

DETERMINACIÓN DEL PERÍODO FUNDAMENTAL DEL SUELO USANDO VIBRACIÓN AMBIENTAL Y EL COCIENTE ESPECTRAL HORIZONTAL/VERTICAL

Raúl J. Ritta^a, Luis E. Suárez^b y Miguel A. Pando^c

^a *Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina, raul.ritta@gmail.com, <http://www.efn.uncor.edu>*

^b *University of Puerto Rico, Department of Civil Engineering, Mayagüez Campus, PO Box 9000 (00681), Mayagüez, Puerto Rico*

^c *University of North Carolina at Charlotte, Department of Civil and Environmental Engineering, Charlotte, NC, USA, 28223*

Palabras clave: vibración ambiental, mapa de isoperiodos, microzonificación sísmica.

Resumen. En este artículo se emplea la técnica del cociente espectral horizontal/vertical (H/V), desarrollada por Nakamura en 1989, para la determinación del período fundamental de vibración del suelo a partir de mediciones de vibración ambiental. El uso de vibración ambiental se puede aplicar en cualquier momento y no requiere esperar, como con otras técnicas, la ocurrencia de un terremoto; esto es una importante ventaja, sobre todo para las regiones de baja sismicidad. Como aplicación del cociente espectral H/V , se presenta el trabajo de microzonificación sísmica realizado en la ciudad de Mayagüez, localizada al oeste de la isla de Puerto Rico, donde fueron tomadas mediciones en 134 diferentes sitios de la ciudad empleando acelerómetros triaxiales Etna. Se detalla el procedimiento empleado en el procesado de las mediciones y se realiza un análisis de estabilidad del método. Se desarrolló un código para procesar las mediciones al cual se le incluyó un módulo para eliminar los transitorios registrados por el instrumento y conservar sólo la parte estacionaria de la vibración medida. Adicionalmente se presenta el mapa de isoperiodos de suelo confeccionado para la ciudad de Mayagüez. El método demostró ser una herramienta simple, de bajo costo pero eficaz en la caracterización de las condiciones de sitio locales a través del período natural fundamental del suelo. Los resultados obtenidos muestran que el uso de vibración ambiental es una excelente alternativa, que brinda muy buenos resultados, comparados con los obtenidos con otras técnicas, además se comprobó que los resultados de la técnica del cociente espectral H/V son estable en el tiempo.

1 INTRODUCCIÓN

En sismología la intensidad de un movimiento del terreno es función de parámetros tales como la magnitud del sismo, la distancia epicentral, las características de la fuente sísmica y las condiciones locales del terreno. Sin embargo, la geología local es uno de los parámetros más importantes, ya que influye grandemente en el tipo de respuesta de sitio para cualquier sitio en particular. Es decir que, para un terremoto dado, la intensidad sísmica depende en gran medida del lugar donde se mide.

Estudios de la magnitud de los daños causados por terremotos recientes y su distribución espacial confirman la importancia de los efectos locales de sitio, ya que la severidad de los daños suele estar relacionada con amplificaciones locales debidas a las condiciones geológicas y geotécnicas del lugar. Por lo tanto es necesario anticipar el daño que ese fenómeno puede llegar a causar. Esto puede resultar en una prospección antes del desastre, con el objetivo de determinar cómo y dónde las señales sísmicas pueden ser modificadas por condiciones geológicas locales o morfológicas.

Debido a las limitaciones que dificultan la utilización de registros sísmicos fuertes en los estudios, por su escasez temporal y espacial, se puede sacar provecho de la información proveniente de movimientos sísmicos débiles y de microtemblores para la caracterización dinámica de los suelos y la subsiguiente de evaluación de la amenaza sísmica local.

El término microtemblor se utiliza para denotar todo tipo de ruido sísmico ambiental o vibraciones ambientales: *i*) vibraciones producidas por actividades humanas, generalmente de alta frecuencia, *ii*) vibraciones causadas por fuentes superficiales locales como las industrias y el tráfico, *iii*) ruido natural de baja frecuencia generado por mareas, vientos, y telesismos.

La importancia de la geología local en la respuesta sísmica ha sido reconocida desde los inicios de la sismología. En Japón, por ejemplo, el fenómeno de efectos de sitio ha sido documentado desde principios del siglo XVIII (Ohsaki, 1972). A modo de ejemplo la Figura 1 muestra la distribución de daños en edificaciones de madera en Shimizu, debido al sismo de Tonankai de 1944. En este caso cerca del 80% de las edificaciones de la ciudad que presentaron daños estaban concentradas alrededor del estuario de un río con depósitos blandos y profundos (Ohsaki, 1972).

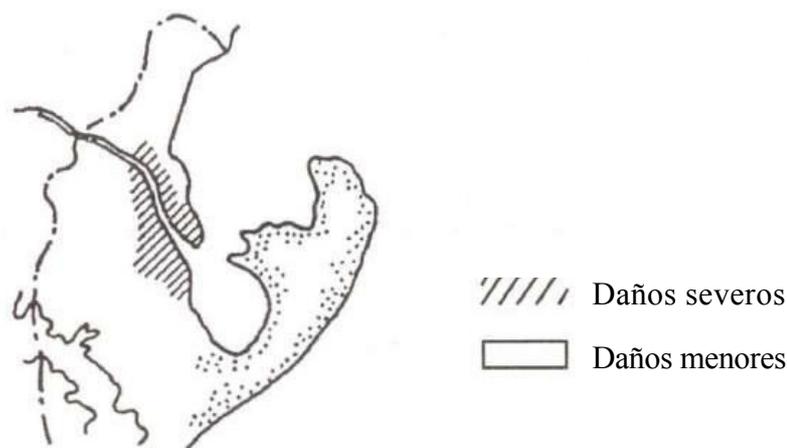


Figura 1: Distribución del daño en la ciudad de Shimizu, Sismo de Tonankai de 1944 (de Ohsaki, 1972).

