



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE  
LA TIERRA**

**ESTIMACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS  
IRREGULARES MEDIANTE EL USO DE  
COCIENTES ESPECTRALES Y ARREGLOS DE  
MICROTREMORES**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**Presenta**

**ANTONIO VALVERDE PLACENCIA**

JURADO EXAMINADOR

- 1) Dr. Jorge Aguirre González (Director de tesis)
- 2) Dr. Francisco Chávez García (Presidente)
- 3) Dr. Carlos Valdés González (Vocal)
- 4) Dr. Martín Cárdenas Soto (Suplente)
- 5) Dra. Xyoli Pérez Campos (Suplente)

Director de Tesis: Dr. Jorge Aguirre González



Ciencias de la Tierra

**MÉXICO D.F.**



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.

# Índice

Índice.....	2
Agradecimientos .....	3
Resumen.....	4
1 Introducción .....	5
2 Localización .....	7
3 Exploración del subsuelo con el método SPAC.....	10
4 Análisis de la frecuencia fundamental de los cocientes espectrales .....	20
5 Discusión de resultados.....	29
6 Conclusiones.....	39
Referencias.....	40
APÉNDICE A .....	43
APÉNDICE B .....	46
APÉNDICE C .....	47
APÉNDICE D .....	52
APÉNDICE E .....	56
APÉNDICE F.....	57

## **Agradecimientos**

Al posgrado en ciencias de la Tierra del Instituto de Geofísica por darme la oportunidad de estudiar la maestría.

A CONACYT por otorgarme la beca de maestría.

Al Instituto de Ingeniería por darme la oportunidad de hacer uso de sus instalaciones.

A la coordinación de Ingeniería Sismológica y al Dr. Jorge Aguirre González por prestarme los datos y el equipo de cómputo necesarios para realizar mi tesis.

Al Dr. Jorge Aguirre González por las enseñanzas y las asesorías.

Al grupo del laboratorio de Geoinformática de la sección de Geotecnia del Instituto de Ingeniería por prestarme la información de los sondeos de pozo geotécnicos y la sección geotécnica de la Avenida Ignacio Zaragoza.

A los miembros del jurado examinador por realizar las correcciones oportunas y pertinentes para que el trabajo mejorara.

El trabajo fue realizado en el Instituto de Ingeniería como un proyecto patrocinado para el Servicio de Transporte Colectivo (SCT) metro, bajo el convenio específico de colaboración SDG01-GOM-C-01/06.

## Resumen

La línea A del metro de la Ciudad de México, del tramo Guelatao a Los Reyes, ha presentado deformaciones en la estructura del cajón y en la vía. Este tramo de la línea del metro está construido sobre zona de lago, la cual presenta hundimiento regional del valle de la Ciudad de México. Los hundimientos también han causado daños severos en las obras públicas y privadas de la zona.

Con la finalidad de entender el comportamiento y la estructura del subsuelo se emplearon los métodos SPAC (Spatial Autocorrelation) y cocientes espectrales H/V.

Con el método SPAC se logró observar estructuras someras hasta 50 m de profundidad. Con los cocientes espectrales H/V se observó el rango de frecuencias dentro del cual varía la frecuencia fundamental del subsuelo. A través de la aplicación del método SPAC en 5 sitios se obtuvieron estructuras estratigráficas con velocidades de cortante que fluctuaron entre 65 y 260 m/s. Con estas técnicas se definió la zona de material con mayor probabilidad de compactarse.

Finalmente, se calcularon los cocientes espectrales H/V de los registros de ruido medidos con el sensor de velocidad Guralp CMG 40T. Estas curvas se compararon con los cocientes espectrales H/V de los registros obtenidos con el acelerómetro K2 Altus. Esto demostró que ambos aparatos tiene respuestas similares en un amplio rango de frecuencias (0.1 a 15 Hz).

# 1 Introducción

La realización de esta tesis surge a partir de un proyecto del Instituto de Ingeniería patrocinado por el Sistema de Transporte Colectivo Metro. En este proyecto se abordó el problema de hundimiento del suelo en la Avenida Ignacio Zaragoza. La coordinación de Ingeniería Sismológica del Instituto de Ingeniería se encargó de estimar la estructura de velocidades debajo del cajón de la Línea A del metro, para lo cual se utilizaron los métodos de ruido sísmico. En la primera etapa del proyecto se instalaron 326 estaciones acelerográficas a lo largo de la Avenida Ignacio Zaragoza, con la finalidad de calcular cocientes espectrales y tener una estimación preliminar de la estructura del subsuelo en esta zona. En la segunda etapa del proyecto se colocaron arreglos de microtremores SPAC (SPatial AutoCorrelation), para tener una mejor estimación del modelo de velocidades.

Los asentamientos diferenciales que se presentan en la Avenida Ignacio Zaragoza, han provocado deformaciones y daños estructurales en el cajón y en las vías de la Línea A del metro en el tramo de Guelatao a los Reyes. Los daños estructurales en la zona han provocado el descarrilamiento del convoy en dos ocasiones. Los daños se manifiestan también en las obras civiles privadas. El hundimiento de la zona está relacionado con la compactación de las arcillas, debida a la extracción de agua.

El hundimiento en la Ciudad de México fue identificado desde el siglo antepasado. Sin embargo fue en el siglo pasado cuando se iniciaron estudios formales sobre el hundimiento de la ciudad. Carrillo (1947), citado por Marsal *et al.* (1951), demostró que la Ciudad de México se hunde por la extracción de agua de los mantos acuíferos, la cual comenzó en 1846. De 1861 a 1895, la ciudad presentó hundimientos de 5 cm por año en promedio. De 1936 a 1944, el hundimiento en el centro de la ciudad fue de 16 cm por año. Entre 1948 y 1952, la ciudad se hundió en promedio 46 cm. De acuerdo con datos publicados de la Gerencia de Agua del Valle de México, el hundimiento neto en los últimos cien años es en promedio de 7.5 m.

En esta tesis se realizaron estudios de ruido sísmico para obtener el modelo de velocidades del subsuelo debajo de un segmento de la Línea A del metro. La zona de estudio está entre las estaciones Guelatao y los Reyes. Se utilizaron arreglos de microtremores SPAC y registros de ruido sísmico para obtener cocientes espectrales H/V.

El objetivo de este trabajo es estimar la estructura de velocidades de ondas de cortante debajo de la Línea A del metro, para apoyar a los estudios de geotecnia. También, determinar si los resultados que se obtienen con el método SPAC son consistentes con los resultados que se obtienen con los cocientes espectrales.

Los métodos empleados en este trabajo tienen la ventaja de ser muy versátiles, ecológicos y económicos. Son versátiles porque es posible realizar las mediciones de ruido sísmico sin interferir con las actividades cotidianas de una ciudad, en este caso con la operación de la línea del metro. Son ecológicos porque se registra el campo sísmico que se genera en forma natural en la Tierra, puesto que con la detonación de explosivo se contamina el medio ambiente con ruido. Son económicos porque aportan información tan importante como la que aportan los sondeos de pozos geotécnicos pero por un costo menor de un orden de magnitud.

Tanto el método SPAC como los cocientes espectrales han sido utilizados para estudios de vibración y de prospección en la Ciudad de México. Por ejemplo Rodríguez *et al.* (2009) utilizaron un sismógrafo de prospección con 24 geófonos verticales para medir ruido sísmico en el transecto de la futura Línea 12 del metro de la Ciudad de México. En sus estudios calculan las correlaciones cruzadas entre geófonos y la curva de dispersión, también utilizaron sensores de banda ancha dispuestos en arreglos triangulares. Con esta técnica demostraron que es posible utilizar, como mínimo arreglos de dos estaciones para aplicar el SPAC, ya que sus resultados fueron consistentes con estudios previos de *crosshole* para esta misma zona (empresa Colinas de Buen). Los resultados que obtuvieron muestran una capa de material lacustre de 60 m de espesor y velocidades de 70 y 90 m/s, sobre una capa de 400 m/s de onda de cortante.

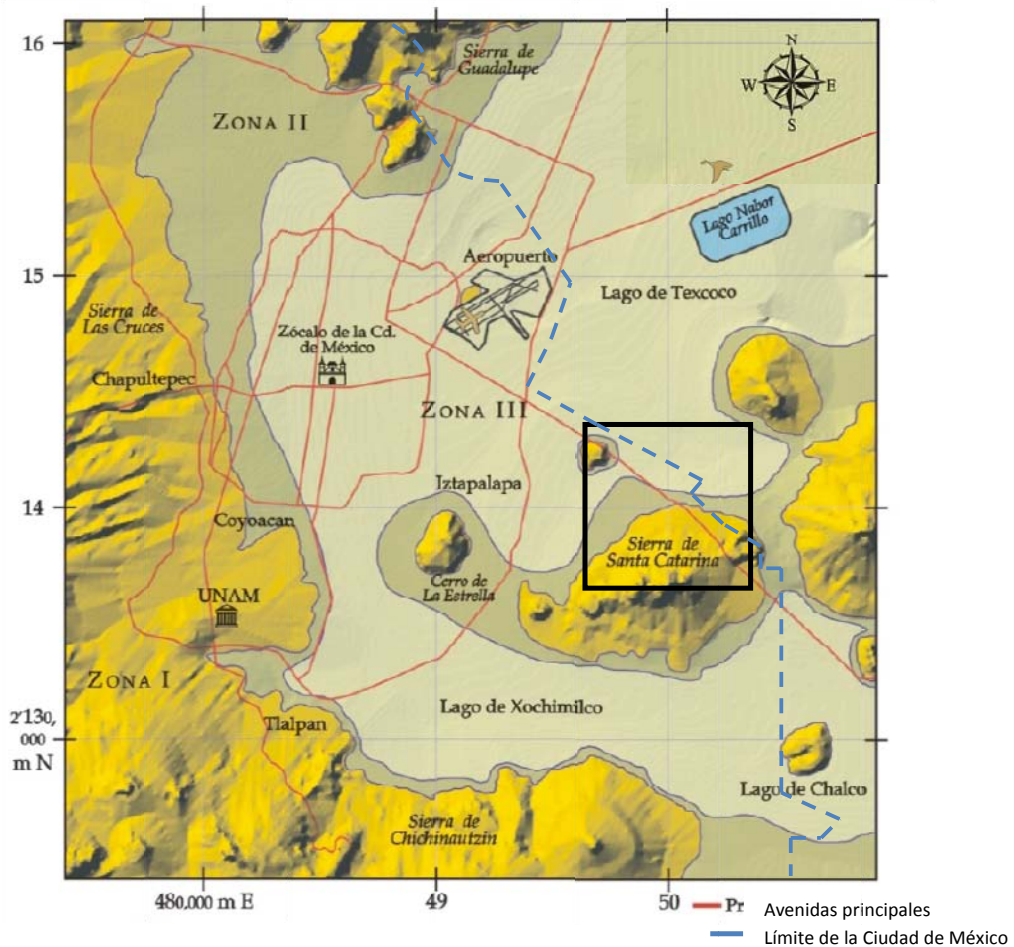
Con respecto a los cocientes espectrales Lermo y Chávez-García (1994) realizaron un mapa de periodos dominantes para la Ciudad de México. Utilizaron datos de eventos telesísmicos y registros de ruido ambiental en 409 puntos de medición distribuidos en la ciudad. Los resultados que obtuvieron con ambos datos fueron consistentes en los 13 puntos que tenían ambos tipos de datos, además, son consistentes con los calculados con la función de transferencia empírica de movimientos fuertes.

Por otro lado, se han realizado estudios previos de geotecnia y de prospección eléctrica sobre la Avenida Ignacio Zaragoza entre las estaciones Guelatao y Los Reyes, en los cuales es evidente la presencia de material lacustre y material volcánico.

Este volumen muestra en el segundo capítulo la localización de la zona estudiada así como una breve descripción de la geología local. En los capítulos 3 y 4 se explica la logística de campo empleada para la adquisición de datos de ruido sísmico del método SPAC y de los cocientes espectrales, respectivamente. También se muestran los resultados que se obtuvieron de estos métodos. En el capítulo 5 se muestra la correlación del modelo de velocidades obtenido con el método SPAC con los resultados de geotecnia estudios previos. También se hace un cotejo de la frecuencia fundamental de los cocientes espectrales H/V calculados en este trabajo con estudios previos de microzonificación en la Ciudad de México. En el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo. Por último, al final del documento se muestran las referencias y los apéndices. En los apéndices se muestra una breve revisión del estado del arte de los cocientes espectrales y de arreglos de microtemores SPAC, los coeficientes de correlación del método SPAC, los cocientes espectrales y los resultados de estudios previos de la zona.

## 2 Localización

Los arreglos SPAC y las estaciones de ruido sísmico fueron instalados sobre la Avenida Ignacio Zaragoza, al costado de la Línea A del metro. El método SPAC fue utilizado con la finalidad de estimar la estructura de velocidades entre las estaciones Guelatao y Acatitla. Los cocientes espectrales se utilizaron para estimar la frecuencia fundamental entre las estación Guelatao a Los Reyes. En el mapa de la figura 2.1 se muestra la ubicación de la zona de trabajo.



**Figura 2.1** Mapa del antiguo Lago de Texcoco de la Ciudad de México (Modificado de Santoyo, 2005). El recuadro negro marca la zona de investigación de este trabajo.

La figura 2.2 muestra con más detalle la zona de trabajo. En el mapa se puede observar Línea A del metro del tramo Guelatao a los Reyes, la longitud de este tramo es de ~7 km. La Línea A está sobre la Avenida Ignacio Zaragoza en la colonia Cd. Nezahualcóyotl.





**Figura 2.2** Localización de la zona de trabajo, área correspondiente al recuadro negro de la figura 2.1. El recuadro de doble línea encierra el área de instalación de los arreglos SPAC. El recuadro de línea discontinua delimita el área de instalación de las estaciones de ruido sísmico (mapa tomado de Google map).

La zona de estudio se encuentra dentro de lo que fue el Lago de Texcoco, de acuerdo con Schlaepfer (1968), Vázquez y Jaimes (1989), Mooser (1975) y Cserna *et al.* (1988), citados por Santoyo *et al.* (2005). En esta zona se encuentran depósitos que corresponden a sedimentos clásticos y productos piroclásticos depositados en ambiente lacustre del Pleistoceno tardío – Holoceno.

El Peñón del Marqués, localizado entre las estaciones Guelatao y Peñón Viejo, es un cerro de origen volcánico del Pleistoceno. Es de composición de lava máfica, brechas, tezontles y cenizas.

La sierra de Santa Catarina es otra estructura volcánica localizada al sur de la zona de trabajo, es de composición máfica y de edad Pleistoceno.

### 3 Exploración del subsuelo con el método SPAC

Con la finalidad de estimar un modelo de velocidades debajo de la Línea A del metro, entre las estaciones Guelatao y Acatitla, se aplicó el método SPAC, propuesto por Aki (1957). Aki propuso un arreglo de estaciones dispuestas en círculo o en triángulo para medir el ruido ambiental. Con las ondas de frecuencia angular registradas en las estaciones del arreglo es posible construir la curva de dispersión del medio, la cual muestra la relación entre la frecuencia y la velocidad a la que se propagan las ondas superficiales de Rayleigh en el medio.

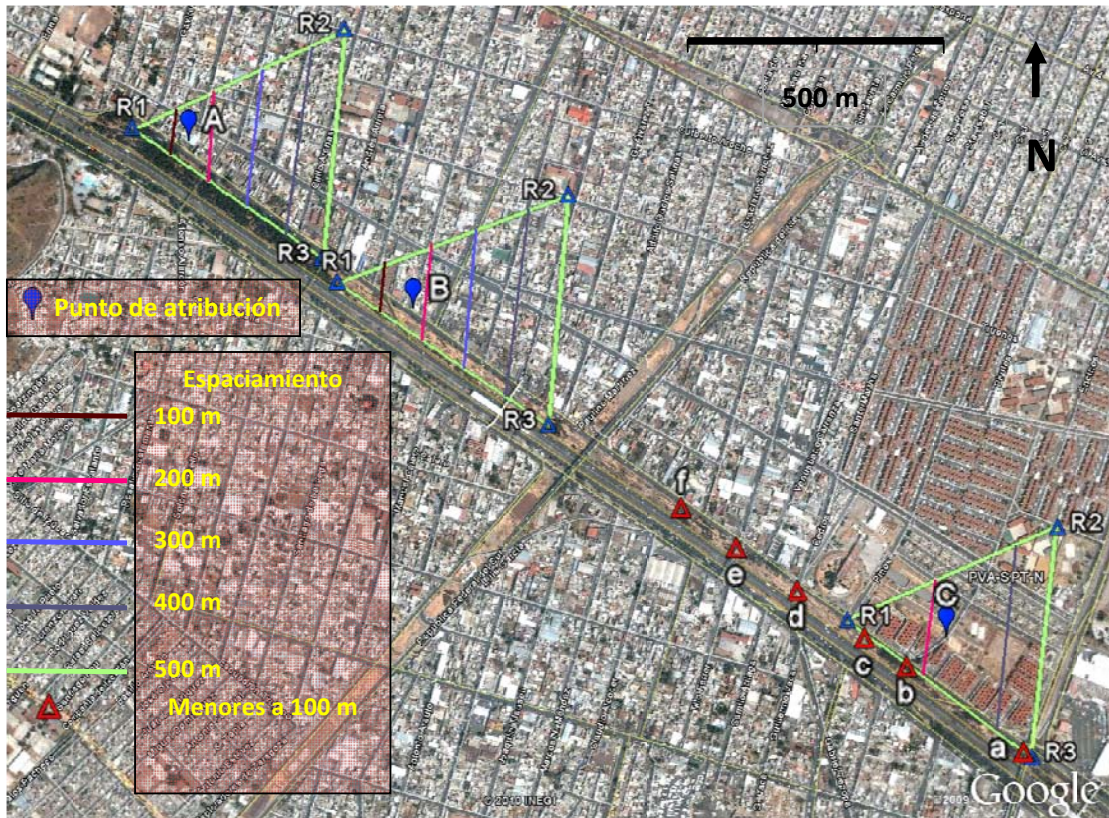
Para obtener la curva de dispersión es necesario calcular los coeficientes de correlación de las trazas de ruido sísmico registradas en las estaciones del arreglo. Los coeficientes de correlación están dados por:

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi\phi(0, \omega)} \int_0^{2\pi} \phi(r, \theta, \omega) d\theta = J_0\left(\frac{r\omega}{c(\omega)}\right),$$

en donde  $\phi(r, \theta, \omega)$  es la función de cros-correlación entre las trazas del arreglo,  $\phi(0, \omega)$  es la función de autocorrelación en el centro del arreglo,  $r$  es la distancia entre estaciones,  $\theta$  es el azimut de las estaciones del arreglo,  $J_0\left(\frac{r\omega}{c(\omega)}\right)$  es la función de Bessel de primer especie y orden cero, cuyo argumento está dado por la distancia entre las estaciones, la frecuencia angular y la velocidad de fase que depende de la frecuencia angular de las ondas superficiales.

En la adquisición de datos de este trabajo, se instalaron arreglos de tres estaciones acelerográficas formando un triángulo equilátero. Se instalaron arreglos con aberturas desde 100 m hasta 500 m, también se instalaron arreglos con aberturas desde 10 m hasta 45 m. La localización de estos arreglos se ilustra en la figura 3.1.

En la figura 3.1 se muestran los arreglos con espaciamiento mayor a 100 m. El nombre de los arreglos se denota con las letras mayúsculas “A”, “B” y “C”, la gota azul indica la localización del punto de atribución de las mediciones, la nomenclatura R1, R2 y R3 corresponde a los equipos utilizados en los arreglos. En esta misma figura también se muestran en rojo los arreglos con espaciamiento menor a 100 m, con sus respectivos nombres en minúsculas de la letra “a” a la letra “f”.

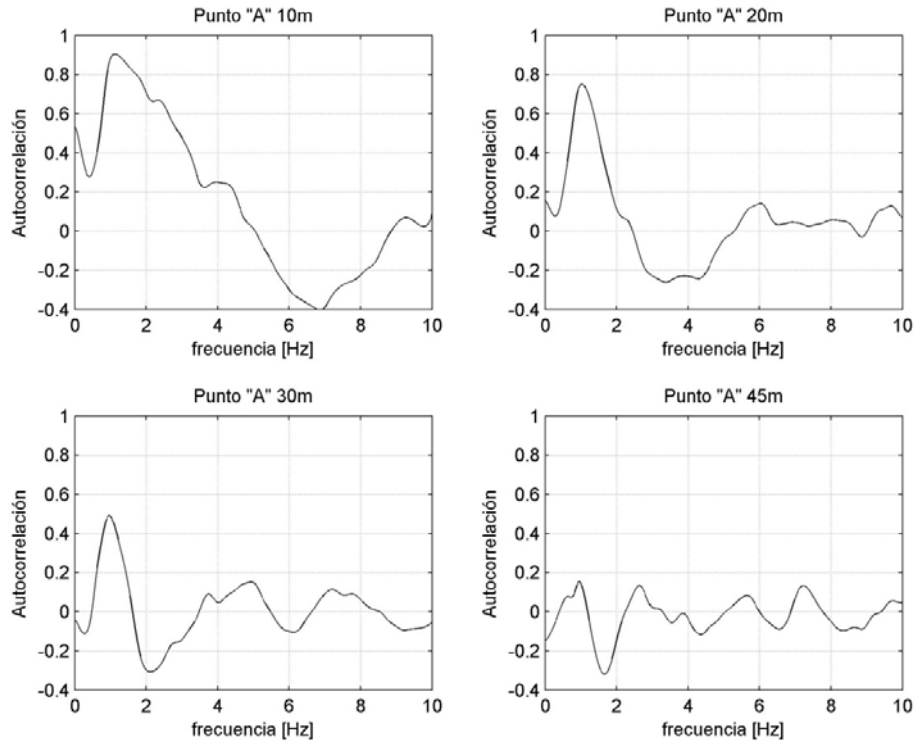


**Figura 3.1 Localización de los arreglos SPAC, corresponde al tramo Guelatao Acatitla de la línea A del metro mostrado en recuadro de doble línea de la figura 2.2.**

Para los arreglos mayores a 100 m se utilizaron 3 K2 Altus como digitalizadores, conectados a un sensor Guralp CMG-40T en cada vértice de los arreglos, Las especificaciones del equipo se encuentran en el Apéndice B. Los equipos fueron sincronizados antes de la toma de datos y fueron disparados en forma manual al mismo tiempo para obtener un registro de 30 min. En la figura 3.1 se muestran los espaciamientos de estos arreglos

En los arreglos menores de 100 m se utilizaron 3 sismómetros Kinometrics V1 de 5 s conectados a un digitalizador K2. Los instrumentos de medición fueron programados para grabar durante 30 min. Estos arreglos se muestran en color rojo en la figura 3.1 cuyo espaciamientos son desde 10 m hasta 45 m.

El procesado de las señales consistió en extraer 14 ventanas de 81.92 s de la componente vertical de cada registro. El promedio de los espectros de potencia de cada ventana fue correlacionado con los espectros de potencia calculados en el resto de los puntos de medición del arreglo. Las funciones de cros correlación resultantes fueron promediadas para obtener el coeficiente de autocorrelación espacial. En la figura 3.2 se muestran como ejemplo los coeficientes de autocorrelación espacial de los arreglos del punto “A”.



**Figura 3.2 Coeficientes de autocorrelación en el punto “A”.**

Los coeficientes de autocorrelación de la figura 3.2 muestran que en los arreglos de 10 m, 20 m, 30 m, y 45 m hay correlación entre los registros tomados en el Punto “A”. En 10 m el coeficiente de correlación se aproxima a la función de Bessel en el rango de frecuencias de 1 a 7 Hz. En 20 m la aproximación con la función de Bessel es de 1 a 3 Hz. Para el espaciamiento de 30m la aproximación es entre 1 y 2 Hz y para el espaciamiento de 45 m el ajuste es entre 1 y 1.8 Hz. En el Apéndice C se muestran el resto de los coeficientes de autocorrelación de cada arreglo.

A partir de los coeficientes de autocorrelación espacial se puede invertir la curva de dispersión. Ésta se obtiene interpolando los valores del argumento de la función de Bessel con los valores de los coeficientes de autocorrelación. Esto es mediante la expresión iterativa

$$C_d = x(j) + (x(j + 1) - x(j)) * (C_c(i) - \text{bessel}(j)) / (\text{bessel}(j + 1) - \text{bessel}(j))$$

En donde

$x(j)$  es el valor del argumento ‘x’ de la función de Bessel

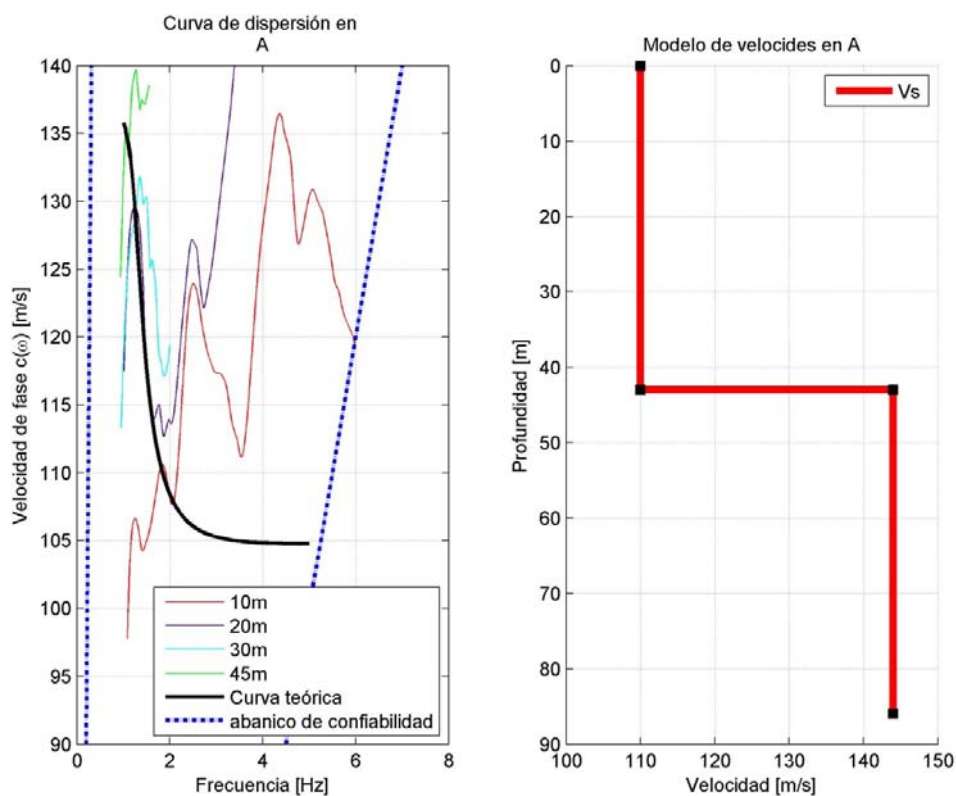
$C_c(i)$  es el valor de los coeficientes de correlación

$C_d$  es la curva de dispersión.

Finalmente se realiza el cálculo de la curva de dispersión teórica. Ésta se obtiene resolviendo la ecuación de movimiento imponiendo las condiciones de frontera libre para una incidencia de onda con ángulo mayor al ángulo crítico en un medio estratificado. Al resolver la ecuación se obtiene un sistema de ecuaciones en el cual la variable a resolver es la velocidad de fase.

El ajuste de la curva teórica con la observada se hace en forma iterativa proponiendo un modelo de capas hasta que se obtiene un modelo que explique las observaciones. El modelo inicial es propuesto a partir de la información que proporciona la curva de dispersión observada en altas frecuencias.

La curva de dispersión describe la variación de la frecuencia con la velocidad de las ondas superficiales. Una curva de dispersión en altas frecuencias es asintótica a la velocidad de corte de la capa superficial, y en bajas frecuencias es asintótica a la velocidad de corte de la capa más profunda. La curva de dispersión también muestra puntos de inflexión. La pendiente en los puntos de inflexión tienen que ver con el contraste de impedancia de las capas adyacentes, además, la posición del punto de inflexión sobre el eje de las frecuencias indica, en forma cualitativa, el espesor del estrato, cuando la curva se recorre a la derecha esto indica que se adelgaza la capa más somera.



