

Capítulo IV

Aplicaciones

Este capítulo se divide en tres apartados. En el primero se describen los sitios en los que se aplicaron los métodos de análisis de microtemores; en el segundo se explica la aplicación del método de Nakamura a los datos registrados en campo; y en el tercer apartado se exponen los resultados obtenidos de la aplicación del método SPAC a los mismos registros.

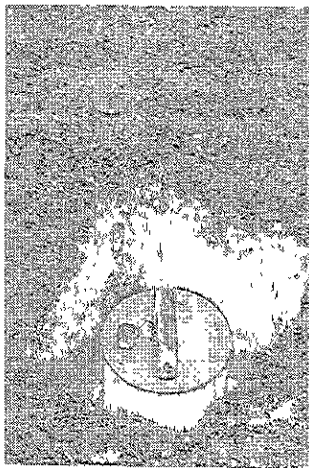
IV.1 Ubicación y descripción de los sitios de estudio

El registro de microtemores mediante arreglos instrumentales de tres o cuatro estaciones se llevó a cabo en dos sitios de la Ciudad de México: Ciudad Universitaria (CU) y Tulyehualco. El primero con la finalidad de comprobar la aplicabilidad del método SPAC y comparar el modelo estructural resultante con algún modelo estimado anteriormente. El segundo, con la finalidad de comparar la aplicación de un método típico, como el método de Nakamura, con la aplicación del método SPAC. En este último sitio se realizaron dos arreglos instrumentales.

Los dos sitios tienen características completamente distintas, mientras que CU se localiza en la zona de lomas de la Ciudad de México, Tulyehualco se encuentra en la zona de lago (figura 1.1) y se caracteriza por ser una zona de gran amplificación (Reinoso, 2000).

En ambos sitios se utilizaron sensores de banda ancha (cuarenta segundos de periodo propio) GURALP de tres canales y equipos digitalizadores REFTEK, como los que se muestran en la figura 4.1. Además, en cada estación se utilizó un disco duro SCSI, antena GPS, una batería de 12 volts y cables de comunicación. Los registros se realizaron de modo continuo con una duración de 30 minutos a 100 muestras por segundo. Se realizó una prueba con todos los sensores juntos para verificar el nivel de amplificación de los mismos y de los equipos digitalizadores. En la figura 4.2 se muestran los espectros de potencia de los componentes verticales de los registros de esta prueba; se observa que para frecuencias menores a 0.2 Hz hay cierta dispersión de los datos que puede deberse a cambios de temperatura y a falta de estabilidad de los sensores; en frecuencias mayores a 0.2 Hz la respuesta instrumental es más estable.

A fin de tener control sobre el experimento se utilizaron equipos de radiocomunicación para informar de la existencia de fuentes cercanas a los sensores que pudieran afectar el registro, tales como automóviles o personas cerca de éstos. En el primer arreglo de Tulyehualco se utilizó una cinta métrica para medir las distancias entre estaciones y, para los arreglos de 800 m de Tulyehualco (figura 4.4) y de 1 km de CU (figura 4.3), se utilizó un GPS (Garmin, 12XL) portátil para la ubicación de las estaciones. En CU se utilizaron cubetas para cubrir los sensores del efecto del viento, y en Tulyehualco se enterraron con la misma finalidad.



Sensor GURALP de tres canales.



Equipo Digitalizador REFTEK.

Figura 4.1. Instrumentos utilizados en el registro de microtremores

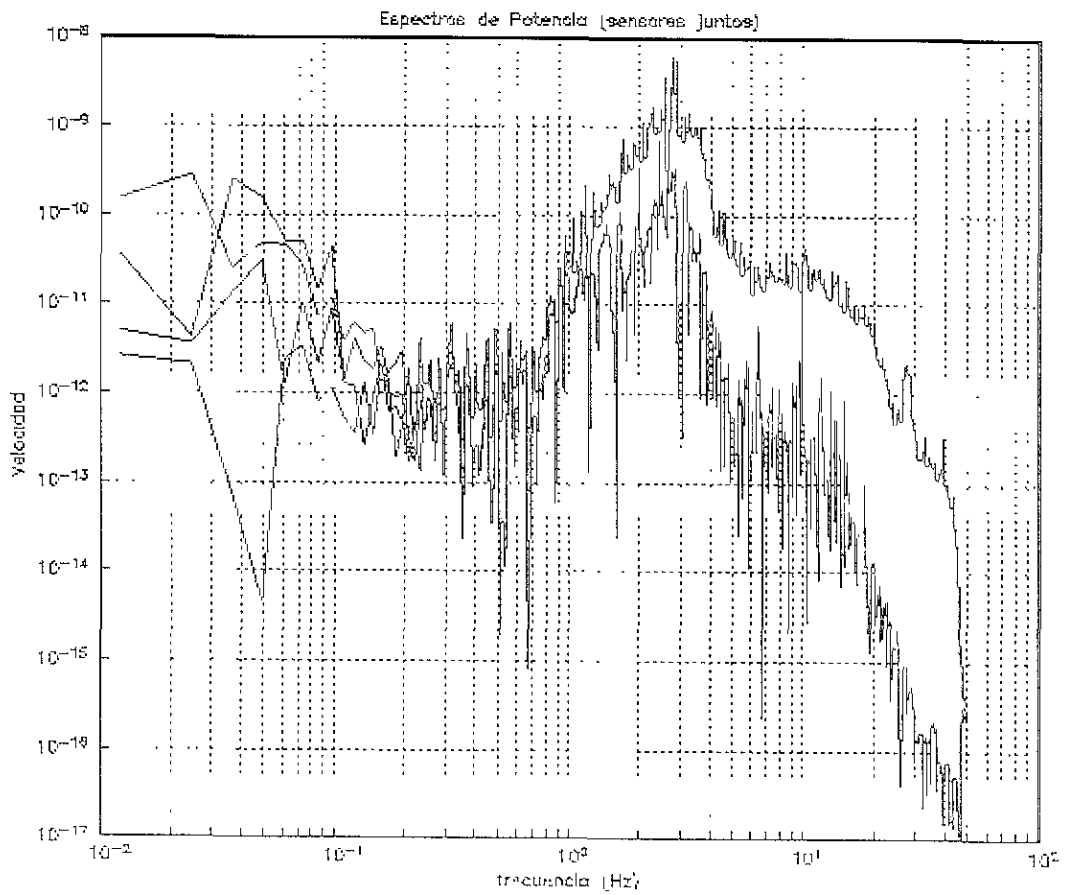


Figura 4.2 Espectros de potencia de los componentes verticales de los sensores juntos

Sitio Ciudad Universitaria (CU)

CU se encuentra al suroeste de la Ciudad de México como se mostró en el mapa de la zonificación (figura 1.1). En la figura 4.3 se muestra el mapa de CU y la localización del arreglo triangular y de cada estación.

La estación no. 1 se ubicó a un costado de la Torre del Instituto de Ingeniería, la estación no. 2 en el estacionamiento del Instituto de Química, la estación no. 3 a un costado del Estadio de Prácticas, y la estación no. 4 en el estacionamiento de Profesores de la Facultad de Economía.

El modelo estructural de CU ha sido estudiado por varios autores (Gutiérrez *et al.*, 1994, Kawaga *et al.*, 1996), e incluso se tienen datos de la columna estratigráfica del Pozo Copilco 1, ubicado a 1 km al sureste del arreglo, que fueron reportados por Pérez-Cruz (1988).

En la figura 4.3 se observa que, en todos los puntos del arreglo, aflora una misma unidad litológica formada por basaltos del cuaternario, clasificados como Qv, provenientes del volcán Xitle, e identificados como basaltos del Pedregal de San Ángel.

Sitio Tulyehualco

Tulyehualco se ubica en el antiguo Lago de Xochimilco, por tal razón corresponde a la zona de lago de la microzonificación de la ciudad (figura 1.1). En este sitio se llevaron a cabo dos arreglos instrumentales triangulares para el registro de microtemores, el primero de ellos con tres estaciones y cuatro aberturas de 20, 40, 80 y 160 metros; el segundo se realizó con cuatro estaciones, una en el centro y las otras en los vértices de un triángulo de 800 metros de lado.

En la figura 4.4 se muestran los arreglos instrumentales, la geología de la zona y el pozo Tulyehualco 1 situado aproximadamente a 4 km al oeste-noroeste del arreglo. En esta zona afloran depósitos lacustres del cuaternario (Qla), aluviones (Qal) y brechas volcánicas (Bv) pertenecientes a la unidad litológica Sierra Chichinautzin (Qc).

En el mapa (figura 4.4) de la zona se observa que las estaciones del primer arreglo se ubicaron sobre aluvión y una de las estaciones de la última abertura se ubicó sobre depósitos lacustres. Sin embargo, para el segundo arreglo, dos estaciones se ubicaron sobre depósitos lacustres, una sobre aluvión y otra cerca del límite entre esta unidad y la brecha volcánica. Las consecuencias de las litologías distintas dentro de un mismo arreglo se explican en el apartado IV.3.

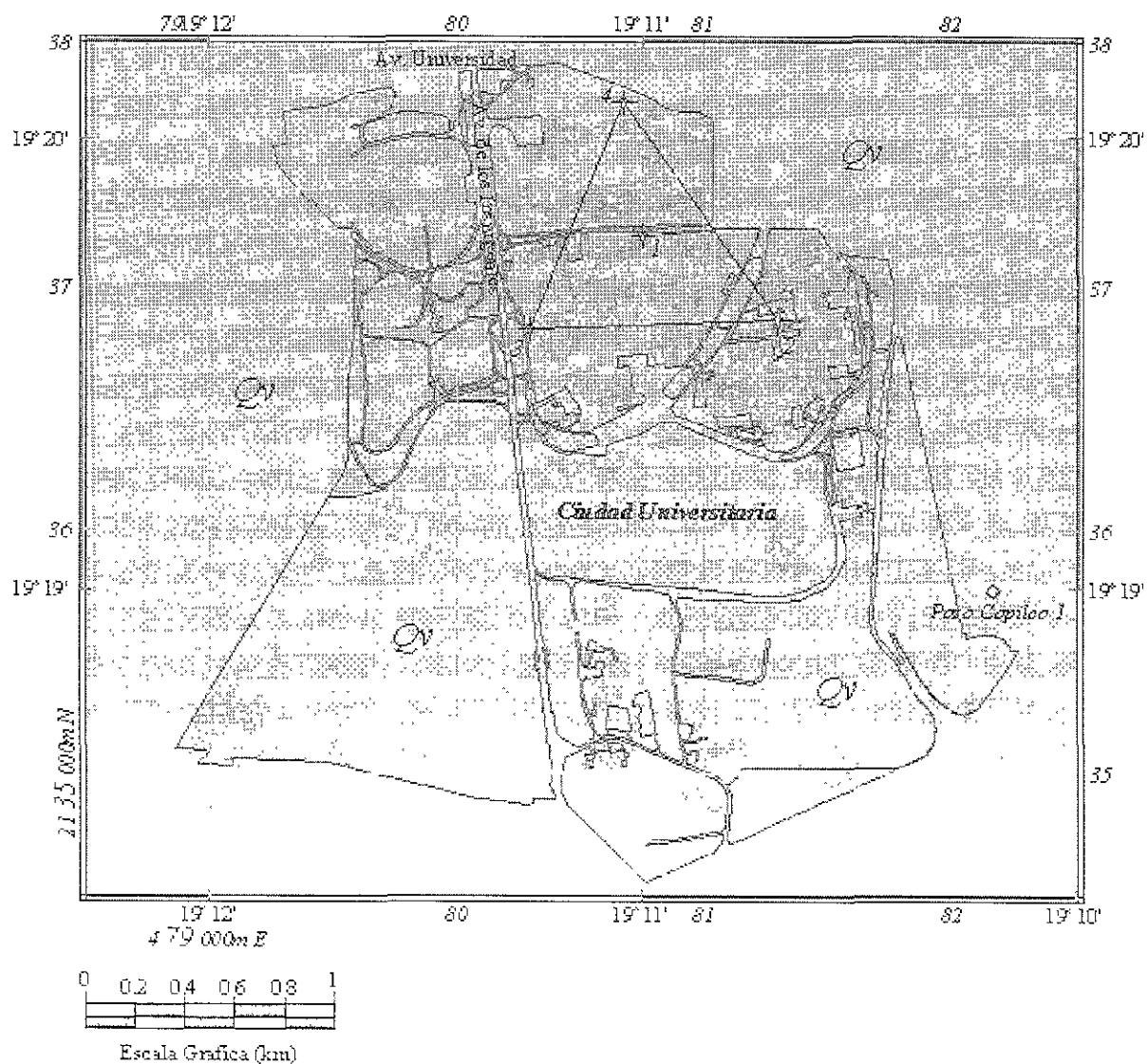


Figura 4.3. Mapa geológico de Ciudad Universitaria. Se observa la misma unidad litológica formada por basaltos del cuaternario. También se muestra la ubicación del arreglo instrumental y la localización del Pozo Copilco 1.

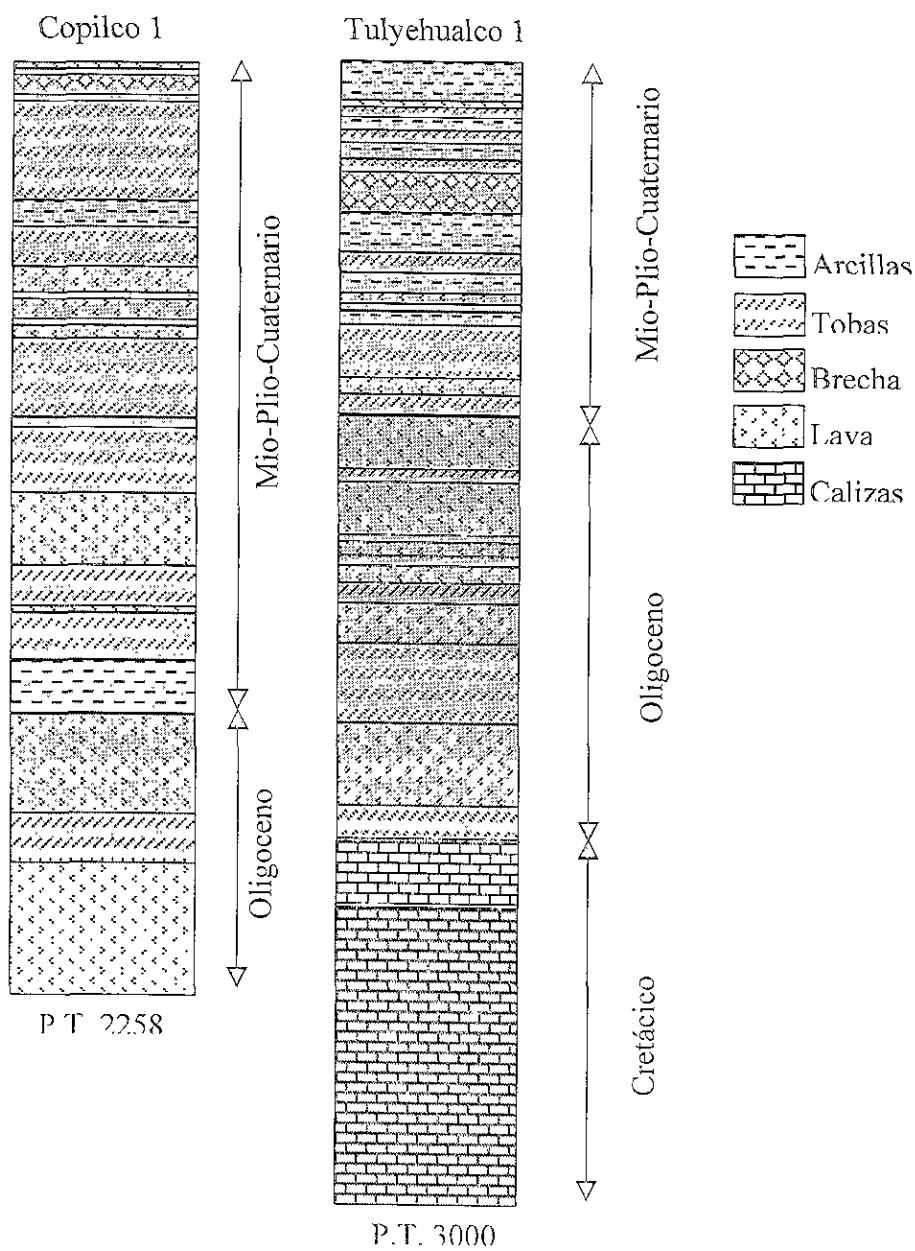


Figura 4.5 Columnas estratigráficas de los pozos Copilco 1 y Tulyehualco 1, reportadas por Pérez-Cruz (1988).

Secuencia	Copilco I	Espesor (m)	Tulyehualco I	Espesor (m)
Lacustre	Ausente		Arcillas lacustres Arcillas con tobas Basaltos	490
I	Basaltos Brechas Tobas Tobas Arcillosas	150	Ausente	
II	Arcillas Basaltos Tobas	535	Tobas Arcillas	415
III	Tobas Arcillas Basaltos Arcillas arenosas Arcillas tobáceas	600	Ausente	
VI	Basaltos Tobas	> 973	Basaltos Brecha arenosa Brechas y tobas	1175
VII			Calizas marinas	> 920

Tabla 4.1. Secuencias sismoestratigráficas reportadas por Pérez-Cruz (1988).