Para el mismo sismo, Yokoi *et al.* (1965) reportaron una distribución de daños similar en la ciudad de Nogoya (Figura 2). Se encontró que los valores del número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar eran muy bajos en los 10 metros más superficiales.

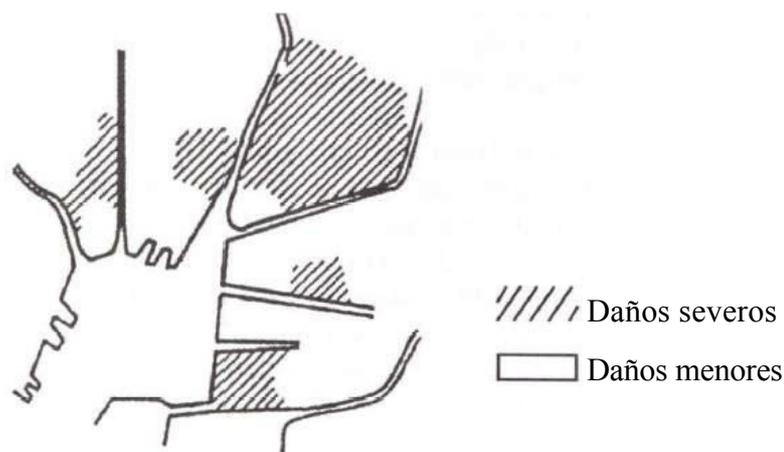


Figura 2: Distribución del daño en Nagoya Sur, Sismo de Tonakai de 1944 (de Yakoi, 1965).

La Figura 3 muestra la distribución de daños en edificaciones de madera en el pueblo de Nakamura, debido al sismo de Nankaido de 1946, allí se evidencia claramente el límite entre áreas totalmente destruidas y ligeramente dañadas (Shimizu y Suehiro, 1947).

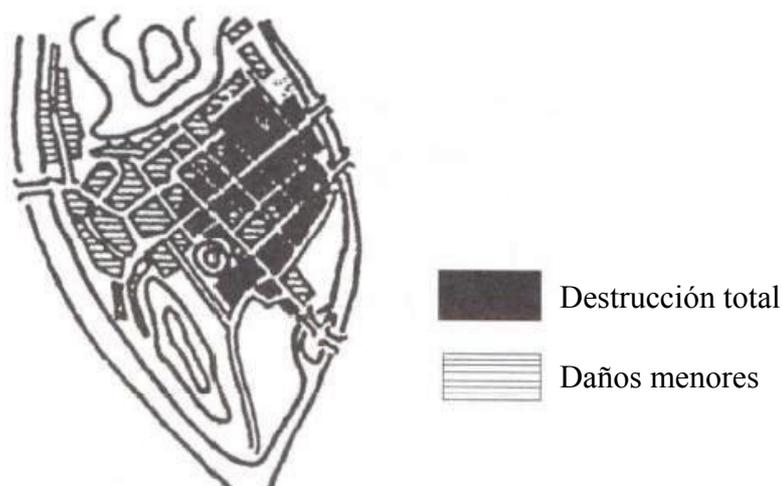


Figura 3: Distribución del daño en el pueblo de Nakamura, Sismo de Nankaido de 1946 (de Shimizu y Suehiro, 1947).

Con estos pocos ejemplos se puede apreciar por qué el fenómeno de la amplificación de la señal sísmica en sedimentos blandos cerca de la superficie ha sido reconocido y profusamente estudiado desde hace varias décadas. Por lo tanto, conocer las características dinámicas de depósitos de suelos en regiones con potencial para una actividad sísmica intensa es muy importante para determinar las posibles amplificaciones de los movimientos sísmicos e identificar probables condiciones de resonancia en las edificaciones.

La relación espectral de las componentes horizontal y vertical de registros de movimiento sísmico ha sido utilizada frecuentemente en sismología. Para el caso de ondas superficiales, Nogoshi e Igarashi (1971) concluyeron que se obtiene una buena correlación de la relación espectral H/V entre el modo fundamental de las ondas de Rayleigh y microtemblores en sitios con alto contraste de impedancia. Por otro lado, Nakamura (1989 y 2000) definió teóricamente la técnica H/V con múltiples refracciones de ondas SH de incidencia vertical. El autor explicó que hay un grupo de investigadores (Konno y Ohmachi, 1998; Lachet y Bard, 1994; Nogoshi e Igarashi, 1971) que tratan de interpretar el pico del cociente H/V con la evidencia de ondas

de Rayleigh. Nakamura, sin embargo, argumenta que los microtemblores consisten de muchos tipos de ondas (Nakamura, 1989). Nakamura (2000 y 2008) mostró, utilizando ejemplos presentados por Nogoshi e Igarashi (1971), que la energía de las ondas de Rayleigh es nula en concordancia con el pico del cociente H/V y que las amplitudes, tanto de la componente horizontal como de la componente vertical, también son cero. Nakamura (1996 y 2000) presentó dos aplicaciones de los resultados obtenidos del cociente espectral H/V o QTS (*Quasi-Transfer Spectra*, cuasi-espectros de transferencia). Una de ellas es el cálculo de la profundidad h del basamento, suponiendo que la densidad de la capa superficial del terreno es igual a la del basamento rocoso. La otra aplicación presentada por Nakamura (1996 y 2000) es el cálculo de un índice de vulnerabilidad del terreno superficial K_g , para estimar el daño que un terremoto puede causarle.