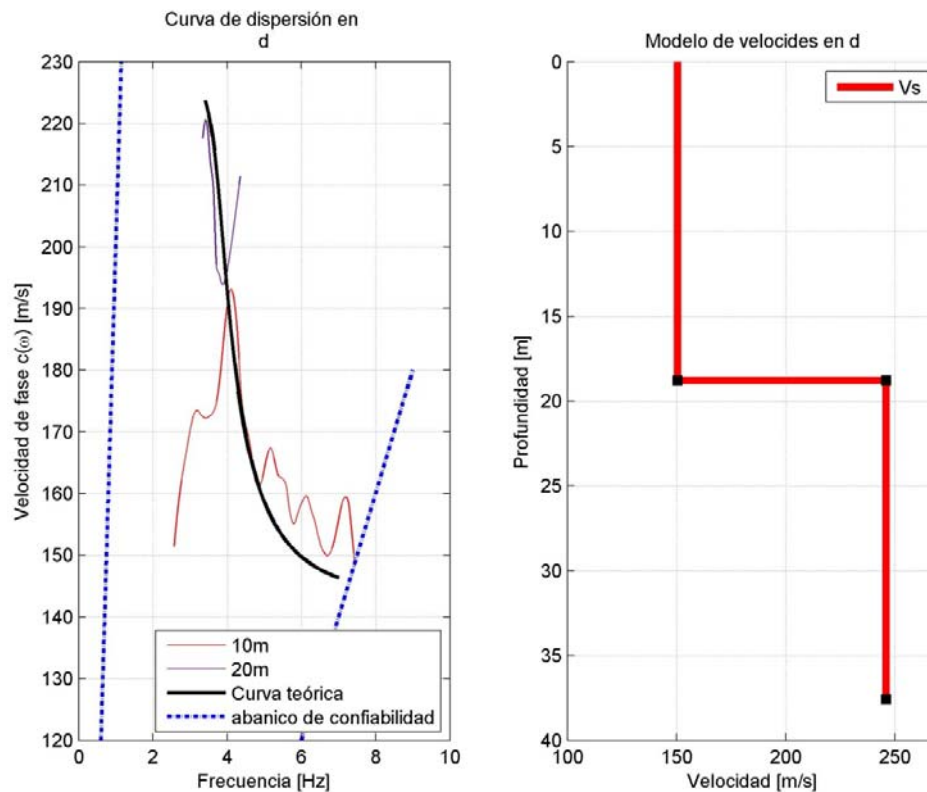
**Figura 3.3 (Izquierda) Fragmentos de la curva de dispersión observada, la curva de dispersión teórica y el abanico de confiabilidad. (Derecha) Modelo de velocidades que explica la curva de dispersión observada.**

En la figura 3.3 se muestra la curva de dispersión y el modelo que mejor explica la curva de dispersión observada en el punto de medición “A” del mapa de la figura 3.1. El panel izquierdo de la figura 3.3 muestra el ajuste entre la curva de dispersión observada y la teórica. La curva de dispersión teórica es calculada a partir del modelo mostrado en el panel derecho.

Los segmentos de curva de dispersión observados muestran el rango de frecuencias en el que el ruido sísmico está dominado por las ondas de Rayleigh. La curva de dispersión teórica que mejor explica la curva observada es un modelo de un estrato con velocidad de ondas de corte de

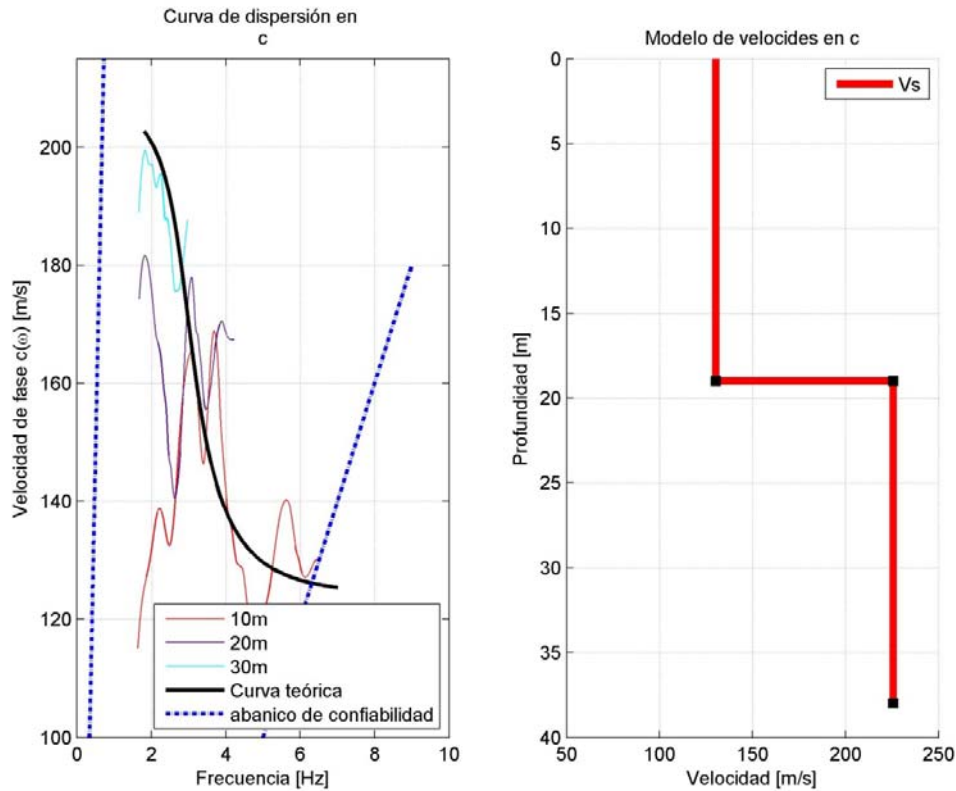
110 m/s con espesor de 43 m, es importante hacer notar que la curva de dispersión teórica es asintótica en 105 m/s, arriba de 3 Hz. La velocidad del medio subyacente al estrato se estimó en ~143 m/s. Debido a que no hubo correlación en los arreglos mayores de 45 m no fue posible estimar con mayor precisión la velocidad del medio subyacente.

La figura 3.4 presenta el ejemplo en el punto de medición “d”. El ajuste de la curva teórica con la curva observada corresponde a un modelo de velocidades de una capa, en la que se estima una velocidad de ~150 m/s y un espesor de ~19 m. La curva de dispersión teórica muestra que la velocidad de la capa es de ~145 m/s. La velocidad del semiespacio se estimó en ~250 m/s. Debido a que no se tiene información de la curva de dispersión de los arreglos con espaciamento mayor a 20 m.



**En la figura 3.4 (Izquierda) Fragmentos de la curva de dispersión observada, la curva de dispersión teórica y el abanico de confiabilidad. (Derecha) Modelo de velocidades que explica la curva de dispersión observada.**

En el punto de medición “c”, cuya curva de dispersión observada se muestra en la figura 3.5 se estimó un modelo de velocidades de un estrato sobre un semiespacio. Se estimó un estrato con espesor de ~19 m y velocidad de corte de ~130 m/s y la velocidad del semiespacio de ~225 m/s.



**Figura 3.5 (Izquierda) Fragmentos de la curva de dispersión observada en el punto de medición “c”, la curva de dispersión teórica y el abanico de confiabilidad. (Derecha) Modelo de velocidades de onda S que mejor explica la curva de dispersión observada.**

La figura 3.6 muestra las curvas de dispersión observadas en el punto de medición “b”. La curva teórica corresponde a un modelo de una capa con velocidad de onda S de  $\sim 120$  m/s con espesor de  $\sim 20$  m, sobre un semiespacio con velocidad de cizalla de  $\sim 210$  m/s. En este caso la curva teórica es asintótica en 120 m/s arriba de 5 Hz.

De las curvas de dispersión de la figura 3.7 se estimó un modelo de velocidades de onda S de  $\sim 25$  m de espesor y velocidad de propagación de onda de corte de  $\sim 65$  m/s y el semiespacio con velocidad  $\sim 90$  m/s. La curva de dispersión teórica es asintótica en 62.5 m/s arriba de 2.5 Hz.

La figura 3.8 muestra el modelo de velocidades estimado para el punto “e”. El modelo consta de dos estratos de velocidad 100 m/s y espesor  $\sim 13$  m del estrato más superficial y  $\sim 170$  m/s con espesor  $\sim 40$  m del segundo estrato, sobre el semiespacio de velocidad  $\sim 255$  m/s. La curva de dispersión teórica tiende a ser asintótica en 100 m/s en 6 Hz, también presenta una curvatura en  $\sim 160$  m/s, que corresponde a la velocidad del segundo estrato.

En los arreglos que corresponden a los puntos de medición B y f no se obtuvo correlación entre las trazas, por lo que fue imposible obtener una curva de dispersión.



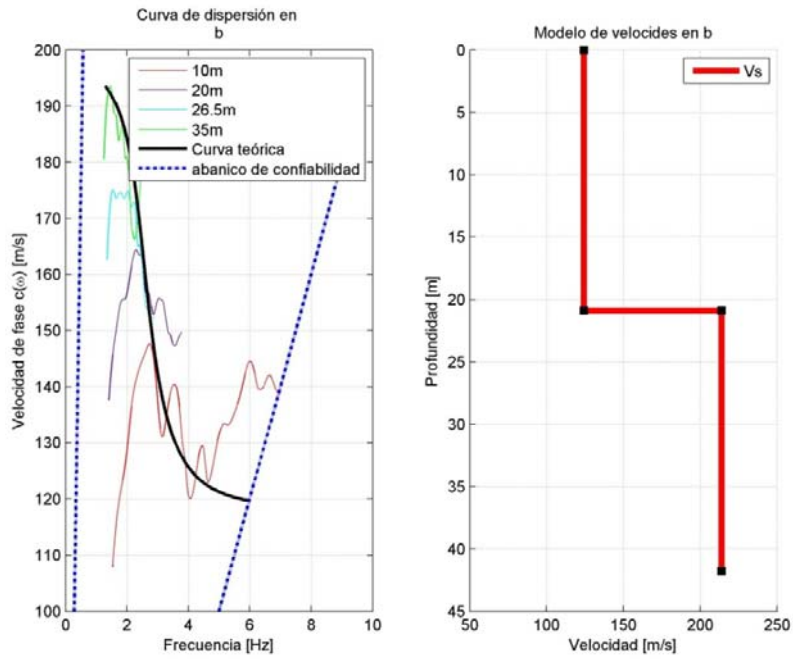


Figura 3.6 Curva de dispersión (izquierda) y modelo de velocidades de cizalla (derecha) en “b”.

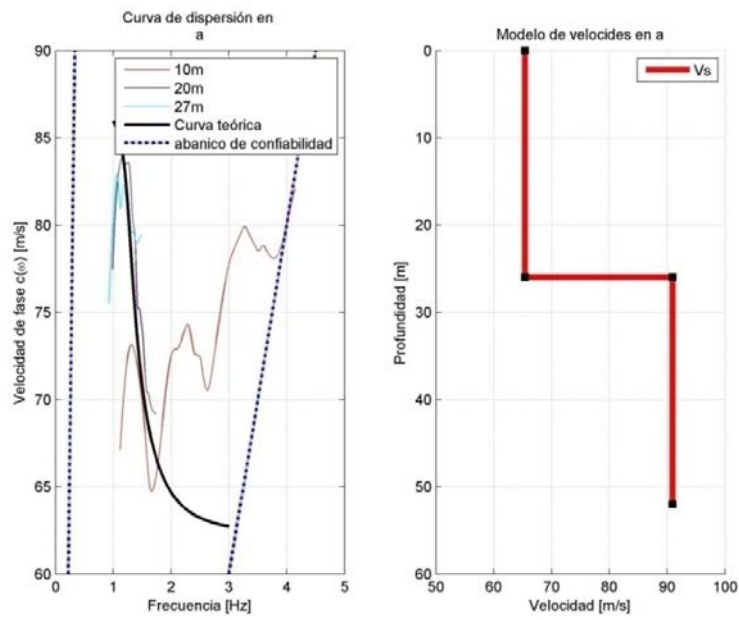
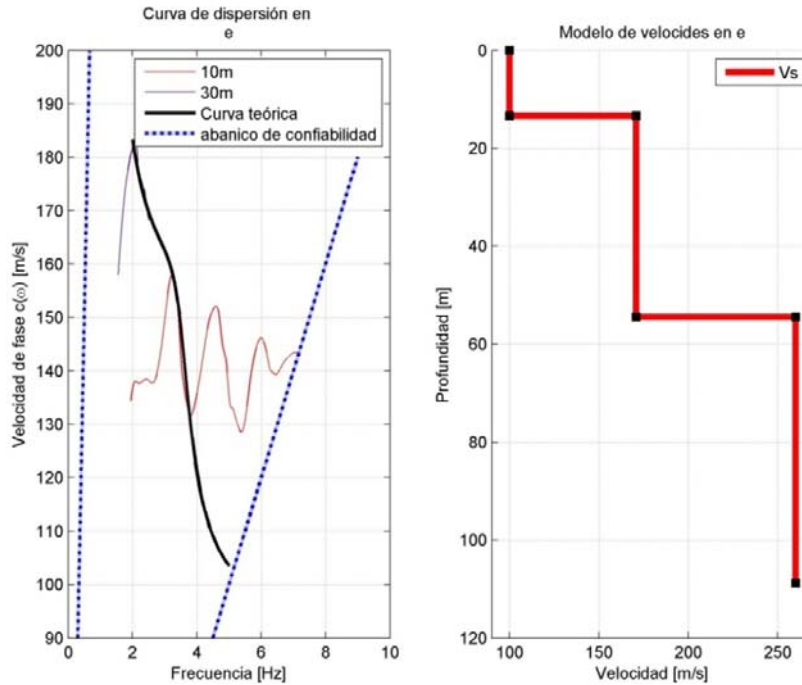
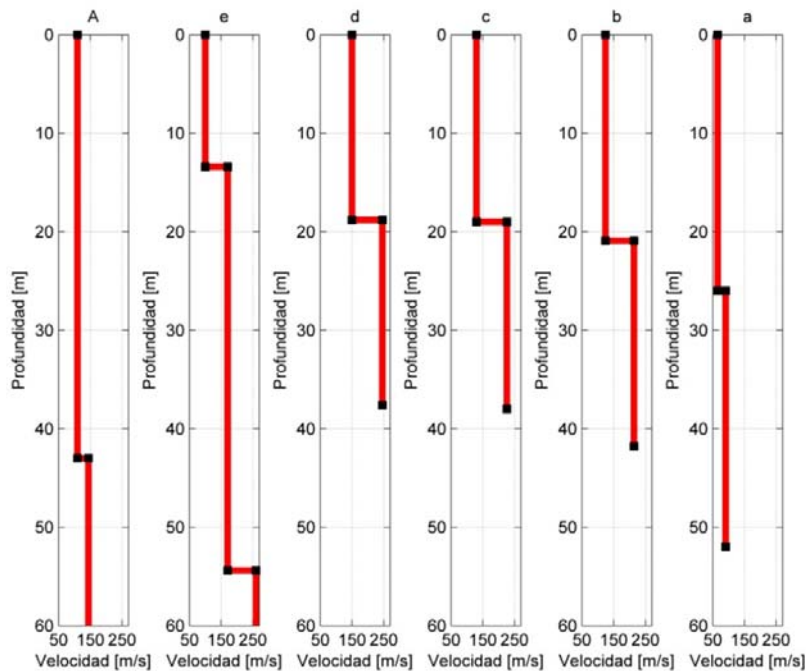


Figura 3.7 Curva de dispersión (izquierda) y modelo de velocidades de cizalla (derecha) en “a”.



**Figura 3.8 (Izquierda) Fragmentos de la curva de dispersión observada, la curva de dispersión teórica y el abanico de confiabilidad. (Derecha) Modelo de velocidades que explica la curva de dispersión observada en el punto “e”.**

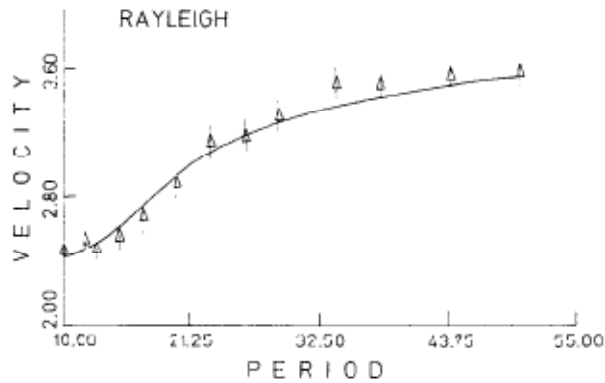


**Figura 3.9 Modelo de velocidades en cada punto de medición.**

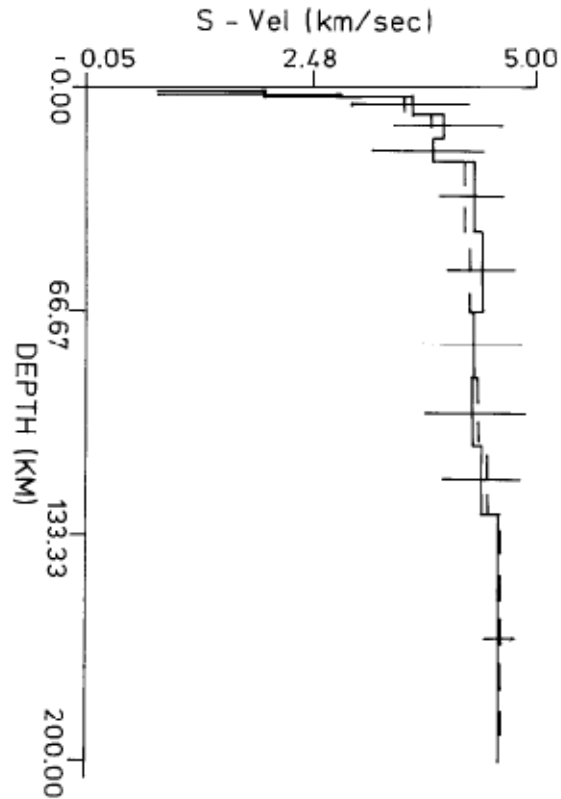
En la figura 3.9 se observa, en general, un modelo de una capa sobre un semiespacio. El espesor de la capa disminuye de 43 m a 13 m del punto “A” al punto “e” y se engruesa de 13 m a 26 m del punto “e” al punto “a”. La velocidad de la capa superficial varía de 100 m/s a 150 m/s entre

los puntos “A” y “b”, sin embargo en el punto “a” la velocidad en la capa disminuye a ~63 m/s. Por otro lado, la velocidad del semiespacio en el puntos “A” es de ~150 m/s mientras que en los puntos “d” y “c” la velocidad estimada es ~250 m/s, en el punto “b”, es ~210 m/s y en el punto “a” 60 m/s. Finalmente, en el punto “e”, la velocidad estimada de la segunda capa es de ~150 m/s y espesor de ~40 m, y la velocidad del semiespacio en este punto fue estimada en 250 m/s.

Es posible calcular el rango de confiabilidad del modelo de velocidades que se obtiene a partir de las curvas de dispersión. Como ejemplo se muestran las figuras 3.10 (curva de dispersión) y 3.11 (modelo de velocidades S), las cuales fueron tomadas de Prakash *et al.* (2005). En las gráficas se muestra que al calcular la desviación estándar de la curva de dispersión de velocidad de grupo de ondas de Rayleigh se obtiene el rango de confiabilidad del modelo de velocidades.



**Figura 3.10** Curva de dispersión de velocidad de grupo con desviación estándar marcada en líneas verticales, (Tomado de Prakash *et al.* (2005)).



**Figura 3.11 Modelo de velocidades de cortante. Las líneas horizontales representan la desviación estándar, (Tomado de Prakash *et al.*, 2005).**

Siguiendo el trabajo de Prakash *et al.* (2005). El modelo de velocidades de onda de cortante de la figura 3.10, fue estimado a partir de la curva de dispersión de velocidad de grupo de las ondas de Rayleigh de eventos se registraron en instrumentos de banda ancha en la parte noreste del Pacífico. La curva de dispersión fue invertida con dos métodos: el código de Hermann (1987), citado por Prakash *et al.* (2005), y la inversión de Lawson y Hanson (1974), citado por Prakash *et al.* (2005), basada en la inversión estocástica. Prakash asegura que arriba de 60 km hay un buen ajuste entre los dos métodos empleados y no hay mucha desviación de los valores de velocidad con respecto a cada capa.

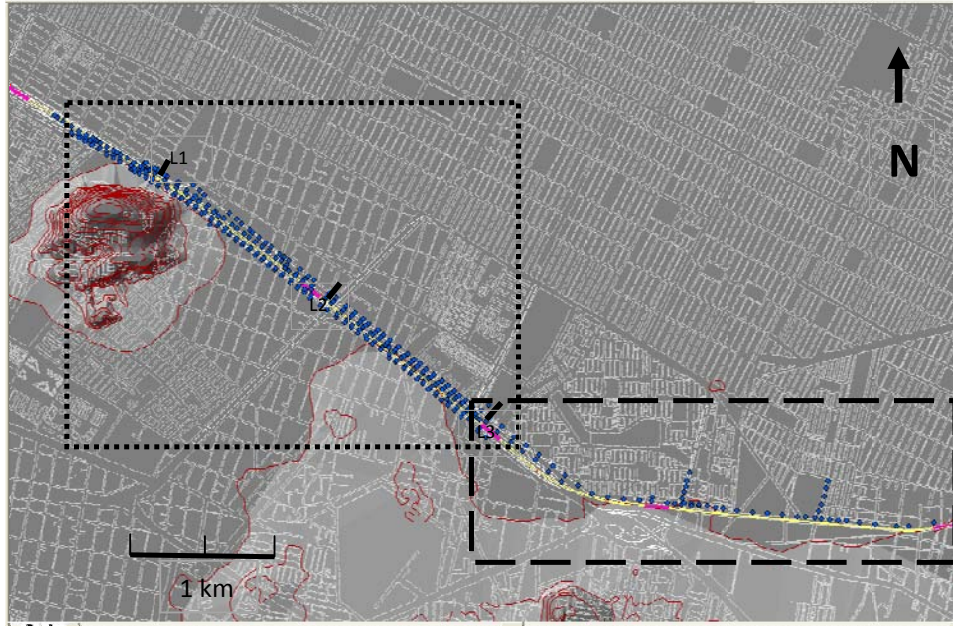
## 4 Análisis de la frecuencia fundamental de los cocientes espectrales

La frecuencia pico que muestran los cocientes espectrales y la función de transferencia se interpreta como la frecuencia fundamental o la frecuencia de resonancia del sitio, esto quiere decir que en el sitio predominan los efectos que generan la frecuencia de amplitud máxima. Los experimentos realizados por Lermo *et al.* (1988), en la Ciudad de México; Seo (1998), en la cuenca de Fukua, Japón; en Nueva York, Field *et al.* (1990); y en la bahía de San Francisco, Hough *et al.* (1991), muestran que la frecuencia pico es debida a que hay una capa de material suave sobre un material muy duro con un alto contraste de impedancia.

De acuerdo con la interpretación de diversos autores como Nogoshi e Igarashi (1971); Field y Jacob (1993); Lachet y Bard (1994); Ansary *et al.* (1995); Horike (1996); Tokimatsu *et al.* (1996); Kono y Omachi (1998), entre otros, coinciden en que el cociente espectral H/V esta básicamente relacionado con la elipticidad de las ondas de Rayleigh, debido a la predominancia de ondas de Rayleigh en la componente vertical. También coinciden en que el pico está relacionado con el desvanecimiento de la componente vertical, el cual corresponde al sentido rotatorio inverso del modo fundamental de la onda de Rayleigh.

Con la finalidad de obtener la distribución espacial del periodo dominante en la zona de trabajo se obtuvieron los cocientes espectrales H/V en 326 puntos a partir de registros de ruido sísmico. Los puntos de medición se ubicaron a los costados de la Avenida Ignacio Zaragoza, espaciados ~50 m. La localización de los puntos de medición se muestra en el mapa de la figura 4.1.

Para registrar el ruido sísmico se utilizaron los acelerómetros K2 Altus, la descripción de los instrumentos es mostrada en el Apéndice B, los acelerómetros fueron nivelados y orientados con respecto al norte. En cada punto se obtuvieron tres registros de 3 min cada uno. De cada componente del ruido sísmico registrado se extrajeron 17 ventanas de 20 s. Las ventanas fueron transformadas al dominio de las frecuencias. Se calcularon los cocientes de los espectros de amplitud de las componentes horizontales con las componentes verticales para cada una de las 17 ventanas y después se promediaron para obtener los cocientes espectrales H/V.



**Figura 4.1 Mapa de localización de los puntos de medición de ruido sísmico (puntos azules), el área de este mapa corresponde al recuadro de línea discontinua de la figura 2.2. El recuadro punteado indica el área de los puntos de medición entre Guelatao y Acatitla. El recuadro de línea discontinua indica el área de los puntos de medición entre Acatitla y Los Reyes Las líneas rosas representan las estaciones de la línea del metro. L1, L2 y L3 denotan líneas de medición perpendiculares a la línea del metro.**

Los cocientes espectrales H/V de las líneas L1 y L3 de la figura 4.1 son mostradas en las 4.2 a 4.4. En los cocientes espectrales H/V se observa que hay una variación de la posición de la frecuencia fundamental. En los espectros de las líneas L1 y L3 la frecuencia fundamental se presenta en frecuencias más bajas conforme el punto de medición se mueve hacia el norte. Sin embargo, no fue posible determinar la frecuencia pico en todos los puntos de observación, como es el caso de los cocientes espectrales H/V, paneles 1 a 4, de la Línea L2 mostradas en la figura 4.3.

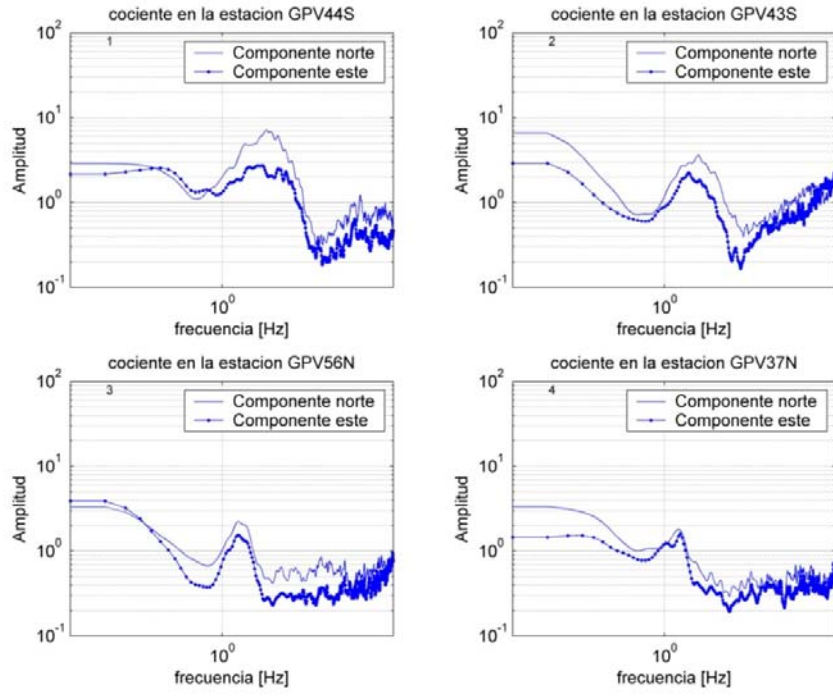


Figura 4.2 Cocientes espectrales H/V de la línea L1 enumeradas de norte a sur.

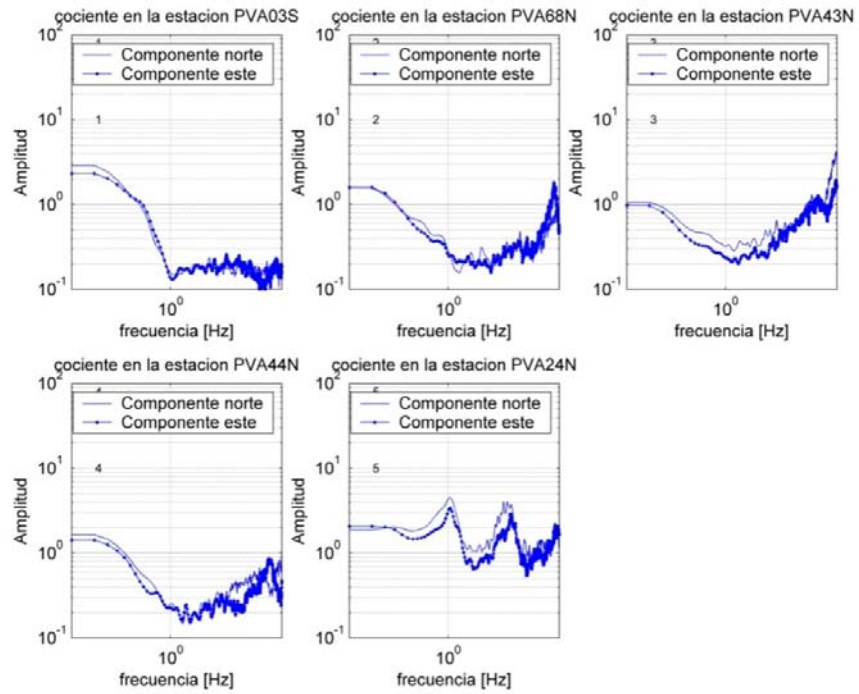
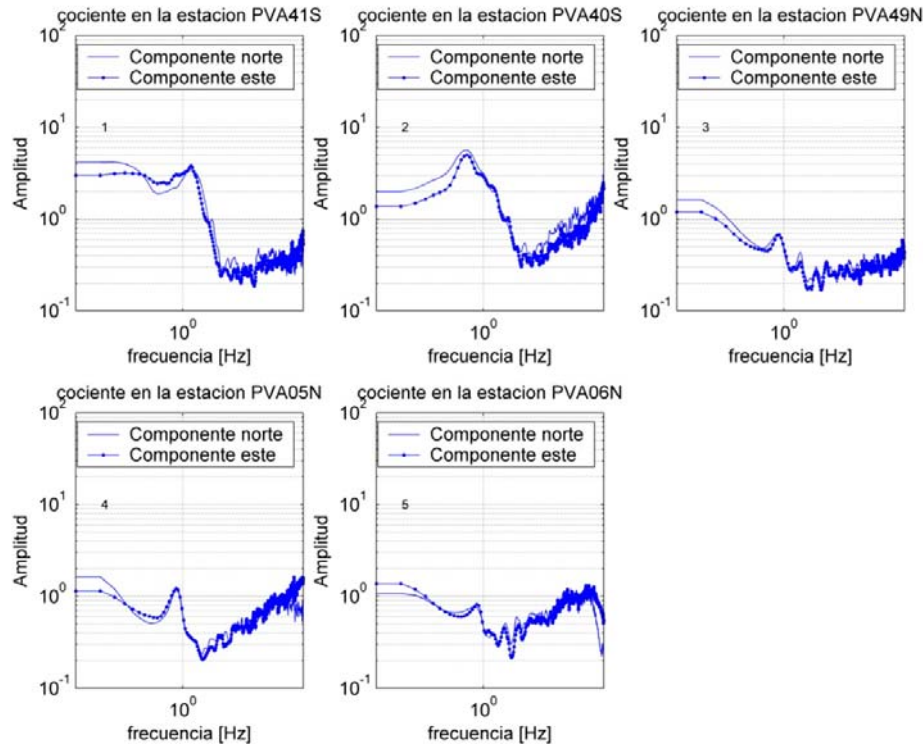


Figura 4.3 Cocientes espectrales H/V de la línea L2 enumeradas de norte a sur.



