Determinación de la estructura del subsuelo utilizando arreglos de microtemblores[1]

ANDRÉS JOSÉ ALFARO CASTILLO
International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Builing Research Institute, Tatehara, Tsukuba, Ibaraki 305-0802, Japón.

Este artículo presenta la teoría y la aplicación del método de la autocorrelación espacial SPAC a microtemblores de corto período para la determinación de la estructura del subsuelo. Los experimentos fueron realizados en el *Building Research Institute* y en *Oyo Corp.* en Tsukuba (Japón) mediante la utilización de diez sismógrafos con frecuencia natural de 2 Hz y siete sismógrafos con frecuencia natural de 0,1 Hz; de componente vertical. La dimensión de los lados mayores de los arreglos fue de 200 metros, con este tamaño de arreglo fue posible observar la estructura del subsuelo a profundidades mayores a 200 metros. Se evalúo la coherencia, los coeficientes de la autocorrelación espacial SPAC, las curvas de dispersión y mediante inversión se determinó la estructura del subsuelo.

Palabras clave: microtemblores, arreglo, estructura del subsuelo, *SPAC*, velocidad de ondas de corte, Tsukuba.

Determination of the subsoil structure using microtremors arrays

This article presents the theory and application of the spatial autocorrelation method SPAC to short period microtremors in order to assess the subsoil structure. Tests were carried out in the *Building Research Institute* and in *Oyo Corp*. located in Tsukuba (Japan) using ten vertical seismographs with 2 Hz natural frequency and seven seismographs with 0.1 Hz natural frequency. The measure of the longest side of the arrays was 200 meters; with this it was possible to see the structure of the subsoil up to more than 200 meters depth. Coherence, spatial autocorrelation coefficients SPAC, and dispersion curves were assessed, and the soil structure was determined by means of inversion technique.

Key Words: Microtremors, array, soil structure, SPAC, shear wave velocity, Tsukuba.

[1] Este trabajo se realizó siendo becario de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) en el *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering* (IISEE), el cual es parte del *Building Research Institute* (BRI) en Tsukuba (Japón).
Correspondencia: alfaro@ciees.org
Recibido: junio 15 de 2005.
Aceptado: febrero 1 de 2006.

INTRODUCCIÓN

El uso de los arreglos de microtemblores se está consolidando como una técnica pasiva de prospección geofísica, utilizada principalmente para el reconocimiento de la estructura del subsuelo. Las técnicas para el análisis de datos fueron desarrolladas en el año 1957 por Aki y en el año 1969 por Capon, la segunda tuvo mayor impulso porque permite, adicionalmente determinar el origen de la fuente que produce la señal sísmica. En las últimas dos décadas las dos técnicas se han utilizado más, debido a la posibilidad del registro digital y a la reducción del costo de los sismógrafos, lo que ha facilitado la realización de los arreglos y el procesamiento de los datos.

Una de las mayores ventajas en la utilización de los arreglos de microtemblores, es que ha permitido su utilización en áreas urbanizadas, sin que esto signifique molestia para los habitantes de la zona y por otra parte, sacando provecho de los microtemblores en vez de utilizar fuentes externas.

Aspectos teóricos del método de autocorrelación espacial SPAC. Aki (1957, 1965) presentó los fundamentos teóricos para estimar las velocidades de fase por medio del método SPAC. En esta sección se resumen los aspectos del método SPAC convencional a partir de Aki (1957), Okada (2003) y Morikawa *et al.* (2004). El método SPAC se basa en la teoría de las funciones aleatorias estacionarias, de tal forma que los microtemblores se consideran procesos estacionarios en el tiempo y en el espacio.

Se considera un arreglo circular con radio *r* para la observación de microtemblores; las ondas armónicas con una frecuencia angular ω de la componente vertical de los microtemblores se representan como $u(t;\omega,0,0)$ y $u(t;\omega,r,\theta)$, las cuales son observadas en el centro del arreglo $C(0,0)$ y en un sitio $X(r,\theta)$ del círculo, respectivamente (Figura 1). Se asume que la componente vertical de los microtemblores consiste principalmente de ondas Rayleigh con un modo fundamental.