Es importante notar que en el Pozo Copilco 1 se encuentra completa la unidad volcánica Mio-Plio-Cuaternario, a excepción de la unidad de arcillas lacustres que sí se encuentra en el pozo Tulyehualco 1. En este último, las secuencias sismoestratigráficas I y III están ausentes y se alcanzaron las rocas calizas del Mesozoico.

En otro trabajo acerca de la Geología de la Cuenca de México se describen las unidades litológicas que fueron cartografiadas en el mapa de la figura 4.6. Según Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) las unidades tienen las siguientes características:

- Formación Chichinautzin (Qc). Las lavas de esta unidad en general son vesiculares, masivas o lajadas, su composición es principalmente andesítico-basáltica y andesítico.
- Depósitos aluviales (Qal). La acumulación de grandes espesores de aluvión se puede explicar debido a un bloqueo del desagüe, causado por el emplazamiento de derrames lávicos.
- Depósitos lacustres (Qla). En esta unidad se agrupan los sedimentos clásticos y productos del estratovolcán Popocatepetl y de la Sierra de Chichinautzin, los cuales se depositaron en un ambiente lacustre.

También se muestra la sección geológica que une los Pozos Copilco 1 y Tulyehualco 1 (figura 4.7), de acuerdo con los autores citados. En esta figura se ilustra la disposición horizontal de las unidades volcánicas, lacustres y aluviales, modificada por las variaciones de sus espesores. Destaca la estructura plegada y fallada de las rocas mesozoicas.

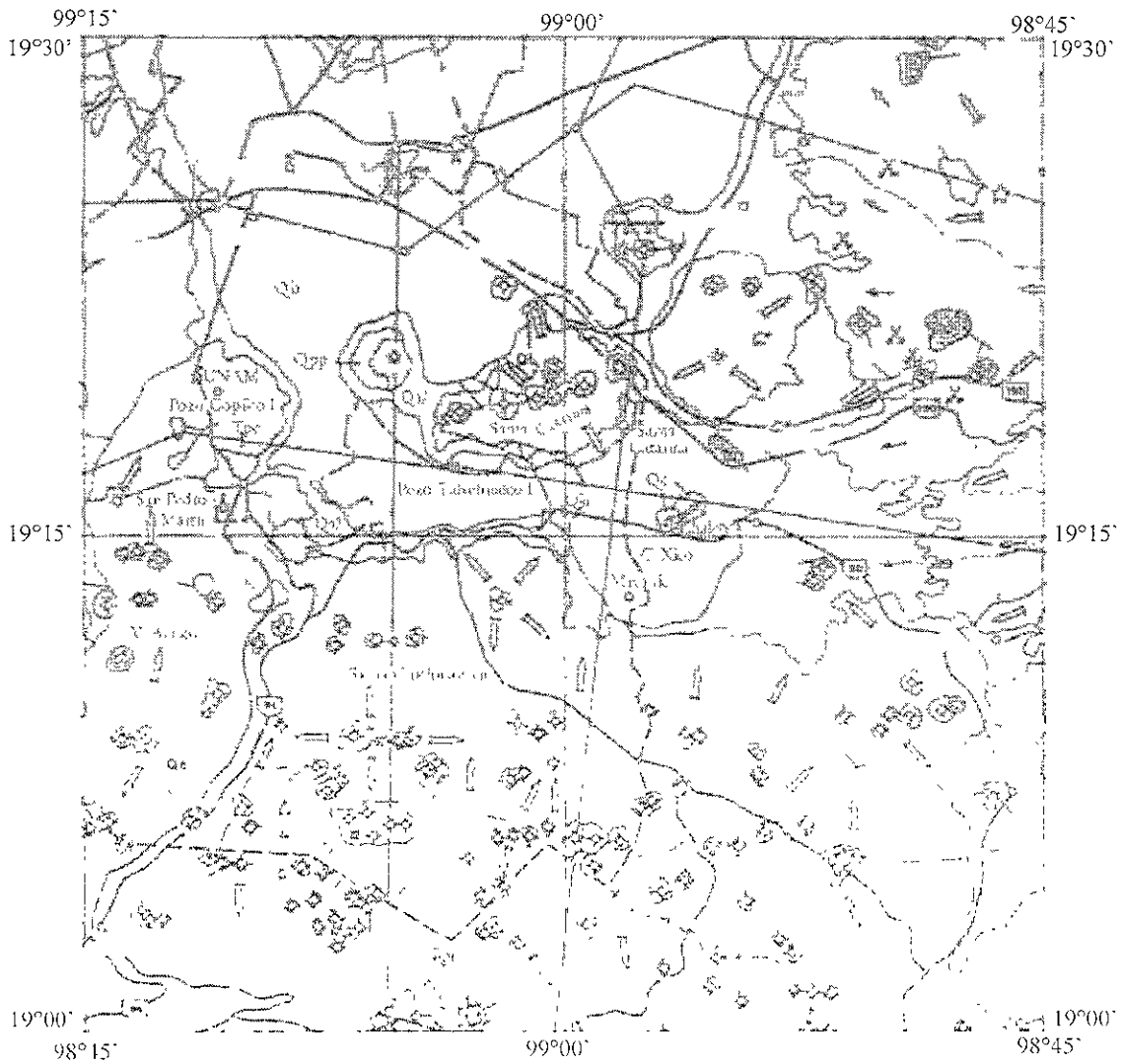


Figura 4.6. Unidades litológicas y cartografía de los dos sitios de estudio (modificado de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera 1989).

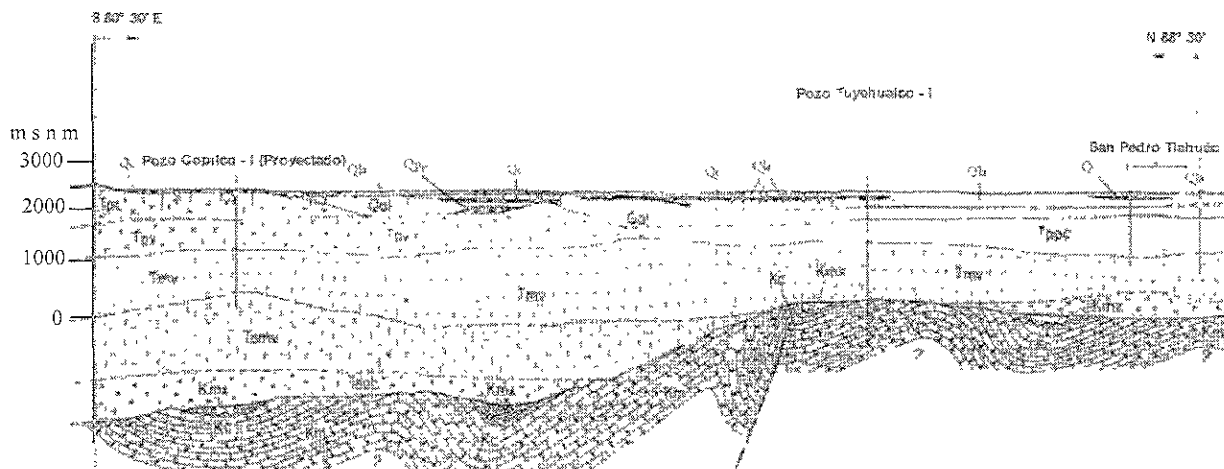


Figura 4.6. Sección geológica que une los dos sitios de estudio (modificada de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera 1989).

En esta sección se muestran las siguientes unidades litológicas según su edad:

- | | | |
|-------------|---|---|
| Cuaternario | { | Qla: depósitos lacustres
Qc: rocas de la Formación Chichinautzin
Qal: depósitos aluviales
Qpp: rocas de la Formación Popocatepetl |
| Terciario | { | Tpc: rocas volcánicas de la Formación Las Cruces
Tppc: depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno
Tmv: rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío
Tomv: rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano
Teob: depósitos continentales del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano |
| Cretácico | { | Kc: caliza de la Formación Cuautla.
Kmx: caliza de la Formación Morelos |

IV.2 Aplicación del método de Nakamura

Para encontrar la frecuencia fundamental del suelo en el sitio Tulyehualco se aplicó el método de Nakamura que se explicó en el capítulo anterior. Con el fin de obtener mejores resultados, se probaron distintas posibilidades para considerar los datos y los cocientes espectrales, comparando de manera estadística los resultados. También se analizaron dos tamaños de ventanas de registro de 20 y 40 segundos para obtener mejor definición de los cocientes espectrales hacia bajas frecuencias.

IV.2.1 Preprocesado de la información

Antes de iniciar el análisis de las señales de microtremores se realizó la conversión de unidades ya que, originalmente, las señales estaban en *cuentas* y, para cambiarlas a unidades de velocidad (*cm/s*), se multiplicaron por el factor $2.4734 \times 10^{-7} [(cm/s)/cuentas]$, que es un promedio de la constante obtenida de los datos de calibración proporcionados por el fabricante del sensor y que varía para cada uno de los componentes del sensor.

Posteriormente, se realizó el truncamiento de las señales en el tiempo para que éstas tuvieran el mismo tiempo de inicio o *tiempo cero de referencia*; ya que, cuando se registraron los datos, los sensores ubicados en cada estación comenzaron a registrar las señales de microtremores con algunos segundos, o décimas de segundo de diferencia.

De un primer análisis de las señales se discriminó entre lo identificado como señal estacionaria y como señal transitoria (figura 4.8) que, aunque la definición no es igual a la proporcionada por Sheriff (1976), se pueden distinguir de la siguiente forma:

- señal estacionaria: señal de amplitud y comportamiento uniforme a lo largo del registro en todas las estaciones,
- señal transitoria: señal de mayor amplitud que el resto del registro, generada por alguna fuente muy local no necesariamente sísmica, que afecta el registro de los instrumentos cercanos.

Dados estos dos tipos de señales, se realizó un estudio estadístico (que se describirá más adelante) para determinar qué tipo de señal utilizar.

Por otro lado, con el fin de evitar el fenómeno de Gibbs —rizaduras en los bordes— en las ventanas de datos, se probó el suavizado —*tapering*— utilizando las ventanas en tiempo de Hamming (Kulhanek, 1976) con la siguiente expresión:

$$w_l = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cos(n\pi / N) & \text{para } n \leq N \\ 0 & \text{para } n > N \end{cases} \quad (4.1)$$

de von Hann (Kulhanek, 1976):

$$w2 = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \cos(n\pi / N) & \text{para } |n| \leq N \\ 0 & \text{para } |n| > N \end{cases} \quad (4.2)$$

y de Bartlett (Sheriff, 1976):

$$w3 = \begin{cases} 1 - |n| / N & \text{para } |n| \leq N \\ 0 & \text{para } |n| > N \end{cases} \quad (4.3)$$

donde n es el número total de muestras (2048 puntos), y N es el ancho del lóbulo lateral de la ventana que, en este caso, se tomó del 15% del número total de muestras de cada lado.

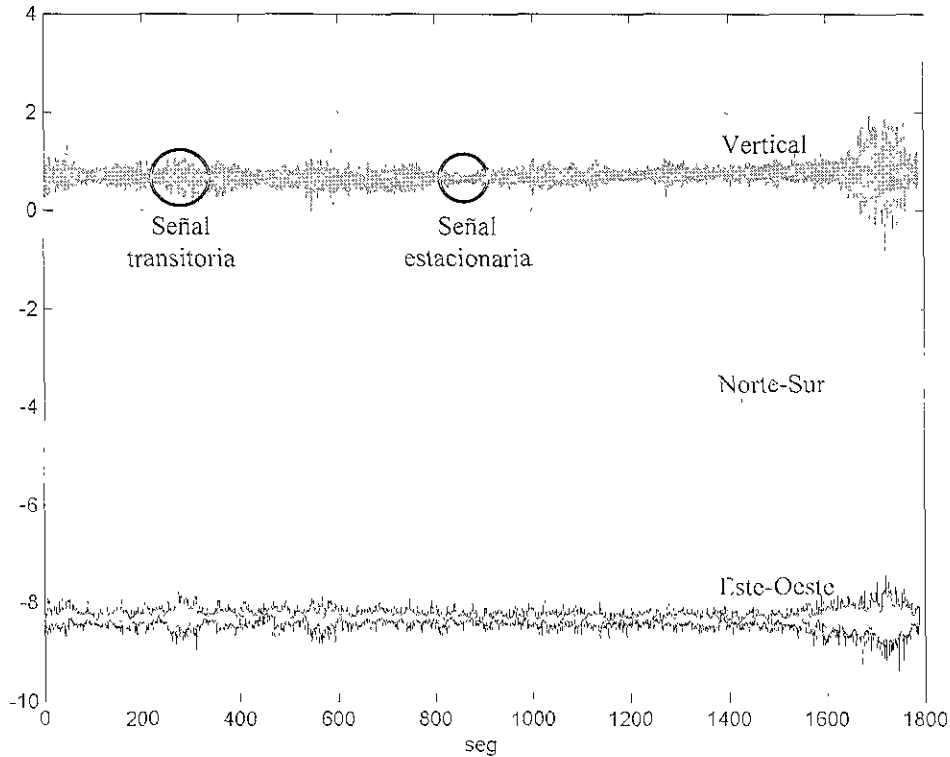


Figura 4.8. Señales de microtremores en tiempo en las que se identifica la señal estacionaria y la transitoria

El suavizado de los bordes con las tres posibilidades se aplicó a nueve ventanas de 20 segundos de la estación C1 del primer arreglo instrumental de Tulyehualco. La aplicación

de las distintas ventanas de suavizado proporcionó resultados idénticos para los espectros de los componentes horizontales. Sin embargo, en el espectro del componente vertical, la aplicación de la ventana de Bartlett dio como resultado amplitudes menores en bajas frecuencias — $10^{-1} - 5 \times 10^{-1}$ Hz.— y, en el resto del espectro, el resultado fue idéntico para la aplicación de las distintas ventanas de suavizado.

Si consideramos que uno de los puntos de interés en la evaluación del efecto de sitio es la amplificación ocasionada por el mismo, el efecto de la ventana de Bartlett de disminuir la amplitud en bajas frecuencias podría causar una subestimación de las amplificaciones. Por esta razón, y por la sencillez de sus coeficientes, se decidió aplicar la ventana de von Hann, ec. 4.2 (Kulhanek, 1976).

El preprocesado de los datos y la aplicación del método de Nakamura se realiza con un programa en Matlab 5 en el siguiente orden:

- Lectura de las señales de microtemores en tiempo y cambio de unidades.
- Selección de ventanas de 20 segundos de registro cada una, para cada estación.
- Suavizado de los bordes con la ventana de von Hann (Kulhanek, 1976).
- Cálculo de la Transformada de Fourier utilizando la FFT (*Fast Fourier Transform*).
- Suavizado de los espectros con una ventana triangular logarítmica, con un factor de 3%.
- Cálculo de los cocientes espectrales para las nueve ventanas de tiempo.
- Obtención del promedio de los nueve cocientes espectrales, y cálculo de la desviación estándar.
- Graficación del promedio resultante \pm una desviación estándar.

Para aplicar el método de Nakamura, se consideró necesario decidir qué componente horizontal se tomaría en cuenta para calcular los cocientes espectrales, o bien, de qué manera combinar el efecto de los componentes horizontales para calcular dichos cocientes.

Cotton y Volant (1998) proponen combinar el efecto de los componentes horizontales calculando el promedio de los espectros:

$$H(\omega) = \frac{1}{2} (NS(\omega) + EW(\omega)) \quad (4.4)$$

donde $NS(\omega)$ y $EW(\omega)$ son los espectros de amplitud de Fourier de los componentes norte-sur y este-oeste del registro, respectivamente.

Por otro lado, Steidl (1993) propone combinar los componentes horizontales formando una señal compleja en el dominio del tiempo, por lo que el módulo de dicha señal dado por la suma vectorial de los componentes horizontales, es la amplitud máxima del movimiento en el plano horizontal:

$$f(t) = \sqrt{(ns(t))^2 + (ew(t))^2} \quad (4.5)$$

El problema de construir la señal compleja en el dominio del tiempo y de obtener su módulo es que se cambian los signos de la señal original, lo que afectaría el resultado de la Transformada de Fourier. Por esta razón, se modificó la propuesta de Steidl (1993) para construir la señal compleja en el dominio de las frecuencias.

$$F(\omega) = \sqrt{(NS(\omega))^2 + (EW(\omega))^2} \quad (4.6)$$

Ya que Nakamura (1989) no especifica en su trabajo qué componente horizontal utilizar para calcular los cocientes espectrales, surgió la necesidad de realizar pruebas estadísticas para decidir entre cuatro cocientes posibles:

- componente norte-sur entre componente vertical (ns/z),
- componente este-oeste entre componente vertical (ew/z),
- promedio de los componentes horizontales (ec. 4.4), entre componente vertical (promedio/z),
- suma vectorial de los componentes horizontales (ec. 4.6) (o módulo de la señal compleja) en el dominio de las frecuencias, entre el componente vertical (suma vectorial/z).

