

# VALIDACIÓN DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DE LOS COCIENTES ESPECTRALES A PARTIR DE MICROTREMORES

Javier F. Lermo-Samaniego<sup>1</sup> y José A. Martínez-González<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México.  
jles@pumas.iingen.unam.mx

## INTRODUCCIÓN

Existe controversia sobre si los microtremores permiten estimar la amplificación relativa de un sitio con respecto a una posición en roca durante sismo. Han sido muchos los trabajos y autores que confirman que, los microtremores son una herramienta útil para inferir el periodo dominante de vibración del suelo en un sitio. Sin embargo, aseguran que el método presenta deficiencias en la obtención de la amplificación relativa (Bonney-Claudet *et al.*, 2006). El manual de SESAME (2005) menciona en sus procedimientos para la toma de registros de vibración ambiental, una serie de recomendaciones en la duración del tiempo de registro para obtener la frecuencia fundamental mínima esperada para diferentes intervalos de frecuencias. Refiere como mínimo, un rango de diez minutos para el registro de altas frecuencias y de treinta minutos para el registro de bajas frecuencias. Sin embargo no refieren el tiempo mínimo adecuado para estimar confiablemente el factor de amplificación. Sánchez-Sesma *et al.* (2011) estudiaron una duración de la medición de 6 horas. Lo cierto es que hasta la actualidad, no existe un consenso justo que garantice el tiempo óptimo de medición que mejor se adecue a estos fines.

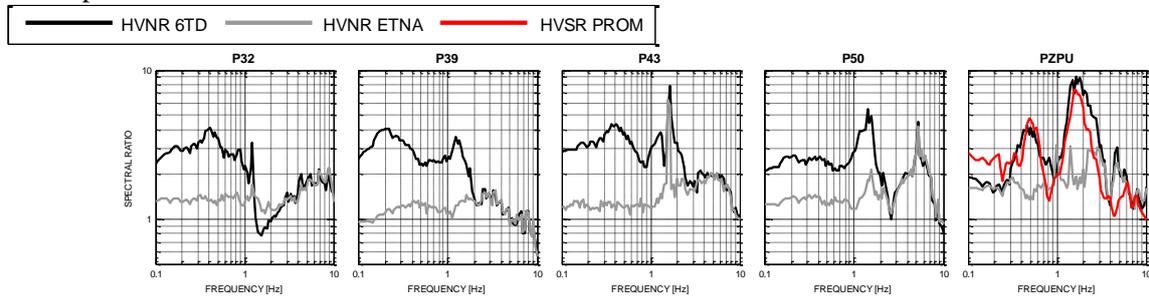
A partir de 2010 se han instalado diversas estaciones temporales en varios sitios del país. Lo anterior con el objetivo de obtener registros tanto de ruido ambiental como de sismos, y con esta información evaluar las funciones obtenidas con ambos métodos. Se han registrado sismos de diversas magnitudes, sin embargo para este trabajo se analizarán aquellos que presentan magnitudes mayores de Mw4.5. Entre estos destacan los últimos dos sismos (10/Diciembre/2011, 20/marzo/2012) que por sus características han sido los de mayor intensidad después del ocurrido el 19 de septiembre de 1985. La ubicación de las redes temporales fue en los estados de Puebla, Tlaxcala, Chiapas y Distrito Federal. Cada sitio presenta diferentes niveles de ruido antropogénico y por su localización se encuentran bajo diferentes ambientes geológicos. Para la implementación de estas redes temporales se utilizaron sismógrafos de banda ancha (Guralp 6TD) con características instrumentales 0.32-50Hz y a 100 muestras/s.

## INSTRUMENTACIÓN

En la actualidad, en México como en Latinoamérica el uso de acelerógrafos para mediciones de microtremores es generalizado. Tejeda-Jácome (2009) realizó mediciones de vibración ambiental con cuatro equipos diferentes. Los resultados fueron contundentes, mostrando que el equipo que mejor responde para caracterizar la respuesta del suelo fue el sismógrafo, ya que los acelerógrafos presentan una interferencia del ruido instrumental con la señal sísmica. Con este antecedente, recientemente se realizó la prueba que consistió en el registro de sismogramas de ruido ambiental mediante un acelerógrafo Kinometrics ETNA y un sismógrafo Guralp 6TD. Ambos equipos se colocaron juntos y el tiempo de registro fue el mismo (cuatro horas). En la figura 1 se presentan las diferencias entre los cocientes espectrales calculados con ambos aparatos en cinco sitios diferentes de la zona baja de la ciudad de Puebla (P32, P39, P43; P50 y la estación de la Red Acelerográfica de Puebla "PZPU").