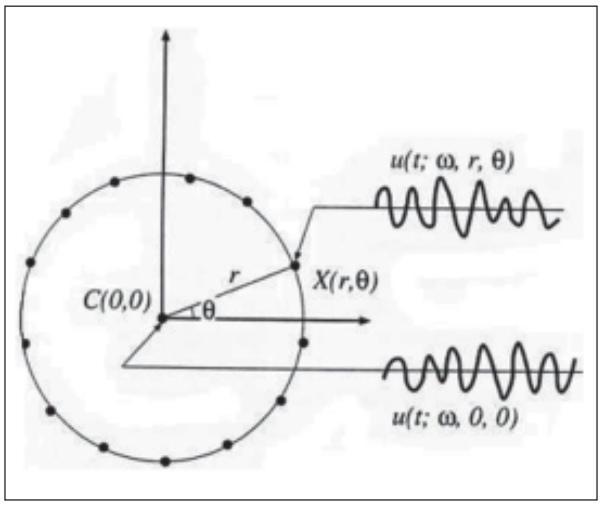

Figura 1. Descripción esquemática de los sitios de observación y de la componente vertical de los microtemblores. u (t; ω, 0, 0) y u (t; ω, r, θ) denotan las ondas armónicas con una frecuencia angular ω las cuales se obtienen en el centro del arreglo y en los diferentes puntos (Morikawa *et al.* 2004).

La función de autocorrelación espacial se define en la Ecuación 1.

$$\phi(\omega;r,\theta)=\langle u(t;\omega,0,0)\cdot u(t;\omega,r,\theta)\rangle$$

Ecuación 1

Los coeficientes de la autocorrelación espacial están definidos como el promedio de las funciones SPAC evaluadas en todos los puntos de observación del arreglo circular, como se muestra en la Ecuación 2.

$$\rho(\omega;r)=\frac{1}{2\pi\cdot\phi(\omega;0,0)}\int_0^{2\pi}\phi(\omega;r,\theta)d\theta$$

Ecuación 2

En la Ecuación 2 ϕ $(\omega;\ 0,0)$ es la función de autocorrelación en el centro $C\ (0,0)$. Después de una simplificación matemática, la integral de la Ecuación 2 se puede escribir como se muestra en la Ecuación 3.

Ecuación 3

Donde J_o es la función Bessel de tipo uno, de orden cero y $c(\omega)$ es la velocidad de fase a la frecuencia ω de las ondas Rayleigh con el modo fundamental.

Los coeficientes SPAC de la Ecuación 2 pueden calcularse directamente en el dominio de la frecuencia utilizando la Transformada de Fourier de los microtemblores como se muestra en la Ecuación 4.

$$\rho(\omega;r) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{real\left[S_{CX}(\omega;r,\theta)\right]}{\sqrt{S_C(\omega;0,0)\cdot S_X(\omega;r,\theta)}}\,d\theta$$

Ecuación 4

Donde *real* $\left[S_{CX}(\omega;r,\theta)\right]$ denota la parte real del número complejo; $S_C(\omega;0,0)$ y $S_X(\omega;r,\theta)$ son los espectros de potencia de los microtemblores en los sitios, $C(0,0)$ y $X(r,\theta)$ respectivamente. $Sc_X(\omega;r,\theta)$ es el espectro cruzado entre $S_C(\omega;0,0)$ y $S_X(\omega;r,\theta)$.

Se puede observar en las ecuaciones 2 y 4 que los coeficientes SPAC se obtienen del promediado de las funciones de coherencia de acuerdo con la localización θ, donde las funciones de coherencia se definen como la parte real del espectro cruzado $S_{CX}(\omega;r,\theta)$ normalizado por el espectro de potencia en $C(0,0)$.