**Figura 4.4 Cocientes espectrales H/V de la línea L3 enumeradas de norte a sur.**

La variación de la frecuencia pico de los cocientes espectrales H/V en las figuras 4.2 y 4.4 indica que el subsuelo tiene variaciones laterales fuertes tanto en espesor del estrato resonante como en velocidades de ondas de corte.

Los cocientes espectrales H/V de la figura 4.3 son un ejemplo en el que se muestra que en frecuencias bajas, menores a 0.2 Hz el espectro es constante, lo que evidencia un efecto de la respuesta del instrumento.

El ruido sísmico registrado con los sensores de velocidad Guralp CGM 40T también fue utilizado para calcular los cocientes espectrales H/V en los puntos G10 y G15. En la figura 4.5 se muestra la posición de los puntos de medición con los Guralp. Las figuras 4.6 y 4.7 son un acercamiento a los puntos G15 y G10, respectivamente. El punto G15 se ubica a 2.5 m de distancia del punto de medición PVA04N, en el cual se colocó un K2. El punto G10 está a 8.5 m del punto de medición PVA045N, en donde se situó un K2.

Los cocientes espectrales H/V en los puntos G15 y PVA04N son mostradas en las figuras 4.8 y 4.9. Estas curvas corresponden a tres ventanas de tres min de tiempo de grabación en ambos aparatos. En la figuras 4.10 y 4.11 se muestra los cocientes espectrales H/V que corresponden a los puntos G10 y PVA045N, las cuales corresponden a tres ventanas de tres minutos de grabación.





**Figura 4.5 Localización de los puntos de medición con los sensores de velocidad Guralp CGM 40T, indicándolos con puntos grises. El recuadro negro corresponde al área mostrada en la figura 4.6 y el recuadro azul corresponde a la mostrada en la figura 4.7.**



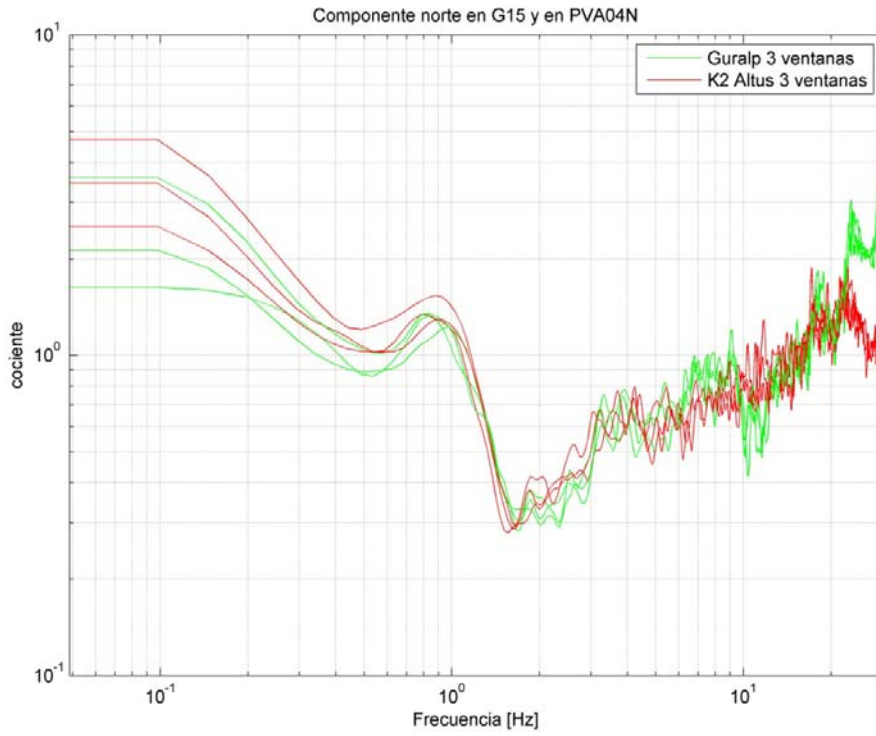
**Figura 4.6 Acercamiento a los puntos G15 y PVA04N medidos con Guralp y K2, respectivamente.**



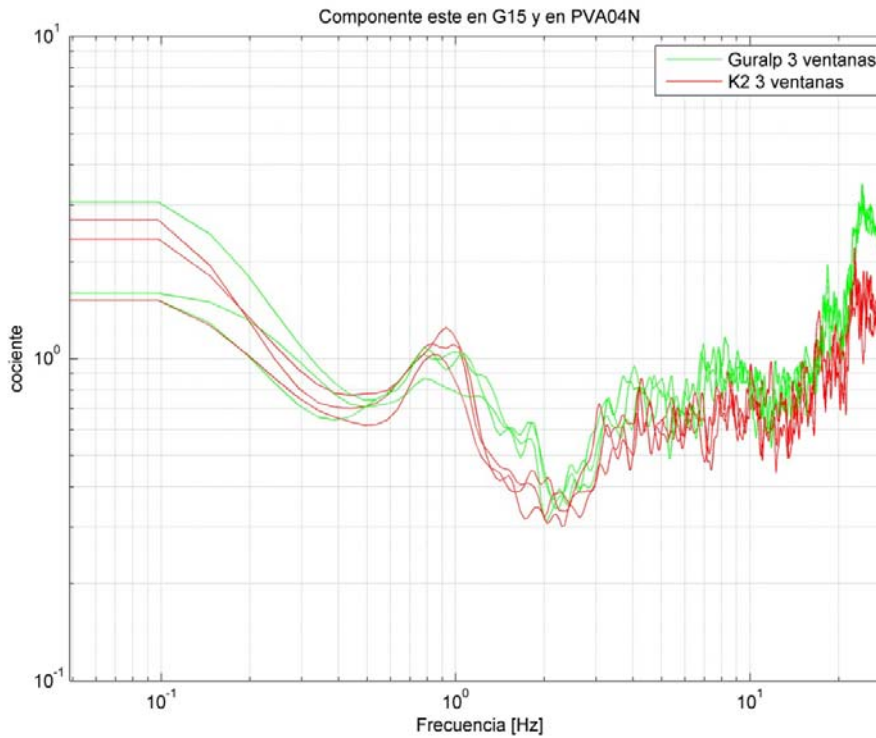
**Figura 4.7 Acercamiento a los puntos G10 y PVA045N medidos con Guralp y K2, respectivamente.**

Los cocientes espectrales H/V que corresponden a los puntos G15 y PVA04N, de las figuras 4.8 y 4.9, muestran que la curva de elipticidad es similar tanto en la componente norte como la componente sur, también muestran que la respuesta en ambos aparatos de registro es similar. Es necesario resaltar que la frecuencia fundamental del cociente es consistente en las medidas de los dos aparatos de medición tanto en frecuencia, alrededor de 1 Hz, como en amplitud. Sin embargo en frecuencias arriba de 2 Hz la amplitud del cociente de los registros del K2 es menor que la amplitud del cociente en el Guralp.

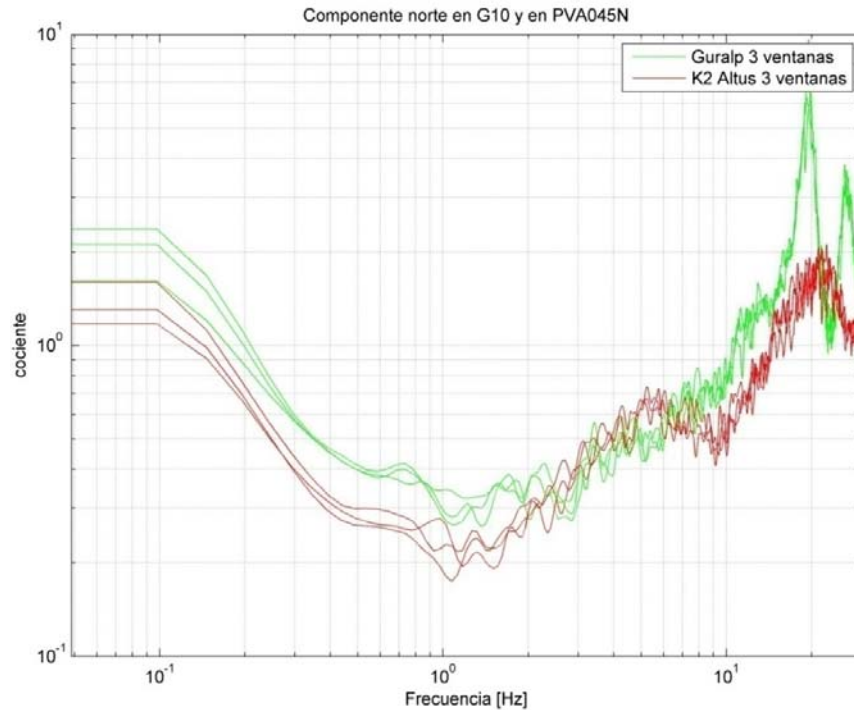
Los cocientes espectrales H/V en los puntos G10 y PVA045N, figuras 4.10 y 4.11, muestran similitud en ambas componentes. El cociente calculado con los registros de ambos aparatos es consistente tanto en amplitud como en frecuencia, aunque no es clara la frecuencia fundamental. Arriba de 2.1 Hz la forma de la curva difiere, ya que la curva del K2 decrece a diferencia de la del Guralp que crece.



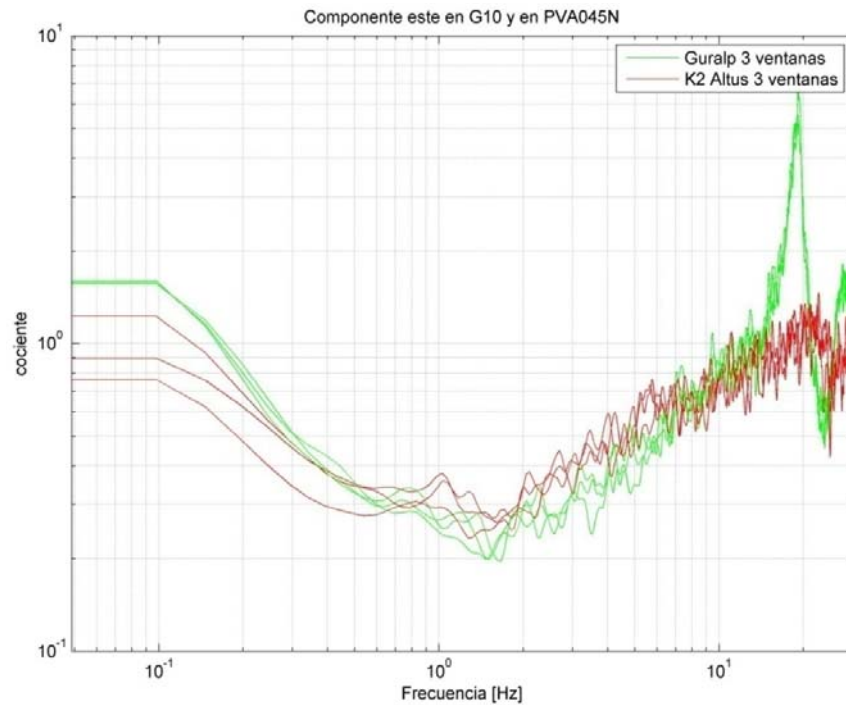
**Figura 4.8** Componente norte de los cocientes espectrales H/V en el punto G15 y PV04N.



**Figura 4.9** Componente este de los cocientes espectrales H/V en el punto G15 y PV04N.



**Figura 4.10** Componente norte de los cocientes espectrales H/V en el punto G10 y PV045N.



**Figura 4.11** Componente este de los cocientes espectrales H/V en el punto G10 y PV045N.

## 5 Discusión de resultados

Los modelos que fueron estimados con el método SPAC se compararon con el perfil geotécnico de la figura 5.1. El perfil geotécnico fue realizado por el grupo del laboratorio de Geoinformática del Instituto de Ingeniería, UNAM. La localización de los pozos con los que se construyó el perfil, así como la traza del perfil en la superficie se muestran en las figuras D1, D2 y D3, los sondeos de pozo del perfil se muestran en la figura D4 y D5 del apéndice D.

El modelo de velocidades estimado en el punto “A” de la figura 5.2 muestra un estrato con espesor de ~42.5 m y velocidad de corte de ~110 m/s, y el semiespacio con velocidad de corte de 150 m/s. El sondeo de pozo SM-LAC-02 de la figura 5.1 muestra una intercalación de arcilla con limo arenoso y una capa de material de relleno en la superficie. Esto quiere decir que la velocidad de la capa que se observa con el método SPAC es el promedio de las velocidades de un paquete de estratos de arcilla, limo arenoso y una capa de relleno, además el sondeo de pozo muestra un contacto entre roca volcánica y arcilla en 48.3 m y el modelo del SPAC muestra una interfase en 42.5 m. En el punto de medición “B” no se obtuvo correlación en ninguno de los arreglos, con excepción del arreglo de 10 m, por lo que no fue posible estimar un modelo de velocidades en este punto.

Los modelos de la figura 5.2 entre los puntos “e” y “a” en general muestran un modelo de una capa sobre un semiespacio. El espesor de la capa va de 13 m en el punto “e” a 26 m del punto “a”. Esta capa tiene correlación con la capa de arcilla del perfil geotécnico y el semiespacio de los modelos del método SPAC entre los puntos “d” y “a” tiene correlación con la capa de limo arenoso del perfil geotécnico.

La segunda capa del modelo del punto “e” tiene correlación con el limo arenoso. La velocidad del semiespacio podría corresponder a un promedio de las velocidades de la segunda capa de arcilla y la segunda capa de limo arenoso o un promedio de las velocidades de la segunda capa de limo arenoso y la roca volcánica que subyace al limo arenoso. Sin embargo debido a que la velocidad de la onda de corte en la roca volcánica es mayor a 1000 m/s, es probable que se trate del promedio de velocidades entre la segunda capa de arcilla y la segunda capa de limo arenoso.

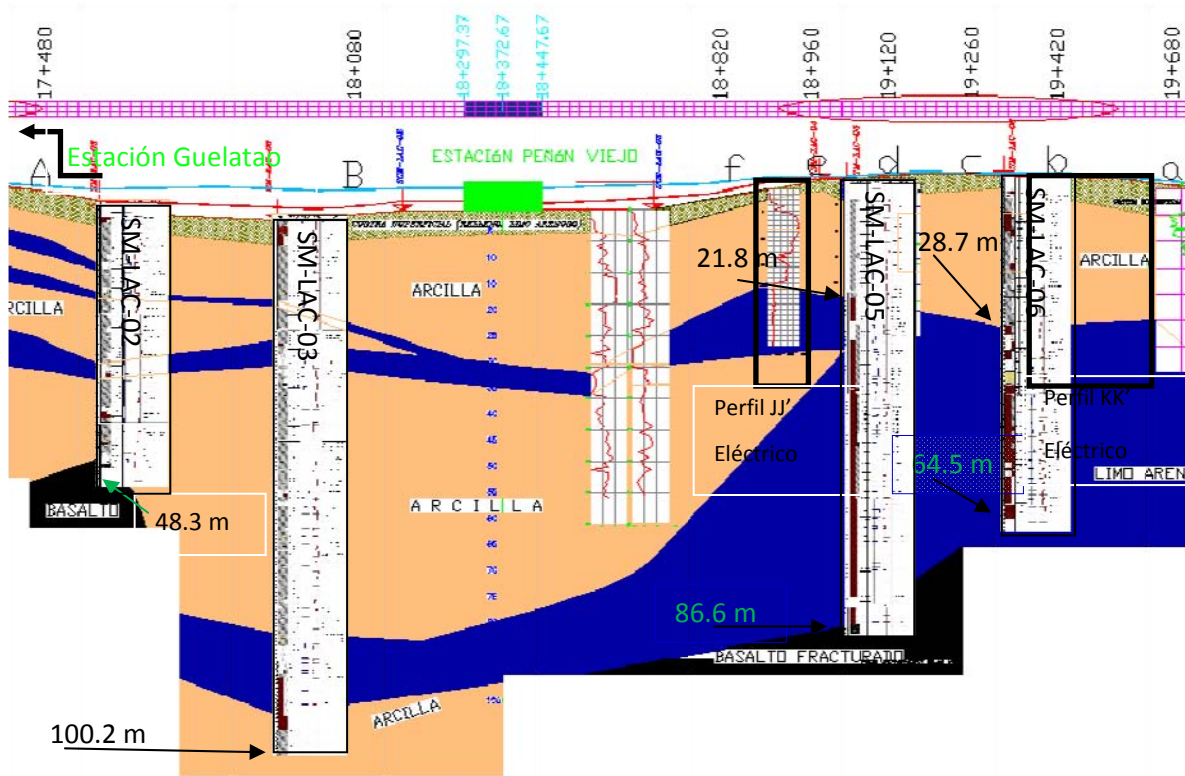


Figura 5.1 Porción del Perfil Geotécnico de 2380 m de longitud entre las estaciones Guelatop y Peñón Viejo. Las letras A, B, f, e, d, c, b y a indican la posición de los arreglos SPAC. También se muestran los sondeos de pozo SMLAC-02 SMLAC-03 SMLAC-05 y SMLAC-06. Los recuadros negros, perfil JJ' y KK', muestran la posición de dos perfiles eléctricos.

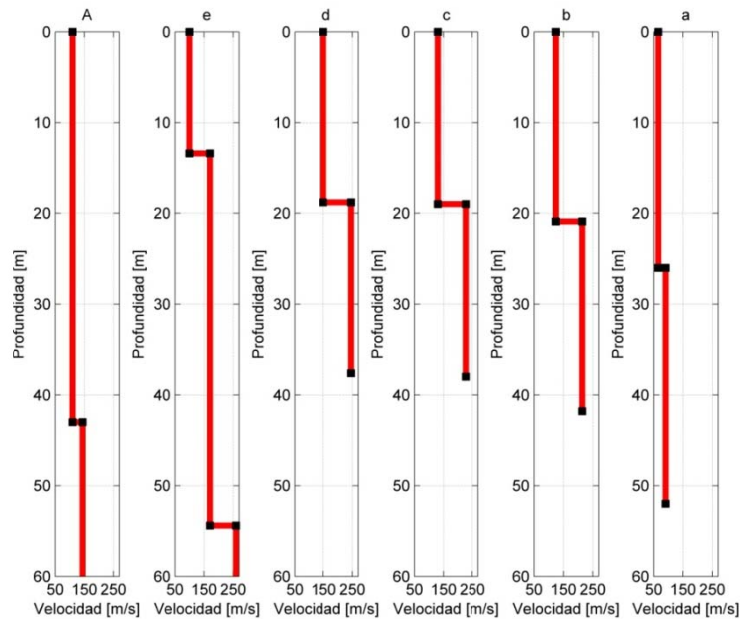


Figura 5.2 Modelos de velocidades de onda de cortante del SPAC entre los puntos de medición “A” y “a”.

Como información adicional se muestra en la figura 5.3 un sondeo de pozo y el perfil de velocidades en el pozo realizados por Santoyo (1996). La localización de pozo se muestra en el mapa de la figura 5.4. Las velocidades en el pozo fueron obtenidas utilizando una sonda suspendida dentro del fluido de perforación. El sistema emite ondas de corte y de compresión con un vibrador electromagnético y las ondas son registradas por un geófono horizontal y uno vertical que están aislados del vibrador. En el perfil de velocidades de onda S se muestra un estrato de arcilla con velocidades que varían de ~60 m/s a 450 m/s de 75 m de espesor y una capa de arcilla limosa con grava de velocidad 450 m/s.

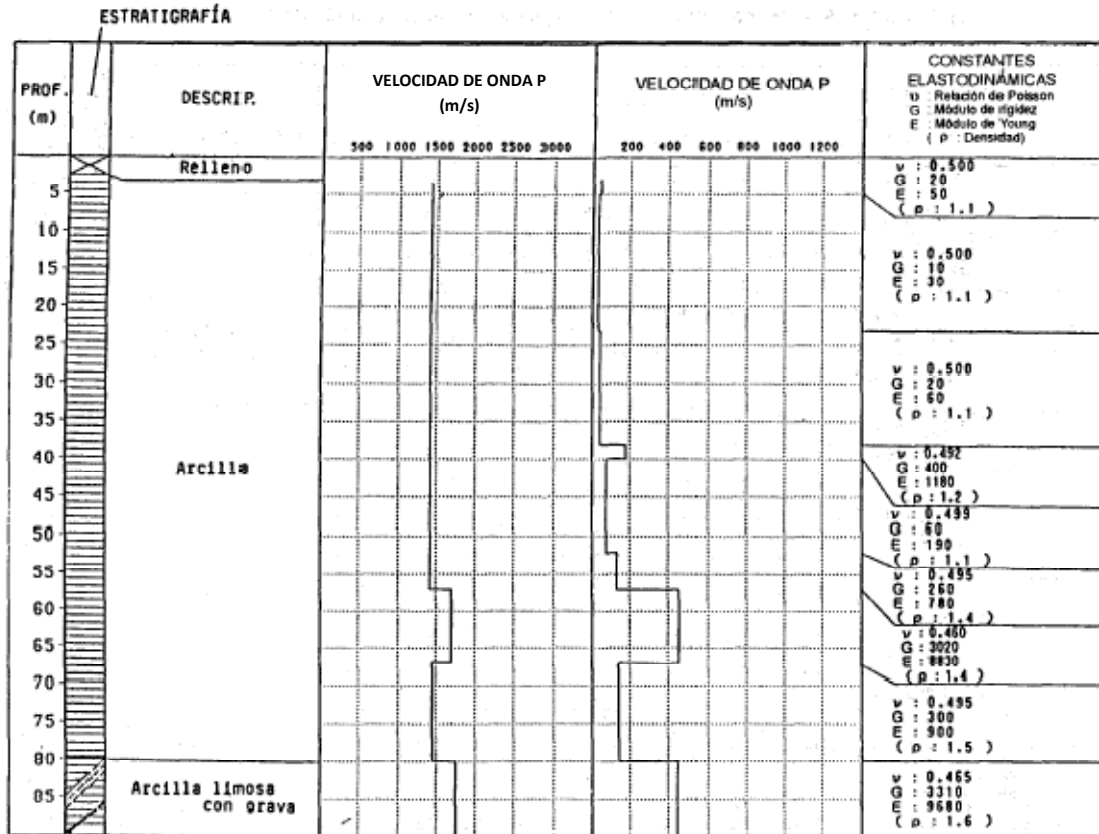
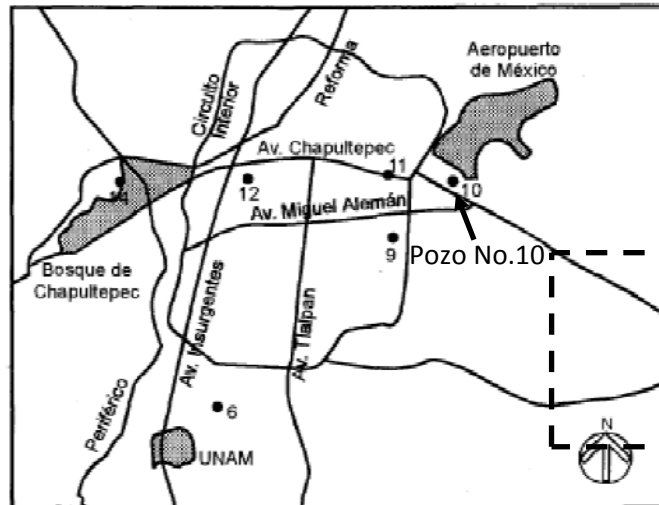


Figura 5.3 Estratigrafía general y perfil de velocidades para el pozo N.10 de la figura 5.4 (tomado de Santoyo, 1996).

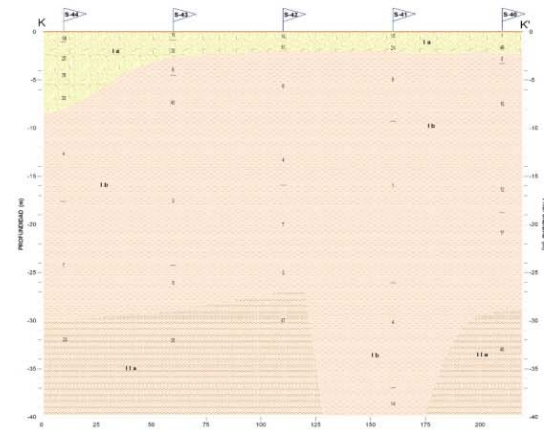
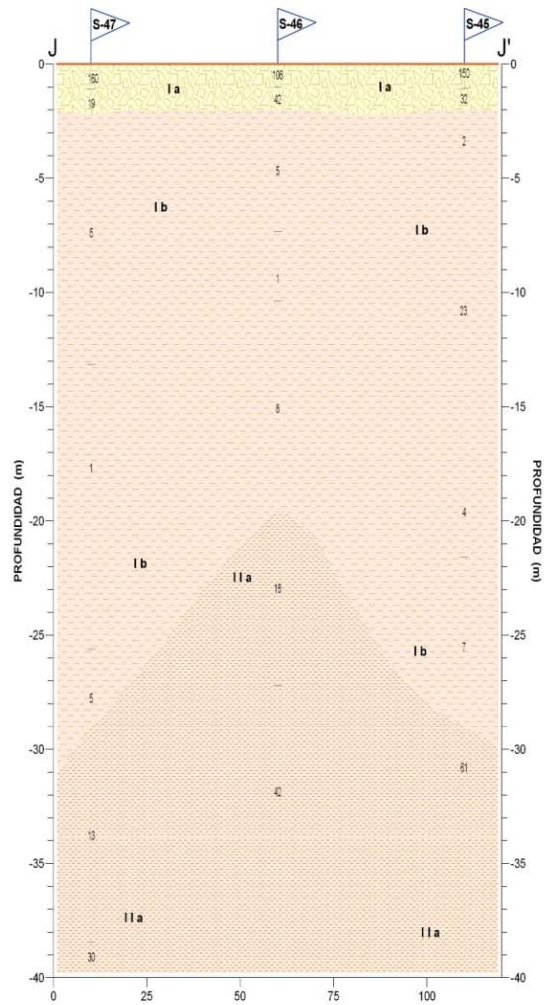




**Figura 5.4 Localización de los pozos (tomado de Santoyo, 1996), el recuadro punteado corresponde a la zona de estudio en este trabajo.**

Por otro lado, entre las estaciones Guelatao y los Reyes, una empresa privada realizó estudios de prospección eléctrica. Esta empresa realizó 13 perfiles, de los cuales se utilizaron 2 en este trabajo. Los perfiles de resistividad eléctrica JJ' y KK' y la leyenda se muestran en las figuras 5.5, y la localización de todos los perfiles de resistividad eléctrica se muestra en el Apéndice E.

Estos perfiles de resistividad muestran una capa superficial de material de relleno con espesor de 3m, al igual que lo muestra el perfil geotécnico. Sin embargo de acuerdo con la nomenclatura mostrada en la figura 5.5, se observa que el rango de resistividades de la unidad Ib es de 2 a 44  $\Omega$  y el rango de resistividades de la arcilla que es de 1 a 100  $\Omega$ . Considerando que la unidad Ib puede ser arcilla entonces los perfiles de resistividad se correlacionan con el perfil geotécnico y con los modelos del método SPAC.



