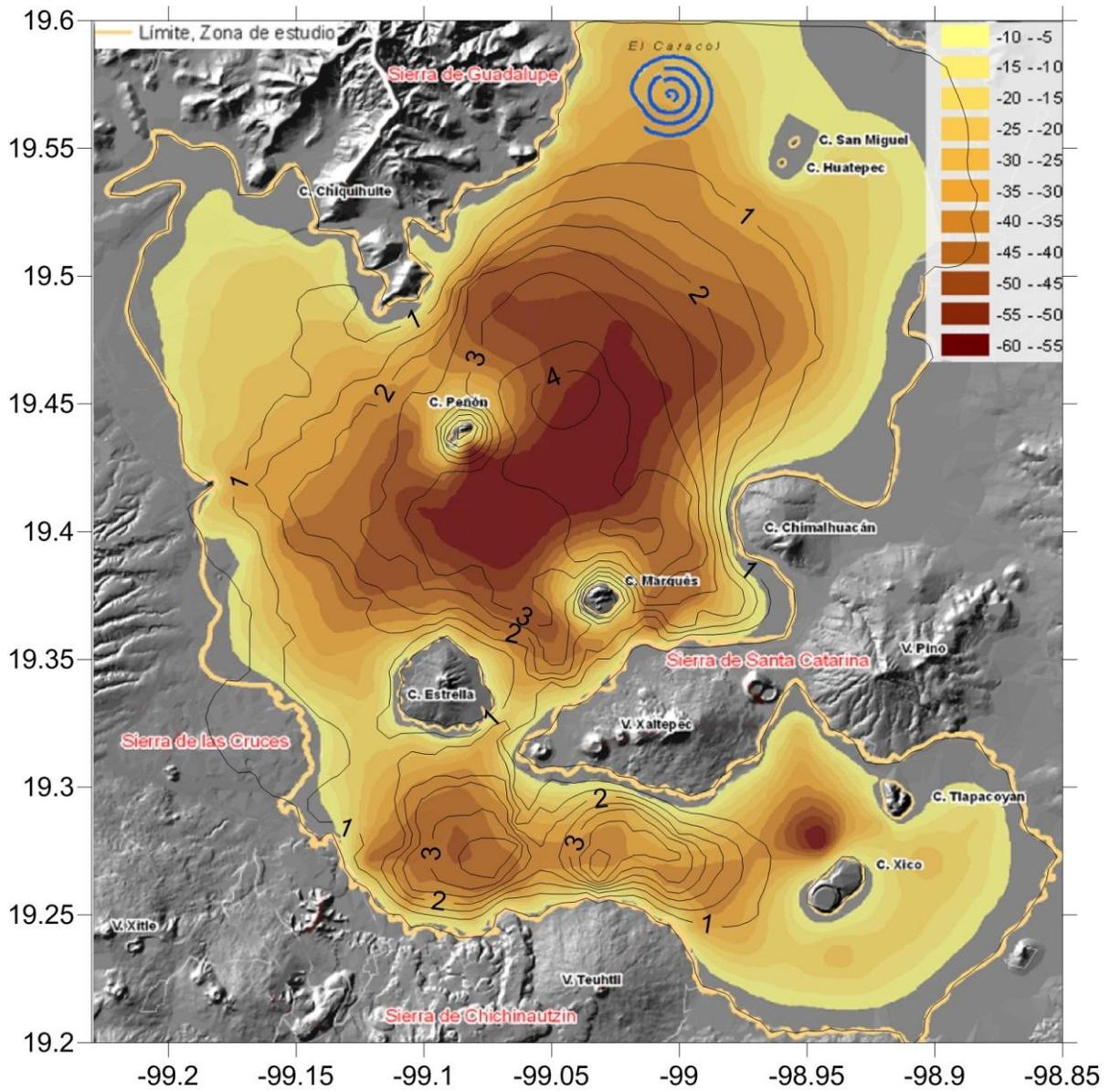


Figura 5.9. Correlación entre el mapa de espesores del acuitardo y las nuevas curvas de isoperiodo en líneas negras.

## Conclusiones

Se presenta una actualización del mapa de agrietamientos para el Distrito Federal y partes del Estado de México. Se compilaron 641 agrietamientos. La mayor parte de estos están localizados en la delegación Iztapalapa en la transición de los cuerpos montañosos hacia los depósitos blandos por efecto de la compactación diferencial provocada por el efecto del hundimiento regional que está causando la consolidación del suelo

Se infiere que los agrietamientos presentes la parte suroriente de la delegación Iztapalapa y que continua en la delegación Tláhuac son ocasionados por un derrame volcánico enterrado de la Sierra de Santa Catarina. Esta estructura fue inferida mediante 60 registros encontrándose una relación entre estos y las grietas que afectan esta parte de la ciudad. Por medio de la adquisición de más mediciones de vibración ambiental en esta zona de la ciudad, se puede tener de una manera más aproximada la forma del derrame. Sería de esperarse que en un futuro la aparición de próximos agrietamientos se diera alrededor de la curva de isoperiodo de 1.7 seg., en semejanza al estudio realizado en Lomas de San Lorenzo (Espinoza, 2011).

Conforme las observaciones realizadas en este trabajo y su posterior análisis, se propone una ecuación que predice el cambio en los valores de periodo dominante para un periodo de 20 años por efecto del hundimiento regional. Se concluye que con la disminución del espesor de las capas arcillosas se presenta una consolidación del subsuelo que arroja un aumento en la velocidad de las ondas de corte produciendo una disminución en los valores de periodo dominante.

Se observó que los cambios de periodo más significativos se presentaron en la zona de lago, siendo las zonas de loma y transición las más estables. Con la ecuación propuesta en este trabajo se actualizaron 410 valores de hace 20 años, que sirvieron como base para generar y proponer un nuevo mapa de periodos dominantes para el Distrito Federal.

## ANEXO 1.

### Fundamentos teóricos de la técnica de Nakamura.

La técnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio o cociente espectral de la componente horizontal a la componente vertical), también conocida como la técnica de Nakamura o técnica QTS (Quasi Transfer Spectrum) es una técnica experimental que permite conocer algunas propiedades de los depósitos sedimentarios o suelos. La principal característica que distingue a ésta técnica es sin duda su economía, ya que para su aplicación solamente necesita del ruido sísmico ambiental o microtremor como fuente; además de que para realizar las mediciones basta con disponer de una sola estación (acelerómetro) sin tener la necesidad de disponer de una estación de referencia (Lermo y Chávez-García, 1993).

El ruido sísmico es generado por fenómenos atmosféricos, siendo éstos ondas oceánicas, efecto del viento, y por la actividad antropogénica, estando presente en cualquier parte sobre la superficie terrestre. Para el caso del ruido natural se relaciona con periodos largos (frecuencias cortas), y para el ruido antropogénico se tienen periodos cortos (frecuencias altas). El límite de frecuencia de estos dos tipos de ruido se encuentra en 1 Hz, donde éste límite ha sido comprobado por diferentes investigadores tal como lo reportan Bennefoy *et. al.* En este trabajo se define a los microtremores como las oscilaciones superficiales de baja amplitud. Estos presentan oscilaciones muy pequeñas similares a las que inducen los terremotos en las zonas próximas al epicentro. En las zonas en las cuales no hay una fuente presente de ruido local y en ausencia de viento, el espectro de frecuencia de ruido de fondo, en un terreno rocoso y plano, tiene la forma que se presenta en la figura 1, donde la curva azul representa el ruido de fondo “mínimo”, mientras la curva en verde representa el “máximo” de dicho ruido, en donde los picos entre 0.14 y 0.07 Hz son producto de las ondas oceánicas sobre las costas. Tales componentes espectrales han sido atenuadas relativamente poco incluso después de trayectos de millones de kilómetros por efecto del medio.

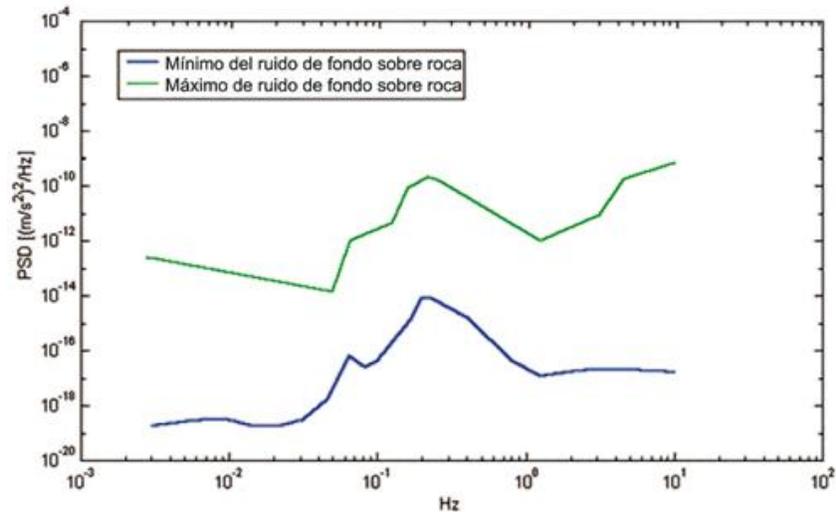


Figura 1. Modelos estándar del ruido sísmico máximo (en verde) y mínimo (en azul) para la Tierra (según USGS). Los espectros de potencia están expresados en términos de aceleración y son relativos a la componente vertical del movimiento.

A este ruido de fondo, que está siempre presente, se superponen las fuentes locales, antropogénicas (tráfico, industria, etc.) y naturales. Los microtremores están constituidos tan solo en parte por ondas de cuerpo, P o S, y principalmente por ondas de superficie. Woods (1968) menciona que cuando se golpea en superficie un depósito de suelo, se generan ondas elásticas, donde el 67% de la energía aplicada se propaga como ondas Rayleigh, 27% como ondas de corte y 6% como ondas de compresión.

A partir de las primeras mediciones de microtremores en diferentes suelos (Kanai, 1954), se han propuesto diferentes métodos para obtener información relativa al subsuelo por medio del ruido sísmico registrado en un sitio. Entre estos, la técnica que se ha consolidado mayormente ha sido el del cociente espectral de la componente horizontal a la componente vertical HVSR. La técnica es universalmente reconocida por ser eficaz en proporcionar estimaciones confiables del periodo fundamental de resonancia del suelo (Field y Jacob, 1993; Lachet y Bard, 1994; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994; Bard, 1998; Ibs-von Seht y Wohlenberg, 1999; Fah *et al.*, 2001; solo por citar algunos).

El método ha demostrado que es idóneo para evaluar el periodo fundamental de resonancia del subsuelo, de manera particular cuando la impedancia de estos presenta un gran contraste con la impedancia de la roca más dura. Por lo tanto la técnica HVSR evalúa el periodo fundamental a partir de registros de ruido en superficie permitiendo estimar de una manera rápida la estratigrafía del suelo. Si se considera la forma de la estructura geológica típica de un depósito sedimentario (Figura 2), se ve como el tremor registrado en superficie se puede considerar que está compuesto por varios tipos de ondas, como las ondas superficiales y ondas de cuerpo. Tales ondas serán modificadas por la acción filtrante del estrato blando.

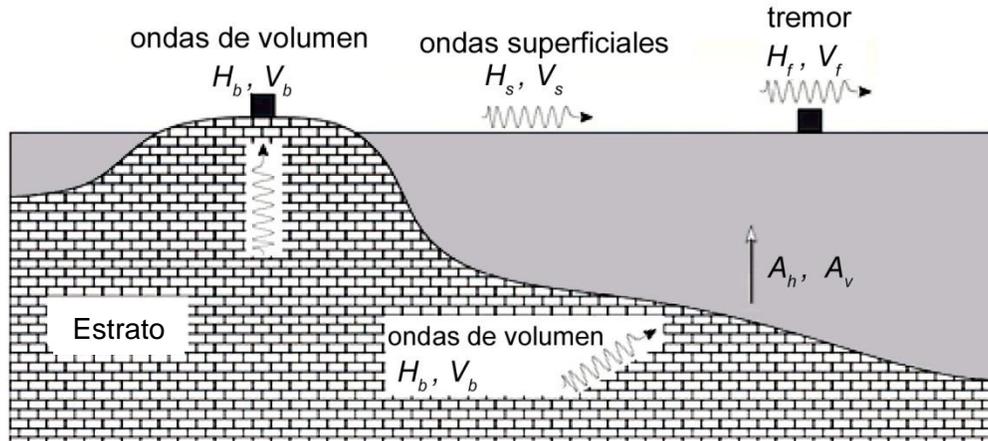


Figura 2. Estructura geológica típica de un depósito sedimentario.

Nakamura asume que los microtremores consisten principalmente de ondas Rayleigh que se propagan en un estrato blando sobre un semiespacio y que la presencia de este estrato es la causa de la amplificación del sitio. Tal técnica permite separar los términos de fuente, trayectoria y de sitio a través de las relaciones entre las componentes del movimiento, sin utilizar algún sitio de referencia. En el dominio de la frecuencia, se tienen 4 espectros implicados, siendo estas las componentes horizontales y verticales del movimiento en superficie ( $H_s$  y  $V_s$ ) y en la base del estrato ( $H_b$  y  $V_b$ ) (Figura 4.3).

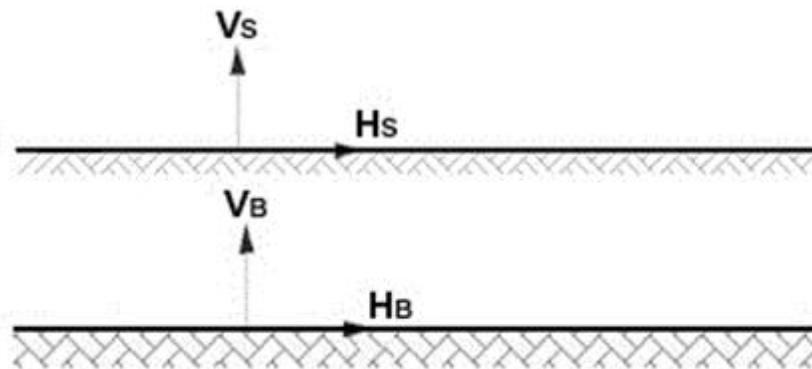


Figura 4.3. Modelo estratigráfico de la técnica de Nakamura.

El método pretende eliminar principalmente el efecto de las ondas Rayleigh. Se considera que los microtremores en la base rocosa son similares horizontal y verticalmente. Dichos microtremores son amplificados por las capas de suelo blando que yacen sobre el estrato rocoso. Se considera además que los microtremores horizontales se amplifican debido a multirreflexiones de la onda S, en tanto que los microtremores verticales lo hacen por multirreflexiones de la onda P.

Por otra parte, el efecto de la onda Rayleigh aparece resaltado en el movimiento vertical. De esta forma, la magnitud de su efecto puede ser conocida a partir de la relación entre el movimiento vertical en superficie y el movimiento vertical en el afloramiento rocoso. Normalmente, el efecto de la onda Rayleigh es cercano a cero cuando la relación es aproximadamente la unidad. En la

medida en que la relación aumenta, el efecto de las ondas Rayleigh puede volverse crítico. La propuesta de Nakamura pretende eliminar este efecto.

Las hipótesis sobre las cuales se basa la técnica de Nakamura son las siguientes:

1. Los microtremores son generados por fuentes locales, sin tomar en cuenta cualquier contribución debida a fuentes profundas;
2. Las fuentes de los microtremores en superficie no influyen a los microtremores en la base;
3. La componente vertical del movimiento no se ve afectada por los efectos de amplificación local.

Sobre estas hipótesis, la relación entre las componentes verticales en superficie y en la base del movimiento contiene solo términos de las fuentes locales  $A_S$  y de las fuentes en la base  $A_B$ , y es igual a

$$R_V = \frac{V_S}{V_B} = \frac{A_S}{A_B} \quad 1$$

mientras la relación entre la amplitud del espectro de la componente horizontal de movimiento en superficie  $H_S$  y en la base del estrato  $H_B$ , contiene el efecto de fuente incluso la amplificación de sitio en superficie  $S_S$  y puede ser expresado de la siguiente manera

$$R_h = \frac{H_S}{H_B} = \frac{A_S S_S}{A_B} \quad 2$$

Para remover el efecto de fuente, Nakamura divide las dos relaciones  $R$  entre ellos, obteniendo así la siguiente expresión para la función de transferencia

$$\frac{R_h}{R_V} = S_S = \frac{H_S}{H_B} \cdot \frac{V_B}{V_S} \quad 3$$

Haciendo la hipótesis de que en la base de los sedimentos la amplitud espectral de la componente vertical y de la horizontal sean iguales

$$\frac{V_B}{H_B} = 1 \quad 4$$

el factor de amplificación del movimiento horizontal en superficie podrá ser evaluado directamente de la siguiente manera

$$S_S = \frac{H_S}{V_S} \quad 5$$

De la fórmula anterior, se tiene entonces una aproximación de la Función de Transferencia Empírica (FTE) para registro de microtemores.

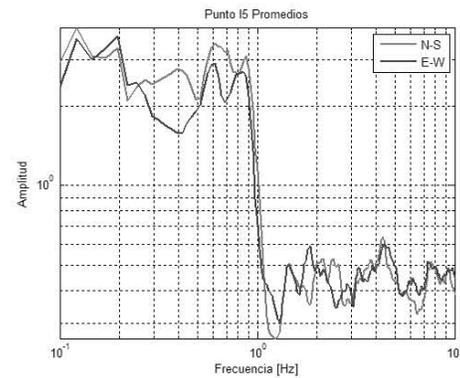
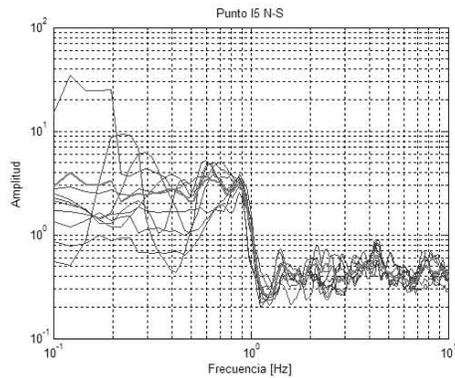
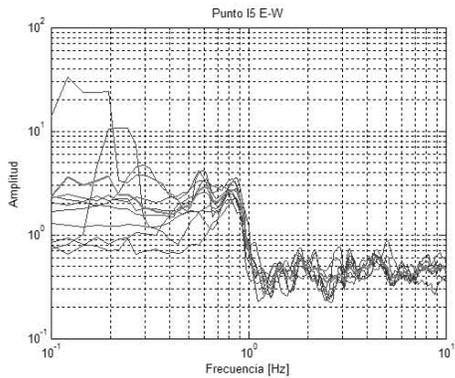
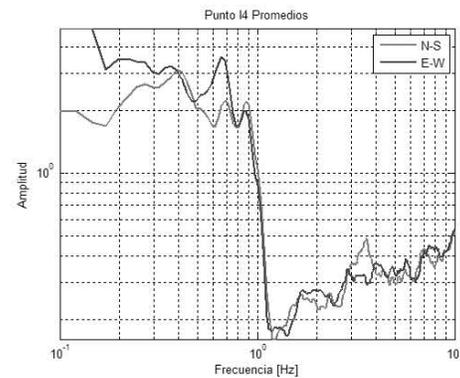
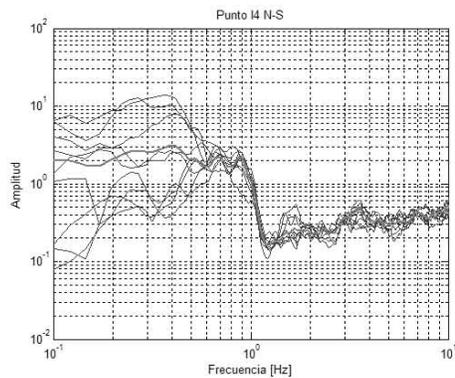
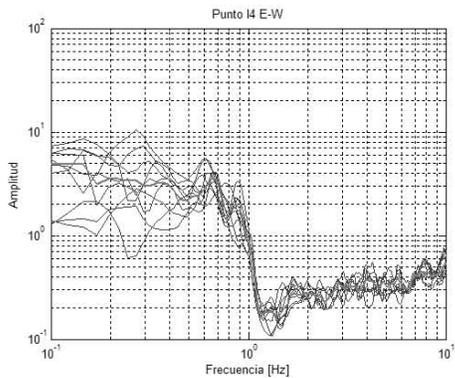
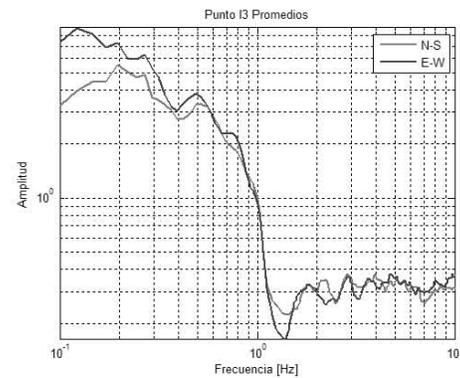
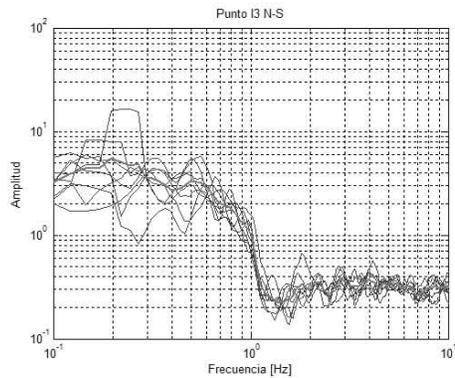
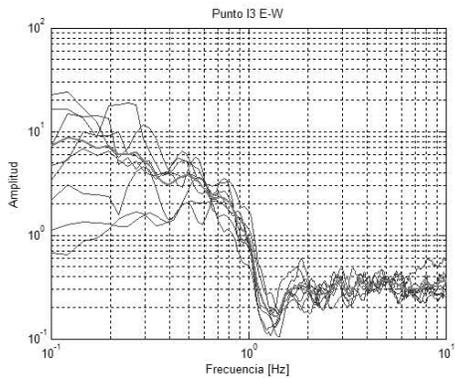
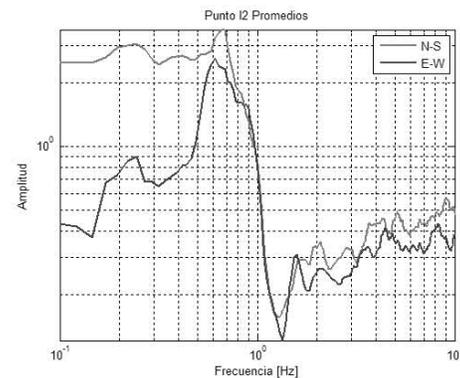
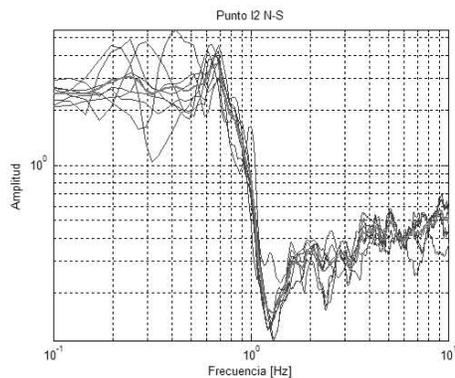
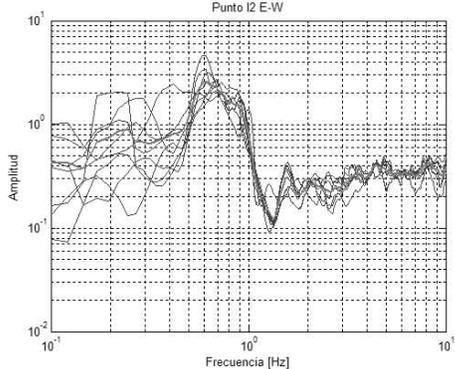
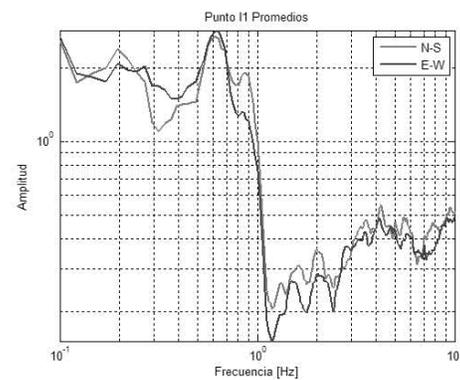
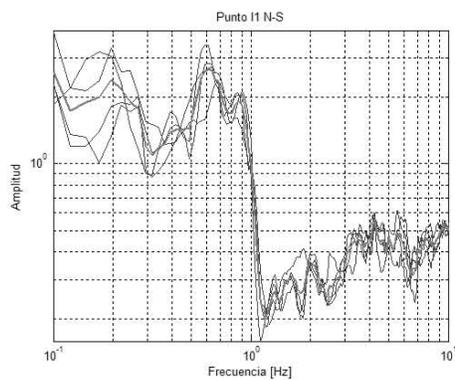
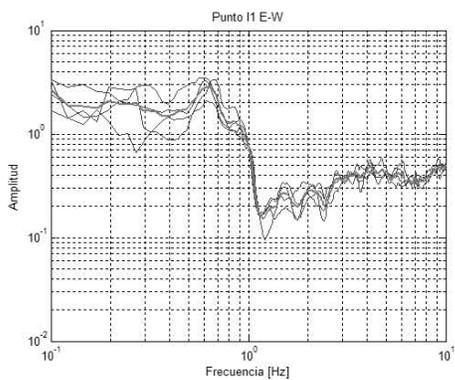
Las diferentes hipótesis han sido verificadas experimentalmente por el mismo Nakamura con mediciones de microtemores en superficie y en pozo. Estas mismas han sido verificadas también numéricamente por otros autores, confrontando los resultados obtenidos con modelos de propagación de ondas Rayleigh, modelos de propagación 1D de ondas S y con modelos generados mediante rumor sintético. Las conclusiones a las cuales llegaron dichos estudios son que el pico que se aprecia en las relaciones H/V obtenidas con el rumor simulado es independiente de las características de la fuente de ruido y es en cambio totalmente dependiente de la estratigrafía del terreno. Dicho pico está además bien correlacionado con el periodo fundamental de resonancia del terreno sujeto a las propagaciones de ondas S verticales y con el pico fundamental de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh.