Los coeficientes $\rho(\omega,r)$ pueden ser calculados directamente a partir de los datos observados utilizando la Ecuación 4. Lo cual es fácil de realizar aplicando alguna técnica numérica tal como la transformada rápida de Fourier (FFT). Adicionalmente, la velocidad de fase a una frecuencia ω puede obtenerse del argumento de la función Bessel en la Ecuación 3. Para esta evaluación, se puede utilizar alguna técnica de inversión, con el fin de obtener el valor óptimo de la velocidad de fase $c(\omega)$. Finalmente mediante proceso de inversión y asumiendo una estructura inicial de subsuelo se puede, a partir de la curva de dispersión, determinar la estructura de mayor ajuste.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos fueron realizados en el *Building Research Institute* y en *Oyo Corp.* en Tsukuba (Japón) mediante la utilización de diez sismógrafos con frecuencia natural de 2 Hz y componente vertical. Los sismógrafos utilizados fueron McSeis SXW de doce canales y el McSeis-MT, este último con antena GPS para dar inicio a los cronómetros en forma simultanea. Las dimensiones de los lados mayores de los arreglos fueron de 50 y 200 metros respectivamente, con este tamaño de arreglo fue posible observar la estructura del subsuelo inclusive a profundidades mayores de 200 metros, los esquema de los arreglos se observan en la Figura 2.

El análisis de los datos se realizó mediante la utilización del *software*: *Pickwin95* y *WaveEq* de *Oyo Corporation* (Hayashi 2005; Hayashi *et al*. 2005); *b_fit* (Yokoi 2005a 2005b) y *surf96* (Herrmann y Ammon 2002).

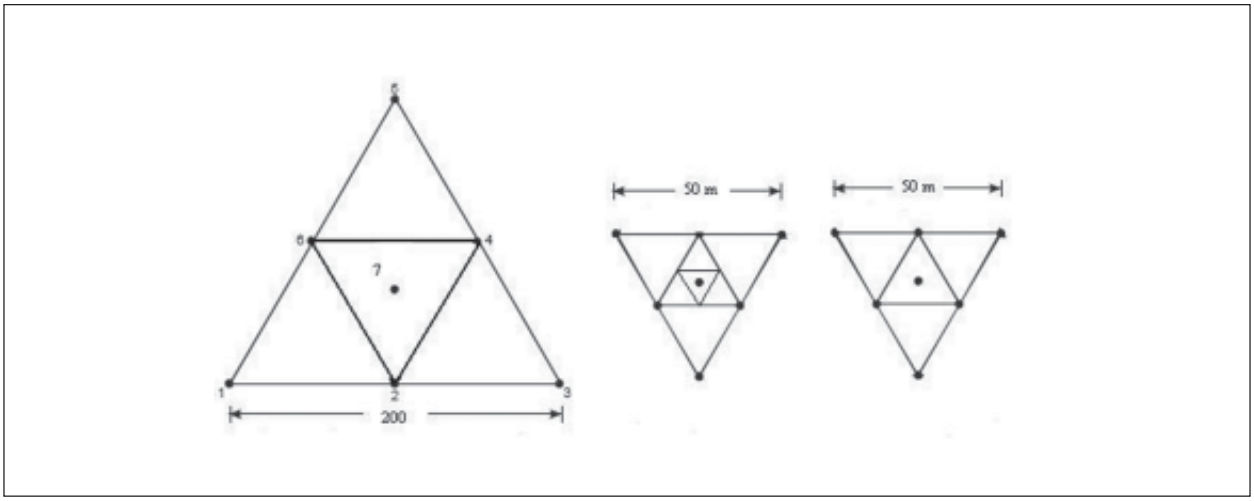

Figura 2. Esquema de los arreglos de microtemblores utilizados en el experimento.

RESULTADOS

Un ejemplo de conjunto de datos se puede observar en la Figura 3, la observación de los datos en el dominio del tiempo permite verificar la estacionariedad del proceso. Esta parte es fundamental para verificar que todas las estaciones estén funcionando correctamente y evitar que alguna este localizada en un sitio con interferencias puntuales.