Para tomar esta decisión, se realizaron pruebas estadísticas con 18 ventanas de la estación C1, nueve con señal estacionaria y nueve con señal transitoria para, de este modo, decidir también qué tipo de señal utilizar. En la figura 4.9 se muestran los resultados de los cocientes calculados utilizando señales estacionarias; y en la figura 4.10 los resultados de utilizar señales transitorias.

En general se observa que, aun cuando se consideran ventanas con señales estacionarias o ventanas con señales transitorias, la desviación estándar se comporta de manera muy similar para los cuatro cocientes; esto es: que es muy grande en el intervalo de 0.1 a 1 Hz; que a partir de esta frecuencia disminuye, y que se mantiene más uniforme y más cercana al promedio en el resto de la gráfica.

Al comparar los resultados de los cocientes ew/z y ns/z (figuras 4.9 y 4.10), el grado energético del primero resulta ser más grande (caracterizado por una mayor amplitud), independientemente del tipo de señal que se considera. Por otro lado, la desviación estándar de estos cocientes se comporta de manera similar, aunque se observa que es menor para el cociente ew/z.

Para los cocientes que consideran el promedio (ec. 4.4) o la suma vectorial (ec. 4.6), se observa que la amplitud es mayor para ventanas con *señales estacionarias*, se definen con más claridad los picos predominantes y la desviación estándar es menor, lo que indica una mayor estabilidad de los datos.

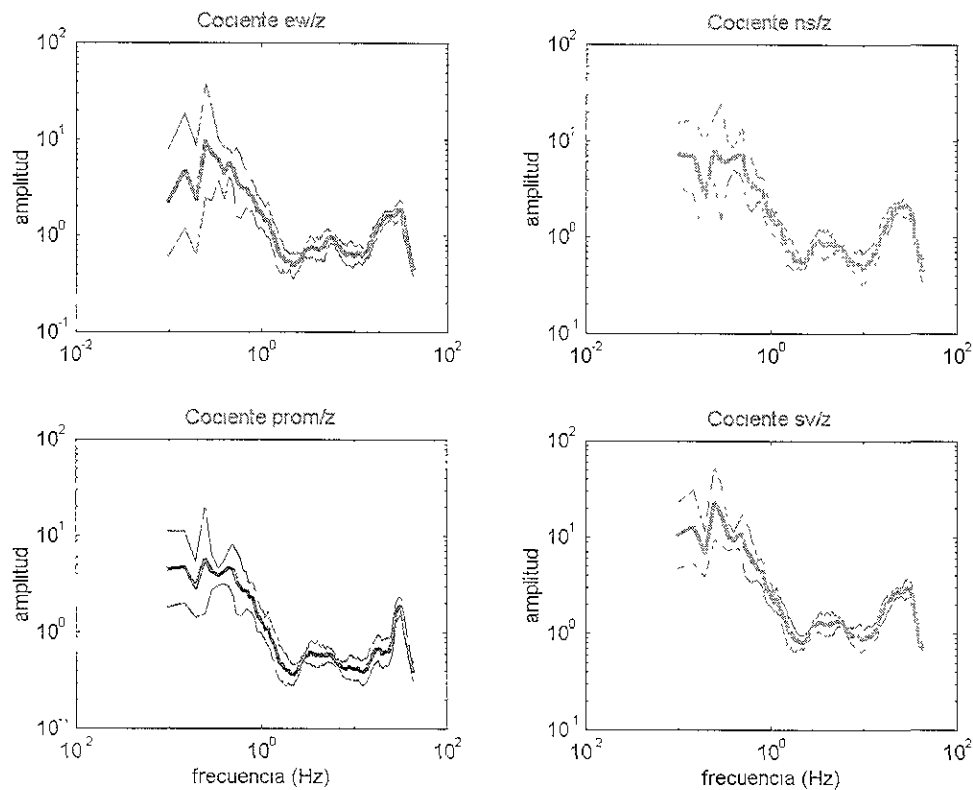


Figura 4.9. Cocientes con señales estacionarias de la estación C1 del primer arreglo de Tulyehualco. ew/z es el cociente del componente EW sobre el componente vertical; ns/z es el cociente del componente NS entre el vertical; prom/z es el cociente del promedio de los componentes horizontales, entre el componente vertical; y, sv/z es el cociente de la suma vectorial de los componentes horizontales entre el componente vertical, todos \pm una desviación estándar.

También se observa que, para el cociente que considera la suma vectorial de los componentes horizontales (figuras 4.9 y 4.10) (ec. 4.6), la amplitud resultante es mayor, la desviación estándar tiende a disminuir con más rapidez, y se definen mejor los picos principales del cociente.

Como resultado de estas observaciones, se concluye que:

- Es mejor utilizar ventanas con señales estacionarias, ya que la desviación estándar de los promedios que consideran este tipo de señal siempre es menor (lo que muestra la estabilidad de los datos) que aquellos que consideran ventanas con señales transitorias; y también porque se definen mejor los picos predominantes del promedio.

- Es conveniente calcular el cociente de la suma vectorial de los componentes horizontales (ec. 4.6) sobre el componente vertical, porque la desviación estándar es menor (es decir que es más estable) que la de los demás cocientes (ns/z , ew/z , $promedio/z$), y porque la amplitud resultante siempre es mayor, ya que con la suma vectorial obtenemos el máximo movimiento horizontal.

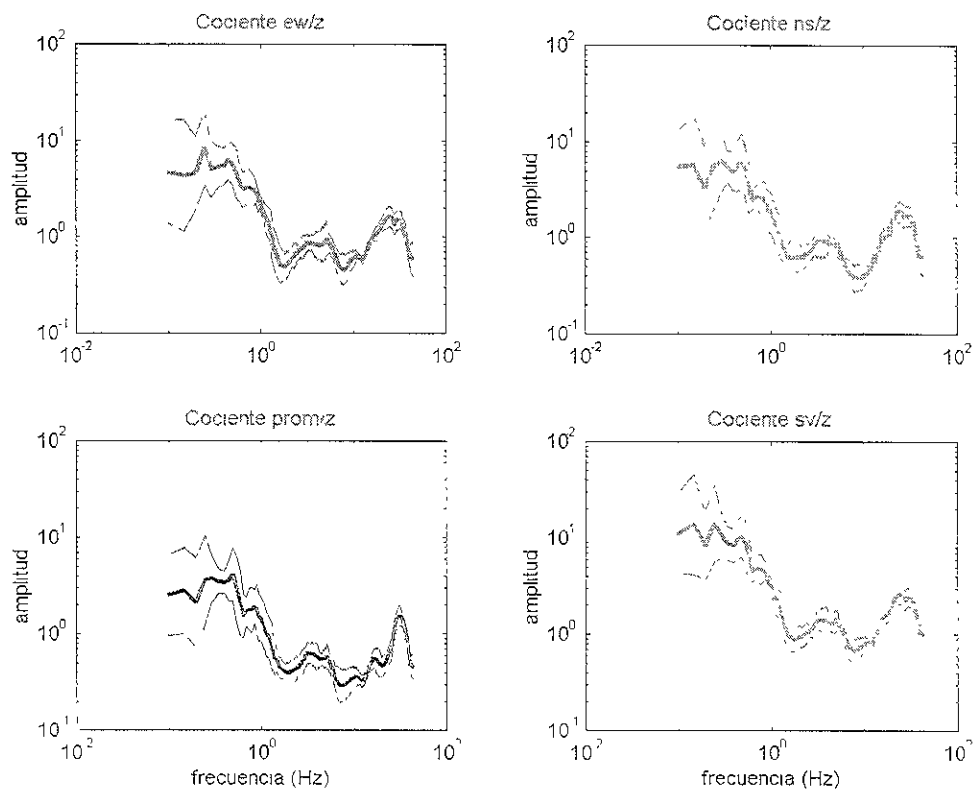


Figura 4.10. Cocientes con señales transitorias de la estación C1 del primer arreglo de Tulychualco. ew/z es el cociente del componente EW sobre el componente vertical; ns/z es el cociente del componente NS entre el vertical; $prom/z$ es el cociente del promedio de los componentes horizontales, entre el componente vertical; y, sv/z es el cociente de la suma vectorial de los componentes horizontales entre el componente vertical, todos \pm una desviación estándar.

Hay que recordar que, cuando se trabaja con señales de microtremores, es importante tomar en cuenta que las fuentes de energía son multidireccionales y, por lo tanto, no se conoce la dirección de máximo movimiento. Esto permite esperar que, al considerar el vector de máxima energía horizontal (ec. 4.6), se obtengan amplitudes mayores. Esto implicaría tomar una postura conservadora en cuanto a la evaluación de la amplificación del sitio se refiere.

Dadas estas conclusiones, el programa base en Matlab se modificó quedando de la siguiente forma:

- Se leen los datos y se realiza la conversión de unidades.
- Se seleccionan las nueve ventanas (de 20 segundos cada una) para cada estación.
- Se realiza el suavizado de los bordes con la ventana de von Hann (Kulhanek, 1976).
- Se calcula la *FFT*.
- Se calcula la suma vectorial de los componentes horizontales en el dominio de las frecuencias.
- Se suavizan los espectros con una ventana triangular logarítmica con un factor de 3%.
- Se calculan los cocientes espectrales para las nueve ventanas de tiempo.
- Se obtiene el promedio de los nueve cocientes espectrales y se calcula la desviación estándar.
- Se grafica el promedio resultante \pm una desviación estándar.

Aplicación a Tulyehualco

La forma del arreglo instrumental que se utilizó en la primera campaña de registros de microtemores en Tulyehualco se muestra en la figura 4.11.

Las aberturas del arreglo instrumental (Fig. 4.11) fueron de 20 (A1, B1, y C1), 40 (A2, B2 y C2), 80 (A3, B3 y C3), y 160 (A4, B4 y C4) metros de distancia entre las estaciones y el centro del arreglo instrumental.

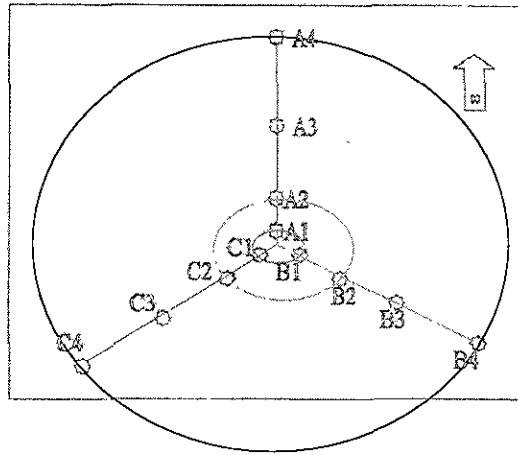


Figura 4.11. Primer arreglo instrumental en Tulyehualco. La primera abertura de 20 m, la segunda de 40, la tercera de 80 y la cuarta de 160m.

Para delimitar los alcances del método de Nakamura realizamos distintas combinaciones entre las estaciones del arreglo instrumental, obteniendo:

- promedios por líneas, $PL = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 X_i; X = A, B, C$
- promedios por aberturas, $PA = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 A_i + B_i + C_i$,
- y un promedio general, $PG = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 A_i + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 B_i + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 C_i \right)$

Para las estaciones de una misma abertura se seleccionaron ventanas de 20 y 40 segundos en los mismos intervalos. En el caso de la abertura 3 (A3, B3 y C3), dicha selección se volvió complicada, ya que la señal se saturó casi en la mayor parte del registro de la estación C3, debido al movimiento de un camión de volteo cerca del arreglo. A continuación se muestran y se explican los resultados obtenidos con ventanas de 20 segundos.

Promedios por líneas (Fig. 4.12)

En este caso se consideraron las cuatro estaciones de las líneas A (línea A1, A2, A3, A4), B (línea B1, B2, B3, B4) y C (línea C1, C2, C3, C4). Las ventanas de señales estacionarias seleccionadas para cada estación no corresponden a los mismos intervalos de tiempo, por lo que las fuentes de ruido no son las mismas para las estaciones de una sola línea. Con esta información podemos ver qué tan estables son los registros en tiempo en las distintas direcciones

En la figura 4.12 se muestran los tres promedios de cada línea \pm una desviación estándar. Se puede observar que los picos fundamentales de las líneas B y C se encuentran en la misma frecuencia de 0.29 Hz, y con una diferencia mínima de amplitud, de 13.5 para la línea B, y de 13.1 para la línea C. El pico fundamental de la línea A se encuentra en 0.24 Hz con una amplitud de 18.5.

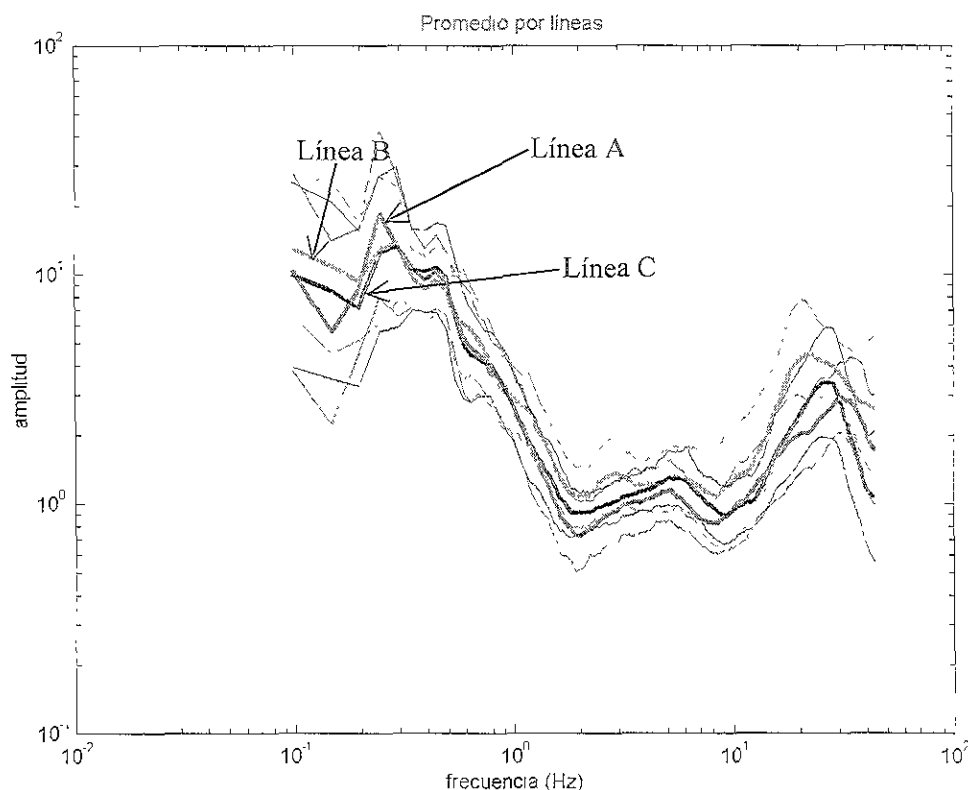


Figura 4.12. Promedios por líneas \pm una desviación estándar, ventanas de 20 segundos, cocientes sv/z.

Las desviaciones estándar tienen un comportamiento muy similar para las distintas líneas: es grande en bajas frecuencias; a partir de 1 Hz comienza a disminuir y se acerca más a los promedios de cada línea. Sólo en la línea B la desviación estándar aumenta en altas frecuencias debido, tal vez, a la gran dispersión de datos y a la saturación de la señal en la estación B3.

Se observa una clara estabilidad de los datos con el tiempo ya que, aun considerando ventanas de tiempo distintas los resultados son muy similares.

Promedios por aberturas (Fig. 4.13)

Para determinar si la aplicación del método de Nakamura nos podía mostrar cierta relación entre la posición de las frecuencias fundamentales y la abertura del arreglo instrumental, se realizaron promedios de cada abertura.

La figura 4.13 muestra el promedio de cada abertura \pm una desviación estándar. Lo primero que llama la atención es que las aberturas 1 y 2 tienen el pico fundamental en la misma frecuencia, 0.24 Hz, sólo que la primera abertura tiene una amplitud de 19.3, y la segunda de 16.9; las aberturas 3 y 4 tienen su pico fundamental en 0.29 Hz con amplitudes de 11.5 y de 14.5, respectivamente.

La desviación estándar de cada uno de los promedios tiene un comportamiento muy similar para las distintas aberturas, sin importar la separación entre estaciones.

