

*Institut Français de Recherche
Scientifique pour le Développement
en Coopération (ORSTOM)*
Representación en el Ecuador

Instituto Geofísico
Escuela Politécnica Nacional
Quito

INFORME DE ACTIVIDADES

MICROZONIFICACIÓN DE QUITO (ECUADOR)

Philippe Guéguen
Cooperante ORSTOM

bajo la dirección de
Jean-Luc Chatelain y
Bertrand Guillier

julio de 1997



Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : *Ax 18139* Ex : *uniquo*

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de amplificación del movimiento sísmico, provocados por las características geológicas, se conocen desde hace varios años. Se ha observado que los daños generados por un sismo son en general mayores en las zonas de relleno o de depósitos sedimentarios que en la roca, debido básicamente a que las ondas sísmicas se entrapan en la capa sedimentaria por el contraste de impedancia entre las capas superficiales y el substrato. Las interferencias entre esas ondas atrapadas provocan fenómenos de resonancia cuyas características son definidas por las propiedades mecánicas y geométricas de la estructura (Bard & Bouchon, 1985).

En el campo espectral, tales fenómenos de resonancia presentan en general varios picos. La frecuencia de estos últimos depende principalmente del espesor y de la velocidad de las ondas de cizalladura de la capa de sedimentos, como lo muestra la siguiente fórmula (en el caso de un modelo de 1 dimensión): $F_0 = V_{S1}/4H$ para el modo fundamental y $F_n = (2n + 1) * F_0$ para los diferentes modos armónicos de vibración (en donde V_{S1} es la velocidad de las ondas S en la capa superficial y H su espesor). El valor de la frecuencia fundamental puede variar entre 0,2 Hz (en el caso de depósitos muy espesos como en Los Ángeles y Tokio, o en el de materiales muy «blandos» como en México) y más de 10 Hz (en el caso de depósitos finos como los depósitos aluviales o de rocas alteradas). La amplitud de esos picos depende principalmente de los contrastes de impedancia entre sedimento y substrato, del coeficiente de amortiguamiento de los sedimentos y en menor medida de las características de campo de onda incidente (tipo de ondas, ángulo de incidencia, campo cercano, campo lejano...). Así, en un modelo de 1 dimensión, la amplitud de la frecuencia fundamental puede definirse como $A_0 = 1 / (1/C + 0,5 \pi \xi_1)$ —donde C es el contraste de impedancia $\rho_2 \cdot V_{S2} / \rho_1 \cdot V_{S1}$, ρ_i es la densidad del medio i, siendo i 1 para los sedimentos y 2 para el substrato; ξ_1 es el coeficiente de amortiguamiento de los sedimentos—. Esta fórmula muestra que para un amortiguamiento muy reducido ($\xi_1 = 0$), la amplificación máxima es únicamente función del contraste de impedancia.

El movimiento de suelo registrado durante un sismo será entonces tanto más amplificado para la frecuencia de resonancia cuanto mayor sea la amplificación. Este fenómeno es uno de los más importantes puesto que la mayoría de

ciudades están construidas sobre rellenos aluviales y, en las zonas sísmicas, se pueden citar numerosos ejemplos como la bahía de San Francisco, Los Ángeles, Tesalónica (Grecia), Caracas, Lima, Bogotá, Tokio y, evidentemente, México. Innumerables estudios y observaciones post-sísmicos han permitido mostrar que estos fenómenos de amplificación pueden acarrear aumentos de intensidad de más de 2 ó 3 grados (escala MM o MSK). Sus efectos, en ocasiones dramáticos en el medio urbano, han suscitado entonces numerosas experimentos y estudios (investigaciones numéricas, instrumentales, afinación y comparación de técnicas para tomar en cuenta esos fenómenos...).

En este sentido, el objetivo de este trabajo es realizar los estudios de comportamiento del suelo ante movimientos sísmicos dentro de los límites de Quito, capital del Ecuador. Esta ciudad presenta una elevada sismicidad y, por su importancia económica, política y demográfica, dispone de medios importantes para considerar y evaluar el riesgo en general. Para ello, se utilizaron tres métodos distintos que emplean movimientos fuertes y ruido: el método tradicional de las relaciones espectrales entre una estación en suelo blando y una estación de referencia, y el método de las relaciones horizontales sobre las verticales por una parte con movimientos fuertes y, por otra, con ruido. Así, fue posible comparar los resultados obtenidos mediante los tres métodos a fin de validar el método principal del estudio. Este, método llamado de Nakamura (1989), permitió cubrir toda la ciudad con el objetivo de definir la frecuencia de resonancia de los diferentes suelos de Quito y precisar la amplificación del movimiento de suelo en caso de sismo.

Por otro lado, la particular configuración de Quito genera pequeños valles estrechos y profundos los cuales, por falta de espacio urbanizable, son casi sistemáticamente rellenos con materiales diversos y variados. Un estudio complementario consiste en definir la respuesta de esos valles según su modo de relleno y el material correspondiente mediante el método de Nakamura. Se escogieron varios ejemplos, en colaboración con Alexis Sierra, geógrafo del ORSTOM, quien trabaja sobre el riesgo urbano y en particular sobre ese tipo de estructuras que provocan importantes catástrofes en la ciudad (hidrológicas en general), con el fin de mejorar el conocimiento del riesgo en Quito.

PARTE 1: QUITO, CAPITAL DEL ECUADOR

1.1. Contexto geográfico y socioeconómico

Quito, capital del Ecuador, está situada en el flanco oeste del valle interandino, entre 0°7' y 0°30' de latitud Sur y 78°45' y 78°6' de longitud Oeste (Figura 1). Borneado al Oeste por el volcán Pichincha y al Este por la depresión de Los Chillos (figura 2), la ciudad no deja de crecer, desde el punto de vista tanto de la población como de la superficie. Mientras en 1990 la población alcanzaba 1,1 millón de habitantes para una superficie de 290 km², las previsiones estiman para el año 2000 una población de 3 millones de habitantes y para 2.020 de 3,5 millones (EPN, 1994, 1996; Chatelain *et al.*, 1994, 1995). La especial configuración de la ciudad limita la extensión de su superficie esencialmente hacia el Norte y el Sur, al igual que en las pendientes del Pichincha hasta alturas del orden de los 3.300 m.s.n.m. Una de las consecuencias de tal crecimiento es el relleno de numerosos pequeños valles, en especial en la vertiente Oeste, a fin de aumentar la superficie urbanizable de la ciudad.

La importancia de este crecimiento al igual que el papel político y económico de la capital justifican la importancia de los medios utilizados para el estudio del riesgo, particularmente del riesgo sísmico en medio urbano.

1.2. Contexto sísmo-tectónico

El Ecuador se sitúa entre 2° de latitud Norte y 5° de latitud Sur y 76° y 81° de longitud Oeste, en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana (figura 3). En estas latitudes, la placa de Nazca se sumerge bajo la placa Sudamericana, con una tasa de convergencia del orden de los 78 mm por año. La convergencia es oblicua, con un ángulo de subducción del orden de 25° al Norte de 1°5 de latitud Sur y de 15° al Sur de esa latitud (EPN, 1994).

Esta configuración ha acarreado, acarrea y acarreará numerosos sismos. Desde 1541, han tenido lugar algunos que han provocado muchos daños, con magnitudes estimadas que pueden alcanzar 8 (figura 4) — EPN, 1994.

Durante los últimos 460 años, Quito ha experimentado sismos de intensidades superiores a 6 al menos en 23 ocasiones. Los más fuertes han sido los de 1587,

Figura 1 - Ubicación de las dos ciudades principales del Ecuador: Quito y Guayaquil

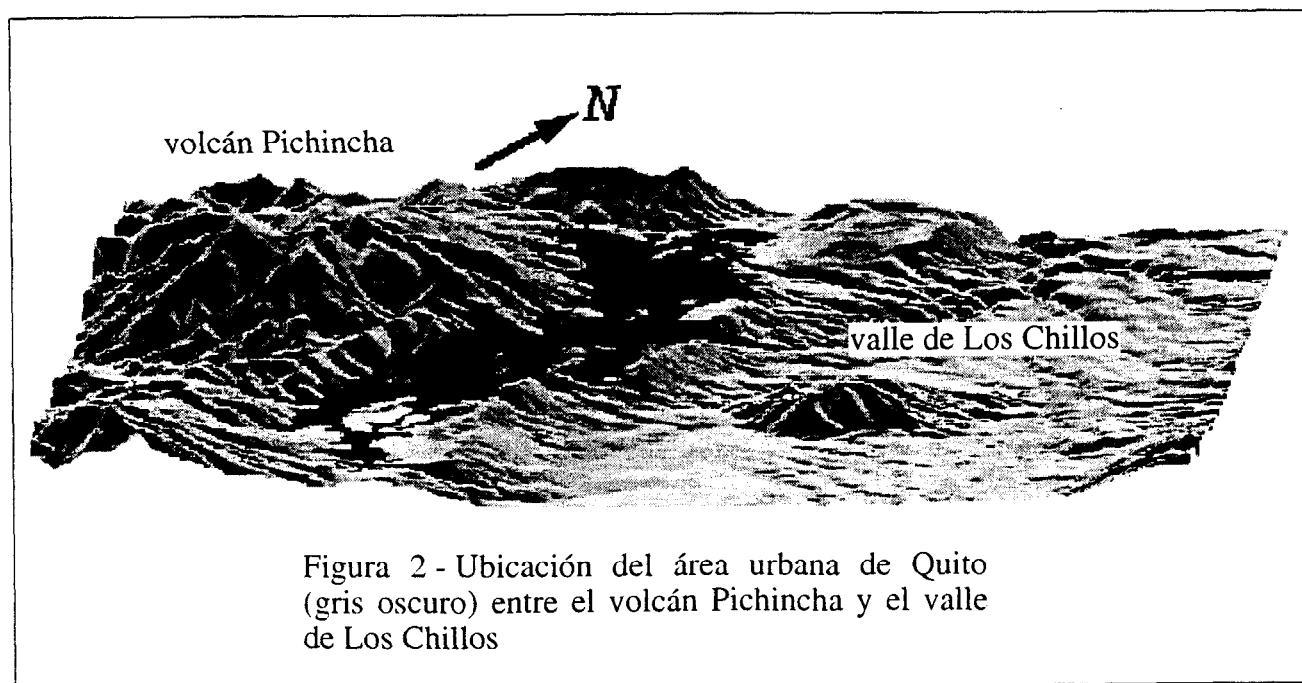
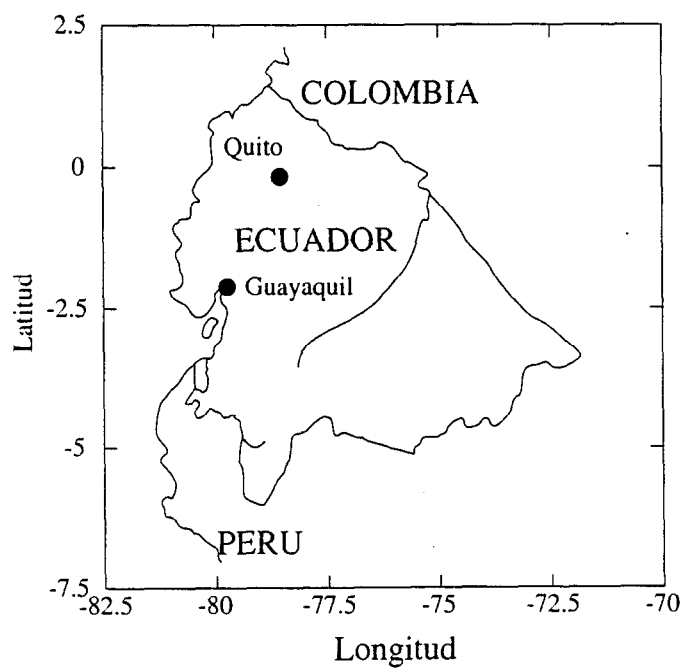


Figura 2 - Ubicación del área urbana de Quito (gris oscuro) entre el volcán Pichincha y el valle de Los Chillos

Figura 3 - Mapa del contexto tectónico a nivel del Ecuador

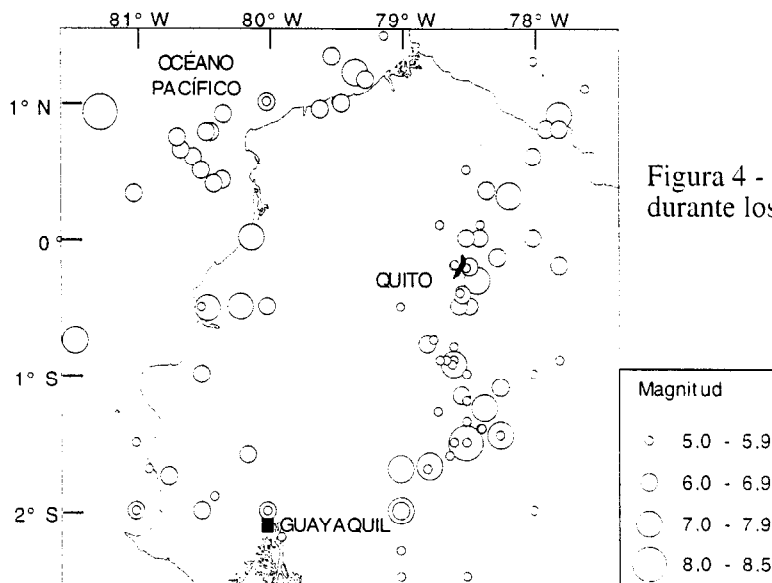
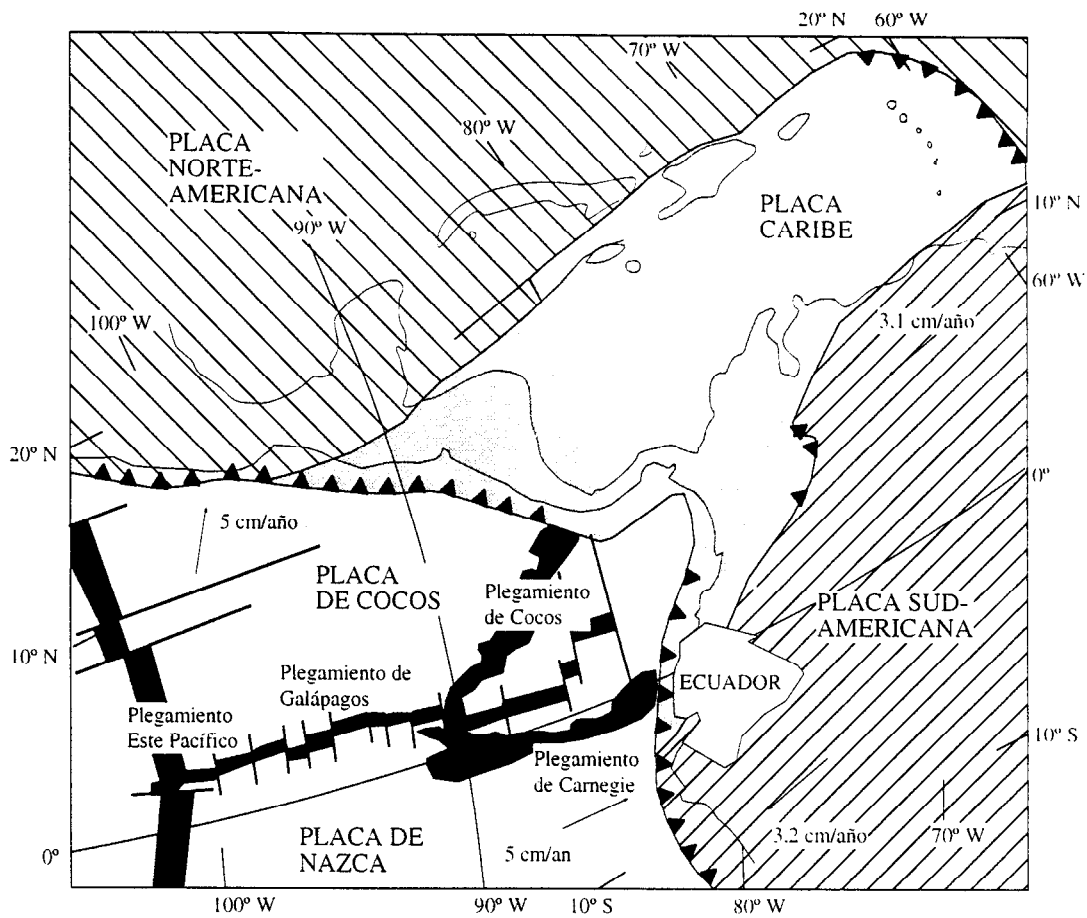


Figura 4 - Sismicidad histórica en el Ecuador durante los últimos 460 años

1755, 1797, 1868 y 19949 que se produjeron sobre varias fallas de la región interandina y provocaron intensidades superiores a 7 en la ciudad (EPN, 1994).

Los sismos más recientes son los de 1987 ($M_s = 6.2$) y 1990 ($M_s = 4.9$), que permanecen en la memoria de los habitantes como los más fuertes que han afectado a la capital. En realidad, la sismicidad histórica muestra que el riesgo sísmico puede alcanzar magnitudes más elevadas.

1.3. Geología de Quito

Las principales formaciones presentes en la ciudad (figura 5) provienen de materiales de origen volcánico o inducidos por movimientos de tierra provocados por la escarpada configuración de Quito (EPN, 1994). Se observan así hacia el Norte rellenos sedimentarios de aproximadamente 200 m de espesor, constituidos esencialmente de productos de origen volcánico y de materiales provenientes de los flancos del Pichincha. A nivel de La Carolina, a lo largo del perfil 2, aparece una formación superficial compuesta de sedimentos lacustres, particular a este sector de Quito. Estos rellenos tienden a atenuarse hacia el perfil geológico 3 donde el espesor de los materiales producidos por la erosión activa de las laderas del Pichincha alcanza apenas unos 50 m. Esta zona corresponde al punto más alto del fondo del valle de Quito. Finalmente se tiene el Sur de la ciudad, caracterizado por sedimentos de 100-150 m de espesor a lo largo del perfil geológico 4.