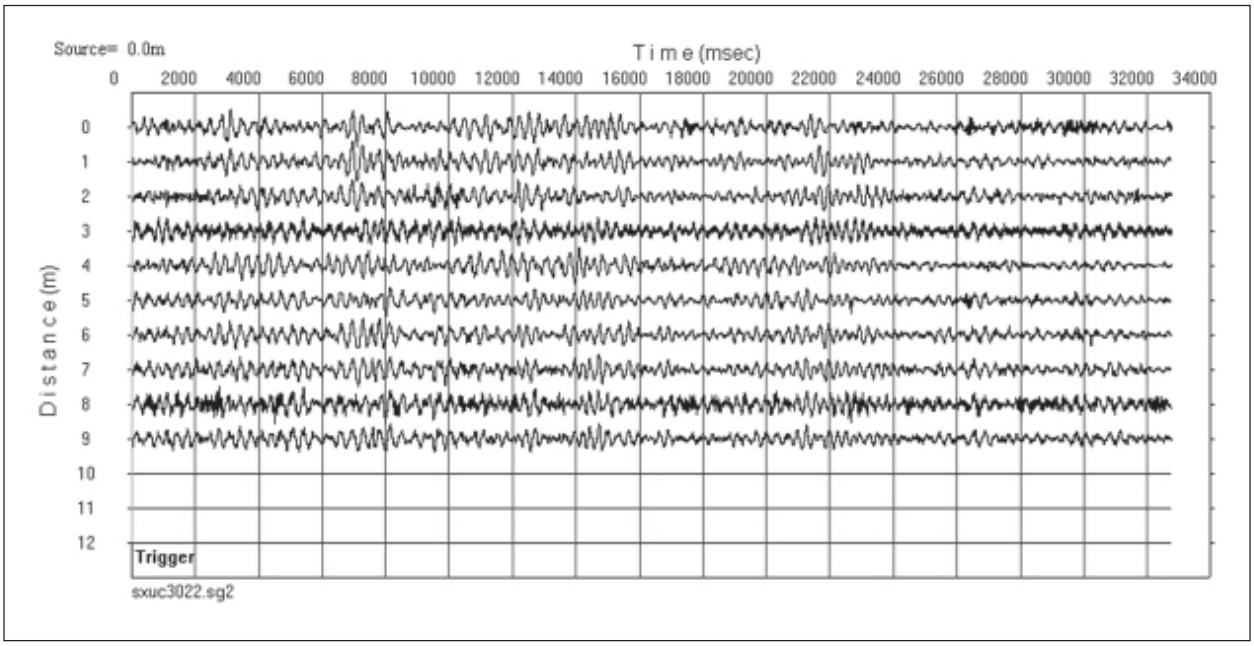

Figura 3. Ejemplo de los datos registrados en los diez sensores simultáneamente.

Se evaluó la coherencia de los datos registrados; luego los coeficientes SPAC, que son una especie de promedio azimutal de las diferentes coherencias (Ecuaciones 2 y 4), un ejemplo se muestra en la Figura 4 para diferentes distancias de separación entre los sensores, en este caso la coherencia es función de la distancia entre sensores, es claro que la coherencia del sensor del centro del arreglo *C(0,0)* consigo mismo es unitaria; los coeficientes SPAC van disminuyendo su valor en la medida que aumenta la distancia; por otro lado, esta es también función de la frecuencia, siendo mayor en las bajas frecuencias.

Se estimaron las velocidades de fase $c(\omega)$ mediante el ajuste de las funciones Bessel de primer tipo y orden cero (Ecuación 3). Ejemplos de curvas de dispersión se pueden observar en la Figura 5.