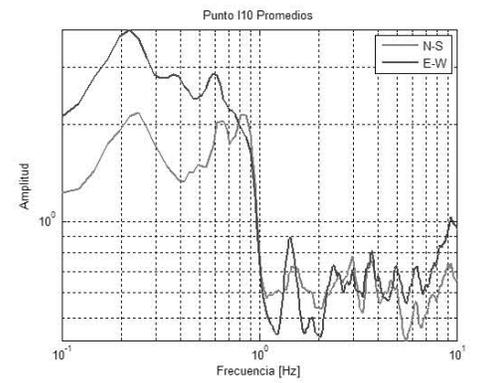
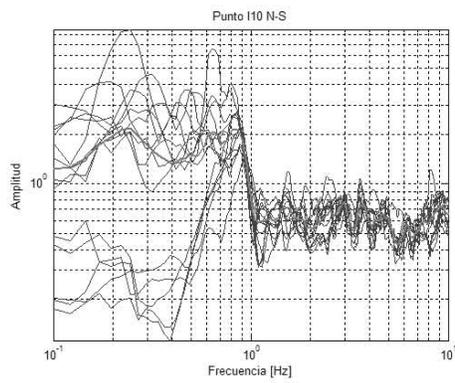
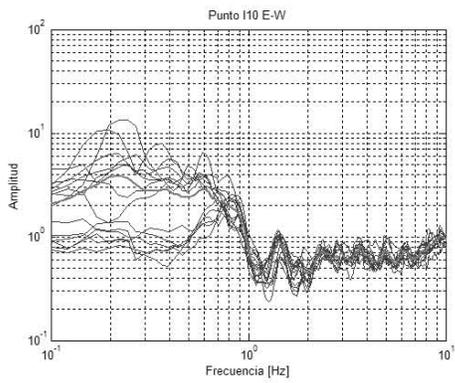
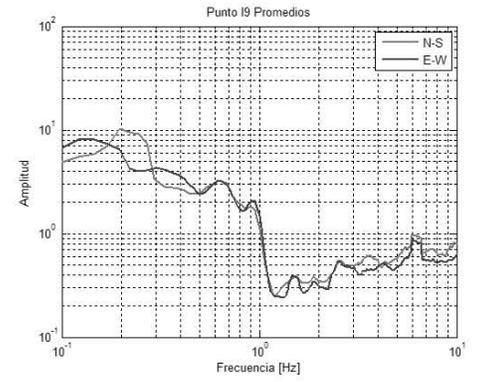
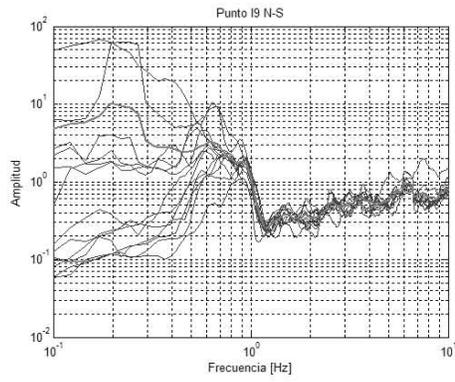
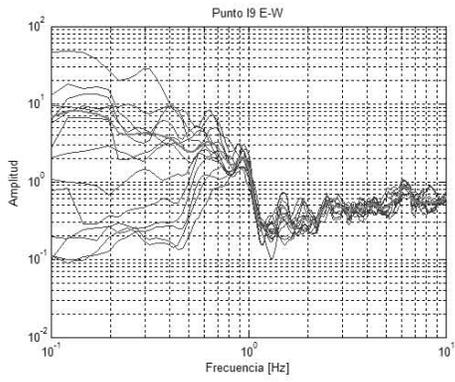
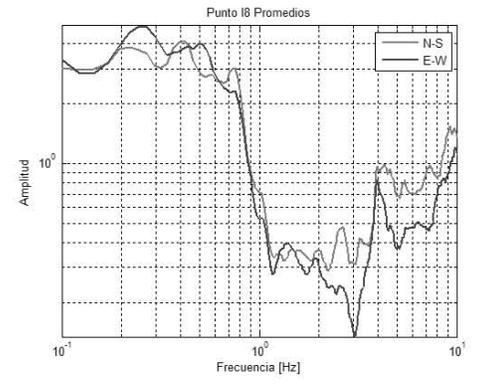
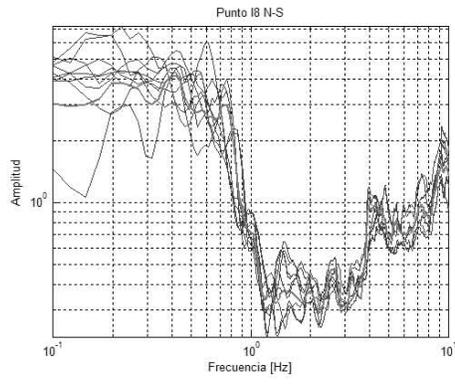
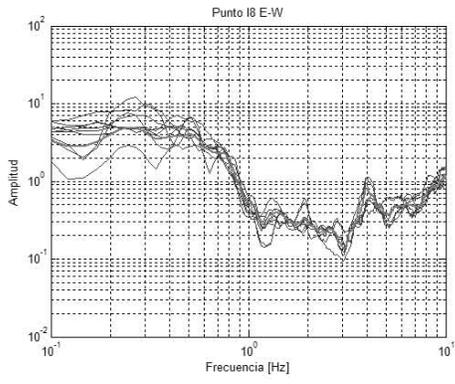
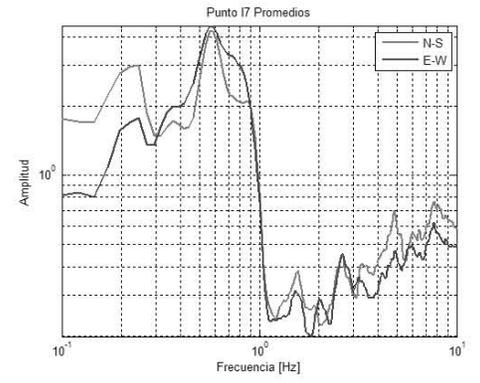
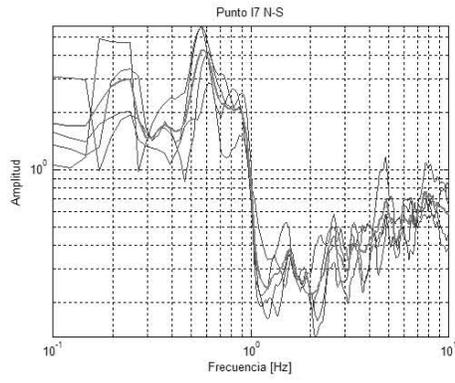
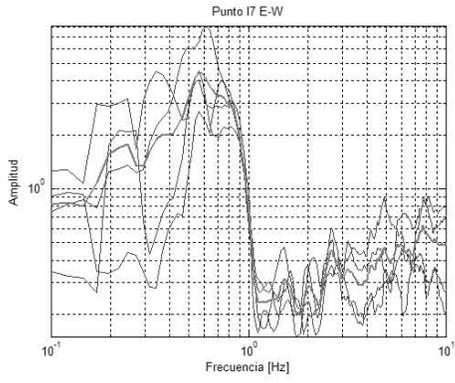
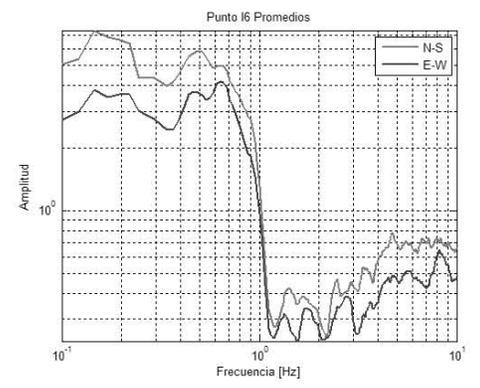
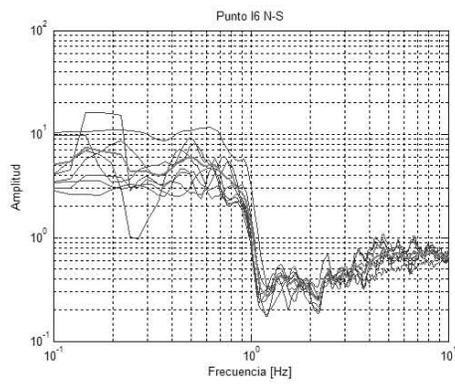
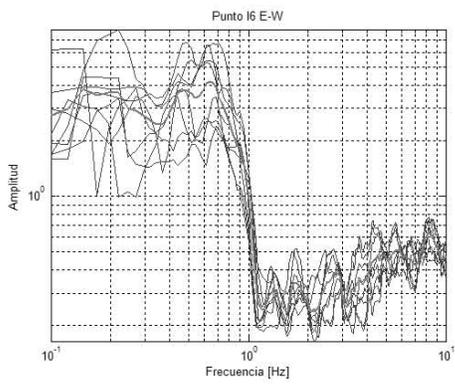
## ANEXO 2

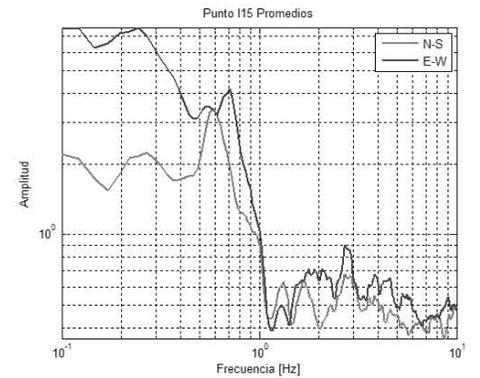
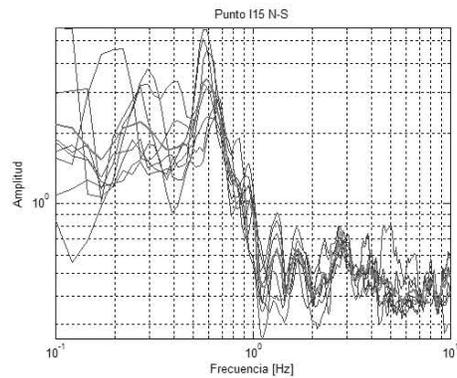
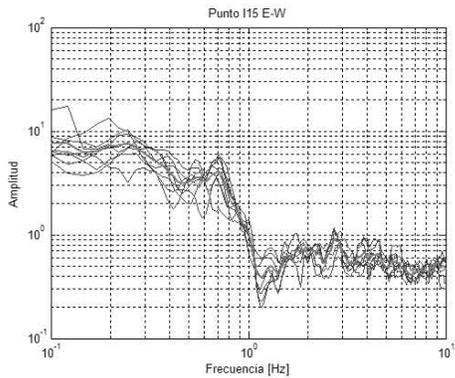
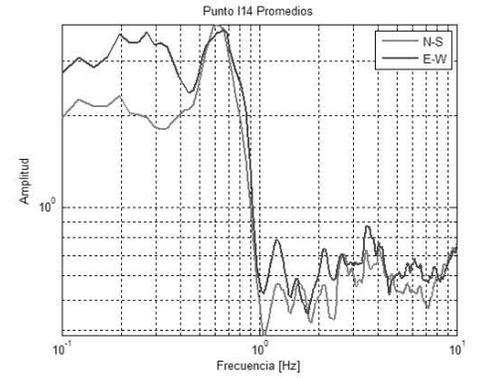
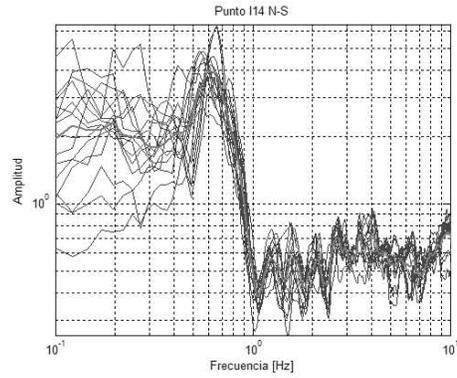
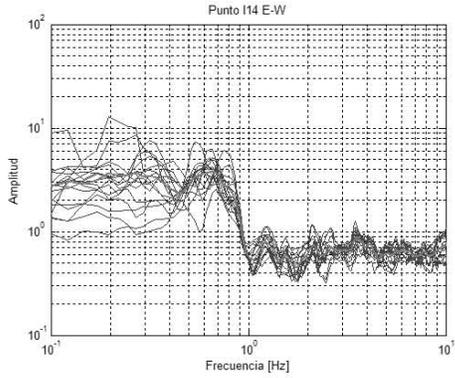
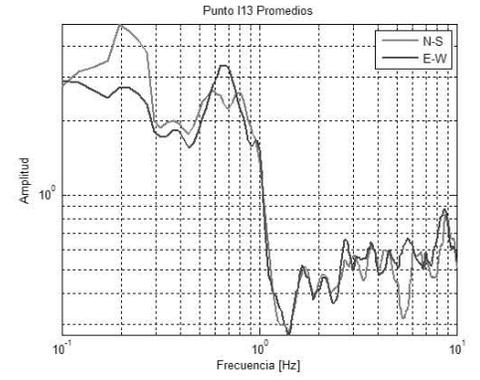
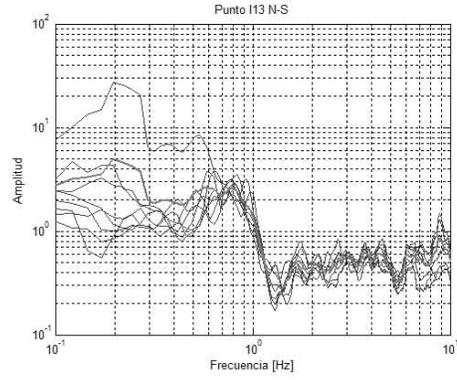
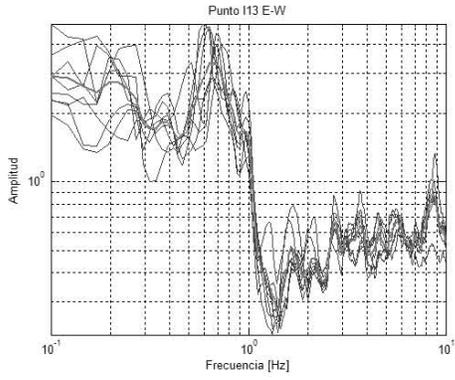
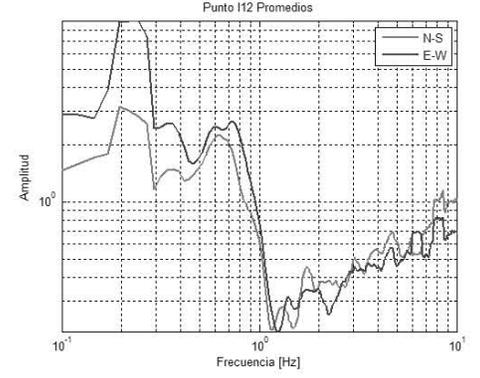
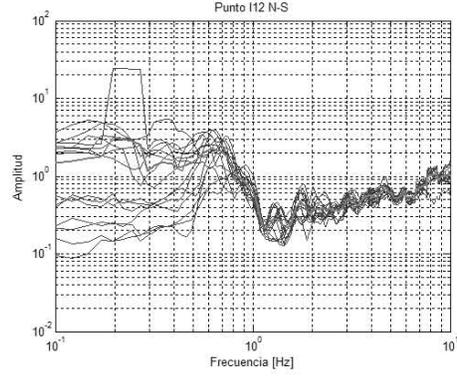
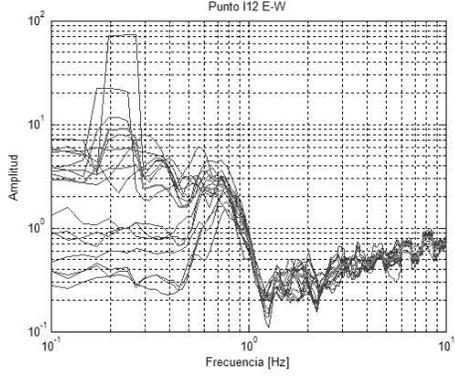
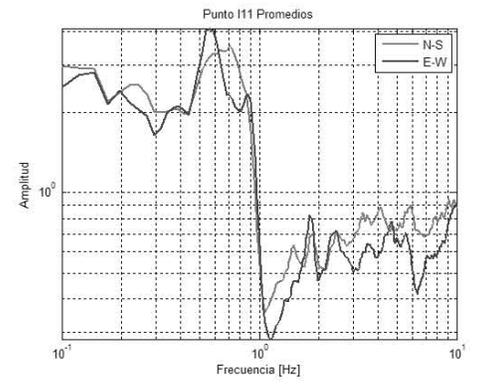
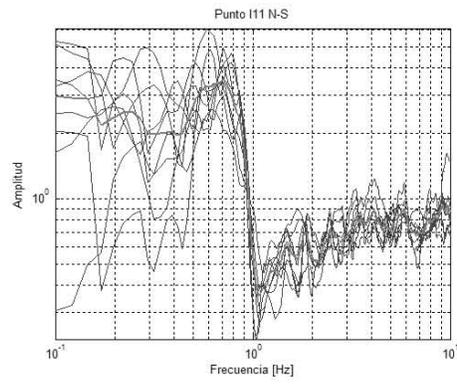
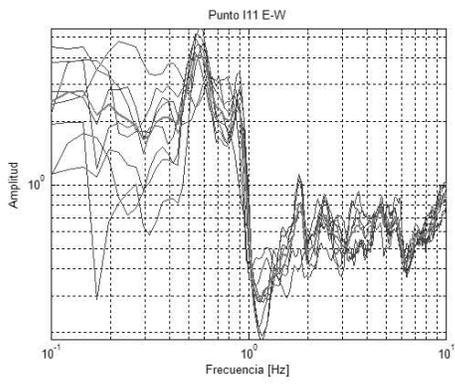
**Funciones de Transferencia Empíricas de las componentes N-S, E-W y promedios de la zona de estudio colonia Del Mar en la delegación Tláhuac.**

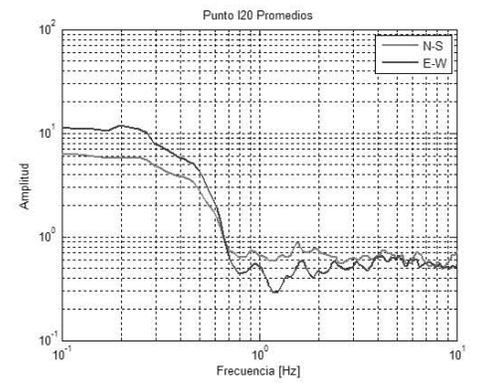
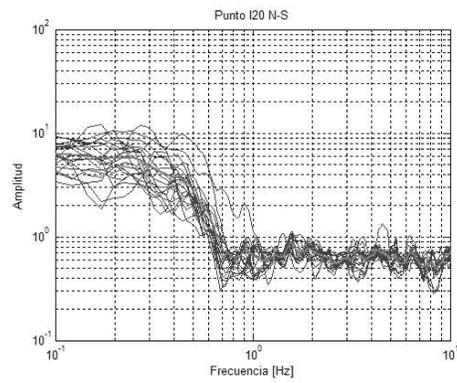
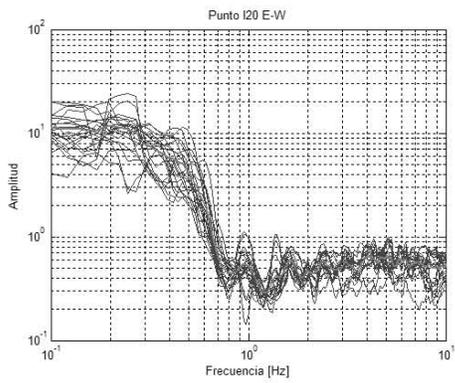
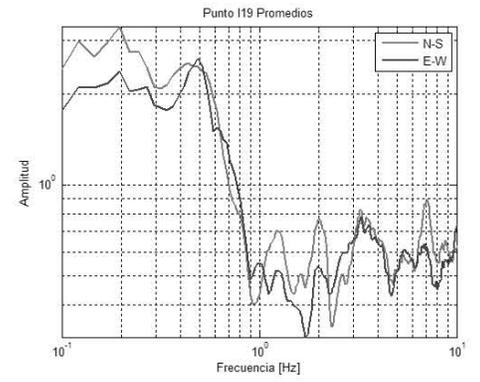
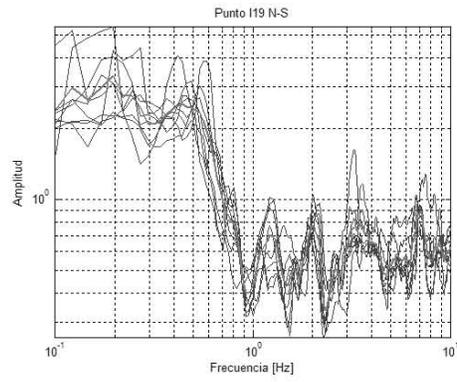
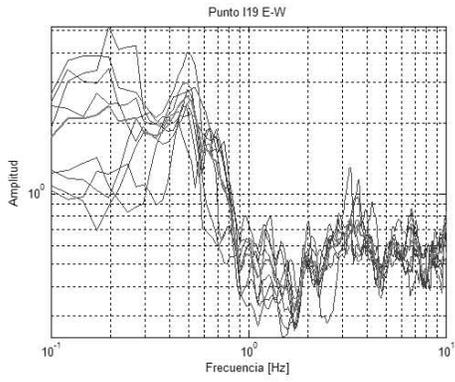
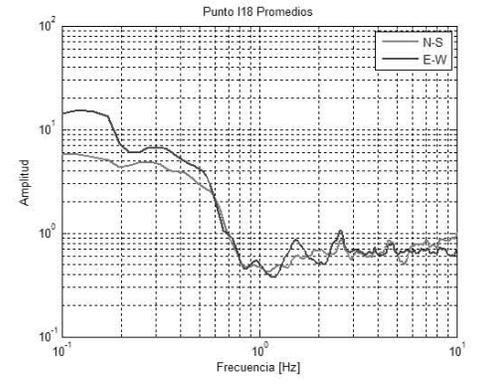
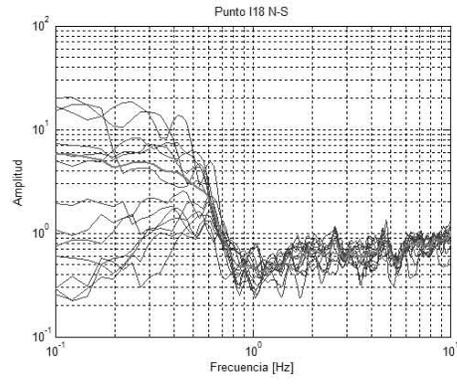
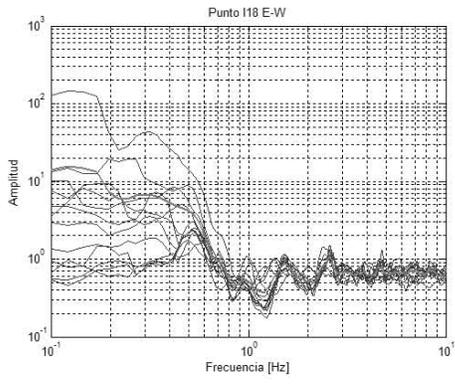
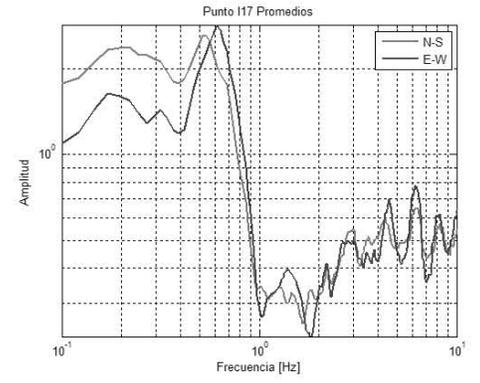
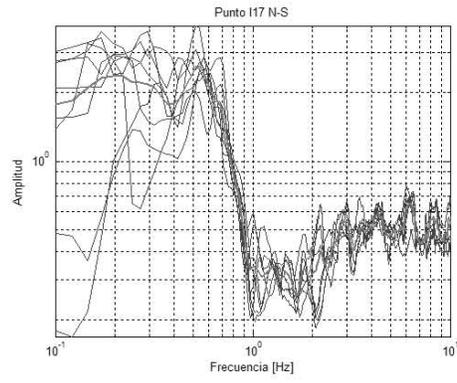
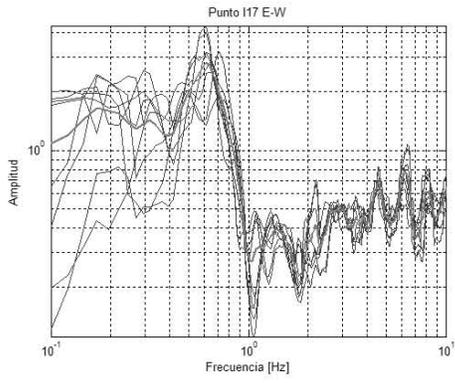
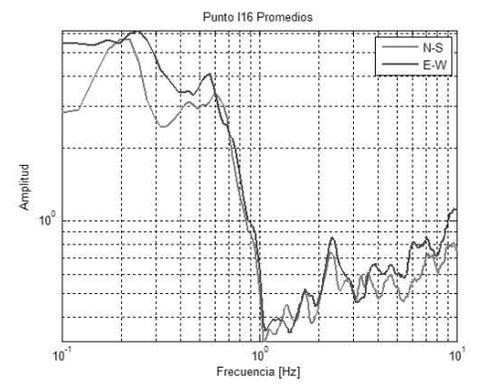
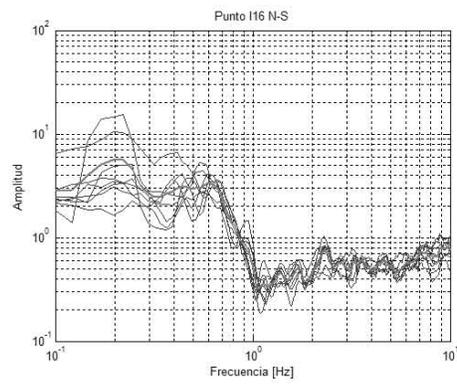
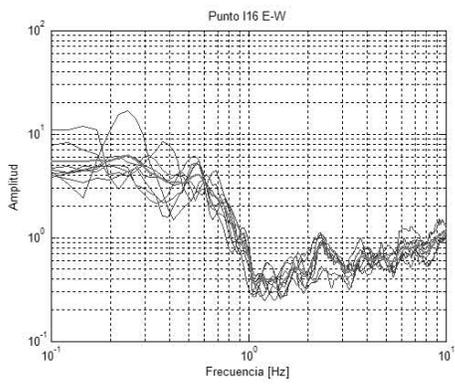
Punto	Longitud	Latitud	To
I1	-99.063	19.28367	1.7
I2	-99.0629	19.28374	1.7
I3	-99.063	19.2838	2
I4	-99.0626	19.28398	1.7
I5	-99.0622	19.28406	1.2
I6	-99.0633	19.28368	1.7
I7	-99.0634	19.28348	2
I8	-99.0638	19.28312	1.7
I9	-99.0629	19.28628	1.1
I10	-99.0637	19.28628	1.3
I11	-99.0631	19.28584	1.8
I12	-99.0624	19.28539	1.7
I13	-99.0641	19.28661	1.3
I14	-99.0644	19.28589	1.7
I15	-99.0648	19.28545	1.7
I16	-99.0653	19.28476	2
I17	-99.0657	19.28429	1.7
I18	-99.0663	19.28361	2
I19	-99.0655	19.28297	1.9
I20	-99.0645	19.28424	2.5
I21	-99.0649	19.28379	1.7
I22	-99.0631	19.28833	1.3
I23	-99.0635	19.28766	1.7
I24	-99.063	19.28768	1.3
I25	-99.0622	19.2893	1.7
I26	-99.0611	19.29064	1.3
I27	-99.06	19.29203	0.6
I28	-99.0576	19.29491	0.8
I29	-99.0544	19.29608	1.1
I30	-99.0528	19.29803	1.3

