

DE LOS MICROSISMOS A LOS MICROTEMBLORES Investigaciones en el Instituto Geofísico

LILIANA MORENO JARAMILLO

Instituto Geofísico Universidad Javeriana, Santafé de Bogotá

ANDRES JOSE ALFARO CASTILLO

Instituto Geofísico Universidad Javeriana, Santafé de Bogotá

RESUMEN: El Instituto Geofísico Universidad Javeriana fue fundado en 1941, con el objeto de realizar estudios geofísicos del territorio colombiano en todas sus ramas, especialmente en lo referente a la sismología y la meteorología. La idea de su establecimiento recibió una extensa acogida por varias organizaciones científicas internacionales, por cuanto aún no existía en Sur América Septentrional ningún centro instaurado para tales investigaciones.

Su fundador y primer Director, R.P. Jesús Emilio Ramírez S.J., MSc. y PhD. en Geofísica en la Universidad de Saint Louis, Mo., EE. UU., dedicó su tesis doctoral al estudio de los microsismos para la detección de ciclones desde tierra por medio de estaciones sismológicas tripartitas, sistema que fue ampliamente utilizado por Estados Unidos durante la segunda guerra Mundial y que fue secreto de Estado por varios años.

En la actualidad, el equipo de investigaciones del Instituto Geofísico adelanta estudios de microzonificación sísmica a partir del análisis de microtemblores, los cuales son vibraciones generadas por fuentes artificiales tales como tráfico, maquinaria industrial y otros, cuya principal ventaja respecto a los microsismos es la estabilidad. En efecto, a pesar de que los niveles de ruido ambiental varían a lo largo del día, los coeficientes espectrales y el periodo predominante del suelo se mantienen invariables, aunque se presenta alteración de la amplitud del periodo. También se puede citar la facilidad de obtención de registros en cualquier sitio y en cualquier momento, ya que se puede realizar con estaciones provisionales, lo cual implica que con un único equipo se pueden cubrir grandes áreas en lapsos de tiempo relativamente cortos.

Los estudios están siendo adelantados en las ciudades de Tunja, Pasto, Villavicencio, Ibagué, Barrancabermeja y Neiva. Para tal efecto, el Laboratorio Sísmico de Albuquerque (ASL) del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) prestará un sismógrafo portátil de banda ancha. El plan de trabajo previsto para el sismógrafo incluye el análisis de ruido sísmico en diferentes sitios de Bogotá (en roca) y el análisis de microtemblores para realizar comparaciones con modelación numérica en diferentes suelos de Bogotá, y para contribuir a la microzonificación de las ciudades anteriormente mencionadas.

1. INTRODUCCION

Las vibraciones del suelo han sido estudiadas y analizadas desde hace varios siglos con el objeto de conocer la estructura de la corteza terrestre y de predecir el comportamiento y los efectos de movimientos sísmicos fuertes, entre muchas otras aplicaciones.

En general, las vibraciones del suelo pueden dividirse en movimientos sísmicos (fuertes y débiles), microsismos y microtemblores. Comúnmente se tiende a pensar que microsismos y microtemblores se refieren al mismo tipo de vibraciones, pero son dos fenómenos que difieren principalmente por la estabilidad, por el rango de periodos de las ondas de que están constituidos y por las fuentes que los generan.

Las fuentes que generan los microsismos son naturales, mientras que las de los microtemblores

dependen principalmente de la actividad humana (Seo, 1992), por lo que se conocen como ruido sísmico ambiental. Por su origen, los microsismos han sido utilizados para predecir los fenómenos inestables que los generan tales como ciclones y tormentas (Ramírez, 1939), mientras que los microtemblores por su estabilidad, aportan información del medio que atraviesan, mas que de sus fuentes.

Este documento centra su atención en la definición y aplicación de estos dos tipos de eventos sísmicos, que forman parte de la historia y de las líneas de investigación del Instituto Geofísico Universidad Javeriana, las cuales incluyen actividades adicionales al normal funcionamiento de la red sismológica activa en Colombia desde 1941 y a la investigación aplicada en la actualidad, enfocada hacia el estudio de amenazas naturales como terremotos, volcanes e inundaciones, vulnerabilidad y evaluación de escenarios de daño.

2. MICROSISMOS

Los microsismos se definen como las oscilaciones naturales y regulares del subsuelo, que no son producidas por terremotos ni por fuentes artificiales como el tráfico o la maquinaria industrial, sino que son inducidas por fuentes naturales como olas oceánicas y tormentas, por tanto las características de la amplitud y del periodo son afectadas por la condición del clima. Están compuestos principalmente por ondas Rayleigh y son de periodo relativamente largo (2-3 ó más segundos). Aparecen en los registros de todos los sismógrafos, demostrando que la corteza terrestre está en un continuo estado de agitación (Ramírez, 1939).

2.1 Historia del estudio de microsismos

El conocimiento de la naturaleza y el origen de las ondas microsísmicas fueron objeto de intensas investigaciones, cuyos propósitos principales eran determinar si se trataba de ondas estacionarias o viajeras y encontrar la relación, si la había, entre los microsismos y las condiciones meteorológicas. En caso de tratarse de ondas viajeras, se requeriría conocer además, la dirección de propagación, velocidad, variaciones de amplitud y periodo y longitud de onda.

Los microsismos como tales fueron estudiados por primera vez en Florencia (Italia) por Timoteo Bertelli, considerado el padre de la investigación sistemática de microsismos. Dedicó tres años (1869-1872) al estudio de los pequeños movimientos espontáneos de un péndulo, por medio de experimentos simples. De su estudio concluyó que los movimientos microsísmicos de un péndulo aislado sucedían frecuentemente cuando ocurrían terremotos distantes, y que otros movimientos ocurrían durante depresiones barométricas continuas. Además, observó que la mayor intensidad de movimiento ocurría en los meses de invierno, mientras que la mínima intensidad ocurría durante el verano (Bertelli, 1878). Algunas de las causas sugeridas por Bertelli para explicar estas oscilaciones fueron:

- Marea
- Acción del viento
- Variaciones de temperatura en general

El interés se extendió y pronto hubo observaciones tronométricas diarias en varias estaciones de Italia. Hubo discusiones en cuanto a sus observaciones, pero éstas fueron confirmadas por otros sismólogos.

Camilo Melzi realizó un estudio detallado de la relación entre movimientos microsísmicos y barométricos, del que concluyó que un descenso en la presión atmosférica correspondía siempre a una agitación del

tronómetro y que los movimientos duraban lo que duraba en la región ese bajón de presión. En Roma encontró que la máxima intensidad de microsismos correspondía a la mínima presión barométrica presentada y observó también microsismos aislados que no eran comunes a todos los observatorios y que no coincidían con el decrecimiento de la presión, por lo que podían considerarse de carácter sísmico, de la misma naturaleza de un terremoto (Ramírez, 1939).