Algunos autores utilizaron técnicas de modelación numérica para estudiar los efectos locales del suelo. Ejemplo de ello es el trabajo de Fäh y Suhadolc (1994), quienes modelaron perfiles de suelo de la ciudad de Benevento (Italia) utilizando modelos estructurales de una y dos dimensiones y adicionalmente emplearon un método híbrido, en el cual se combinaron las técnicas de superposición modal con la de diferencias finitas. Se encontraron importantes diferencias en las respuestas obtenidas con las diferentes técnicas de modelado. Otro ejemplo es el trabajo de Field y Jacob (1993), quienes presentaron un modelo para determinar la respuesta de capas sedimentarias a ruido sísmico ambiental. La estimación de Nakamura, aplicada tanto al espectro observado como al predicho, fue exitosa en la identificación de la frecuencia fundamental de resonancia, con un leve corrimiento, menor al 10%, hacia las frecuencias bajas.

Otros autores han concentrado su esfuerzo en estudiar y comparar los resultados obtenidos por la técnica del cociente espectral H/V y otras técnicas de uso más conocido y extendido, empleando tanto registros de movimiento fuerte como de microtemblores. Duval *et al.* (2001) compararon tres técnicas, dos de ellas basadas en el cociente espectral H/V para un mismo sitio (para una de ellas la señal es un terremoto y para la otra es vibración ambiental) y la restante utiliza un sitio de referencia. Compararon la frecuencia fundamental y su correspondiente factor de amplificación y también la amplitud pico máxima y su correspondiente frecuencia. Entre las conclusiones más importantes a las que arribaron esos autores podemos destacar que la técnica del cociente espectral H/V utilizando vibración ambiental provee una estimación muy confiable de la frecuencia fundamental. Resultados similares fueron obtenidos por Field y Jacob (1995), quienes utilizando datos de las réplicas del sismo de Loma Prieta de 1989 y de ruido sísmico ambiental, compararon también varias técnicas usadas para determinar de la respuesta de sitio.

Hasancebi y Ulusay (2006) realizaron una evaluación del factor de amplificación y del periodo fundamental del suelo en Yenisehir, un área propensa a terremotos, ubicada en el Oeste de Turquía, usando tres métodos: relaciones empíricas basadas en velocidad de la onda de corte, modelado con el programa SHAKE y el cociente espectral H/V con datos de microtemblores. A modo de resumen y basándose en los resultados obtenidos de las mediciones de vibración ambiental construyeron dos mapas: uno para los factores de amplificación y otro para los periodos fundamentales del sitio.

Huang (2002) usando datos de 108 estaciones sísmicas y mediciones de vibraciones ambientales comparó la técnica del cociente espectral respecto a un sitio de referencia con la del cociente espectral H/V obteniendo consistencia en los valores de frecuencia fundamental, mientras que los factores de amplificación estimados a partir de datos de terremotos fueron mayores, para todas las estaciones, que aquellos obtenidos de registros de vibración ambiental. A iguales conclusiones arribaron Molnar y Cassidy (2006).

Lermo y Chávez-García (1994) revisaron la aplicabilidad de las mediciones de microtemblores para evaluar la respuesta de sitio de suelos blandos de México. Las técnicas que compararon fueron: interpretación del espectro de amplitudes de Fourier, cocientes espectrales respecto a una estación de referencia y, finalmente, cocientes espectrales H/V (la técnica de Nakamura). Los autores concluyen afirmando que las mediciones de microtemblores pueden ser utilizadas para estimar el periodo predominante de un sitio con una aceptable confiabilidad en el rango de frecuencias de 0,3 a 5 Hz. Los mejores resultados fueron obtenidos con la técnica de Nakamura, la cual también da una estimación aproximada de la amplificación de las ondas sísmicas cuando la geología local es relativamente simple.

Un estudio de microzonificación sísmica para mitigación del riesgo sísmico fue realizado por Parolai *et al.* (2004) en el área de Colonia, Alemania. En este estudio se utilizaron dos tipos de datos, registros de ruido sísmico ambiental y de terremotos. Las técnicas que se emplearon y compararon fueron: el cociente espectral de Nakamura utilizando ambos tipos de datos y la técnica de Kagami (cociente espectral respecto a un sitio de referencia, utilizando la contribución de la parte correspondiente a la onda S del registro), con registros de terremotos. Las observaciones y conclusiones a las que arribaron fueron las siguientes: (1) La frecuencia fundamental calculada es estable en el tiempo, pero la amplitud del pico (factor de amplificación) no lo es; (2) la variación de la amplificación relativa del cociente H/V debe ser revisada sistemáticamente con mediciones repetidas antes de establecer conclusiones sobre su significancia; (3) el análisis del cociente H/V de los registros de ruido ambiental permite determinar la frecuencia fundamental de sitio; y (4) generalmente las formas de los cocientes espectrales obtenidos por los diferentes métodos se corresponden entre sí.

Pando *et al.* (2008) evaluaron la aplicabilidad de diferentes técnicas para la determinación del período fundamental de sitio en varias estaciones sísmicas de Mayagüez, Puerto Rico. Emplearon registros de terremotos de movimiento débil y de microtemblores. De las cinco técnicas comparadas, tres son de uso extendido: amplitudes espectrales de Fourier, cociente espectral de Fourier entre el espectro obtenido en un determinado sitio y el obtenido en otro sitio tomado como referencia y la técnica de Nakamura. Las restantes dos técnicas son nuevas: una de ellas, propuesta por Montejo y Suárez (2006), consiste en la aplicación de la transformada wavelet a registros de movimiento fuerte, pero que en esta oportunidad fue aplicada a registros de movimiento débil. La otra nueva técnica, propuesta por Cano (2008) está basada en teoría de vibraciones aleatorias aplicada a vibraciones ambientales. En general todos los métodos proporcionaron estimaciones del período fundamental de sitio razonablemente similares.