En la primera grafica de la Figura 1, se muestra con una línea gris la función de transferencia empírica (FTE) obtenida con la técnica HVNR a partir de un registro de microtremores obtenido con el acelerógrafo y en línea negra la FTE calculado con la misma técnica (HVNR) a partir de un registro de microtremores obtenido con el sismógrafo. Cabe mencionar que el sitio PZPU, que corresponde a una estación acelerográfica localizada en la ciudad de Puebla. Se calculó la FTE promedio con la técnica de Nakamura con sismo (HVSr) a partir de cinco eventos registrados en esa estación. Este cociente se muestra en línea roja. En general se observa a simple vista una deficiencia en la respuesta del acelerógrafo a baja frecuencia, que se define como el rango comprendido entre 0.1 a 1.0 Hz. Por el contrario, la respuesta del suelo obtenida con el sismógrafo en este rango de frecuencias es más

resolutiva. Esto se aprecia claramente en PZPU donde el máximo espectral presente en 0.4Hz concuerda con la respuesta obtenida con sismo usando la técnica HVSR. Analizando la respuesta en altas frecuencias, que comprende el rango de 1 a 10 Hz, se observa una buena correlación entre las FTE a partir de los 2.0 Hz.



**Fig 1.** Comparación entre cocientes espectrales obtenidos con sismógrafo (línea negra) y acelerógrafo (línea gris).

### MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE NAKAMURA (HVNR)

Uno de los programas más utilizados en la actualidad para el tratamiento de señales sísmicas es GEOPSY, por las siglas en inglés GEO Physical Signal database for noisearra Y processing (SESAME, 2005). Este software tiene entre sus funciones el cálculo del método H/V. Esta técnica consiste en estimar el cociente espectral de los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales con respecto a la vertical de las vibraciones de ruido ambiental registradas en una sola estación (Nogoshi y Igarashi, 1971; Nakamura, 1989; Lermo y Chavez, 1993).

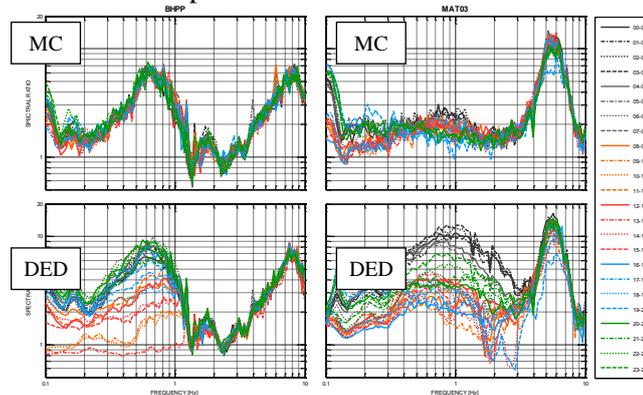
Resumiendo, el cociente espectral obtenido con GEOPSY es el resultado de promediar todos los H/V, derivados a partir de la media cuadrática de las componentes horizontales entre la vertical de cada ventana de tiempo (a esta metodología se le denominara como “MC”). Sánchez-Sesma *et al.* (2011) han propuesto un método alternativo para el cálculo de la relación H/V. El cambio consiste en obtener la suma de todos los espectros de amplitud de Fourier para cada una de las componentes horizontales y verticales, posteriormente la sumatoria se divide entre el número de ventanas. Este método difiere sustancialmente en que tan solo se realiza durante el cálculo un único promedio espectral, así como también por que se tiene que multiplicar por un factor de ponderación para que cada ventana de tiempo sea de igual energía. Esta metodología es conocida como el método de las densidades espectrales direccionales (DED).

### COMPORTAMIENTO DEL COCIENTE HVNR CONFORME EL TIEMPO

El criterio para establecer el tiempo mínimo de registro de los microtremores es un tema que aún falta por estudiar. Sánchez-Sesma *et al.* (2011) analizaron registros de microtremores para el lago de Texcoco, donde los autores realizaron pruebas considerando tiempos de registro de entre 3 y 6 horas sin observar una variación importante en los factores de amplificación. Con este fin, en este apartado se presentan una serie de pruebas para determinar el tiempo necesario de registro de microtremores para obtener una buena aproximación tanto de la frecuencia fundamental como de la amplitud correspondiente a esta. Para los análisis presentados en éste trabajo se ha descartado la primera hora de registro por cuestiones de estabilización del equipo. El procesado de las señales se realizó definiendose ventanas de tiempo de 81.92s., sin traslape y no se aplicó ningún tratamiento digital (filtrado, taper, suavizado).