Rebeur-Paschwitz (1895) distinguió tres clases de movimientos microsísmicos del péndulo:

- Vibraciones regulares causadas por terremotos
- Pulsaciones con periodo entre 2-3 min. y longitud de onda de 500 Km. aprox, diferentes a las oscilaciones de corto periodo estudiadas por Milne.
- Oscilaciones regulares con periodo de 3 -10 seg. con las siguientes características:
 - Mas frecuentes en invierno que en verano.
 - Periodo máximo muy marcado entre las 4-5 a.m. y entre las 2-3 p.m.
 - Influencia del viento solo en su intensidad, pero no en su periodicidad.
 - El tráfico podía ser eliminado como causa de esos microsismos; en cambio, una de las posibles causas podían ser las heladas, las cuales explicarían la periodicidad el movimiento.
 - Observó cuidadosamente el gradiente barométrico pero no pudo confirmar los resultados de Milne.

En Japón, los microsismos fueron amplia y profundamente estudiados. Autores como Omori y Milne (Omori, 1901) los definieron como el resultado de actividades volcánicas, depresiones barométricas profundas y el océano. Las principales características de las pulsaciones observadas en Tokio fueron:

- Ocurrieron mas frecuentemente durante el invierno que en verano
- El periodo promedio oscilaba entre 3.4-8 seg. y permanecía constante por muchas horas sin depender de la amplitud
- No hubo dependencia de la frecuencia de microsismos con la hora del día
- La dirección del movimiento cambiaba constantemente
- La longitud de onda varió entre 11.2 Km. y 26.4 Km.
- El periodo y la amplitud no parecían depender de las condiciones geológicas del suelo

Omori además de los movimientos microsísmicos, reconoció y estudió vibraciones cortas con periodo promedio de 0.3 seg., actualmente llamadas microtemblores (Omori, 1908).

A principios del siglo XX, con el mejoramiento de la instrumentación y el establecimiento de una Asociación Internacional Sismológica, se dio un nuevo impulso al estudio de microsismos, hubo numerosas Conferencias Internacionales Sismológicas y se nombraron comités especiales con el propósito de investigar la naturaleza y causas de los microsismos. Un primer reporte determinó dos tipos de microsismos (Schuster, 1909):

- Microsismos con periodo entre 4–10 seg.: No relacionados con el viento
- Microsismos con periodo alrededor de 30 seg.: Relacionados directamente con la fuerza del viento

Wiechert, integrante de uno de los comités especiales, intentó probar su teoría sobre el impacto de las olas del océano en las costas continentales, por medio del registro y la contabilización de las olas que llegaban a la playa en un tiempo dado, con un aparato construido por él mismo (Wiechert, 1907).

En 1913, Hecker comparó la intensidad de los microsismos con el comportamiento de varios elementos meteorológicos y llegó a una conclusión opuesta a la de Rebeur-Paschwitz en cuanto al gradiente barométrico.

El meteorólogo Banerji, afín a la escuela Alemana, concluyó que la causa de los microsismos era la acción directa de ondas Rayleigh producidas por tormentas a mar abierto, que eran llevadas al fondo del mar por el tren de olas que genera la corriente de Monson de la India, cuyo periodo oscila entre 5 -9 seg. según la fuerza del viento (Banerji, 1925).

Gutenberg aseguró que las ondas microsísmicas eran de tipo Rayleigh y que no eran solamente estacionarias, sino que también existían ondas de tipo progresivo en los microsismos (Gutenberg, 1931).

Critikos(1932) rechazó tanto la corriente alemana como la hipótesis de Bertelli, y atribuyó la causa de microsismos a la acción del viento contra las rocas de las costas.

Bradford de acuerdo con Gherzi, concluyó que las variaciones atmosféricas eran la causa de los microsismos, no sólo sobre el mar sino también sobre tierra firme. (Bradford, 1934).

Whipple y Lee(1935) sostuvieron que los microsismos eran ondas terrestres procedentes del centro de tormentas en el océano y no de lugares donde las olas rompían contra las rocas costeras, y que originalmente las ondas eran tipo Rayleigh pero cambiaban según la condición geológica.

Desde finales de la Primera Guerra Mundial y hasta los años 50's, hubo dos principales tendencias sobre el origen de los microsismos:

- Escuela Alemana: Atribuyó la causa de los microsismos al choque del oleaje contra las rocas de las costas continentales.
- Hipótesis de Bertelli: Afirma que la causa de los microsismos son las depresiones barométricas.

Los detractores de la teoría alemana encontraron muy difícil ver cómo las pulsaciones del océano contra las costas podrían ser la causa de microsismos a partir de la energía de las olas. Afirmaron que debido a la falta de simultaneidad a lo largo de la orilla, dicha energía podría ser simplemente absorbida dentro de una corta distancia (Ramírez, 1939).

Gherzi, opuesto a Banerji y a favor de la hipótesis de Bertelli, no encontró importancia en la acción de las olas producidas por tifones y vientos locales en la costa China, y afirmó que los microsismos eran causados por variaciones periódicas de la presión del aire en la región de ciclones tropicales o extra-tropicales. Visión prevalente entre los sismólogos japoneses (Gherzi, 1923; Zanon, 1938a).

Zanon (1938a y 1938b) afirmó que los ciclones profundos en el Atlántico Norte eran la causa de un tipo de microsismos característicos que llegaron a Venecia con un periodo de 9 seg. y aceptó como probable la teoría de Whipple, es decir, la transmisión de la energía de las olas del mar a un estrato de resonancia de la litosfera, por medio de ondas longitudinales elásticas. También explicó las diferencias de amplitud como el resultado de los diferentes periodos de los sismógrafos que se mueven en resonancia con el movimiento del suelo.

Sin embargo, tanto Whipple como Klotz, Lee y otros, aunque estuvieron de acuerdo que los microsismos eran generados según la intensidad y el movimiento de los abatimientos barométricos, afirmaron que no era posible explicar su mecanismo exacto o el origen de las ondas (Klotz, 1908, Whipple y Lee, 1935).

En cuanto al tipo de onda microsísmica y a su estacionariedad, la mayoría de sismólogos japoneses consideraron que se trataba de ondas estacionarias (Kishinouye, 1935). Nagaoka definió los microsismos como temblores superficiales estacionarios compuestos por ondas Rayleigh, debidos a la superposición de dos vibraciones con periodos y amplitudes casi iguales (Nagaoka, 1906). Honda(1930), a pesar de estar de acuerdo con Nagaoka, no descartó que por lo menos una mínima parte de las pulsaciones eran de tipo Love con componente vertical igual a cero.