La aplicabilidad del método H/V basado en el cociente espectral entre las componentes horizontal y vertical de movimientos fuertes fue examinada por Huang y Teng (1999) para la estimación de la respuesta del sitio (frecuencia fundamental del suelo y su factor de amplificación) usando datos del terremoto de Northridge, ocurrido el 17 de enero de 1994 de magnitud M_w 6,7. A partir de los resultados obtenidos, los autores concluyen que el cociente espectral H/V aplicado a registros de movimiento fuerte es capaz de predecir razonablemente la frecuencia fundamental y el nivel de amplificación de la respuesta de un sitio, especialmente para aquellos sitios en la vecindad de los epicentros. Un análisis similar al anterior fue realizado por Lermo y Chávez-García (1993) en tres diferentes ciudades de México. A partir de los resultados obtenidos, los autores concluyeron que si los efectos son causados simplemente por la geología, se puede obtener una primera estimación del periodo dominante y del nivel de amplificación local usando registros de una sola estación.

Varios trabajos presentan comparaciones entre los resultados obtenidos mediante la técnica de los cocientes espectrales H/V de microtemblores y los obtenidos mediante soluciones teóricas. Un ejemplo es el trabajo de Apostolidis *et al.* (2006), quienes realizaron detallados estudios

geológicos y geotécnicos con el objetivo de establecer un modelo 2D de la estructura superficial del suelo presente en la ciudad de Aigión, Grecia, una de las áreas sísmo-tectónicas más activas de Europa. Todos los resultados fueron consistentes, indicando una buena correlación entre el modelo del depósito de suelo y la respuesta del sitio obtenida a partir de las mediciones. Bour *et al.* (1998) llevaron a cabo un estudio de microzonificación sísmica utilizando el método de Nogoshi-Nakamura y registros de microtemblores. Los resultados experimentales fueron completados comparándolos con la solución de simulaciones numéricas unidimensionales (usando el programa SHAKE91). La comparación de los resultados obtenidos por los métodos experimentales y numéricos mostraron buena correlación en las frecuencias fundamentales, pero las amplitudes obtenidas mediante las dos técnicas mostraron, en algunos casos, cierta discrepancia.

Muchos de los trabajos revisados presentan estudios de microzonificación sísmica para la estimación de los efectos de sitio en alguna región particular del mundo, mediante la aplicación del método del cociente espectral H/V con mediciones de vibración ambiental.

Al-Qaryouti y Al-Tarazi (2007) utilizaron mediciones de vibración ambiental en conjunto con la técnica H/V para la estimación de las funciones de respuesta de sitio empíricas en la ciudad de Aqaba, Jordania. Los resultados mostraron variaciones con el sitio en la amplitud espectral, frecuencia dominante y nivel de amplificación. La intensidad y distribución de la destrucción sísmica del terremoto del Golfo de Aqaba (Noviembre 22, 1995, $M_w = 7,3$) mostró una buena correlación con los valores de frecuencia fundamental y niveles de amplificación obtenidos en este estudio.

Gosar (2007) realizó un estudio de efectos de sitio en la región de Bovec en Eslovenia con el propósito de intentar explicar los fuertes efectos de sitio observados luego de dos importantes terremotos que afectaron la zona en 1998 y 2004, utilizando la técnica de los cocientes espectrales H/V de registros de microtemblores para determinar la frecuencia fundamental de los sedimentos. También fueron realizadas mediciones sobre ciertas edificaciones. Los resultados obtenidos permitieron concluir que la gran variación en los daños producidos por los terremotos de 1998 y 2004 se debió a una gran variación en los efectos de sitio (frecuencia y amplificación locales) y los grandes daños fueron consecuencia de la amplificación local de sitio y de la condición de resonancia suelo-estructura.

Panou *et al.* (2005), investigaron la validez de la estimación de las características de la respuesta sísmica de sitio a partir de mediciones de vibración ambiental en el centro de la ciudad de Tesalónica (norte de Grecia), la cual fue afectada fuertemente a por el terremoto de 1978 ($M = 6,5$). Con este propósito se tomaron 250 mediciones de ruido sísmico ambiental, en una densa grilla de puntos que cubría el centro de la ciudad. Se calculó el cociente espectral H/V para cada sitio y se estimó tanto la frecuencia fundamental (f) como el correspondiente nivel de amplificación (A) y se compararon con resultados obtenidos a partir de estudios geológicos, geotécnicos y datos de movimiento fuerte. Estas comparaciones proveyeron buena evidencia de que las mediciones de ruido ambiental apropiadamente procesadas junto con la técnica de los cocientes espectrales H/V pueden ser utilizadas como una herramienta rápida y económica para estudios de microzonificación en ambientes urbanos.

Volant *et al.* (2002) realizaron una evaluación sísmica de las instalaciones nucleares existentes en el sureste de Francia, las cuales están ubicadas a pocos kilómetros de una importante falla activa llamada South Eastern Durance Fault, usando mediciones de vibración ambiental para caracterizar el comportamiento dinámico de la estructura y del suelo. Los resultados del estudio del comportamiento del suelo con el método de Nakamura fueron muy dificultosos de interpretar porque no fueron estables en tiempo y espacio.