**UNIDADES GEOELECTRICAS**

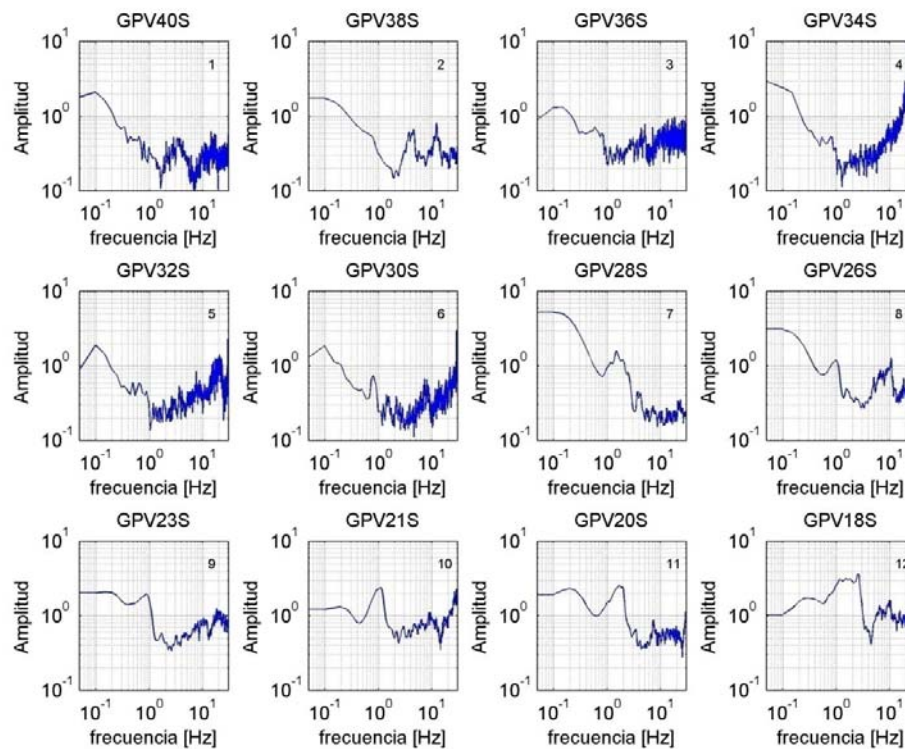
UNIDAD	RESISTIVIDAD (ohm-m)	ESPESOR (m)	LITOLOGIA
I a	2 - 962	1.0 - 8.0	Relleno y material arcilloso y arenoso.
I b	2 - 44	3.5 - 38.0 Indefinido	Material limo arenoso, poco arcilloso.
I c	2 - 94	6.0 - 14.0 Indefinido	Material limo arenoso.
II a	10 - 527	1.2 - 21.0 Indefinido	Limos y arenas de tipo piroclasticas y fragmentos de escorias.
II b	31 - 250	2.0 - 15.0 Indefinido	Intercalaciones de coladas de basaltos y basaltos escoriaceos.
II c	77 - 670	Indefinido	Coladas de basaltos con intercalaciones de horizontes arcillosos y basaltos escoriaceos
II d	94 - 171	Indefinido	Basaltos escoriaceos.

Figura 5.5 perfiles eléctricos tomado de (reporte “Estudio geofísico para evaluar las características dl subsuelo entre las estaciones Guelatao y Los Reyes, de la línea del metro. D.F.)

Por otra parte, para analizar los cocientes espectrales H/V calculados en este trabajo se construyeron 13 perfiles con todos los puntos de observación del ruido sísmico. En el Apéndice F se muestran los cocientes espectrales H/V que corresponden a cada perfil, y la distribución de estos perfiles se muestra en las figuras F1 y F2 del apéndice F.

En las figuras 5.6 a 5.8 se muestran los cocientes espectrales H/V en los puntos del perfil GG'. En ellos se puede observar la variación de la frecuencia fundamental entre 0.2 Hz y 1.2 Hz. El mapa de isoperiodos realizado por Lermo y Chávez-García (1994) para la Ciudad de México, figura 5.9, muestra el periodo de resonancia en la zona de la Avenida Ignacio Zaragoza desde 2 s hasta 4 s, (recuadro negro en la figura 5.9). Sin embargo, es necesario mencionar que en el mapa no hay suficientes puntos de medición para estimar con mayor detalle el periodo resonante en la zona estudiada.

Es evidente que en la zona estudiada en este trabajo la frecuencia de resonancia varía en un amplio rango de frecuencia, de acuerdo con los cocientes espectrales H/V calculados en este trabajo este rango varía desde 0.2 hasta 2.75 Hz, los espectros que muestran estos límites de frecuencias pico se indican en la figura 5.10. las variaciones del pico de resonancia en los cocientes espectrales H/V se debe tanto a variaciones laterales del espesor como de la velocidad de corte de la capa resonante.



**Figura 5.6** Cocientes del perfil GG' de la figura F1. Estas curvas corresponden al inicio del perfil de izquierda a derecha.

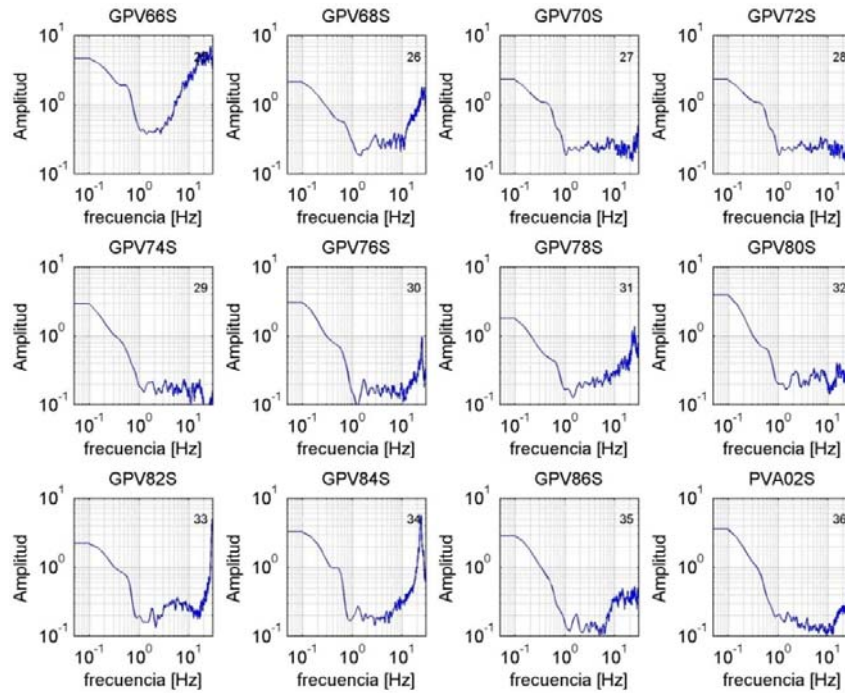


Figura 5.7 Cocientes del perfil GG' de la figura F1. Estas curvas corresponden a la parte intermedia del perfil.

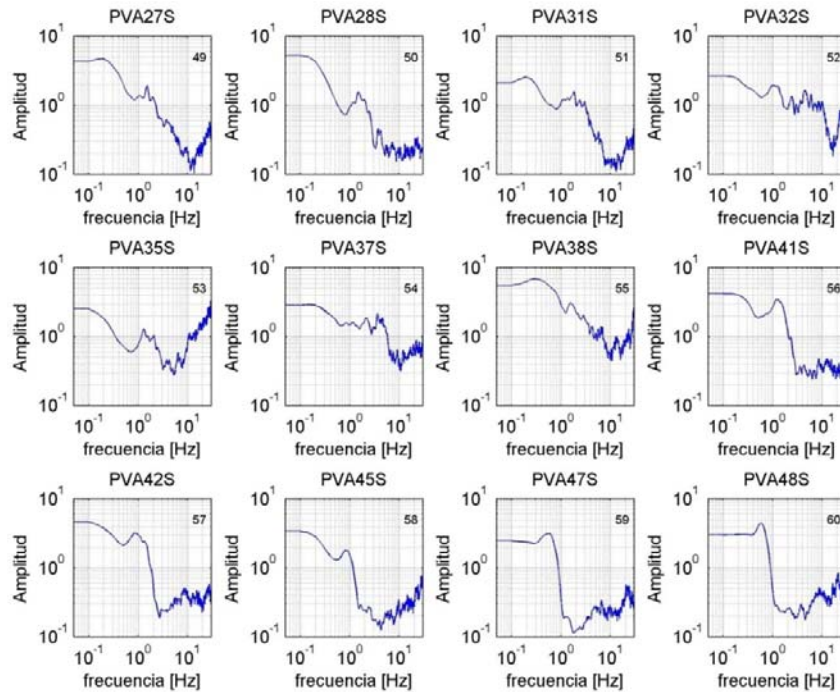
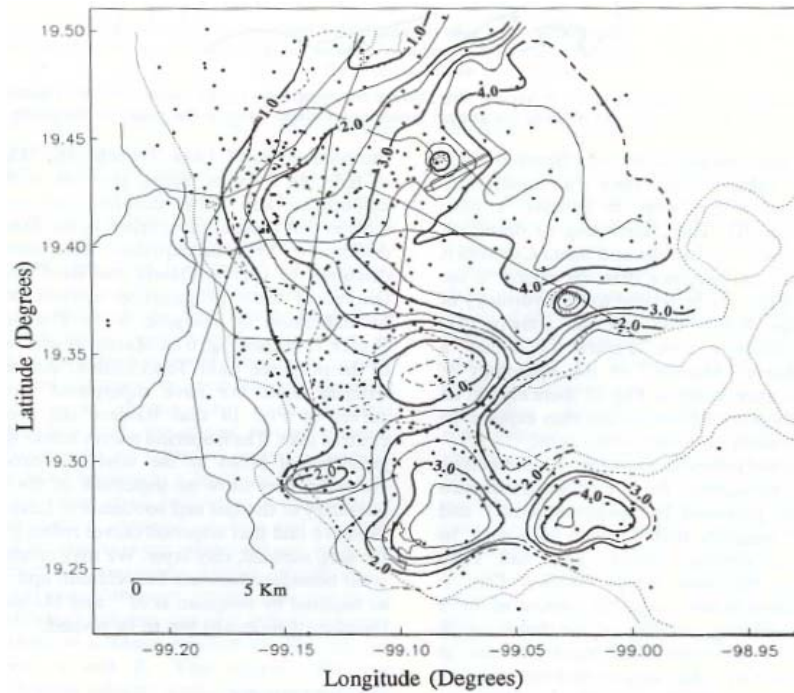
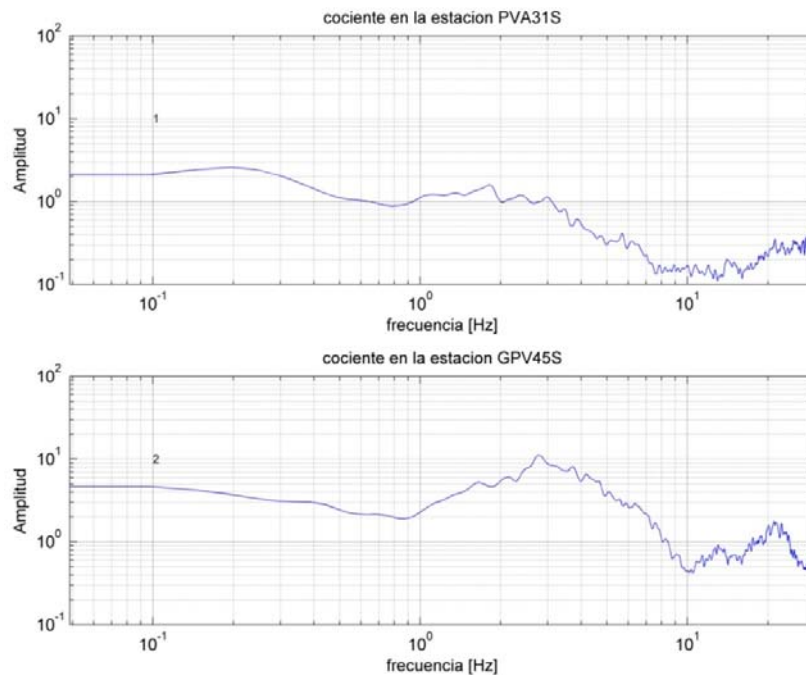


Figura 5.8 Cocientes del perfil GG' de la figura F1. Estas curvas corresponden a la parte final del perfil de izquierda a derecha.



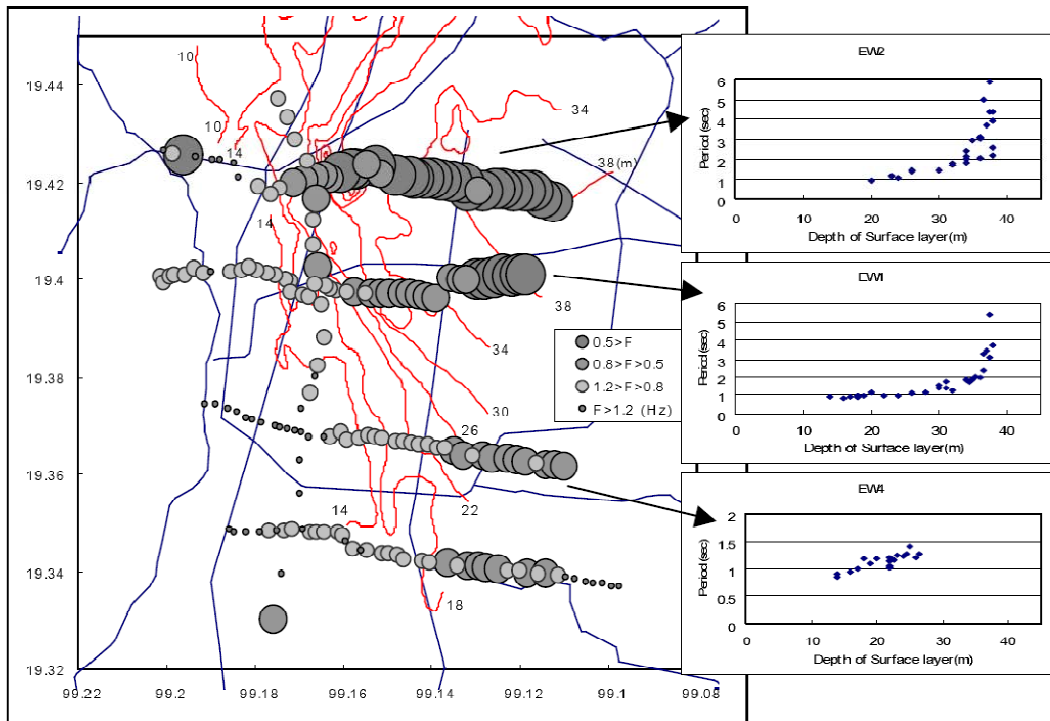
**Figura 5.9** Mapa de periodos dominantes de la Ciudad de México, tomado de Lermo y Chávez-García (1994), el recuadro negro indica la zona de estudio de este trabajo.



**Figura 5.10** Estaciones en donde se observan los límites de la frecuencia fundamental de la zona de estudio.

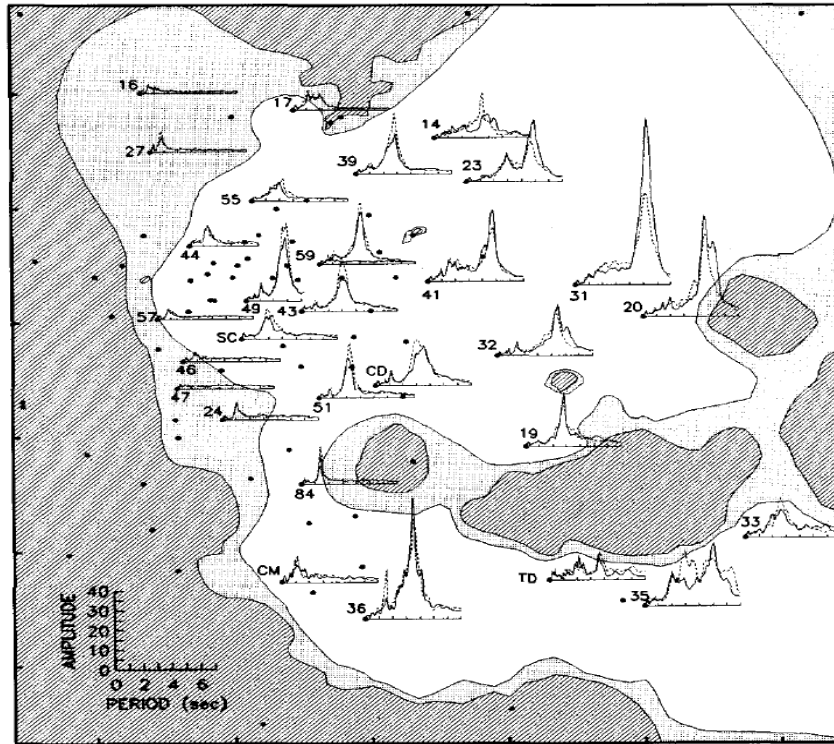
Por otro lado Gurler *et al.* (1999), colocaron 200 estaciones para medir ruido sísmico a lo largo de 4 perfiles que cruzan las zonas de lago, de transición y de lomas en la dirección este-oeste y

uno en la dirección norte-sur. Con los cocientes espectrales de sus estudios calcularon la frecuencia fundamental ( $f$ ) del sitio, el factor de amplificación ( $A$ ) y el índice de vulnerabilidad ( $K_g$ ). De acuerdo con sus resultados observan un rango de frecuencias que va de menos de 0.5 a más de 1.2 Hz. Sin embargo no es posible correlacionar los resultados de los estudios de Gurler con los de esta tesis, ya que el área estudiada por Gurler no abarca la zona que se estudió en esta tesis. La figura 5.11 muestra el área estudiada por Gurler.



**Figura 5.11 Zona de la Ciudad de México estudiada por Gurler *et al.* (1999).**

Singh *et al.* (1988) y Lermo y Chávez-García (1994) realizaron estudios de ruido sísmico en la Ciudad de México usando los cocientes espectrales, pero, los lugares donde realizaron sus estudios están muy apartados de la zona de interés de esta tesis. Sin embargo, Reinoso y Ordaz (1999) midieron el ruido sísmico en varios puntos de la ciudad y muestran que en un punto cercano a la Avenida Ignacio Zaragoza (punto 23 de la figura 5.12) el periodo dominante esta en 5.5 s, es decir 0.18 Hz. Este valor es muy próximo al valor de la frecuencia fundamental del panel superior de la figura 5.10.



**Figura 5.12 Promedio de la relación espectral para algunos lugares representativos de la zona de lago. (Tomado de Reinoso y Ordaz, 1999)**

Por otro lado en algunos Cocientes espectrales H/V no es posible ver el pico resonante esto podría deberse a que la respuesta del instrumento no permite llegar a ver el rango de frecuencias en donde se manifiesta la frecuencia resonante.

Es necesario mencionar que la relación que existe entre la información que proporciona el método SPAC y los cocientes espectrales es que el pico resonante de los cocientes siempre está dentro del intervalo de frecuencias del modo fundamental de la curva de dispersión.

Finalmente, al confrontar los registros obtenidos con los aparatos de medición, Guralp y K2, se observó que en general se tienen prácticamente los mismos cocientes espectrales en un amplio rango de frecuencias (0.1 a 15 Hz). Es importante mencionar que ambos instrumentos de medición no están en el mismo punto, y más importante aun que ambos aparatos se colocaron con diferencia de tiempo de meses, es decir no se colocaron en el mismo instante.

## 6 Conclusiones

El análisis de ruido sísmico empleando el método SPAC proporcionó resultados, en términos de velocidades, que se correlacionan con los estudios del subsuelo del Valle de México realizados por Santoyo (1996).

Los modelos del SPAC de la figura 5.2 son consistentes con el perfil geotécnico, ya que muestran una capa superficial que se engruesa en dirección al poniente y por debajo de ésta se encuentra un material de mayor velocidad. Además, los resultados del SPAC muestran que es posible estimar las zonas de más probabilidad de hundimiento, ya que evidencian la presencia de la arcilla que muestra el perfil geotécnico, asimismo, los valores de resistividad de los perfiles eléctricos muestran la presencia de arcilla.

Por otra parte, los cocientes espectrales H/V muestran que la frecuencia de resonancia varía en un rango de 0.2 a 2.75 Hz. Esto indica que la estructura debajo de la línea del metro tiene variaciones laterales fuertes, tanto en velocidad como en espesor de la capa resonante. La variación de la velocidad en dirección al poniente es evidenciada por los resultados que aportó el método SPAC. También es posible relacionar los resultados del método SPAC con los de los cocientes espectrales H/V de la siguiente manera: Es posible que las fuertes variaciones laterales del estrato resonante causen que no haya correlación entre las trazas de los arreglos SPAC mayores a 100 m.

Los resultados de los métodos de ruido sísmicos han mostrado que son de gran utilidad para estimar la estructura de velocidades del subsuelo. Estos resultados son valiosos porque ayudan a la planificación de la ruta que debe seguirse en la construcción de una obra civil, como las líneas del metro.

Finalmente, se recomienda realizar más arreglos SPAC en ambos lados y a lo largo de la Avenida Ignacio Zaragoza. Con estos arreglos es posible obtener una imagen tridimensional de las velocidades del subsuelo debajo de la línea del metro, y así estimar la distribución espacial de las zonas de más probabilidad de hundimiento. De esta forma se apoyaría a los estudios geotécnicos. En lo que se refiere a los cocientes espectrales H/V, si se requiere entender cuál es la relación entre la frecuencia fundamental y la velocidad en un estrato con variaciones laterales fuertes, tanto de velocidad de ondas de corte como de espesor, es necesario realizar simulaciones numéricas en las cuales se consideren dichas variaciones laterales. Además es necesario realizar estudios de ruido sísmico y geofísicos antes de iniciar la construcción de las obras civiles.



## Referencias

- Akai, H., y K. Tokimatsu., (2004), "S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum", *Bull. Seis. Soc. Am.* 94, 53-63.
- Aki, k. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.* 35, 415–456.
- Ansary, M.A., M. Fuse, F. Yamazaki y T. Katayama, (1995). Use of microtremors for the estimation of ground vibration characteristics, third international conference on recent advances in geotechnical engineering and soil dynamics, saint-louis, usa, 2, 571-574.
- Aubinet, G. E, Méndez. M. Juárez. (2006), Investigación, caracterización análisis y predicción del comportamiento (fenómeno de asentamientos diferenciales) del subsuelo del apoyo del cajón definición de alternativas de solución y supervisión del proyecto ejecutivo en el tramo guelatao-los reyes de la línea a del metro, Instituto de Ingeniería UNAM, proyecto interno 7502.
- Bard, P-Y. (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?, the effects of surface geology on seismic motion, 2, 1252-1279.
- Benigno, S. (2006). Estudio geofísico para evaluar las características del subsuelo entre las estaciones Guelatao y Los Reyes de la Línea A del metro, Benigno Ingeniería y Geociencias S.A. de C.V.
- Bonnefoy-Claudet, C. Cornous., P. Y. Bard., F. Cotton., P. Moczo., J. Kristek, y D. Fäh., (2006), "H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Result from 1-D noise simulation", *Geophys. J. Int.* 167, 827-837.
- Bonnefoy-Claudet, S, A., Köhler, C., Cornous, M., Wathelet , y P. Y. Bard. (2008) "Effets of Love Wave on Microtremor H/V Ratio", *Bull. Seis. Soc. Am.* 98, 288-300.
- Chávez-García, F., M. Rodríguez. y R. Stephenson. (2006). Subsoil structure using SPAC measurement along a line, *Bull. Seis. Soc. Am.* 96, 729-736.
- Field, E.H., y K. Jacob (1993). The theoretical response of sedimentary layer to ambient seismic noise, *geophysical Res. Letter.* 20-24, 2925-2928.
- Field, E.H., S.E. Hough y K. H. Jacob. (1990). Using microtremor to assess potential earthquake site response: a case study in flushing meadows, New York City, *Bull. Seis. Soc. Am.* 80, 1456-1480.
- Gurler, D., Nakamura. Y., Saita. J. y Sato. T. (1999). Local effect of cytibased on microtremor measurement, System and Data Research Co., Ltd., 3-25-3 Fujimidai, Kunitachi-shi, Tokyo 186-0003, Japan.
- Horike, M. (1996). Geophysical exploration using microtremor measurement, Xth World Conf. Earthq. Engng., Acapulco, #2033, elsevier sciencie ltd.

- Hough, S.E., E.H. Field y K.H. Jacob. (1991). Using microtremor to assess site –specific earthquake hazard, *Proceeding of the Fourth International Conference on Seismic Zonation*, Standford, C, August 25-29, 1991,3,385-592.
- Kono, K., y Ohmachi. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88-1, 228-241.
- Lachet, C., y P-Y. Bard, (1994). Numerical and theoretical investigation on the possibilities and limitations of the “Nakamura’s” technique, *Journal of Physics of the Earth.* 452, 377-397.
- Lermo, J., M. Rodriguez y S.K. Singh. (1988). Natural period of site in the valley of Mexico from microtremor measurement and strong motion data, *Earthquake Spectra.* 4-4, 805-814.
- Lermo, J. y Chávez-García, F. (1994). Site effect evaluation at Mexico City: Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor record, *elsevier, soil dynamics and earthquake engineering.* 13, 413-423.
- Marsal, R. J., Hiriart. F., y Sandoval R. (1951). Hundimiento de la Ciudad de México, *observaciones y estudios analíticos.* ICA. 6, 25.
- Nogoshi, M. y T. Igarashi. (1971). On the amplitude characteristics of microtremors (Part 2), *Jour. Seis. Soc. Japan,* 24, 26-40.
- Parolai, S y J. J. Galiana-Merino. (2006), “Effect of Transient Seismic Noise on Estimates of H/V Spectral Ratios”, *Bull. Seis. Soc. Am.* 96, 228-236.
- Prakash, O., Zhao. Dapeng. y D. Datta. (2005). Surfase-wave studies beneath the Pacific ocean, *Bull. Seis. Soc. Am.* 95, 251 – 261.
- Reinoso, E. y M. Ordaz. (1999). Spectral ratios for Mexico City from free-Field recording, *Earthquake Spectra.* 15-2,273-295.
- Rodríguez, M. Hernández-Cruz. F. Cuenca-Sánchez. J. (2009). “mediciones de velocidad de cortante en tres sitios del trazo de la Línea 12 del metro de la Ciudad de México”, *SMIS memorias técnicas XVII Tema* 1-16.
- Santoyo, M. (1996), *Estudio del subsuelo en el valle de México*, cuadernillo de investigación, CENAPRED, 34, 91.
- Santoyo, E., Ovando. E. Mooser. F.y León. E. (2005). *Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México*, TGC geotecnia S.A. de C.V.170.
- Satoh, T., H. Kawase., S. I. Matsushima. (2001), “Estimation of S-Wave Velocity Structures in and around the Sendai Basin, Japan, Using Array Record of Microtremors”, *Bull. Seis. Soc. Am.* 91, 2, 206-218.
- Seo, K. (1998). A joint microtremor measurement Fukuai basin to discuss the effect of surface geology on seismic motion during the 1948 Fukui, Japan, earthquake, *proceeding of the Xth European Conference on Earthquake* 6-11. Bisch, Labbé y Pecker Editor, Balkema 1998.

Singh, K., J. Lermo., T. Dominguez., M. Ordaz. M. Espinosa., E. Mena., y R. Quaas. (1988). The Mexican earthquake of September 19, 1985-a study of amplification of seismic wave in the Valle of Mexico with respect to a hill zone, *Earthquake Spectra*, 4, 653-673.

Tokimatsu, K. H. Arai, y Y. Asaka. (1996). Three dimensional soil profiling In Kobe area using microtremor". *Xth Wold Conf. Earthq. Engng*, Acapulco, # 1486, Elsevier Science Ltd.

## APÉNDICE A

### Estado del arte H/V y arreglos de microtremores SPAC.

#### *Cocientes espectrales H/V.*

Hasta el año de 1999 el método de cocientes espectrales había sido utilizado únicamente para determinar la frecuencia de resonancia del sitio, sin embargo, en esta década el método de los cocientes espectrales ha evolucionado de tal forma que es posible obtener más información del subsuelo.

Bard (1999) realizó un estado del arte sobre los cocientes espectrales. En su estudio muestra ampliamente la interpretación que dan diversos autores a los cocientes espectrales, así como las bases teóricas que consideran cada uno de estos autores.

Por otro lado, estudios de esta década como el de Arai y Tokimatsu (2004), propusieron un método para estimar el perfil de velocidades de cortante en el sitio. Obtuvieron la expresión teórica de la relación espectral H/V de las ondas superficiales en una capa sobre un semiespacio, en el cual consideraron el modo fundamental y los modos altos. Con la fórmula teórica del cociente espectral realizaron una inversión del cociente espectral observado de los registros de ruido sísmico.