Esta visión general japonesa, se debe al hecho de que al comparar los registros de dos estaciones diferentes en Tokio, fue imposible identificar las vibraciones individuales en los dos lugares (Omori, 1909).

Humpheys observó pequeños cambios de presión de aire con amplitud entre 0.1- 0.3 mm y periodo entre 5-10 min., que continuaban por varias horas o días, y que eran mas comunes durante los meses de invierno (Humpheys, 1920).

A fin de estudiar la relación entre oscilaciones microbarométricas y la ocurrencia de microsismos, se inventó el microbarógrafo como un instrumento para registrar las oscilaciones cortas y no regulares de la presión del aire.

Goldie, de acuerdo con Johnson, aseguró que dichas oscilaciones de presión, con periodos comúnmente observados, eran el resultado del movimiento ondulatorio en la interfase de dos corrientes de aire con diferentes densidades y movimiento, y que los cambios en los periodos, se debían a cambios de temperatura en una de las corrientes de aire (Johnson, 1929).

Entre 1936 y 1937, Krug encontró que el periodo oscilaba entre 4-8 seg., con una velocidad de propagación relativamente baja de 1100 ± 200 m/s. También encontró correlación entre las depresiones barométricas y la intensidad de los microsismos, así como una dependencia de la intensidad en la condición geológica local (Krug, 1937).

En 1939, el R.P. Jesús Emilio Ramírez S.J, fundador y primer director del Instituto Geofísico Universidad Javeriana, dedicó su tesis doctoral al estudio de los microsismos para la detección de ciclones desde tierra por medio de estaciones sismológicas, sistema que fue ampliamente utilizado por Estados Unidos durante la segunda guerra Mundial y mantenido como secreto de Estado durante varios años.

Jesús Emilio Ramírez S.J., nacido el 25 de abril de 1904 en Yolombó-Antioquia (Colombia) y fallecido en 1983, fue el fundador de la Geofísica en Colombia, promovió la instrumentación, el análisis de registros sísmicos y la investigación geofísica a gran escala, cuyo mayor ejemplo son los proyectos Nariño I, II y III.

La investigación de Ramírez se restringió al tipo mas común de microsismos, el cual tiene un periodo entre 3-10 seg., ocurre con mayor frecuencia en invierno que en verano y aparece en los registros de todos los sismógrafos de periodo libre no muy corto (Ramírez, 1939). Para este efecto, se instalaron en San Luis (Missouri) cuatro sismógrafos electromagnéticos

horizontales y portátiles, formando una red triangular, método que ya había sido ensayado previamente por algunos autores (Krug, 1937; Kishinouye, 1935).

El periodo del péndulo se ajustó de modo que estuviera sincronizado con el periodo del galvanómetro (6 seg. aprox.), de tal manera que el sistema completo estuviera en resonancia con el microsismo estudiado. Los tres vértices de la red se localizaron de la siguiente manera: Gimnasio de la Universidad de San Luis; Universidad de Washington y College Maryville.

La Universidad de Washington se encuentra a 6.4 Km. al oeste del Gimnasio de la Universidad de San Luis, y el College Maryville a 6.3 Km. al sur del mismo. Las distancias fueron escogidas por ser presumiblemente un cuarto de la longitud de la onda microsísmica. Los sismógrafos de San Luis y Washington se instalaron sobre caliza dura, mientras que la estación de Maryville yace sobre esquistos. Se usaron también dos microbarógrafos diseñados por Macelwane.

Debido a que las mismas ondas fueron identificadas en cada una de las estaciones de la red y en otras estaciones cercanas, los resultados demostraron que las ondas microsísmicas son viajeras y no estacionarias.

La velocidad se determinó en $2,67 \pm 0,03$ Km./s a partir del estudio de numerosas lluvias de microsismos. El periodo osciló entre 3.5 -7.5 seg., siendo el promedio de 5.4 seg., y se estimó que era función de la distancia entre la estación y la fuente. La longitud de onda hallada fue del orden de $14 - \frac{1}{4}$ Km. (Ramírez, 1939).

Muchas de las observaciones de las oscilaciones barométricas obtenidas por medio de los microbarógrafos, mostraron una relación no directa entre los microsismos y las oscilaciones microbarométricas, tanto en la forma de la onda como en el periodo.

Todas las direcciones determinadas de los microsismos que llegaron a la red, apuntaron a una profunda depresión barométrica sobre el océano, por tanto, la fuente de microsismos se encontró no sobre la tierra sino sobre la superficie de mar, cuando esas profundas depresiones barométricas viajan a través del agua.

A pesar de las divergencias, la gran conclusión fue que el origen de los microsismos correspondía a fenómenos naturales tales como el oleaje, las tormentas y las depresiones barométricas. El viento, los cambios de temperatura y la atracción de cuerpos celestes fueron descartados por los sismólogos por improbables.

Después del estudio dedicado a los microsismos promovido enormemente por el R.P. Jesús Emilio Ramírez, sesenta años después el equipo de investigaciones del Instituto Geofísico Universidad Javeriana adelanta actualmente estudios y análisis de otro tipo de oscilaciones, llamadas microtemblores (Alfaro y Pavlenko, 2000; Acevedo y Peralta, 2000).

3. MICROTEMBLORES

Los microtemblores son vibraciones generadas por eventos artificiales producto de la actividad humana tales como tráfico, maquinaria industrial y explosiones de dinamita, cuya principal ventaja respecto a los microsismos es su estabilidad. Están compuestos principalmente por ondas Rayleigh y S y contrario a los microsismos, son de periodo corto (Aki, 1957; Akamatsu y Nogoshi, 1961; Igarashi, 1971).

El rango de periodos para medición de microtemblores es menor a 1 ó 2 segundos. Sin embargo, existe una excepción en Ciudad de México, en donde microtemblores de periodo mayor a 5 segundos han sido originados por acción humana debido a la existencia de sedimentos muy blandos (Seo, 1995).

3.1 Historia del Estudio de Microtemblores

Aunque desde finales de los años cincuenta en Japón se han realizado numerosas publicaciones sobre microtemblores, la medición y el análisis de éstos se hizo muy popular desde el terremoto ocurrido en Ciudad de México en 1985, ya que se encontró que registraron muy bien la condición del suelo en las áreas afectadas (Seo, 1995).

Durante los años cincuenta y sesenta, Kanai y Tanaka fueron los pioneros en la utilización de los microtemblores para la caracterización de efectos de sitio. Llevaron a cabo observaciones simultáneas de microtemblores a diferentes profundidades en varios tipos de suelo y concluyeron que la distribución de periodos varia con la profundidad, que la curva de distribución de periodos muestra una forma definida que depende del tipo de suelo y que la variación de la distribución de amplitudes con la profundidad no es simple ni formulable (Kanai y Tanaka, 1961).