Theodulidis *et al.* (2008), dentro del esquema del proyecto SESAME (2004), recopilaron mediciones de vibración ambiental en cinco áreas urbanas europeas afectadas por fuertes

terremotos históricos o recientes en Europa, a saber: Angra do Heroísmo (Portugal), Fabriano y Palermo (Italia), Thessaloniki y Kalamata (Grecia). El objetivo de esta tarea fue darle una respuesta a la pregunta: “¿Cómo se correlaciona el cociente espectral H/V de ruido ambiental con el daño en ciudades modernas?”. Todos los registros de ruido ambiental fueron procesados homogéneamente utilizando un programa desarrollado como parte del proyecto SESAME. Los resultados mostraron que en algunos casos la técnica H/V es capaz de diferenciar entre áreas que previamente mostraron estar asociadas con altos niveles de daño. En otros casos, sin embargo, la correlación no es estadísticamente significativa indicando así el carácter complejo de los parámetros involucrados.

Finalmente, algunos autores han estudiado la influencia de las condiciones bajo las cuales se realizan las mediciones para aplicar el método del cociente H/V y las diferencias en los resultados obtenidos al utilizar diferentes tipos de instrumentos. Strollo *et al.* (2008) compararon los registros obtenidos de dos sismómetros diferentes (Gürlap CMG-3ESPC y Mark L4C-3D) instalados uno a continuación del otro. La comparación realizada en términos de densidad espectral de potencia (PSD, *Power Spectral Density*) y análisis de coherencia mostró una excelente correspondencia entre los registros obtenidos por los sismómetros de período corto y los de banda ancha en el rango de frecuencias 0,2-20 Hz. Por lo tanto, este resultado permite concluir que utilizando un sensor de período corto correctamente calibrado se pueden obtener los mismos resultados que se obtendrían usando un sismómetro de banda ancha en el rango de interés para ingeniería.

Chatelain *et al.* (2008), como parte del proyecto europeo SESAME, llevaron a cabo una evaluación de la influencia de las condiciones experimentales sobre los resultados del cociente H/V a partir de registros de ruido ambiental. Entre los resultados obtenidos se pueden destacar los siguientes:

1. se recomienda utilizar un sensor cuya frecuencia natural se encuentre al menos en el orden de la frecuencia fundamental de sitio;
2. los parámetros de registro (ganancia del instrumento, horizontalidad del instrumento, frecuencia de muestreo) no tienen ninguna influencia sobre los resultados del cociente H/V ;
3. sin considerar las condiciones climáticas, las mediciones sobre césped, cemento y asfalto no cambian dramáticamente los resultados; se debe siempre evitar hacer mediciones sobre grava o caliza;
4. si es necesario utilizar una interfaz artificial para instalar el sensor, lo mejor es utilizar cualquier tipo de arena en un recipiente, lo cual no tiene influencia sobre los resultados;
5. la cercanía tanto de grandes como de pequeñas construcciones pueden afectar los resultados debido a la interacción suelo-estructura y por lo tanto debe incluirse esta información en la hoja de campo;
6. debe evitarse registrar ruido ambiental sobre terrenos ubicados encima de vacíos tales como grandes tuberías o sistemas de transporte subterráneo;
7. el viento y la lluvia por sí mismos no influyen en los resultados, pero la combinación de viento con césped o estructuras cercanas (árboles, edificios, etc.) puede severamente cambiar las curvas H/V , especialmente en las bajas frecuencias (debajo de 1 Hz);
8. excepto en las pruebas realizadas con sismómetros de periodo largo, no se observó variación con el tiempo del cociente H/V , para períodos que variaron desde horas a semanas y años;
9. tomar registros próximos a fuertes fuentes de ruido influye sobre los resultados: el problema principal se presenta con fuentes continuas;
10. se recomienda evitar tomar registros próximos a fuentes de ruido tales como tráfico pesado, mar agitado o maquinaria y también evitar producir perturbaciones en las cercanías del sensor.

2 LA TÉCNICA DEL COCIENTE ESPECTRAL H/V

La ocurrencia de un terremoto involucra la liberación de la energía de deformación acumulada en la región focal y la propagación de una parte de esta energía hacia los alrededores. Las características dinámicas $O(\omega)$ (ω significa frecuencia) observadas en un cierto sitio incluyen todas las características de radiación de las ondas $F(\omega)$ de la región focal, las características dinámicas $T(\omega)$ de la ruta de propagación de las ondas hasta el punto de observación y las características dinámicas $S(\omega)$ de las capas superficiales para el punto de observación (ver Figura 4).