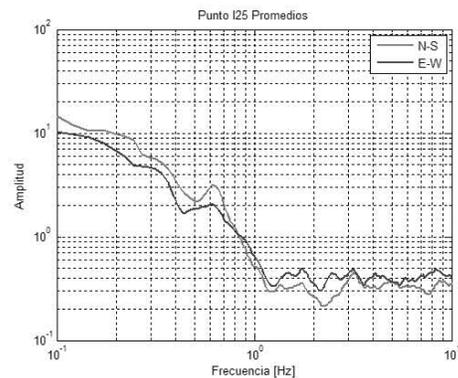
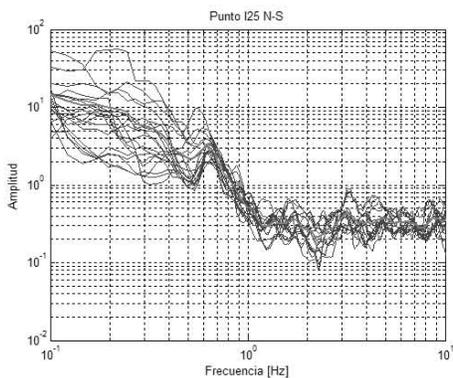
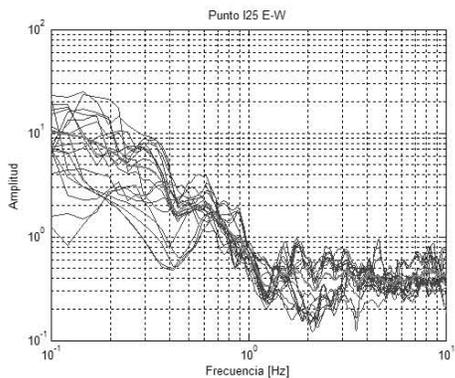
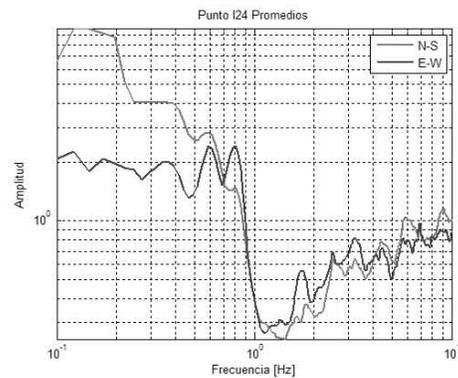
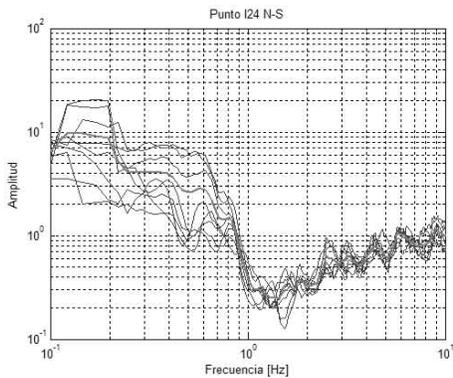
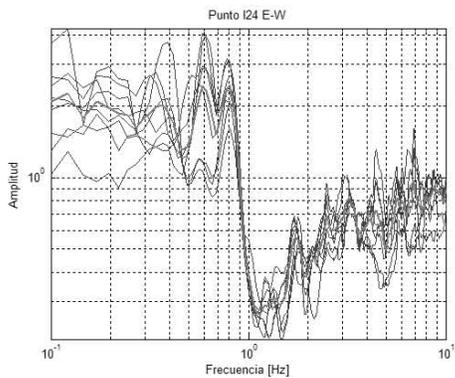
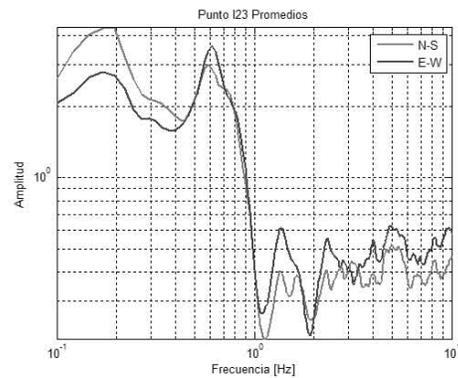
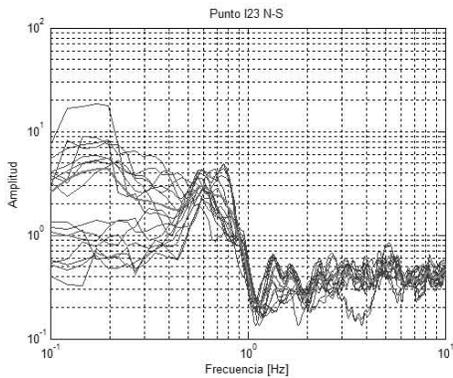
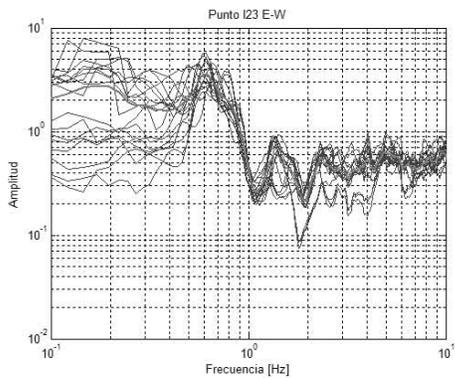
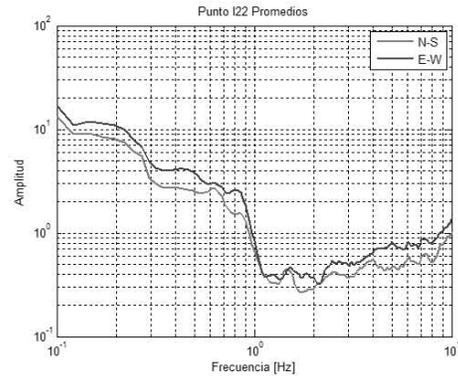
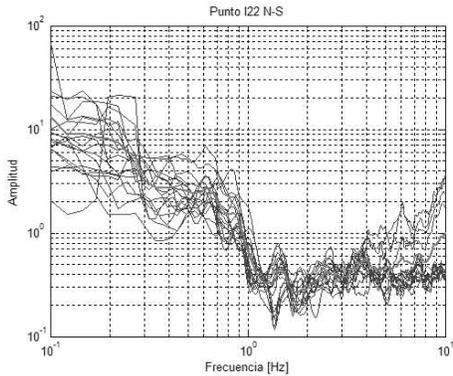
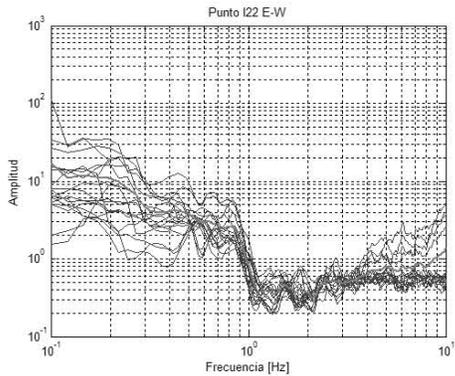
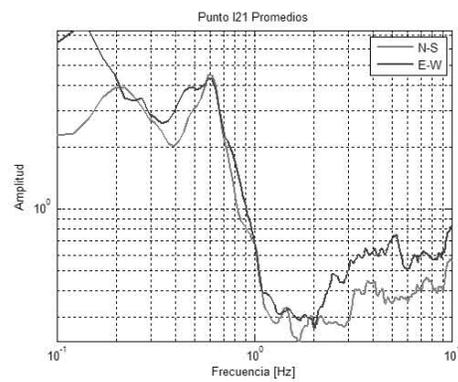
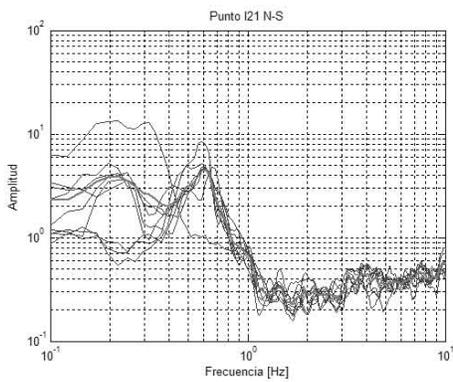
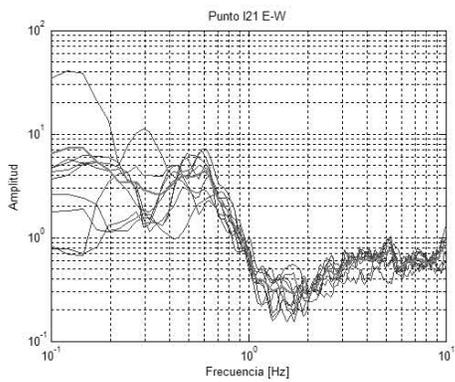
Punto	Longitud	Latitud	To
I31	-99.0509	19.30027	2.2
I32	-99.0496	19.30195	1.3
I33	-99.0472	19.30478	1
I34	-99.064	19.29217	1.7
I35	-99.0578	19.28478	1.7
I36	-99.0569	19.28427	2
I37	-99.0574	19.28363	2

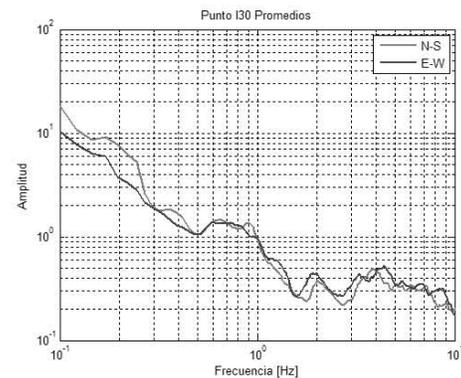
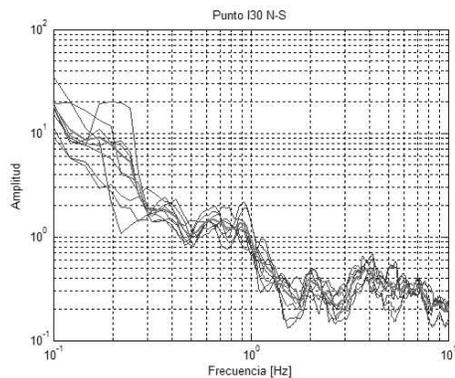
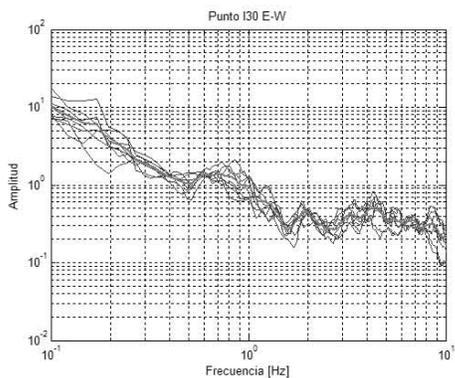
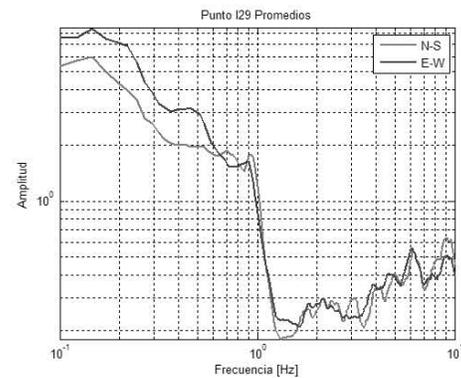
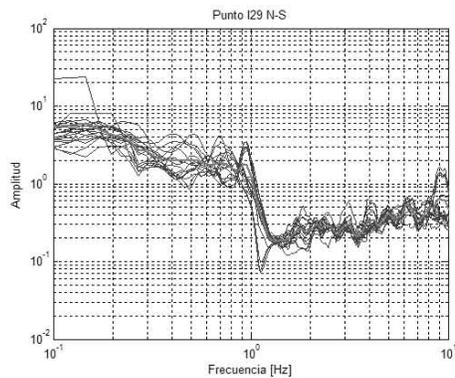
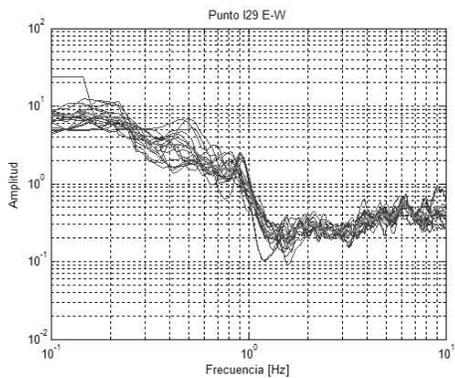
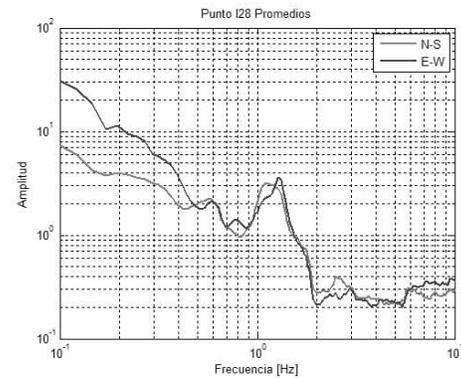
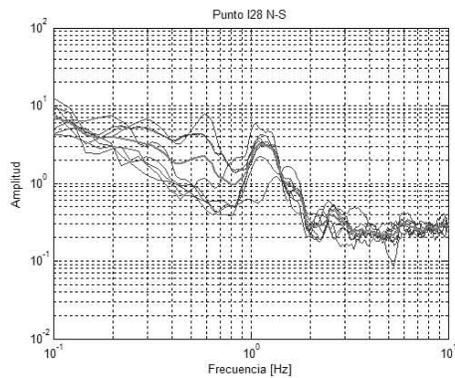
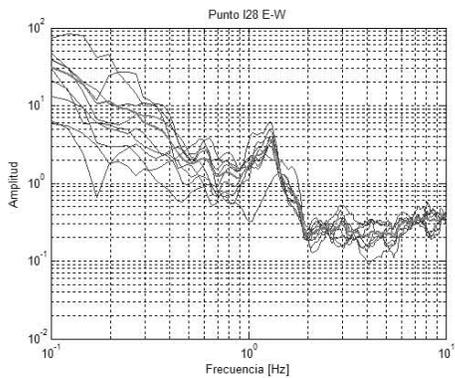
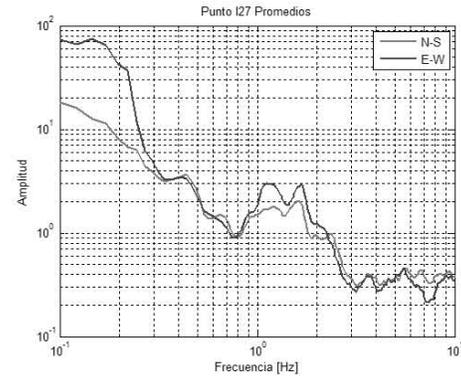
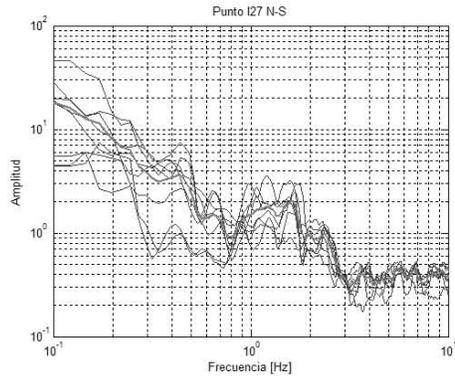
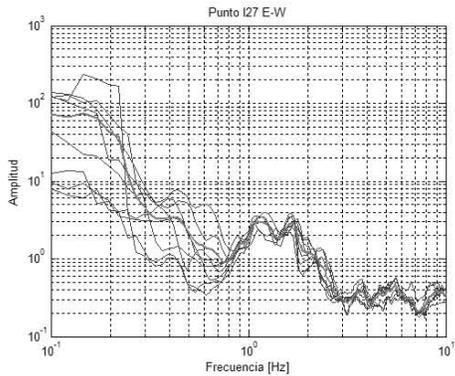
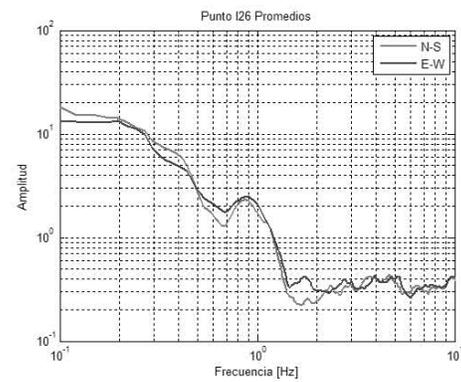
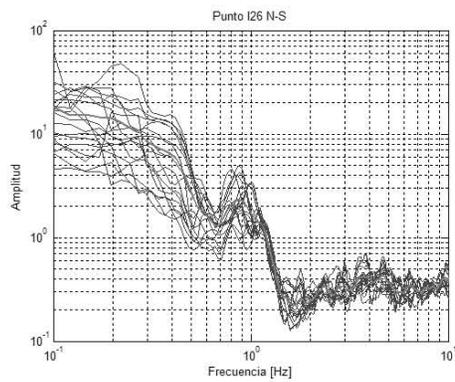
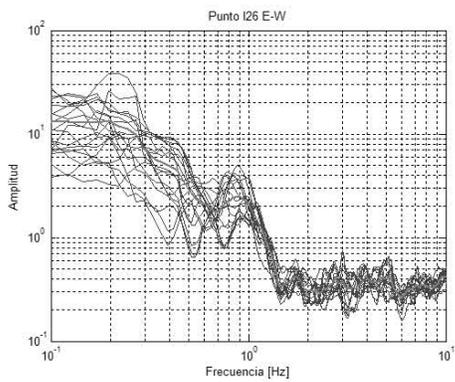


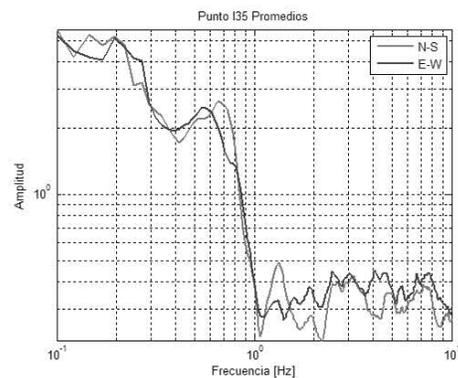
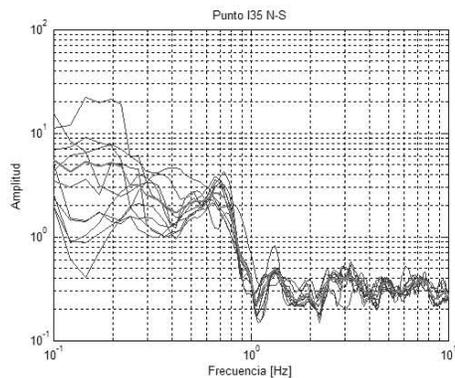
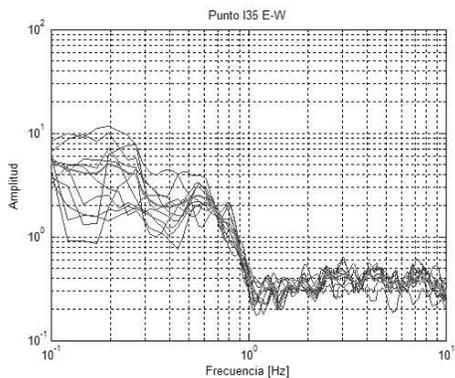
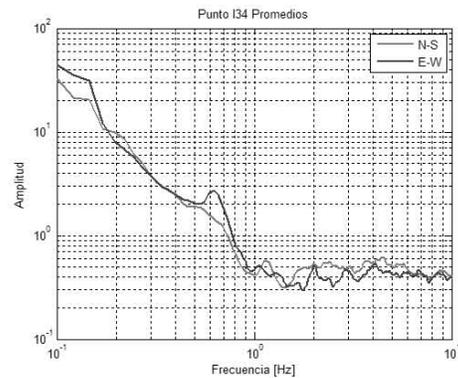
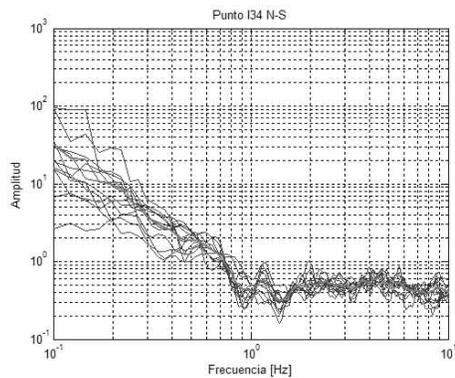
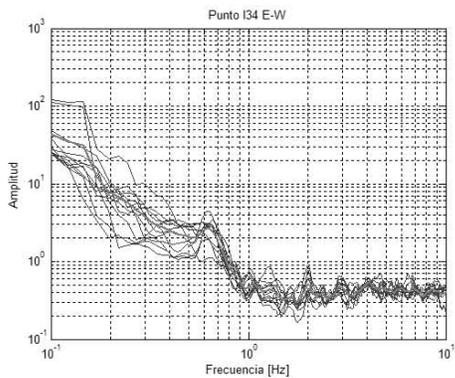
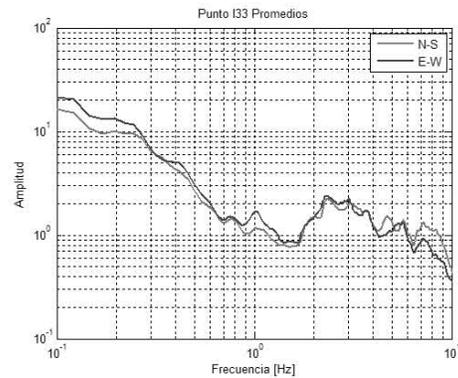
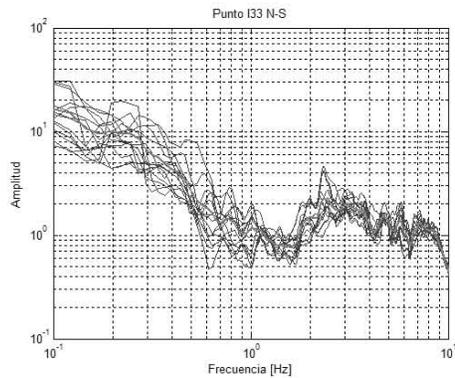
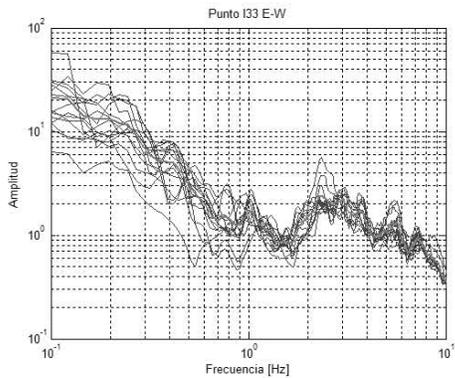
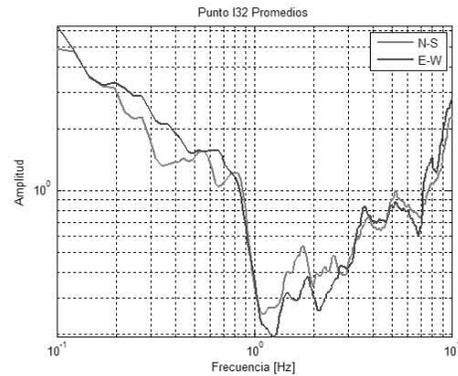
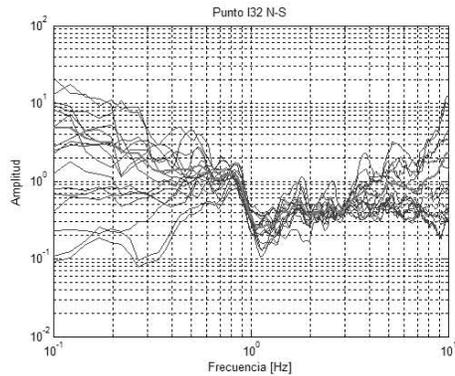
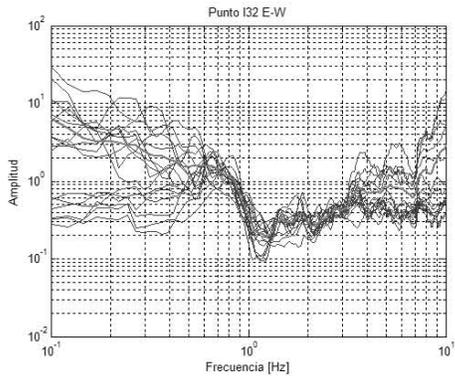
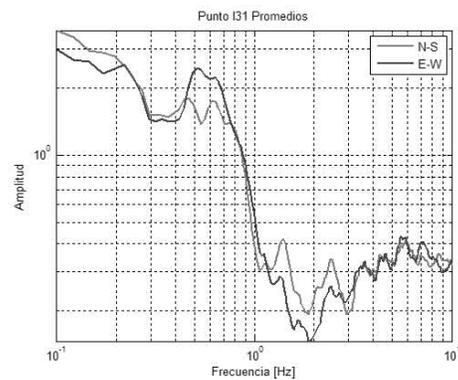
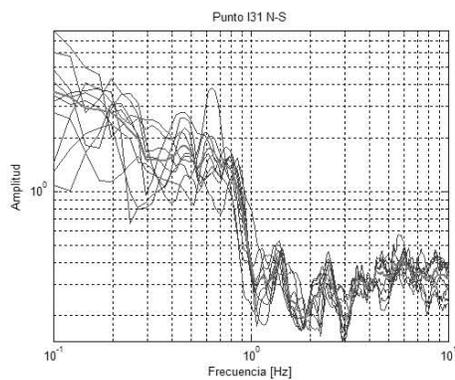
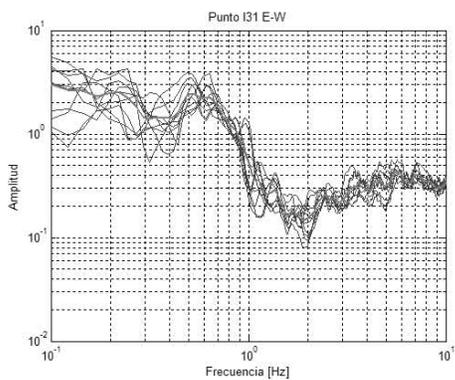