La geología superficial fue definida mediante observaciones de superficie y geomorfológicas, así como por medio de excavaciones y perforaciones realizadas en la ciudad (EPN, 1994). Se la puede descomponer en tres zonas distintas: los flancos del Pichincha (F), la depresión central (L) y los flancos orientales (Q) —figura 6—. Cada zona está dividida en subzonas en función de su composición y su modo de formación. Principalmente, la depresión central está constituida de depósitos lacustres que cubren en parte formaciones de cangahua, en espesores que pueden alcanzar algunos centenares de metros. Un estudio reciente (Alvarado, 1996) revela a nivel del sector de La Carolina (formaciones 14 y 13n) depósitos fluvio-lacustres, muy marcados por el drenaje de las aguas de escurrimiento provenientes de las laderas del Pichincha y por un nivel turboso hacia los 45 m, confirmando así la existencia de una antigua laguna. Es interesante anotar que la mayor parte de aguas de escurrimiento de

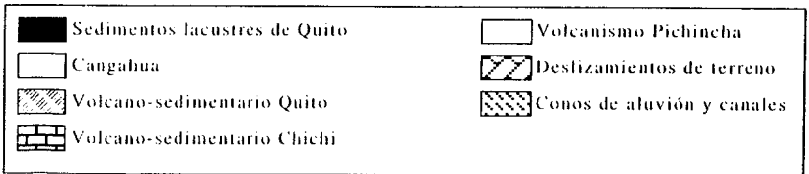
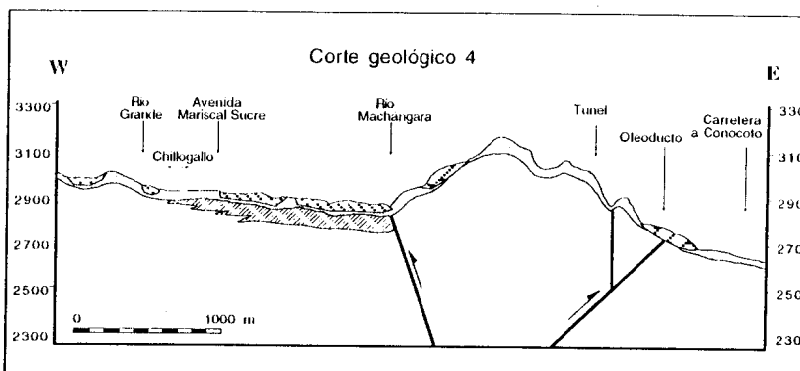
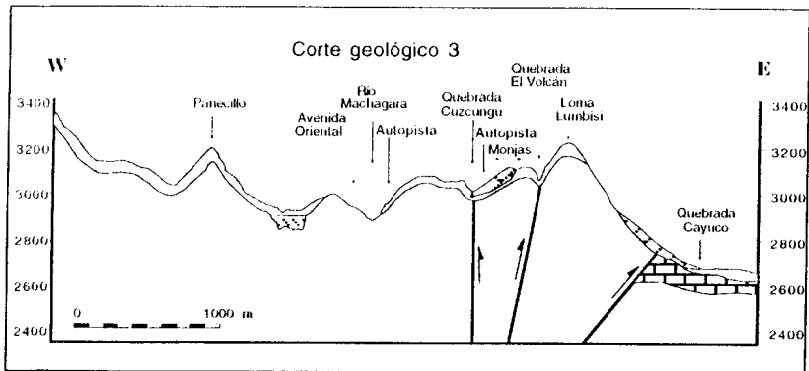
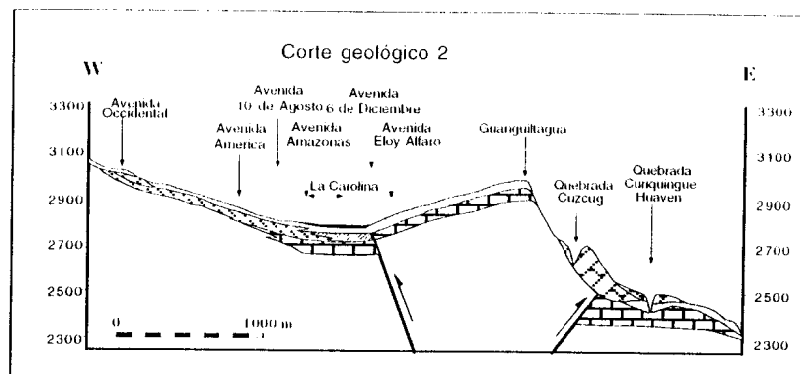
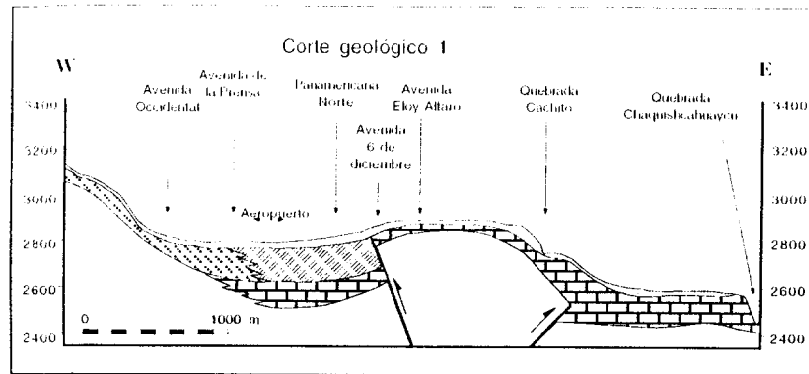


Figura 5 - Perfiles geológicos en la zona de Quito

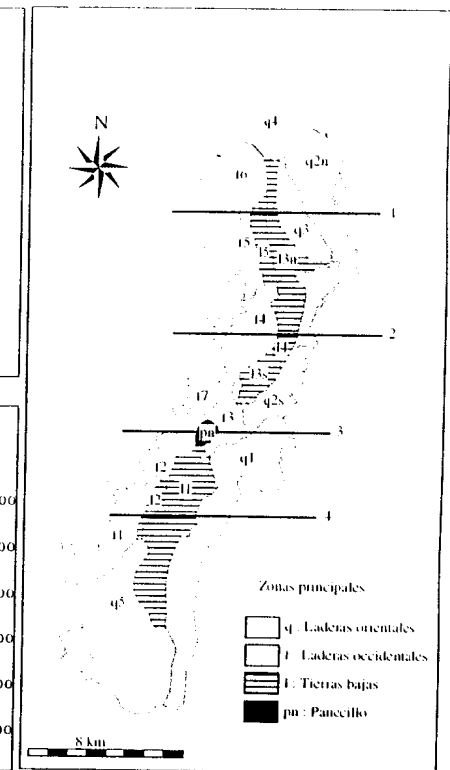


Figura 6 - Zonas geológicas en Quito y ubicación de los perfiles geológicos de la figura 5

las pendientes occidentales de la ciudad llegan al fondo del valle y fluyen luego hacia los derivativos principales de Quito, hacia el Norte y hacia el Sur. Los flancos del Pichincha están constituidos esencialmente de depósitos volcánicos (cangahua, cenizas) y en algunos lugares de depósitos provenientes de conos de deyección. Finalmente, los flancos orientales de la ciudad se caracterizan por grandes espesores de cangahua, cubierta o no por depósitos de materiales blandos (*loess* volcánicos, cenizas...).

PARTE 2:

MÉTODOS UTILIZADOS PARA EL ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE SITIO

2.1. Las relaciones espectrales tradicionales

Este método consiste en utilizar registros de sismos obtenidos simultáneamente en varios sitios, y requiere la elección de una estación de referencia, caracterizada por efectos de sitio nulos. Los primeros resultados obtenidos por Borchardt y Gibbs (1976) permitían poner en evidencia la frecuencia fundamental y la amplificación del movimiento del suelo durante un sismo.

Así, se instalaron dos estaciones sismológicas, la una en un sitio de referencia R (es decir en una roca) y la otra en un sitio sedimentario S (figura 7). El movimiento registrado simultáneamente en dos sitios puede ser considerado como la deconvolución de los efectos debidos a la fuente del sismo $S(t)$, a la propagación de las ondas $P(t)$, a los efectos producidos por el sitio $T(t)$ y a la respuesta instrumental del sensor $I(t)$, es decir:

$$E_R(t) = S_R(t) * P_R(t) * I_R(t)$$

$$E_S(t) = S_S(t) * P_S(t) * I_S(t) * T_S(t)$$

Siendo el sismo utilizado el mismo, los efectos de fuente en las dos estaciones son idénticos. Por otro lado, como los dos sitios son cercanos, los efectos producidos por la propagación de las ondas entre la fuente y el receptor pueden considerarse idénticos para las dos estaciones. Se utilizan los mismos sensores en ambos sitios, lo que da la misma respuesta instrumental. Si ese no es el caso, existe siempre la posibilidad de aplicar correcciones a fin de hacerla idéntica.

Así, pasando del campo temporal al campo espectral:

$$E_R(f) = S_R(f) * P_R(f) * I_R(f)$$

$$E_S(f) = S_S(f) * P_S(f) * I_S(f) * T_S(f)$$

En general, las componentes EW y NS son idénticas y se puede calcular su promedio espectral aritmético o definir una componente espectral compleja $CHC = NS + i.EW$ (Lachet *et al.*, 1996).

El principio de este método equivale entonces a calcular los espectros (FFT) de las componentes horizontales de ambas estaciones y las relaciones espectrales tradicionales entre la estación S y la estación R, habiéndose previamente alisado los espectros.

Uno de los inconvenientes mayores de este método radica en la elección de la estación de referencia. Esta debe ser lo suficientemente cercana como para admitir efectos de propagación similares en los diferentes receptores. Debe igualmente instalarse en un sitio no amplificado. En general, tales sitios se asimilan a los sitios rocosos. Sin embargo, Gagnepain-Beyneix *et al.* (1995) mostraron que formaciones volcánicas de la Martinica presentaban una amplificación hacia 2-3 Hz, debida tal vez a una capa subyacente caracterizada por una velocidad reducida de propagación de las ondas S. Chávez-García *et al.* (1990) mostraron igualmente que los sitios rocosos de Tesalónica (Grecia) podían amplificar el movimiento sísmico en la superficie hacia 8-15 Hz. Por otra parte, es necesario disponer de señales sísmicas de buena calidad y en cantidad suficiente, lo que implica, en sectores de sismicidad moderada a baja, recursos considerables en tiempo. Por otro lado, como los estudios de los efectos de sitio se utilizan esencialmente para estudios en el medio urbano, el nivel de ruido es importante por lo que es difícil obtener relaciones señal/ruido superiores a 3.

2.2. Relaciones espectrales H/V ruido de fondo

Incluso si este método ya fue utilizado en estudios japoneses (Nogoshi e Iragashi, 1970, 1971), su difusión y explicación corresponde a Nakamura (1989), al igual que la explicación de sus principios fundamentales. Está basado en la utilización del ruido de fondo (figura 8) y en algunas hipótesis planteadas por ese autor.

Ante todo, Nakamura (1989) considera que la energía del ruido de fondo consiste en una onda de volumen y en una de Rayleigh, lo que explica la necesidad de eliminar los efectos de las ondas de superficie. Según él, es posible estimar los efectos S ligados a las ondas Rayleigh mediante:

$$AS = VS / VB$$

Figura 7 - Técnica tradicional para determinar los efectos de sitio por la función de transferencia. R corresponde a un sitio de referencia. S al sitio donde los efectos de las condiciones locales serán determinados. $E_R(t)$ y $E_S(t)$ son los registros en los sitios R y S del mismo evento sísmico y de la misma componente horizontal. FFT corresponde a la Transformación de Fourier.

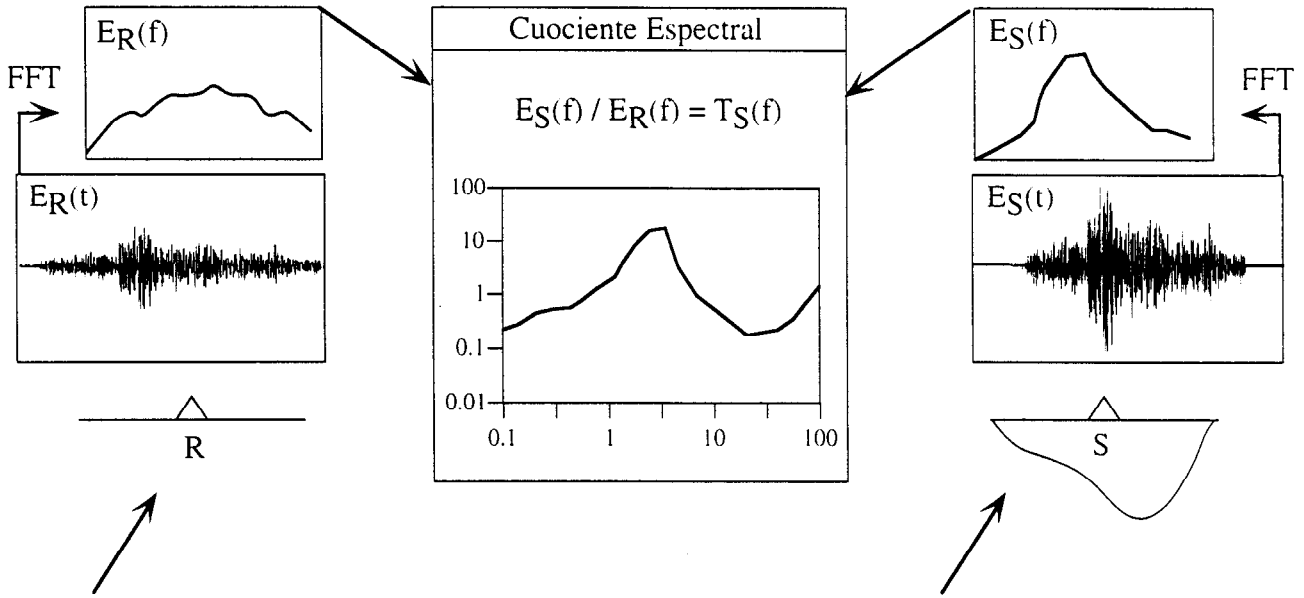
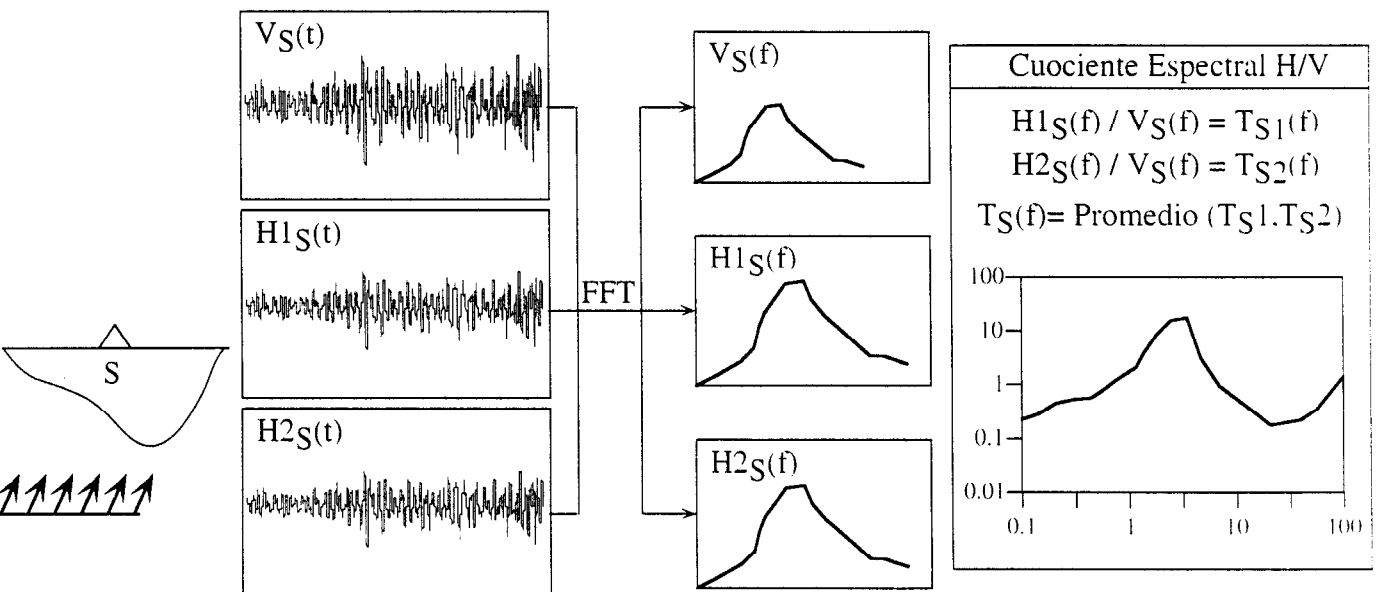


Figura 8 - Técnica que utiliza el ruido ambiental para determinar los efectos de sitio por la función de transferencia. S corresponde al sitio donde los efectos de las condiciones locales serán determinados. $V_S(t)$, $H1_S(t)$ y $H2_S(t)$ corresponden a la componente vertical y a las dos horizontales del ruido ambiental registrado en la estación S. FFT corresponde a la Transformación de Fourier.



donde VS y VB son el espectro de la componente vertical registrada en la superficie y a nivel del substrato respectivamente.

Por otra parte, Nakamura propone una estimación del efecto de sitio mediante:

$$SE = HS / HB$$

donde HS y HB corresponden a los espectros de la componente horizontal registrada en la superficie y a nivel del substrato respectivamente.

Para suprimir así el efecto de la onda de Rayleigh, propone una función de transferencia que caracteriza al suelo:

$$TF = SE / AS = (HS / HV) / (HB / VB)$$

A partir de las observaciones realizadas en una perforación en tres sitios diferentes, Nakamura (1989) afirma que la relación HB / VB es igual a 1. Así, se obtiene la función de transferencia del suelo mediante:

$$TF = HS / VS$$

Es importante anotar que las hipótesis planteadas por Nakamura son discutibles (Lachet, 1996) pero numerosos estudios realizados en diferentes sitios (Chávez-García *et al.*, 1990; Duval, 1995; Duval *et al.*, 1995; Field y Jacob, 1993, 1995; Lachet *et al.*, 1996; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994; Ohmachi *et al.*, 1991; Theodulidis y Bard, 1995; Thodulidis *et al.*, 1996) confirman los buenos resultados obtenidos por el método H/V-ruido de fondo, en cuanto a la frecuencia fundamental del suelo. Sucede lo mismo con una modelización numérica realizada por Lachet y Bard (1994) que define las posibilidades y limitaciones del método llamado de Nakamura. Todos los autores parecen concordar en cambio en afirmar que puede no representar una buena estimación de la amplificación del movimiento del suelo. Por ejemplo, Field y Jacob (1995) y Lachet *et al.* (1996) constataron, en una serie de observaciones, que la amplificación obtenida por las relaciones espectrales H/V-ruido de fondo subestimaba aquella obtenida por el método llamado de las relaciones espectrales tradicionales, presentando este último variaciones estadísticas importantes. Sin embargo, Lermo y Chávez García (1995) en México y Duval (1994) en Francia encuentran una buena correspondencia entre los niveles de

amplificación obtenidos por H/V-ruido de fondo y por las relaciones espectrales tradicionales.

Desde un punto de vista práctico, este método presenta la ventaja de realizarse en corto tiempo pues no utiliza registros de movimientos fuertes de calidad. Permite cubrir, con un mínimo de medios técnicos (1 estación de 3 componentes), la totalidad de una superficie estudiada que puede ser importante en el caso de un centro urbano como México.

2.3. Relaciones espectrales H/V-sismos (o funciones receptores)

Este método, propuesto originalmente por Langston (1977, 1979), era utilizado para determinar la estructura de las velocidades en la corteza terrestre a partir de registros telesísmicos de onda P con incidencia casi vertical. El principio del método es análogo al de las relaciones espectrales H/V-ruido de fondo, pero utiliza registros de sismos.

Yamanaka *et al.* (1994) compararon relaciones H/V-ruido de fondo y H/V-sismos, estas últimas calculadas en la onda P de la señal, y pudieron observar una buena correlación en cuanto a la frecuencia de resonancia, con amplitudes ligeramente superiores en el caso de las relaciones espectrales H/V-sismos. Por otro lado, Theodulidis *et al.* (1996) muestran que los mecanismos focales de los sismos utilizados por este método influyen en el nivel de amplificación de la relación espectral pero no en la forma de la señal, que presenta la misma frecuencia fundamental que la obtenida mediante otras técnicas

Contrariamente a Langston, Field y Jacob (1995) calcularon las relaciones espectrales H/V-sismos en las ondas sísmicas S de la señal y obtuvieron frecuencias fundamentales idénticas a las obtenidas mediante el método llamado de Nakamura H/V-ruido de fondo.

Finalmente, un estudio reciente de Lachet *et al.* (1996) permitió comparar los tres métodos citados anteriormente en Tesalónica (Grecia). Pudieron así observar, en cada sitio estudiado, que el método H/V-ruido de fondo subestimaba la amplificación obtenida mediante el método H/V-sismos, que a su vez subestimaba la obtenida por el método de las relaciones espectrales tradicionales. Por otra parte, esos tres métodos definen la misma frecuencia

fundamental del suelo y las relaciones H/V-ruido de fondo presentan la mayor estabilidad. Por otro lado, este estudio permitió poner en evidencia buenas correlaciones entre las formaciones geológicas y las amplitudes de las relaciones espectrales tradicionales, así como con los niveles de intensidad medidos en la ciudad después del sismo de magnitud 6.5 de 1978 (Lachet *et al.*, 1996).

PARTE 3: RESULTADOS DE LA RED TEMPORAL

3.1. Los datos extraídos de la red temporal

3.1.1. *Las estaciones sismológicas*

Entre el 25.03.97 y el 27.05.97, se instalaron en Quito cinco estaciones sismológicas (figura 9), las mismas que fueron construidas por LEAS-Francia en colaboración con Julien Fréchet del Laboratorio de Geofísica Interna y Tectonofísica de Grenoble (LGIT, Francia). Cada una estaba conectada a un sismómetro de 3 componentes L4-3D Mark Products ($F_0 = 1$ Hz). Su ubicación se escogió cumpliendo las siguientes condiciones:

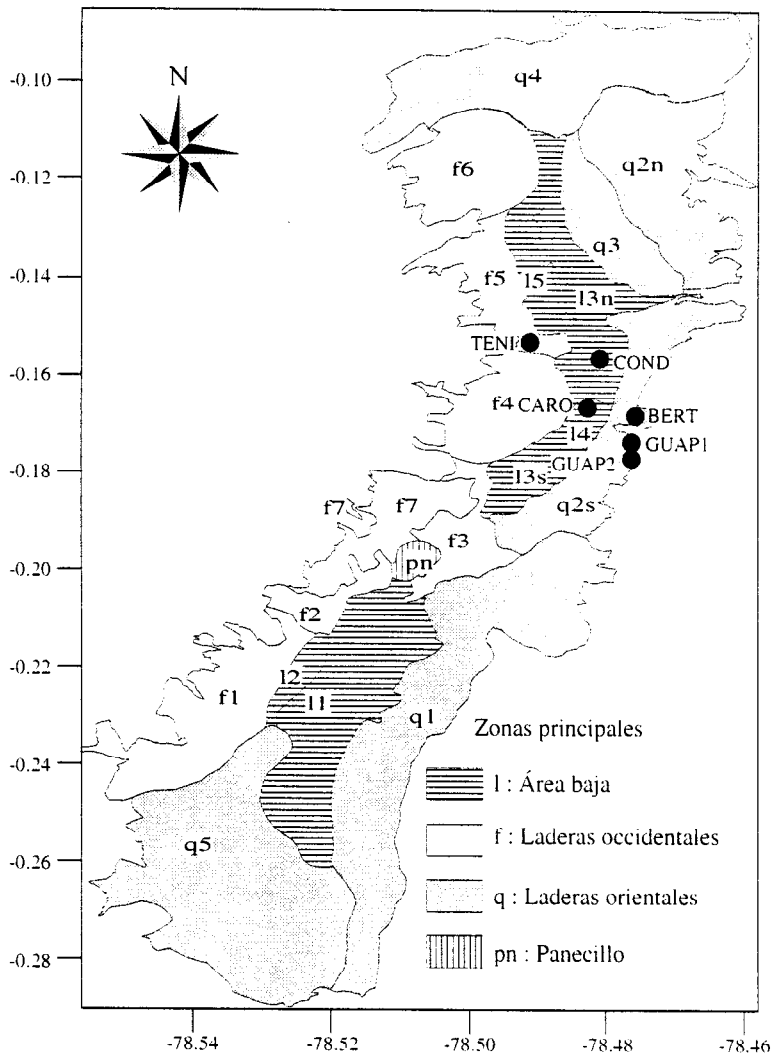
Primeramente, se instalaron a proximidad entre ellas de modo que se pudiera obtener, en un lapso bastante corto, una cantidad lo suficientemente importante de eventos, detectados simultáneamente en varias estaciones. Por otra parte, era necesario que en cada formación geológica mayor, es decir las pendientes orientales, occidentales y las tierras bajas, se instale al menos una estación a fin de conocer el comportamiento global de cada estructura. La elección de la estación ubicada en la formación 14 (sector de La Carolina) se efectuó sabiéndose con anterioridad que ese sector podía presentar características particulares. Finalmente, la experimentación en medio urbano obliga a elegir sitios protegidos para garantizar la seguridad de los aparatos.