Arai y Tokimatsu calcularon el cociente espectral H/V teórico de las ondas superficiales de Love y de Rayleigh. Al comparar el cociente teórico con la relación espectral de las ondas de Rayleigh y con el cociente espectral del ruido sísmico observaron que: La forma del nodo fundamental del cociente teórico y el cociente del ruido sísmico es similar. El modo fundamental del cociente de las ondas de Rayleigh es similar en forma, pero de mayor amplitud al cociente espectral del ruido.

La inversión del método que proponen Akai y Tokimatsu consiste en calcular el cociente teórico debido a un modelo inicial. Mediante el método de mínimos cuadrados no lineal generalizado resuelven la ecuación de mínimos cuadrados para diferentes frecuencias del cociente teórico y del observado.

El método que proponen Akai y Tokimatsu lo aplicaron en 6 sitios de Tokio. Los resultados que obtuvieron los compararon con registros de borehole en los cuales obtienen un buen ajuste.

Parolai y Galiana-Merino (2006), mostraron que los transitorios no alteran el valor del cociente espectral H/V. Compararon los cocientes de ruido estacionario con cocientes calculados sin ruido estacionario. También calcularon mediante el método de la transformada wavelet la relación espectral de una señal transitoria, en la cual se observa una variación importante en el cociente la cual es debida al tipo de fuente.

Bonnefoy-Claudet *et al.* (2006) realizaron pruebas numéricas de ruido sísmico bajo condiciones controladas de tipo, distribución de fuente y estructura. Las pruebas numéricas las realizaron sobre modelos unidimensionales de una capa sobre un semiespacio. Los parámetros que definen al estrato son: 25 m de espesor, factor de calidad de  $Q_p=50$ ,  $Q_s=25$ , velocidades  $V_p=1350$  m/s y  $V_s=200$  m/s; y para el semiespacio  $V_p=2000$  m/s,  $V_s=1000$  m/s,  $Q_p=25$ ,  $Q_s=50$ . Las fuentes las

ubicaron en cuatro grupos, el primer grupo lo ubicaron a menos de 500 m de distancia alrededor del punto de medición, el segundo grupo a distancias entre 500 y 750 m, el tercer grupo entre 750 y 1250 m y el último grupo a más de 1250 m. Estas fuentes las colocaron a profundidades de 2, 14 y 22 m dentro del estrato, y en el semiespacio en 30 y 60 m de profundidad. También simularon otros dos modelos con los mismos parámetros que el modelo mencionado arriba, pero, para uno con factores de calidad igual a 1000 y en el semiespacio de 10, en el segundo modelo el factor de calidad de la capa igual a 10 y el semiespacio sin atenuación.

De acuerdo con los resultados de sus experimentos observaron que: Cuando las fuentes están en el basamento, el pico de la relación espectral se debe a la resonancia de la onda S de cabecera. Cuando las fuentes están dentro de la capa y muy lejanas al punto de medición, la relación espectral muestra dos picos, de los cuales el primero se debe al modo fundamental de las ondas de Rayleigh, y a la resonancia de la onda S de cabecera; y el segundo es debido únicamente a la onda de cabecera. Finalmente si las fuentes están dentro de la capa sedimentaria y muy cerca al punto de medición la relación espectral muestra un pico que se debe al modo fundamental de la onda de Rayleigh.

Bonnefoy-Claudet *et al.* (2008) investigaron la naturaleza del ruido sísmico para confirmar la confiabilidad de los cocientes espectrales. Simularon ruido sísmico con la función de Green para una capa viscoelástica y un medio espacio en 1D. El ruido sísmico simulado lo analizaron con el método CVFK y el método MSPAC (SPAC modificado), en la componente horizontal y vertical para estimar la contribución de las ondas de cuerpo (P y S) y las ondas superficiales en el cociente espectral H/V. Mostraron que la proporción relativa de las diferentes ondas depende de las condiciones del sitio principalmente del contraste de impedancias. Mostraron que la proporción de las ondas de Love controlan la amplitud del pico del cociente H/V.

Las simulaciones muestran que para contrastes de impedancia mayores a 4 el ruido sísmico está principalmente compuesto por el modo fundamental de las ondas de Love y de Rayleigh. Para contrastes de impedancia entre 3 y 4 predomina el modo fundamental de Love, y el modo fundamental de la onda de Rayleigh existe pero no es predominante. En contrastes de impedancia menores a 3 predominan el modo fundamental de la onda de Love y la onda S, y el modo de la onda de Rayleigh contribuye muy poco.

Las simulaciones también muestran que la orientación de la fuente tiene mucha influencia en la amplitud del pico resonante. Al generar un campo de ruido sísmico con fuentes orientadas vertical o radialmente se observa un pico de amplitud mucho menor que cuando se simula el ruido con fuentes orientadas aleatoriamente con lo que se muestra que las fuentes aleatorias enfatizan la contribución de las ondas de Love.

#### *Arreglos de microtremores.*

Satoh *et al.* (2001), Utilizaron el método SPAC y el método espectral ( $f-k$ ) para estimar la estructura de velocidades de la cuenca de Sendai en Japón. Utilizaron 6 redes de estaciones dentro y fuera de la cuenca para registrar ruido sísmico. Los métodos de ruido sísmico que emplearon no solo les permitieron estimar la estructura sobre el basamento pre-terciario, sino también la parte superior justo debajo de la capa pliocénica. Además de que estos métodos mapear estructuras geológicas que no habían sido mapeadas antes, y de que es la primera vez que la cuenca Sendai es estudiada con ruido sísmico.

Chávez-García *et al.* (2006) proponen un arreglo de estaciones lineal para aplicar el método SPAC. Con el arreglo lineal mostraron que este tiene ventajas sobre el arreglo circular, ya que no es necesario que las estaciones estén sincronizadas y es muy rápido obtener resultados e un gran número de estaciones cercanas entre sí. La curva de dispersión de velocidad de fase que obtuvieron la compararon con resultados de estudios previos en la cuenca sedimentaria de parkway, Wainuyomata. A partir de los resultados sugieren que el método SPAC es más general que lo que muestran las publicaciones anteriores.

Claprod y Asten (2010) instalaron arreglos de microtremores SPAC en tres sitios de Landseton, Australia (KPK, DBL y RGB). Usaron un arreglo triangular, uno hexagonal y uno lineal con dos sensores en cada sitio. Con la finalidad de estudiar el efecto del número de sensores, el tiempo de duración del registro y el intervalo de frecuencia al evaluar el modelo de velocidad de onda de cortante.

En cada arreglo calculó la raíz cuadrática media de la parte imaginaria rugosa de la coherencia espectral (COHs), que expresa la coherencia observada del ruido estadístico. La parte imaginaria suavizada da una indicación de la distribución del campo de ruido sísmico. El promedio cuadrático del residual entre el observado y el teórico es un indicador del nivel de confiabilidad de modelo de velocidades. El valor del promedio cuadrático en el par de sensores en diferentes orientaciones proporciona una indicación de la distribución del azimut del campo de ondas de ruido sísmico y provee una dirección de la procedencia del campo cuando se usa un limitado número de sensores en los arreglos SPAC.

El COHs observado en KPK muestra la importancia de medir mucho tiempo de ruido sísmico porque incrementa la COHs. El incremento del nivel estadístico de ruido cuando incrementa la frecuencia en el sitio DBL sugiere que el método SPAC puede ser usado con dos sensores al restringir el límite superior de la frecuencia al mínimo de la COHs. Las observaciones del método SPAC en el sitio RGB dan señales de la capacidad del SPAC para calcular el modelo de velocidades en acimuts limitados del campo de ruido sísmico.

## APÉNDICE B

Las especificaciones del equipo de adquisición de datos utilizado en este trabajo son:

Los acelerómetros K2 Altus de Kinometrics (figura B1) tienen rango de respuesta plana de 0.005 a 80 Hz, rango dinámico >114 dB a 200 muestras por segundo (mps), nivel de resolución de 19 bits y rango de escala completo de 1g (+/- 2.5V), también cuenta con tres sensores internos con respuesta plana hasta 200Hz y rango dinámico 145 dB, rango de escala completo de +/- 0.25g, +/-0.5g, +/-1g, +/-2g ó +/-4g.



**Figura B1 K2 Altus de Kinometrics.**

Los sismómetros kinometrics V1 son aparatos electromecánicos y tiene periodo natural de 5s.

Los sismómetro Guralp CMG-40T (figura B2) cuentan con tres sensores internos, tiene un rango dinámico > 145 dB, respuesta plana de 0.033 Hz, 0.005 Hz ó 0.1 Hz a 50 Hz.



**Figura B2 Guralp CGM-40T.**

# APÉNDICE C

Coeficientes de correlación del presente estudio.

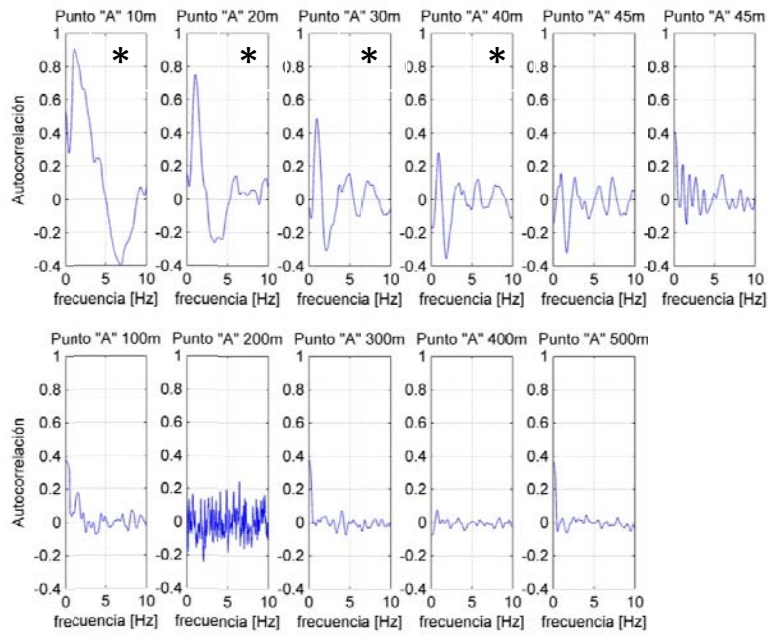


Figura C1 Coeficientes de autocorrelación en el punto "A". Los coeficientes marcados con asteriscos se tomaron para calcular la curva de dispersión observada.

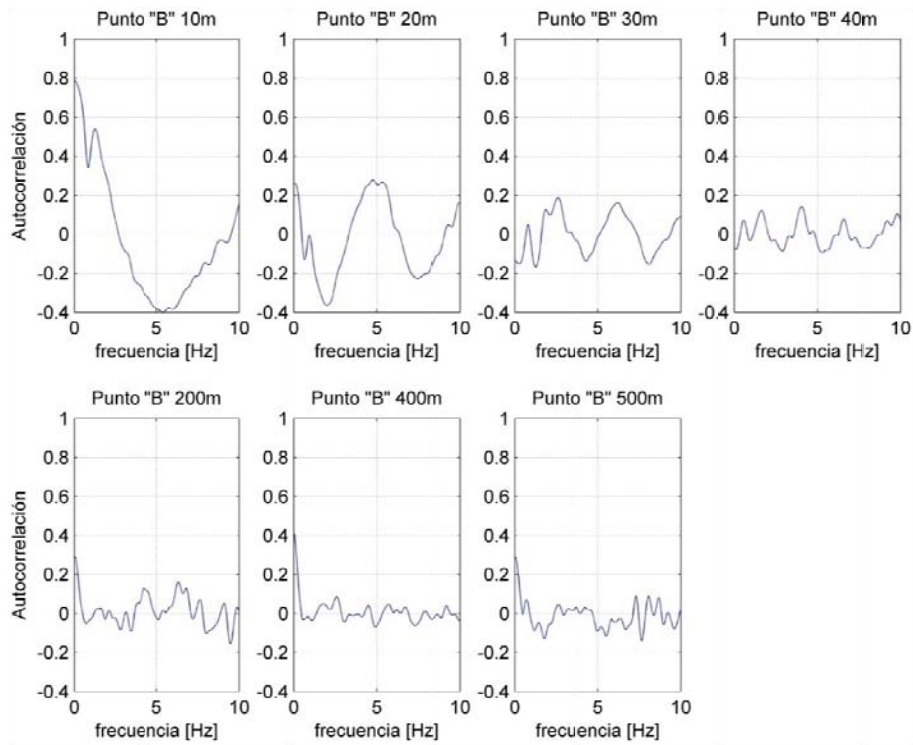
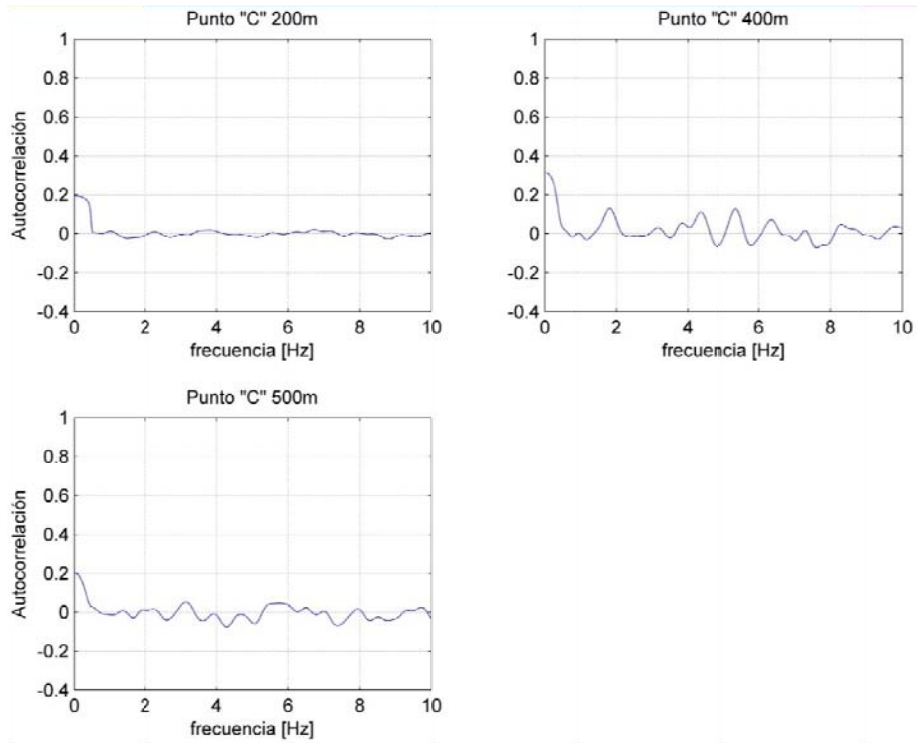
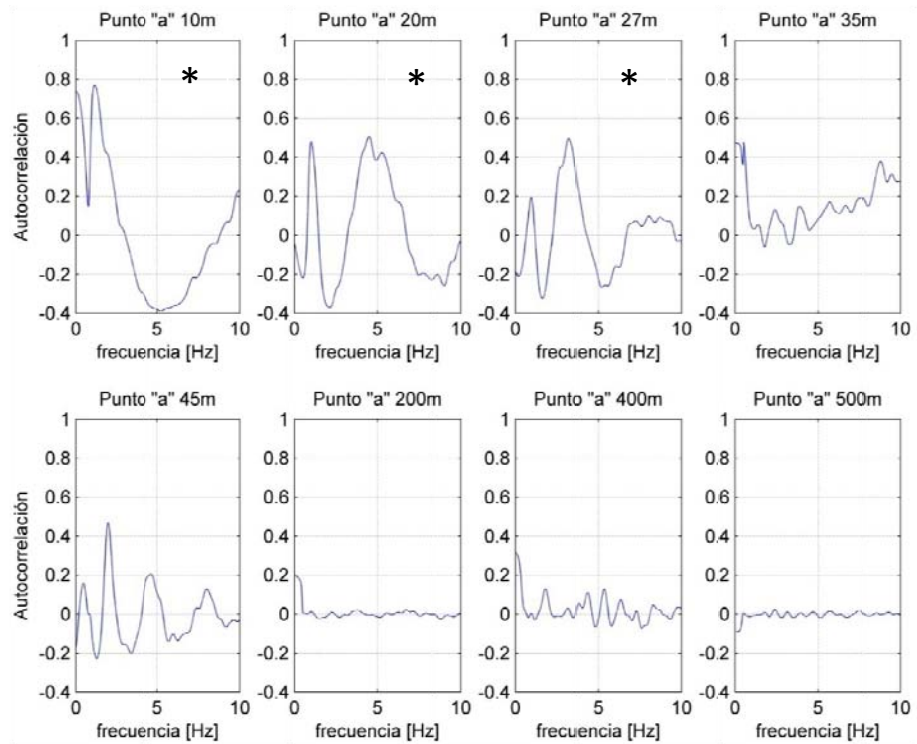


Figura C2 Coeficientes de autocorrelación en el punto "B".

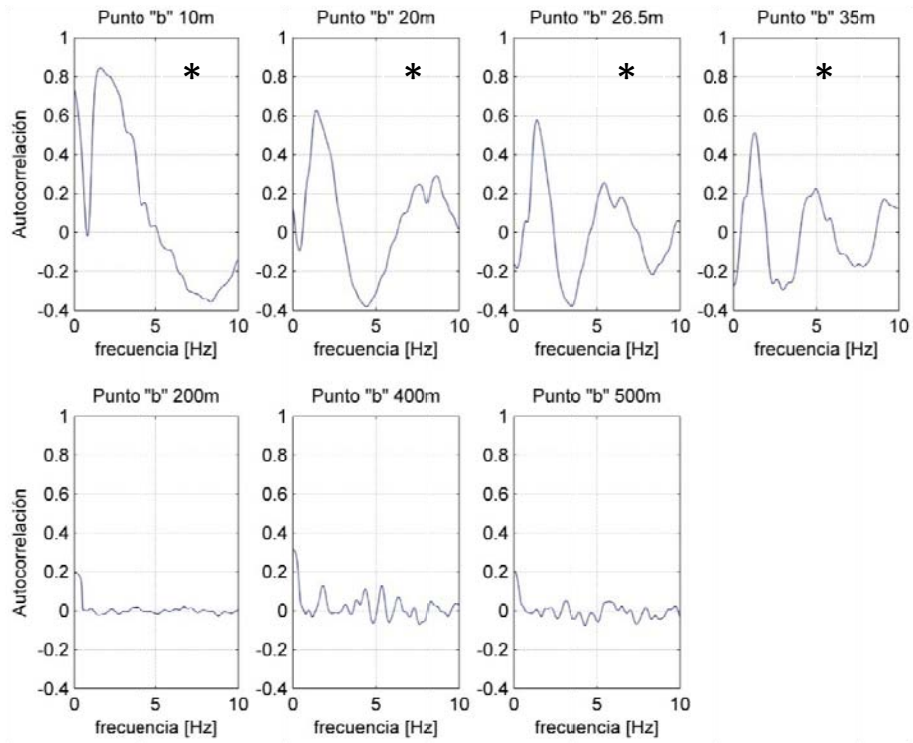




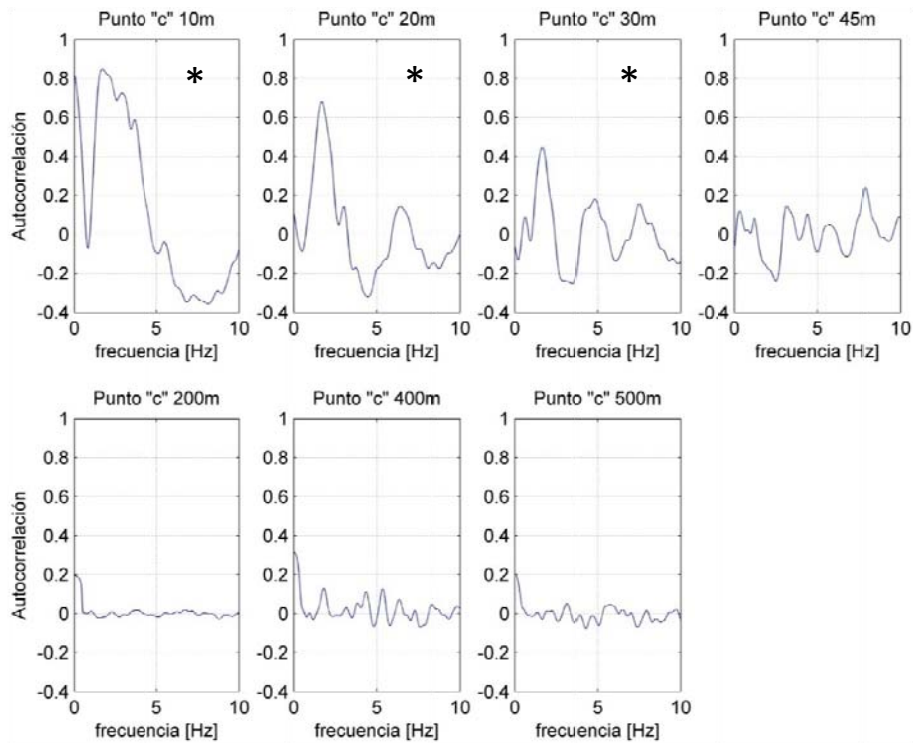
**Figura C3 Coeficientes de autocorrelación en el punto "C".**



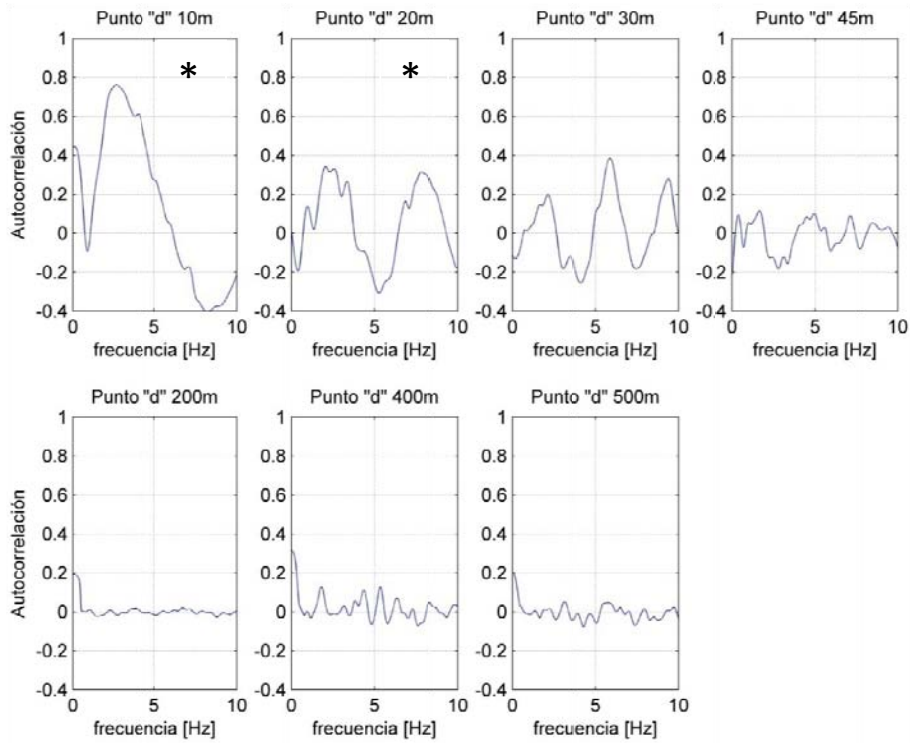
**Figura C4 Coeficientes de autocorrelación en el punto "a". Los paneles marcados con asteriscos se tomaron para calcular la curva de dispersión observada.**



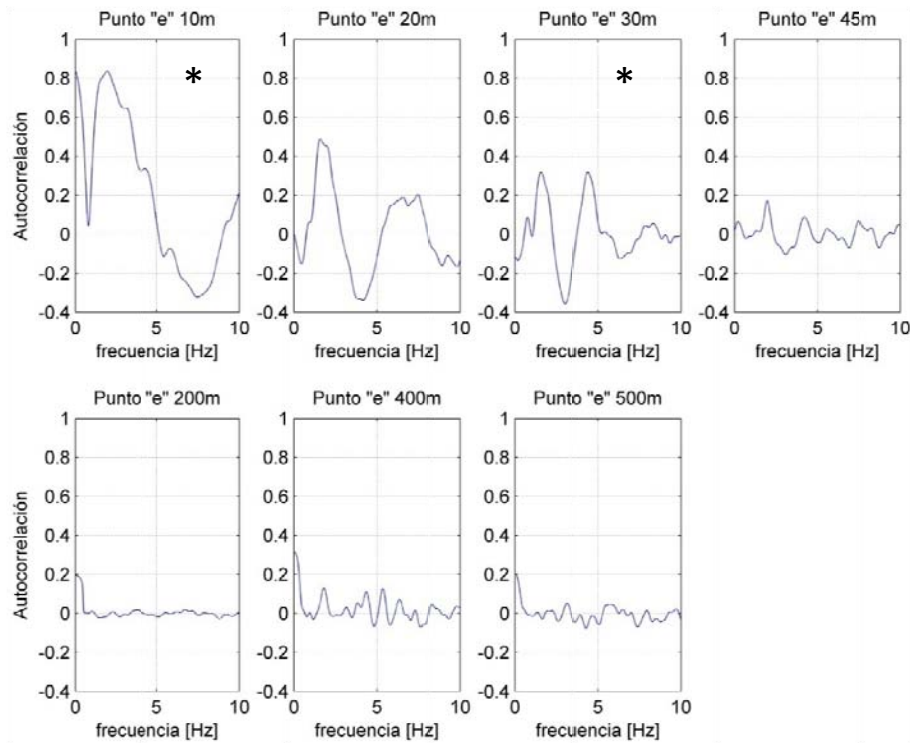
**Figura C5** Coeficientes de autocorrelación en el punto "b". Los paneles marcados con asteriscos se tomaron para calcular la curva de dispersión observada.



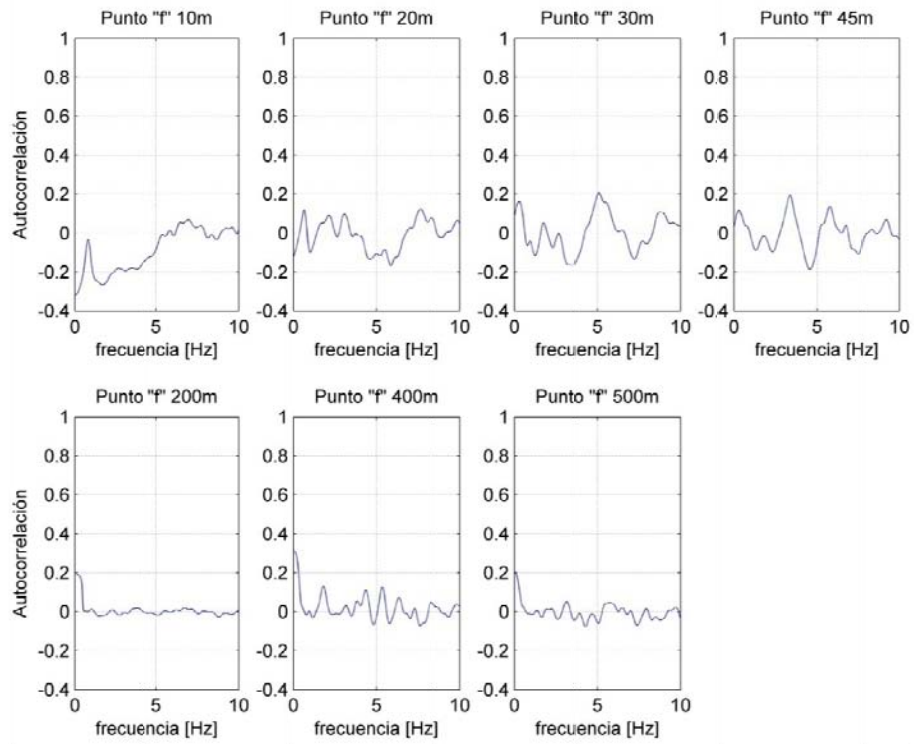
**Figura C6** Coeficientes de autocorrelación en el punto "c". Los paneles marcados con asteriscos se tomaron para calcular la curva de dispersión observada.



**Figura C7** Coeficientes de autocorrelación en el punto "d". Los paneles marcados con asteriscos se tomaron para calcular la curva de dispersión observada.



**Figura C8** Coeficientes de autocorrelación en el punto "e". Los paneles marcados con asteriscos se tomaron para calcular la curva de dispersión observada.



**Figura C9** Coeficientes de autocorrelación en el punto "f".

## APÉNDICE D



Figura D1. Localización de los sondeos de pozo entre las estaciones Gualatao y Peñón Viejo.



Figura D2. Localización de los sondeos de pozo entre las estaciones Peñón Viejo y Acatitla.



Figura D3. Localización de los sondeos de pozo entre las estaciones Santa Marta y Los Reyes.