Tras una serie de pruebas para determinar la unidad mínima de tiempo para el cálculo de H/V, se observó que con una hora se obtiene un cociente bien definido en frecuencia como en amplitud. También se calcularon los cocientes con registros de 3 y 6 horas, sin observarse un cambio considerable en el nivel de amplitud, permaneciendo prácticamente constante. Esta evolución en los cocientes espectrales es similar en cada una de las ciudades estudiadas, independientemente de las características estratigráficas del suelo. En la figura 2 se muestra esta comparación para las estaciones BHPP y MAT03, donde en la parte superior se muestran los resultados calculados mediante el método de la media cuadrática (MC); y en la parte inferior se muestran los resultados obtenidos con el método de densidades espectrales direccionales (DED). Cada línea a color representa el HVNR obtenido con un registro de una hora. Del lado derecho se presenta la simbología utilizada para distinguir el cociente

espectral o la FTE calculado para cada intervalo de tiempo. A simple vista los resultados son sorprendentes y contrastantes si comparamos estas cuatro graficas mostradas en la figura 2, ya que tanto en la estación BHPP como en MAT03 se observa una gran dispersión de las FTE calculados hora a hora con el método DED, mientras que para las FTE procesadas con MC, no muestran esta dispersión. Se observa que en el intervalo de las 00-08 horas las FTE procesadas con DED presentan sus máximas amplitudes hacia bajas frecuencias, alcanzando valores de hasta de 10 veces de amplificación, lo que contrasta con el método MC, que por ejemplo para la estación MAT03 estos máximos son menores a 3 veces de amplificación.



**Fig. 2.** Comparación entre los cocientes espectrales calculados por medio de los métodos MC (arriba) y DED (abajo) para registros de una hora en las estaciones BHPP y MAT03

## VALIDACIÓN DE HVNR MEDIANTE LA COMPARACIÓN CON HVSR Y SSR

En este capítulo, vamos a insistir que los registros de microtremores con instrumentos triaxiales de velocidad de banda ancha, y con una duración de por lo menos de varias horas y en especial tomados en la madrugada (0.0-8.0 horas) y con la metodología adecuada (DED) se pueden estimar el factor de amplificación del mismo orden que los obtenidos con registros de movimientos fuertes y procesado con la técnica HVSR o SSR. Aun cuando, hemos mencionado que las mejores horas para el registros de los microtremores es en la madrugada, así como la mejor metodología para el procesado de estos registros es el de las densidades espectrales direccionales (DED), en los siguientes ejemplos que se mostrarán a continuación no se tomaron en cuenta estos dos últimos resultados.

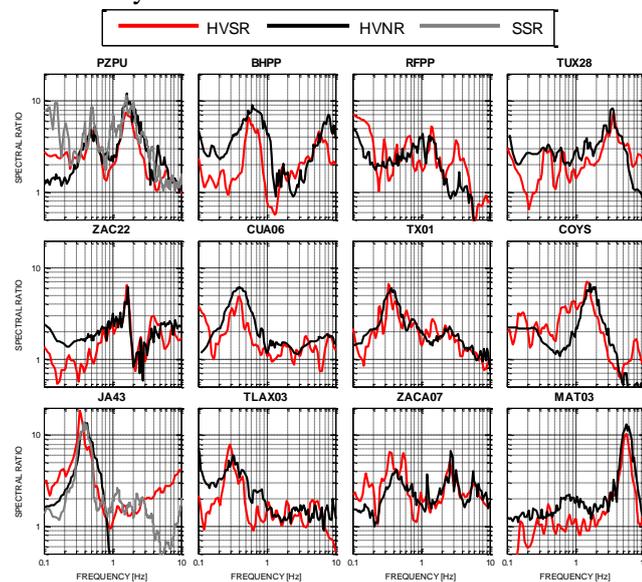
En cada estación se estimó la respuesta de sitio, en términos de la FTE a partir de registros de los sismos en cuestión. La estimación se llevó a cabo con la aplicación del método de HVSR (Lermo y Chávez, 1994). Para constatar que el cociente HVNR (Lermo y Chávez, 1993) es un buen estimador del factor de amplificación, se efectuó la comparación de ambas funciones de transferencia empírica, (Figura 3). Del análisis de las FTE, se observa una excelente aproximación entre todas las técnicas en sus máximos espectrales. En las estaciones CUA06 y BHPP se sobre-evalúa el nivel de amplitud en el ancho de banda de 0.1-1Hz. En el resto de las estaciones la aproximación es aceptable. En las estaciones PZPU y JA43, se calculó el cociente SSR tomando como estaciones en roca a LMPP y CUIP, respectivamente. Comparando las formas de los cocientes H/V con microtremores con respecto al H/V con sismo, se aprecia que hay una gran similitud entre ambas, pero sobre todo en las amplitudes.