La elección de la estación de referencia fue difícil pues, dentro de los límites de la ciudad, ninguna formación rocosa era accesible. Por ello, la estación GUAP1 fue instalada cerca a una antigua cantera formada de materiales volcánicos rocosos (andesita) producto de la última erupción del Rucu Pichincha (1 a 2 millones de años), en el sector de Guápulo (límite oriental de Quito). Debido a un desacuerdo con el propietario del terreno, se tuvo que cambiar la ubicación de la estación a GUAP2, lo más cerca posible de GUAP1, suponiendo que se trataba de un sitio con el mismo comportamiento.

3.1.2. *Los registros obtenidos*

En total, la estación BERT registró 121 eventos. Esta estación tenía la particularidad de presentar un bajo nivel de ruido. Así, se la consideró como la

Figura 9 - Ubicación de las cinco estaciones instaladas en Quito entre el 25/03/97 y el 27/05/97 (Guap 1 y Guap 2 corresponden a la estación de referencia)



estación «testigo» de la red. Los eventos pudieron clasificarse en 4 categorías principales, en función de la frecuencia de la señal y de la amplitud.

En primer término, la categoría 1 (figura 10a) corresponde a los telesismos y representa 18 eventos (figura 11a), que se caracterizan por frecuencias bajas y sobre todo amplitudes reducidas, lo que explica que las demás estaciones no los hayan registrado sistemáticamente, pues generalmente se ahogan en el ruido. Se los encuentra distribuidos a lo largo de los dos meses de registro, sin clasificación particular (figura 11 a).

La categoría 2 se refiere a los sismos llamados «regionales», es decir de una duración entre la llegada de la onda P y la onda S superior a 20 segundos (figura 10b). En total, la estación BERT registró 23 eventos regionales, independientemente del tiempo (figura 11b).

Finalmente, las categorías 3 y 4 se refieren a los sismos locales, distinguiéndose los muy locales (categoría 4) caracterizados por un intervalo onda P-onda S sumamente reducido y hasta indetectable (figura 10d), y los locales (categoría 3) situados solamente a algunos kilómetros de distancia (figura 10c). La mayoría de los 46 eventos de la categoría 3 tuvo lugar entre el 7 y el 13 de mayo de 1997 (figura 11c), período durante el cual se produjeron 32 sismos en la parte norte de Quito. Tales sismos (10-15 km de profundidad) provienen de la reactivación de una falla subvertical (EPN, 1997). La categoría 4 reúne 34 sismos (figura 11d) que se produjeron esencialmente hacia el 7 de abril (4 eventos), del 18 al 20 de abril (8 eventos) y durante la crisis del 8 de mayo (7 eventos). Estos eventos presentan la particularidad de haber sido registrados únicamente por la estación BERT y de ser de baja frecuencia pese a su proximidad. Se constata en las representaciones frecuenciales (figura 12) que los registros en BERT son amplificados casi sistemáticamente hacia 1 Hz, lo que puede explicarse, como se verá más adelante, por un efecto de sitio que amplifica el movimiento del suelo hacia esa frecuencia.

3.1.3. Localización de los sismos

La mayoría de los sismos detectados por la estación BERT (aparte de los muy locales) pudo ser localizada por la red nacional permanente (figura 13). Se constata principalmente la importante actividad hacia el Norte de Quito. Las

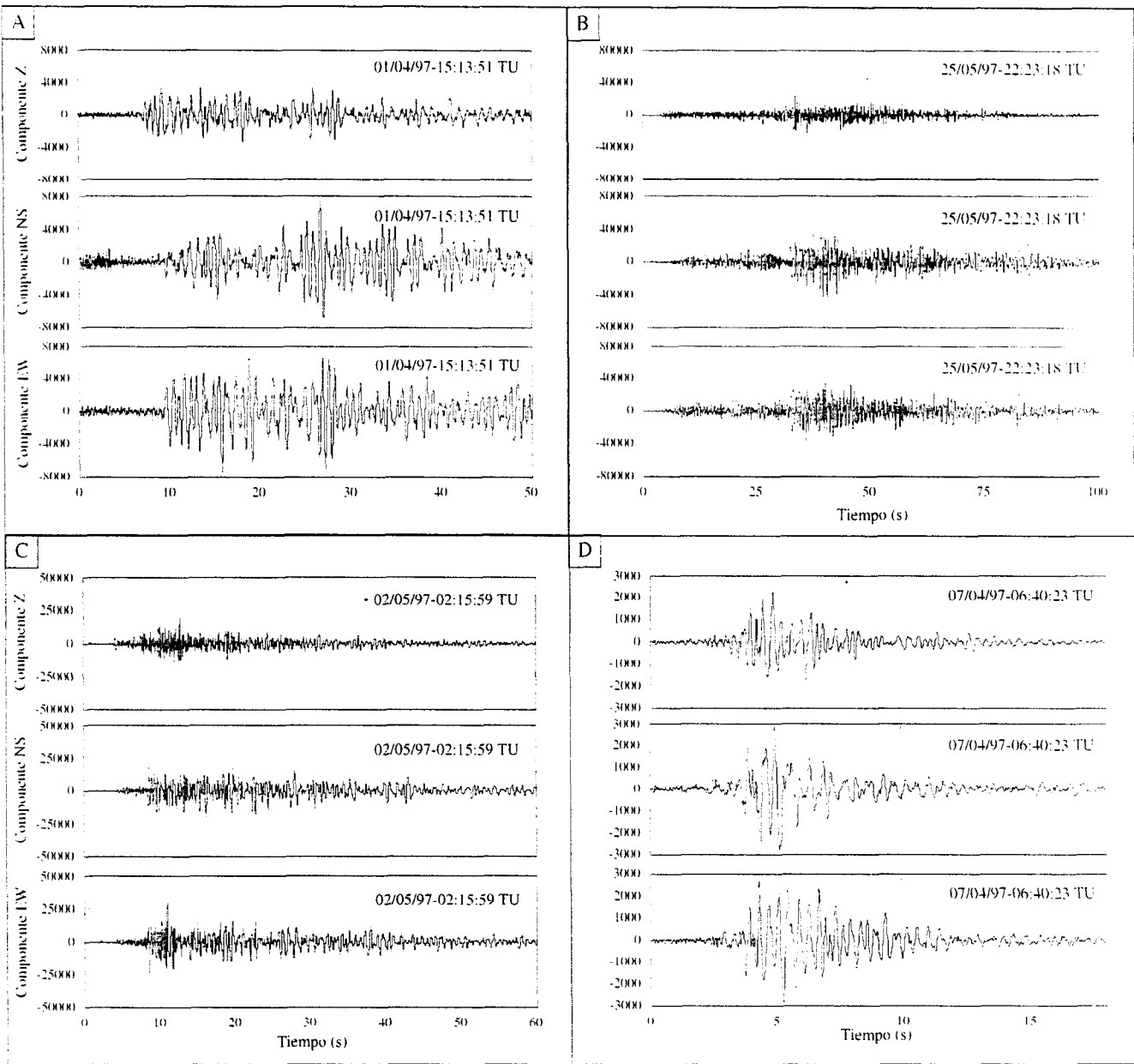


Figura 10 - Ejemplos de los 4 tipos de eventos registrados por la red ubicada en Quito entre el 25/03/97 y el 27/05/97 en la estación BERT (A: tipo 1; B: tipo 2; C: tipo 3; D: tipo 4)

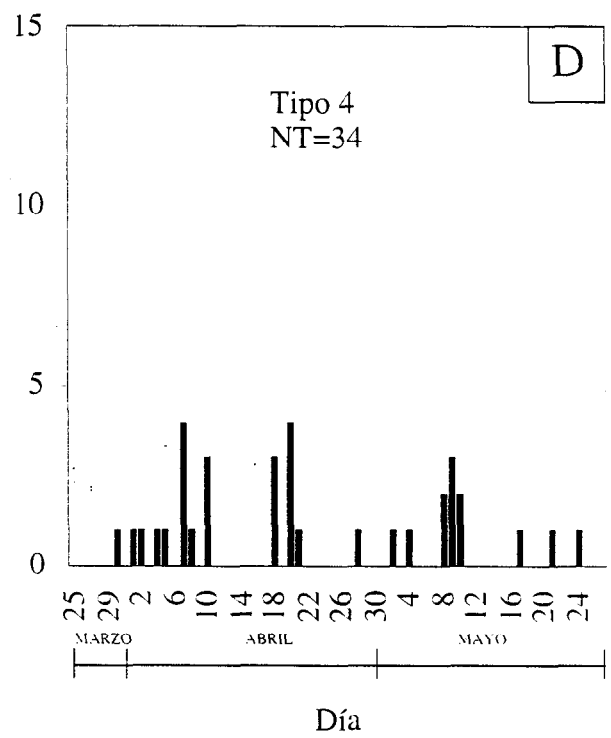
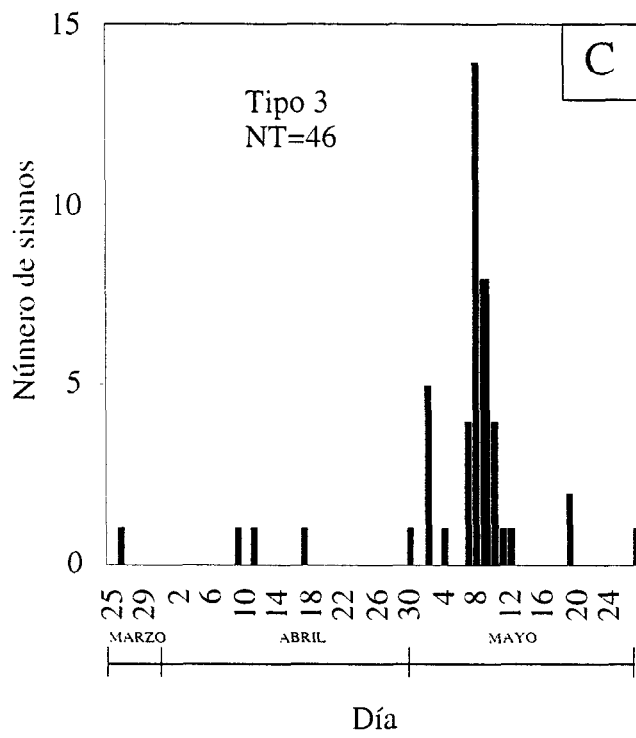
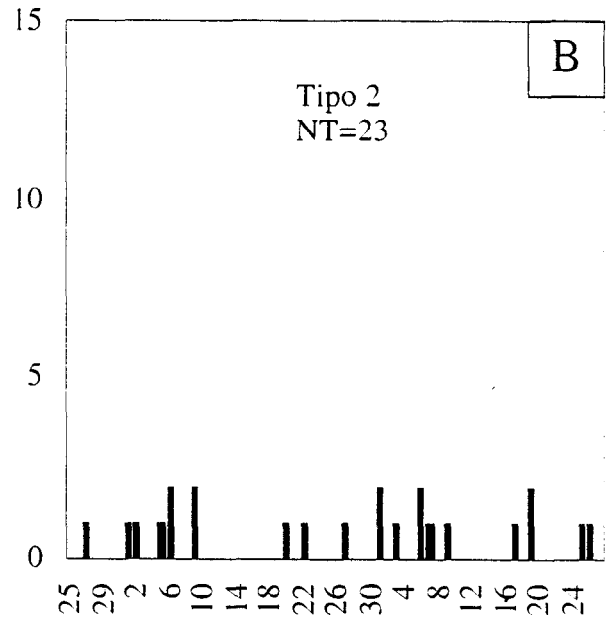
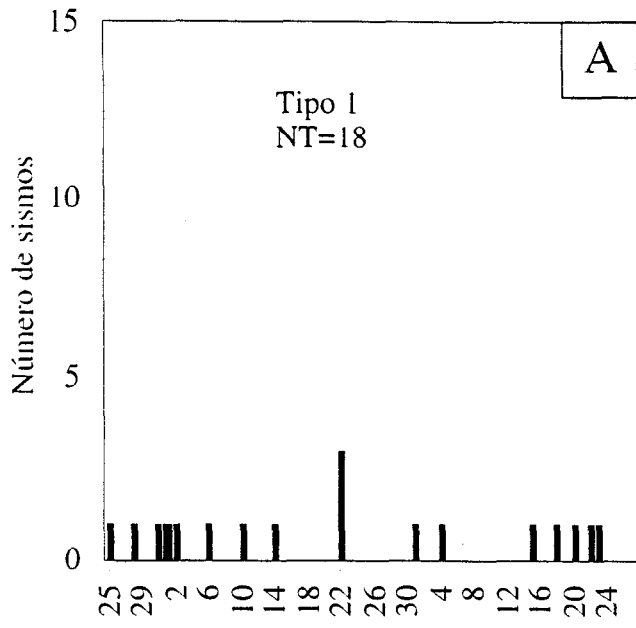


Figura 11 - Distribución, por tipo de eventos, de los sismos registrados por la estación BERT en la ciudad de Quito entre el 25/03/97 y el 27/05/97

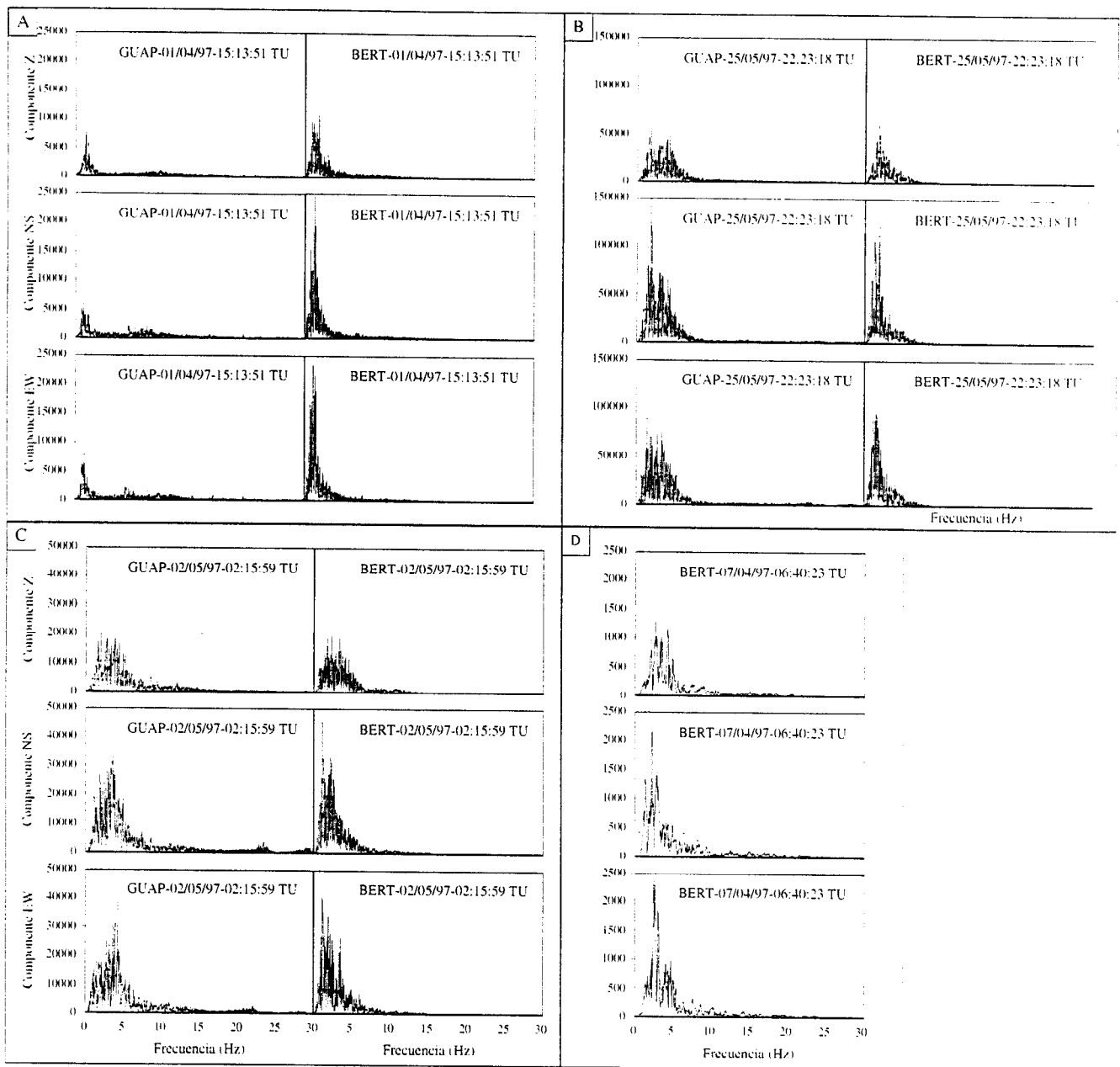


Figura 12 - Espectros de los ejemplos de eventos registrados por la red ubicada en Quito entre el 25/03/97 y el 27/05/97 en las estaciones BERT y GUAP 1 o 2 (A: tipo 1; B: tipo 2; C: tipo 3; D: tipo 4)

magnitudes de esos sismos son inferiores a 4. En especial en las regiones de Guayaquil y Macas, tuvieron lugar otros eventos que presentaron las mayores magnitudes (entre 5 y 6).

En el marco de nuestro estudio, se escogieron sismos registrados al menos en dos estaciones (entre ellas la de referencia) y caracterizados por una relación señal/ruido inferior a 3. En total, se pudieron analizar 24 eventos, los que fueron generalmente localizados por la red nacional (Figura 14). Solamente 2 eventos fueron registrados por la primera estación de referencia GUAP1 (cuadro 1).

3.2. Resultados de la estimación de los efectos de sitio

3.2.1. Metodología

Los registros de ruido de fondo y de sismos fueron muestreados a 100 Hz.

Para cada evento sísmico utilizado, se selecciona una ventana temporal constituida por toda la señal (ondas P y S). Se obtienen las representaciones espectrales de cada componente mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), aplicándose luego una ventana de alisamiento triangular de medio ancho función de la frecuencia. Las relaciones espectrales respecto a la estación de referencia se calculan para las dos componentes horizontales (NS y EW) que son casi idénticas. Borchedt y Gibbs (1976) observaron que las dos relaciones horizontales eran similares. Así, se calcula la media aritmética de todas las relaciones espectrales para las dos estaciones de referencia citadas anteriormente (GUAP1 y GUAP2), sin distinción de las direcciones.