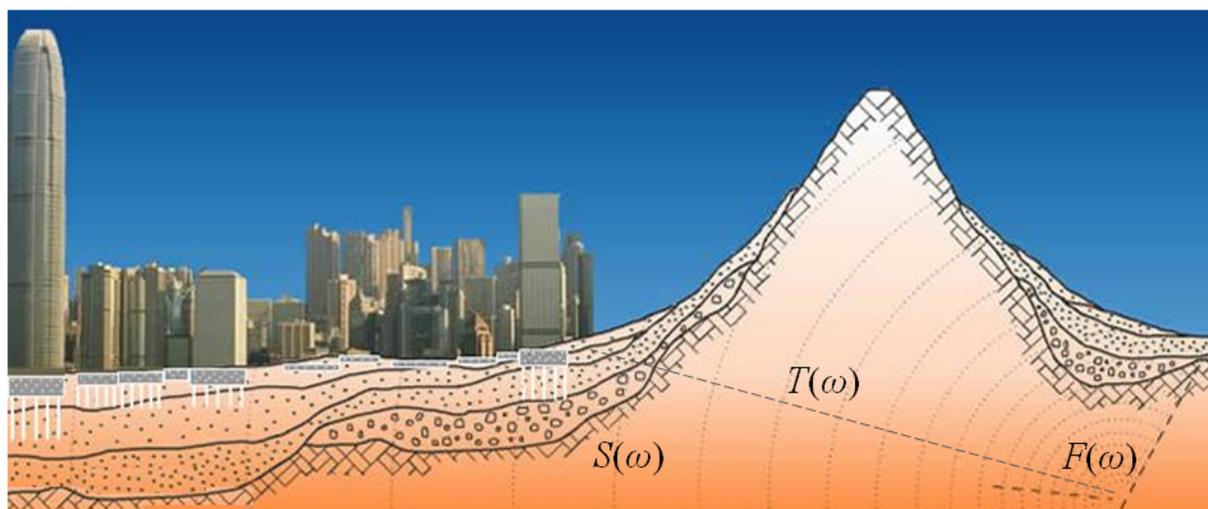


Figura 4: Factores que influyen en la respuesta sísmica de un determinado sitio (figura adaptada de Alfaro, 2006)

Las formas de las ondas de la aceleración sísmica para un punto dado de observación son generalmente muy similares (sin mucha variación entre diferentes terremotos), aunque la tendencia es que los movimientos de alta frecuencia prevalecen cuando la magnitud del terremoto es pequeña y los movimientos de baja frecuencia prevalecen cuando la magnitud es grande. Esto significa que la forma de las ondas sísmicas observadas es similar para el mismo punto de observación (esto es, iguales características de las capas superficiales $S(\omega)$ aun cuando las características de radiación $F(\omega)$ o las características de propagación $T(\omega)$ sean diferentes. En otras palabras, se puede decir que el efecto de las capas superficiales del terreno es el más crítico de los tres factores que influyen en las características dinámicas. Este hecho remarca la importancia de comprender las características de vibración de las capas superficiales.

Nakamura postula que las ondas que causan las vibraciones ambientales registradas en la superficie del suelo son de dos tipos: ondas superficiales (ondas de Rayleigh específicamente) y ondas de cuerpo (ondas P y S). Si alguna fuente superficial genera ondas de cuerpo en un medio formado por una capa elástica sobre una roca con una gran diferencia de impedancia, estas ondas se propagan siguiendo un patrón complejo, que depende de cuál es la fuente específica que les dio origen y de su localización. De todas maneras, debido a las reflexiones que ocurren en la interfaz suelo-roca, parte de las ondas P y S se mueven desde el basamento hacia la superficie libre donde pueden ser registradas por un sensor. Nakamura (2000) expresó el movimiento horizontal (H_f) y vertical (V_f) del suelo en la superficie libre como la suma del movimiento debido a las ondas de cuerpo que viajan desde el basamento más la contribución de las ondas superficiales (ver Figura 5). Esta superposición conviene hacerla en el dominio de la frecuencia. Por lo tanto $H_f(\omega)$ y $V_f(\omega)$ son, respectivamente, la transformada de Fourier

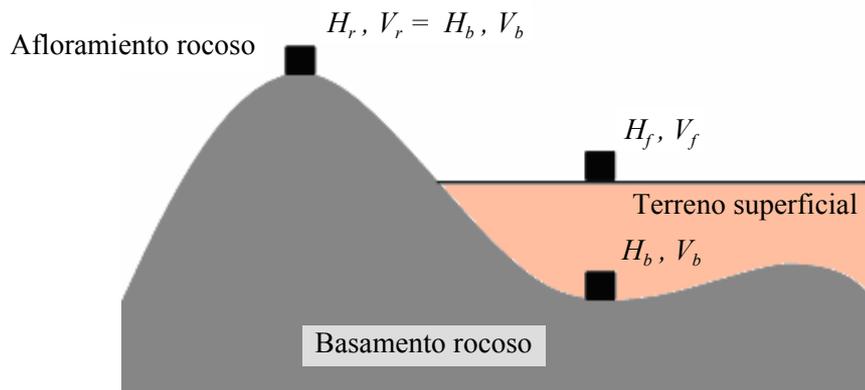


Figura 5: Estructura geológica típica de una cuenca sedimentaria (de Nakamura, 2000).

del movimiento horizontal en la superficie y la transformada de Fourier del movimiento vertical en la superficie considerando, para ambos, la contribución de los dos tipos de onda (de cuerpo y superficiales). Los espectros $H_f(\omega)$ y $V_f(\omega)$ no son útiles para identificar las frecuencias naturales del depósito porque también contienen las frecuencias dominantes de las fuentes que generaron las ondas.

Obviamente, si se dispusiera de los espectros en el basamento rocoso, es decir $H_b(\omega)$ y $V_b(\omega)$, podríamos realizar los cocientes,

$$T_h(\omega) = \frac{H_f(\omega)}{H_b(\omega)} \quad T_v(\omega) = \frac{V_f(\omega)}{V_b(\omega)} \quad (1)$$

obteniendo así las funciones de transferencia entre el movimiento en la superficie y en la roca basal, tanto para la componente horizontal $T_h(\omega)$ como para la vertical $T_v(\omega)$, logrando de esta forma eliminar el llamado “efecto de la fuente” y así obtendríamos las frecuencias naturales del depósito, pero el problema es que usualmente no se dispone de ellos. Nakamura (2000) considera que $H_b(\omega)$ y $V_b(\omega)$ son iguales a los espectros en un afloramiento rocoso, a los que llama $H_r(\omega)$ y $V_r(\omega)$ (ver Figura 5). Esto podría considerarse como una aproximación, pero rigurosamente no es cierto: los picos de los espectros sí coinciden pero las magnitudes de $H_r(\omega)$ y $V_r(\omega)$ son menores que las de $H_b(\omega)$ y $V_b(\omega)$.