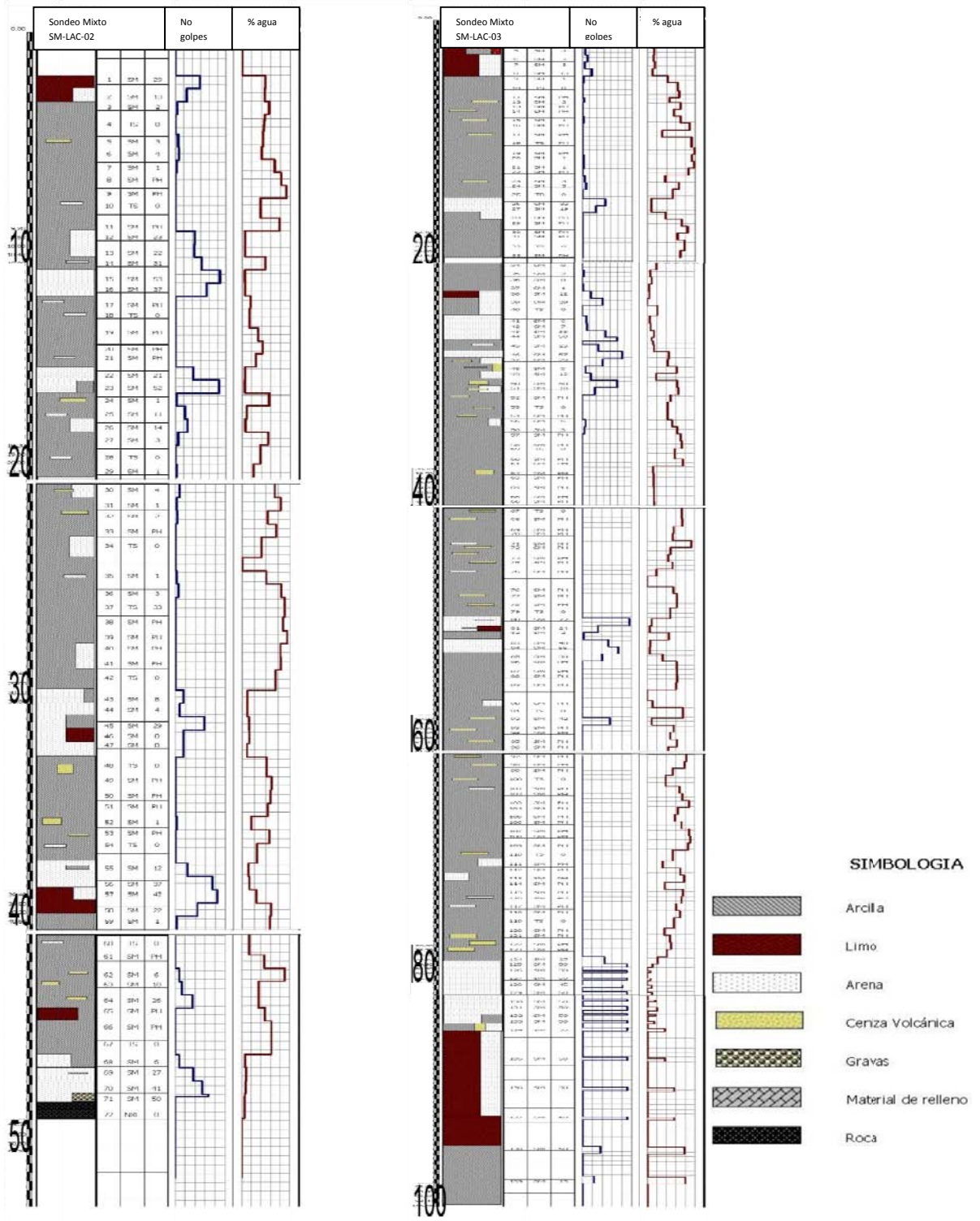


Figura D4 sondeos de pozo SM-LAC-02 y SM-LAC-03.

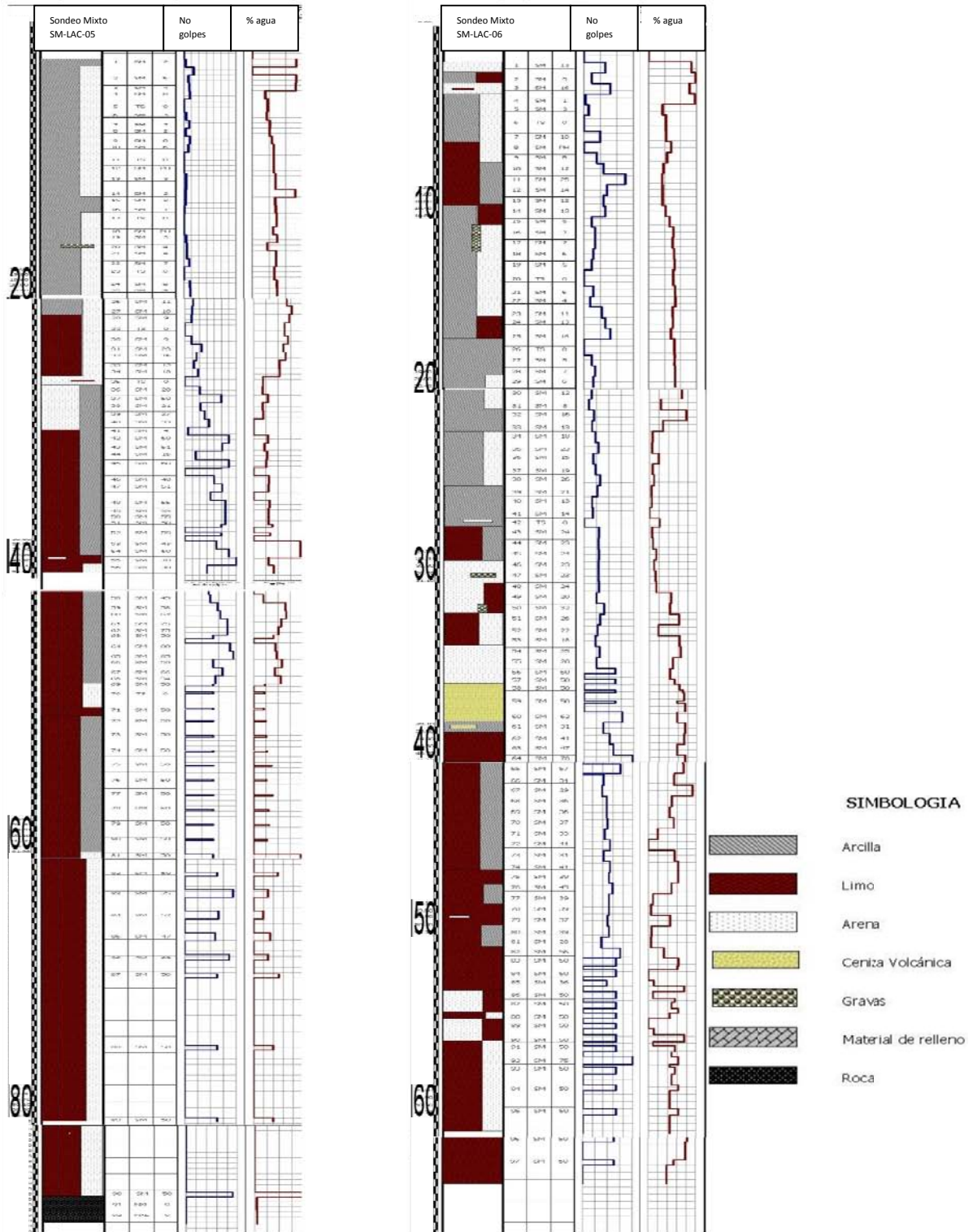


Figura D5 sondeos de pozo SM-LAC-05 y SM-LAC-06.



## Apéndice E



Figura E1 Localización de los perfiles eléctricos verticales.

## APÉNDICE F

En las figuras F1 y F2 se muestra la localización de los perfiles que se definieron con las estaciones para medir el ruido sísmico. En las figuras F3 a F30 se muestran los cocientes espectrales H/V ordenados por perfiles. La figura F31 muestra el mapa del área de trabajo dividido en zonas, las cuales se muestrea a detalle de la figura F32 a la figura F44 con la localización de los punto de medición.

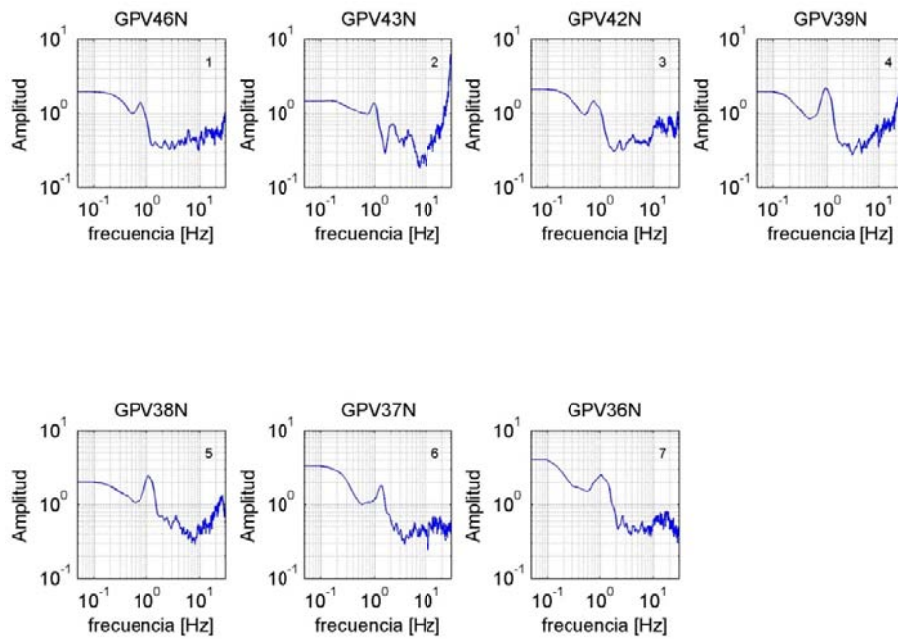


**Figura F1** Perfiles definidos entre las estaciones Gualatao y Acatitla de la Línea A del metros, los perfiles se definieron de izquierda a derecha. El área de trabajo corresponde al área del recuadro con línea punteada de la figura 4.1.



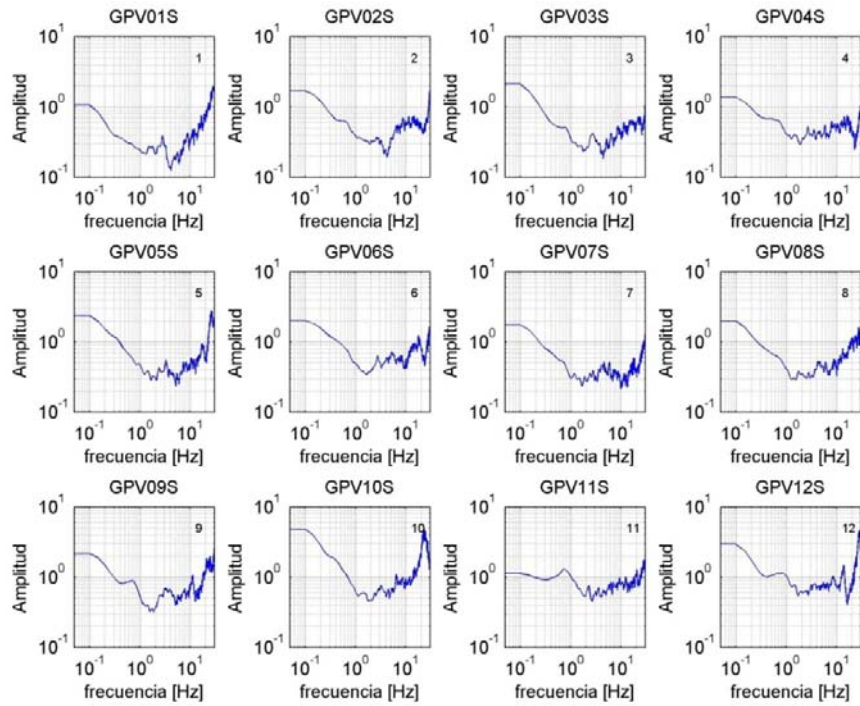
**Figura F2** Perfiles definidos entre las estaciones Acatitla y Los Reyes de la Línea del metro, los perfiles están definidos de izquierda a derecha. El área ilustrada corresponde al área enmarcada con el cuadro de línea discontinua de la figura 4.1.

Perfil AA'

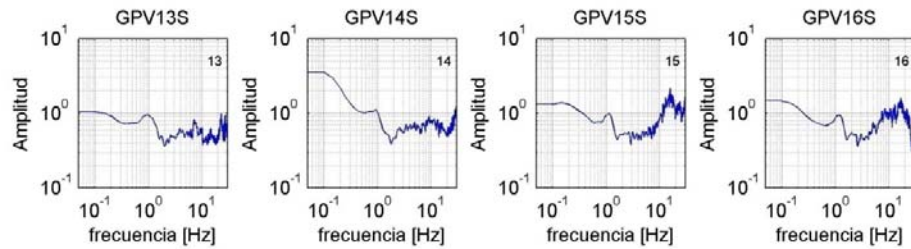


**Figura F3** Cocientes espectrales del perfil AA'.

### Perfil BB'



**Figura F4 Cocientes espectrales del Perfil BB'**



**Figura F5 Cocientes espectrales del Perfil BB'**

Perfil CC'

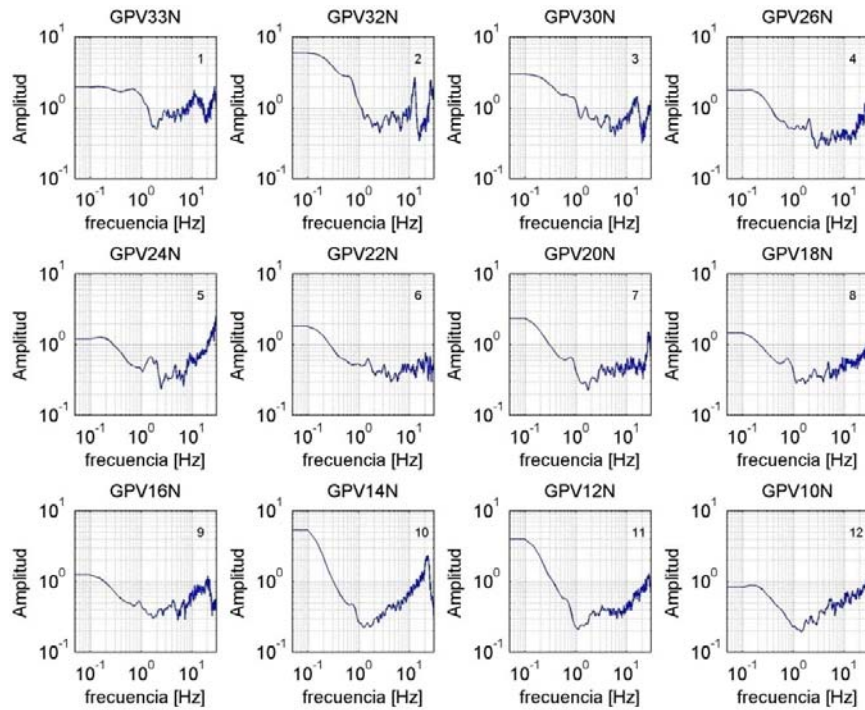


Figura F6 Cocientes espectrales del Perfil CC'.

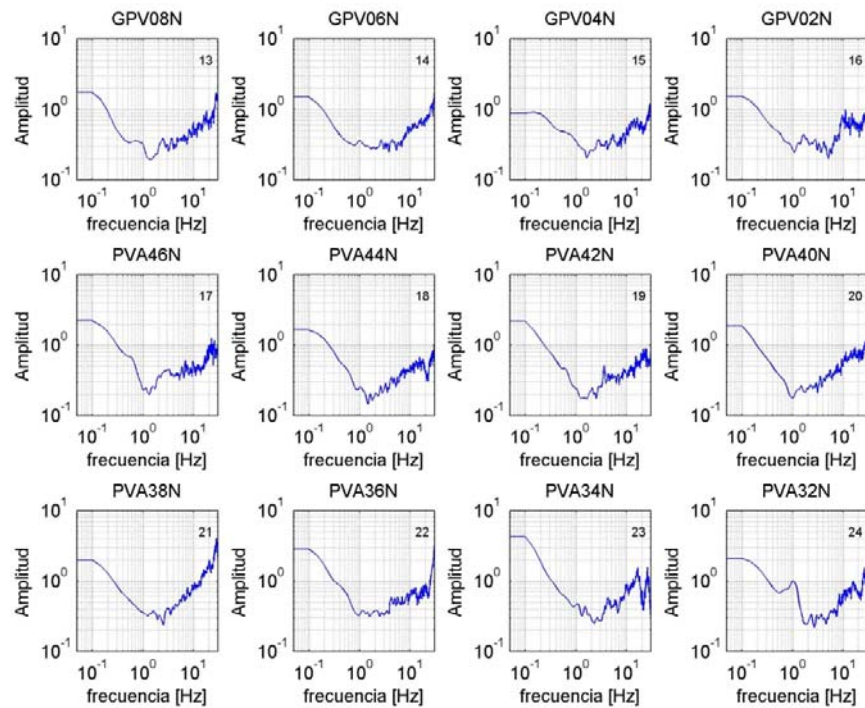
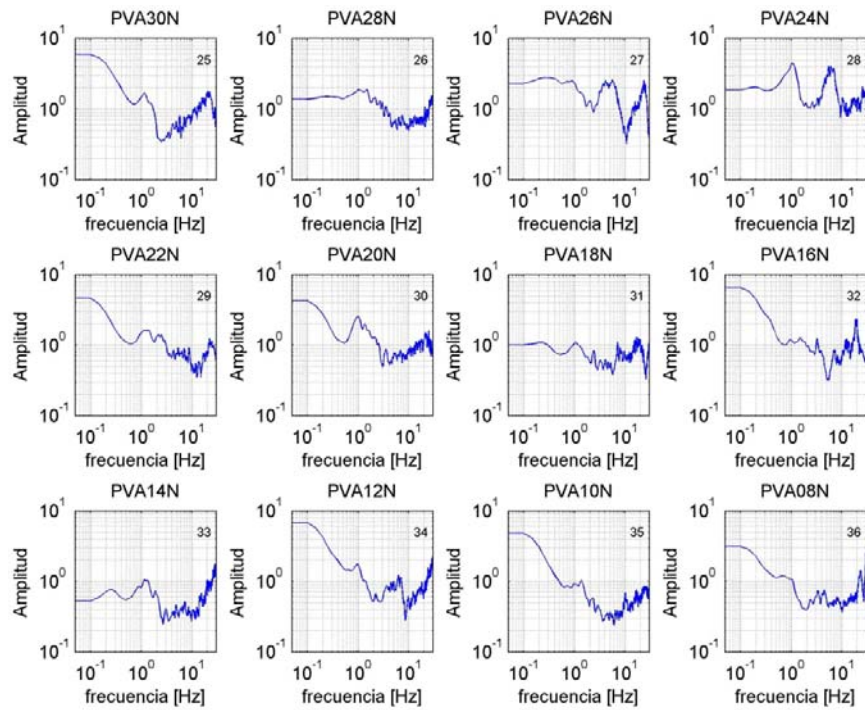
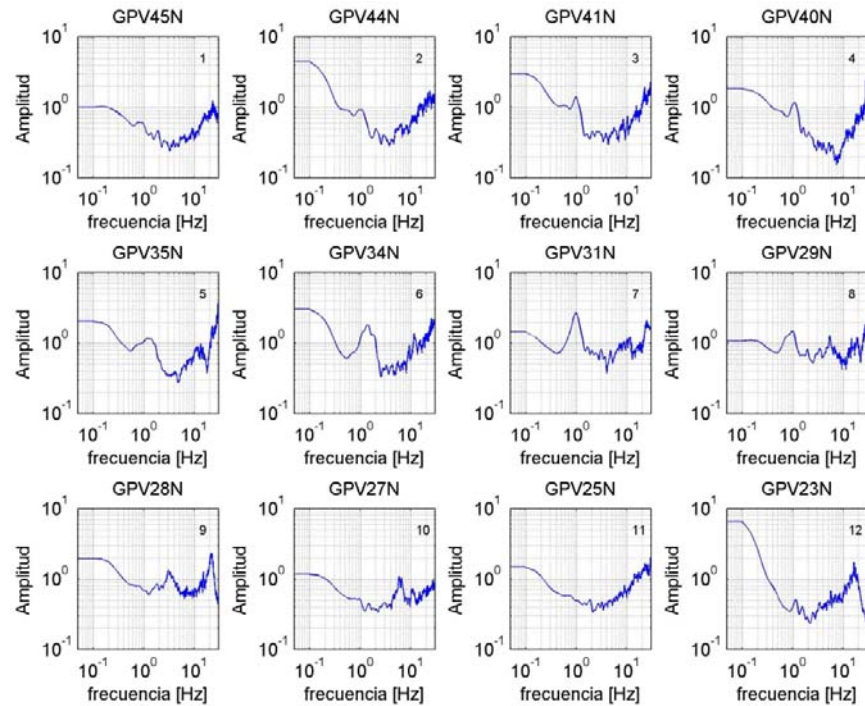


Figura F7 Cocientes espectrales del Perfil CC'.

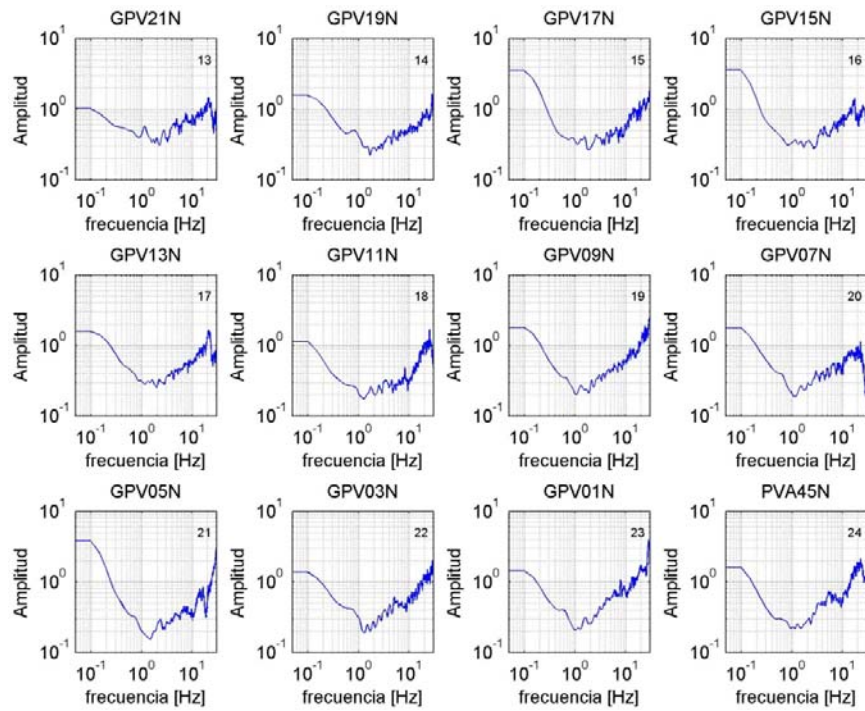


**Figura F8 Cocientes espectrales del Perfil CC'.**

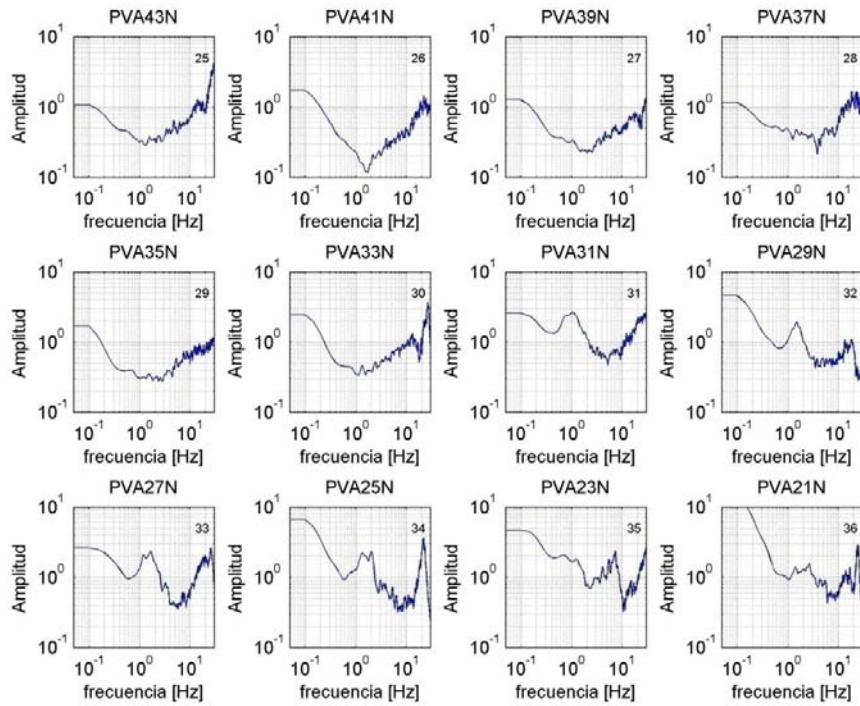
Perfil DD'



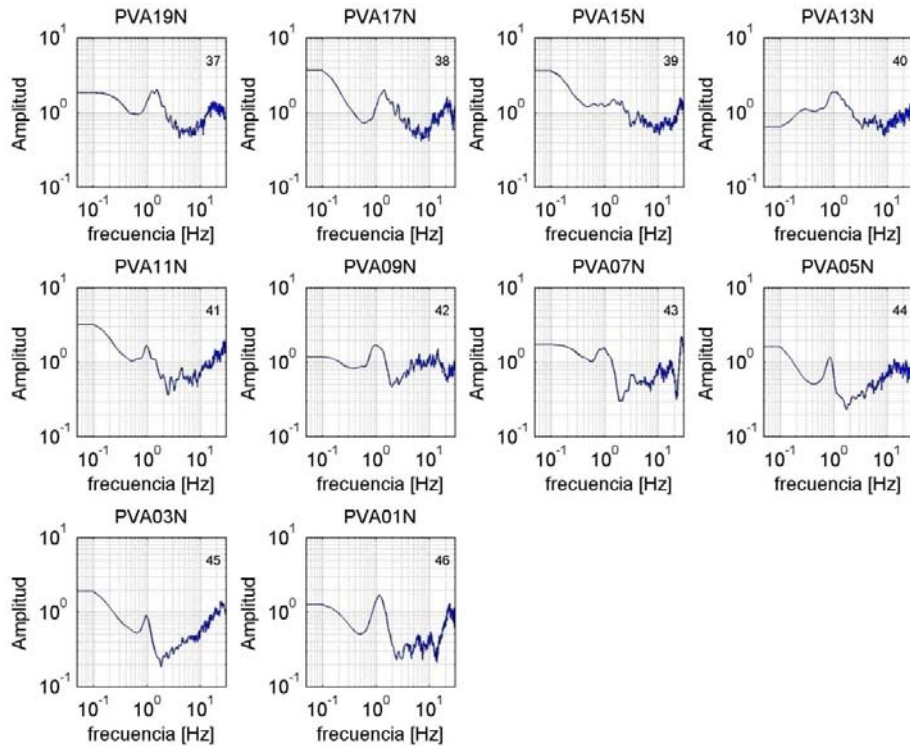
**Figura F9 Cocientes espectrales del perfil DD'**