De algunos ejemplos en los que se compara la distribución de periodos obtenida con sismos y con microtemblores, Kanai y Tanaka (1961) concluyen que el periodo predominante de un movimiento sísmico está muy relacionado con el periodo más frecuente de los microtemblores y que el registro de microtemblores en superficie permite obtener el periodo de resonancia que se obtiene con el sismo. Además, en lugares en los que

la curva de distribución para microtemblores tiene un solo pico, dicho periodo coincide claramente con el periodo predominante de los movimientos sísmicos. La Figura 1 es un ejemplo que muestra una buena correlación de las curvas de frecuencia-periodo entre el movimiento sísmico fuerte y los microtemblores.

En resumen, en sus investigaciones Kanai y Tanaka (1961) encontraron que los microtemblores estudiados obtienen periodos predominantes similares a los obtenidos con señales de movimientos sísmicos fuertes, y propuso una clasificación de las condiciones del suelo en un sitio, usando solamente registros de microtemblores.

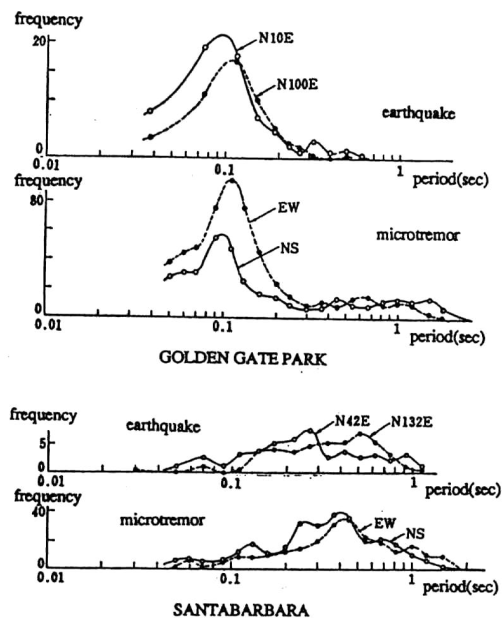


Fig. 1- Comparación de la relación Frecuencia-Periodo entre sismos y microtemblores. (Kanai *et al.*, 1961).

Udwadia y Trifunac (1973) señalaron la nula correlación entre los espectros de movimientos sísmicos fuertes y microtemblores en El Centro, California. Sin embargo, mostraron la posible aplicabilidad de microtemblores en áreas donde se encuentra una resonancia fuerte en terremoto, tal como en ciudad de México (Udwadia y Trifunac, 1974).

Lermo y Chávez-García (1994) observaron que los periodos coinciden pero que las amplitudes de las relaciones espectrales a una estación de referencia de microtemblores no con las de los registros de movimientos fuertes (Figura 2). Otros autores también han hallado diferencias entre amplitudes de relaciones

espectrales de movimientos fuertes y de microtemblores en varios sitios (Seo, 1992; Gutiérrez y Singh, 1992).

Alcock (1974), Allam y Shima (1967) sugirieron que tanto el período predominante como la amplificación de microtemblores en las capas del subsuelo, se pueden interpretar por ondas internas y por ondas superficiales, siempre y cuando las características entre subsuelo y basamento estén muy diferenciadas.

Kagami *et al.*(1982) trataron de obtener relaciones espectrales de microtemblores entre una estación arbitraria en sedimento y una estación de referencia en roca, por medio de mediciones simultáneas. No encontraron frecuencias predominantes claras, pero sí importantes correlaciones entre las amplitudes espectrales y el espesor de valles sedimentarios. Junto con Yamanaka, realizó mapas de factor de amplificación (Yamanaka *et al.*, 1993).

Seo (1992) discutió acerca de la pobre correlación entre relaciones espectrales de sitios sedimentarios respecto a basamento rocoso y por el contrario, encontró evidencia de buena correlación en las comparaciones entre dos sitios sedimentarios con diferentes condiciones geológicas en el Valle de Ashigara. Esto debido a la excitación de los microtemblores, es decir, a que el tipo y el número de fuentes es generalmente diferente entre un sitio rocoso y un sitio urbano construido en un lugar con espesores importantes de material sedimentario.

Aki (1957), Toksoz (1964) y Lacoss *et al.* (1969) han sido pioneros en la utilización de mediciones en serie de microtemblores (arrays). Esta técnica ha sido desarrollada para conocer las estructuras del subsuelo y ha sido aplicada a muchos sitios.

Horike (1985) obtuvo modelos de la estructura en dos sitios que coincidieron bien con los obtenidos por mediciones geotécnicas.