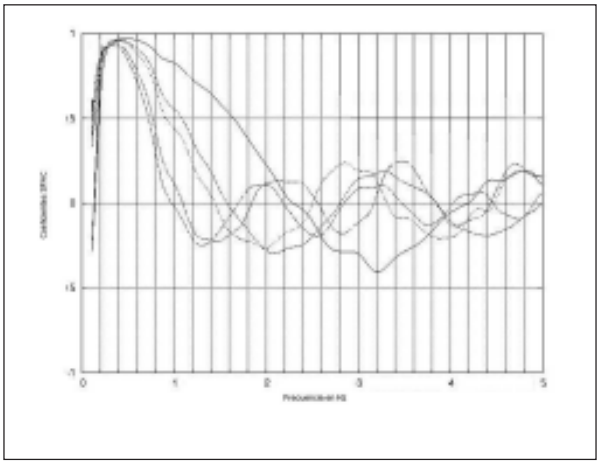

Figura 4. Ejemplo de coeficientes SPAC entre señales para diferentes distancias de separación entre los sensores. Nótese que la coherencia es función de la distancia y de la frecuencia.

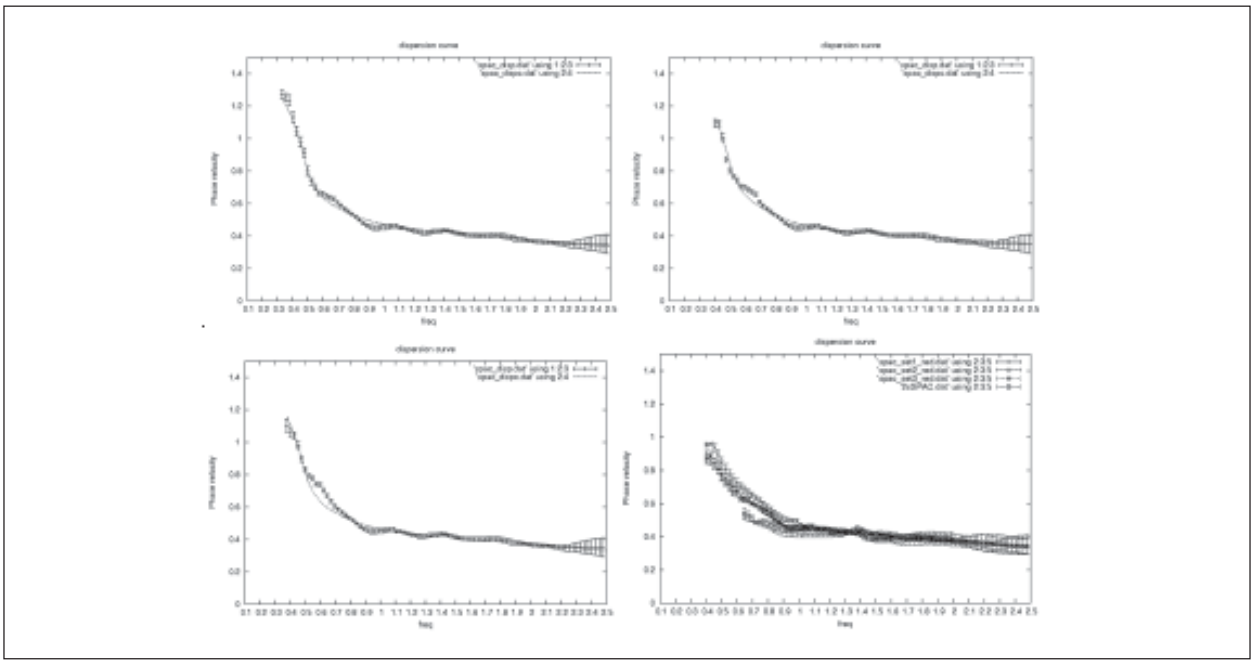

Figura 5. Ejemplos de curvas de dispersión estimadas. Los puntos provienen de los datos de campo, la línea continua corresponde al ajuste teórico (Yokoi 2005b).

Con la curva de dispersión es posible realizar el proceso de inversión con el fin de determinar la estructura del subsuelo, para lo cual se parte de un modelo inicial; este modelo es sencillo y parte de dos premisas: se divide el subsuelo en capas y se asume que la velocidad de ondas de corte (*Vs)* aumenta con la profundidad; a continuación se asignan valores de la velocidad de ondas de corte, consistentes con los materiales de la zona en estudio.