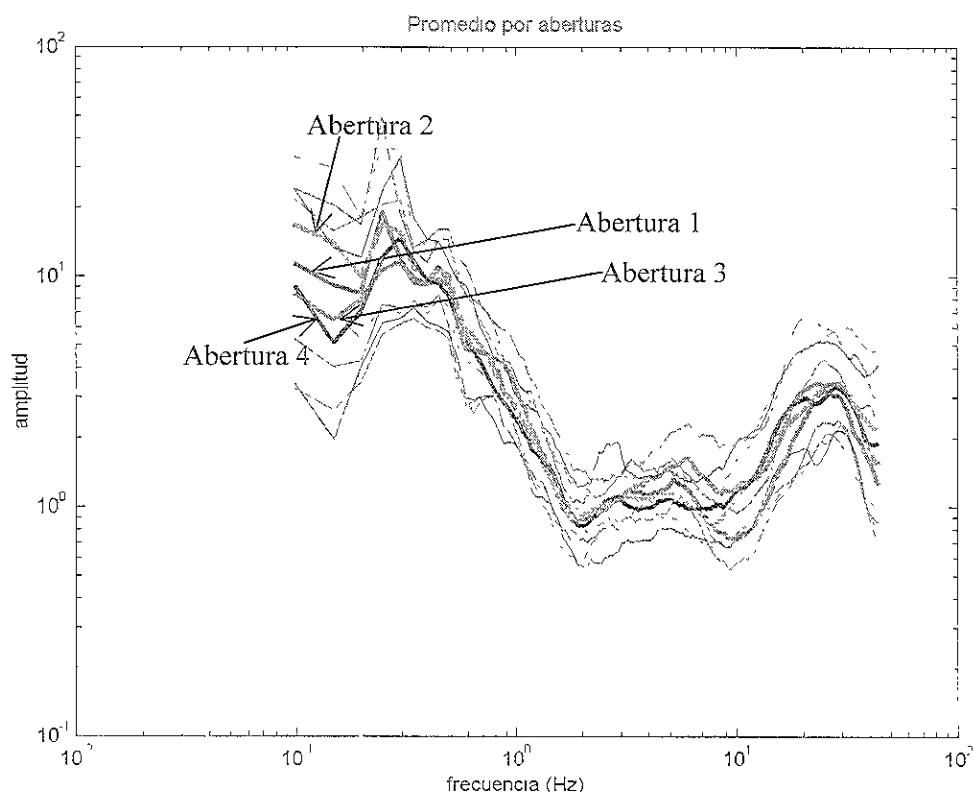


Figura 4.13. Promedios por aberturas \pm una desviación estándar, ventanas de 20 segundos, cocientes sv/z.

Promedio general (Fig. 4.14)

Para asignar una frecuencia fundamental al punto central del arreglo instrumental, se calculó un promedio general con los nueve cocientes de cada estación.

En la figura 4.14 se muestran los promedios de cada estación, organizados por líneas del arreglo instrumental y el promedio general \pm una desviación estándar. La frecuencia del pico principal es 0.24 Hz, y tiene una amplitud de 14.3. La desviación estándar es grande en bajas frecuencias, pero disminuye hacia las altas frecuencias.

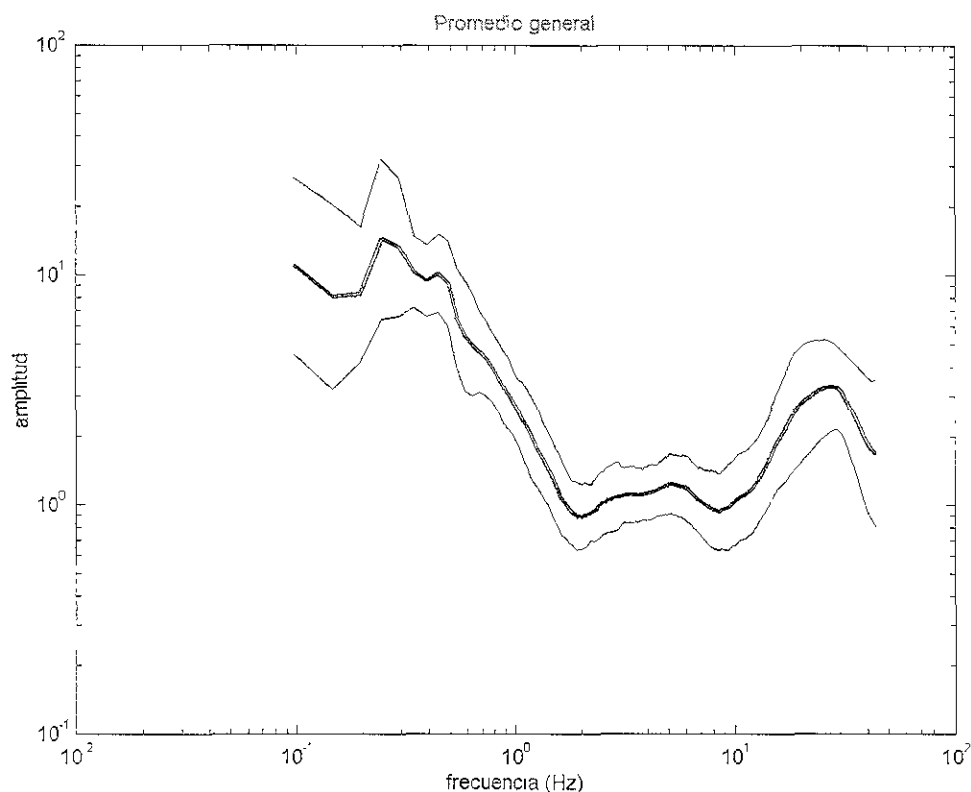


Figura 4.14. Promedio general \pm una desviación estándar, ventanas de 20 segundos, cocientes sv/z.

Con la frecuencia de 0.24 Hz asignada al punto central del arreglo instrumental; y con el espesor de la capa superior de arcillas de 300 metros, dado por Pérez (1988) para el pozo Tulyehualco I, se realiza un cálculo preliminar de velocidad de ondas S de 288 m/s, a partir de la relación:

$$V = h * [4 * f] \quad (4.7)$$

donde, V es la velocidad de ondas S [m/s]; f es la frecuencia en Hz, y h es el espesor de la capa en metros.

De estos tres promedios se puede concluir que las frecuencias fundamentales de los distintos promedios se localizan en una banda de 0.24 a 0.29 Hz, con amplitudes que varían de 11.5 a 19.3.

Respecto a la desviación estándar, se observa un comportamiento muy similar para los distintos promedios: grande en bajas frecuencias, cerca de 1 Hz la desviación estándar disminuye y se acerca a la curva de los promedios, sin embargo, en altas frecuencias vuelve a aumentar.

Si comparamos la gráfica de promedios por aberturas con la gráfica de promedios por línea, podemos ver que la desviación estándar se comporta de manera muy similar cuando se consideran mismas ventanas de tiempo (caso de los promedios por abertura), y cuando se consideran ventanas de tiempo distintas (caso de los promedios por líneas). Esto nos da una idea de la estacionaridad de los registros en tiempo, lo cual es favorable al momento de estimar cocientes espectrales.

Ventanas de 40 segundos

Después de estas observaciones, surgió la inquietud de seleccionar ventanas de tiempo más grandes, y analizar el registro de 40 a 1300 segundos de manera continua. Se decidió tomar ventanas de 40 segundos para cada estación, y realizar los promedios por líneas, por aberturas y un promedio general.

El primer problema que surgió fue la saturación de los registros, por lo que las ventanas saturadas de cada estación se eliminaron. Por otro lado, también se tiene el inconveniente de que, al considerar todo el registro, algunas ventanas incluyen lo que describimos como señales transitorias. Sin embargo, se tiene la ventaja de que el contenido de frecuencias aumenta (comenzando en 0.0488) y de que se definen más picos hacia bajas frecuencias.

Promedios por líneas (Fig. 4.15)

Se observan los picos fundamentales de las tres líneas alineados en 0.22 Hz, con amplitudes de 13.6 para la línea A, de 12.7 para la línea B, y de 6.7 para la línea C.

Para las líneas A y B se observa un pico en 0.073 Hz, con amplitudes de 9.5 y de 10.6, respectivamente. Para la línea C aparece un pico en 0.12 Hz, con amplitud de 4.85. Posteriormente, se observa un pico alineado para las tres líneas, en 0.42 Hz, con amplitudes de 9.18, 8.98 y 6.16 para las líneas A, B y C, respectivamente.

Llama la atención que la amplitud de la línea C es mucho menor a la de las otras dos líneas. Esto puede explicarse porque la estación C3 se eliminó por estar casi completamente saturada en el intervalo de 40 a 1300 segundos; además es posible que su amplitud se vea afectada por algún problema del sensor (que no estuviera bien nivelado, por ejemplo).

Promedios por aberturas (Fig. 4.16)

Los picos fundamentales de las aberturas 1, 2 y 3 se encuentran alineados en 0.22 Hz, con amplitudes de 13.4, 5.8, 14.2, respectivamente. El promedio de la abertura 4, en azul, tiene su máximo en 0.41 Hz, con una amplitud de 5.2; en esta misma frecuencia, las aberturas 1 y 3 muestran un pico con amplitudes de 8.74 y 10.57, respectivamente; muy cercano, se ubica un pico de la abertura 3 en 0.39 Hz, con una amplitud de 5.26.

Al inicio de los promedios, en 0.07 Hz, las aberturas 1 y 4 muestran un pico de 7.53 y 4.8 de amplitud, respectivamente.

Es notorio que las amplitudes de las aberturas 2 y 4 son considerablemente menores que las amplitudes de las aberturas 1 y 3. Este fenómeno no se observó en el promedio por aberturas con ventanas de 20 segundos seleccionadas por su uniformidad, por lo que es posible que la disminución en la amplitud de las aberturas 2 y 4 se deba a la naturaleza de la señal que se considera.

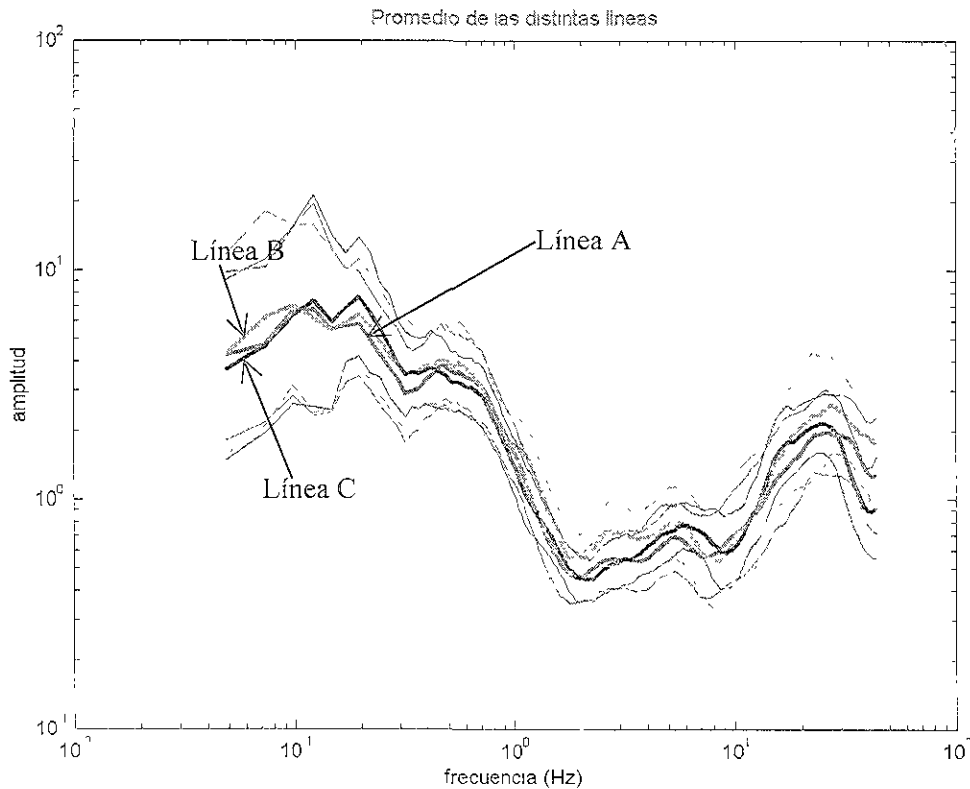


Figura 4.15. Promedios por líneas \pm una desviación estándar, ventanas de 40 segundos, cocientes sv/z.

Promedio general (Fig. 4.17)

El pico fundamental se localiza en 0.22 Hz, con 10.5 de amplitud. Muestra otros dos picos, en 0.41 Hz con 7.95 de amplitud, y en 0.073 Hz con 7.69 de amplitud.

La desviación estándar es grande a lo largo de toda la gráfica. Esto puede explicarse debido a que algunas ventanas incluyeron señales transitorias y estacionarias, por lo que no se puede garantizar la estabilidad del registro.

Si realizamos el mismo cálculo de la velocidad de la primera capa, a partir de la expresión (4.7) y con el espesor de la primera capa reportado por Pérez-Cruz (1988), pero ahora con la frecuencia fundamental de 0.22 Hz, se obtiene una velocidad de 264 m/s.

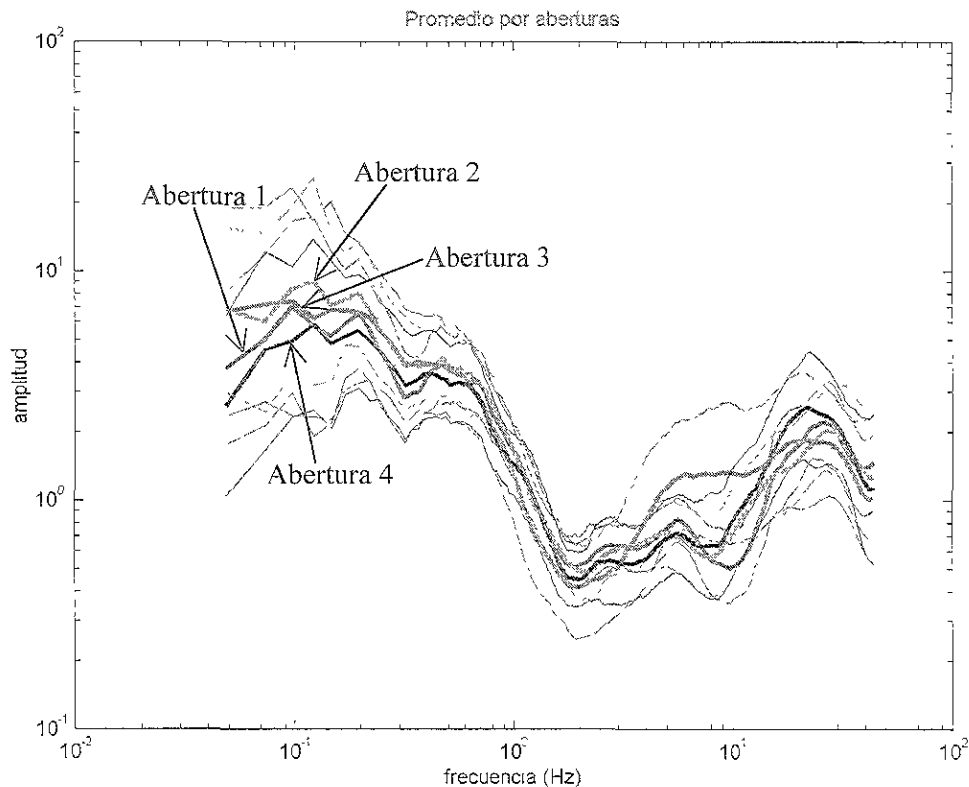


Figura 4.16. Promedios por aberturas \pm una desviación estándar, ventanas de 40 segundos, cocientes sv/z.

Las diferencias entre usar ventanas de veinte segundos y usar ventanas de cuarenta segundos, son las siguientes:

- En el promedio general la frecuencia fundamental se ubicó en 0.22 Hz para las ventanas de cuarenta segundos, y en 0.24 Hz para las ventanas de veinte segundos.
- En el caso de las desviaciones estándar, éstas son mayores cuando se utilizan ventanas de cuarenta segundos, debido a la naturaleza de las señales que se consideran.
- Es muy importante señalar que, cuando se utilizan ventanas de cuarenta segundos, se marca un primer pico en bajas frecuencias que no aparece cuando se consideran ventanas de veinte segundos.

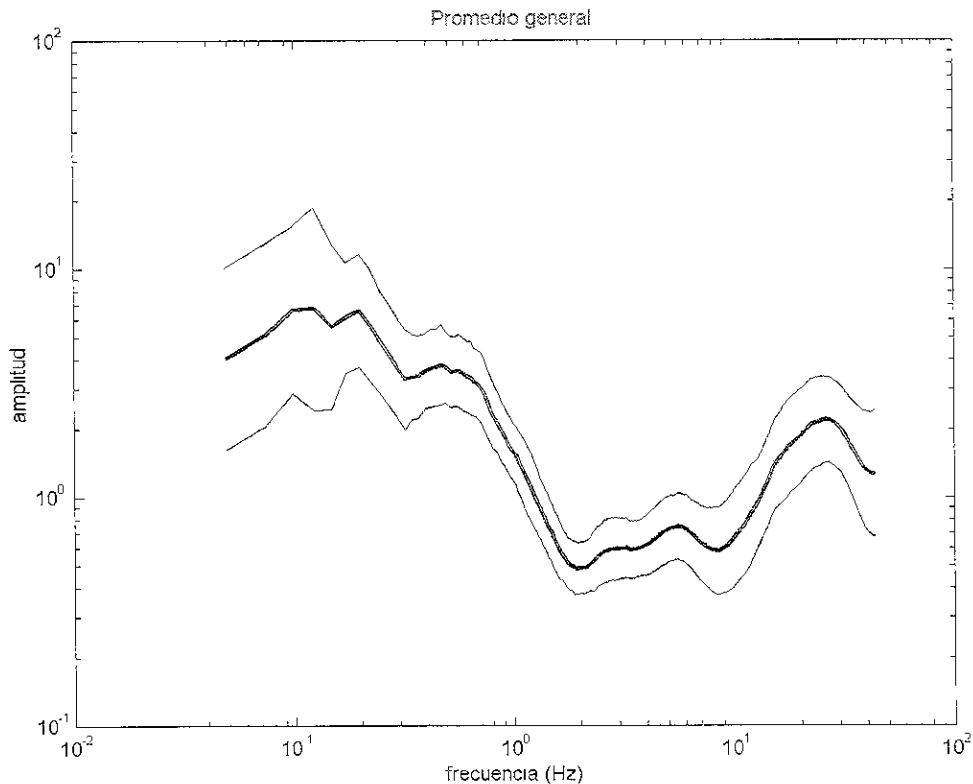


Figura 4.17. Promedio general \pm una desviación estándar, ventanas de cuarenta segundos, cocientes sv/z.