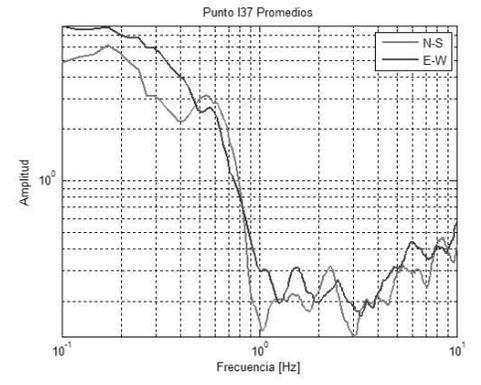
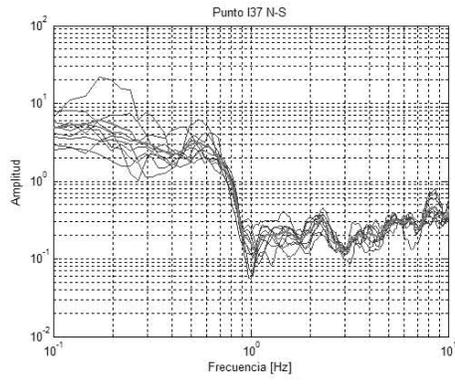
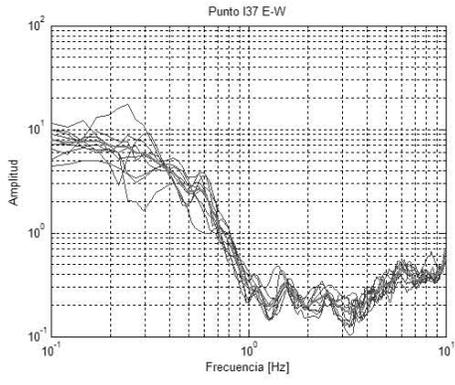
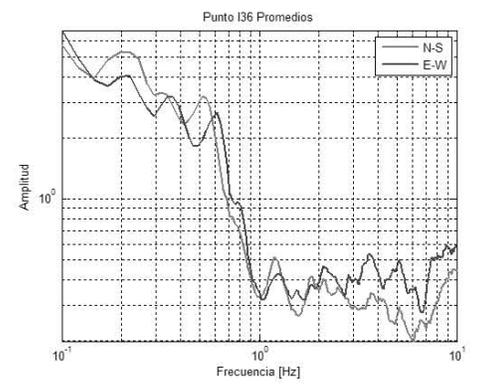
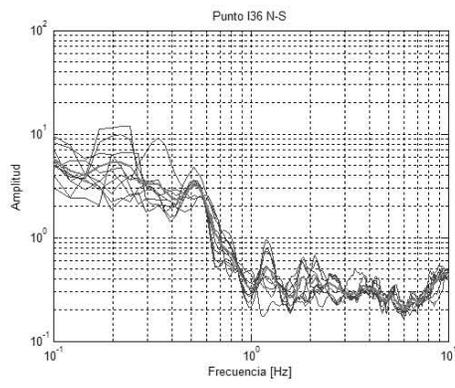
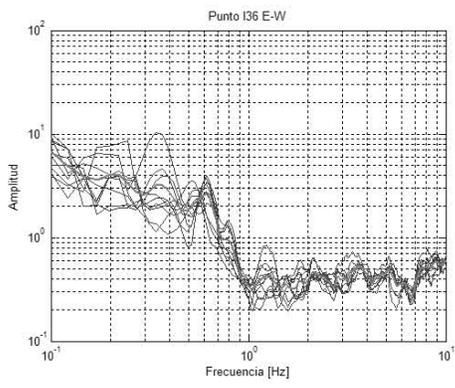










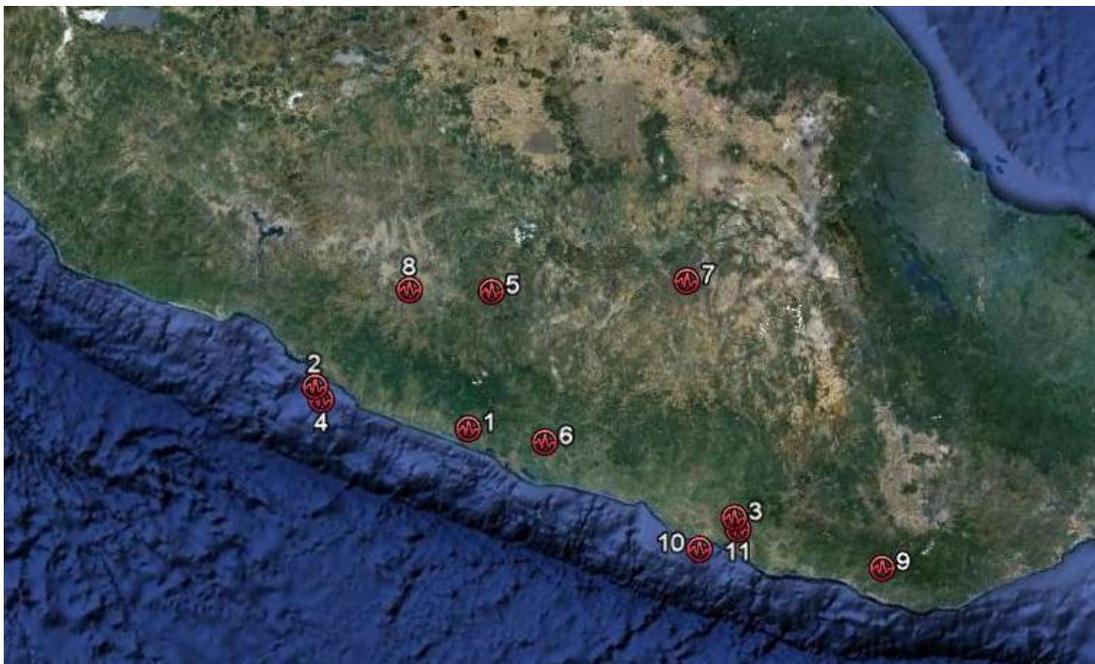


## ANEXO 3

Funciones de Transferencia Empíricas obtenidas con datos de aceleración (primera parte) y microtemores (segunda parte) en las estaciones del CIRES y Idel.

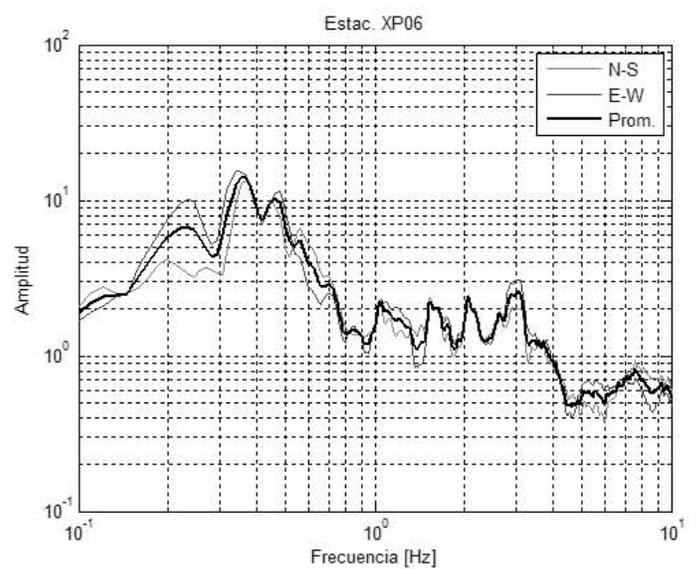
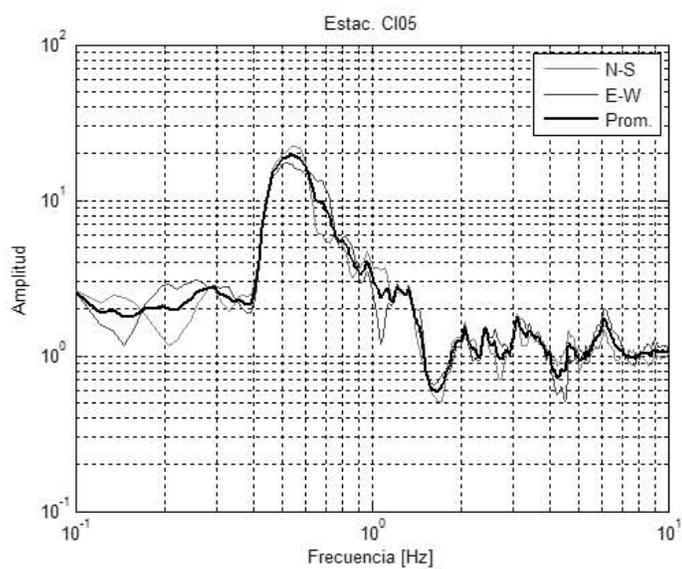
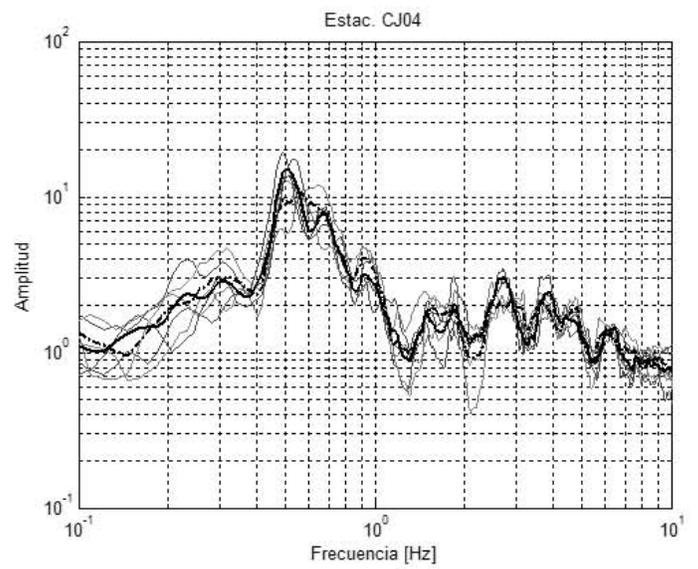
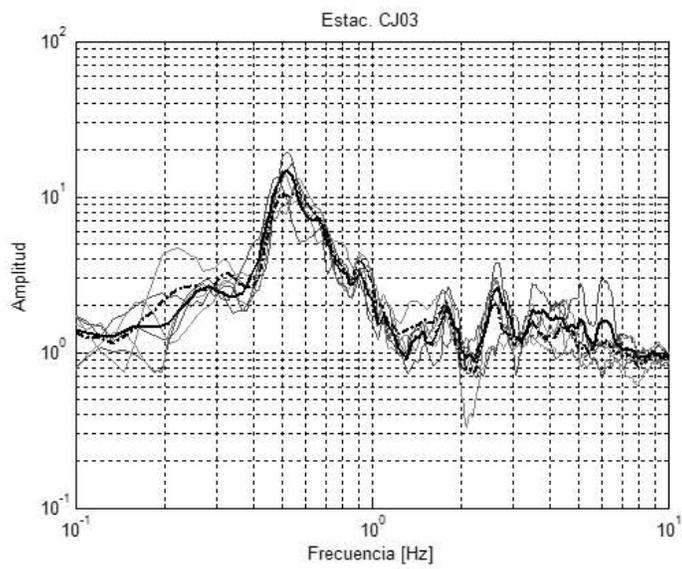
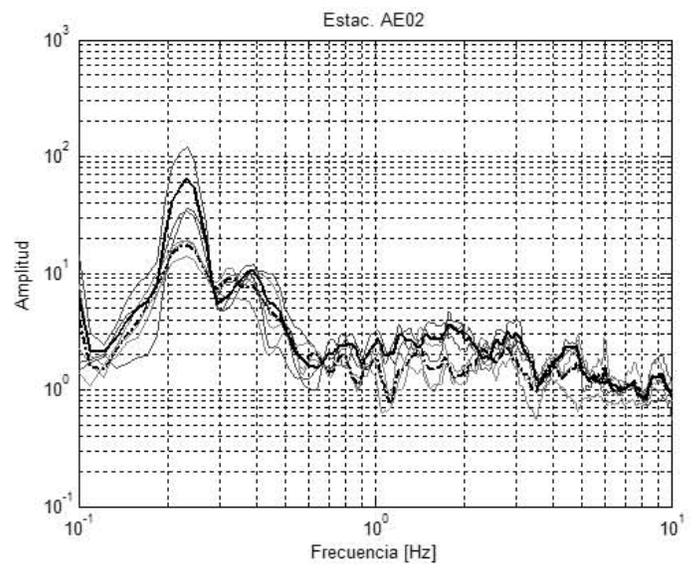
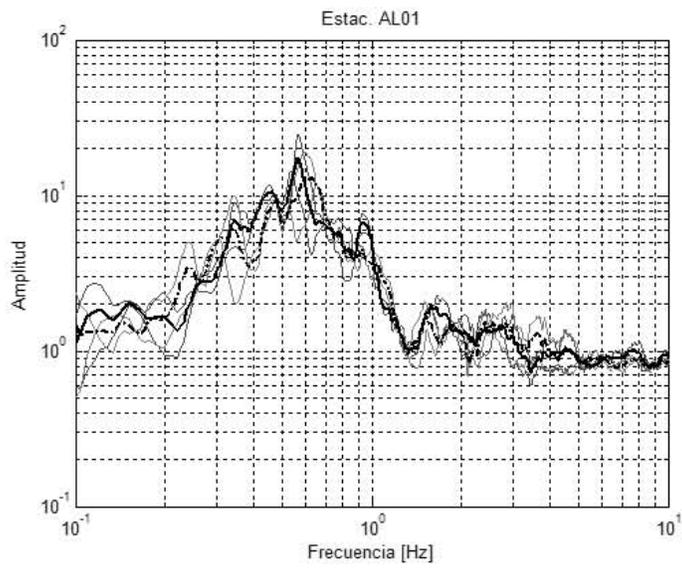
Tabla de eventos sísmicos registrados.

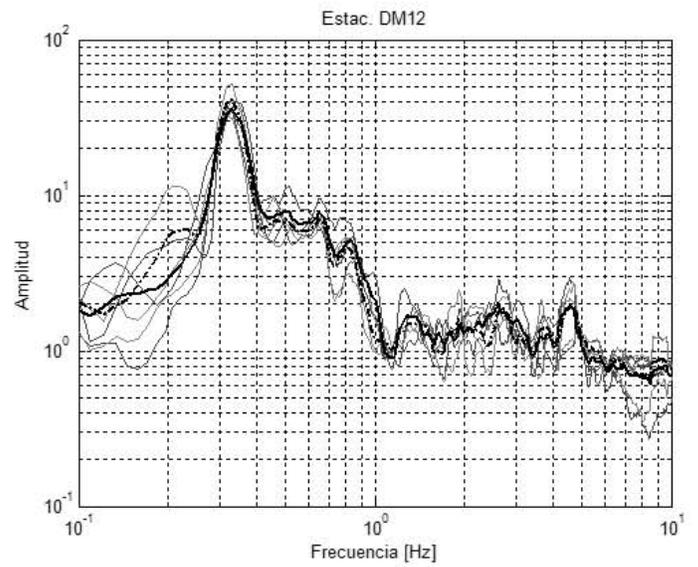
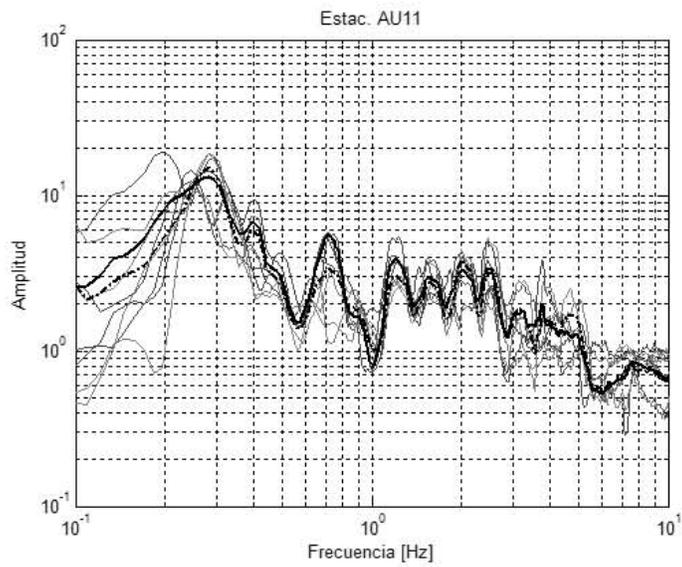
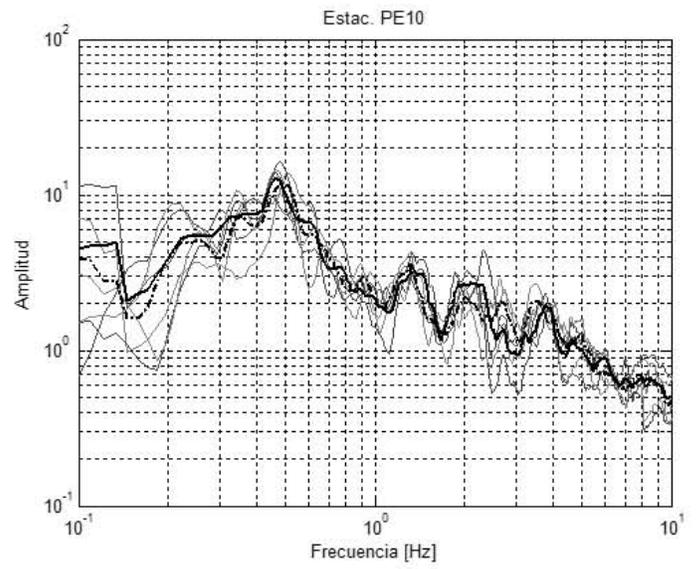
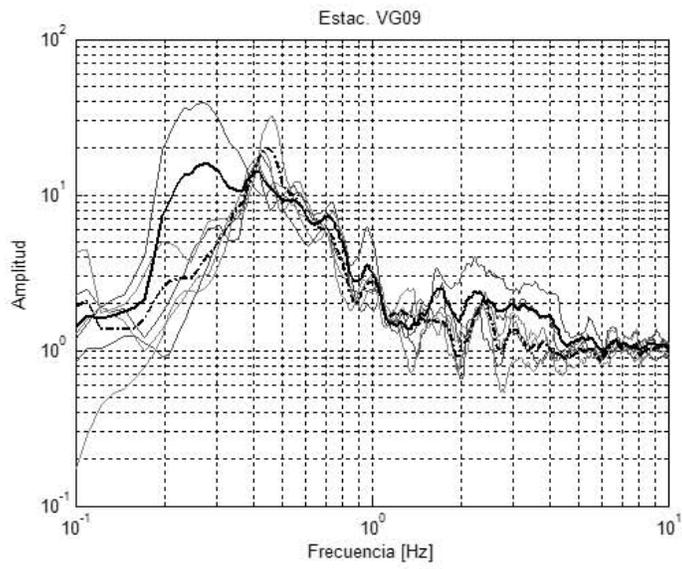
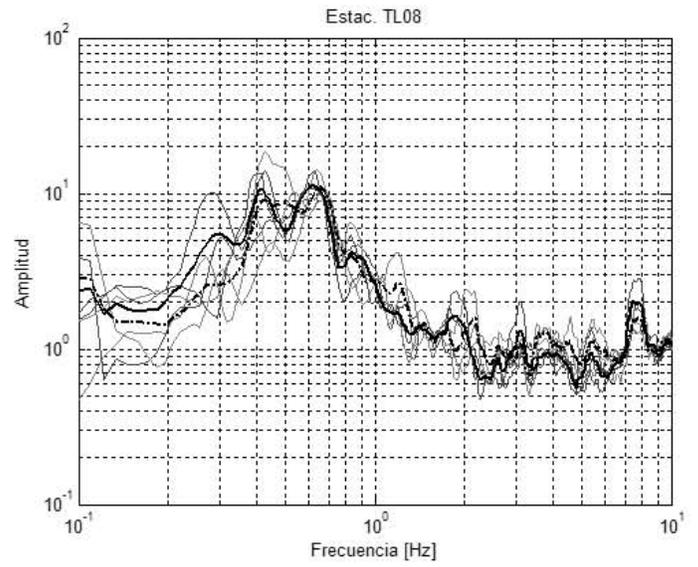
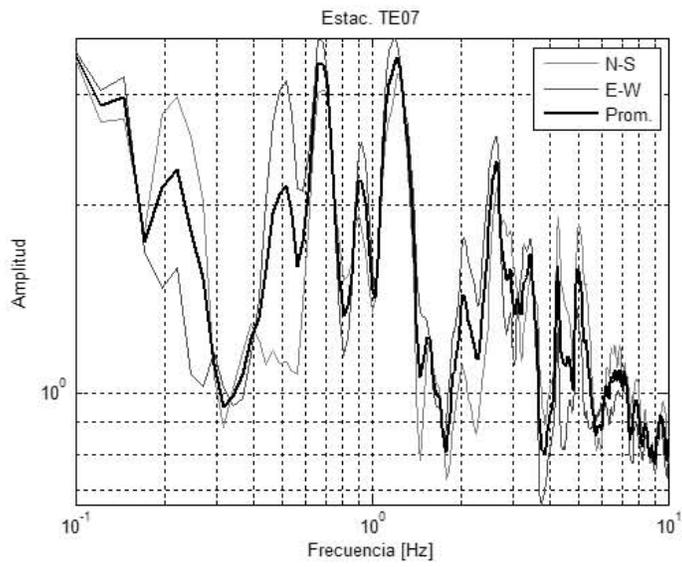
Evento	Fecha	Lat. N	Long. W	Profundidad (km)	Magnitud
1	08102001	17	-100.19	4	5.1
2	01012004	17.31	-101.42	10	5
3	14062004	16.31	-98.06	10	5.8
4	13042007	17.21	-101.37	24	5.2
5	28042008	18.05	-100.01	52	5.6
6	27042009	16.9	-99.58	7	5.7
7	22052009	18.13	-98.44	45	5.7
8	15082009	18.06	-100.67	55	5.4
9	09022010	15.9	-96.86	37	5.8
10	20042010	16.07	-98.34	5	5
11	30092010	16.22	-98.03	8	6

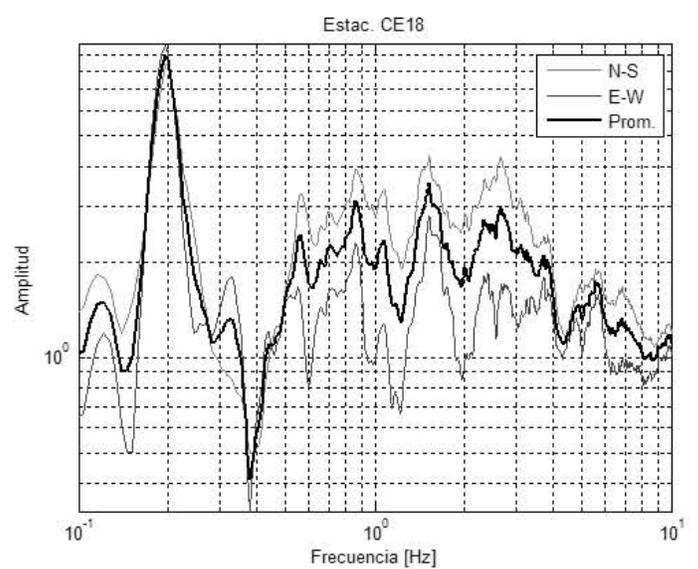
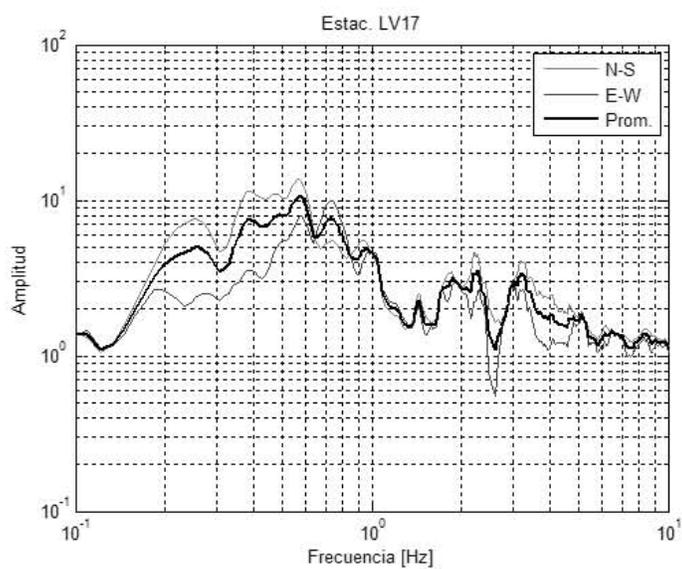
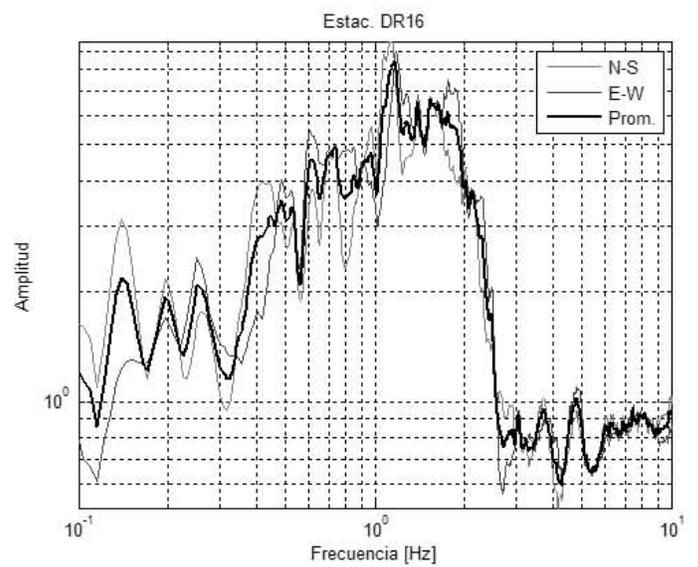
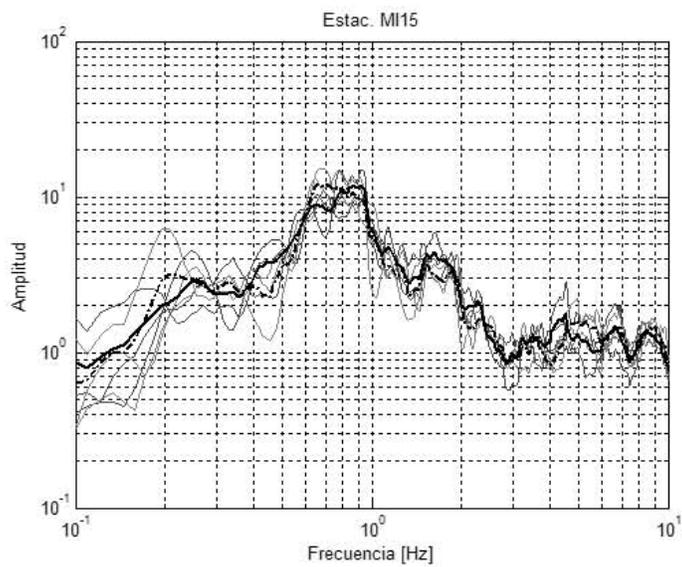
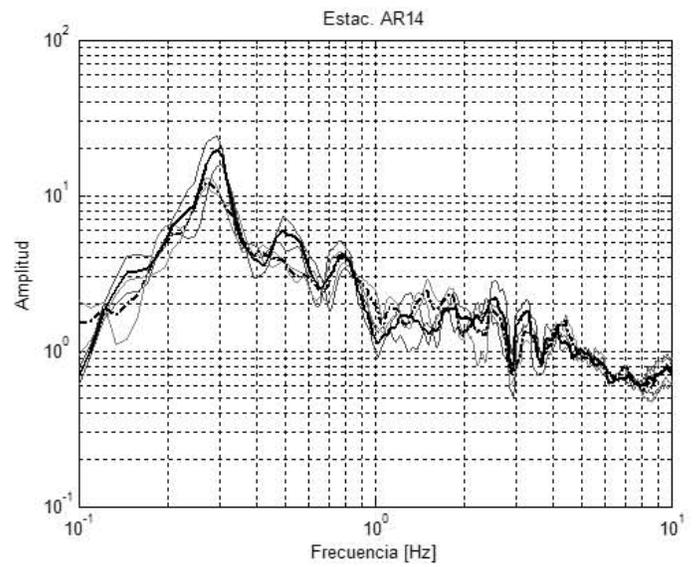
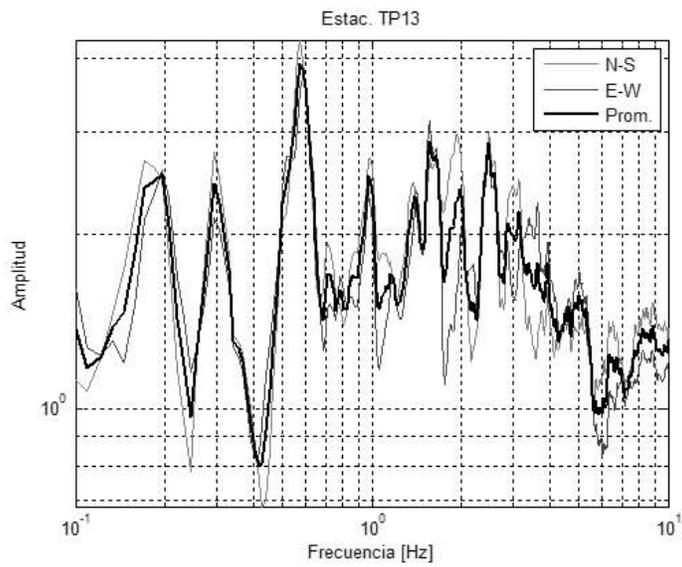