Sobre esos mismos sismos, se calculan las relaciones de cada componente horizontal sobre la componente vertical, siguiendo el mismo procedimiento de cálculo espectral y de alisamiento que anteriormente. Los estudios realizados por Langston (1977, 1979) muestran que solamente en las componentes horizontales (que integran las ondas P y S) influyen las condiciones geológicas locales. Field y Jacob (1995) y Lachet *et al.* (1996) obtienen las mismas relaciones espectrales H/V, pero calculadas únicamente sobre las ondas S, que revelan así la frecuencia fundamental del sitio. En el presente estudio, se optó por la totalidad de la señal (P y S). Siendo las componentes EW y NS similares, se

Tabla 1 - Lsta de los eventos utilizados para estimar los efectos de sitio en Quito

Fecha	hora (UT)	Lat	Long. W	ML	CARO	COND	TENI	BERT	GUAPI	GUAP2
260397	05:55:37	0.0150	-78.4472	3.7		x	x	x	x	No
010497	15:13:58	-----	-----	-----		x	x	x	x	Instal.
020597	02:16:03	0.0810	-78.4605	4.3	x		x	x	I	x
020597	11:27:58	0.0586	-78.4471	4.2	x		x	x	I	x
020597	11:38:00	0.0822	-78.4312	3.5	x		x	x	I	x
020597	11:57:43	0.0815	-78.4501	3.1				x	I	x
020597	17:46:44	0.0899	-78.4597	4.0	x		x	x	I	x
030597	08:52:12	-2.6110	-82.1373	4.9				x	I	x
080597	20:45:02	-----	-----	-----	x	x	x	x	D	x
080597	23:25:21	-0.2181	-78.4463	3.4	x	x	x	x	E	x
090597	00:03:01	-----	-----	-----		x	x	x	S	x
090597	12:04:47	-0.0268	-78.4817	3.9		x		x	A	x
090597	22:50:27	-0.1050	-78.4788	-----		x		x	R	x
090597	22:51:07	-----	-----	-----		x		x	M	x
090597	22:51:54	-----	-----	-----		x		x	A	x
090597	22:54:29	-0.0913	-78.4958	3.9		x		x	D	x
100597	00:33:08	-0.1090	-78.4682	3.8		x		x	A	x
100597	09:50:13	-0.0537	-78.4994	3.0		x		x	I	x
190597	02:27:36	-0.7858	-78.6471	-----	x			x	I	x
190597	07:15:47	-----	-----	-----		x		x	I	x
190597	07:22:13	-----	-----	-----				x	I	x
240597	08:14:44	-----	-----	-----	x	x		x	I	x
250597	22:23:21	-1.8405	-79.7613	5.1	x	x		x	I	x
260597	05:53:13	-2.7107	-78.0442	4.5		x		x	I	x
TOTAL					9	16	9	24	2	22

Figura 13 - Ubicación de los sismos registrados por la Red Nacional y por las estaciones LEAS instaladas en Quito para estimar los efectos de sitio entre el 25/03/97 y el 27/05/97

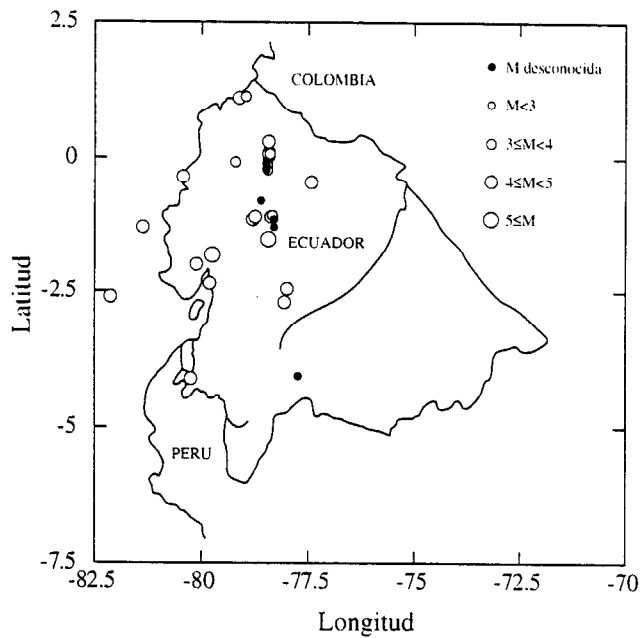
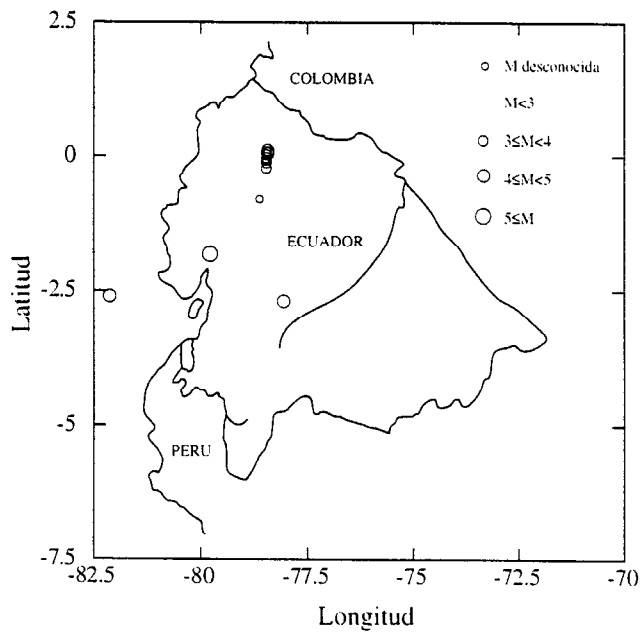


Figura 14 - Ubicación de los sismos registrados por la Red Nacional entre el 25/03/97 y el 27/05/97 y utilizados para estimar los efectos de sitio en Quito



define una componente espectral horizontal global de la siguiente manera (Lachet *et al.*, 1996):

$CH = NS + i.EW$ componente horizontal compleja

$CHS = CFT[CH]$ transformada de Fourier compleja

$HS = (1/\sqrt{2}) \cdot |CHS|$ espectro horizontal

Se obtiene entonces la relación espectral entre la componente horizontal global y la componente vertical.

Finalmente, se registró el ruido de fondo en cada estación para utilizar el método de las relaciones espectrales H/V-ruido de fondo. En cada registro de 2 minutos, se calcularon los espectros de las tres componentes seleccionando ventanas temporales de 20 segundos. La media logarítmica de las relaciones espectrales obtenidas en cada registro de 2 minutos fue calculada una vez alisados los espectros según el procedimiento definido anteriormente. Siendo las componentes NS y EW similares, se calcula, como anteriormente, una componente horizontal promedio.

3.2.2. Resultados

Así, se comparan en cada sitio las respuestas de los suelos obtenidas mediante las tres técnicas.

Se presentan las relaciones espectrales tradicionales con respecto a GUAP1 (a), a GUAP2 (b), las relaciones espectrales H/V-sismos (c) y H/V-ruido de fondo (d) en las estaciones TENI (figura 16), BERT (figura 17), COND (figura 18) y CARO (figura 19). Esta última no registró los eventos utilizados para el cálculo de las relaciones espectrales respecto a la estación GUAP1. Es interesante observar que las relaciones espectrales H/V-ruido de fondo son más estables que aquellas obtenidas mediante los otros métodos. Por otra parte, se constata entre las relaciones espectrales tradicionales respecto a GUAP1 y a GUAP2, diferencias importantes en amplitud en el caso de las estaciones BERT (figura 17a y b) y TENI (figura 16a y b) y en frecuencia y amplitud en el caso de la estación COND (figura 18a y b).

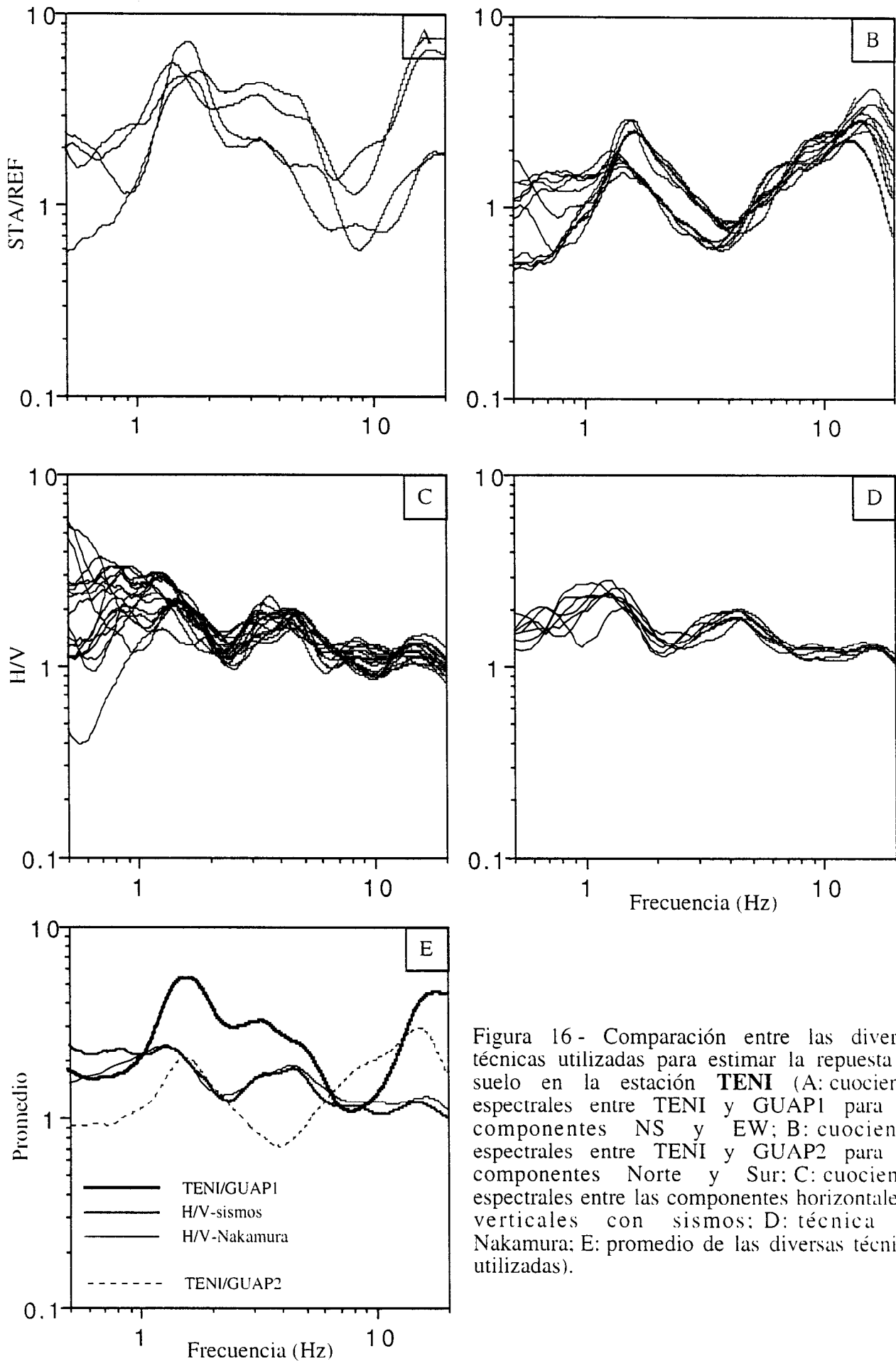


Figura 16 - Comparación entre las diversas técnicas utilizadas para estimar la repuesta de suelo en la estación **TENI** (A: cuocientes espectrales entre TENI y GUAPI para las componentes NS y EW; B: cuocientes espectrales entre TENI y GUAP2 para las componentes Norte y Sur; C: cuocientes espectrales entre las componentes horizontales y verticales con sismos; D: técnica de Nakamura; E: promedio de las diversas técnicas utilizadas).

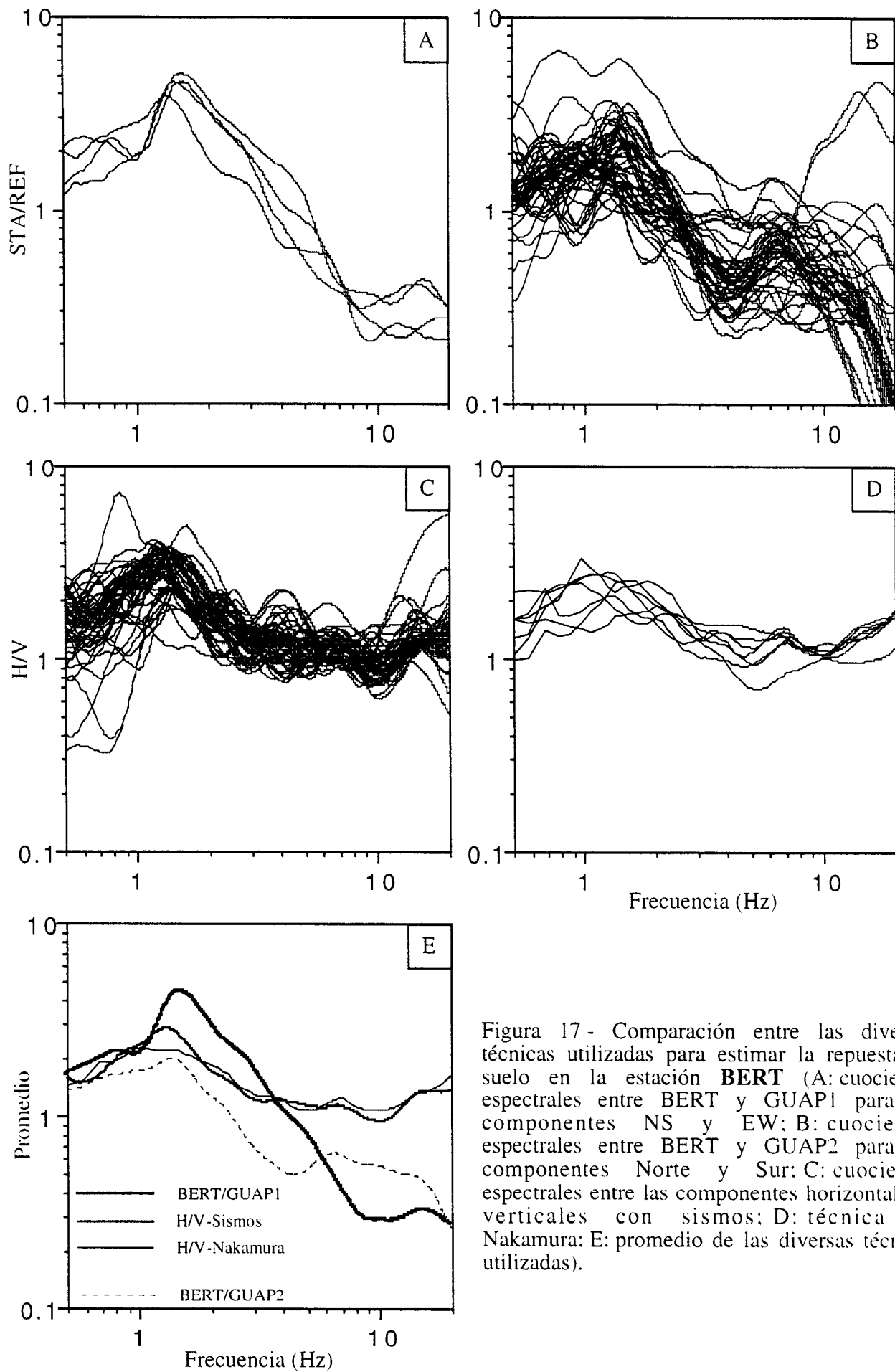


Figura 17 - Comparación entre las diversas técnicas utilizadas para estimar la répuesta de suelo en la estación **BERT** (A: cuocientes espectrales entre BERT y GUAP1 para las componentes NS y EW; B: cuocientes espectrales entre BERT y GUAP2 para las componentes Norte y Sur; C: cuocientes espectrales entre las componentes horizontales y verticales con sismos; D: técnica de Nakamura; E: promedio de las diversas técnicas utilizadas).

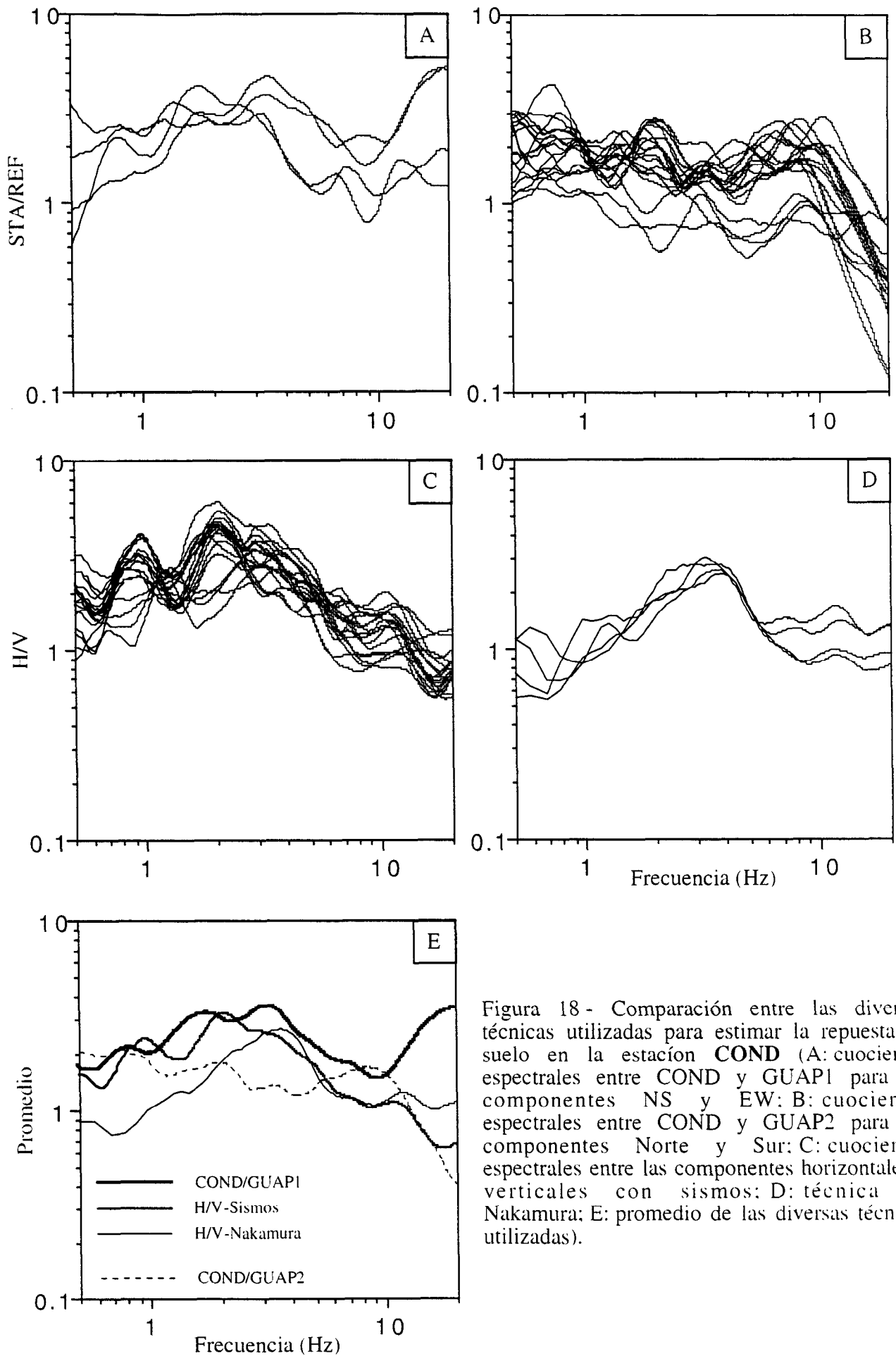


Figura 18 - Comparación entre las diversas técnicas utilizadas para estimar la repuesta de suelo en la estación COND (A: cuocientes espectrales entre COND y GUAPI para las componentes NS y EW; B: cuocientes espectrales entre COND y GUAP2 para las componentes Norte y Sur; C: cuocientes espectrales entre las componentes horizontales y verticales con sismos; D: técnica de Nakamura; E: promedio de las diversas técnicas utilizadas).

Se observan buenas similitudes entre las diferentes técnicas utilizadas que revelan una frecuencia del orden de 1 Hz para la estación BERT (figura 20a), de 3 Hz para la estación COND (figura 20c), del orden de 1,5 Hz para la estación TENI (figura 20d) y del orden de 2 Hz para la estación CARO (figura 20 b, sin la comparación con la relación espectral tradicional respecto a GUAP1). Es interesante anotar que la amplitud obtenida mediante el método H/V-ruido de fondo subestima la deducida del método H/V-sismos que a su vez subestima las relaciones espectrales tradicionales respecto a GUAP1. Lachet *et al.* (1996) ya habían observado esta particularidad, lo que permite confirmar que el método H/V-ruido de fondo define correctamente la frecuencia de resonancia del suelo. Sin embargo, queda por definir la significación de la amplitud pues parece ser casi sistemáticamente subestimada con relación a la obtenida mediante el método tradicional.

Por otro lado, es interesante también observar en la estación TENI (figura 20d) que los tres métodos utilizados revelan dos amplificaciones distintas, la primera hacia 1,5 Hz y la segunda hacia 3-4 Hz.

El método H/V-ruido de fondo permite así definir simplemente la respuesta del suelo, o en todo caso conocer la frecuencia a la cual el movimiento del suelo será amplificado. Proporciona información en cuanto a la amplificación, sabiéndose que esta parece ser sistemáticamente inferior a la que se puede observar durante un sismo. Por otra parte, la elección de la estación de referencia y el nivel de ruido del ambiente, elevado en el medio urbano, plantean ciertos problemas en cuanto a la utilización del método de las relaciones espectrales tradicionales, confirmados por la elección de la estación GUAP2. Esta última parece no ser una estación de referencia, es decir con una amplificación propia.