De estas observaciones se puede concluir lo siguiente:

- Es mejor considerar ventanas de cuarenta segundos, ya que el primer pico en bajas frecuencias no se define con las ventanas de veinte segundos.
- Considerando los promedios por aberturas, en los que los picos fundamentales no coinciden, se define una banda de 0.1 a 0.22 Hz. en la que se ubica la frecuencia fundamental del sitio.
- Las pequeñas variaciones en los promedios por líneas y por aberturas nos permiten pensar que no existe gran variación de la señal en ninguna dirección, ni en la distancia máxima entre estaciones.
- Si se considera el pico más grande en bajas frecuencias, la frecuencia fundamental del sitio se puede ubicar en 0.22 Hz.
- Si la frecuencia fundamental se identifica en 0.22 Hz, se obtiene un periodo de 4.5 segundos que se aproxima al obtenido por Lermo y Chávez-García (1994b) en la zona, con datos acelerométricos y de microtremores.

IV.3 Aplicación del método SPAC

El método SPAC se aplicó a dos sitios de la Ciudad de México, primero en Ciudad Universitaria (CU), por ser éste un sitio del cual se conoce el modelo estructural; y en segundo lugar, Tulyehualco con el objetivo de comparar los resultados del método SPAC con los obtenidos con el método de Nakamura. A continuación se explican los experimentos y los resultados obtenidos en ambos sitios.

IV.3 .1 Sitio Ciudad Universitaria

Como se mencionó en el capítulo anterior, los métodos que implican arreglos instrumentales para el registro de microtremores han sido poco utilizados en nuestro país. El caso del método SPAC no es la excepción. Por eso se consideró necesario realizar un prueba sobre su aplicabilidad a la Ciudad de México, en algún sitio del cual se conociera la estratigrafía. Para ello se decidió realizar un arreglo instrumental en CU y aplicar el método SPAC a los registros obtenidos.

En la figura 4.17 se muestra un plano de CU con la ubicación del arreglo y de cada estación. La descripción de la ubicación de las estaciones se realizó en la primera parte de este capítulo.

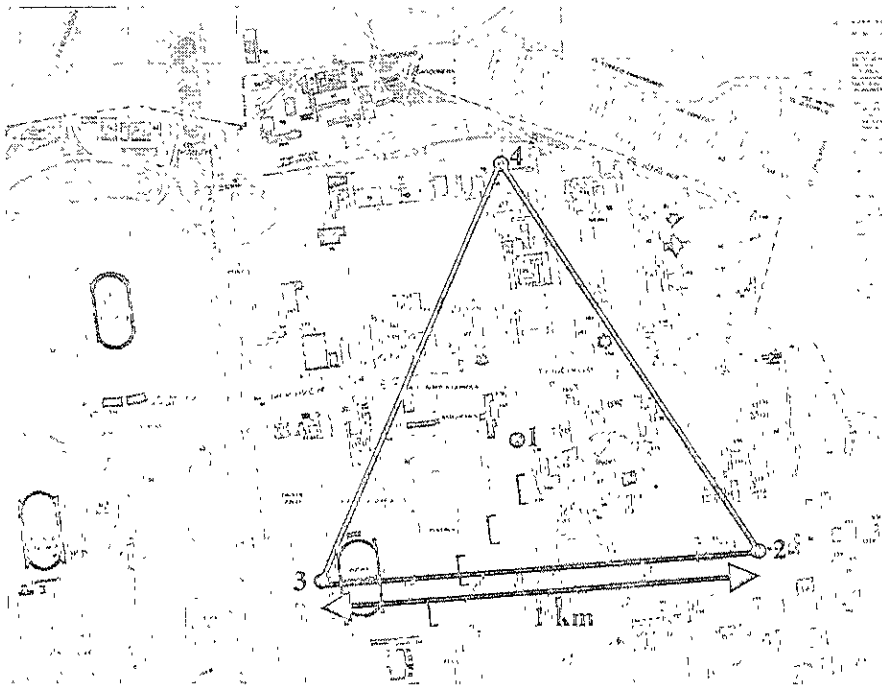


Figura 4.17 Plano de Ciudad Universitaria y ubicación del arreglo instrumental.

El modelo estructural de CU ha sido estudiado por diversos autores (Gutiérrez *et al.*, 1994, Kagawa *et al.*, 1996); sin embargo, en este capítulo se compara el modelo obtenido en este trabajo con el estimado por Kagawa *et al.* (1996) con el método f-k.

El preprocesado de los registros fue similar al realizado para la aplicación del método de Nakamura. Primero se truncaron los registros para tener el mismo tiempo cero de referencia en todas las estaciones, esto es muy importante, ya que el objetivo del método es obtener la mejor correlación entre las señales de las distintas estaciones.

La conversión de unidades, el suavizado, y la obtención de los coeficientes de correlación se realizan con un programa en lenguaje de programación FORTRAN, en el siguiente orden:

- Se leen los archivos de datos truncados con un encabezado que contiene el factor de conversión de unidades.
- Se leen las ventanas de tiempo seleccionadas.
- Se obtienen los espectros de potencia para cada ventana y cada estación (figura 4.18).
- Se calculan los coeficientes de correlación interna y externa para cada estación y cada ventana (figuras 4.19 y 4.20, respectivamente).
- Se promedian los coeficientes de correlación interna y externa para cada ventana (figura 4.21).

Se buscaron las ventanas que tuvieran la mejor correlación, y se seleccionaron seis ventanas de 81.92 segundos ubicadas en 170, 990, 1100, 1440, 1710 y 1960 segundos.

Los espectros de potencia (figura 4.18) para las cuatro estaciones tienen un comportamiento muy similar en bajas frecuencias: muestran casi el mismo nivel de energía. Las diferencias que se observan en altas frecuencias para las distintas estaciones se deben a diferencias en las condiciones superficiales de cada estación; esto es: que la estación 1 estuvo ubicada sobre pavimento, la estación 2 sobre roca, la estación 3 en una zona empedrada y la 4 sobre tierra.

En la figura 4.19 se presentan los coeficientes de correlación entre las estaciones de los vértices y la estación central (correlación interna). En la figura 4.20 se muestran los coeficientes de correlación de cada ventana entre las estaciones de los vértices, se observa que tienen un comportamiento muy estable de 0.0 a 0.5 Hz.

En la figura 4.21 se tienen los promedios de la correlación interna, y la correlación externa para cada ventana. De nuevo se observa que la correlación externa tiene un comportamiento más estable que la correlación interna, lo que se refleja en la curva de dispersión obtenida a partir de ésta.

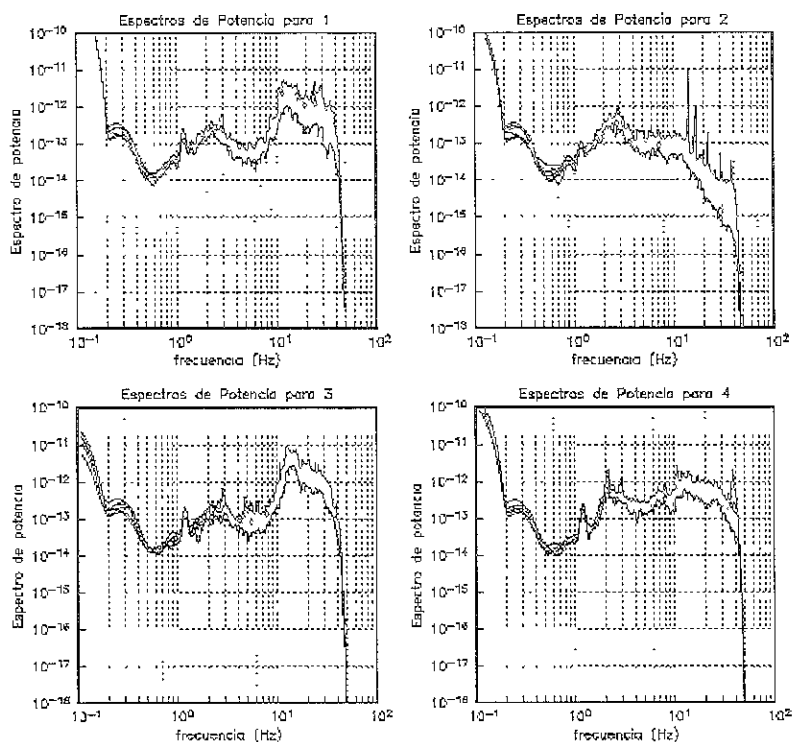


Figura 4.18 Espectros de potencia de cada estación. Arreglo CU.

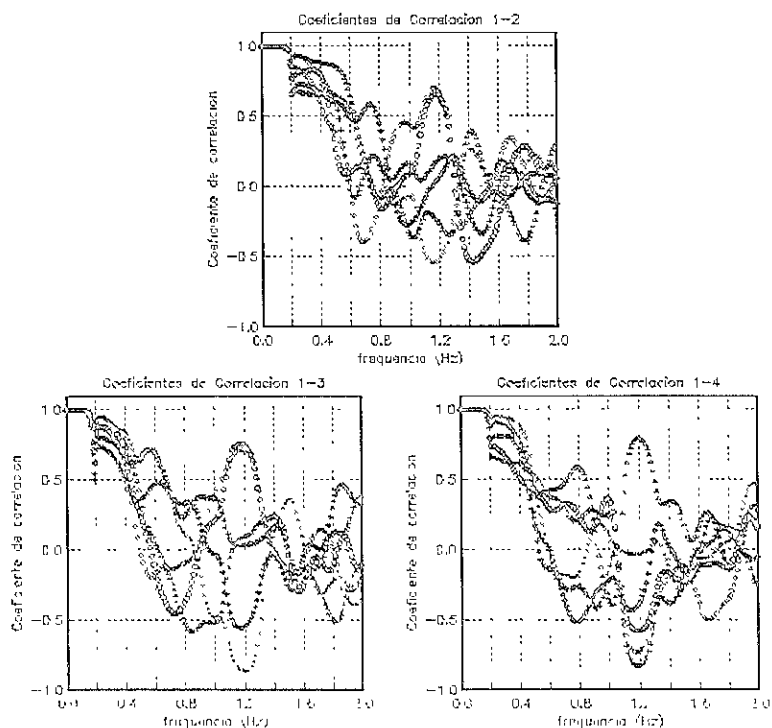


Figura 4.19 Coeficientes de correlación interna. Arreglo CU. Los símbolos indican los coeficientes de correlación entre cada una de las ventanas de registro seleccionadas

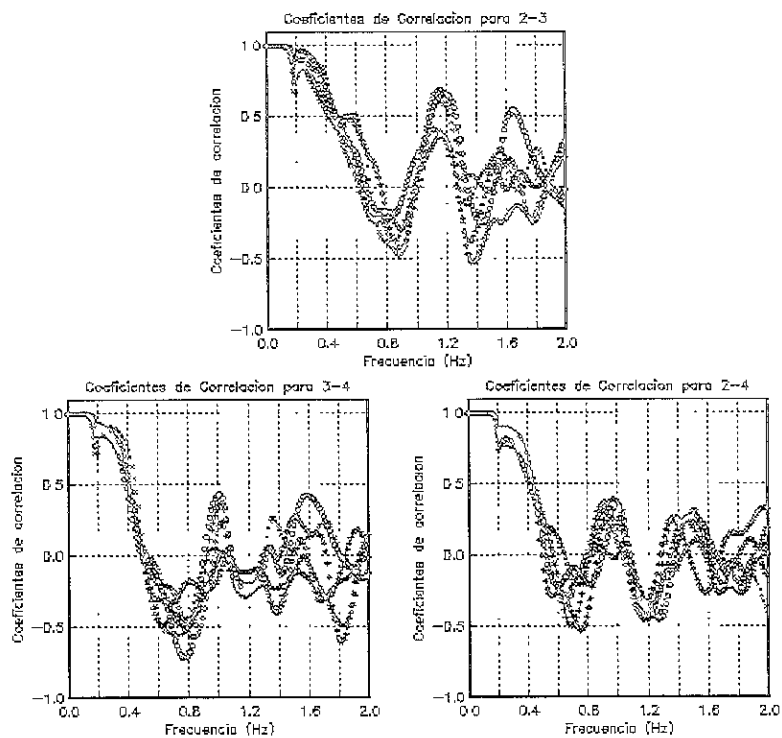


Figura 4.20. Coeficientes de correlación externa. Arreglo CU. Los símbolos indican los coeficientes de correlación entre cada una de las ventanas de registro seleccionadas.

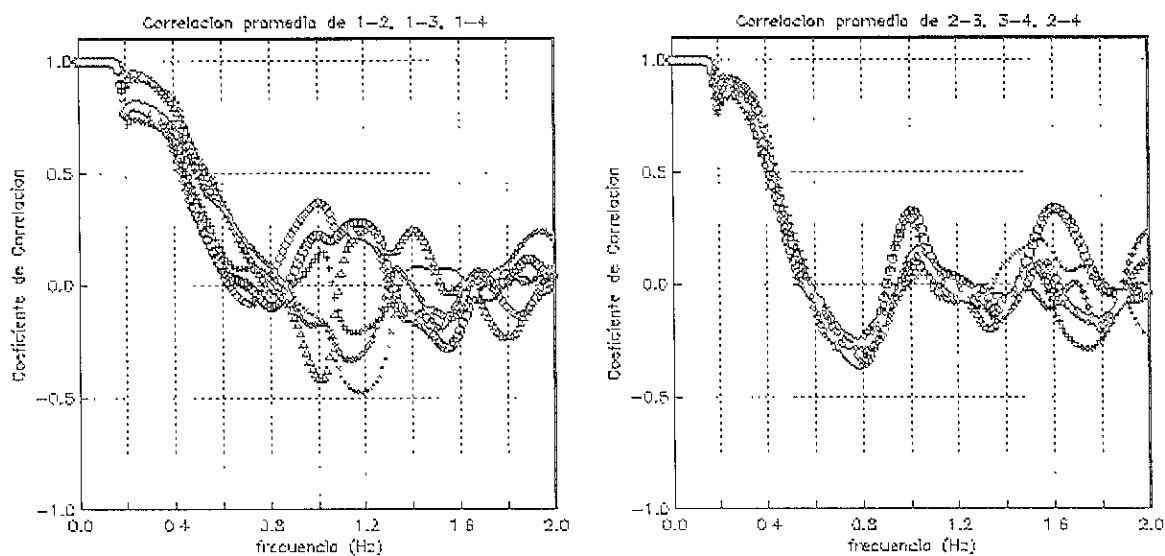


Figura 4.21. Coeficientes de correlación interna y externa promediados. Arreglo CU. Los símbolos indican los promedios de los coeficientes de correlación promediados para cada una de las ventanas de registros seleccionadas.