De esta manera, se procede al proceso de inversión (Herrmann y Ammon 2002), con lo que se obtiene un modelo de estructura del terreno, como el que se muestra en la Figura 6, en la que se presenta la comparación de las velocidades obtenidas mediante *PS-logging* en una perforación de 1300 metros de profundidad y la estructura obtenida mediante la inversión de la curva de dispersión a partir de los microtemblores.

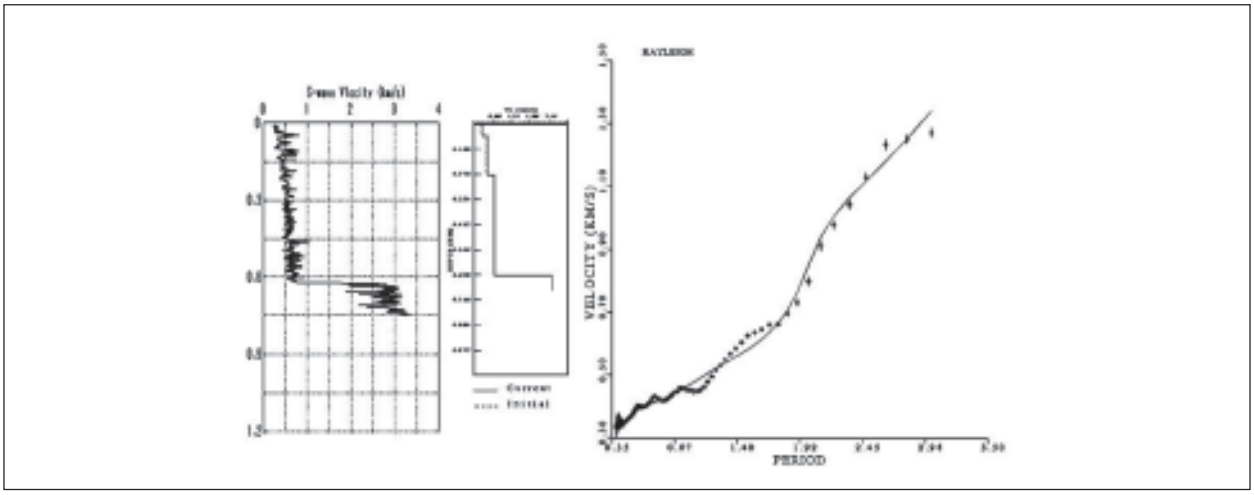

Figura 6. Comparación de las velocidades obtenidas mediante *PS-logging* en una perforación de 1300 metros de profundidad al lado del arreglo de 200 metros y la estructura obtenida mediante la inversión de la curva de dispersión a partir de los microtemblores.

DISCUSIÓN

De los diferentes métodos de prospección geofísica, los métodos pasivos tienen la gran ventaja de no generar molestias en la zona en la que se están realizando los ensayos, las técnicas que utilizan microtemblores se han venido consolidando en los últimos años como una interesante opción para el reconocimiento y estudio de estructuras superficiales y profundas del subsuelo (Alfaro 2005, Alfaro y Yokoi 2005). Dentro de las diferentes técnicas que usan microtemblores se ha de destacar la que utiliza las relación espectral Horizontal Vertical H/V, impulsada a partir de la publicación de Nakamura (1989), utilizada en muchos sitios del mundo para la determinación de periodos predominantes y clasificación de materiales desde el punto de vista dinámico (Alfaro *et al*. 2001); los vacíos teóricos fueron resueltos por los desarrollos de Arai y Tokimatsu (2000, 2004), quienes no sólo realizaron el ensamble de ondas superficiales sino que mediante técnicas de inversión pudieron estimar la estructura de velocidades utilizando la relación H/V.