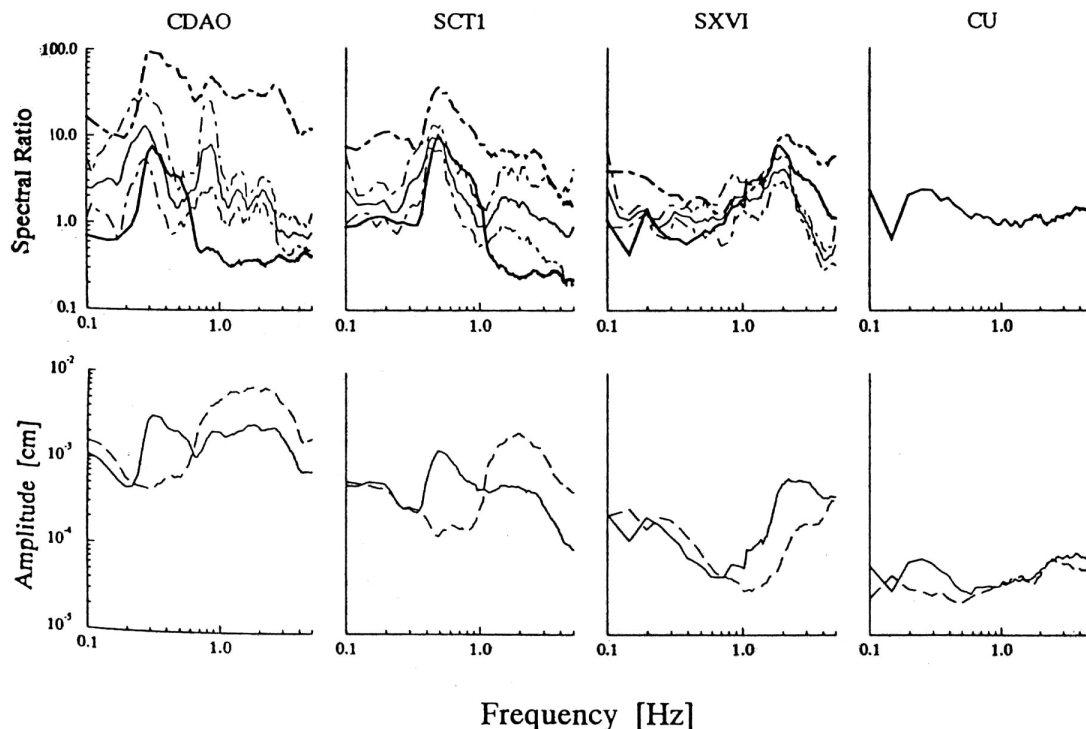


Fig. 2- Resultados para Ciudad de México, componente EW. Primera Fila: Función de transferencia empírica promedio (línea continua delgada) , más y menos una desviación estándar (líneas delgadas discontinuas) . Relaciones espectrales de microtemblores respecto a CU (Línea gruesa discontinua). Relación Horizontal/Vertical (línea gruesa continua). Segunda Fila: Amplitudes espectrales promedio de microtemblores en cada estación para las componentes EW (línea continua) y vertical (línea discontinua). CDAO(Central de Abastos), SCT(Secretaría de Comunicaciones y Transporte), CU(Ciudad Universitaria) (Lermo y Chávez -García , 1994)

Horike (1993) resumió las ventajas y desventajas de este método de la siguiente forma:

- Se determina bien la velocidad de fase de ondas superficiales por el método frecuencia-número de onda.
- Se determina bien un modelo de estructura profunda de velocidad de ondas S, mejor que con otros estudios geotécnicos convencionales.
- El método es igualmente aplicable en áreas urbanas donde mediciones geotécnicas son difíciles de realizar .
- Se requerirán consideraciones adicionales para aplicar este método a una estructura subterránea irregular.

Matsushima y Okada (1990) aplicaron un método similar para determinar la estructura profunda de un valle en Hokkaido, Japón y obtuvieron una buena correlación con los datos de gravimetría.

Nakamura (1989, 2000) asume la componente vertical de la superficie como sustituta de la señal horizontal del basamento rocoso y su técnica consiste precisamente en la relación espectral de microtemblores entre sus componentes horizontal y vertical.

Lermo y Chávez-García (1994) compararon tres tipos de razón espectral: relaciones espectrales de movimientos horizontales fuertes con un sitio de referencia, relaciones espectrales de microtemblores con un sitio de referencia y relaciones espectrales de microtemblores horizontal(H) y vertical(V) (técnica de Nakamura). Concluyeron que la relación H/V da una mejor estimación del período predominante en un sitio y permite una estimación mas aproximada del nivel de amplificación que la relación espectral entre dos sitios. Las comparaciones fueron hechas en tres sitios en la ciudad de México que se presentan en la Figura 2.

Trabajos en Japón como los de Nogoshi y Igarashi (1971), Kobayashi (1980), Kagami *et al.* (1982,1986) también encontraron que H/V es un buen indicador para estimar la estructura del subsuelo.

Field y Jacob (1993) hicieron un experimento numérico distribuyendo fuentes en muchos sitios y concluyeron que la técnica de Nakamura da una buena estimación no sólo en la frecuencia del pico sino también en la amplitud, es decir, que la relación espectral H/V representa la función de transferencia del suelo.

Los experimentos teóricos de Lachet y Bard (1994) sugirieron que las frecuencias del pico halladas en H/V a partir de microtemblores simulados en varias condiciones geológicas, correspondían tanto a las de

ondas S incidentes como a las de ondas Rayleigh, y que a frecuencia del pico de H/V de microtemblores da una estimación buena de la respuesta del sitio, porque se compensan los efectos de fuente de los microtemblores.

Lachet y Bard (1994) concluyeron que la amplitud del pico de H/ V no se puede usar de manera directa para estudios de amplificación y que H/V da información únicamente del primer pico o modo fundamental de respuesta pero ninguna indicación de las frecuencias más altas.

Kudo (1995) afirma que se puede encontrar la frecuencia resonante del modo fundamental en un sitio a partir de H/V, sin tener en cuenta el tipo de onda de los microtemblores. En cambio, el problema más importante es si la relación H/V de microtemblores da una buena estimación de amplificación en un sitio, es decir, si la técnica de Nakamura es válida.

Finn (1991) reportó que la técnica de Nakamura (1989) está basada en unas suposiciones débiles y que requiere comprobación de campo. Las suposiciones de Nakamura son las siguientes:

- Una función de transferencia (St) del subsuelo está dada por la razón espectral de los movimientos horizontales en superficie (Shs) con los del basamento (Shb). La relación espectral de movimiento vertical ($Es = Svs / Svb$) tiene en cuenta los efectos de las ondas Rayleigh.
- Los microtemblores en el subsuelo contienen ondas Rayleigh pero sus efectos aparecen igualmente en ambos componentes horizontal y vertical. Un nuevo parámetro ($Stt = St / Es = Shs / Shb / Svs / Svb$) da una función de transferencia fiable, porque los efectos de las ondas Rayleigh se compensan en Stt .
- La relación espectral de horizontal a vertical de microtemblores en un basamento (Shb / Svb) es aproximadamente 1, entonces Stt se estima por la relación espectral de horizontal a vertical en superficie.

Según Kudo (1995) la segunda suposición no es válida porque la composición de microtemblores no puede ser expresada como una convolución de ondas internas y superficiales, sino que son generalmente una suma de ondas internas y superficiales; de ahí que St / Es no genera ninguna compensación de ondas Rayleigh. La tercera suposición es válida únicamente, si en los microtemblores predominan las ondas Rayleigh y su elipticidad es casi unitaria, pero generalmente la elipticidad de ondas Rayleigh dispersivas en un medio estratificado depende fuertemente de la relación de la impedancia entre subsuelo y basamento, de la relación

de Poisson de subsuelo, del modo de las ondas Rayleigh y de la frecuencia o longitud de onda. Por tanto, Kudo concluye que Nakamura es inconsistente en la consideración de las ondas Rayleigh que están incluidas en los microtemblores.

Lermo y Chávez-García (1994) hicieron evaluaciones numéricas para verificar las suposiciones de Nakamura y concluyeron que H/V en una interface entre subsuelo y basamento era cercano a la unidad en la frecuencia fundamental resonante de las ondas Rayleigh; sin embargo, no se mantiene en modos más altos. También mostraron la correspondencia de formas espectrales de H/V entre ondas S unidimensionales incidentes y ondas Rayleigh, pero los niveles de amplitud absoluta de H/V no coincidieron.

Wakamatsu y Yasui (1995) hicieron un experimento teórico similar al de Lachet y Bard(1994) usando modelos de estructura simples y encontraron que en los microtemblores simulados predominan las ondas Rayleigh y Love, y que H/V tiene buena correlación con la función de transferencia unidimensional de las ondas. Sin embargo, también mencionaron la dificultad del uso directo de H/V.