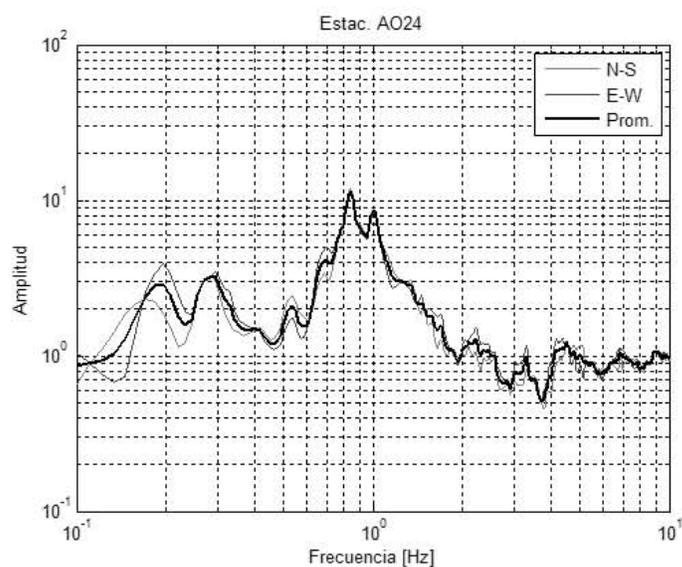
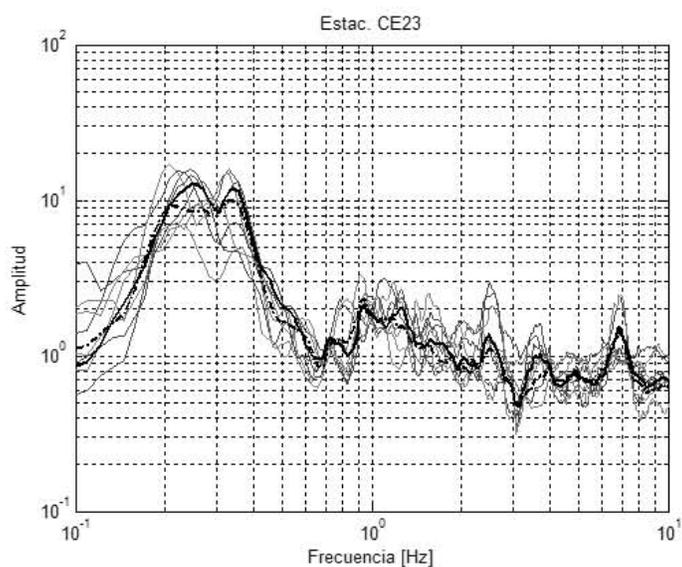
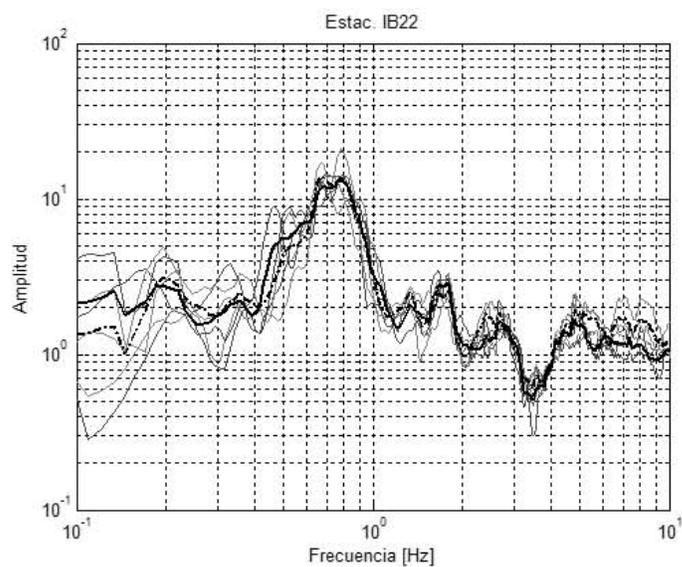
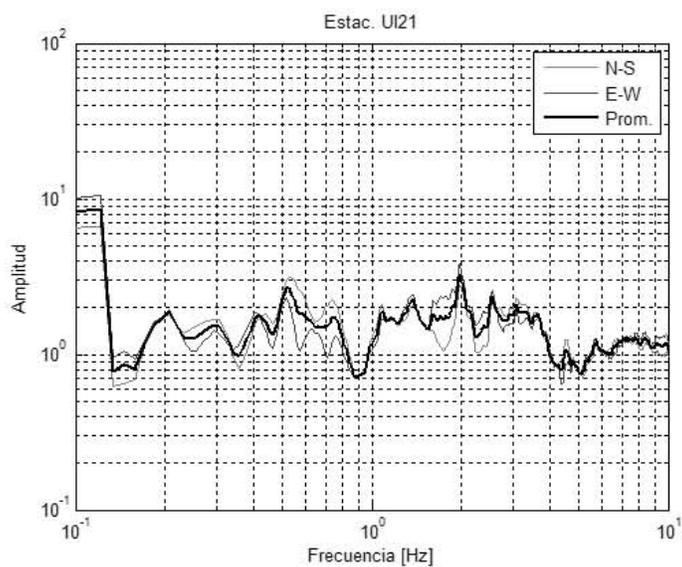
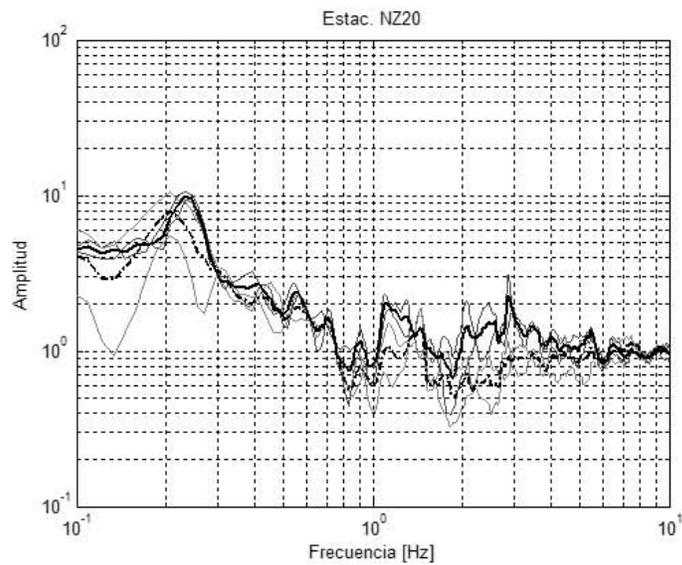
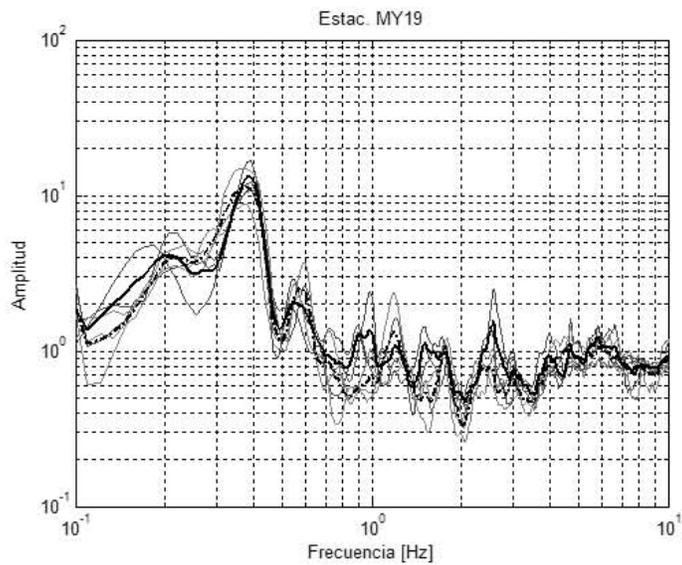
Estación	Eventos				
AE02	20100630	20090427	20090522		
AL01	20100630	20100209			
AO24	20100630				
AP68	20100630	20080428	20070413		
AR14	20040614	20100209			
AU11	20100630	20090427	20090522	20090815	20100209
BA49	20100630	20090815	20100209		
BL45	20100630				
BO39	20100630	20090815	20100209		
CA59	20100630	20090815	20100209		
CE18	20100630				
CE23	20100630	20090427	20090522	20100209	
CE32	20100630	20090427	20090522		
CH84	20100630	20090427	20090522		
CI05	20100630				
CJ03	20100630	20090522	20100209		
CJ04	20100630	20090427	20090522		
CO47	20100630				
CO56	20100630				
CP28	20100630				
CS78	20100630				
CT64	20070413				
CU80	20100630	20090427	20090522		
DM12	20100630	20090427	20090522		
DR16	20100630				
DX37	20090427				
EO30	20100630				
ES57	20100630				
FJ74	20100209				
GA62	20100630				
GC38	20100630				
GR27	20100630				
HJ72	20100630	20090427	20090522		
IB22	20100630	20090427	20090522		
IM40	20090522				
JA43	20100630	20100630	20090427	20090522	
JC54	20100630	20090427	20090522		
LI58	20100630	20090427	20090522		
LV17	20100630				
ME52	20100630				

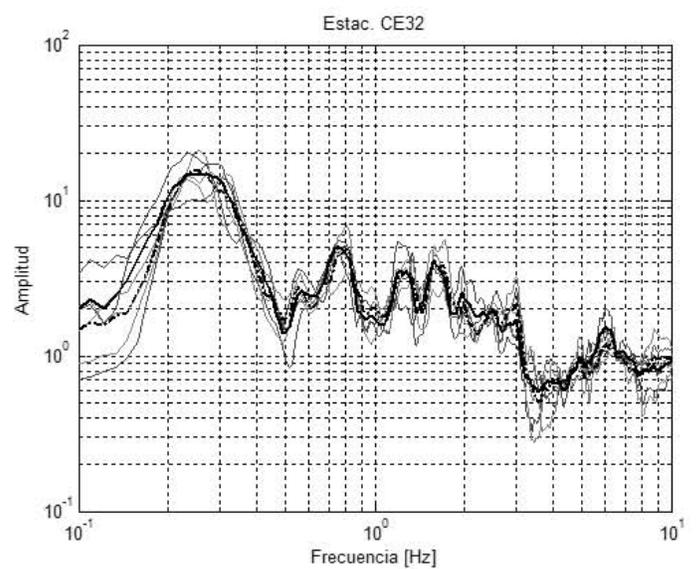
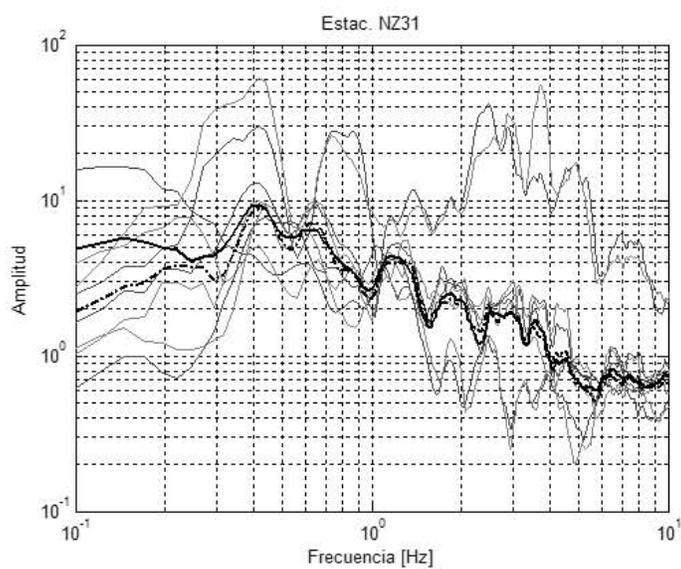
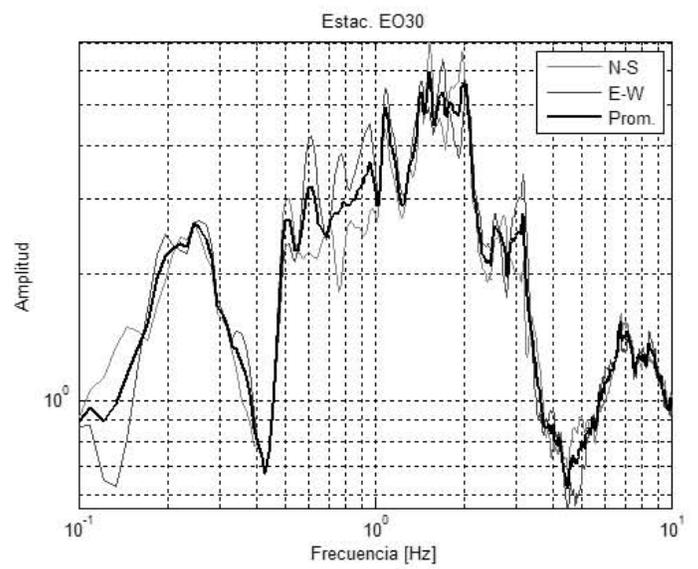
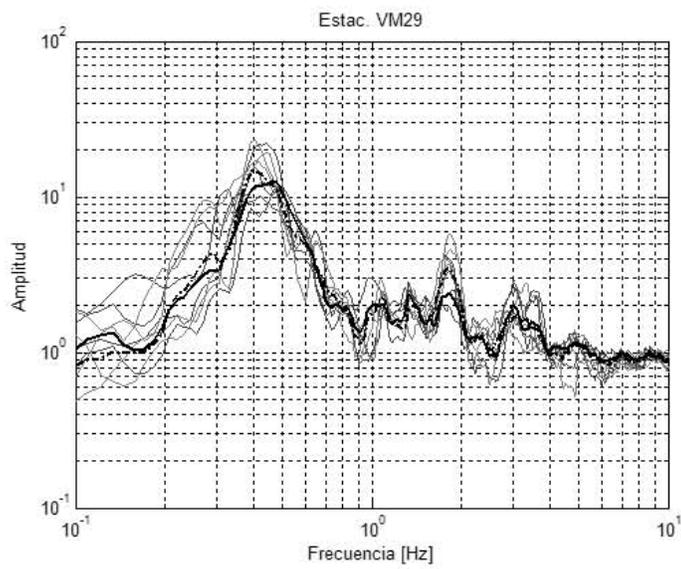
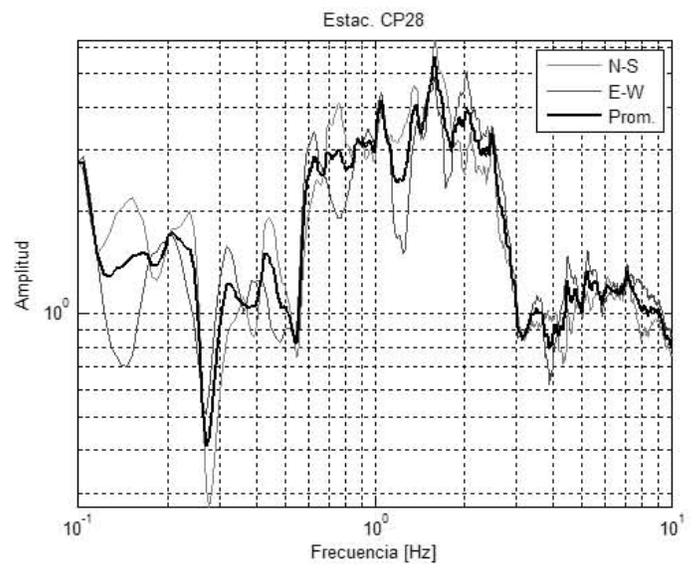
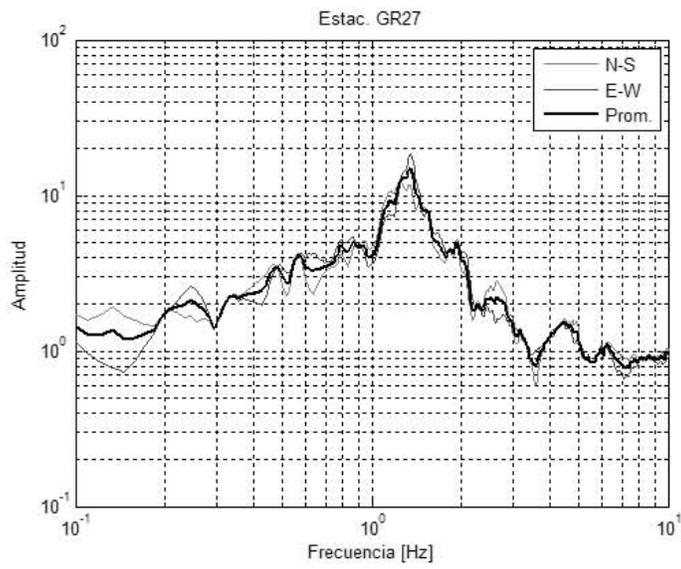
MI15	20100630	20090427	20090522		
MT50	20100630				
MY19	20100630	20090522	20100209		
NZ20	20100630	20080428			
NZ31	20100630	20080428	20090427	20090815	20100209
PD42	20100630	20090427	20090522		
PE10	20100630	20090427	20090522		
RI76	20100630	20090427	20090522		
RM48	20100630	20090427	20090522		
SI53	20100209				
SP51	20090815	20100209			
TE07	20100209				
TH35	20090427	20100209	20080428		
TL08	20100630	20090427	20090522		
TL55	20100630				
TP13	20100630				
UC44	20100630	20090427	20090522		
UI21	20100630				
VG09	20100630	20090815	20100209		
VM29	20100630	20100420	20090815	20100209	
XO36	20100630	20090427	20090522	20100209	20100630

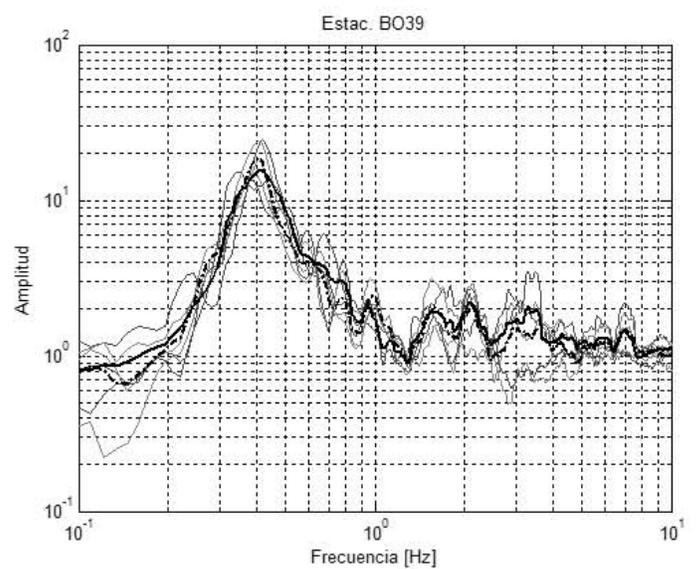
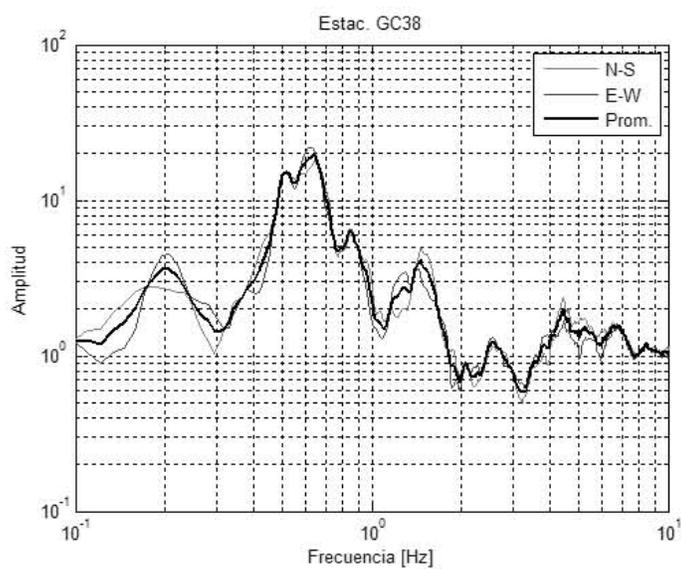
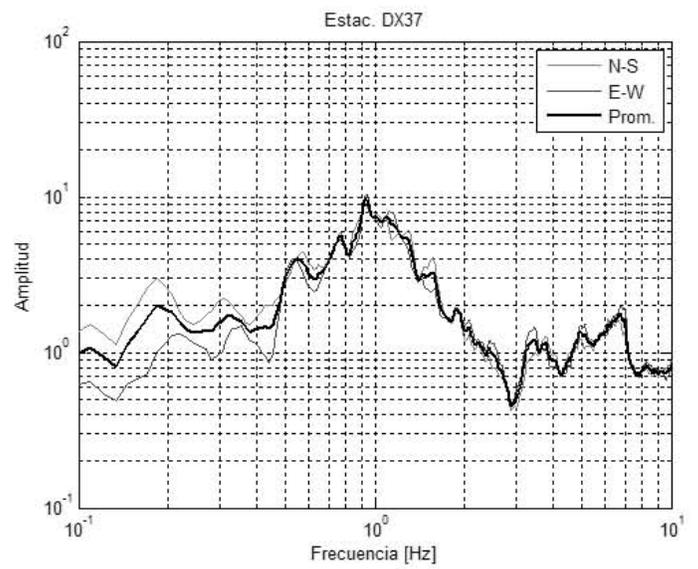
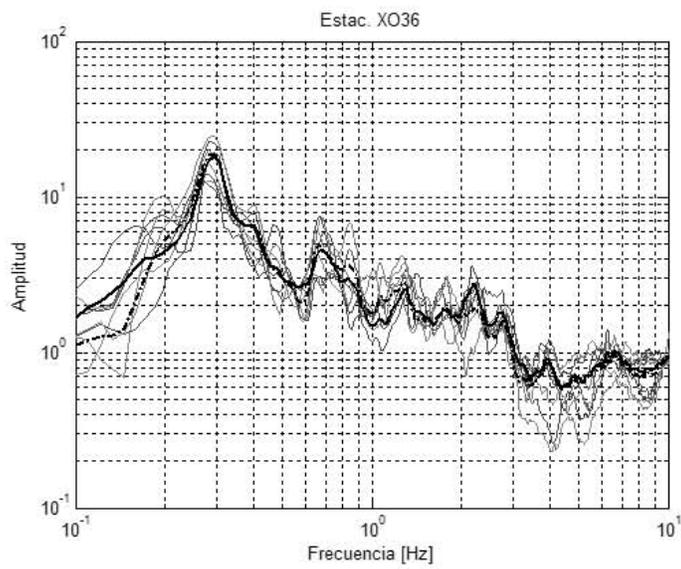
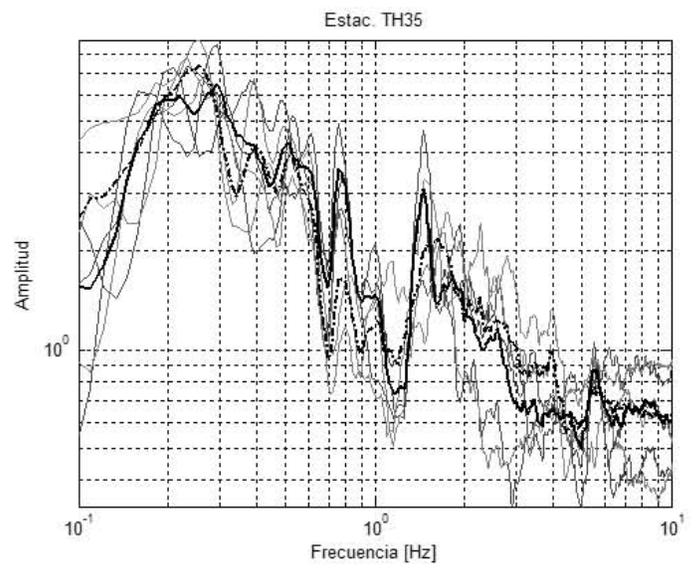
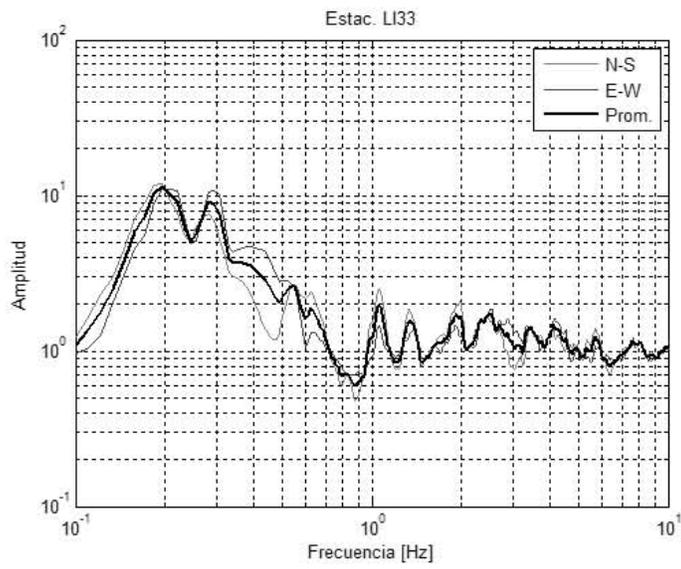