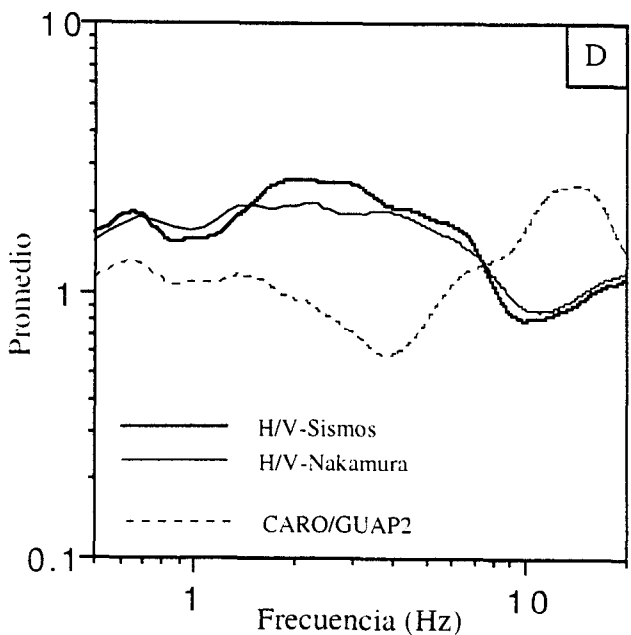
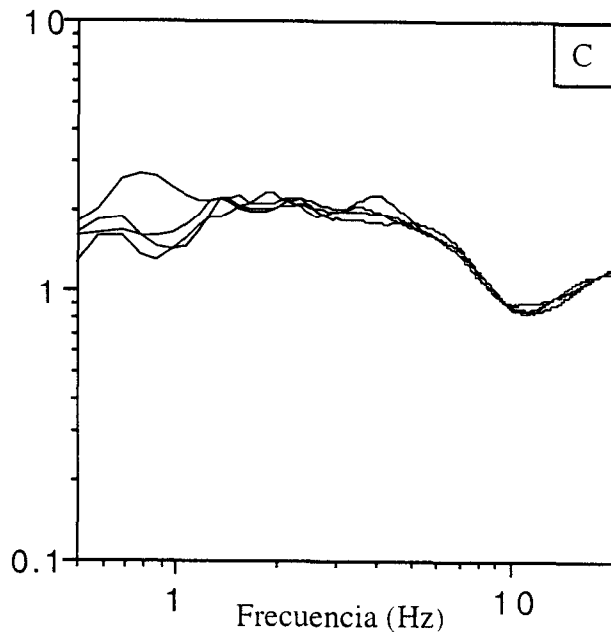
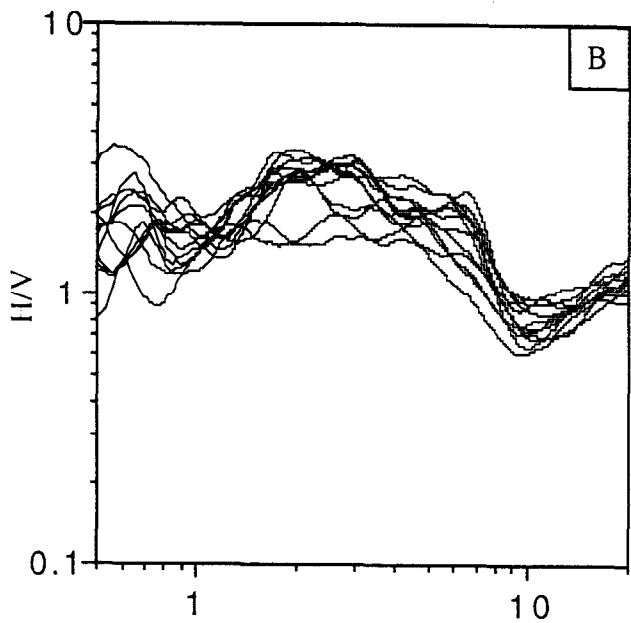
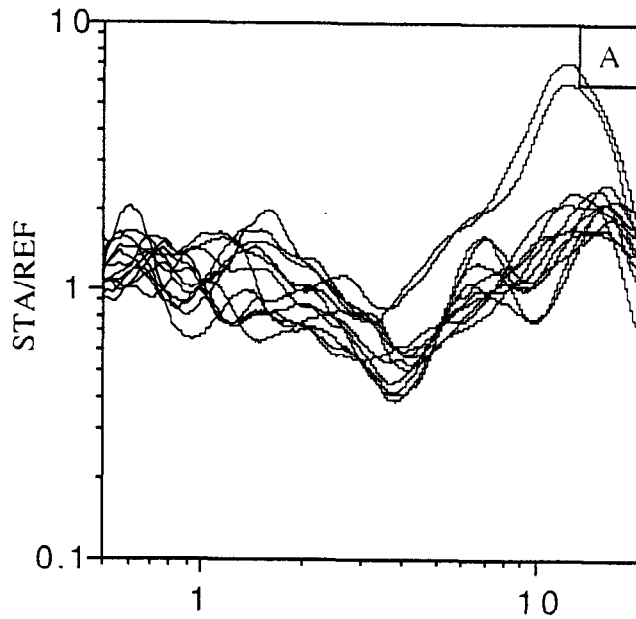


Figura 19 - Comparación entre las diversas técnicas utilizadas para estimar la repuesta de suelo en la estación **CARO** (A: cuocientes espectrales entre CARO y GUAP2 para las componentes NS y EW; B: cuocientes espectrales entre las componentes horizontales y verticales con sismos; C: técnica de Nakamura; D: promedio de las diversas técnicas utilizadas).

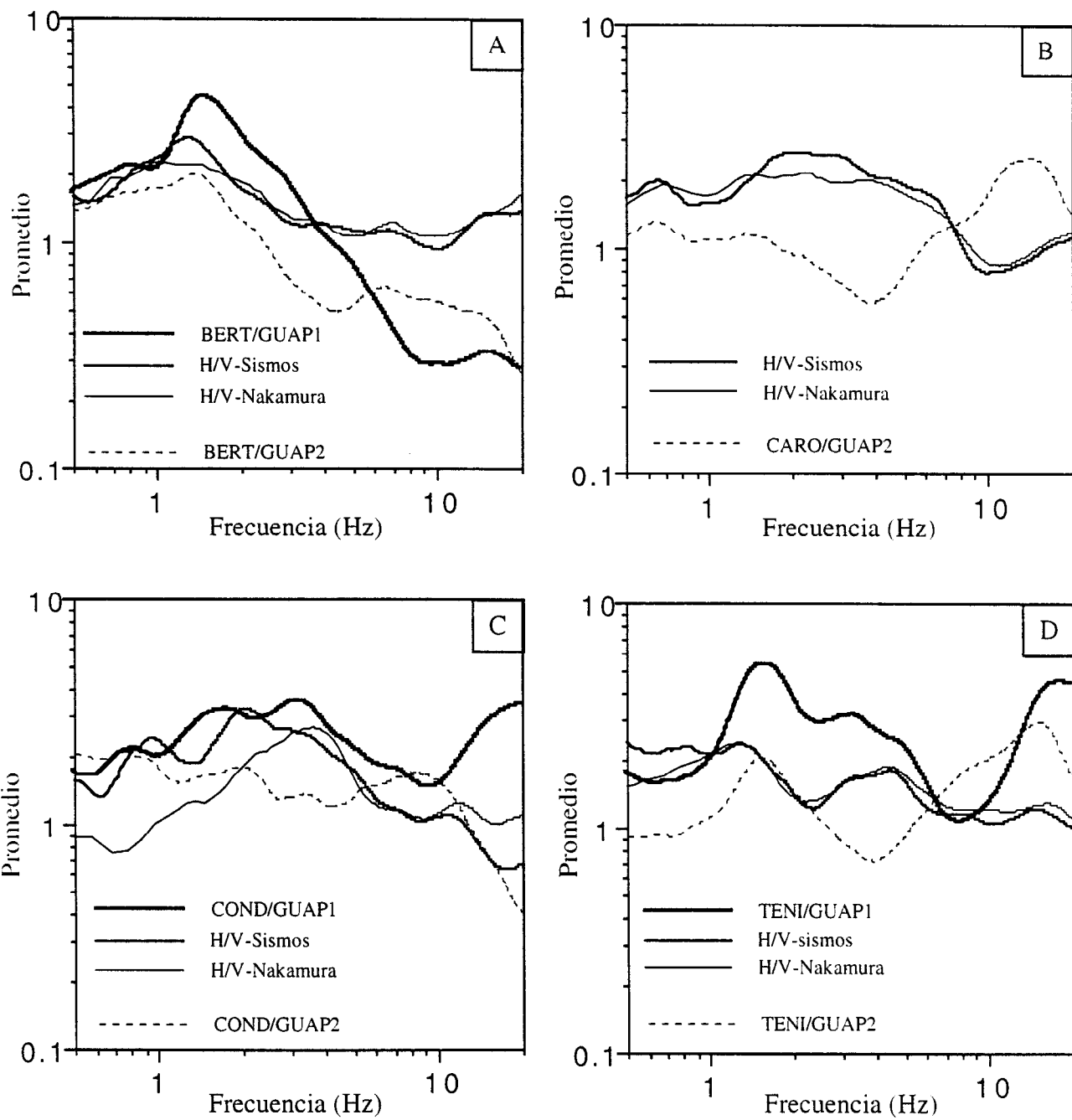


Figura 20 : Síntesis de las diversas técnicas utilizadas para estimar la respuesta de suelo en la estación **BERT** (A), **CARO** (B), **COND** (C) y **TENI** (D). Línea gruesa: promedio de los cuocientes espectrales en relación con GUAP1; línea medianamente gruesas: promedio de los cuocientes H/V que utilizan registros de sismos; línea delgada: promedio de los cuocientes H/V que utilizan registros de microtremores (técnica de Nakamura); línea discontinua: promedio de los cuocientes espectrales en relación con GUAP2 .

PARTE 4: LA MICROZONIFICACIÓN DE QUITO

4.1. Metodología

En total, se establecieron 673 puntos de registro del ruido de fondo, de modo que se cubrieran de la mejor manera todas las zonas geológicas de Quito (figura 21). Tales puntos eran identificados utilizando la intersección de las calles. Por ello, tres sectores (2 al Sur y 1 al Norte) no pudieron ser cubiertos, pues los planos disponibles entonces no presentaban una precisión suficiente.

En cada punto, se realizaron 2 minutos de registro en 50 Hz, de modo que se seleccionaran un máximo de ventanas de 10 segundos. En estas últimas, se calcularon los espectros de las tres componentes, y luego, una vez alisados siguiendo el procedimiento descrito anteriormente (punto 3.2.1.), se calcularon las relaciones espectrales H/V y la media logarítmica del sitio. Como las componentes EW y NS son similares, se definió previamente una componente horizontal promedio como anteriormente (punto 3.2.1.).

Con el fin de estudiar el sector de La Carolina, se procedió a aumentar la densidad de los puntos de registro para precisar de la mejor manera posible el comportamiento del suelo en esa zona.

4.2. Ejemplos de relaciones H/V-ruido de fondo

Todas las relaciones H/V-ruido de fondo se presentan en el anexo 1. En la figura 22 aparecen algunos ejemplos de relaciones H/V-ruido de fondo para cada formación geológica y en la figura 23 su localización.

En las pendientes orientales y occidentales (formaciones q y f respectivamente) se revela un pico de amplificación máxima entre 1 y 2 Hz. El valor de amplificación puede alcanzar 5 en ciertos ejemplos (figura 22, sitio 072409). En verdad, estos ejemplos no son representativos de todas las zonas geológicas, pues dentro de cada formación existen numerosas variaciones desde el punto de vista tanto de la frecuencia como de la amplificación.

Se reparó en el hecho de que los registros provenientes de la zona de tierras bajas (formación 1) tienen un aspecto completamente diferente al observado en

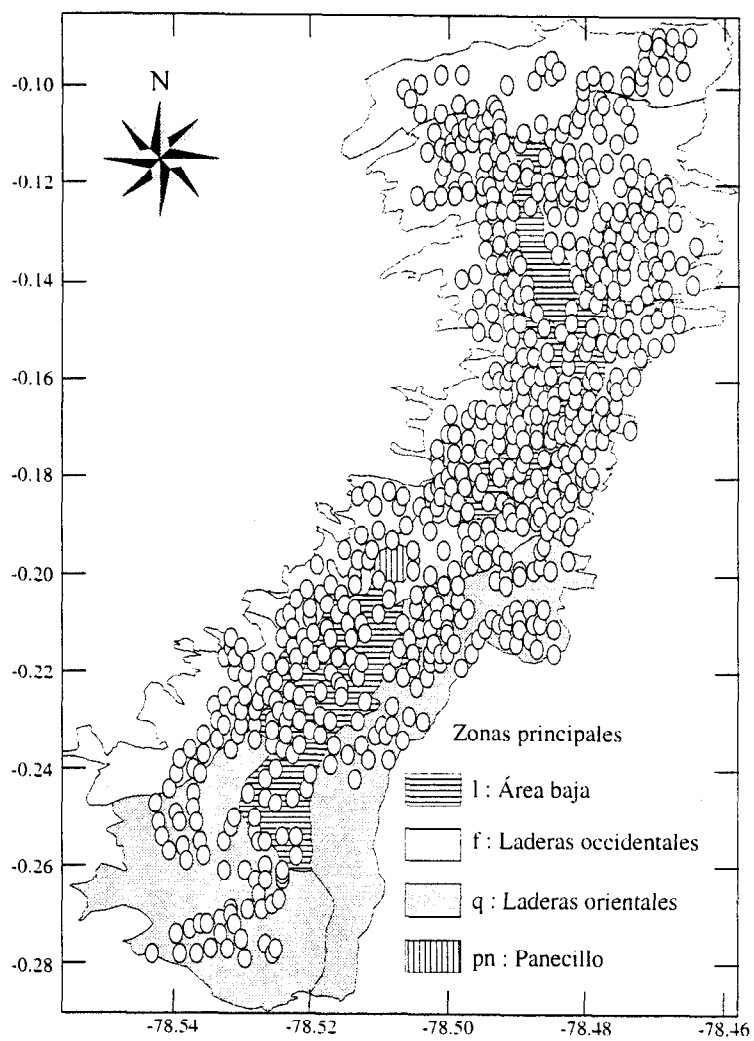
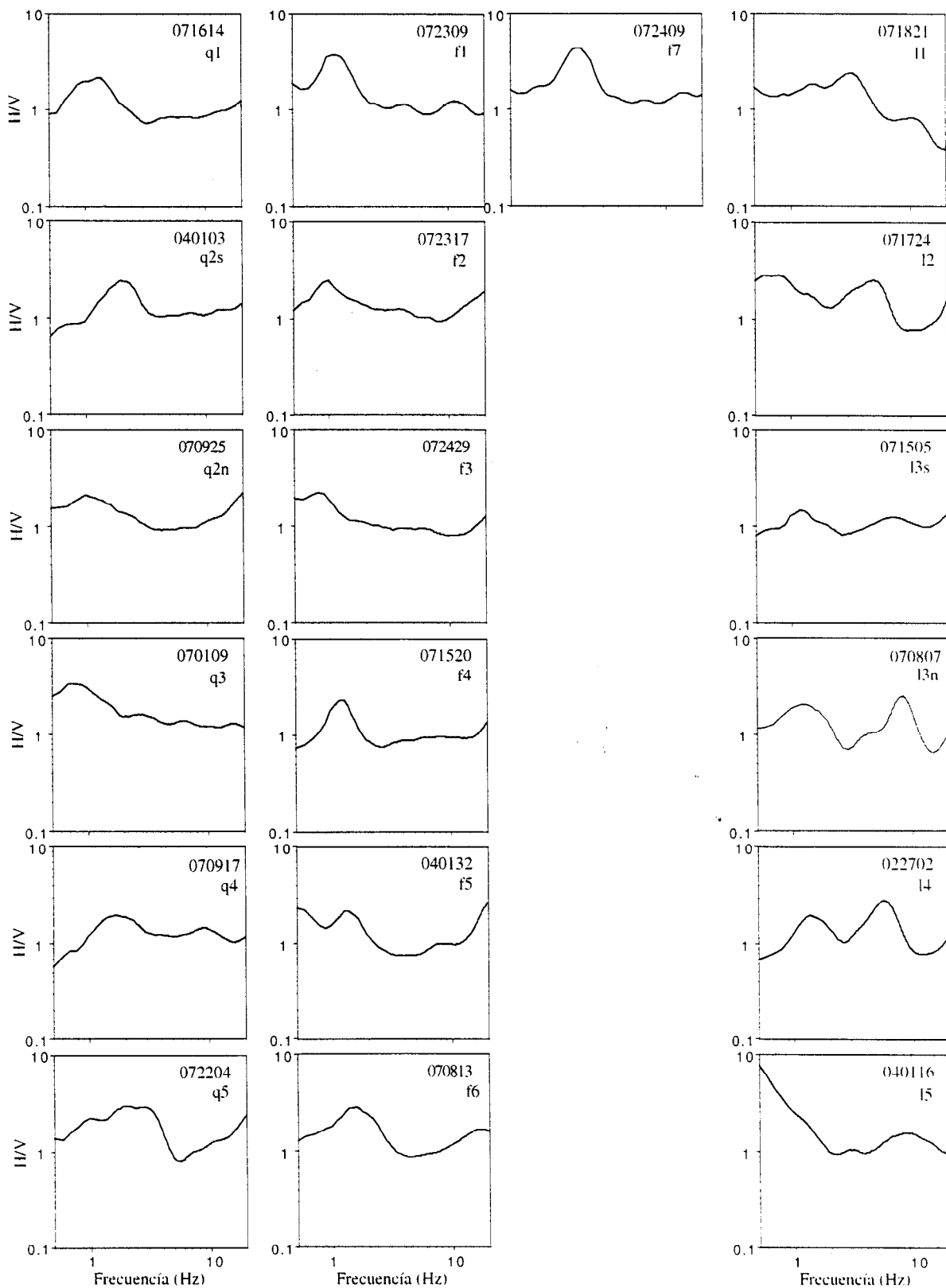


Figura 21 - Ubicación de los puntos donde se registró el ruido ambiental para estimar los efectos de sitio en Quito y presentación de la geología

Figura 22 - Ejemplos de cuocientes espectrales H/V que utilizan el ruido ambiental en cada zona geológica de Quito. Se indica la zona geológica a la que corresponde cada ejemplo.



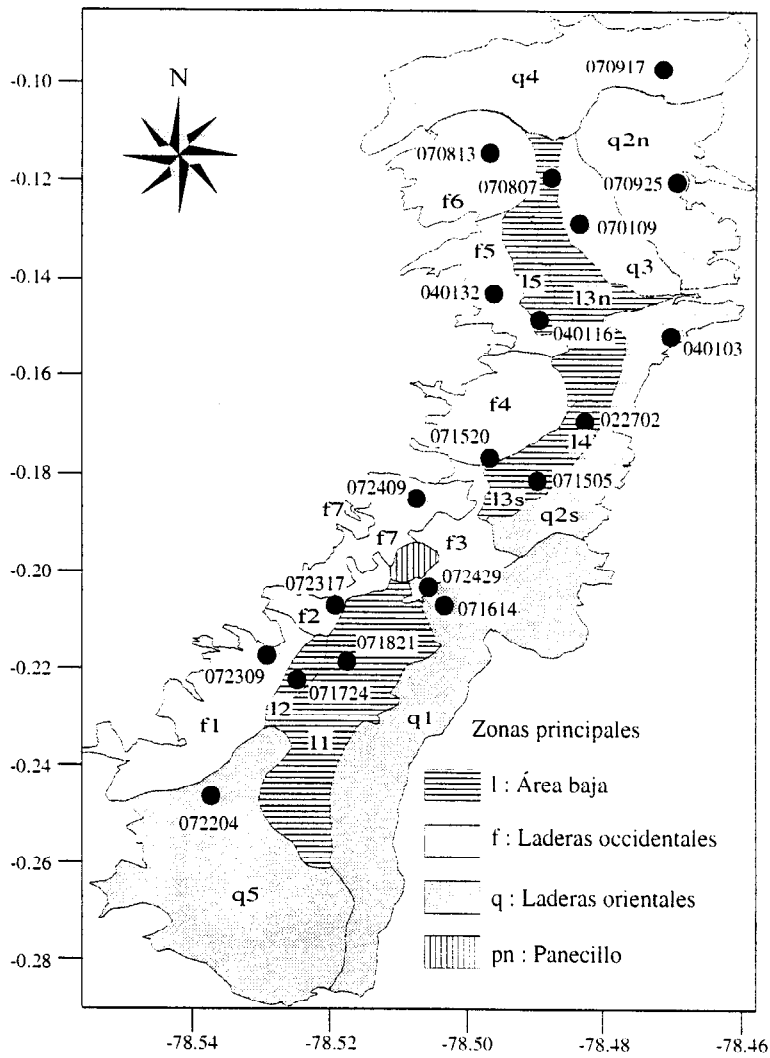


Figura 23 - Ubicación de los ejemplos de cuocientes espectrales que utilizan el ruido ambiental y presentación de la geología en Quito

las demás formaciones (figura 22). La mayoría de las relaciones H/V-ruido de fondo presenta una frecuencia amplificada entre 3 y 10 Hz, pudiendo las amplificaciones alcanzar valores del orden de 4. Los ejemplos 070807 y 022702, y en menor medida los ejemplos 071724 y 071505, tienen la particularidad de revelar dos frecuencias amplificadas. La primera, del orden de 1 Hz, tiene una amplificación inferior o igual a la segunda frecuencia, comprendida entre 3 y 10 Hz. En general, la frecuencia fundamental de una columna de suelo se considera como característica del primer pico, produciendo este la amplificación máxima del movimiento del suelo en caso de sismo. Sin embargo, en los casos presentados anteriormente, se revela que la amplificación de la segunda frecuencia puede alcanzar valores superiores o iguales a la primera. Se hace entonces necesario considerar esas dos frecuencias amplificadas para evaluar el comportamiento de los suelos en Quito.