4. APLICACIONES DEL ESTUDIO DE MICROTEMBLORES

Un objetivo fundamental de la ingeniería en cuanto a sismos es la minimización de desastres. La experiencia y las investigaciones realizadas han observado la aplicabilidad de la medición y del análisis de microtemblores para inferir las propiedades del suelo, y por tanto se consideran herramientas adecuadas para evaluar efectos de sitio y predecir las características de movimientos fuertes(Giraldo *et al.*, 1999).

Los microtemblores sirven como sustitutos de señales del suelo por sismos y como traductores de información limitada obtenida de la observación de señales de sismos en un sitio(Seo, 1995).

En los años cincuenta a partir del registro sistemático de microtemblores en miles de sitios en Japón, se encontró que éstos eran útiles como diferenciadores de las condiciones del suelo y del efecto de la geología superficial en el movimiento sísmico, y por tanto podrían contribuir a las normas de diseño sismo-resistentes (Seo, 1995).

Actualmente los microtemblores son ampliamente utilizados para microzonificación sísmica, pero para establecer un nuevo sitio de medición de microtemblores, debe primero verificarse su estacionareidad y las interferencias ocasionadas por

estructuras enterradas. El análisis de estacionareidad consiste realizar en mediciones continuas durante 24 horas para confirmar su estabilidad, es decir, que se obtengan periodos estables y variaciones cotidianas en la amplitud. Una recomendación para el éxito de la microzonificación es buscar ciudades ruidosas (Giraldo *et al.*, 1999).

En cuanto a la aplicación de microtemblores en el estudio de amenazas naturales, vulnerabilidad y evaluación de escenarios de daño, se basa en que las áreas con picos predominantes muy claros en el rango de periodos cortos, corresponde al área de daño fuerte.

Los propósitos de la medición de microtemblores y de las aproximaciones existentes pueden resumirse en :

- Obtención del periodo predominante del suelo
- Evaluación de efectos de sitio
- Detección de la estructura subterránea (la variación del periodo es consistente con el perfil geológico)
- Obtención de perfiles de velocidad de ondas sísmicas

5. VENTAJAS DEL ESTUDIO DE MICROTEMBLORES

Entre la utilización de microtemblores, microsismos y movimientos sísmicos, existen diferencias tanto a nivel práctico como a nivel de información contenida en los registros. Desde el punto de vista práctico se destaca lo referente a costos, pues para la obtención de registros de movimientos sísmicos fuertes se requiere una red permanente, la cual a su vez puede registrar movimientos sísmicos débiles. Sin embargo, el registro de microtemblores se puede realizar con estaciones provisionales y por tanto, con un único equipo se puede cubrir grandes áreas en lapsos de tiempo relativamente cortos.

Desde el punto de vista de la información contenida en los registros, se diferencian por la amplitud, contenido frecuencial, información de efectos no lineales, y aunque los movimientos sísmicos fuertes aportan información de efectos locales de primera mano, los tiempos de recurrencia son mucho más largos. Por su parte, los microtemblores se pueden registrar en cualquier momento y en cualquier lugar, lo cual constituye la mayor ventaja de su utilización para evaluar efectos de sitio. En cuanto a la confiabilidad de los resultados, ésta es directamente proporcional al número de mediciones y se tiene de mayor a menor confiabilidad los siguientes métodos: arrays, estación de referencia y estaciones portátiles. (Giraldo *et al.*, 1999).

La técnica de Nakamura (relación H/V) se destaca por la facilidad en la realización y el procesamiento de las mediciones, lo cual se traduce en los más bajos costos de entre todos los métodos. Este método se ha utilizado para diferenciar tipos de material (Lermo y Chávez-García, 1994, Alfaro *et al.*, 1998, Euroseismod 1998, entre otros), e incluso ha servido para modificar planos geotécnicos de ciudades como Lieja, Bélgica (Euroseismod, 1998). Otra de las ventajas es que las mediciones se pueden realizar indistintamente con acelerómetro o con velocímetro (Alfaro, 1997) siempre y cuando los niveles de ruido ambiental tengan una amplitud mayor que el nivel de resolución del equipo, como es el caso de las grandes ciudades.

En cuanto a la estabilidad y variabilidad de los microtemblores, aunque sus mecanismos de propagación no son muy claros, poseen un periodo predominante estable, así como ocurre en las señales de movimientos sísmicos fuertes. En efecto, a pesar de que los niveles de ruido ambiental varían a lo largo del día (Kanai y Tanaka, 1961; Nakamura, 1989; Alfaro, 1997), los coeficientes espectrales y el periodo predominante del suelo se mantienen invariables, sin embargo, se presenta alteración de la amplitud entre el día y la noche. Los análisis de estacionariedad permiten identificar además la presencia de fuentes fijas que excitan el suelo a determinadas frecuencias.

Una ventaja mas, es que no es necesario descartar del análisis aquellos intervalos del registro en los que hay fuentes puntuales identificadas (Alfaro *et al.*, 1999b), como es el caso del paso de un automóvil o de un peatón en las cercanías del instrumento de medición.

6. LIMITACIONES DEL ESTUDIO DE MICROTREMBORES

Debido a los niveles de amplitud y a las frecuencias presentes, los periodos predominantes del suelo difieren según el movimiento utilizado. Como limitación del uso de microtemblores, se tiene que aún no se ha encontrado una relación numérica entre el periodo obtenido con microtemblores y el obtenido con movimientos sísmicos fuertes, como si ocurre en el caso de movimientos sísmicos débiles y fuertes (Tokimatsu *et al.*, 1989).

Según Nakamura (1989,2000) el método del cociente espectral permitiría obtener la función de transferencia aproximada del suelo, es decir, los periodos predominantes del suelo y las amplificaciones asociadas. Sin embargo, investigaciones teóricas y experimentales (Lachet y Bard, 1994) han demostrado que el método únicamente permite la determinación del periodo predominante. Pero tal vez la mayor limitación

del método H/V, es que presenta vacíos teóricos (Konno y Ohmachi 1998), lo que explicaría el hecho de que en ciertos casos el método funcione (Lermo y Chávez-García, 1994) y en otros no.

En cuanto al análisis de señales, para resolver problemas de estabilidad, variabilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos, se ha propuesto, entre otros, la minimización del ruido presente en las señales (Bendat y Piersol, 1986; Acevedo y Peralta, 2000), y métodos alternativos para evaluar la relación H/V (Alfaro *et al.*, 1999a,) basados en el cociente energético de las señales y también teniendo en cuenta la coherencia de las componentes vertical y horizontal.