A partir de los coeficientes de correlación promediados (figura 4.21), se obtienen las velocidades de fase para la correlación externa y para la interna, que se muestran en la figura 4.22:

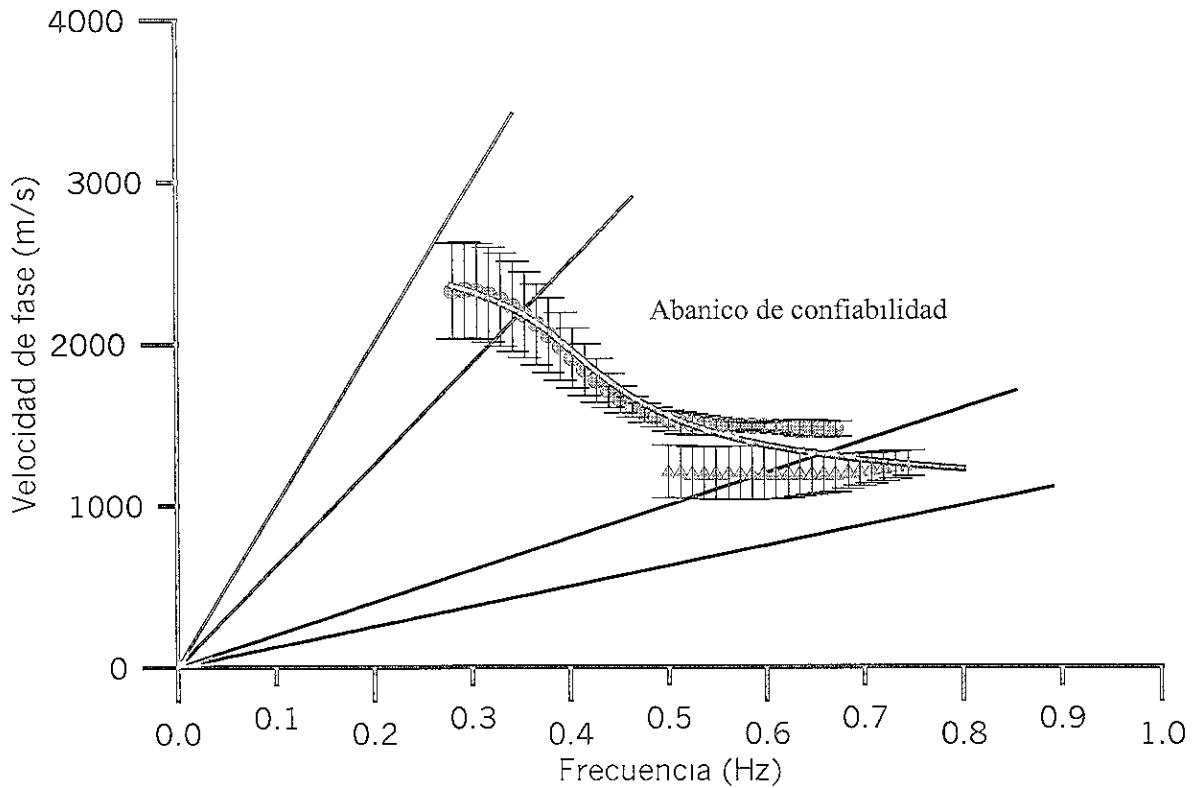


Figura 4.22. Curvas de dispersión obtenidas, y abanicos de confiabilidad. Los círculos indican la curva de dispersión obtenida a partir de la correlación externa. Los triángulos indican la curva de dispersión obtenida a partir de la correlación interna. Las barras indican la desviación estándar. La curva es el modelo de velocidades ajustado. Las líneas rectas indican los abanicos de confiabilidad para las curvas de dispersión obtenidas con la correlación externa e interna.

Los círculos son los obtenidos con la correlación externa y su desviación estándar; los triángulos son los obtenidos con la correlación interna. Las líneas muestran el abanico de confiabilidad para cada correlación. La curva continua es el modelo estructural obtenido a partir de la curva de dispersión de la correlación externa para las capas más profundas, y de la correlación interna para las capas más superficiales. El modelo se muestra en la tabla 4.2, y en la figura 4.23.

Kagawa *et al.* (1996) obtuvieron el modelo estructural de CU a partir de registros de 4 arreglos de microtemores, utilizando el método f-k. El modelo de Kagawa *et al.* (1996) tiene diez capas que definen con más detalle la parte superficial del terreno. En la figura 4.24 se comparan las curvas de dispersión obtenidas con el método SPAC (línea continua), y la obtenida por Kagawa *et al.* (1996) con el método f-k (línea discontinua)

Lo primero que se observa es que con el método SPAC se obtiene mayor densidad de muestras en el dominio de las frecuencias, lo que permite un mejor ajuste del modelo teórico y la curva de dispersión experimental. Por otro lado, las desviaciones estándar para el método SPAC son del mismo orden, e incluso, en algunos intervalos, son menores que las obtenidas con el método f-k.

Espesor (m)	Densidad (t/m³)	Velocidad Ondas P (m/seg)	Velocidad Ondas S (m/seg)
116	2.0	1630	804
530	2.0	2500	1263
700	2.2	3100	1500
700	2.2	4500	2153
∞	2.5	5600	3000

Tabla 4.2. Modelo de velocidades encontrado a partir de la curva de dispersión de la figura 4.22.

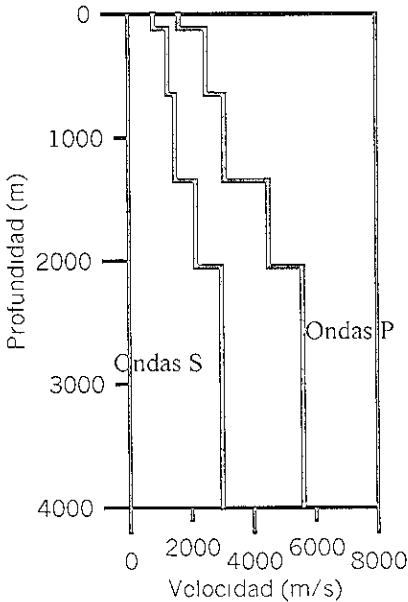


Figura 4.23. Modelo de velocidades encontrado.

La diferencia más notable es que con el método f-k se definen con más detalle las capas superficiales; sin embargo, con el método SPAC se obtiene una aproximación muy buena de la velocidad del estrato más superficial. Esto es más claro en la gráfica que muestra los modelos de velocidades obtenidos con uno y otro método (figura 4.25).

En la figura 4.25 se muestran el modelo obtenido con el método SPAC (línea continua), y el obtenido con el método f-k (línea discontinua). Se observa que los valores de velocidad

son similares para los modelos obtenidos con cada método, y que realmente lo que cambia son los espesores de las capas.

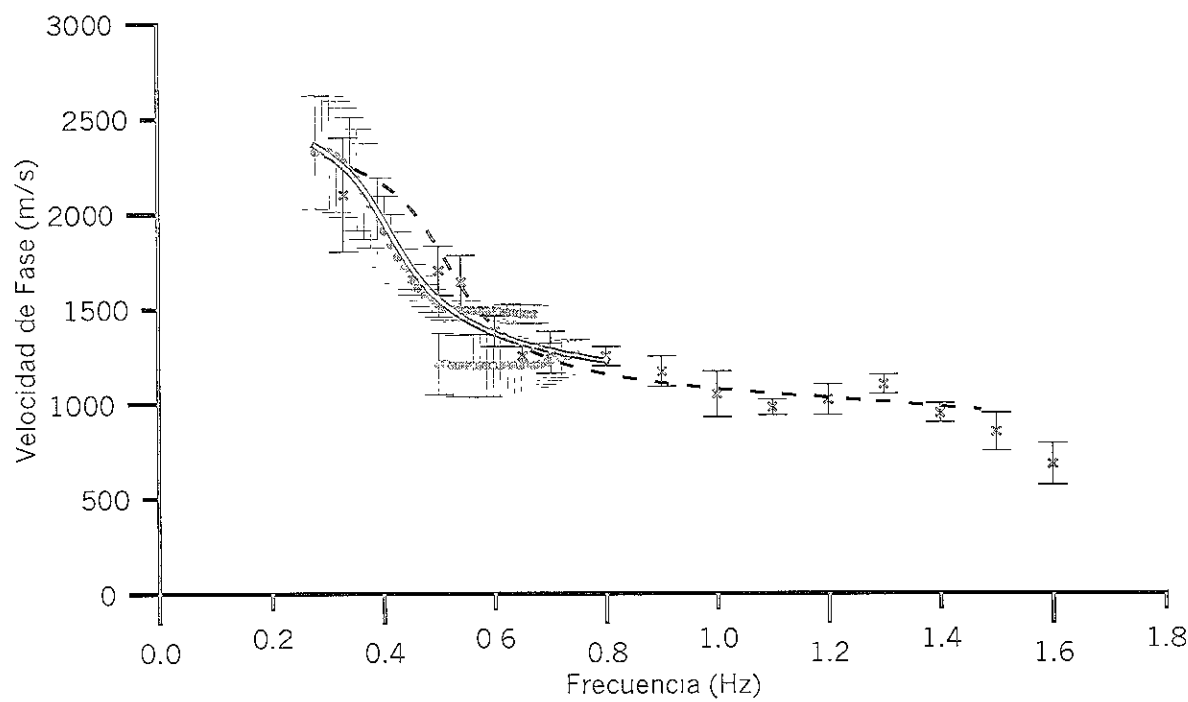


Figura 4.24. Comparación de las curvas de dispersión obtenidas con el método SPAC (círculos y línea continua) y el método *f-k* (cruces y línea discontinua).

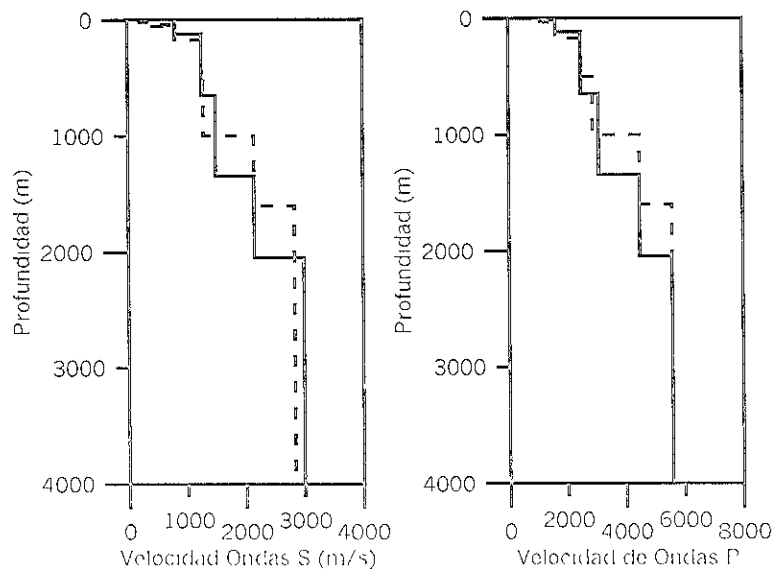


Figura 4.25. Comparación de los modelos de velocidades estimados con el método SPAC (línea continua) y con el método *f-k* (línea discontinua).

El método SPAC tiene varias ventajas sobre el método f-k:

- ❖ Requiere de menos estaciones, para el método SPAC el mínimo son tres estaciones, y para el método f-k el mínimo son siete estaciones.
- ❖ Se obtiene mayor densidad de muestras en el dominio de las frecuencias, lo que permite un mejor ajuste del modelo.
- ❖ Con un número de arreglos menor, se obtiene la misma cantidad de información (con SPAC se requirió de un arreglo para obtener lo que se obtuvo con tres arreglos utilizando el método f-k).

Con este experimento se comprobó que los datos obtenidos con los instrumentos disponibles eran útiles para el objetivo de este trabajo, y que el programa para el análisis de los mismos funcionaban correctamente.

IV.3.2 Sitio Tulyehualco

Para la aplicación del método SPAC en Tulyehualco fue necesario realizar un arreglo más grande al que originalmente se había dispuesto con cuatro estaciones y tres aberturas.

En la primera campaña se realizó un arreglo instrumental de tres estaciones, con cuatro aberturas de 34 (A1, B1, C1), 69 (A2, B2, C2), 138 (A3, B3, C3), 276 (A4, B4, C4) metros de distancia entre estaciones (figura 4.26).

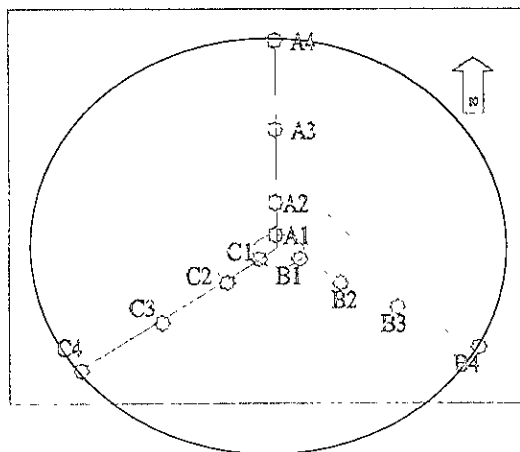


Figura 4.26. Primer arreglo instrumental de Tulyehualco, con tres estaciones y cuatro aberturas de 20, 40, 80 y 160 metros.

Para guardar la misma nomenclatura entre las estaciones de los arreglos para los cuales se aplica el método SPAC, las estaciones se renombran de la siguiente forma: a las

estaciones de la línea A se les llamará 2.1, 2.2, 2.3, 2.4; a las estaciones de la línea B, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4; y, a las estaciones de la línea C, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4.

El procesado fue el mismo que se realizó para los datos de CU. Para cada estación se buscaron las ventanas de registro que tuvieran mejor correlación, se obtuvieron sus espectros de potencia, los coeficientes de correlación entre estaciones y, por último, la curva de dispersión correspondiente.

En general se observa que los espectros de potencia de los registros en las tres estaciones de cada abertura son más o menos estables en bajas frecuencias; por otro lado, los coeficientes de correlación muestran cierta dispersión hacia bajas frecuencias (figuras 4.27 a 4.34).

Cuando se obtiene la curva de dispersión (figura 4.35) y los abanicos de confiabilidad para cada abertura se observan los problemas generados por la distancia tan corta entre estaciones. Para la primera abertura (34 metros) solamente 2 puntos (cruces) entran en el abanico de confiabilidad y, hacia altas frecuencias, los puntos se ubican sobre la línea que define el intervalo de confiabilidad, por lo que no se toman en cuenta. Para la segunda abertura (69 metros) (triángulos), de nuevo son muy pocos los puntos dentro del intervalo de confiabilidad, y los quiebres de la curva de dispersión están fuera de este intervalo.

En la curva de dispersión de la tercera abertura (138 metros) (equis) se puede hacer una aproximación de la velocidad superficial si consideramos que los puntos en altas frecuencias tienden asintóticamente a ésta, que es de 255 m/seg. En la curva de dispersión de la cuarta abertura (276 metros) (círculos) se puede ver al menos un quiebre, lo que indica información sobre capas más profundas. Sin embargo la información, aún no es suficiente para definir un modelo estructural del sitio.

Por esta razón se realizó otro arreglo en la misma zona, pero esta vez con una distancia de 800 metros entre estaciones. Este arreglo se ubicó lo más cercano posible al arreglo realizado con anterioridad, y se logró que los centros de uno y otro arreglo se colocaran muy cerca, como se muestra en la figura 4.36.

El procesado de las señales fue el mismo que se realizó para los dos arreglos anteriores: se truncaron las señales, se obtuvieron las ventanas con mejor correlación, sus espectros de potencia, las correlaciones interna y externa y, por último, la curva de dispersión.

Las ventanas de datos para el arreglo de Tulychualco de 800 metros se ubicaron en 720, 820, 920, 1020 y 1120 segundos, y fueron las que mejor correlación presentaron.

Si se observa de nuevo el mapa de localización (figura 4.36), la estación 1 se ubica sobre depósitos lacustres, pero muy cerca del límite con el aluvión; la estación 2 se encuentra sobre depósitos lacustres, muy cerca de la orilla de la Laguna de los Reyes Aztecas; la estación 3 sobre depósitos volcánicos y, la estación 4 se localiza sobre el aluvión.

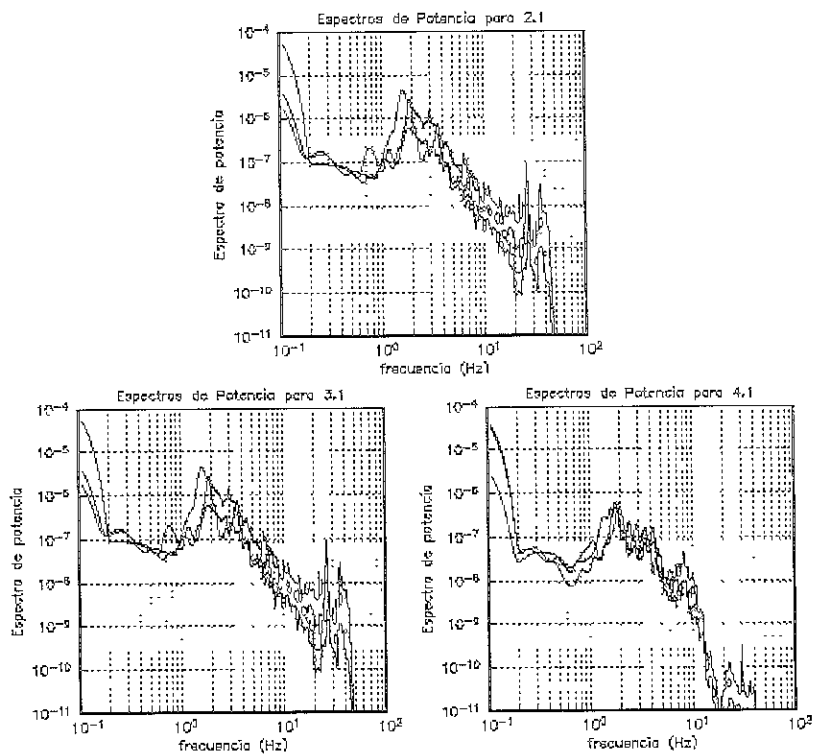


Figura 4.27. Espectros de potencia para las ventanas de registro seleccionadas de la primera abertura.