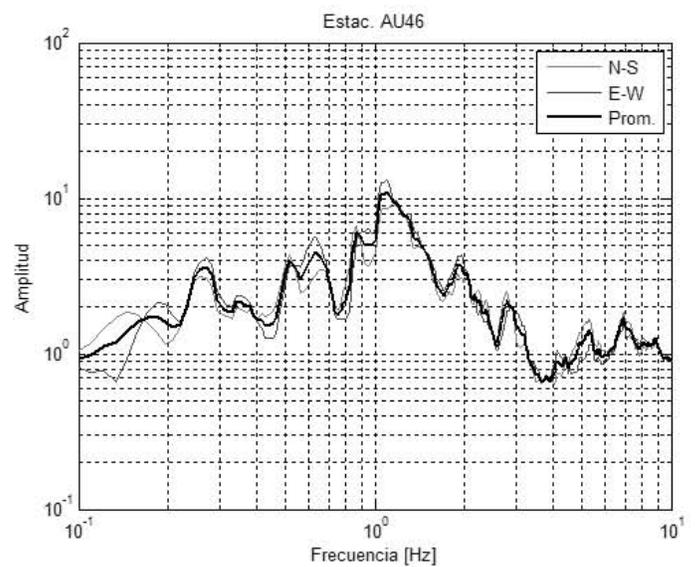
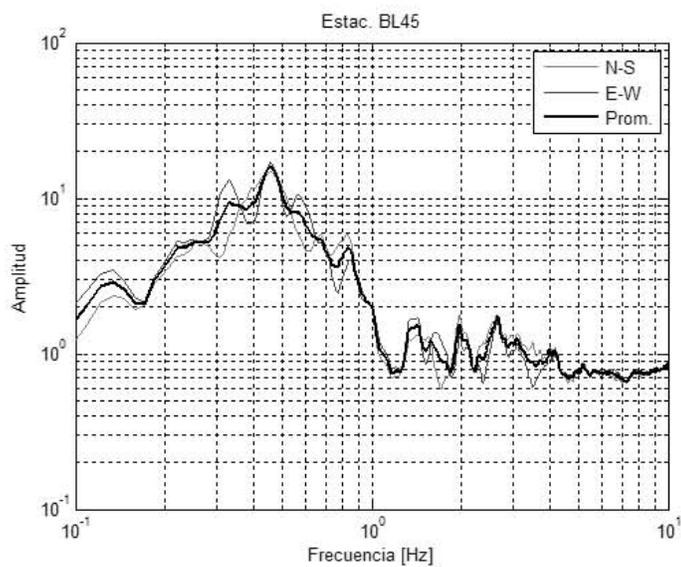
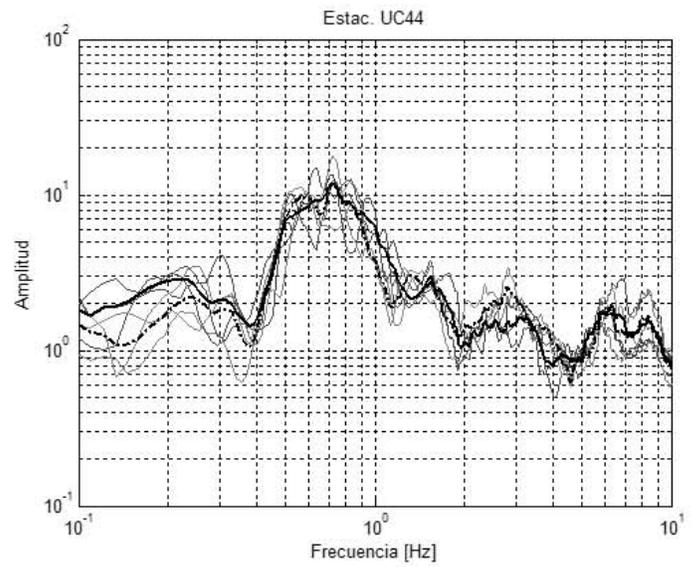
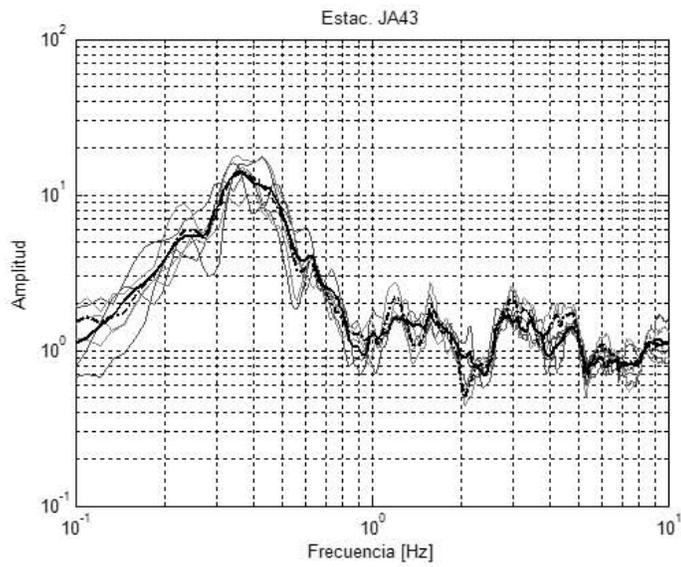
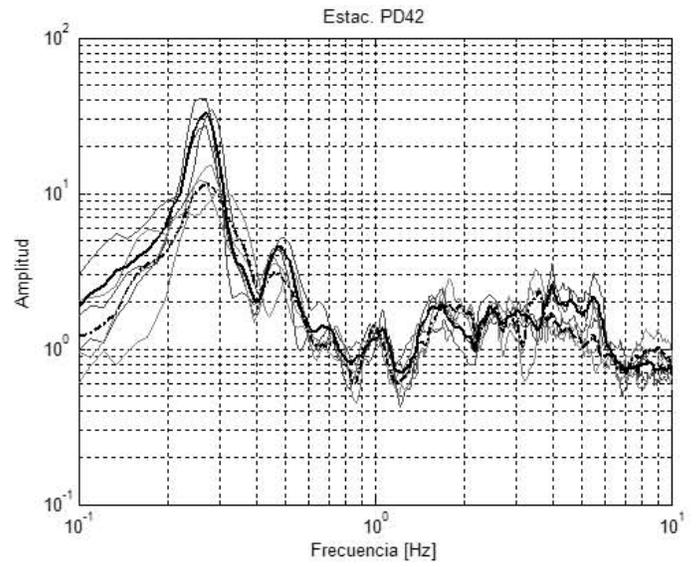
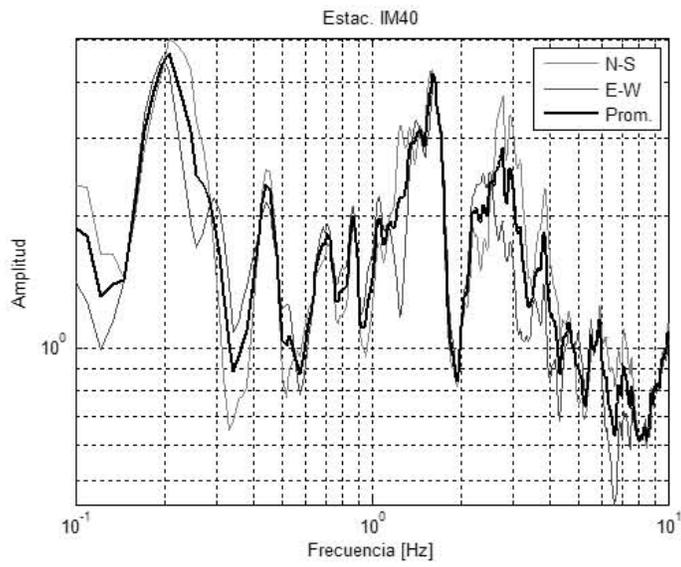


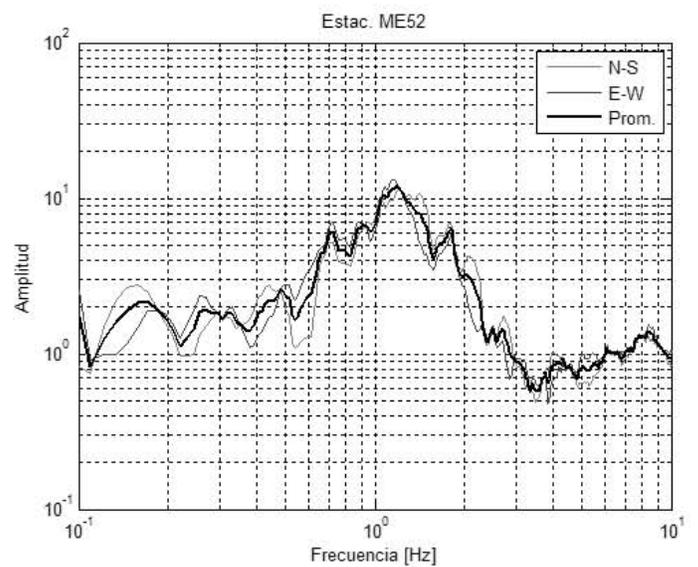
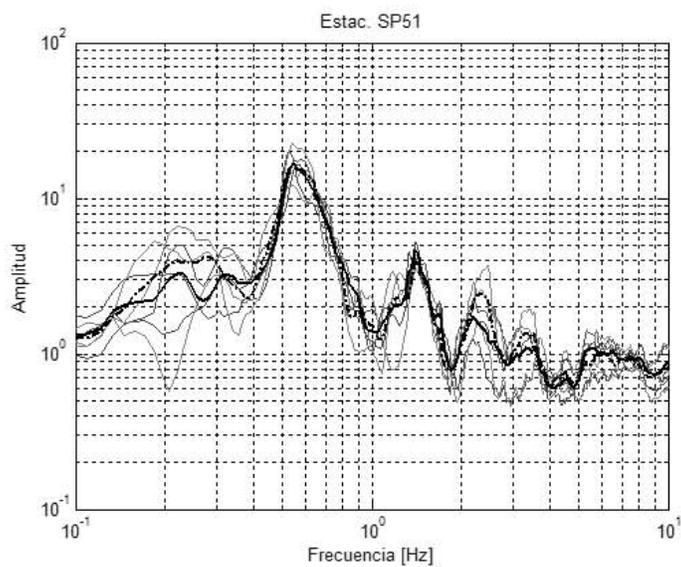
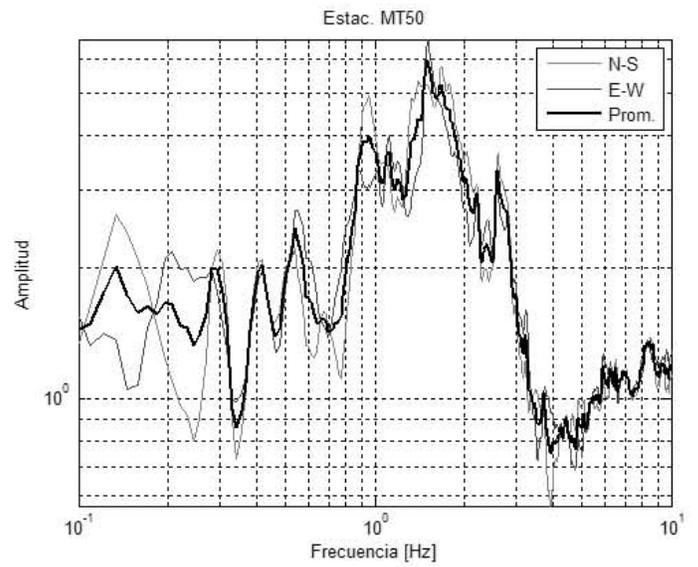
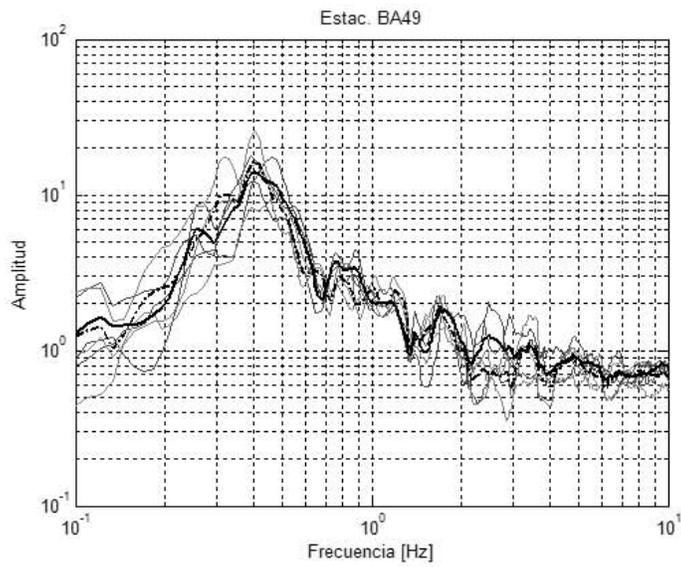
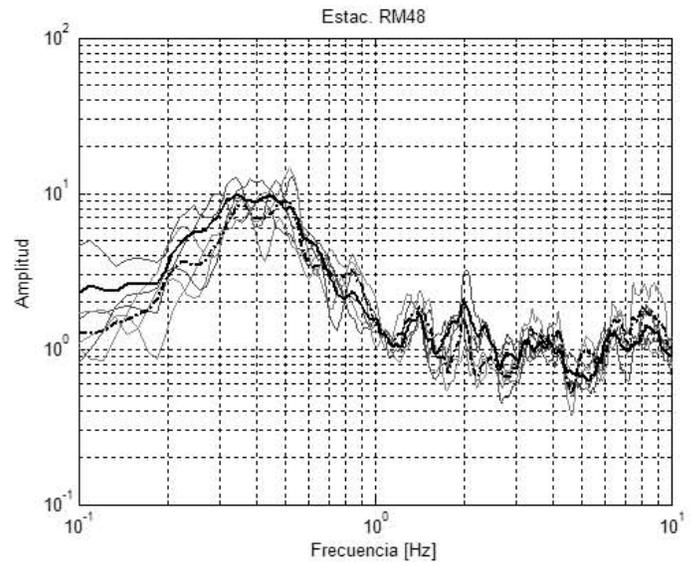
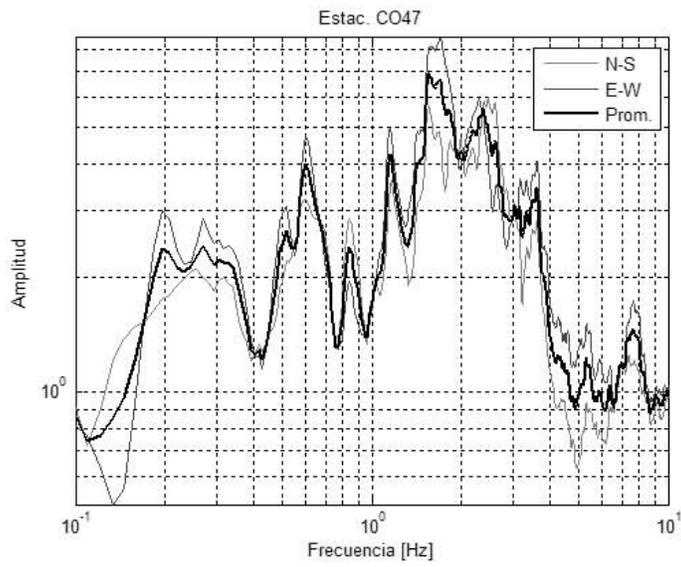


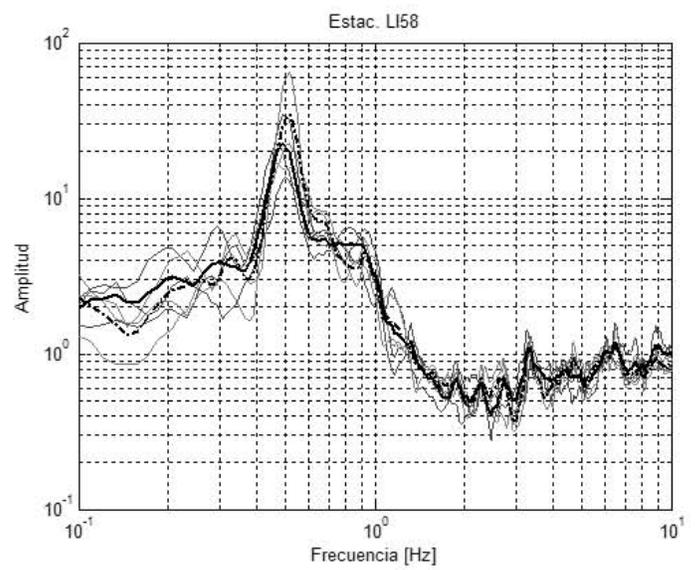
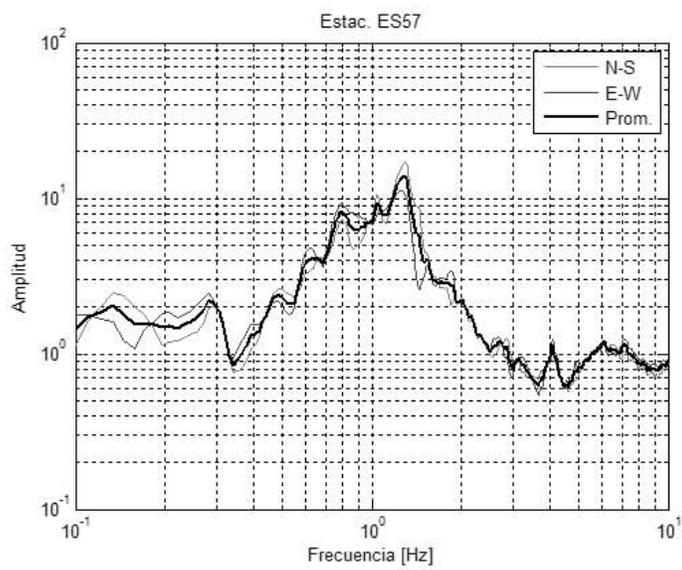
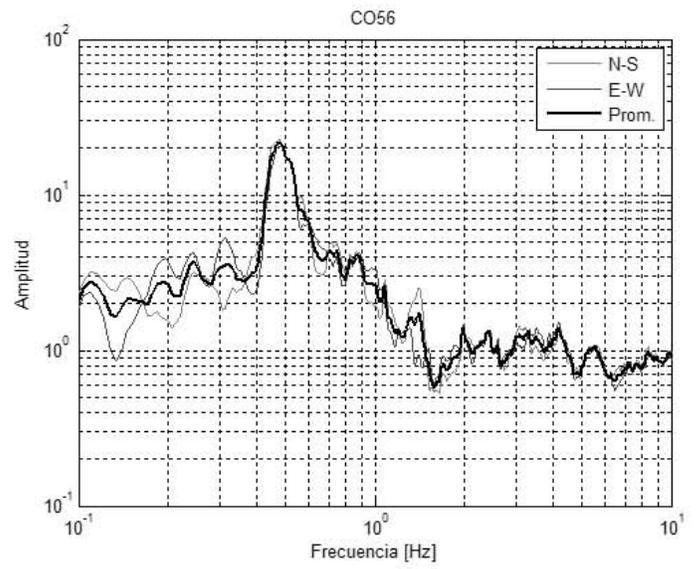
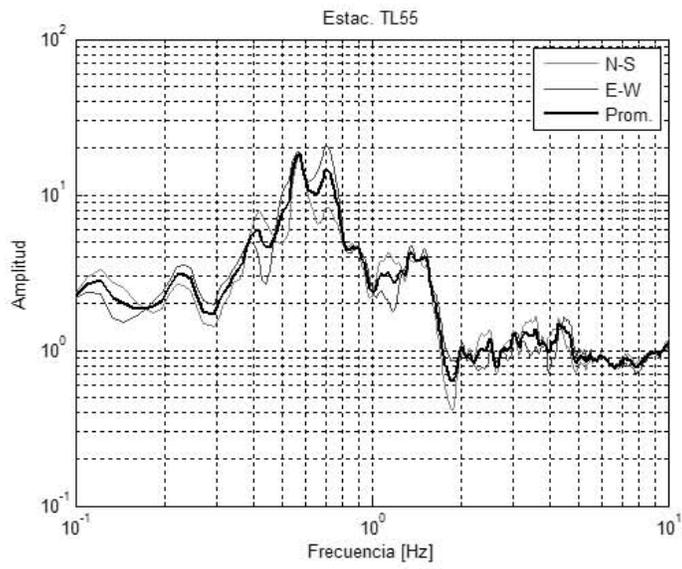
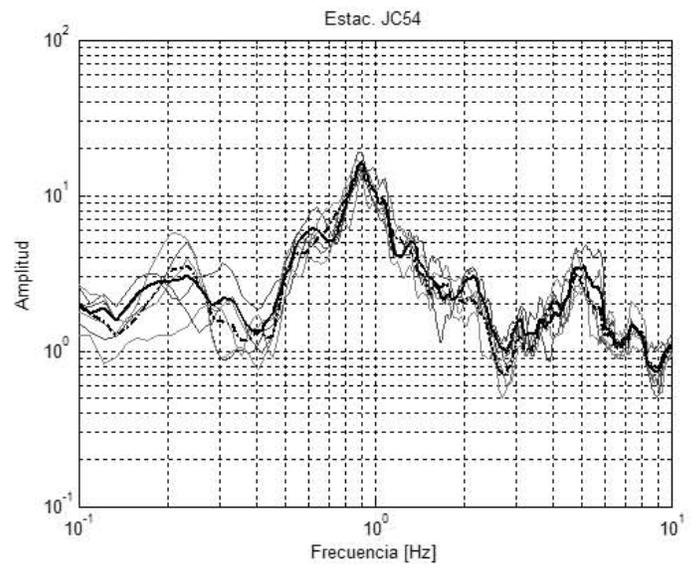
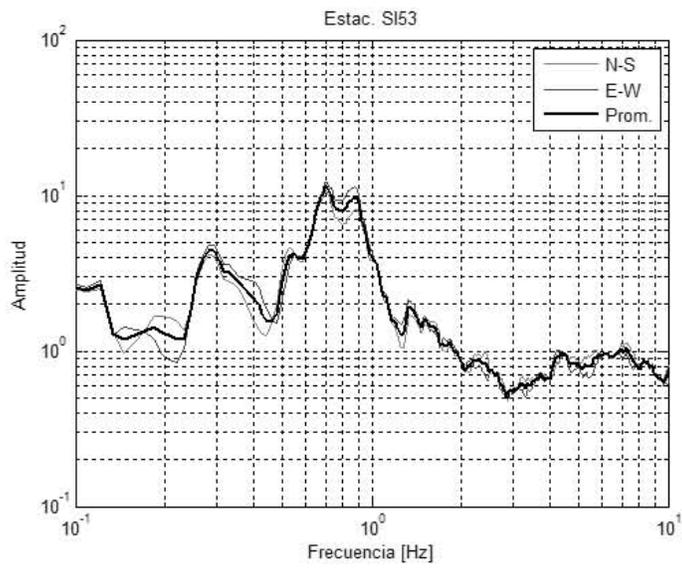


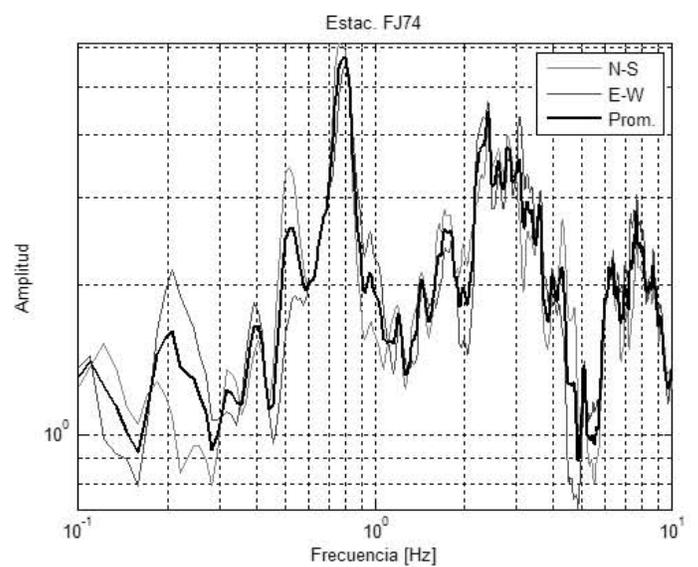
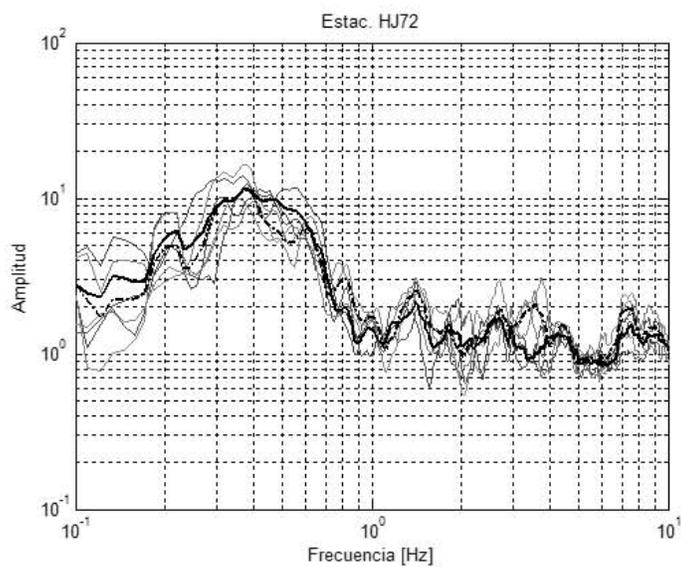
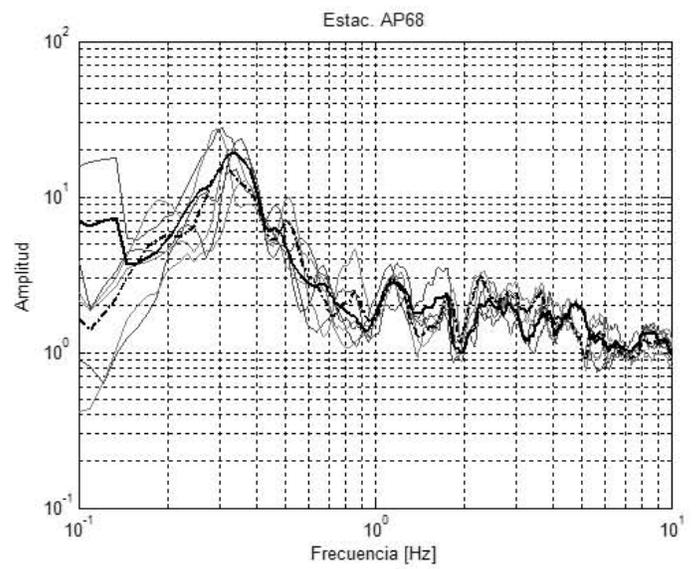
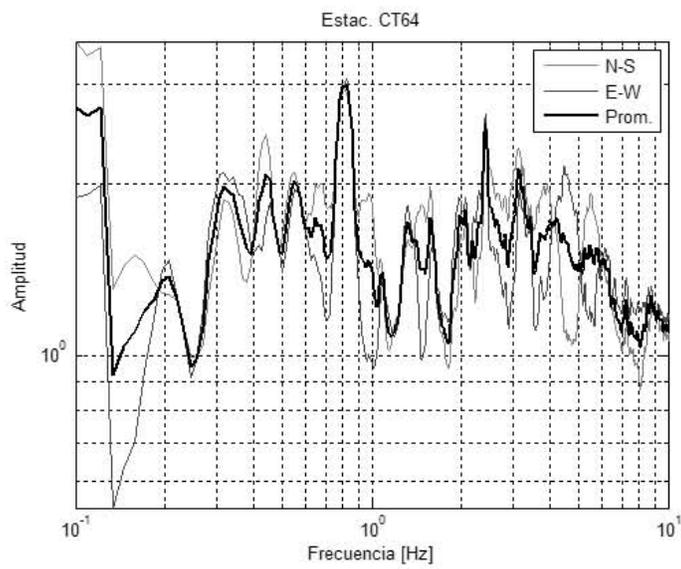
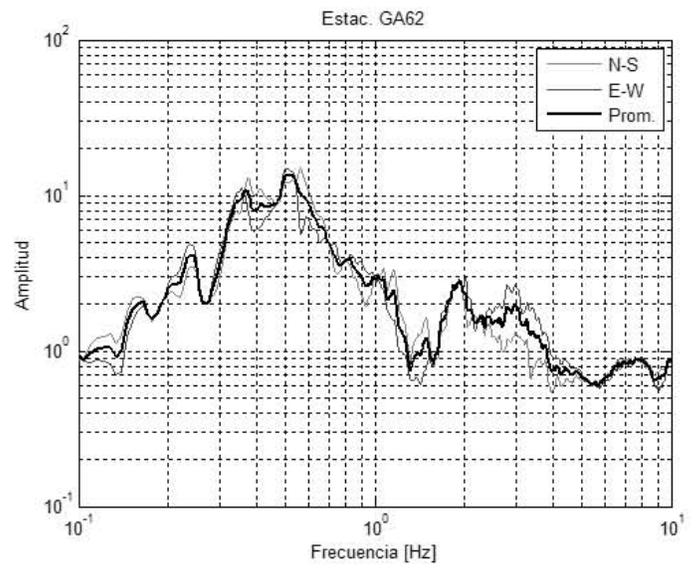
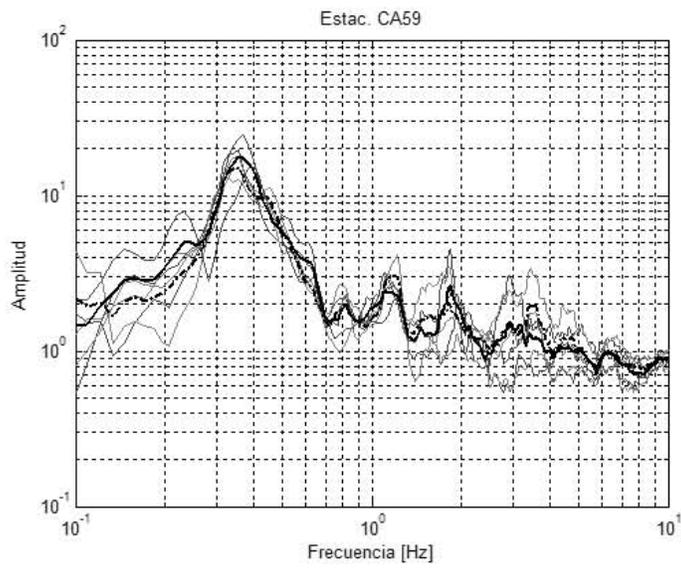