Como puede observarse las limitaciones de los microtemblores se centran en tres aspectos fundamentales: el primero se refiere a la obtención o no de la función de transferencia del suelo, el segundo es si esta función de transferencia obtenida y el periodo predominante asociado serán los que se presenten durante movimientos sísmicos moderados y fuertes, y la tercera se refiere a la confiabilidad de los resultados. Para resolver estas limitaciones se deben calibrar los resultados de microtemblores con los obtenidos durante movimientos sísmicos, y realizar un adecuado procesamiento de las señales.

REFERENCIAS

- Acevedo, J.C. y S.A. Peralta. (2000). Función de Transferencia del Subsuelo a partir de microtemblores minimizando el ruido. Trabajo de Grado. Pontificia Universidad Javeriana.
- Akamatsu, K. (1961). On microseisms in frequency range from 1 c/s to 200 c/s, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 39, 23-75.
- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 35, 415-457.
- Alcok, E. D. (1974). Comments on "Comparison of Earthquake and Microtremor Ground Motions in El Centro, California" by F. E. Udwadia and M. D. Trifunac, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64,495.
- Alfaro, A. (1997). Estimación de Periodos Predominantes de los Suelos de Barcelona a partir de Microtremors. M. Sc. Thesis, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España. Informe ICC No. GS091-97.
- Alfaro, A.J. y O.V. Pavlenko. (2000). Análisis

- Multiespectral a Microtemblores en Barcelona. Procc. Segunda Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. ISBN 0870-2748.
- Alfaro A., J. J. Egozcue y A. Ugalde (1999a). Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtemblores. *Proc. Primer Congreso Nacional Ing. Sísmica*. Murcia. España. 2:435-441.
- Alfaro A., M. Navarro, J. Sánchez y L.G. Pujades (1999b). Microzonificación Sísmica de Barcelona utilizando el Método de Nakamura. Ventajas y Limitaciones. *Proc. Primer Congreso Nacional Ing. Sísmica*. Murcia. España. 1:273-278.
- Alfaro, A., Goula, X; Susagna, T, Pujades, L.G., Canas, J.A., Navarro, M, Sánchez, J(1998). Estimación del Período Predominante del Suelo a Partir de Microtemblores. Aplicación a Barcelona. IX Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Aguadulce (Almería , España) Febrero 9-13, 1998
- Allam, A. and E. Shima (1967). An investigation into the nature of microtremors *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 45, 43-59.
- Banerji, S.K. (1925). Microseisms and de Indian monsoon, *Nature*, Vol 116, Pag 866, 1925.
- Bendat J. S. y A. G. Piersol (1986). *Random Data. Analysis and Measurements Procedures*, Ed. John Wiley and Sons, New York.
- Bertelli, D.T. (1878). Riassunto delle Observazioni microsismiche fatte nel Collegio alla Querce di Firenze, Pars III. (Reprint) from *Atti dell' Accademia Pontificia dei Nuovi Lincei*, Anno XXI, sessione 2ª, 17 Febbraio, 1878,
- Bradford, D.C. (1934). "On a Study of Microseims Recorded at Sitka, Alaska, during de Period from January 1, 1929, to December 31, 1931, inclusive". MSc.Thesis Saint Louis University.
- Critikos, N. (1932). "Sur les causes des mouvements microsismique réguliers du sol d'une période de 4s a 8s a Athènes", Publication du Bureau Central Séismologique International, Série A, Travaux Scientifiques, Fasc. 7, Pag 5-11, 1932)
- Euroseismod (1998). Development and Experimental Validation of Advanced Modelling Techniques in Engineering Seismology and Earthquake Engineering, Final Report, Project ENV4-CT96-0255.
- Field, E.H. and K. Jacob (1993). The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise, *Geophysical Res. Letters*, 20-24, 2925-2928.
- Finn, W. D. L. (1991). Geotechnical engineering aspects of microzonation, *Proc. 4th Int. Conf. on Seismic Zonation*, Stanford, California, 1, 199-259.
- Gherzi, E., S.J. (1923). Etude sur les microseismes, Observatoire de Zi-ka-wei. Notes de Sismologie, No.5, Principaux Siesmogrammes, Juillet-December, 1923.
- Giraldo, V., Alfaro, A.J., Pujades, L.G., Canas, J.A. (1999). Estimación de efectos locales con movimientos Sísmicos y Microtemblores, Barcelona. España. Monografías CIMNE IS-38. 77pp.
- Gutenberg, B. (1931). "Microseisms in North America", *Bull. Seism. Soc. Am.* XXI, n. 1, Pag 1-24.
- Gutiérrez, C. and S. K. Singh (1992). A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: comparison of results from strong-motion and microtremor data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 642-659.
- Hecker, O. (1913). Ergebnisse der Beobachtungen der Mikroseismischen Bewegungen an den Europäischen Stationen an vier Tangen des Winters 1911-1912, *Beiträge zur Geophysik*, Vol. 13, Pag 13-32.
- Hecker, O. (1915). "Versuche zur Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Bodenbewegung bei der mikroseismischen Unruhe", *Mitteilungen der Zentralbüros. Gerland's Beiträge zur Geophysik*, Vol. 14, Pag 28-33.
- Honda, H. (1930). "The Pulsatory Oscillation and the Satationary Surface Tremors of the Love Type", *Geophysical Magazine*, VIII, n. 3, Pag 177-181.
- Horike, M. (1985). Inversion of phase velocity of long period microtremors to the S-wave velocity structure down to the basement in urbanized areas, *Jour. Phys. Earth*, 33, 59-96.
- Horike, M. (1993). Studies on microtremors, *Jour. Seism. Soc. Japan*, 46, 343-350 (in Japanese with English abstract).