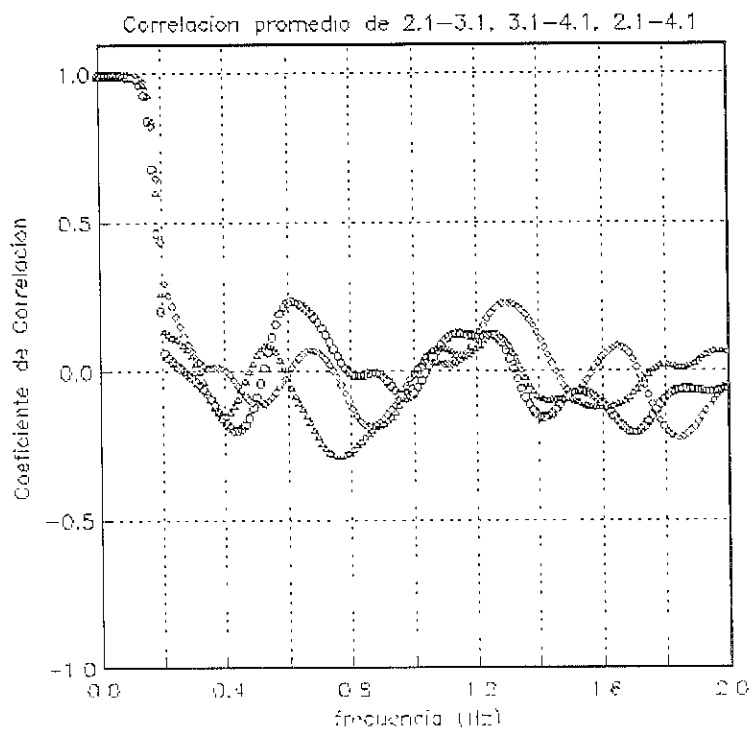


Figura 4.28. Coeficientes de correlacion promediados, primera abertura.

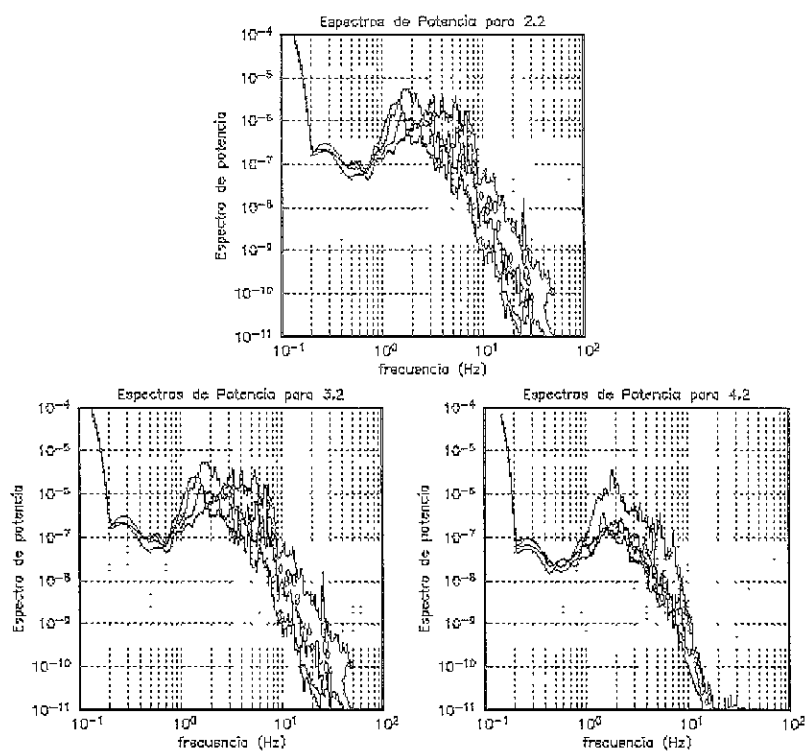


Figura 4.29. Espectros de potencia para las ventanas de registro seleccionadas de la segunda abertura.

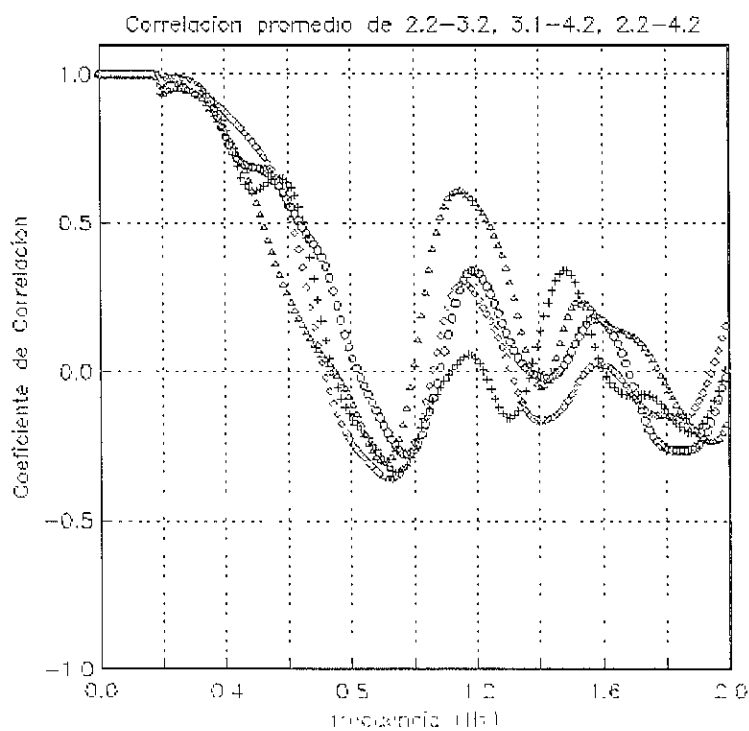


Figura 4.30. Coeficientes de correlación promediados, segunda abertura

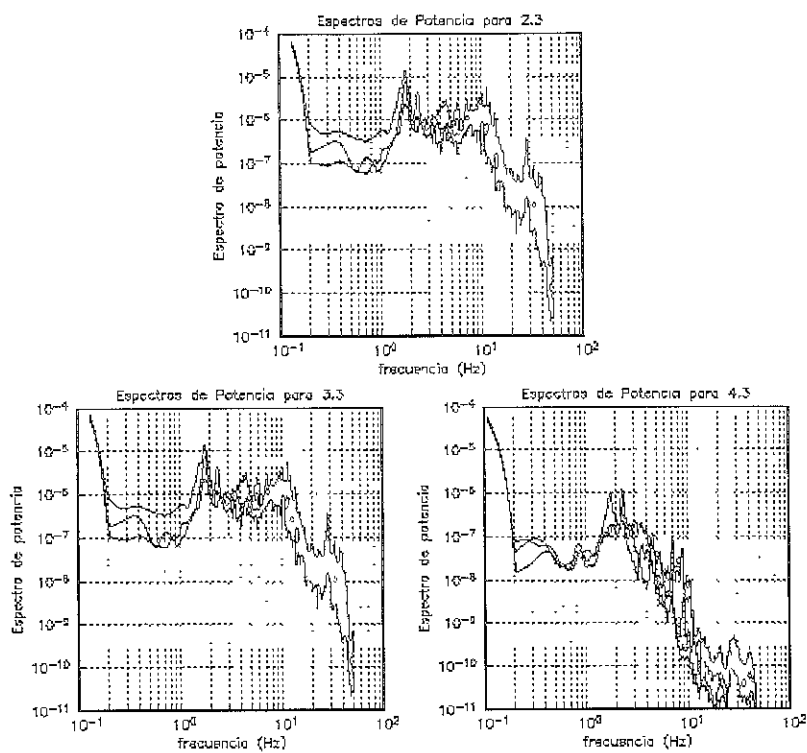


Figura 4.31. Espectros de potencia para las ventanas de registro seleccionadas de la tercera abertura.

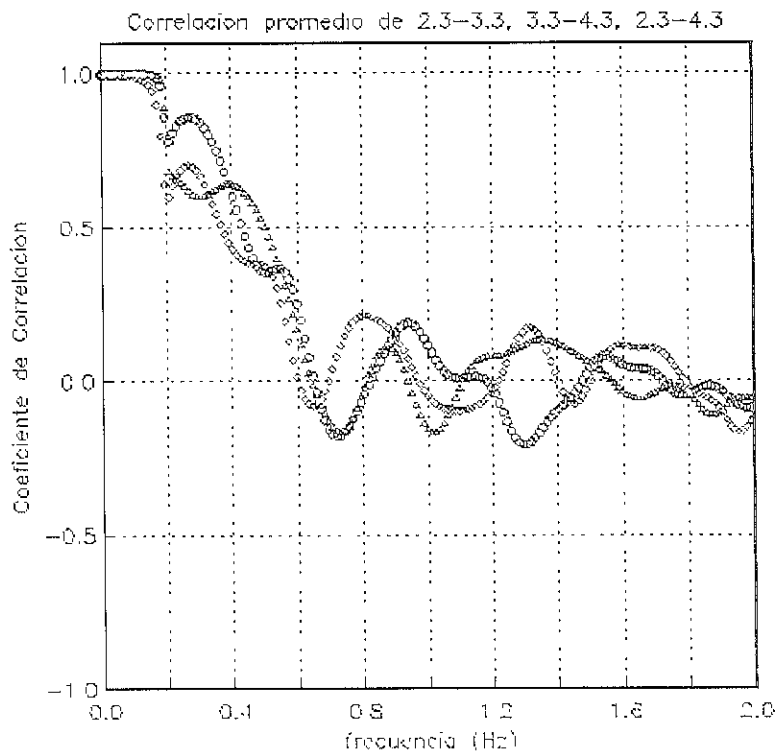


Figura 4.32 Coeficientes de correlación promediados, tercera abertura.

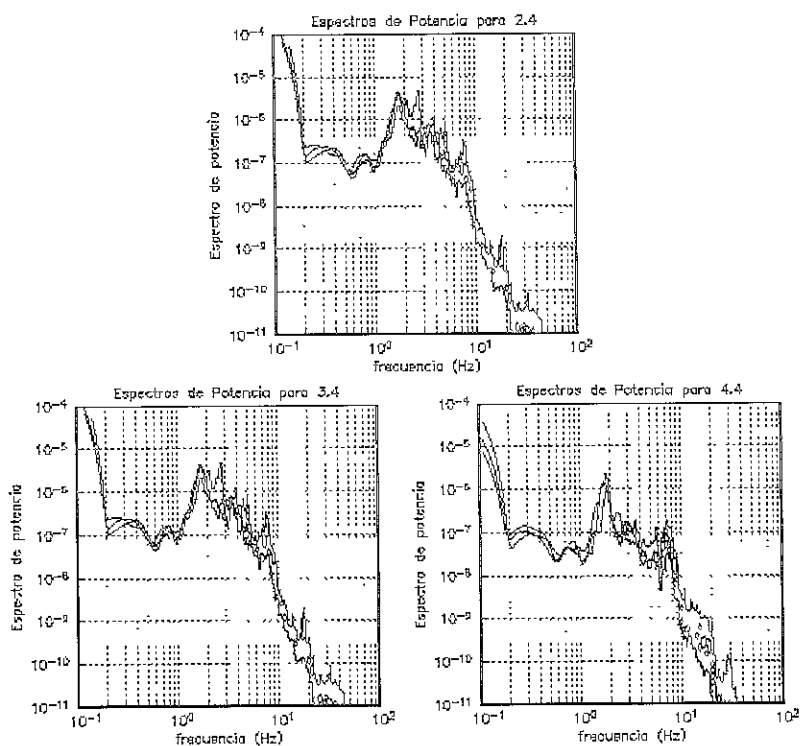


Figura 4.33. Espectros de potencia para las ventanas de registro seleccionadas de la cuarta abertura.

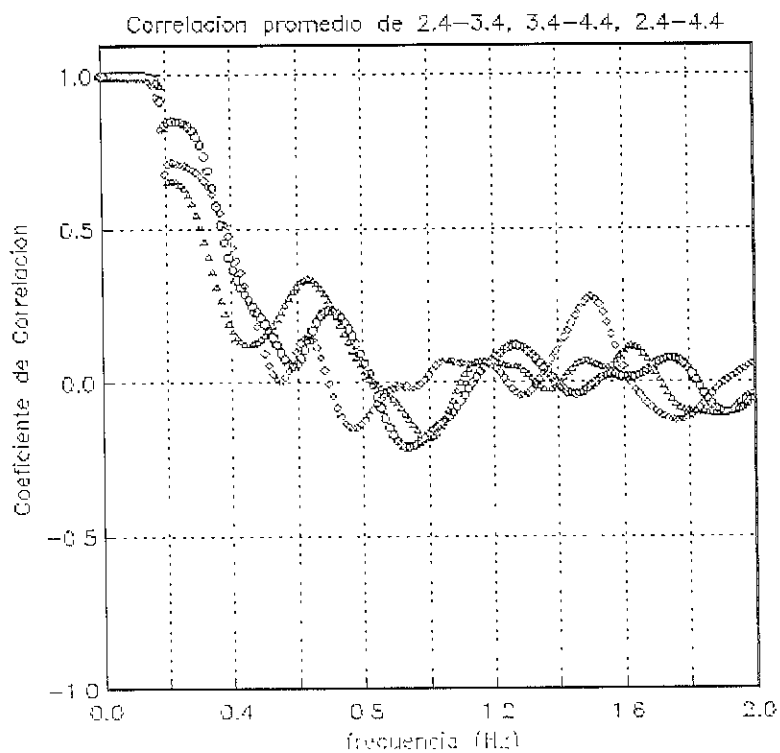


Figura 4.34 Coeficientes de correlacion promediados, cuarta abertura.

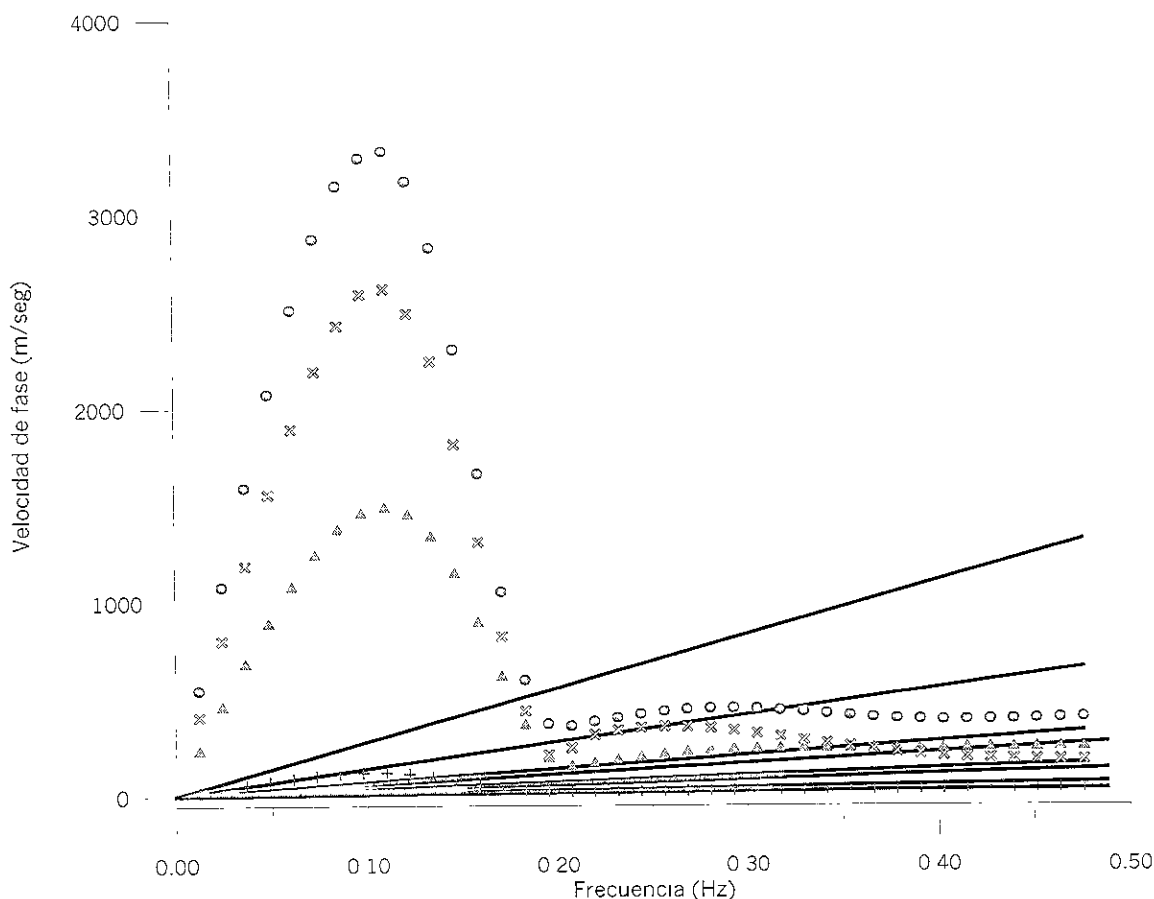


Figura 4.35. Curvas de dispersión obtenidas del primer arreglo de Tulyehualco. Las cruces indican la curva obtenida a partir de la primera abertura; los triángulos la curva obtenida a partir de la segunda abertura; las x's indican la curva obtenida a partir de la tercera abertura; y, los círculos la curva obtenida a partir de la cuarta abertura.