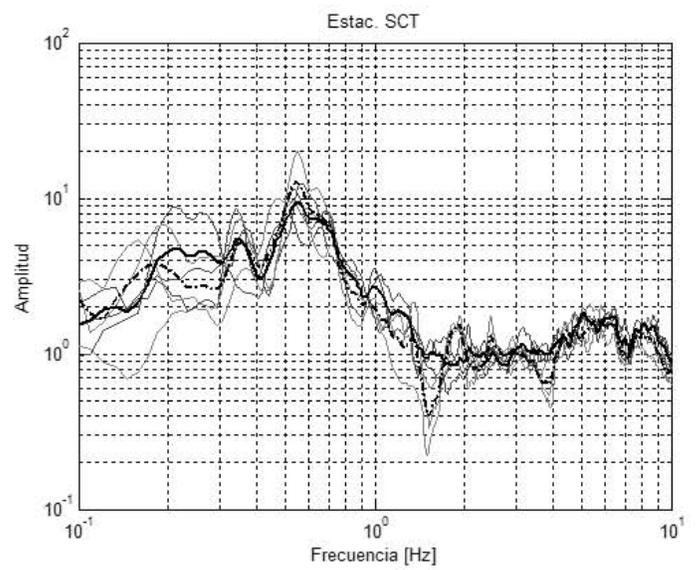
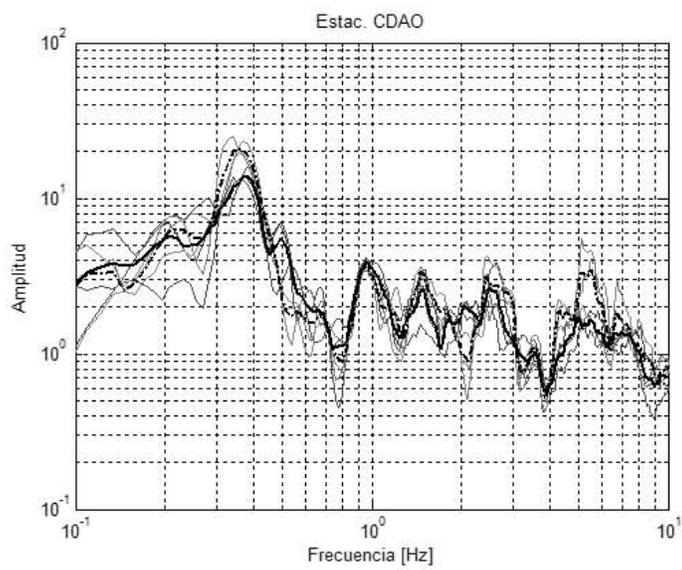
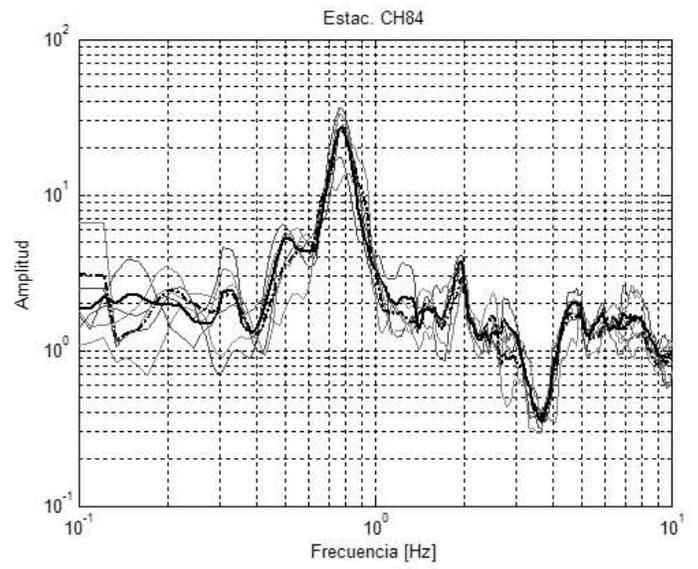
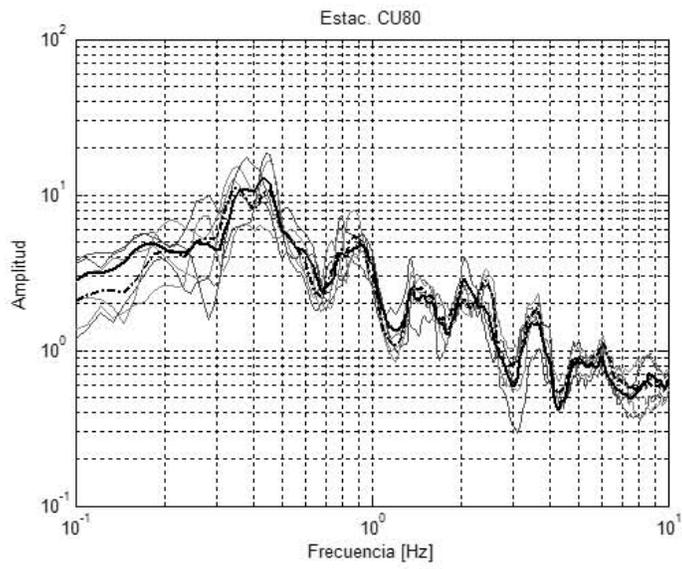
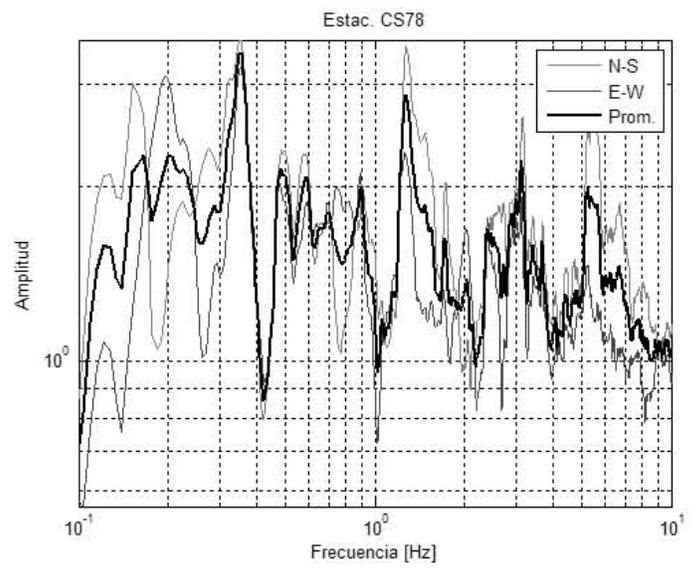
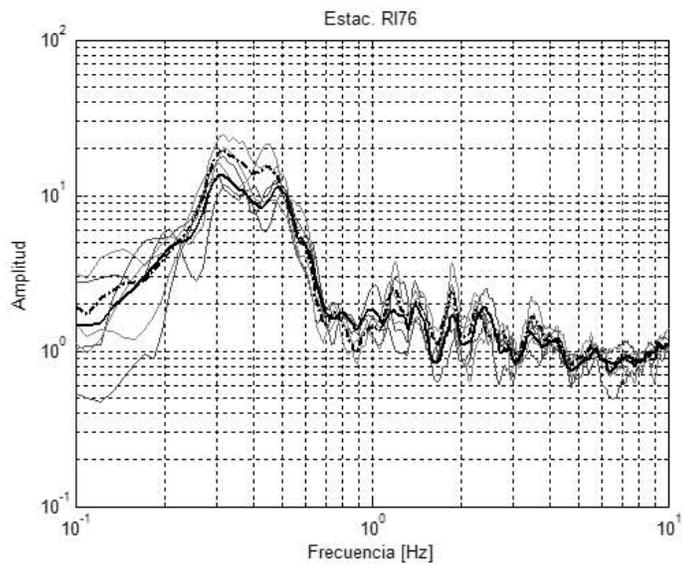


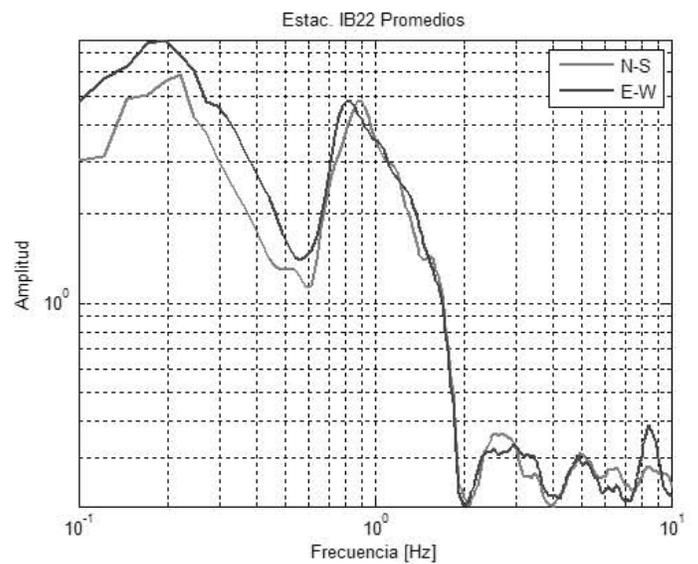
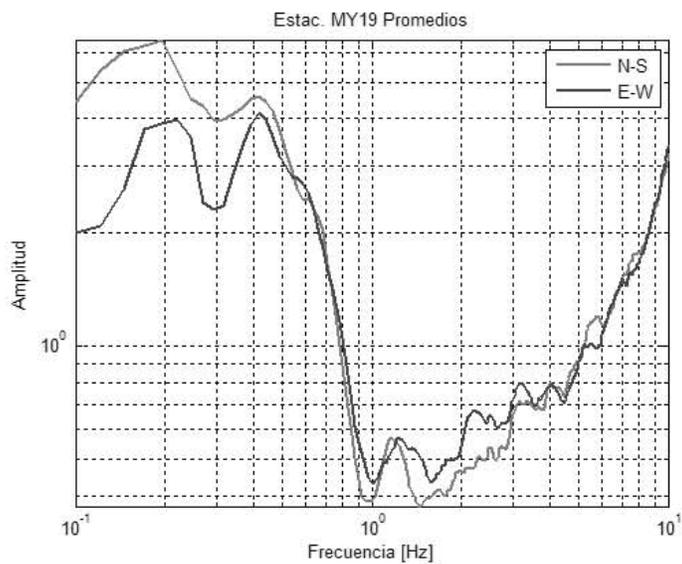
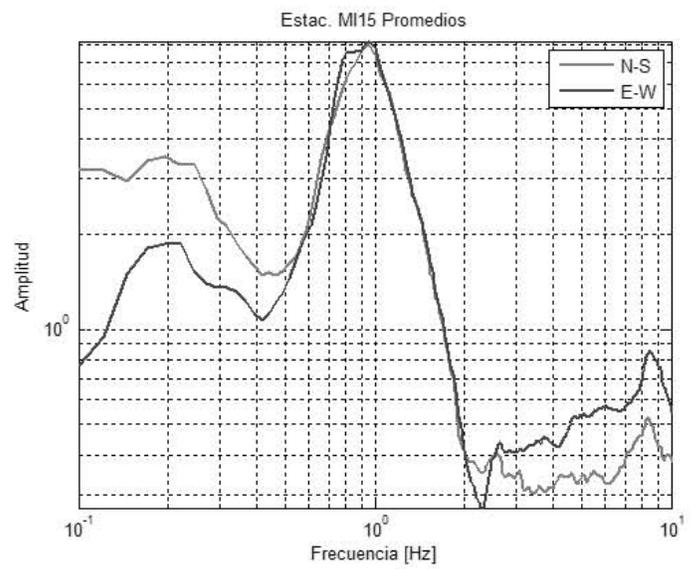
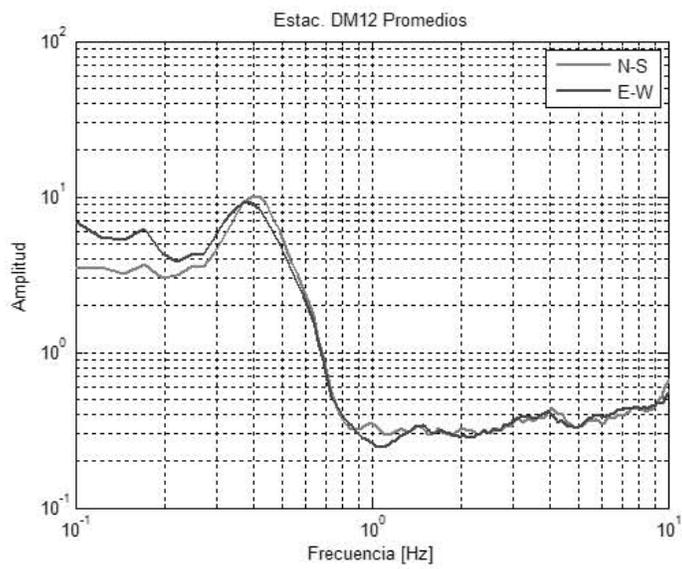
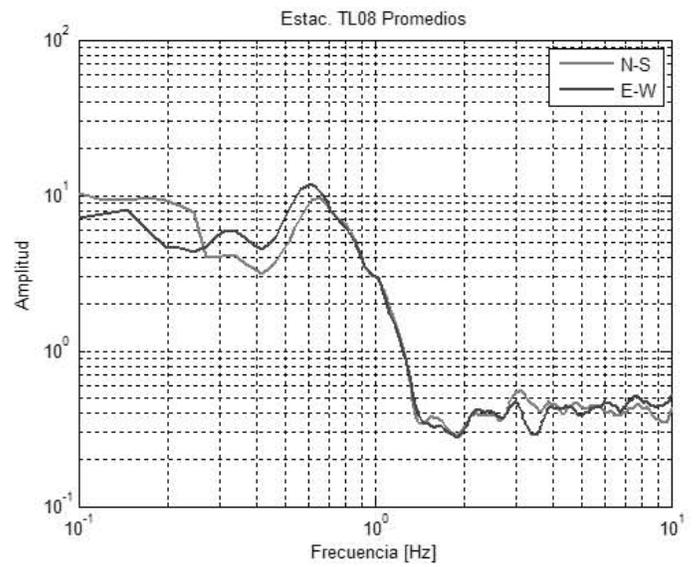
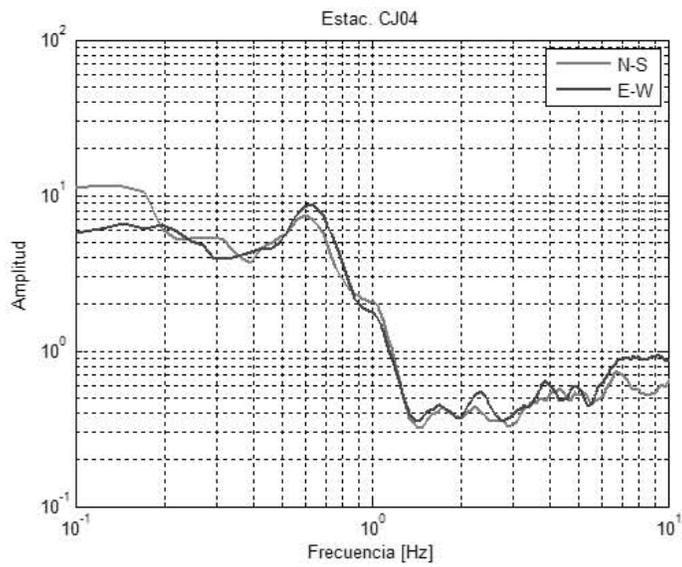


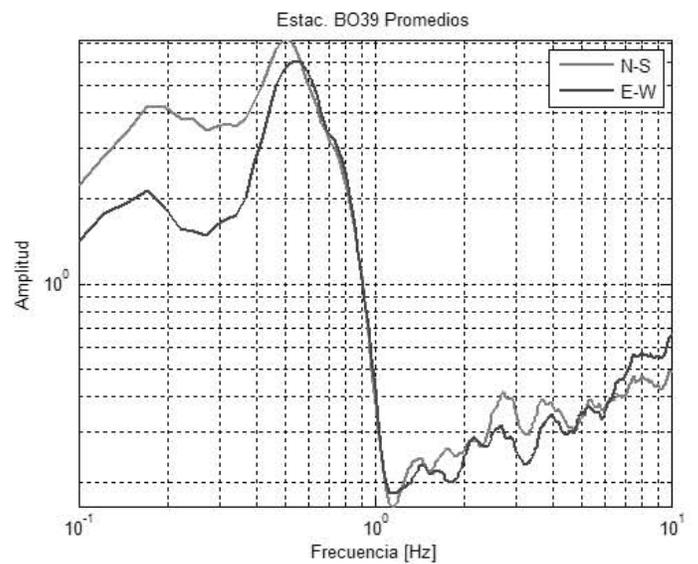
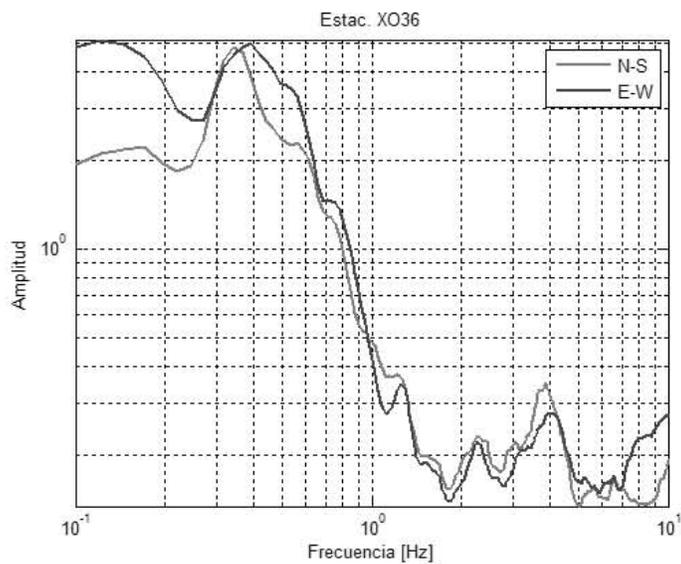
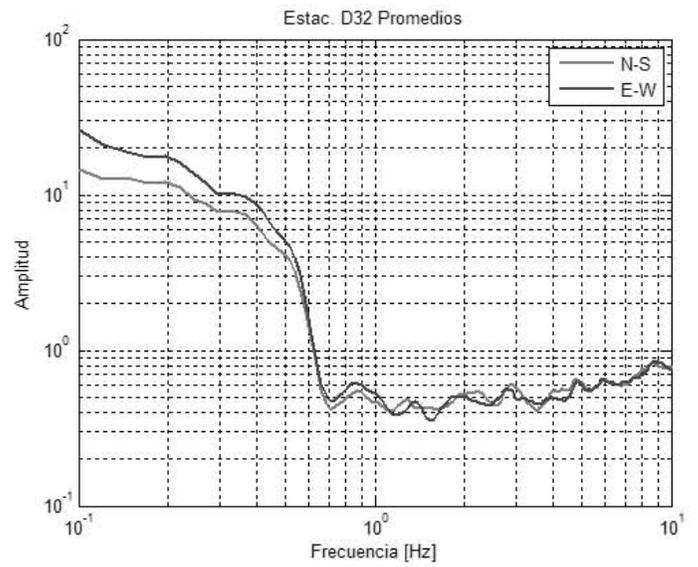
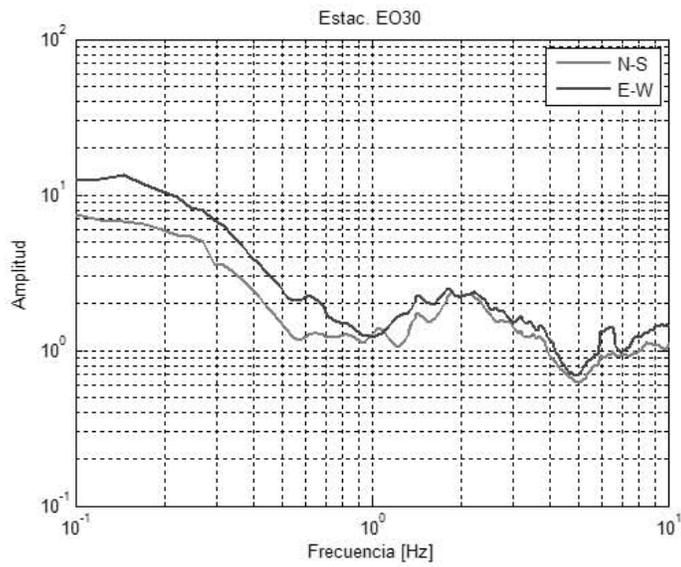
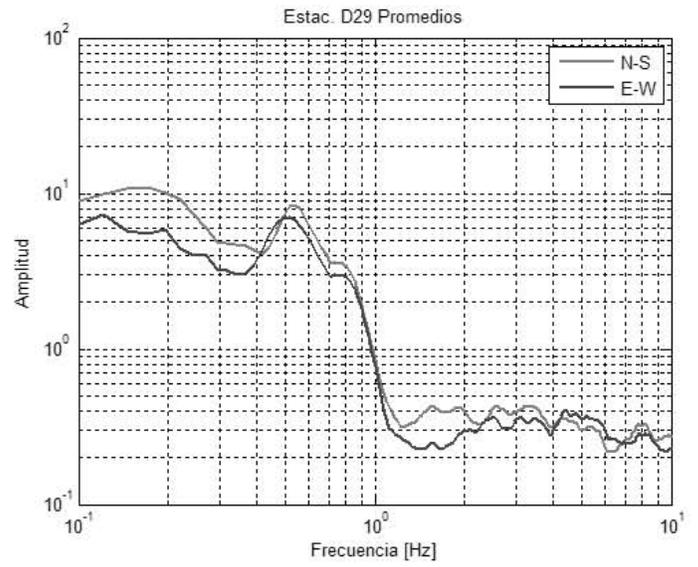
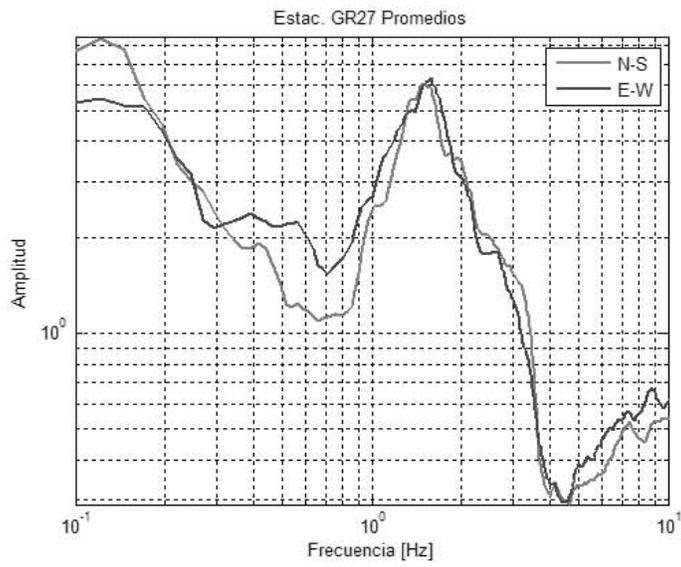