- Humpheys, W.J. (1920). "Physics of the Air. Published by the Franklin Institute, Pag 228.
- Iida, K. (1935). "Pulsatory Oscillation of the Earth's Crust Due to Surface Force", *Bull. Tokyo Earthq. Res. Inst.*, Vol. 13, Pag 504-518.
- Johnson, N.K. (1929). "Atmospheric Oscillations Shown by the Microbarograph", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 55, Pag 19.
- Kagami, H., C. M. Duke, G. C. Liang, and Y. Ohta (1982). Observation Of 1 To 5 Second Microtremors And Their Application To Earthquake Engineering. Part II. Evaluation Of Site Effect Upon Seismic Wave Amplification Due To Extremely Deep Soil Deposits, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 987-998.
- Kagami, H., S. Okada, K. Shiono, M. Oner, M. Dravinski, and A. K. Mal (1986). Observation of 1 to 5 second microtremors and their application to earthquake engineering. Part III. A two-dimensional study of site effects in S. Fernando valley, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 1801-1812.
- Kanai, K. y T. Tanaka,(1961).On microtremors. VIII, *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 39,97-114.
- Kishinouye, F. (1935). "Microseisms of Four Second Period Observed with Horizontal Seismographs", *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. 13, Pag 146-154 and 608-615.
- Klotz, O. (1908). "Microseisms", *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, Vol. XI, n. 4, Pag 195-208.
- Kobayashi, K. (1980). A method for presuming deep ground soil structures by means of longer period microtremors, *Proc. 7th World Conf. Earthquake Eng.*, Sep. 8-13, 1980, Istanbul, Turkey, 1, 237-240.
- Kobayashi, H., K. Seo and S. Midorikawa (1986). Estimated strong ground motions in the Mexico city due to the Michoacán, Mexico earthquake of September 19, 1985 based on characteristics of microtremor. Part 2, Report on seismic microzonation studies of the Mexico earthquake of September 19, 1985, The Graduate School of Nagatsuta, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan.
- Konno, K. and T. Ohmachi (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 228-241.
- Krug, H.D. (1937). "Ausbreitung der natürlichen Bodenunruhe (Mikroseismik) nach Aufzeichnungen mit transportablen Horizontal Seismographen", *Zeitschrift für Geophysik*, Vol. 13, Heft 7-8, Pag 328-348, 1937.
- Kudo, K. (1995) Practical Estimates of Site Response. State-of-art Report. *Proc. 5th Int. Conf. Seismic Zonation*, Nice, France, 1878-1907.
- Lachet, C. and P. -Y. Bard (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of the "Nakamura's" technique, *Jour. Phys. Earth*, 42, 377-397.
- Lacoss, R. T., E. J. Kelly and N. M. Toksoz (1969). Estimation Of Seismic Noise Structure Using Arrays, *Geophysics*, 34, 21-38.
- Lee, A. W. (1934). "Further Investigations of the Effect of Geological Structure upon Microseismic Disturbance", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Geophysical Supplement*, n. 6, Pag 238-252.
- Lermo, J. and F. J. Chavez-Garcia (1994). Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83,1350-1364.
- Leet, L.D. (1934). "Analysis of New England Microseismic Waves", *Gerland's Beiträge zur Geophysik*, Vol. 42, Pag 232-245.
- Matsushima T. and H. Okada,(1990). Determination of deep geological structure under urban areas, using long-period microtremors. *Butsuri-Tansa*, 43, 21-33.
- Nagaoka, H. (1906). "Stationary Surface tremors", *Publications of the Earthquake Research Institute*, n.22, Section B, Art. 2, Pag 17-27.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTRI* 30, no. 1, February, 25-33.
- Nakamura, Y. (2000). Clear Identification Of Fundamental Idea Of Nakamura's Technique And Its Applications. *Procc. 12WCEE*. New Zealand.
- Nogoshi, M. and T. Igarashi, (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2), *Jour.*

- Seism. Soc. Japan*, 24, 26-40. (in Japanese with English abstract).
- Omori, F. (1901). Pulsatory Oscillations, Publications of the Earthquake Investigation Committee in Foreign Languages, n.5, Pag 51-57.
- Omori, F. (1908). On Micro-Tremors, *Bull. Imperial Earth. Investigation Committee of Tokyo*, Vol. II, Pag 1-6.
- Omori, F. (1909). "Report on the Observation of Pulsatory Oscillations in Japan", (Two Papers), *Bull. Imperial Earthq. Investigation Committee of Tokyo*, III, n.1, Pag 1-35; Vol. 5, n. 3, Pag 109-147.
- Ramírez, J.E., (1939). An experimental Investigation of the Nature and Origin of Microseisms at St. Louis, Missouri, PhD. Dissertation.
- Rebeur-Paschwitz (1895). Horizontalpendel-Beobachtungen an der Kaiserlichen Universitäts-Saternwarte zu Strassburg, 1892-1894, Beiträge zur Geophysik, Vol 2, Pag 211-406, 1895.
- Seo, K. (1992). A joint work for measurements of microtremors in the Ashigara valley, *Int. Symp. Effects of Surf. Geol. Seismic Motion*, ESG, Odawara Japan, 2, 43-52.
- Seo, K. (1995). A joint research on Microtremor Measurements in Kushiro City Related to the 1993 Kushiro-Oki (Hokkaido, Japan) Earthquake, Report of the Research Group on Microtremor Joint Measurements Related to the 1993 Kushiro-Oki (Hokkaido, Japan) Earthquake. *Proc. 5th International Conference Seismic Zonation*, Vol. III, Pag 2271-2278.
- Schuster, A. (1909). Report of de Committee for the Investigation of Microseisms, Proc. of the International Seismological Association. Comptes Rendus des Seances de la trixieme réunion de la Commission Oermanente de l'association internatonale de sismogique reunie a Zermatt de 30 Aout au 2 Septembre, Pag 67, Annexe XI-l.
- Shaw, E. (1922). "Communication de M.I.T. Shaw sur les mouvements microséismiques", Comptes Rendus des Seances de la Premiere Conference Réunion a Rome du 2 au 10 Mai 1922. Union Geodesique el Geophysique International, Pag 52-53.
- Susuki, S. and Omori, H. "On the Atmospheric Waves". *Beiträge zur Geophysik*, Bd. 49, Pag 301-318.
- Tokimatsu, K., S. Midorikawa, and Yoshimi (1989). Dynamic soil properties obtained from strong motion records, *Proc. Twelfth Int. Conf. Soil Mechanics Foundation Eng.* 3, 2015-2018.
- Toksoz, N. M. (1964). Microseisms and attempted applications, *Geophysics*, 39, 154-177.
- Udwadia, F. E. and M. D. Trifunac (1973). Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 1227-1253.
- Udwadia, F. E. and M. D. Trifunac (1974). Reply, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, 496.
- Wakamatsu, K. and Y. Yasui (1995). Possibility Of Estimation For Amplification Characteristics Of Soil Deposits Based On Ratio Of Horizontal To Vertical Spectra Of Microtremors, *Jour. Struc. Constr. AIJ*, No. 471, 61-70.
- Wiechert, E. (1907). Zweite Sitzung. Proceedings of the International Seismological Asociation, Hague, Pag 61.
- Whipple, F.J.W. and Lee, A.W. (1935). "Notes on the Theory of Microseisms", *Monthly Not. Of the Roy. Astron. Soc., geoph. Suppl.*, Vol. 3, n. 8, Pag 287-288, December.
- Yamanaka, H., M. Dravinski and H. Kagami (1993). Continuous Measurements Of Microtremors On Sediments And Basement In Los Angeles, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83,1595-1609.
- Zanon, F.S. (1938a). I cicloni dell'Atlantico settentrionale e i microseismi a Venezia, *Bolletino della Societa Sismologica Italiana*, Vol. 26, Pag 219-226.
- Zanon, F.S. (1938b). "I microseismi registrati in Venezia causati da cicloni sull'Atlantico e sull'Adriatico", *Bolletino della Societa Sismologica Italiana*, Vol. 35, Pag 219-226.