La diferencia de litología entre las estaciones se refleja en los espectros de potencia obtenidos (figura 4.37). En la estación 1 (depósitos lacustres en el límite con el aluvión) el comportamiento de los espectros no es muy estable; los espectros de potencia de la estación 2 (en depósitos lacustres) son los que se presentan mayor dispersión; los espectros de la estación 3 (en depósitos volcánicos, cerca del límite con el aluvión) vuelven a expresar cierta dispersión y, los espectros de la estación 4 (sobre el aluvión) son los que muestran mayor estabilidad.

En la figura 4.39 se observa que las únicas estaciones que se correlacionan son la 1 y 2, aunque su correlación no es muy estable. Por otro lado, en la figura 4.40 sólo las estaciones 3 y 4 tienen buena correlación, y muestran un comportamiento más estable de 0.0 a 0.4 Hz.

Las estaciones se correlacionan bien por pares, por un lado las estaciones 1 y 2, que están sobre depósitos lacustres; y por otro, la 3 que posiblemente esté en el límite de los depósitos volcánicos con el aluvión e incluso sobre éste (figuras 4.39 y 4.40) y la 4 que está sobre aluvión.

La diferencia de litología entre las estaciones explica las correlaciones por pares observadas; además las estaciones 3 y 4 se encontraban cerca de construcciones pequeñas (casas de una planta o un piso) que pueden haber causado una compactación del suelo, y por tanto un comportamiento distinto ante las ondas superficiales.

Para obtener la curva de dispersión (figura 4.42), sólo se tomaron en cuenta las correlaciones de las señales de las estaciones 1-2 y 3-4 (figura 4.41), la primera con la distancia R_{\min} de 462 metros (triángulo grande) y la segunda con R_{\max} de 800 metros (triángulo pequeño).

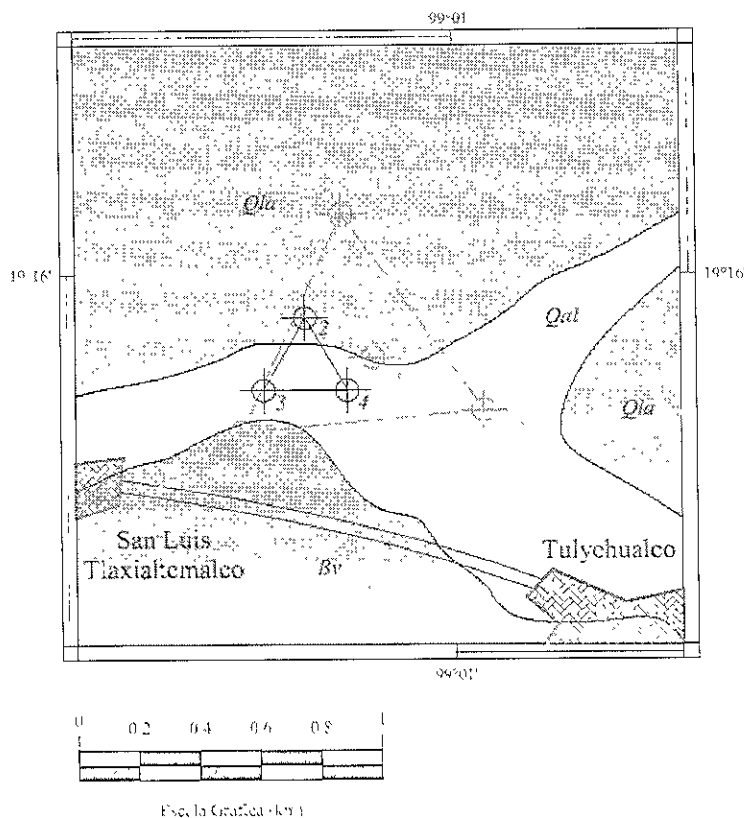


Figura 4.36. Mapa de ubicación de los dos arreglos de Tulychualco.

Si consideramos que hacia altas frecuencias las curvas de dispersión tienden asintóticamente a la velocidad de los estratos más superficiales, la correlación externa (círculos) define la velocidad del aluvión de 1000 m/seg aproximadamente; y la correlación interna (triángulos) define la velocidad de los depósitos lacustres de 500 m/seg aproximadamente. Estos valores de velocidad son muy altos, aun para el tipo de litología que se tiene; sin embargo, hay que recordar que sólo se están considerando dos estaciones para cada correlación (1-2 para la correlación interna, y 3-4 para la correlación externa), pero, cualitativamente, se observa que para el aluvión la velocidad es mayor que para los depósitos lacustres.

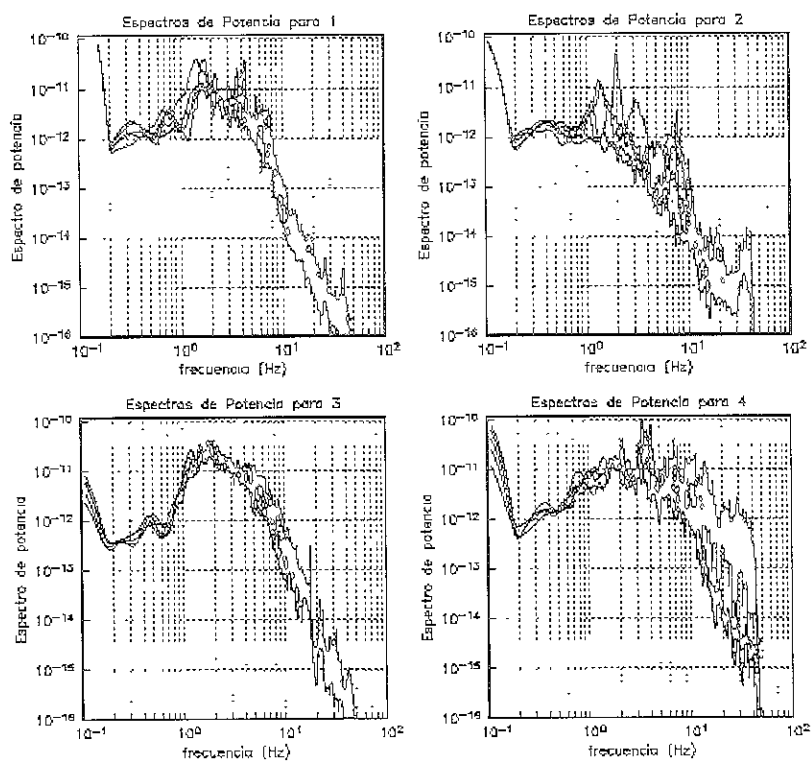


Figura 4.38. Espectros de potencia para cada estación.
Arreglo Tulyehualco 800 m.

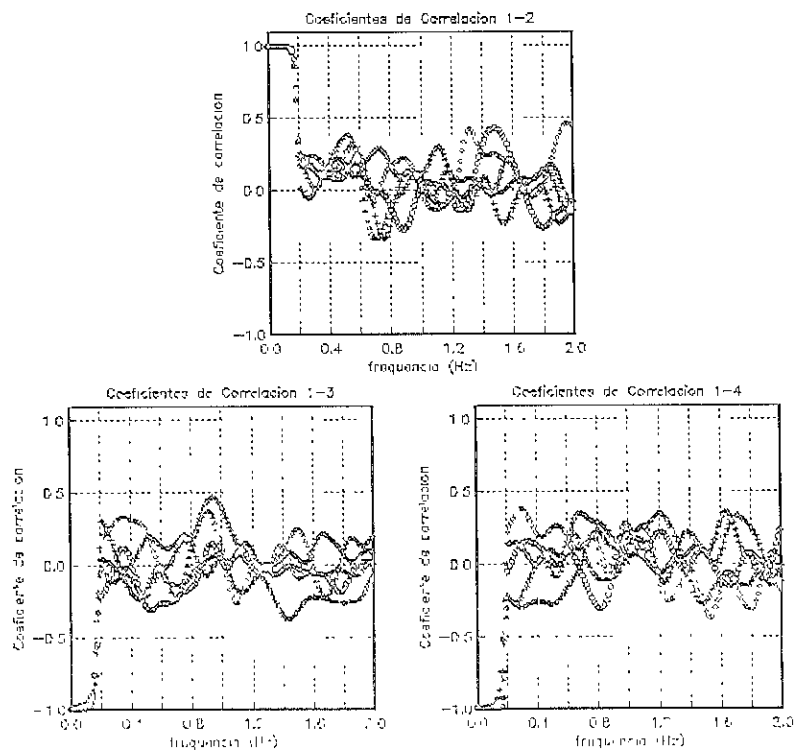


Figura 4.39. Coeficientes de correlacion interna para cada ventana
Arreglo Tulyehualco 800 m.

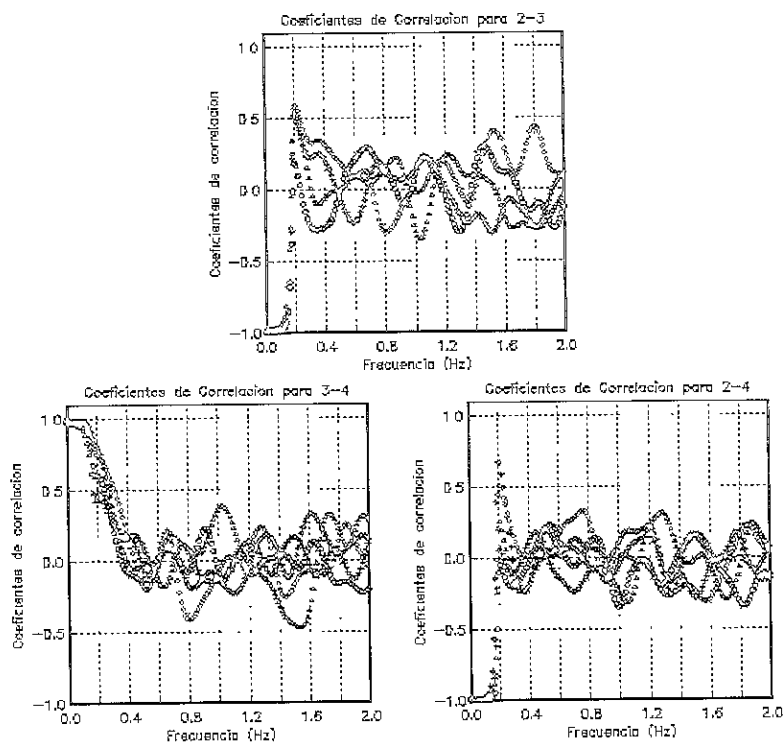


Figura 4.40. Coeficientes de correlación externa para cada ventana.
Arreglo Tulyehualco 800 m.

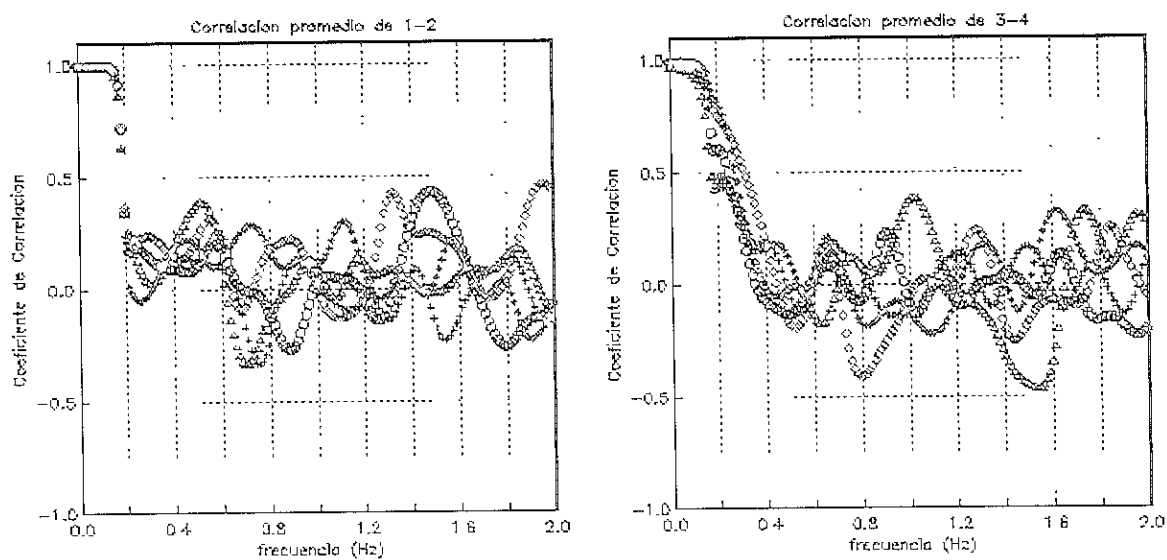


Figura 4.41. Coeficientes de correlación interna y externa promediados.
Arreglo Tulyehualco 800 m.

El método SPAC se aplicó a dos sitios de la Ciudad de México con características geológicas y estratigráficas distintas: CU que está ubicada sobre material volcánico y Tulyehualco, ubicado en la zona del antigua Lago de Xochimilco y con unidades litológicas diferentes dentro del mismo arreglo instrumental.

En el experimento de CU todos los resultados fueron más estables y más fáciles de obtener, precisamente porque todas las estaciones se localizaron dentro de una misma unidad litológica de material volcánico lo que fue de gran ayuda para la obtención del modelo estructural.

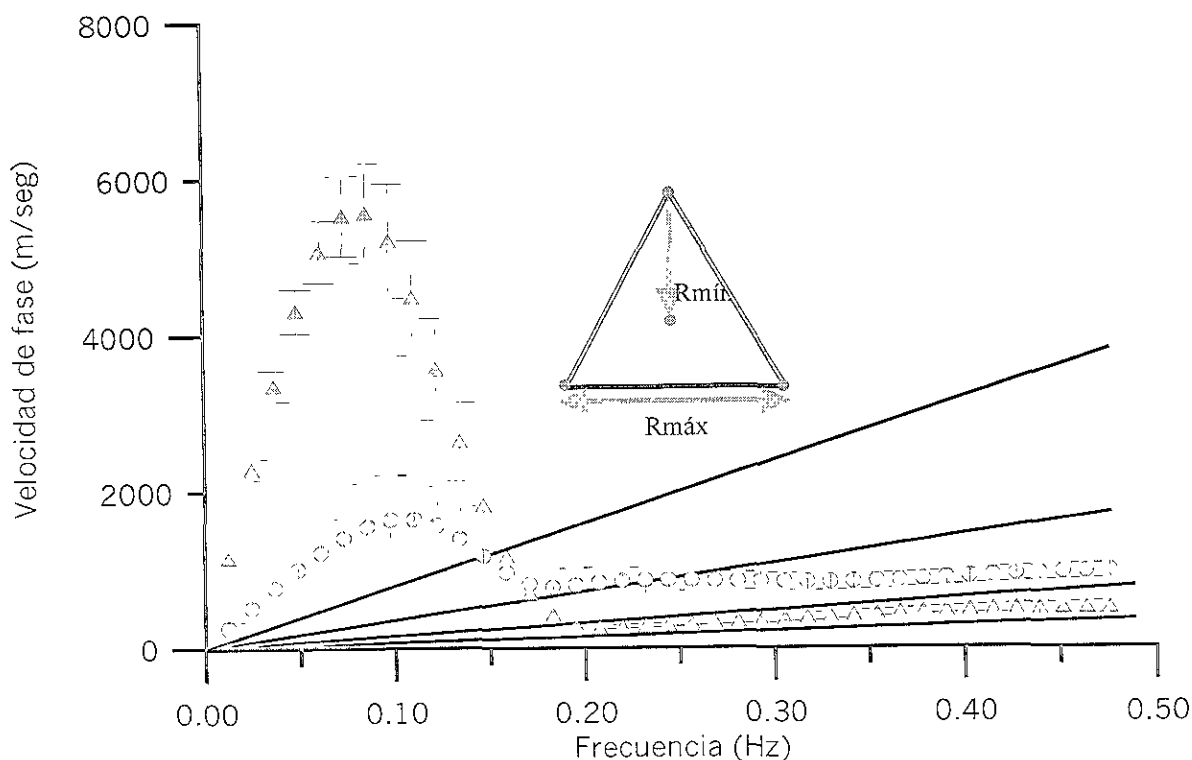


Figura 4.42 Curvas de dispersión obtenidas del arreglo de Tulyehualco 800 m. Los triángulos indican la curva de dispersión obtenida a partir de la correlación interna; los círculos indican la curva de dispersión obtenida a partir de la correlación externa.

Sin embargo en Tulyehualco surgieron varios problemas, el primero fue con los datos ya existentes de la primera campaña de microtremores, ya que la distancia de los arreglos fue muy pequeña; lo que no permitió la obtención del modelo estructural.

Posteriormente, se trató que el arreglo instrumental de 800 metros en Tulyehualco se ubicara lo más cerca posible al arreglo realizado con anterioridad, lo que ocasionó que las estaciones se ubicaran en unidades litológicas distintas, y esto provocó los problemas con

los coeficientes de correlación que se explicaron anteriormente de manera que la información obtenida no fue suficiente para obtener el modelo estructural.