**Figura F10 Cocientes espectrales del perfil DD'**

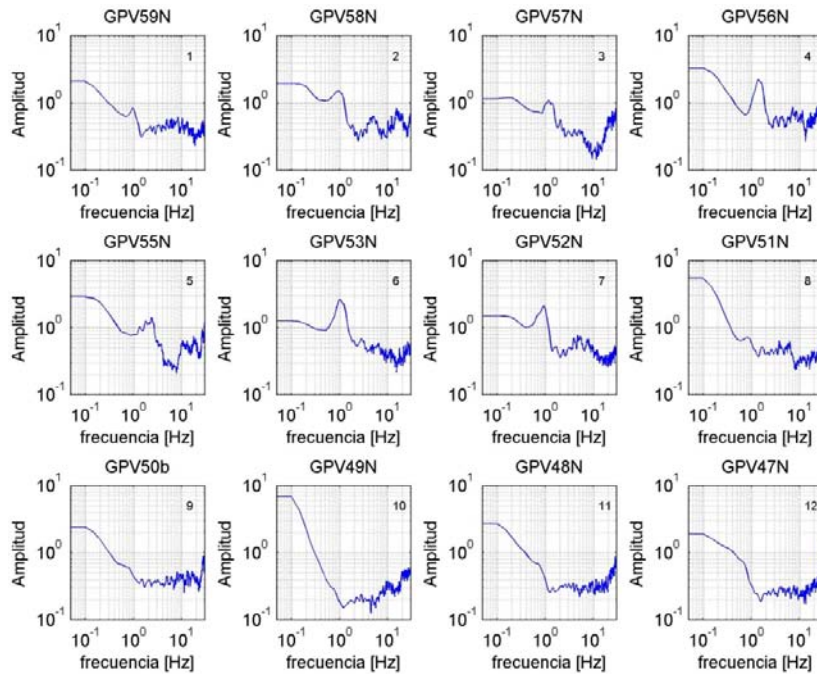


**Figura F11 Cocientes espectrales del perfil DD'**



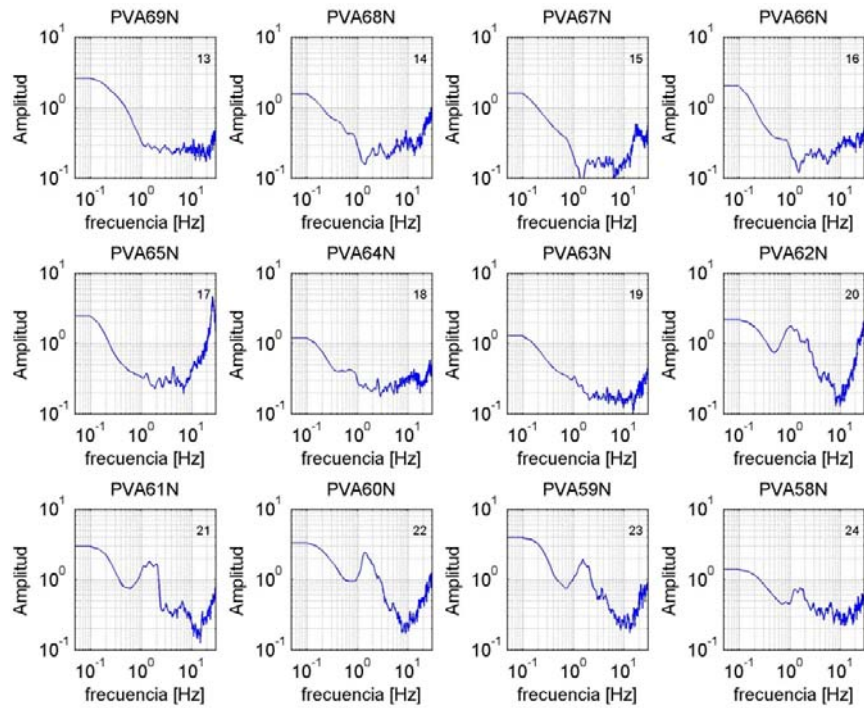
**Figura F12 Cocientes espectrales del perfil DD'**

Perfil EE'

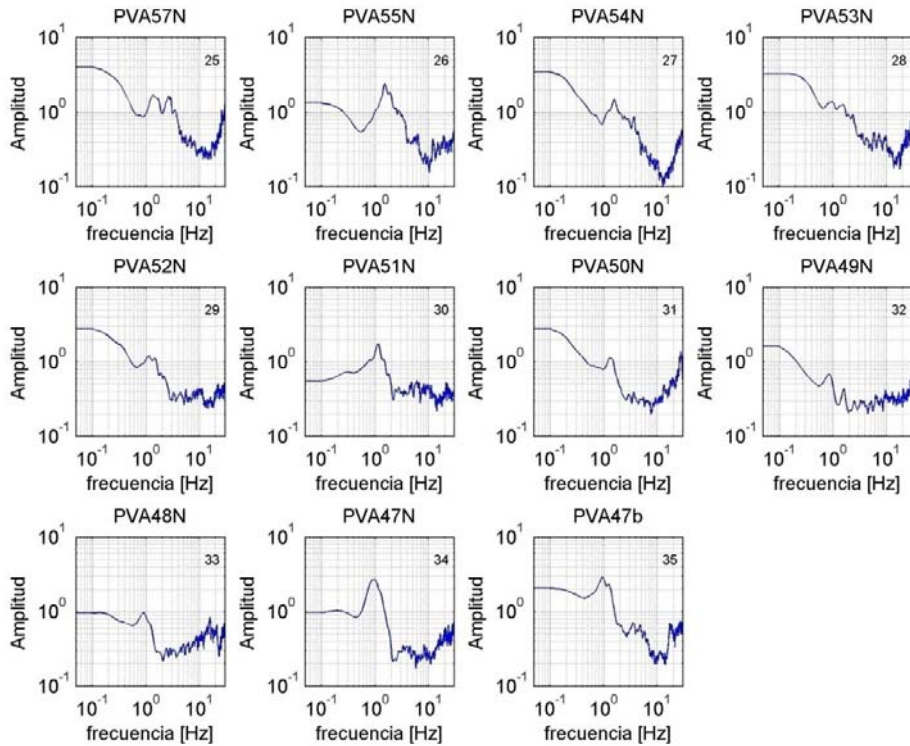


**Figura F13 Cocientes espectrales del perfil EE'**





**Figura F14 Cocientes espectrales del perfil EE'.**



**Figura F15 Cocientes espectrales del perfil EE'.**

Perfil FF'

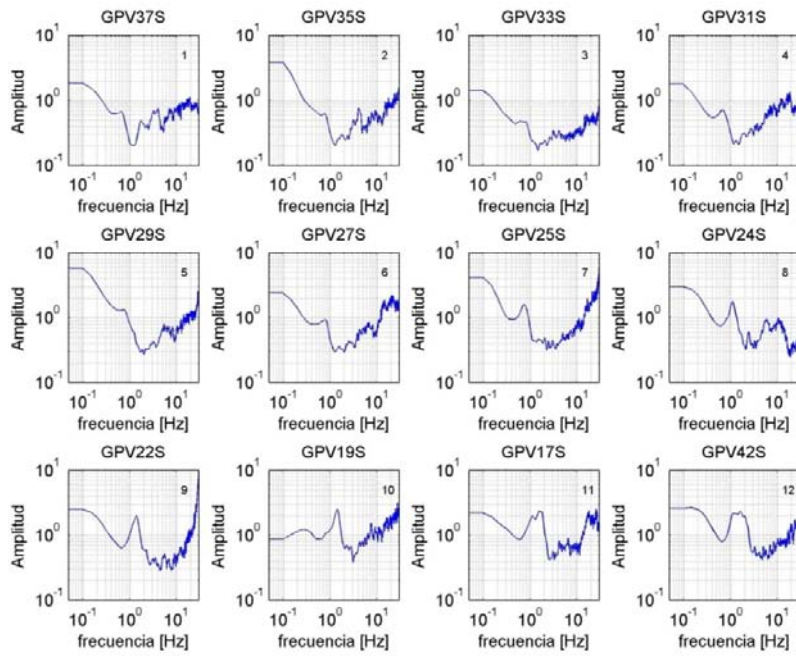


Figura F16 Cocientes espectrales de la parte inicial del perfil FF'

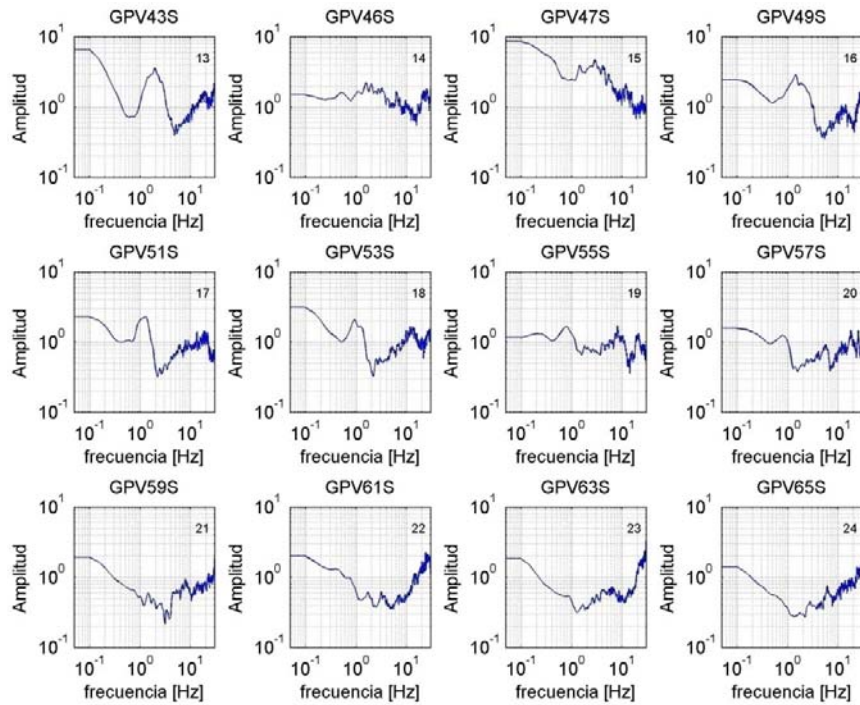
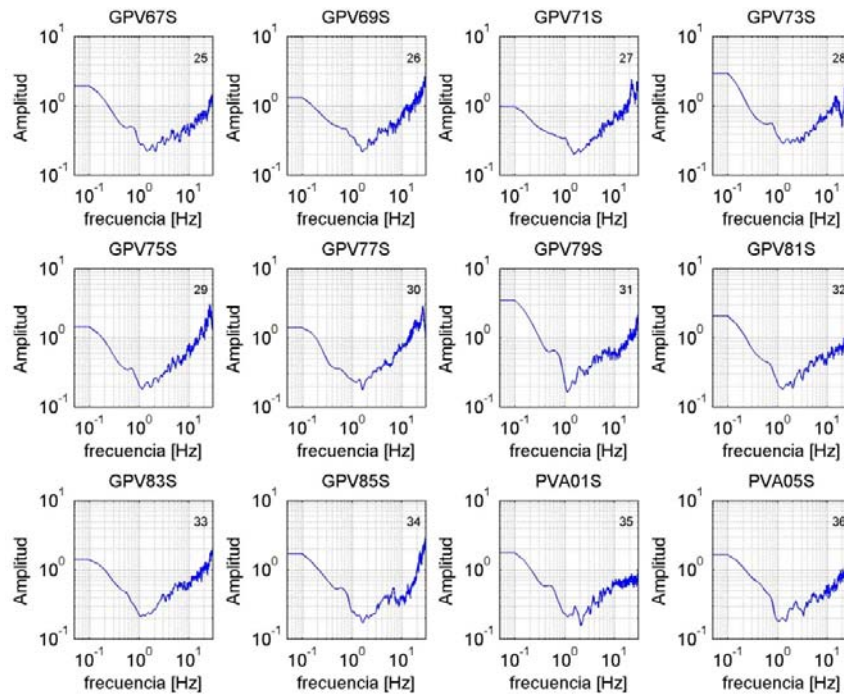
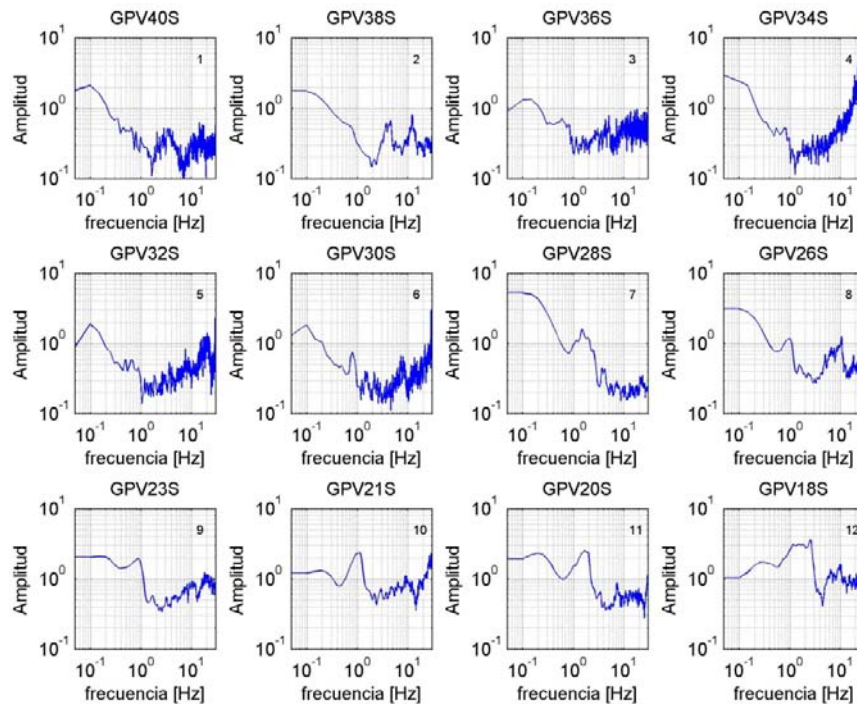


Figura F17 Cocientes espectrales del perfil FF'.



**Figura F18 Cocientes espectrales del perfil FF'.**

Perfil GG'



**Figura F19 Cocientes espectrales de la parte inicial de perfil GG'**

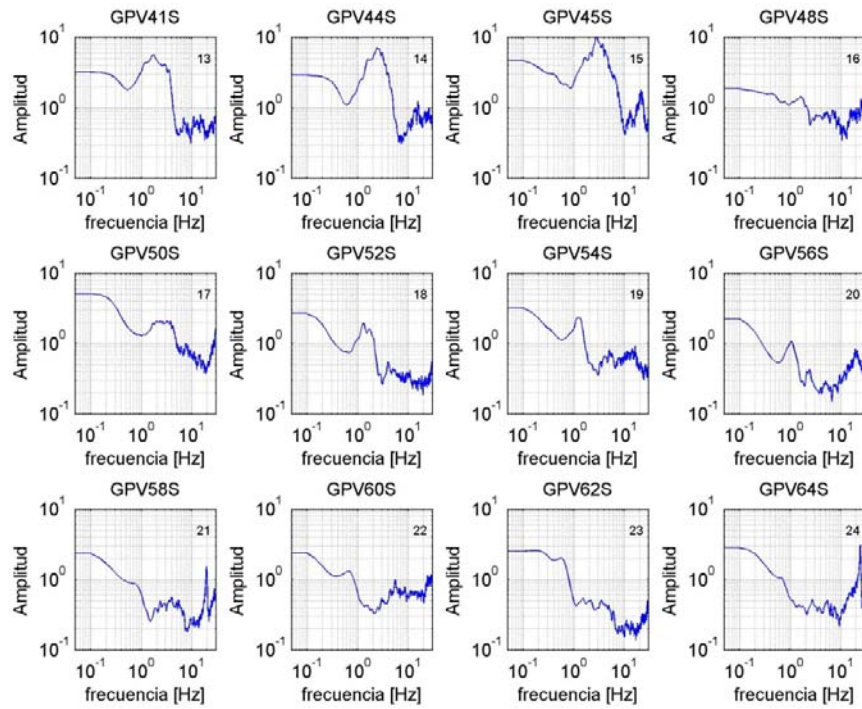


Figura F20 Cocientes espectrales del perfil GG'.

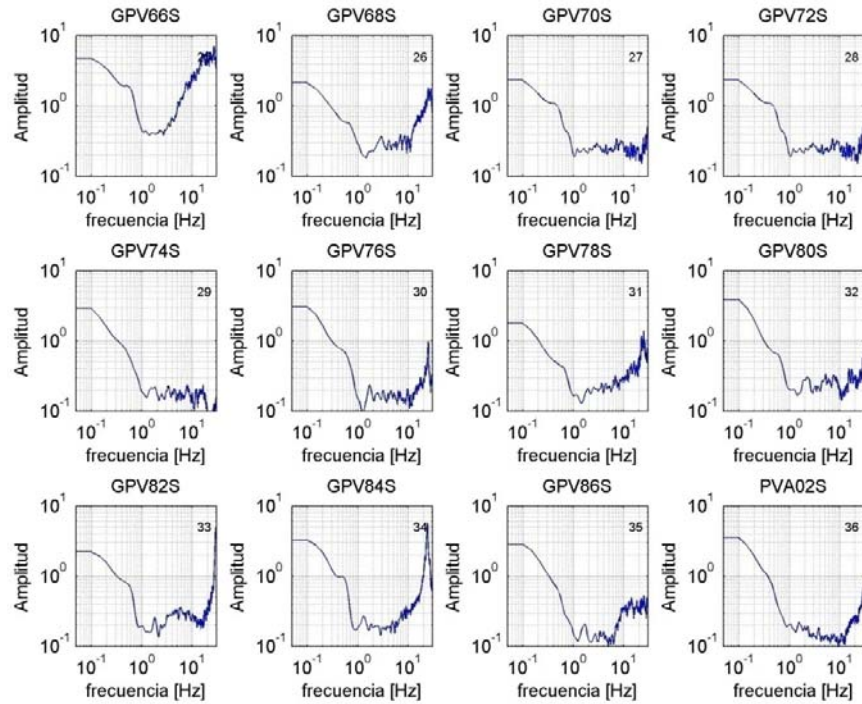


Figura F21 Cocientes espectrales del perfil GG'.

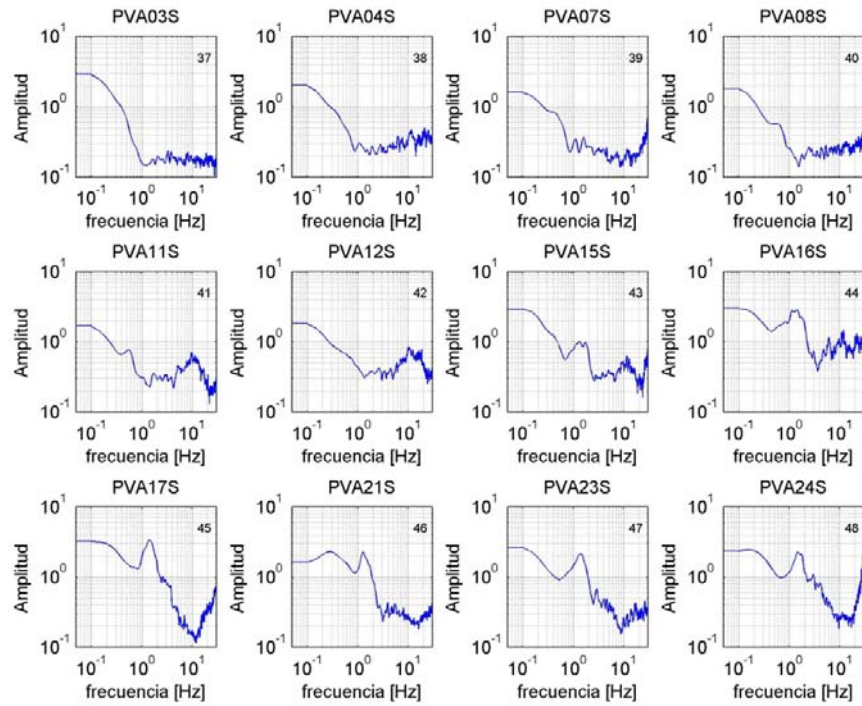


Figura F22 Cocientes espectrales del perfil GG'.

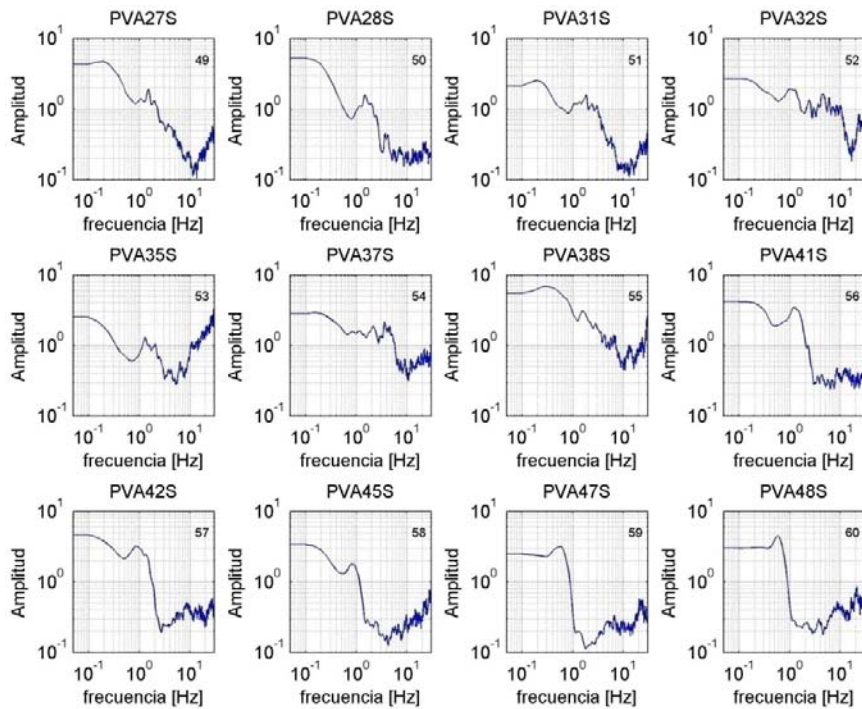


Figura F23 Cocientes espectrales del perfil GG'.

Perfil HH'

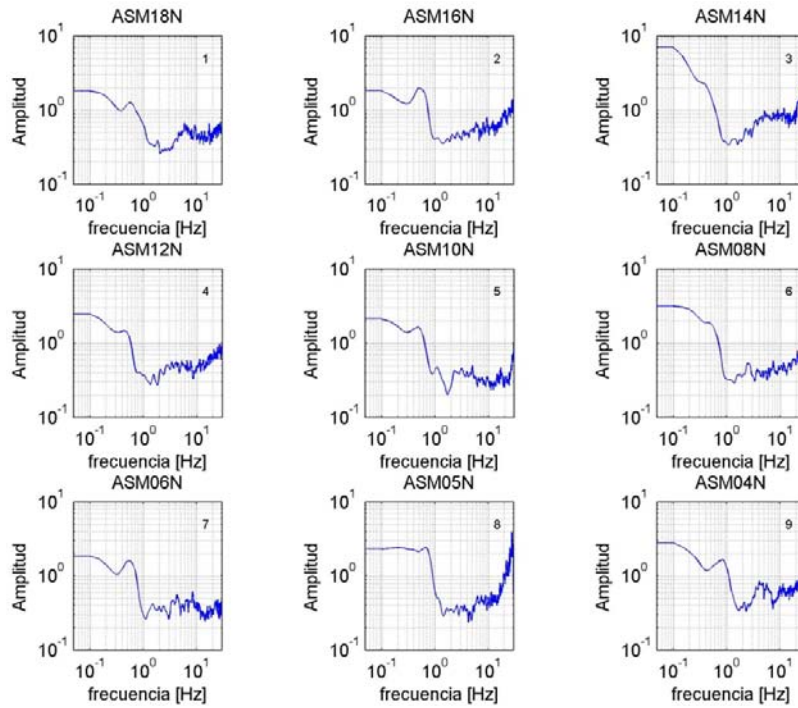


Figura F24 Cocientes espectrales del perfil HH'.

Perfil II'

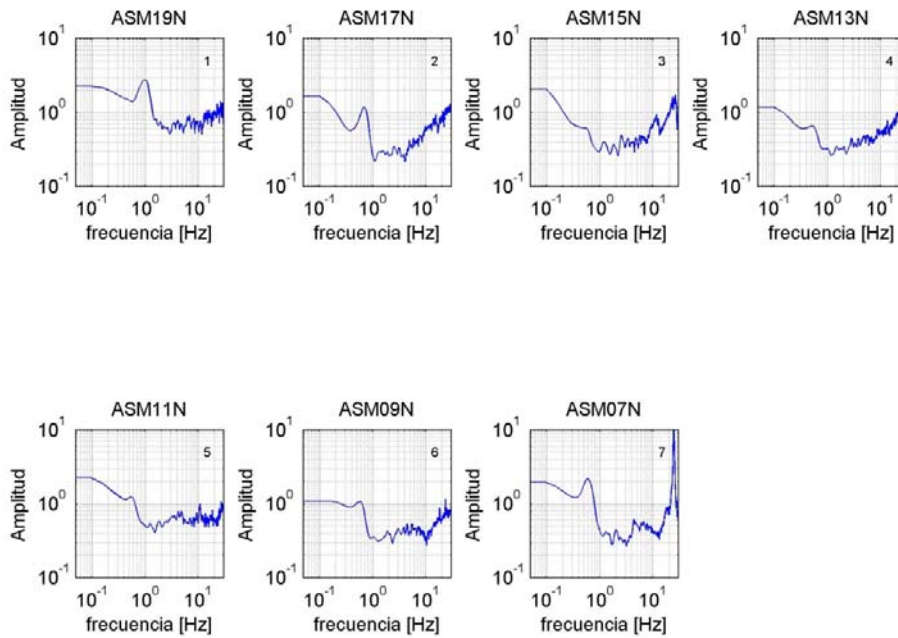


Figura F25 Cocientes espectrales del perfil II'.

### Perfil JJ'

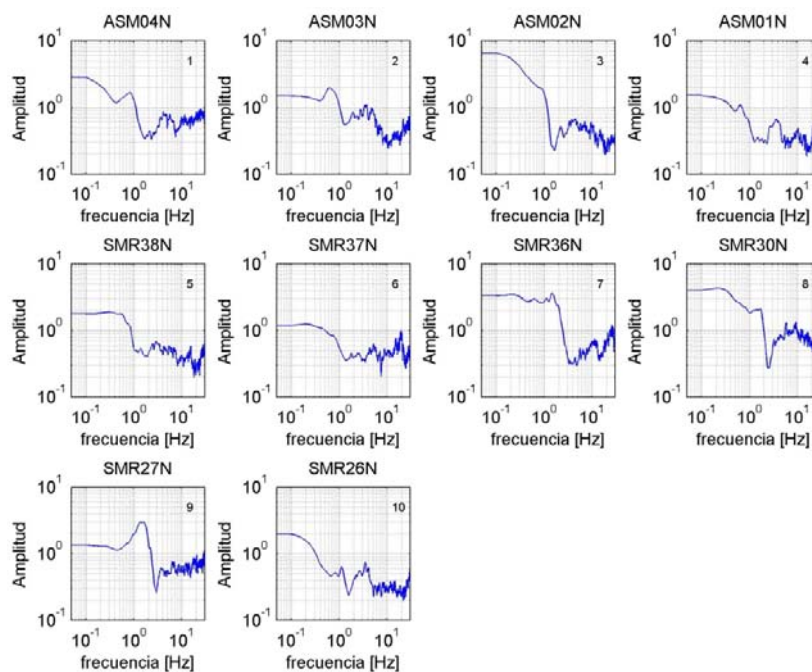


Figura F26 Cocientes espectrales del perfil JJ'.

### Perfil KK'

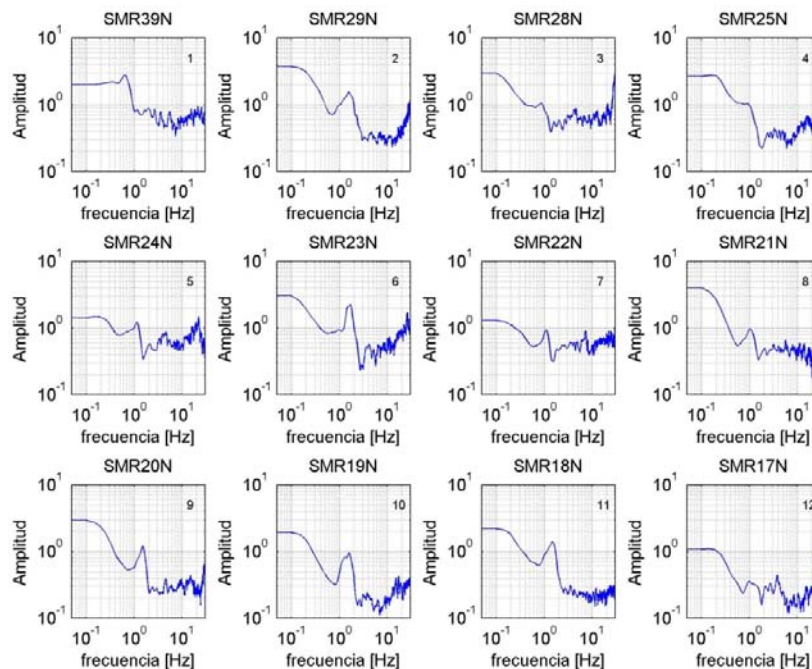


Figura F27 Cocientes espectrales del inicio del perfil KK'.

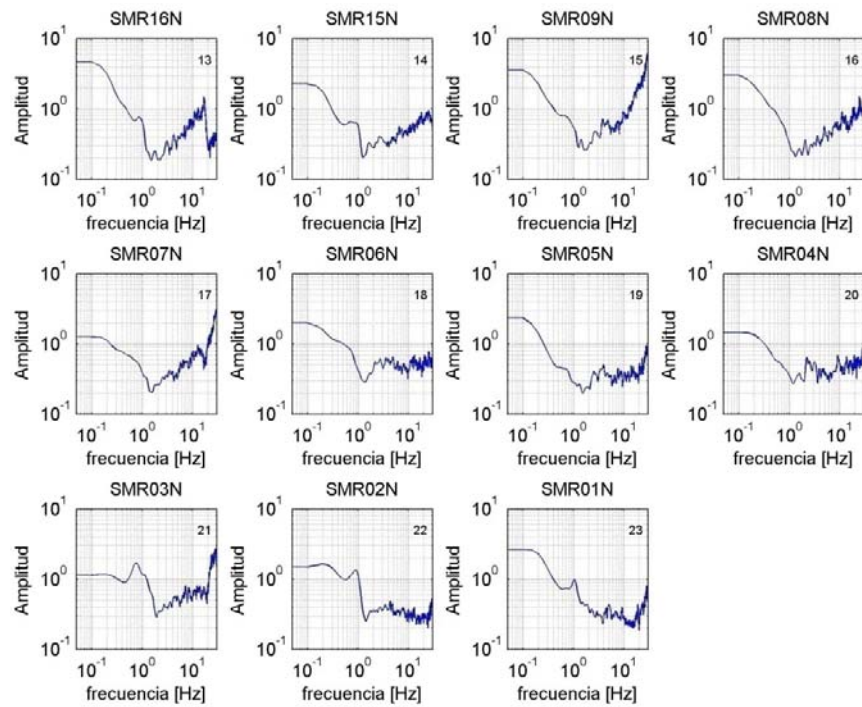


Figura F28 Cocientes espectrales del perfil KK'.