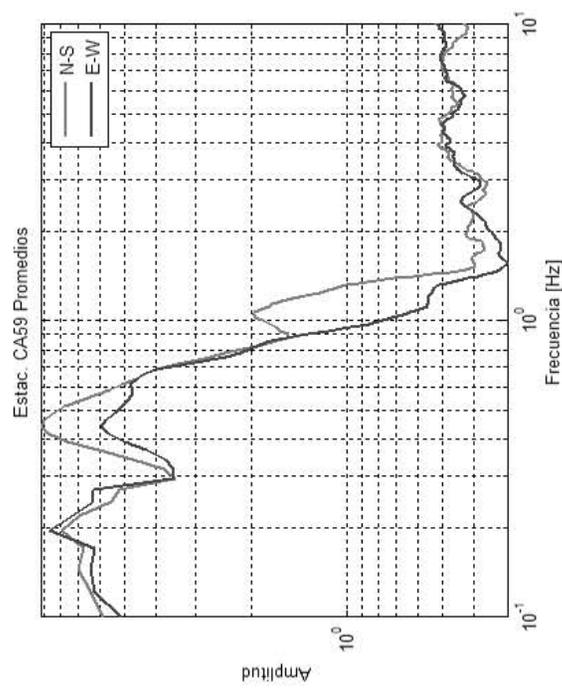
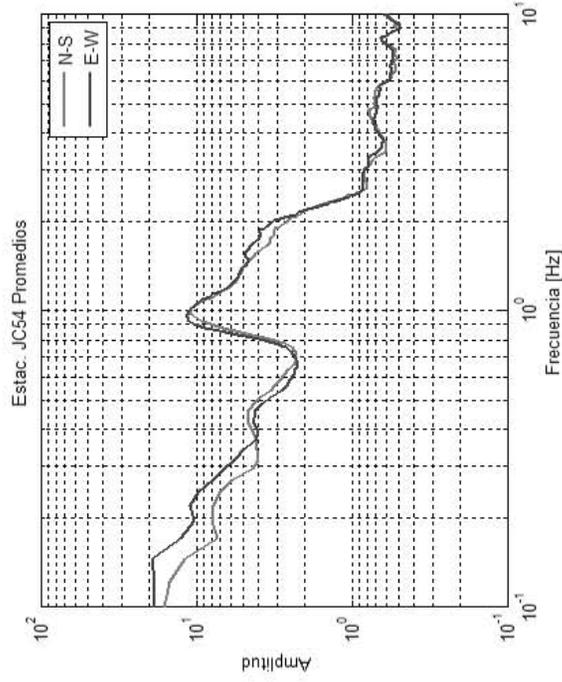
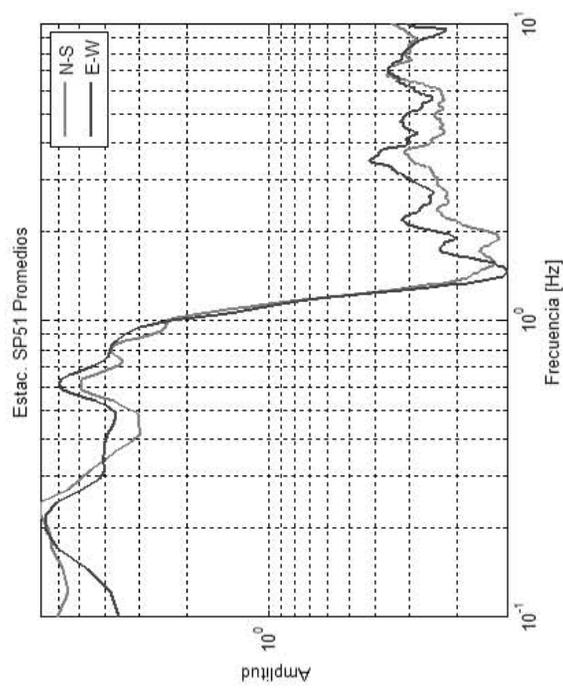
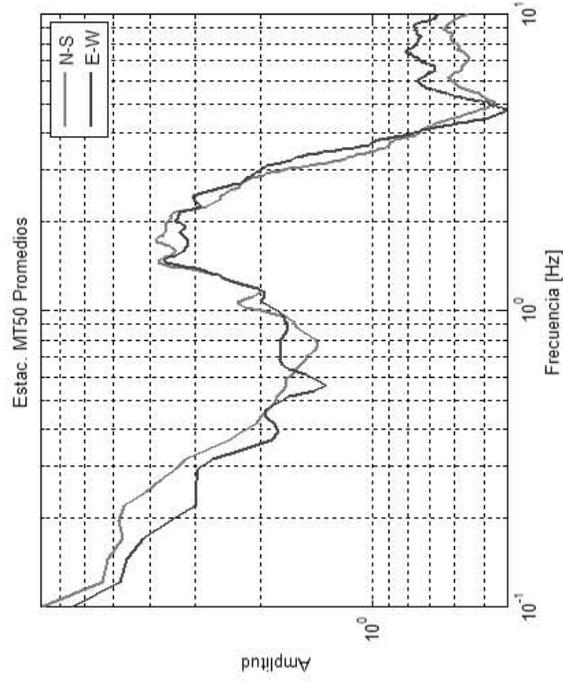
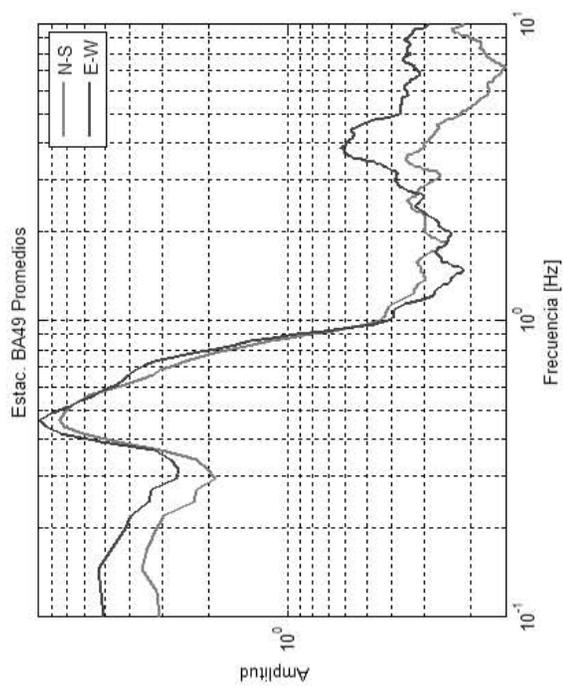
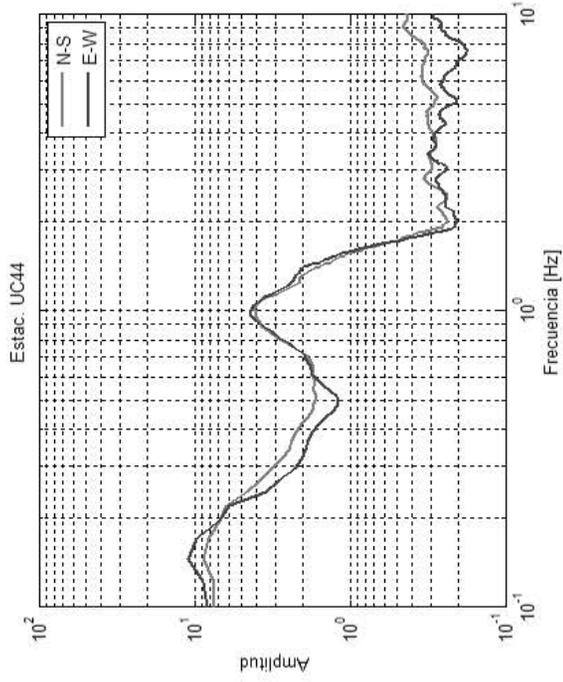


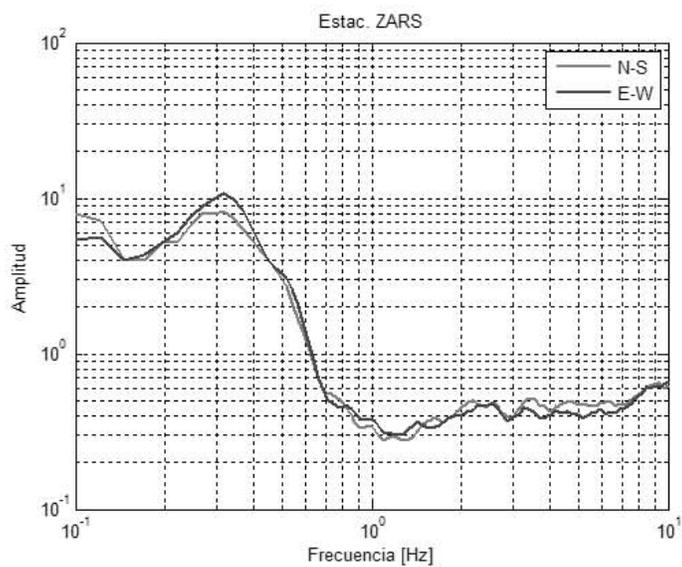
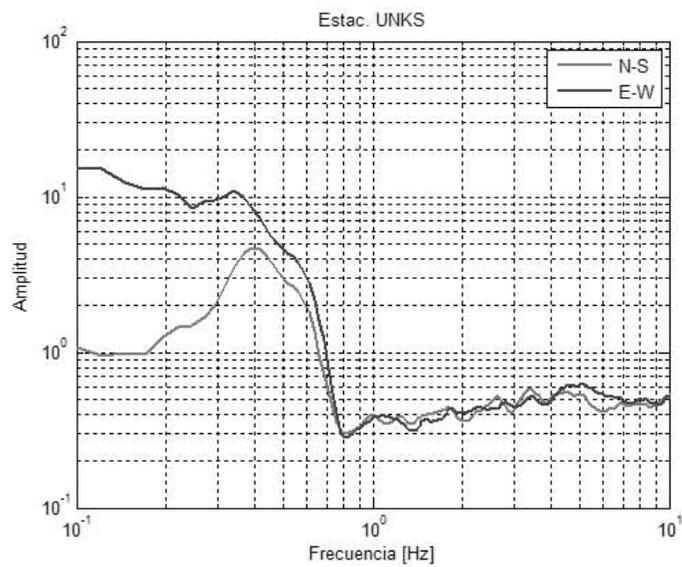
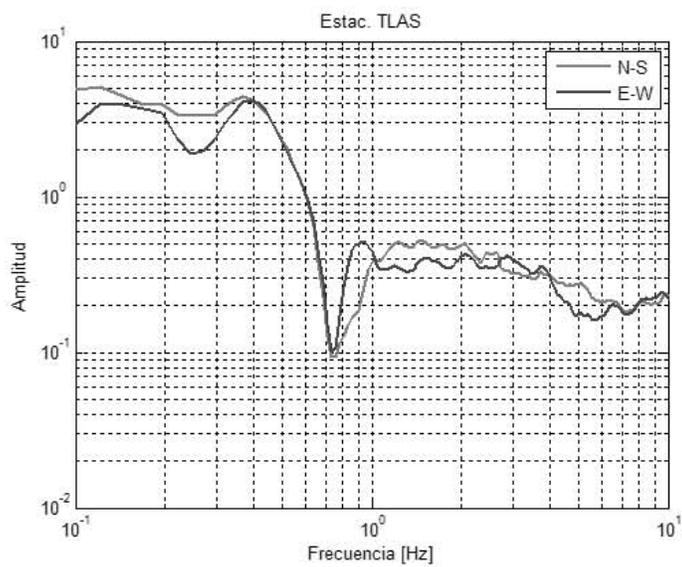
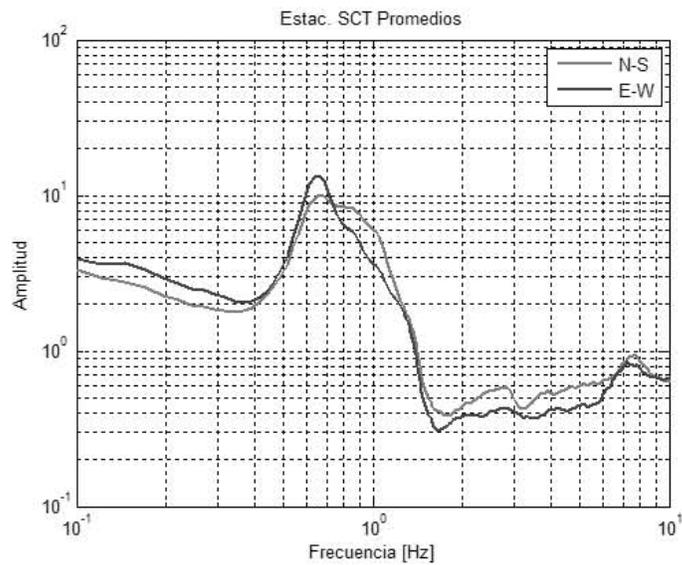
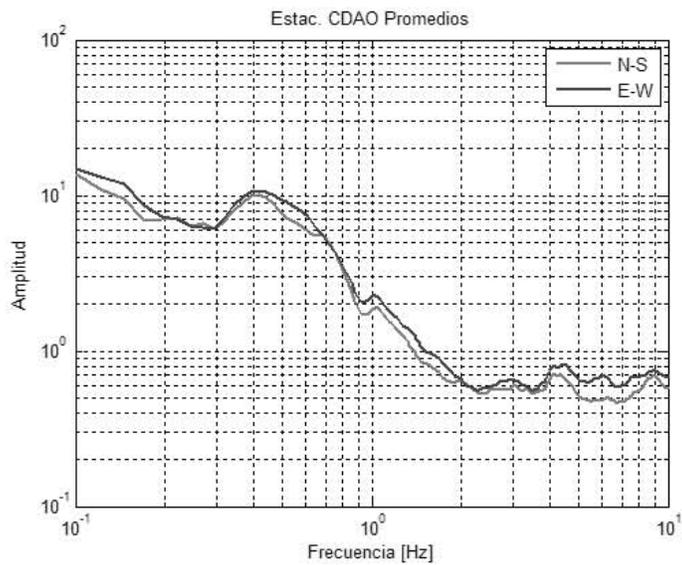












## ANEXO 4

Ubicación de los sitios con los que se comparó el efecto del hundimiento regional en la Ciudad de México.

Datos Periodo Dominante		Coordenadas	
1992	2010	Long	Lat
0.4	0.4	-99.2217	19.4269
0.4	0.4	-99.21	19.299
0.5	0.5	-99.2642	19.37
0.5	0.5	-99.1703	19.3714
0.5	0.5	-99.1137	19.4876
0.6	0.6	-99.1708	19.2922
0.6	0.6	-99.1829	19.5005
0.6	0.6	-99.0847	19.3398
0.6	0.6	-99.1772	19.3885
0.6	0.6	-99.2032	19.3428
0.6	0.6	-99.19	19.4253
0.6	0.6	-99.1772	19.3885
0.7	0.6	-99.0839	19.4385
0.7	0.7	-99.19	19.4253
0.8	0.8	-99.146	19.344
0.8	0.8	-99.1797	19.4747
0.9	0.9	-99.133	19.31
0.9	0.9	-99.1681	19.3832
0.9	0.9	-99.182	19.4383
0.9	0.8	-99.1775	19.4017
1	1	-99.135	19.33
1	1	-99.111	19.339
1	0.9	-99.1539	19.358
1	1	-99.1439	19.3322
1.1	1.1	-99.131	19.329
1.1	1.1	-99.1116	19.335
1.1	1.1	-99.1272	19.313
1.2	1	-99.118	19.31
1.2	1.1	-99.1272	19.313
1.3	0.9	-99.113	19.32
1.3	1.1	-99.126	19.329
1.3	1.3	-99.1275	19.4931
1.4	1.2	-99.1483	19.3753
1.4	1.1	-99.1253	19.2834
1.4	1.3	-99.1297	19.345
1.5	1.3	-99.1253	19.2834
1.5	1.5	-99.1297	19.345
1.5	1.4	-99.1654	19.4337
1.5	1.3	-99.1254	19.33

Datos Periodo Dominante		Coordenadas	
1992	2010	Long	Lat
2.2	1.7	-99.1566	19.4098
2.2	1.6	-99.1336	19.45
2.3	2	-99.1189	19.3656
2.3	2.1	-99.159	19.4215
2.3	1.9	-99.1401	19.4385
2.4	1.7	-99.064	19.283
2.4	2.1	-99.1569	19.4263
2.6	1.7	-99.068	19.3
2.6	2.2	-99.1011	19.3091
2.6	2.2	-99.1481	19.4253
2.7	2	-99.122	19.381
2.7	2.6	-99.119	19.425
2.7	2.2	-99.1318	19.3899
2.8	2.5	-99.1225	19.4539
2.8	2.6	-99.145	19.4097
2.8	2.5	-99.0433	19.3461
2.8	2	-99.1253	19.3811
2.9	2.4	-99.144	19.411
2.9	2.6	-99.1047	19.4653
2.9	2.8	-99.1301	19.4251
2.9	2.9	-99.1037	19.2938
2.9	2.7	-99.1047	19.3967
3	2.3	-99.103	19.383
3	2.7	-99.0433	19.3461
3.1	2.5	-99.1253	19.3811
3.2	2.9	-99.125	19.4053
3.2	3	-99.128	19.4359
3.2	3.1	-99.1183	19.4258
3.2	2.5	-99.096	19.372
3.3	2.9	-99.1353	19.4198
3.4	2.9	-99.1024	19.2711
3.6	3.3	-99.095	19.382
3.6	3.2	-99.1068	19.3809
3.6	2.9	-99.096	19.372
3.7	3.3	-99.0697	19.3927
3.7	2.6	-99.1111	19.4186
3.8	3.7	-99.1024	19.2711
4	3.4	-99.0963	19.4312
4	3.7	-99.076	19.4808

1.5	1.1	-99.1654	19.4337
1.8	1.4	-99.005	19.3611
1.9	1.3	-99.063	19.288
1.9	1.7	-99.119	19.363
1.9	1.6	-99.1059	19.3161
2	1.9	-99.1653	19.4186
2	1.9	-99.1254	19.33
2	1.6	-99.147	19.393
2.1	1.8	-99.1453	19.4356
2.1	2	-99.1567	19.4097
2.1	2	-99.1566	19.4098
2.1	1.7	-99.1425	19.4356
2.2	1.6	-99.1336	19.45

4.1	3.7	-99.069	19.38
4.1	3.6	-99.0876	19.4192
4.2	3.3	-99.0537	19.3858
4.5	4	-99.0869	19.3919
4.5	4.1	-99.0537	19.3858
4.5	4	-99.0997	19.4055
4.8	4.3	-99.0642	19.4619
5	4.6	-99	19.4027
5	3.9	-99	19.2786
5.3	4.8	-99.0584	19.429
5.5	4.1	-99.0247	19.4167

## ANEXO 5

## Código MATLAB para graficar las Funciones de Transferencia

```

clc;clear all;
ysumn=0; ysume=0; ptos_dat=[];
carpeta='images';
mkdir(carpeta); ruta=[pwd, '\\', carpeta, '\\'];
ii=0; q=1;
for i=2:21
    ysumn=0; ysume=0;
    for j=1:4
        archn=['p', num2str(i), 'n', num2str(j), '.txt'];
        arche=['p', num2str(i), 'e', num2str(j), '.txt'];
        eval(['load ', archn]);
        eval(['load ', arche])
        if i<10
            archn=archn(1,1:4); %nombre archivo excepto extension
            arche=arche(1,1:4);
        else
            archn=archn(1,1:5); %nombre archivo excepto extension
            arche=arche(1,1:5);
        end
        archn=eval(archn);
        arche=eval(arche);
        x=archn(1:2047,1); x=x';
        yn=archn(1:2047,2); yn=yn';
        ye=arche(1:2047,2); ye=ye';

        un=[zeros(1,3) yn];
        ue=[zeros(1,3) ye];
        N=3;
        %filtrado --inicia--
        for k=1:2047;
            wn=un(k:k+N);
            zn(k)=runsum(wn);
        end
        for k=1:2047;
            we=ue(k:k+N);
            ze(k)=runsum(we);
        end
        %-- finaliza--
        ysumn=zn+ysumn;
        ysume=ze+ysume;

        figure(1)
        title(['Punto I', num2str(q), ' N-S'])
        loglog(x, yn), grid on
        hold on
        if j==4
            ypromn=ysumn/4;
            loglog(x, ypromn, '-r', 'LineWidth', 2)
        end
        xlabel('Frecuencia [Hz]'); ylabel('Amplitud'); xlim([.1 10]);
    end
end

```

```

        legend('v1','v2','v3','v4','Promedio',1)

        figure(2)
        title(['Punto I',num2str(q),' E-W'])
        loglog(x,ye),grid on
        hold on
        if j==4
            yprome=ysume/4;
            loglog(x,yprome,'-r','LineWidth',2)
        end
        xlabel('Frecuencia [Hz]'); ylabel('Amplitud'); xlim([.1 10]);
        legend('v1','v2','v3','v4','Promedio',1)
    end
    figure(3)
    loglog(x,ypromn,'-r',x,yprome,'-b','LineWidth',2)
    title(['Punto I',num2str(q),' Promedios']); grid on
    xlabel('Frecuencia [Hz]'); ylabel('Amplitud'); xlim([.1 10]);
    legend('N-S','E-W',1)
    x0=x(20:123);
    ymn0=ypromn(20:123);
    [amplitud,im]=max(ymn0);
    amplitud;
    frecuencia_n=x0(im);

    yme0=yprome(20:123);
    [amplitud,im]=max(yme0);
    amplitud;
    frecuencia_e=x0(im);

    namens=['I',num2str(q),'_ns.bmp'];
    figura=figure(1);
    saveas(figura,[ruta namens]);

    nameew=['I',num2str(q),'_ew.bmp'];
    figura=figure(2);
    saveas(figura,[ruta nameew]);

    nameprom=['I',num2str(q),'_pr.bmp'];
    figura=figure(3);
    saveas(figura,[ruta nameprom]);
    q=q+1;

    pause
    close all
    ii=ii+1;
    ptos_dat(ii,1)=frecuencia_e;
    ptos_dat(ii,2)=frecuencia_n;
end

```

**Bibliografía**

Aguilar, R. (2008), "Respuesta dinámica de los suelos del valle de México en el futuro", Memorias de la XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, Ags. (nov), pp B. 621 - B. 628.

Auvinet, G., Ovando, E., Méndez, E. (2007), "Evaluación y control de riesgos geotécnicos en la zona metropolitana del valle de México", Informe del I. de I., UNAM, al GDF, septiembre.

Auvinet, G. (2010), "Soil fracturing induced by land subsidence", Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS), Querétaro, Qro (oct), pp 20-25.

Alfaro, A., Navarro, M., Sánchez, J., Pujades, L. (1999), "Microzonificación sísmica de Barcelona utilizando el método de Nakamura. Ventajas y limitaciones", Memorias del Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Murcia, España (abr), pp 273-278.

Alfaro, A., Canas, J., Giraldo, V., Pujades, L. (2000), "Estimación de efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores", Memorias Seminario Análisis de Registros Sísmicos, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. 59 pp.

Alfaro, A., Pavlenko, O. V., Pujades, L. G. (1999), "Análisis multiespectral a microtemblores en Barcelona", X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia, Bogotá.

Barazza F., Malisan P., Pascolo, P., Carniel, R. (2008), "La stima degli effetti di sito dell'evento sísmico. Miglioramiento ed applicazioni della tecnica HVSR". Venezia, Italia.

Cabral-Cano, E., Osmanoglu, B., Dixon, T., Wdowinski, S., Demets, C., Cigna., F., Diaz-Molina, O. (2010), "Subsidence and fault hazard maps using PSI and permanent GPS networks in central Mexico", Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS), Querétaro, Qro (oct), pp 255-259.

Centro de monitoreo de fracturamiento del subsuelo, Delegación Iztapalapa.

Dravinski, M., Ding G., Wen, K. (1996), "Analysis of Spectral Ratios for Estimating Ground Motion in Deep Basins", Bull. Seism. Soc. Am., 86(3) pp 646-654.

Espinoza, L. (2011), "Mediciones de microtemblores para estimar el origen del agrietamiento en la delegación Iztapalapa, D.F., México", Tesis de licenciatura, UNAM, México

Ezcurra, E. (2007), "De las chinampas a la megalópolis, el medio ambiente en la cuenca de México", F.C.E., México.

GDF (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, octubre 2004.

Lermo, J., Chávez-García, F. (1992), "Estimación de periodos dominantes y amplificación relativa en zonas faltantes (transición y lago) del D.F.", Informe del I. de I., UNAM, al GDF, Proy 1742, noviembre.

Lermo, J., Cuenca, S., Chávez-García, F. (1993), "Estudio de prospección, sismología y vibración ambiental a lo largo de las líneas de conducción del sistema Cutzamala", Informe del I. de I., UNAM, a la Comisión Nacional del Agua CNA, proy 2562.

Lermo, J., Chávez-García, F. (1993), "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, pp 1574–1594.

Lermo, J., Chávez-García, F. (1994a), "Are microtremors useful in site response evaluation?", *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, pp 1350-1364.

Lermo, J., Chávez-García, F. (1994b), "Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records", *Soil. Dyn. & Earthq. Eng.* 13, pp 413-423.

Martínez, E., Sánchez, E., Fernández, S., Dávila, M., Uribe, A. (2010), "Dispersión de ondas superficiales aplicadas a la caracterización dinámica del suelo y estructuras", *Memorias de la XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Acapulco, Gro. (nov), pp 411-416.

Méndez, E., Juárez, M., Pérez, D., Auvinet, G. (2008), "Evolución del hundimiento regional en el vallo de México", *Memorias de la XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Aguascalientes, Ags. (nov), pp B. 377 - B. 384.

Méndez, E., Matus, U., Auvinet, G., Juárez, M. (2010), "Caracterización de anomalías geotécnicas en las zonas lacustre y de transición de la ciudad de México", *Memorias de la XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Acapulco, Gro. (nov), pp 311-321.

Mooser, F., Montiel, A., Zúñiga, A. (1996), "Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla", *Subdirección de Construcción, Comisión Federal de Electricidad*, México D.F., 63p.

Mucciarelli, M. (2002), "Applicazione della Tecnica dei Rapporti Spettrali di Microtremori alla Identificazione delle Sollecitazioni da Traffico ad Edifici", Italia.

Mucciarelli, M., Gallipoli M. (2006), "Misure di vibrazione ambientale e registrazioni accelerometriche sugli edifici ATER Melfi e loro suoli di fondazione", Italia.

Mulargia, F. (2007), "Effetti di sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica", *Il geologo dell'Emilia-Romagna*, Italia.

Nakamura, Y. (1989), "A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremors on the Ground Surface", *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1) pp 25-33.

Ortiz, D. (2007), "Fracturamiento en el acuitardo lacustre que cubre al acuífero regional de la ciudad de México: origen, dinámica e implicaciones", *Tesis Doctoral*, UNAM, México.

Pacheco, J. (2009), "Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales", *Tesis Doctoral*, UNAM, México.

Rincón, O. (2005), "Determinación de los periodos predominantes de los depósitos de suelo de Tunja y Sogamoso usando microtemblores", *Revista Facultad de Ingeniería*, 14(19), Colombia, pp 49-57.

Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., León, E. (2005), "Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México", *TGC geotecnia S.A. de C.V.*, México, 171p.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. (1991), "Agrietamiento de suelos", México.

Whitlow, R. (1998), "Fundamentos de mecánica de suelos". Ed. CIESA, México.