Debido a la dificultad para obtener los espectros en el basamento rocoso, Nakamura propone entonces usar una función de la frecuencia T_h^* que se define como el cociente entre las funciones de transferencia $T_h(\omega)$ y $T_v(\omega)$:

$$T_h^*(\omega) = \frac{T_h(\omega)}{T_v(\omega)} \quad (2)$$

Algunos autores (e.g. Lermo y Chávez-García, 1993) mencionan que la función de transferencia $T_h(\omega)$ se divide por $T_v(\omega)$ para “compensar el efecto de la fuente”. Reemplazando $T_h(\omega)$ y $T_v(\omega)$ de las ecuaciones (1) en la (2) se obtiene:

$$T_h^*(\omega) = \frac{T_h(\omega)}{T_v(\omega)} = \frac{H_f(\omega)/H_b(\omega)}{V_f(\omega)/V_b(\omega)} = \frac{H_f(\omega)}{V_f(\omega)} \frac{1}{H_b(\omega)/V_b(\omega)} \quad (3)$$

Usando resultados de sus propias mediciones experimentales, Nakamura determinó que el cociente entre $H_b(\omega)$ y $V_b(\omega)$ es aproximadamente igual a 1, al menos dentro del rango de

frecuencias donde se encuentra la frecuencia fundamental del depósito ω_0 . Este resultado ha sido posteriormente comprobado por otros investigadores (Lermo y Chávez-García, 1994; Huang y Chiu, 1998). En ese caso, el cociente $T_h(\omega)/T_v(\omega)$ resulta:

$$T_h^*(\omega) = \frac{T_h(\omega)}{T_v(\omega)} = \frac{H_f(\omega)}{V_f(\omega)} \quad (4)$$

Al cociente $H_f(\omega)/V_f(\omega)$, Nakamura lo llama *QTS* por las siglas en inglés de *Quasi Transfer Spectrum* (cuasi-espectro de transferencia). No obstante la comunidad ingenieril simplemente lo llama cociente H/V .

Puede ser demostrado tanto teórica como empíricamente que, independientemente del tipo de ondas y de su importancia relativa en los registros de los movimientos superficiales $H_f(\omega)$ y $V_f(\omega)$, la relación entre éstos (vale decir el cuasi-espectro o cociente H/V) presenta un pico en concordancia con la frecuencia fundamental del depósito de suelo ω_0 asociada a las vibraciones horizontales.

3 MEDICIONES DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN MAYAGÜEZ

Como parte del proyecto de microzonificación sísmica realizado en la ciudad de Mayagüez, localizada en la costa oeste de Puerto Rico, se tomaron registros de vibración ambiental en distintos sitios de la ciudad, adecuadamente seleccionados, con el propósito de cubrir la gran variación geológica y topográfica de la ciudad.

3.1 Descripción del área estudiada

La isla de Puerto Rico está localizada en la placa del Mar Caribe entre las latitudes 18° y $18,5^\circ\text{N}$ y longitudes $65,25^\circ$ y $67,25^\circ\text{O}$. Se encuentra ubicada sobre una muy activa y compleja región tectónica en el noreste del Mar Caribe. La mayor parte de la actividad sísmica del área es producida por la convergencia y traslación lateral de las placas de Norte América y del Caribe por debajo de la placa de Puerto Rico (Tuttle *et al.*, 2003), como muestra la Figura 6. El área de estudio para este trabajo se concentró sobre la ciudad de Mayagüez, la cual está ubicada en el extremo Oeste de la isla de Puerto Rico como lo muestra la Figura 7.

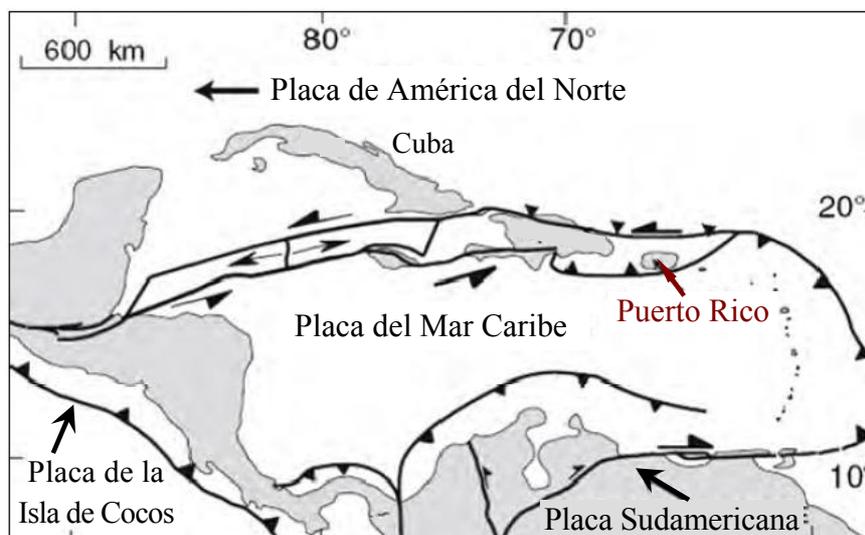


Figura 6: Configuración de las placas tectónicas para la región del Caribe (de Tuttle *et al.*, 2003).