Este artículo presenta ejemplos de la utilización de arreglos de microtemblores para la determinación de la estructura superficial del suelo en Tsukuba (Japón), mediante la utilización de arreglos triangulares de 7 y 10 sensores, con lados mayores de los triángulos de 50 y 200 metros. Mediante el análisis de microtemblores de corto período se estimaron las coherencias, los coeficientes SPAC; las curvas de dispersión $c(\omega)$ y mediante inversión de $c(\omega)$ se determinó la estructura del subsuelo. Los resultados obtenidos coinciden con los provenientes de un *PS-logging* de 1300 metros de profundidad, el nivel de detalle es menor pero los arreglos de microtemblores pudieron obtener los aspectos más relevantes de los cambios de la estructura de velocidades de ondas de corte del subsuelo.

Es importante destacar que se pueden realizar arreglos de mayores dimensiones utilizando microtemblores para estimar la estructura profunda del subsuelo, alcanzando profundidades hasta 600 metros (Hayashi 2005, Alfaro 2005). De acuerdo con los resultados resumidos en este artículo es deseable que se impulse la técnica de los arreglos de microtemblores para estudios de prospección geofísica, principalmente aquellos que buscan estimar la estructura del subsuelo para estudios de amenaza sísmica local.

AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Koichi Hayashi del *Building Research Institute* y en *Oyo Corp.* en Tsukuba (Japón) por su colaboración en el manejo de los datos.

Al Dr. Toshiaki Yokoi *Building Research Institute* y en *Oyo Corp.* en Tsukuba (Japón) por la supervisión de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Aki K 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors. *Bull Earthq Re. Inst* 35: 415-457.

Aki K 1965. A note on the use of microseisms in determining the shallow structure of the Earth´s Crust. *Geophysics* 30: 665-666.

Alfaro A 2005. *Estimation of S-wave velocity structure Using arrays of long period microtremors. Individual Studies by Participants at the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering.* Building Research Institute. Tsukuba Japan. 41: 15-28.

Alfaro A, Yokoi T 2005. Determinación de la Estructura de Velocidades de Ondas de Corte mediante arreglos de microtemblores de largo periodo. *XIII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana*. CDROM.

Alfaro A, Pujades LG, Goula X, Susagna T, Navarro M, Sánchez JA 2001. Preliminary Map of Soil´s Predominant Periods in Barcelona Using Microtremors. *Pure Appl Geophys* 158: 2499-2511.

Arai H, Tokimatsu K 2000. Effects of Rayleigh and Love waves on microtremor H/V spectra. *Proc 12th World Con. Earth. Eng.* Paper 2232, CD-ROM.

Arai H, Tokimatsu K 2004. S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum. *Bull Seism Soc Am* 94 (1): 53-63.

Capon J 1969. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Procc IEEE* 57: 1408-1418.

Hayashi K 2005. Active and Passive Surface Waves. *International Institute of Seismology and Earthquake Engineerin.* Lectures Notes. 45 p.

Hayashi K, Inazaki T, Suzuki H 2005. Buried Channel delineation Using a Passive Surface Wave method in Urban Area. *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering.* Lectures Notes. 25 p.

Herrmann RB, Ammon CJ 2002. *surf96 from Computers Programs in Seismology, Surface Waves, receiver Functions and Crustal Structure*, Version 3.30. Department of Earth and Atmospheric Sciences. Saint Louis University.

Morikawa H, Sawada S, Akamatsu J 2004. A method to Estimate Phase Velocities of Rayleigh Waves Using Microseisms Simultaneously Observed at Two Sites. *Bull Seism Soc Am* 94 (3): 961-976.

Nakamura Y 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR of RTRI* 30 (1): 25-33.

Okada H 2003. *The microtremor survey method.* Society of Exploration Geophysicists. Geophysical Monograph Series No. 12. Tulsa. USA. 127 pp.

Yokoi T 2005a Combination of Down Hill Simplex Algorithm with Very Fast Simulated Annealing Method - An effective Cooling Schedule for Inversion of Surface Wave's dispersion Curve. *Proc Fall Meeting of Seismological Society of Japan.* S16-08010854

Yokoi T 2005b. Program for fitting the spatial auto-correlation coefficient determined from observed data to Bessel function and determine the dispersion curve. *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering.* Building Research Institute. Tsukuba Japan.