Por otro lado, la relación H/V-ruido de fondo en 041116 revela un pico hacia los 10 Hz y otro a frecuencias inferiores a 1 Hz. Siendo el sismómetro utilizado un L4-3D Mark Products de frecuencia propia de 1 Hz, es difícil saber en qué medida las frecuencias inferiores a la del sismómetro son representativas. Sin embargo, se observa en el anexo 1 que varios sitios cercanos presentan esa misma característica, validando así el hecho de que pueda existir una frecuencia amplificada inferior a 1 Hz.

Por ello, se contempla la posibilidad de representar el comportamiento del suelo en Quito considerando los dos picos presentes en ciertas relaciones H/V-ruido de fondo.

4.3. Resultados de la microzonificación

4.3.1. Comparación con la geología

Se calcula la media aritmética de la frecuencia y de la amplificación, al igual que el rango de fluctuación de los valores máximos y mínimos obtenidos en las relaciones H/V-ruido de fondo, que pertenecen a la misma zona geológica. Se obtienen así las figuras 24 y 25 considerando inicialmente la primera frecuencia amplificada y luego aquella que presenta la mayor amplificación. En ambos casos, se considera el intervalo de las frecuencias 1-20 Hz (a) y 0,5-20 Hz (b).

Primeramente, es interesante anotar que aparecen diferencias según se consideren o no las frecuencias amplificadas inferiores a la frecuencia propia del sismómetro (1 Hz). Se constata en efecto una disminución de las frecuencias promedio y un aumento de las amplitudes promedio cuando se considera el primer pico entre 0,5 y 20 Hz (figuras 24a y 24b). Por otro lado, se observa que el rango de fluctuación de los valores es más importante para ese intervalo de frecuencia. En cambio, cuando se considera el pico máximo de amplificación (figuras 25a y 25b), se encuentran las formaciones de las tierras bajas (formaciones 1) caracterizadas por las frecuencias más elevadas. Esto significa que ese segundo pico es globalmente más amplificado que el primero, haciéndose entonces necesario considerarlo como el más crítico. Se observa por otra parte que las formaciones que presentan las mayores amplificaciones son f1, f6, f7, q1 y q2 situadas en los flancos oeste y este de la ciudad.

4.3.2. Interpolación a toda la ciudad

El conjunto de relaciones H/V-ruido de fondo permitió representar las iso-frecuencias y las iso-amplitudes de la respuesta de los suelos en las figuras 26 y 27.

Primeramente, considerando el primer pico de la amplificación entre 0,5 y 20 Hz (figura 26), se observa que globalmente las frecuencias obtenidas decrecen hacia el eje central del valle de Quito (tierras bajas) hasta alcanzar valores comprendidos entre 0,5 y 1 Hz, exceptuando algunos sectores en la mitad sur donde ciertas frecuencias llegan a 2,5 Hz. Las frecuencias más elevadas se sitúan esencialmente en los flancos este y oeste, presentando por otro lado estos últimos las más importantes variaciones. Esta configuración se puede explicar definiendo simplemente la frecuencia fundamental f_0 de una estructura de suelo en función de su velocidad V_S de propagación de las ondas S y de su espesor H, mediante la siguiente fórmula:

$$f_0 = V_S / 4.H$$

Así, cuando aumenta el espesor de la estructura, disminuye la frecuencia. Esto parece ser confirmado por los cortes geológicos de la figura 5. Se observa en efecto que el fondo del valle de Quito presenta los mayores espesores de

Figura 24a - Promedio y desviación estándar de las frecuencias (A) y de las amplificaciones (B) de las diferentes clases de suelos, considerando la primera amplificación entre 1 y 20 Hz

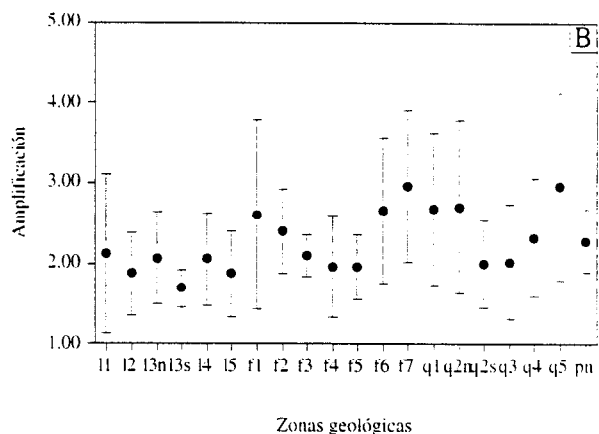
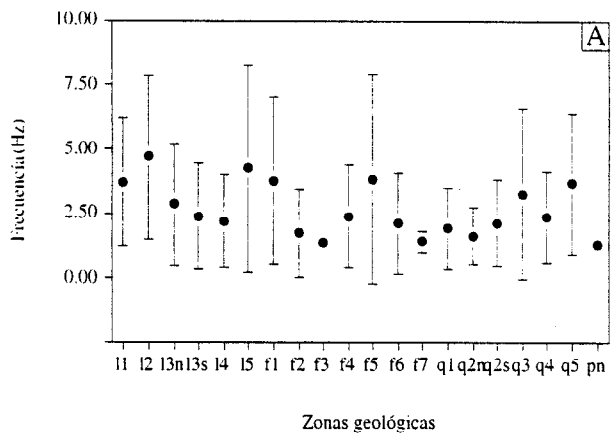


Figura 24b - Promedio y desviación estándar de las frecuencias (A) y de las amplificaciones (B) de las diferentes clases de suelos, considerando la primera amplificación entre 0.5 y 20 Hz

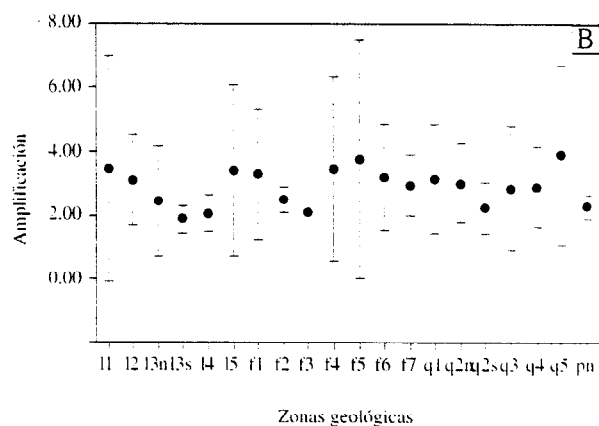
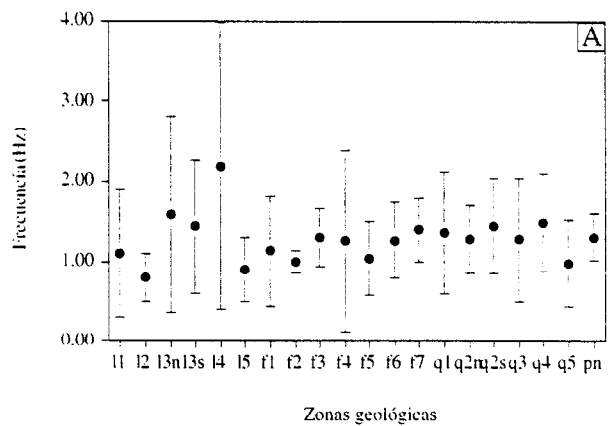


Figura 25a : Promedio y desviación estándar de las frecuencias (A) y de las amplificaciones (B) de las diferentes clases de suelos, considerando la amplificación máxima entre 1 y 20 Hz

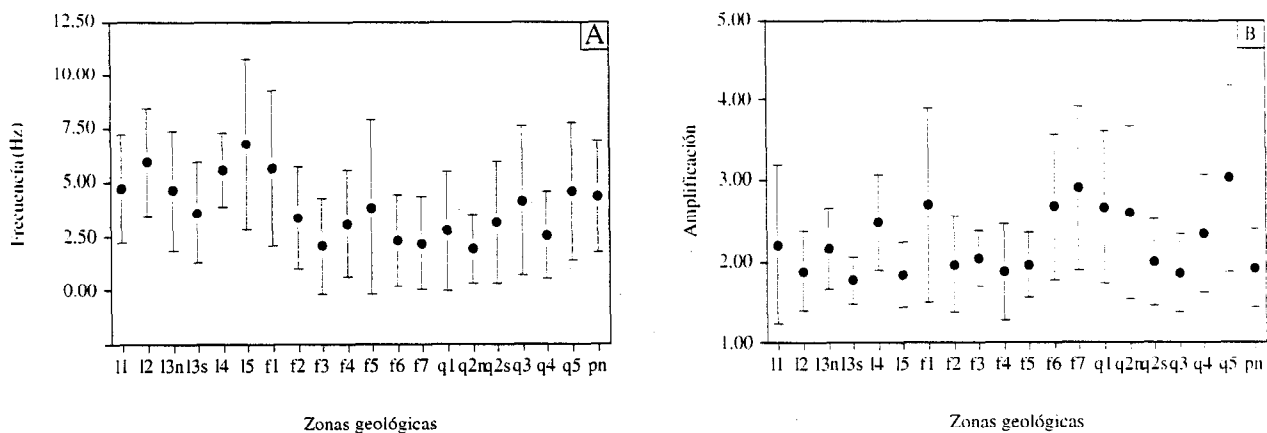


Figura 25b - Promedio y desviación estándar de las frecuencias (A) y de las amplificaciones (B) de las diferentes clases de suelos, considerando la amplificación máxima entre 0,5 y 20 Hz

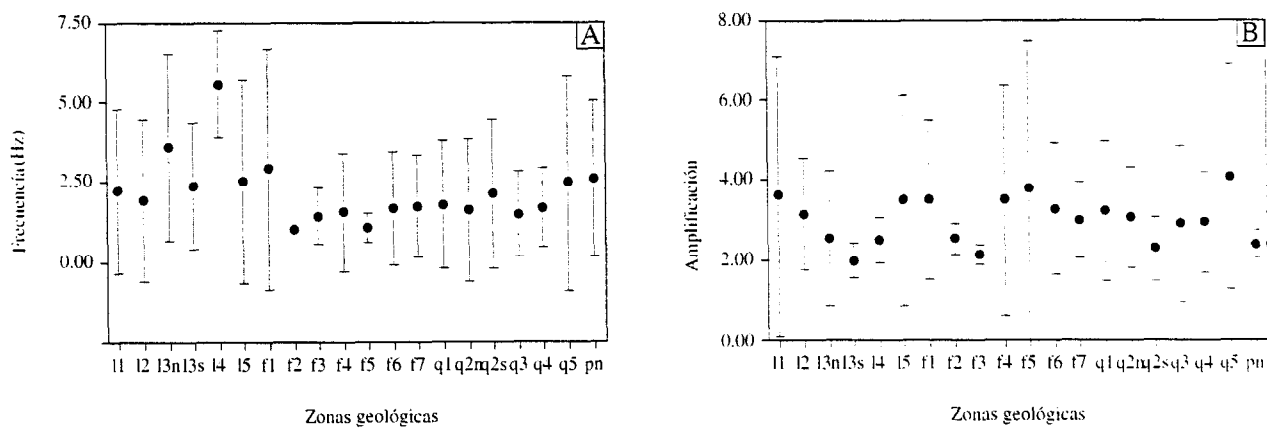
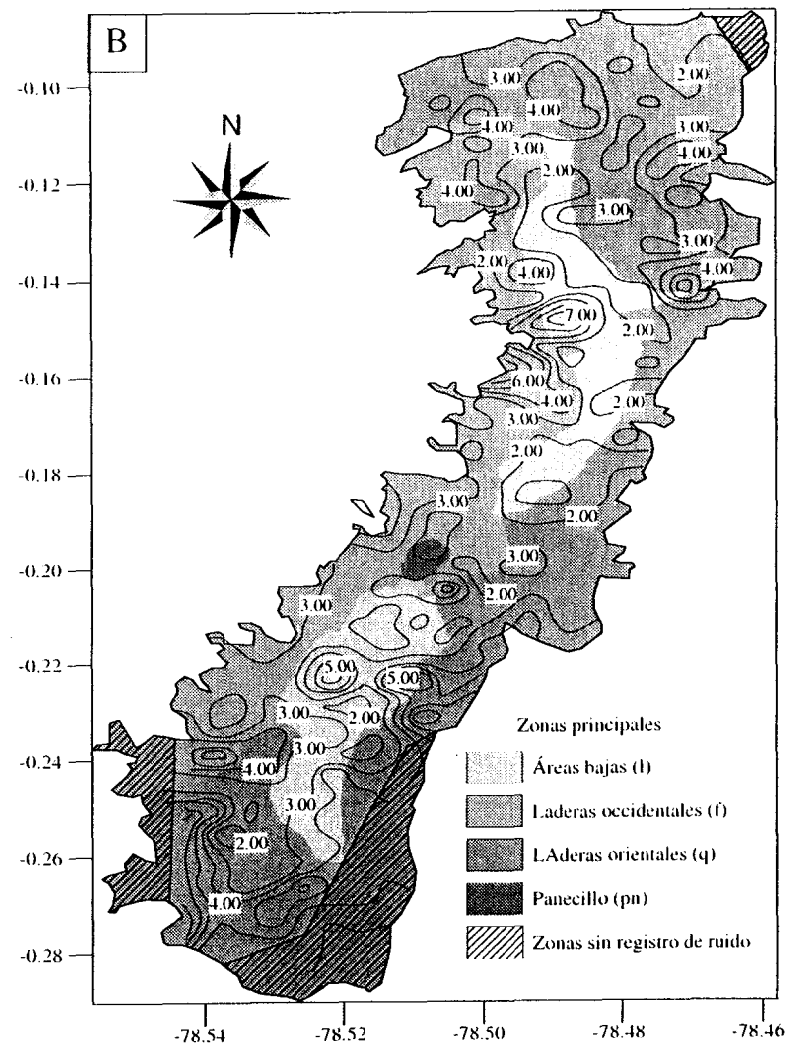
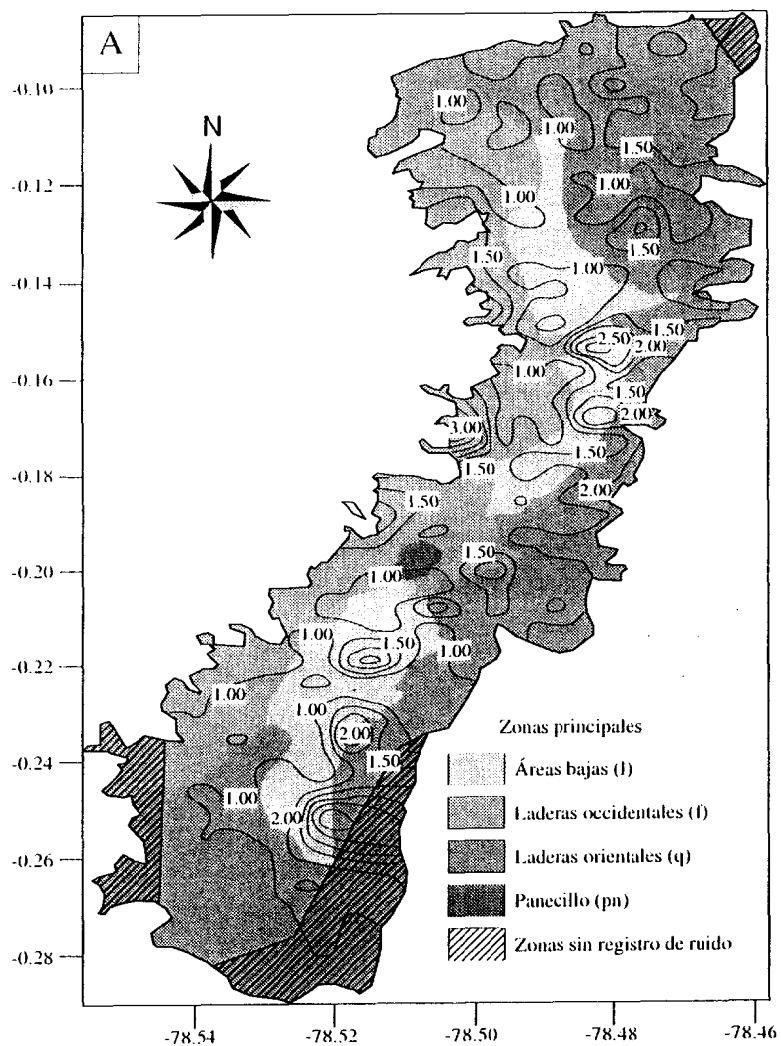


Figura 26 - Mapas de las iso-curvas obtenidas considerando la primera amplificación entre 0.5 y 20 Hz. (A): frecuencias en Hz, cada curva corresponde a un intervalo de 1 Hz; (B): amplificaciones, cada curva corresponde a un intervalo de 1 grado.



relleno, encontrándose las diferentes formaciones representadas a lo largo de cada perfil geológico.

La distribución de las amplitudes (figura 26b) no revela similitud alguna con la geología, a no ser que la parte norte de las tierras bajas se caracteriza por amplitudes reducidas. Se encuentra así esta formación en el aspecto de las iso-amplitudes (del orden de 2).

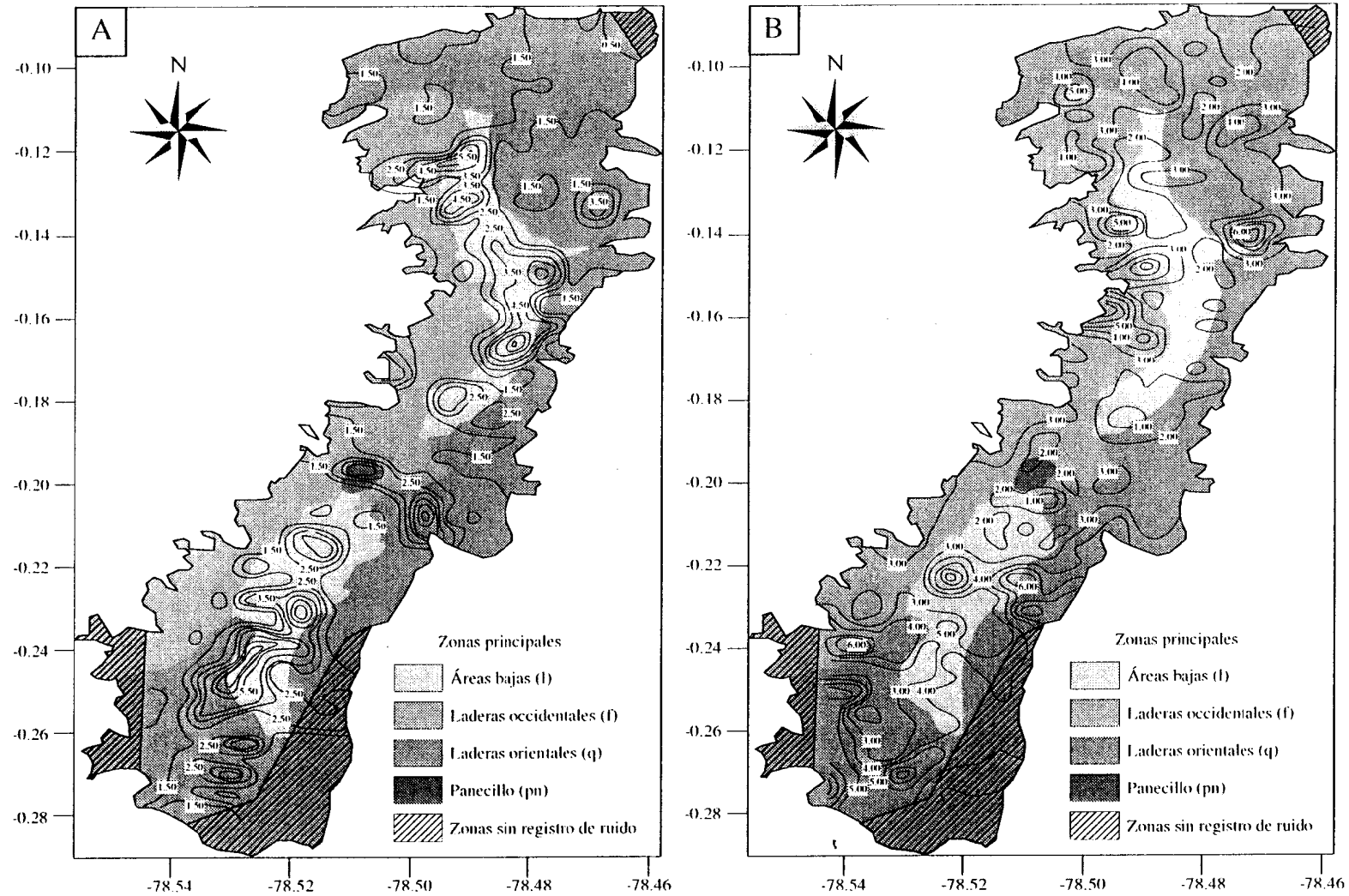
El aspecto de las iso-frecuencias obtenidas con el pico de amplificación máxima comprendido entre 1 y 20 Hz (figura 27) concuerda con las formaciones geológicas deducidas de las observaciones de superficie. Se encuentran las tierras bajas al Norte y al Sur de la ciudad, caracterizadas por las mayores frecuencias (entre 2,5 y 8,5 Hz). En cuanto a las laderas orientales y occidentales, presentan frecuencias del orden de 1,5 Hz. Así, parecería que una formación superficial poco espesa induce tal comportamiento. Se encuentra igualmente esta particularidad a nivel de la formación Panecillo (Pn). Es interesante anotar que esas iso-frecuencias revelan límites geológicos diferentes a los ya establecidos, como por ejemplo al Sur de la ciudad donde la formación q5 se comporta en parte como la formación l1.