## CONCLUSIONES

Se ha comprobado que el equipo que mejor se adecua para la toma de registros de microtremores son los sismógrafos de banda ancha, ya que estos definen, por un lado la respuesta del suelo hacia bajas frecuencias y por otro, una mejor resolución de la frecuencia fundamental así como del factor de amplificación en el rango comprendido entre 0.1 a 10 Hz (para fines de ingeniería sísmica). Se han mostrado una serie de resultados que demuestran que, mediante registros de microtremores sí es posible estimar la respuesta en amplificación del suelo que se esperaría si se calcula con registros de sismos. Para ello deben cumplirse los siguientes criterios:

- Los registros de microtremores deben adquirirse con sismógrafos de banda ancha.
- Un tiempo mínimo de registro de 4 horas en la madrugada de cualquier día de la semana
- Se recomienda el uso ventanas de tiempo de 81.92 segundos y el tratamiento digital de la señal

- *deberá ser mínimo.*
  - *Por otro lado, se ha comprobado la validez del método de densidades espectrales direccionales, presentando una mejor definición en los máximos espectrales tanto hacia bajas y altas frecuencias.*
- Finalmente, aun cuando ya hemos experimentado en más de 6 estaciones distribuidas en diferentes lugares de México, el comportamiento de las FTE hacia bajas frecuencias, obtenidas con registros de microtremores y utilizando el método de las densidades espectrales direccionales (DED); merece una mayor observación, así como un mayor número de experimentos para observar su comportamiento en cuanto a su amplificación en registros de una hora durante un día, ya que nos muestra que las mayor amplificación de las FTE en todo el rango de frecuencias para uso de la Ingeniería Sísmica (0.1 a 10 Hz) se obtiene entre la 0.0 a 8.0 horas del día. Este resultado rompe con varias suposiciones que se tenían con respecto a la fuente de los microtremores, por ejemplo que las mejores horas para medir este tipo de energía, era cuando se tenía dentro de una zona urbana, la mayor cantidad de tráfico vehicular. Probablemente, esta energía local, sea la que dificulte la respuesta real de un sitio, por interferencias con la energía limpia que se podría explicar por la energía producida en nuestros mares, me refiero a la **energía de las olas** y una combinación con la **marea lunar**.



**Fig.3.** Comparación de cocientes espectrales: Línea roja, método de Nakamura con sismos (HVSR); Línea negra, método de Nakamura con ruido (HVNR); Línea gris, técnica Estándar (SSR).

## REFERENCIAS

1. Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.-Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J. and Fäh, D. (2006). H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophys. J. Int.*, 167, 827–837.
2. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation, SESAME European research project, deliverable D23.12, 2005.
3. Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute* 30:1, 25-30.
4. Nogoshi, M. & Igarashi T., 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2) (in Japanese with english abstract). *J. of seism. Soc. of Japan* 24, 26-40.
5. Sánchez-Sesma, F., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M. and Rodríguez-Castellanos, A. (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophys. J. Int.* 186, 221–225
6. Lermo, J., y Chávez-García, F.J. (1993). Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios with Only One Station, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83:5, 1574-1594.
7. Lermo, J. y Chávez-García, F.J. (1994). Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84:5, 1350-1364.
8. Martínez-González, J., Lermo, J., Sánchez-Sesma, F., Angulo-Carrillo, J., Valle-Orozco, R., Ordoñez-Alfaro, J. and Pérez-Rocha, L. (2012). Effects of the subsidence on the changes of dominant periods of soils within Mexico City valley. *Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering*.
9. Tejeda-Jacome, J. (2009). Atenuación de la energía sísmica en Colima, efectos de sitio en Tecmán y su relación con la estructura del subsuelo. Un estudio experimental. *Tesis de maestría, Facultad de Universidad Nacional Autónoma de México*.