Perfil LL'

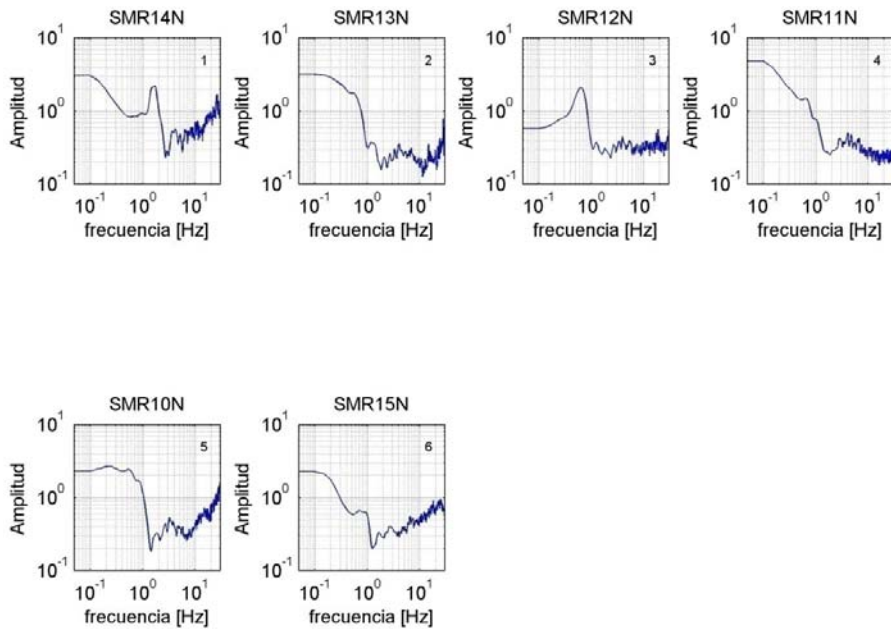


Figura F29 Cocientes espectrales del perfil LL'.



Perfil MM'

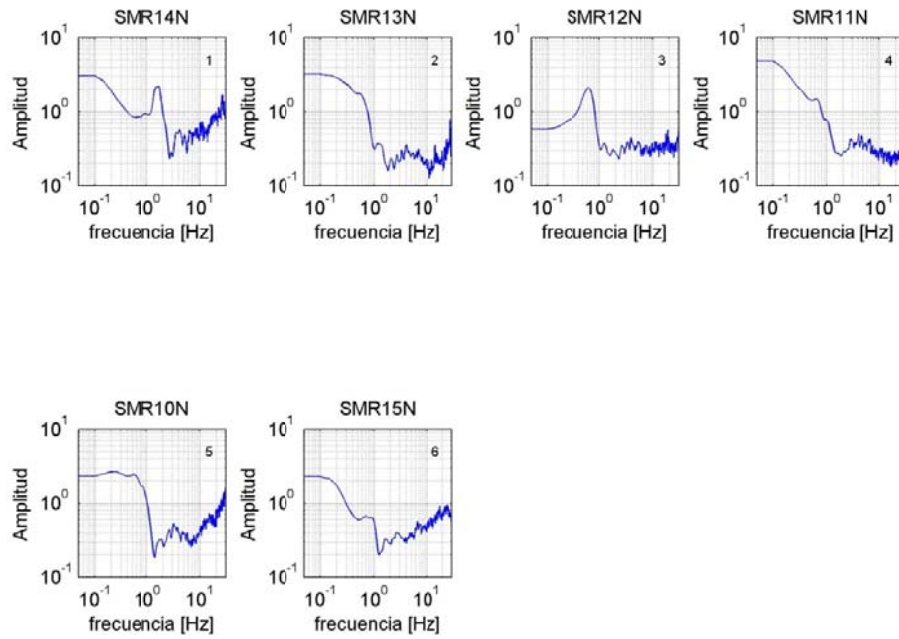


Figura F30 Cocientes espectrales del perfil MM'.

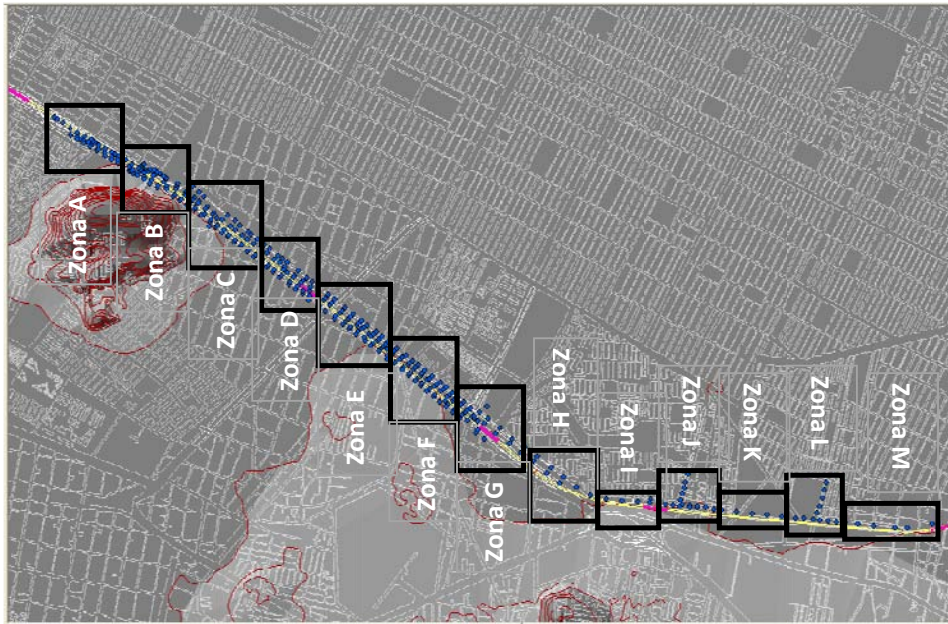
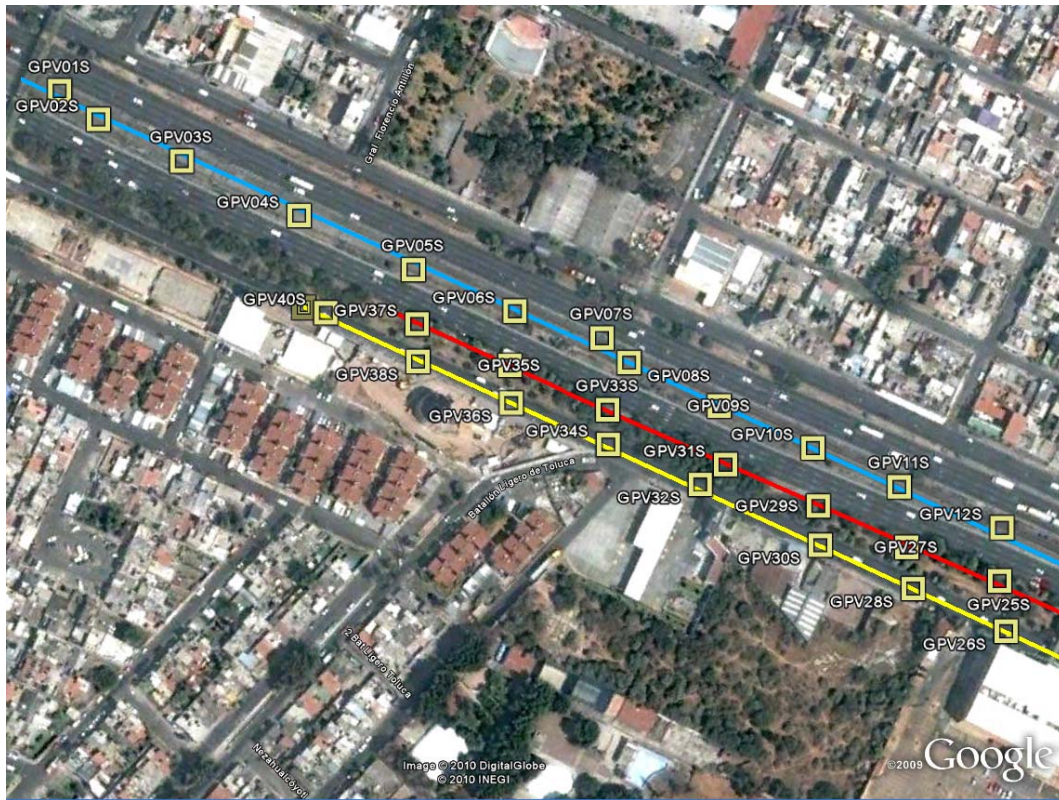
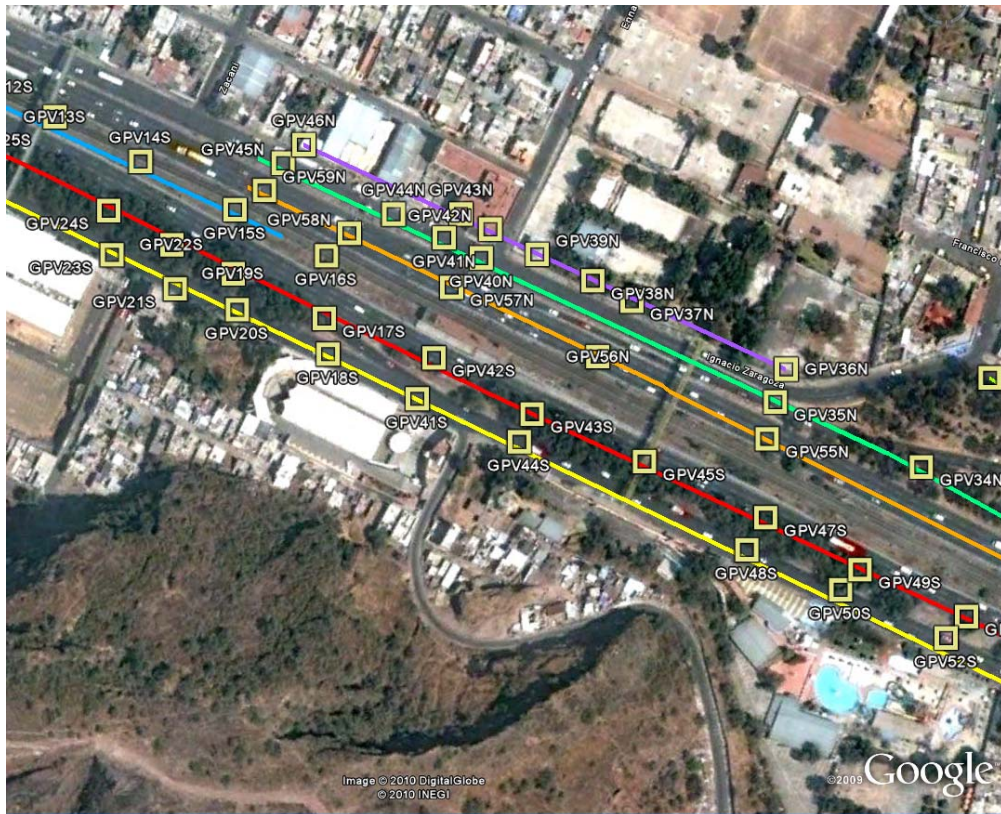


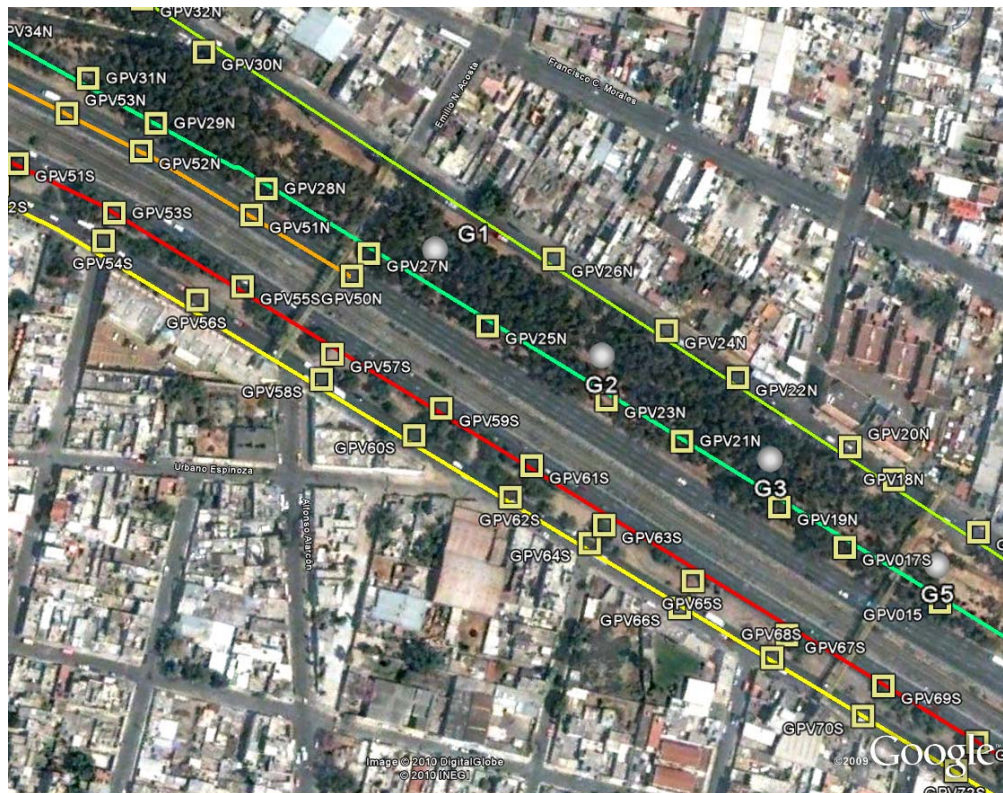
Figura F31 División del área de trabajo en zonas para localizar los puntos de medición.



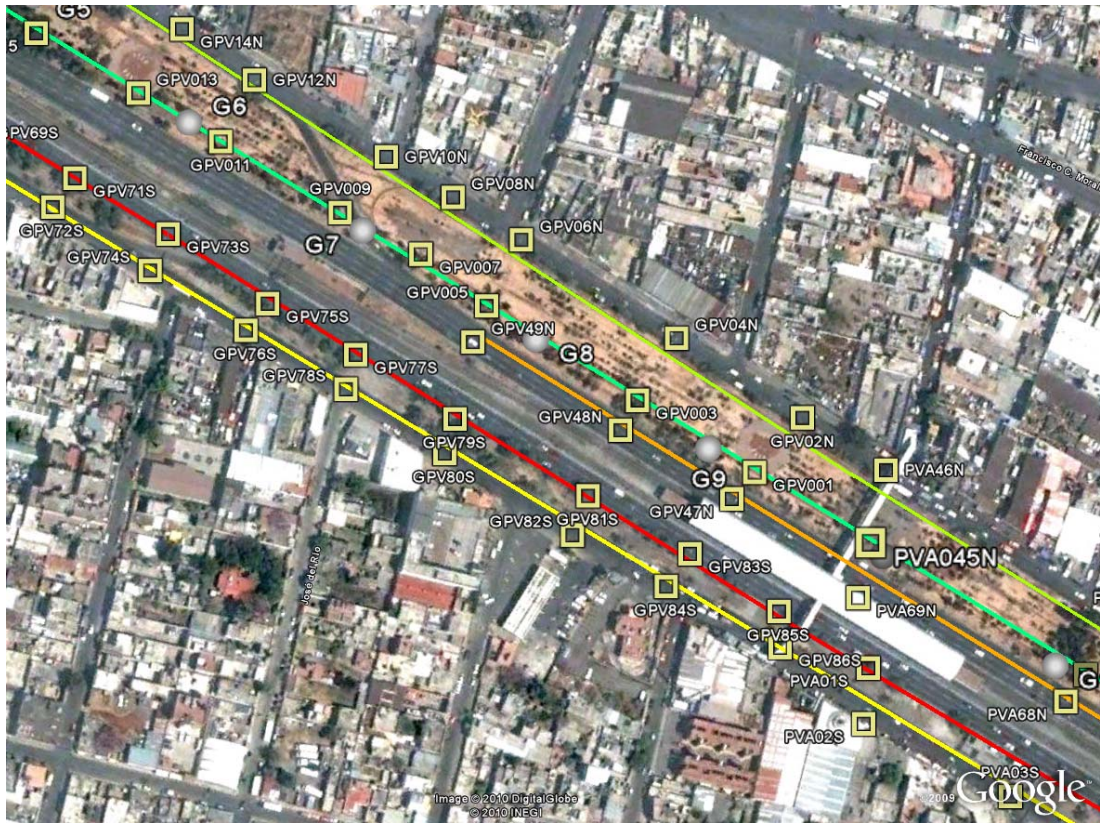
**Figura F32 Zona A del mapa de la Figura F31.**



**Figura F33 Zona B del mapa de la Figura F31.**



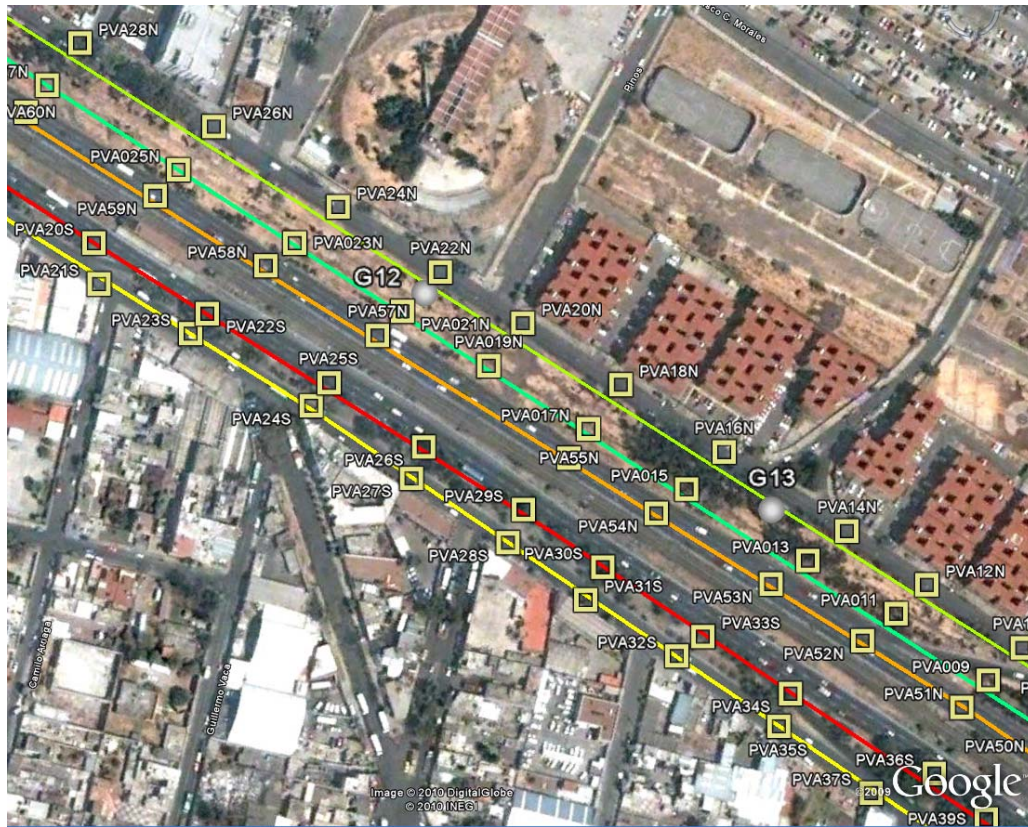
**Figura F34 Zona C del mapa F31.**



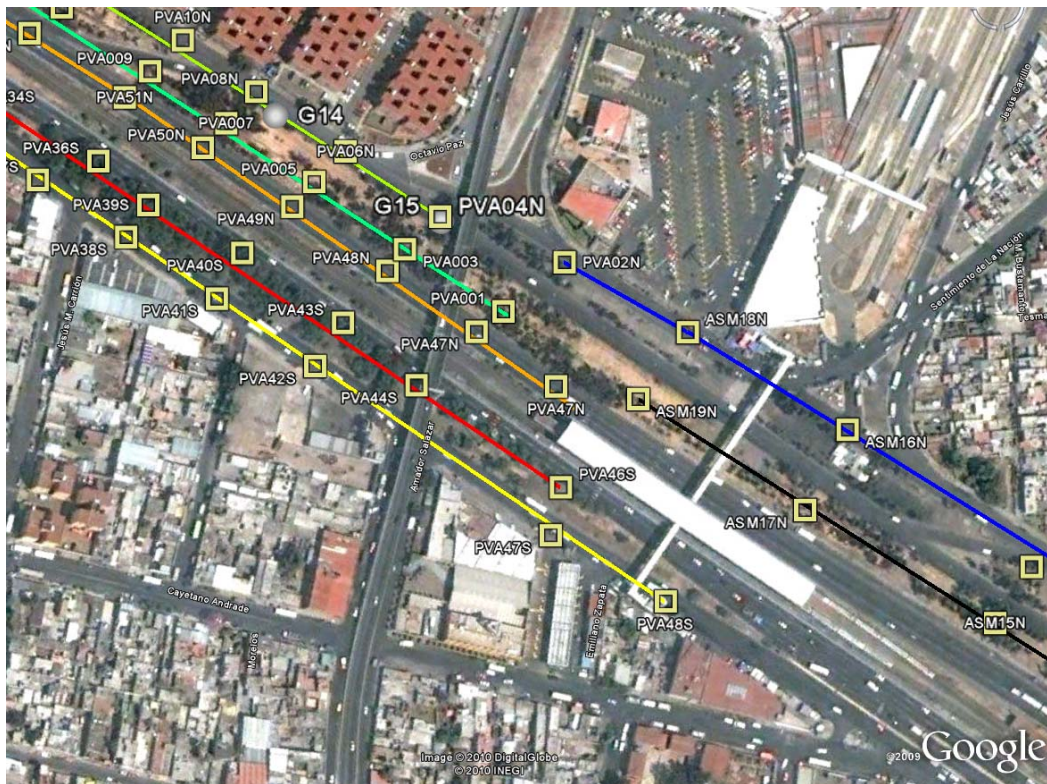
**Figura F35 Zona D del mapa de la Figura F31.**



**Figura F36 Zona E del mapa de la Figura F31.**



**Figura F37 Zona F del mapa de la Figura F31.**



**Figura F38 Zona G del mapa de la Figura F31.**



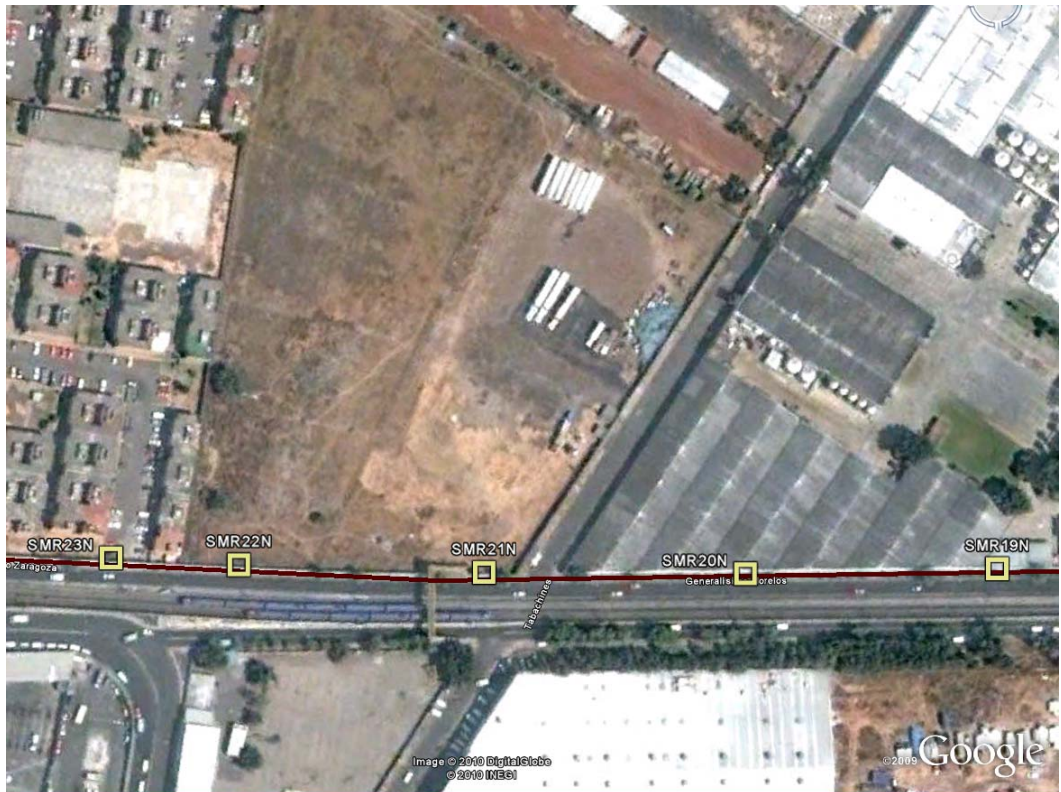
**Figura F39 Zona H del mapa de la Figura F31.**



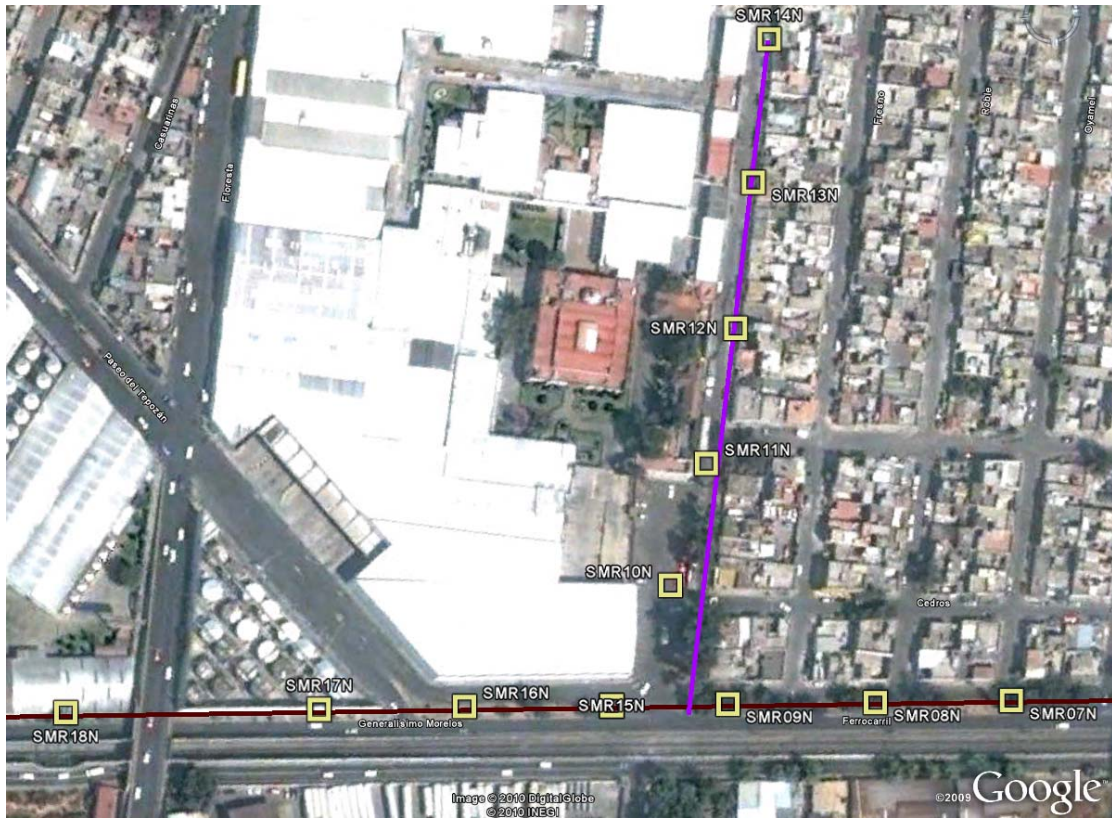
**Figura F40 Zona I del mapa de la Figura F31.**



**Figura F41 Zona J del mapa de la Figura F31.**



**Figura F42 Zona K del mapa de la Figura F31.**



**Figura F43 Zona L del mapa de la Figura F31.**



**Figura F44 Zona M del mapa de la Figura F31.**