Las iso-amplitudes no revelan particularidad alguna. Se observan amplificaciones elevadas en las pendientes occidentales, pudiendo algunas alcanzar al Norte valores del orden de 5. Se observa también que la parte sur de las tierras bajas se caracteriza por amplitudes elevadas.

4.4. Conclusiones

Así, se revela que el método de las relaciones espectrales utilizando el ruido de fondo permite definir correctamente las frecuencias de amplificación máxima del movimiento del suelo en caso de sismo. La frecuencia fundamental, generalmente la primera comprendida entre 0,5 y 2,5 Hz, caracteriza al comportamiento de la totalidad de la columna de suelo. Cuando esta es casi homogénea (mismas capas de suelo), el espesor de la formación va a influir directamente en el valor de esa frecuencia. Es interesante en cambio anotar que en ciertas relaciones espectrales, aparece una segunda amplificación. Esta última, que puede alcanzar valores superiores a los de la frecuencia fundamental, revela similitudes con las formaciones geológicas deducidas de

Figura 27- Mapas de las iso-curvas obtenidas considerando la amplificación máxima entre 1 y 20 Hz. (A): frecuencias en Hz, cada curva corresponde a un intervalo de 1 Hz; (B): amplificaciones, cada curva corresponde a un intervalo de 1 grado.



observaciones de superficie. Así, parecería que esa segunda amplificación caracteriza más exactamente al comportamiento de una capa superficial, como en el sector de La Carolina donde Alvarado (1997) identificó una antigua laguna. Así, se revela necesario considerar las diferentes amplificaciones visibles en las relaciones espectrales, que pueden incidir en la respuesta del suelo en caso de sismo.

PARTE 5: LAS QUEBRADAS

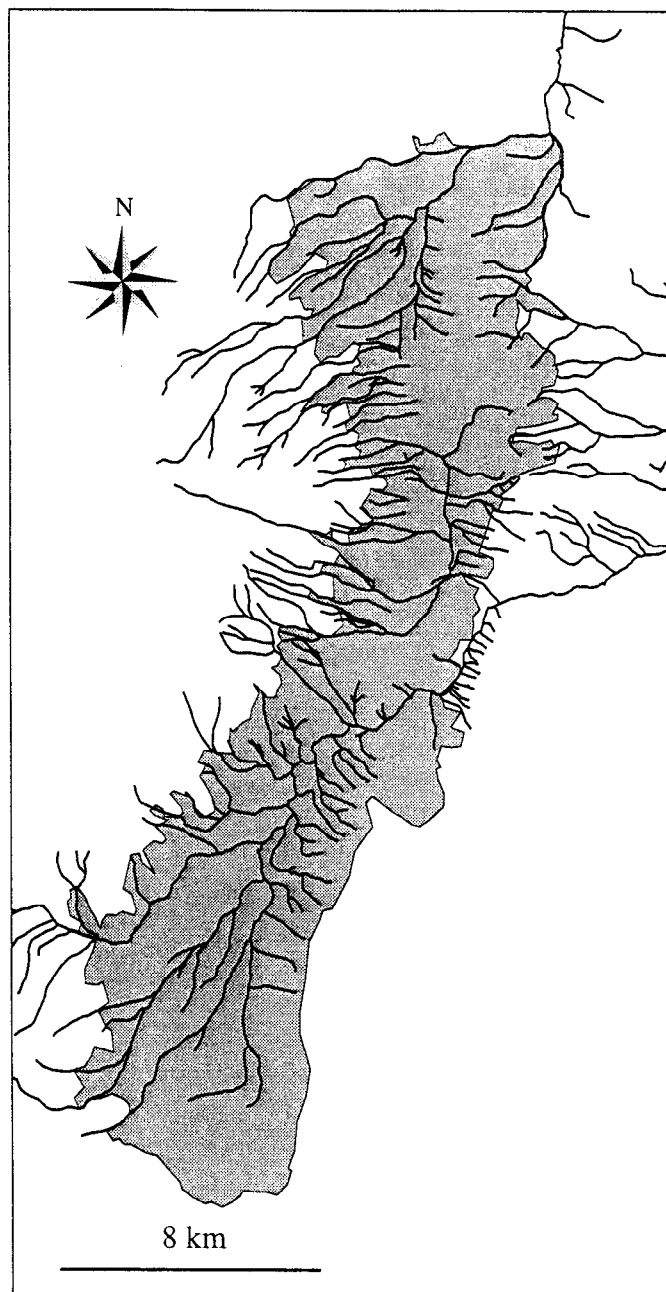
5.1. Generalidades

Una de las particularidades de Quito radica en la existencia de numerosas quebradas, valles profundos y a menudo estrechos que descienden a lo largo de las pendientes orientales y occidentales (figura 28). La superficie urbanizable está interrumpida entonces por esas quebradas, elementos del sistema hidrográfico de Quito que en general no funcionan sino en caso de fuertes lluvias. En la capital ecuatoriana, donde desde hace varios años la urbanización se desarrolla rápidamente, en especial en las pendientes orientales y occidentales, esa numerosas quebradas han sido rellenadas casi sistemáticamente con el fin de aumentar la superficie constructible de la ciudad (Metzger y Peltre, 1996). Se han transformado así en zonas de riesgo y son objeto de numerosos estudios por parte del Municipio de Quito. Sus dimensiones pueden alcanzar de 30 a 100 m de ancho por profundidades de 5 a 70 m (Metzger y Peltre, 1996). La cantidad de quebradas existentes es difícil de cifrar, pero ciertos estudios recientes hablan de 69 quebradas que evacúan las aguas por la depresión de Quito (tierras bajas) hacia los drenes mayores de la capital (Metzger y Peltre, 1996).

5.2. Presentación

Se decidió estudiar cinco rellenos de quebradas, distintos por su modo de relleno y por los materiales utilizados, por su antigüedad y por sus dimensiones. Se los escogió en colaboración con Alexis Sierra, geógrafo del ORSTOM de Quito, quien estudia para el Municipio algunas quebradas mayores de la ciudad. Así, se analizó el comportamiento de cada relleno, utilizando el método de las relaciones espectrales H/V-ruido de fondo. Los datos fueron obtenidos, en la medida de lo posible, a lo largo de los perfiles que atraviesan los límites del relleno, a fin de identificar la transición entre el suelo original y el material de relleno. En cada punto se utilizó el mismo procedimiento de análisis y de tratamiento de los datos descrito anteriormente (punto 4.1.), registrando el ruido durante 5 minutos, muestreandolo a 100 Hz, y calculando la media logarítmica de ventanas de 20 segundos.

Figura 28 - Distribución de las quebradas en la ciudad de Quito



5.2.1. *Anglo French*

La quebrada Anglo French, en el barrio de La Vicentina, está situada en la intersección de las calles Ladrón de Guevara y Los Conquistadores (figura 29). El relleno, que data de hace 2 años aproximadamente, sigue el trazado de la calle de Los Conquistadores y está constituido de tierra proveniente de los terrenos en construcción vecinos, en un espesor comprendido entre 4-5 m (en su parte aguas abajo) y alrededor de 15 m (aguas arriba). Ese relleno se realizó con ayuda del Municipio, lo que implicó la utilización de medios para compactar los materiales de relleno. Es interesante observar que el relleno de la parte aguas arriba (a nivel de la calle Ladrón de Guevara) data de aproximadamente hace 10 años. No se dispone de información alguna en cuanto al material de su relleno.

En total se realizaron 30 registros lo más cercanos posible entre ellos, en especial en la parte más recientemente rellenada (figura 29). Las relaciones espectrales a nivel del relleno más antiguo no revelan ninguna amplificación marcada. En efecto, los registros efectuados al exterior de los límites supuestos del relleno parecen ser similares a los del relleno. Se observa sin embargo una ligera amplificación hacia lo alto de las frecuencias (7-10 Hz) en las relaciones H/V-ruido de fondo de los puntos 3, 7, 9, 10 y 21 de la figura 28, presentando los puntos 8 y 22 dos amplificaciones distintas (la primera hacia 1-2 Hz y la segunda hacia 5-10 Hz).

Se revela en la parte más reciente del relleno que cada relación H/V-ruido de fondo se caracteriza por una ligera amplificación hacia 5-6 Hz. Este pico es más o menos bien marcado debido al espesor y juventud del relleno a ese nivel de la quebrada. Globalmente, la amplificación es reducida (hacia 2). Ciertos puntos se caracterizan por 2 amplificaciones (por ejemplo, las relaciones 32, 33 y 34), pudiendo la primera caracterizar el comportamiento del material original, situado por debajo del material de relleno.

5.2.2. *La Comunidad*

Situada en el barrio de La Comuna, esta quebrada sigue la calle Humberto Albornoz, hasta la avenida Occidental (figura 30). Realizada en forma de terraza, el relleno está constituido de tierra y escombros varios, aunque

Figura 29 - Estudio del comportamiento de la quebrada **Anglo French**, localizada en el barrio La Vicentina, Centro Este de Quito. Las líneas gruesas discontinuas corresponden a los límites supuestos de la quebrada rellena y la línea continua al límite entre el relleno nuevo y el antiguo.

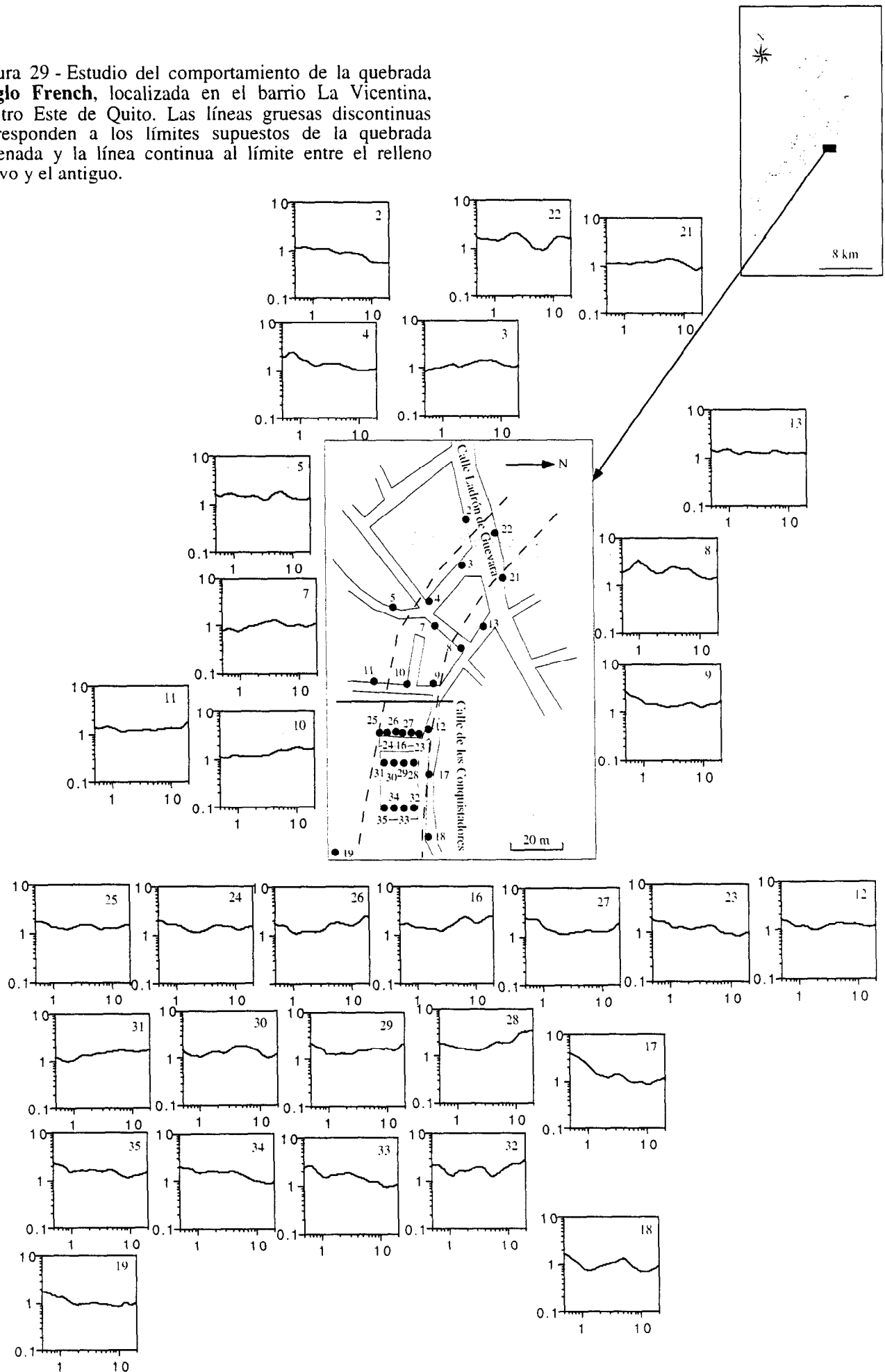
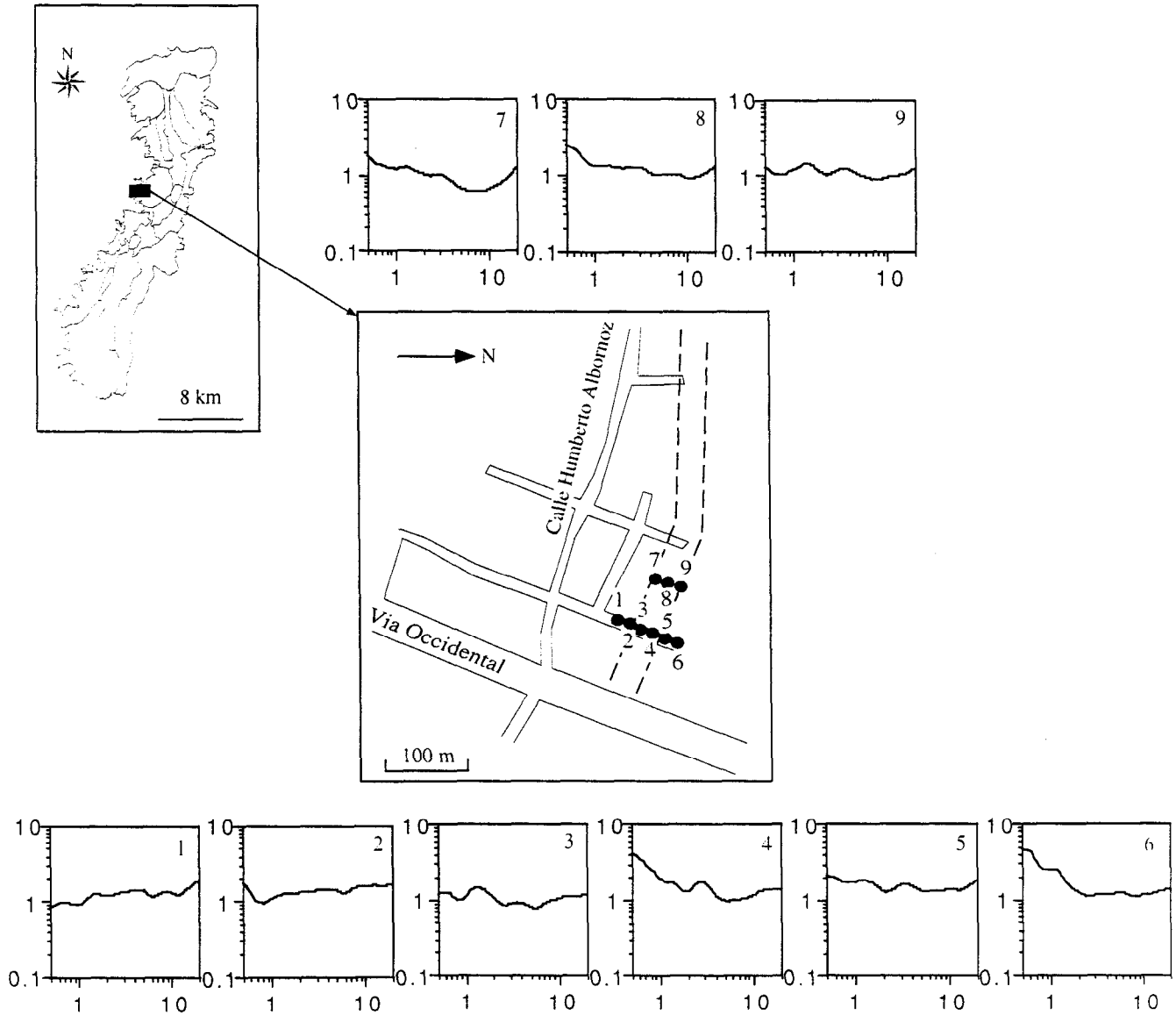


Figura 30: Estudio del comportamiento de la quebrada **La Comunidad**, localizada en el barrio La Comuna, Centro Oeste de Quito. Las líneas gruesas discontinuas corresponden a los límites supuestos de la quebrada rellenada.



desechos domésticos aparecen igualmente al pie de la terraza, lo que supone la presencia de basura dentro del relleno mismo. El espesor del material varía según se encuentre aguas abajo de una terraza (aproximadamente 10-12 m) o aguas arriba (menos de 2 m). Este relleno reciente (4 ó 5 años) fue realizado en parte con ayuda del Municipio, lo que implicó medios adecuados de compactación.

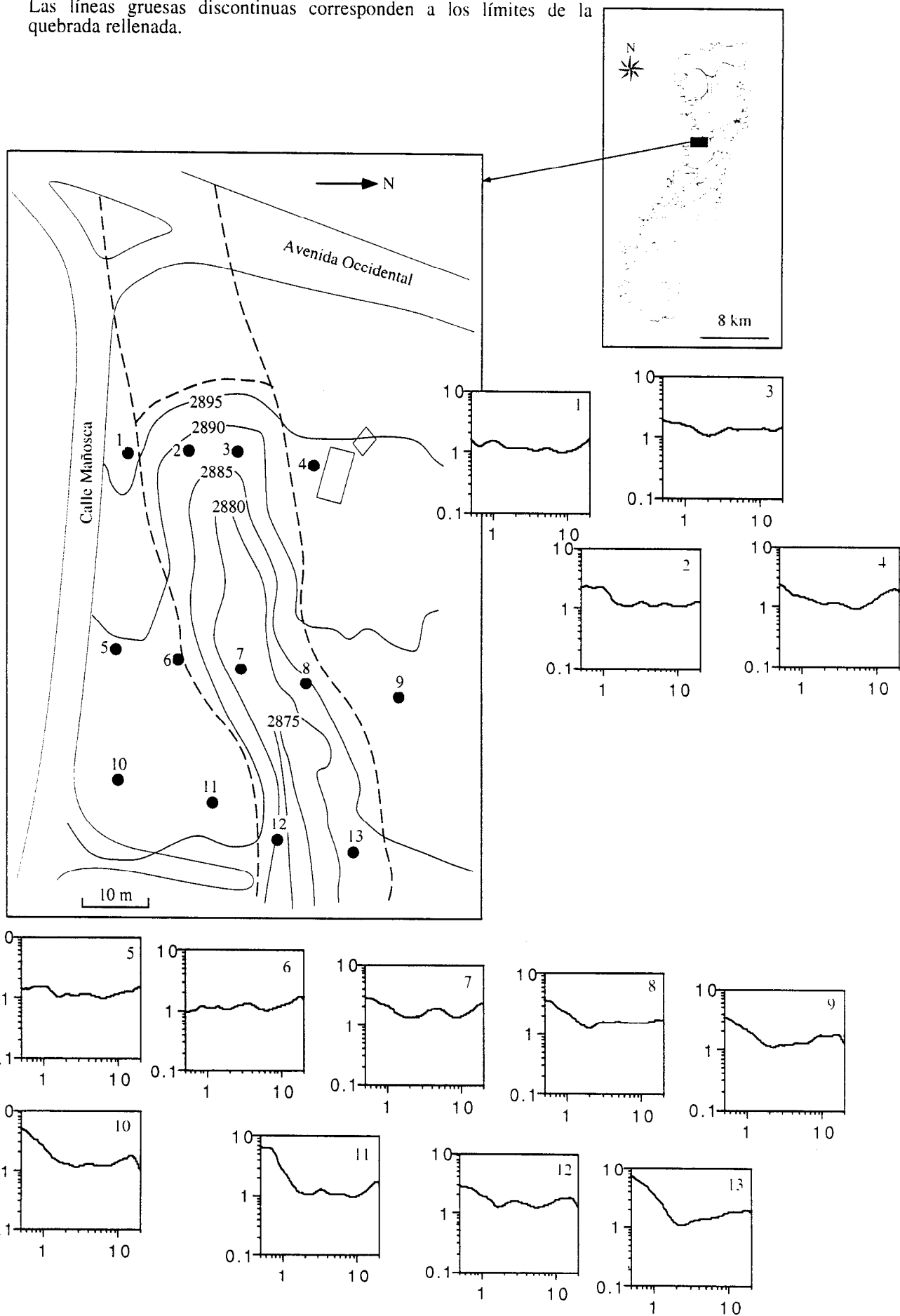
Se establecieron 9 puntos de experimentación, los 6 primeros a lo largo de un perfil que desborda de un lado y otro el relleno, aguas abajo de una terraza, y los 3 últimos situados sobre dicha terraza y aguas arriba de la misma. Se constata así que la transición de los terrenos vecinos a la zona de relleno aparece en las relaciones espectrales. Los puntos 3 y 4 y en menor escala 5 de la figura 29 revelan una amplificación entre 1 y 4 Hz, disminuyendo la frecuencia a medida que nos alejamos del eje supuesto del relleno. Los puntos 7, 8 y 9 presentan apenas una amplificación casi imperceptible, en las mismas frecuencias que los puntos 3 a 5. Es interesante anotar que los puntos 5 a 9, en el límite norte del relleno, presentan la misma respuesta, caracterizada por dos picos hacia 1 y 3,5 Hz. En todos los casos, los valores de la amplificación siguen siendo bajos, inferiores a 2.

5.2.3. *Manzanachupa*

Esta quebrada tiene la particularidad de haber sido cartografiada antes de la fase de relleno, lo que permitió conocer con precisión el espesor del material de relleno. Sigue el trazado, al Este de la avenida Occidental, de la calle Mañosca (figura 31). El relleno, constituido de desechos, de escombros y finalmente de tierra data de hace 2-3 años aproximadamente y corresponde a un espesor de 10 m en el eje central de la quebrada. Fue realizado por la Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable (EMAAP-Q), lo que implica medios adecuados de relleno.

Se realizaron tres perfiles de mediciones, el primero aguas arriba del relleno (puntos 1 a 4), el segundo (puntos 5 a 9) situado a igual distancia del primero y del tercer perfiles, estando este último ubicado aguas abajo de la zona de estudio (puntos 10 a 13). Los resultados revelan poca información en cuanto al comportamiento del relleno. En el primer perfil (figura 31, puntos 1 a 4), que los puntos situados sobre el relleno revelan al parecer una frecuencia ligeramente

Figura 31 - Estudio del comportamiento de la quebrada **Manzana Chupa**, localizada en el barrio Granda Centeno, Centro Oeste de Quito. Las líneas gruesas discontinuas corresponden a los límites de la quebrada rellenada.



amplificada hacia 3-4 Hz, sin que esta última aparezca en las dos relaciones espectrales de un lado y otro de los límites del relleno. Se encuentra también esta frecuencia, más marcada, en los puntos 6 y 7 y eventualmente 8 del perfil 2 y en el punto 12 del perfil 3. Este pico parece ser más marcado, con valores de amplificación más elevados al aproximarse al eje de la quebrada, es decir a nivel de los mayores espesores de relleno. Globalmente, las amplificaciones obtenidas en el relleno son bajas.

5.2.4. *Sabanilla*

Esta quebrada, situada en el barrio Bellavista, al Norte de Quito (figura 32), es el más reciente de los rellenos estudiados. El relleno data de hace aproximadamente 6 meses y está constituido de desechos domésticos en el lecho mismo de la quebrada, cubiertos de tierra. Tiene la particularidad de haber sido realizado por la comunidad de los alrededores, sin medios particulares de colocación de los materiales. Es estrecha y según las informaciones disponibles, el relleno puede alcanzar 10-15 m de espesor.

Se realizaron dos perfiles aguas arriba (puntos 1 a 9, figura 32) y aguas abajo (puntos 10 a 13, figura 32). Se constata una clara amplificación en los puntos situados sobre el relleno, presentando todos una amplificación elevada, superior a 6, hacia una frecuencia del orden de 7-8 Hz. Es interesante constatar que este pico se encuentra parcialmente en los puntos 3 y 12, lo que permite definir esta zona como la transición entre el material original y el relleno (figura 32). La elevada amplificación, visible en las relaciones H/V-ruido de fondo, puede explicarse por un fuerte contraste de impedancia entre el material de relleno y el terreno subyacente, debido a una mala compactación y a un relleno reciente.

5.2.5. *Zámbiza*

Este relleno corresponde al relleno «sanitario» oficial de Quito. Situado a lo largo de la carretera que desciende a Zámbiza, desde la avenida Eloy Alfaro (figura 33), está constituido de capas sucesivas de desechos urbanos y de tierra. Esta quebrada es la más ancha de las estudiadas (aproximadamente 100 m) y tiene la particularidad de no estar rellena hasta la cima. Por ello, no fue posible realizar perfiles que atravesasen el relleno, lo que impidió comparar el

Figura 32 - Estudio del comportamiento de la quebrada **Sabanilla**, localizada en el barrio Bellavista, Norte de Quito. La línea gruesa discontinua corresponde al lecho de la quebrada rellenada.

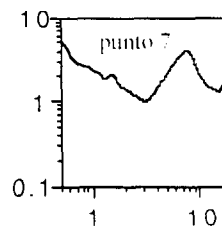
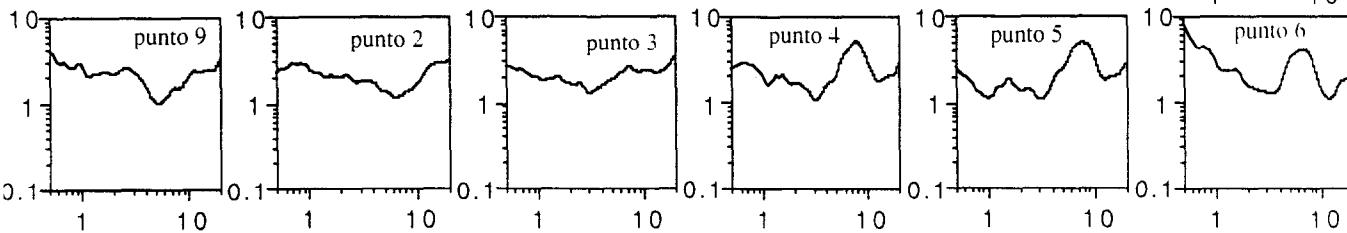
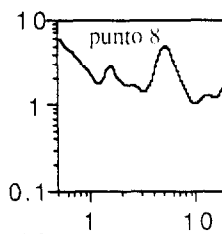
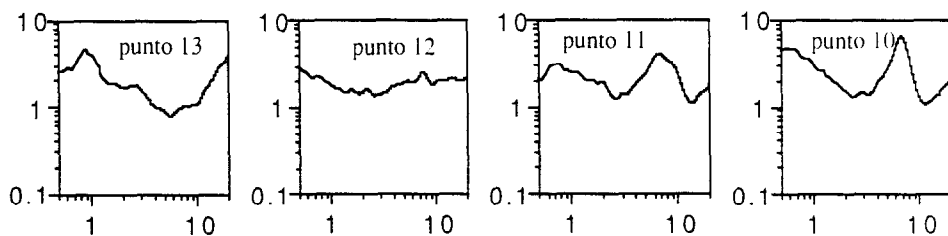
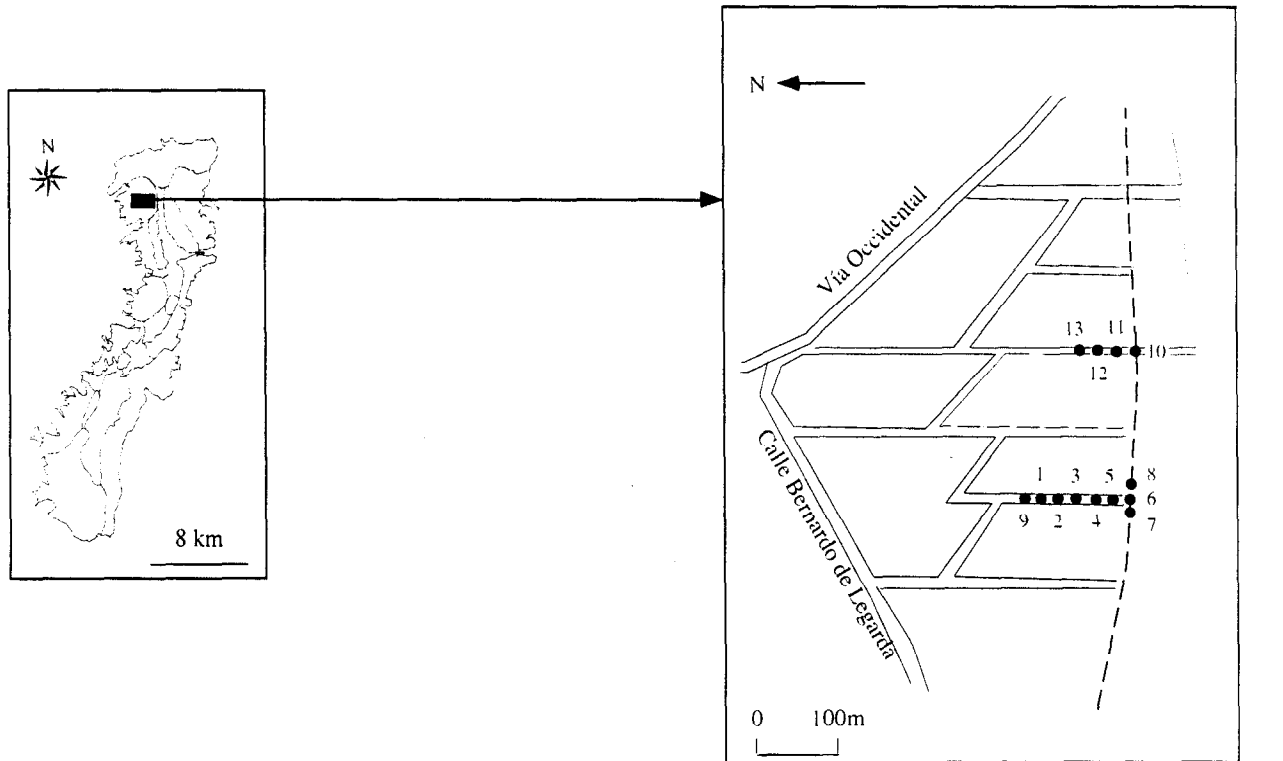
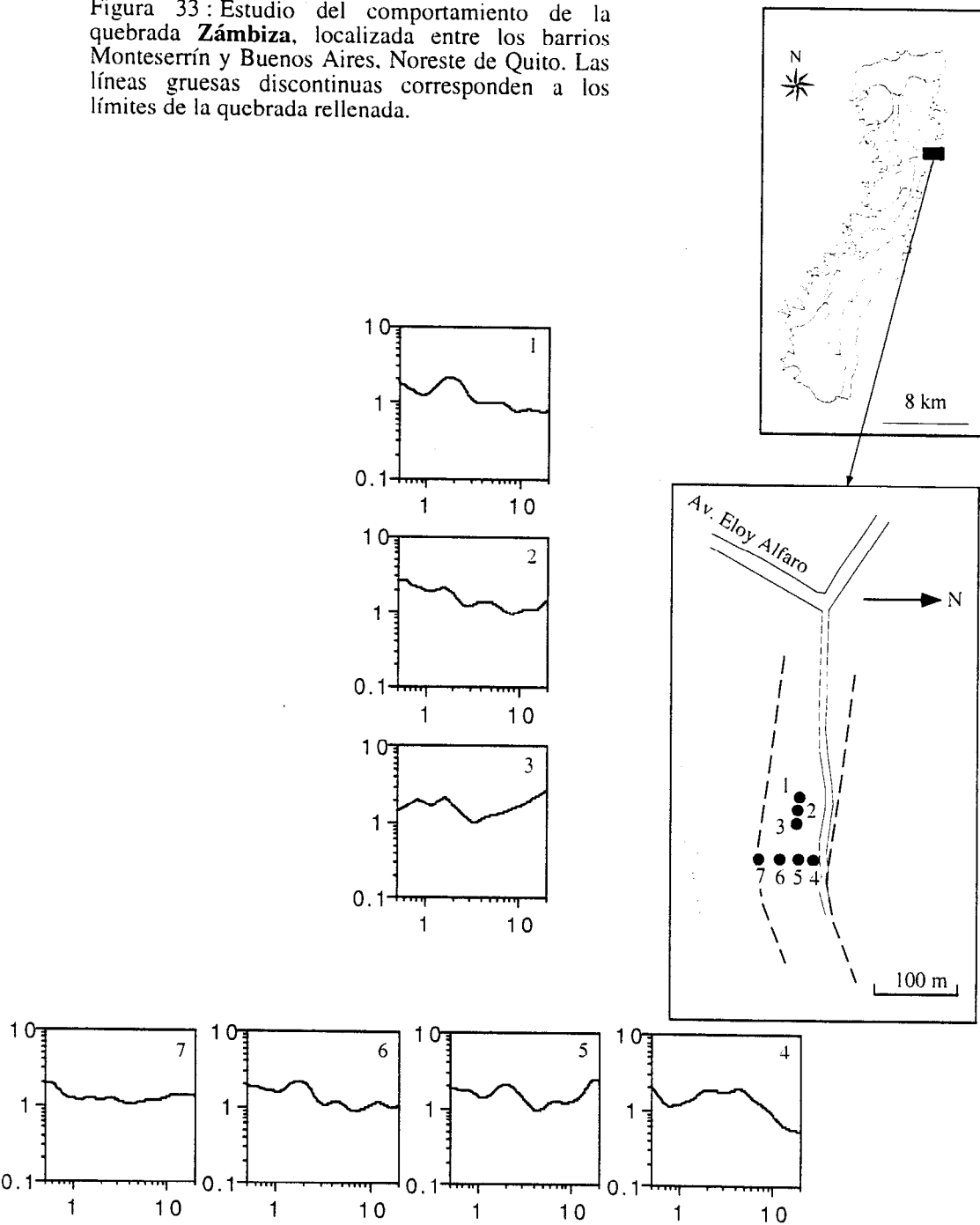


Figura 33: Estudio del comportamiento de la quebrada **Zámbiza**, localizada entre los barrios Monteserrín y Buenos Aires, Noreste de Quito. Las líneas gruesas discontinuas corresponden a los límites de la quebrada rellenada.



comportamiento de este último con el del terreno vecino. El espesor de los materiales alcanza 30-35 m y el relleno se realiza con maquinaria de compactación. Los registros se efectuaron en la parte más antigua de relleno que data de hace aproximadamente 10 años.

Se realizaron dos series de mediciones, la primera paralela (puntos 1 a 3, figura 33) y la segunda perpendicular (puntos 4 a 7, figura 33) al eje de la quebrada. En todas las relaciones espectrales aparece una amplificación hacia 2 Hz en el caso de los puntos 1, 2, 3, 5 y 6 y hacia 4-5 Hz en el caso del punto 4, excepto en el punto 7 ubicado en el límite sur del relleno. La amplificación es bien marcada y alcanza valores comprendidos entre 2 y 3. Esta quebrada, en comparación con las estudiadas anteriormente, presenta el mayor espesor de relleno, lo que explica que la frecuencia amplificada sea menor.

5.3. Conclusiones

Así, el estudio de estas quebradas permitió poner en evidencia ciertos factores que influyen en el comportamiento de los rellenos en caso de sismo. Las dimensiones del relleno, en especial el espesor de los materiales utilizados, va a incidir directamente en el valor de la frecuencia amplificada. Se revela igualmente que la técnica de relleno empleada tiene un papel considerable en la respuesta del relleno. En efecto, las relaciones obtenidas en Sabanilla muestran las mayores amplificaciones, habiéndose realizado este relleno sin los medios técnicos empleados en los otros casos. Por oposición, La Comuna y Manzanachupa presentan amplificaciones muy poco marcadas, pues esas quebradas han sido rellenadas con materiales relativamente homogéneos y sobre todo con medios técnicos. Se constata entonces en Zámbriza, seguramente el relleno mejor realizado y el más antiguo, una amplificación bien marcada debida a la calidad de los materiales compuestos en buena proporción por desechos. Por el contrario, la calidad de los materiales que en el caso de la quebrada Anglo French son esencialmente «sanos», presenta solo una reducida amplificación pese a que el relleno es reciente.

Así, dos factores esenciales deben tomarse en cuenta a fin de limitar de la mejor manera posible el riesgo sísmico en estas estructuras particulares: la mejor técnica posible de relleno y la calidad de los materiales utilizados que deben contener un mínimo de desechos domésticos.

CONCLUSIONES

Este estudio pone en evidencia algunas informaciones importantes en cuanto a la definición y a la precisión del riesgo sísmico en Quito.

Primeramente, las 5 estaciones LEAS instaladas durante dos meses en Quito confirman la importante actividad sísmica que puede afectar a la ciudad. Aparte de los sismos lejanos (telesismos y regionales), se producen permanentemente eventos locales provocados por el sistema de fallas existente bajo Quito. Se desprende igualmente de este estudio una micro-actividad que solo fue detectada en la estación «testigo» de la red. Sería entonces interesante, con el objetivo de conocer de la mejor manera el peligro sísmico, precisar el origen de tal actividad.

Las relaciones espectrales obtenidas en TENI, BERT, COND y CARO permiten confirmar la buena calidad de las informaciones obtenidas mediante el método H/V-ruido de fondo. Se revela, por comparación con los demás métodos, que este último indica sistemáticamente las frecuencias a las cuales se producen las amplificaciones máximas del movimiento del suelo en caso de sismo. El método permite, por otro lado, realizar la microzonificación de una ciudad con un ahorro importante de medios y de tiempo. La validez del valor de amplificación deducido de las relaciones H/V-ruido de fondo queda por definirse. Parece estar subestimado en comparación con el deducido de los métodos que utilizan movimientos fuertes, pero proporciona ya una información. Por la densidad de los puntos de medición que pueden establecerse, la utilización del ruido de fondo permite igualmente precisar los límites de las formaciones geológicas que, debido a la urbanización, no siempre son accesibles.

Se observa además que ciertos sectores presentan dos frecuencias amplificadas. La menor, generalmente asimilada a la frecuencia fundamental de la columna de suelo, se caracteriza en ciertos casos por una amplificación que puede revelarse como la menor de las dos. Se hace entonces necesario considerar esas dos frecuencias a fin de precisar de la mejor manera los efectos de sitio. Ese segundo pico parece caracterizar la respuesta de una capa superficial que aparentemente se comporta de manera independiente del resto de la columna

de suelo. En efecto, en la figura 27 se observa que el aspecto de las iso-frecuencias (deducidas de las relaciones H/V-ruido de fondo considerando la amplificación máxima entre 1 y 20 Hz) coincide con las formaciones geológicas deducidas de las observaciones de superficie. Es interesante anotar que este segundo pico se encuentra igualmente en la estación TENI, con los tres métodos utilizados.

Este estudio de las quebradas muestra que ellas modifican la respuesta de los suelos. Se constata que el modo de relleno y los materiales utilizados inciden considerablemente en el comportamiento de los rellenos y que estos deben realizarse de la mejor manera posible (compactación y materiales homogéneos). Por otro lado, las numerosas quebradas identificadas en Quito, a menudo estrechas, obligan aumentar la densidad de la malla de puntos de medición, pues esas rupturas no siempre fueron detectadas por el estudio global de microzonificación. Al parecer, hacia el Noroeste aparece una quebrada (figura 27) perpendicular al eje Norte-Sur de Quito y se caracteriza por frecuencias elevadas.

Las informaciones deducidas de la microzonificación permiten entonces conocer con precisión las frecuencias de los suelos en Quito, parámetros que intervienen en la elaboración de los códigos y reglamentos de construcción.