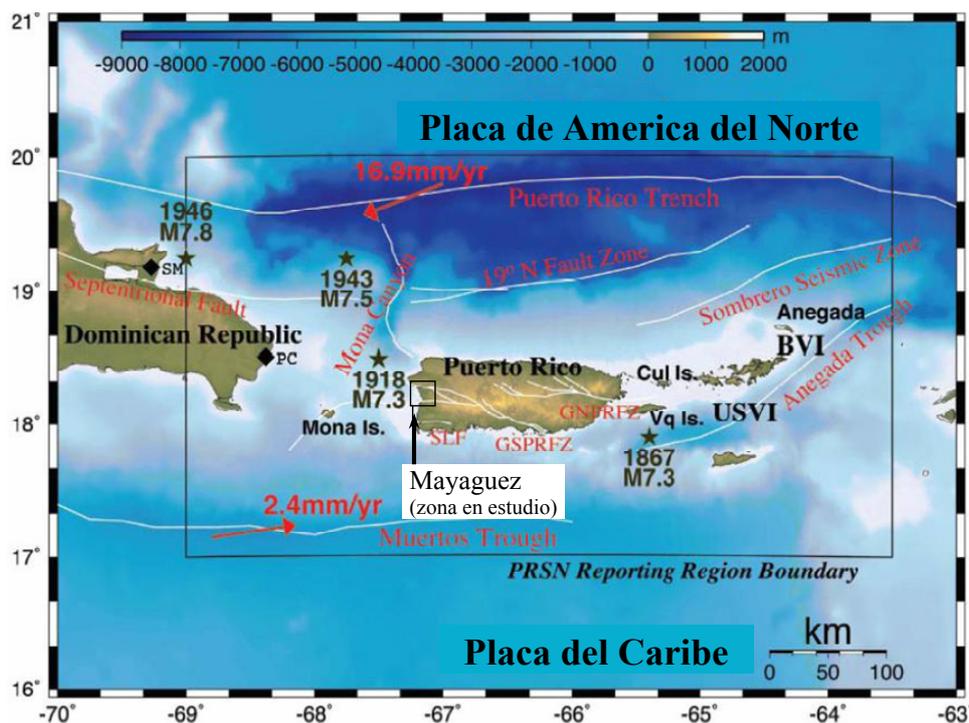


Figura 7: Actividad sísmica y principales fallas de Puerto Rico (adaptada de Clinton et. al, 2006).

La Figura 7 muestra que Puerto Rico está rodeado de fallas activas las cuales son consideradas las principales fuentes de actividad sísmica en la isla. El Cañón de La Mona y el Canal de Anegada son zonas de extensión localizadas al Oeste y al Este de la isla, respectivamente. Hay dos zonas de subducción, al Norte la Trinchera de Puerto Rico y al Sur el Canal de Muertos. También existen segmentos de una gran zona de falla en la región Norte de Puerto Rico (GNPRFZ) y de otra gran zona de falla en la parte Sur de Puerto Rico (GSPRFZ) que cruzan la isla de noroeste a sureste. Además de las fuentes sísmicas mencionadas anteriormente, una nueva fuente sísmica fue recientemente identificada como capaz de generar eventos con una magnitud M7,0 (Prentice *et al.*, 2000; Prentice y Mann, 2005). Esta falla, ubicada en el interior de la isla, se identifica en la Figura 7 como SLF por la abreviación de South Lajas Fault. La misma está localizada en la esquina suroeste de Puerto Rico.

Las potenciales fuentes sísmicas más importantes para el área de Mayagüez son la Trinchera de Puerto Rico, el Canal de Muertos y el Cañón de La Mona (McCann, 1987). Los registros históricos demuestran que en el pasado han ocurrido fuertes terremotos en la Trinchera de Puerto Rico (Sykes *et al.*, 1982 y McCann, 1993). Se cree que esta fuente es capaz de generar eventos con una magnitud de hasta $M \sim 8$, debido a que existe evidencia de que en 1943 produjo un evento de magnitud $M \sim 7,75$ (McCann, 1987). También, de acuerdo a McCann (1987) se considera que el Canal de Muertos es capaz de producir eventos de $M \sim 7,5$ a 8,0. Sin embargo, la sismicidad producida por el Cañón de La Mona es considerada como la amenaza más importante para la costa oeste debido a la proximidad a esta área. Esta zona es capaz de generar sismos de $M \sim 7,5$ a 8,0 (McCann, 1987). En 1918, esta fuente generó el evento más devastador para el área de Mayagüez, con una magnitud estimada de 7,3. Más de 100 personas murieron debido a esta catástrofe y se estimó una pérdida en propiedades de cuatro millones de dólares de esa época (Reid and Taber, 1919).

La geología general para el área de Mayagüez ha sido mapeada por Curet (1986). En términos generales, esa área yace entre el contacto de dos unidades geológicas diferentes: el complejo Sierra Bermeja y un complejo volcánico (Moya y McCann, 1992). El complejo Sierra Bermeja está compuesto principalmente por rocas volcánicas y metamórficas de edad pre-Cretácea a

Cretácea Temprana y es considerado como la formación rocosa más antigua de la isla (Moya y McCann, 1992). El complejo volcánico está constituido por rocas sedimentarias y volcánicas de finales de la edad Cretácea a comienzos de la edad Terciaria y recubre al complejo Sierra Bermeja (Moya y McCann, 1992).

La topografía del área de Mayagüez esta conformada por depósitos costeros de la edad Holocena y valles aluviales con pendientes suaves a planas, mientras que en la parte Este y Noreste de la ciudad predomina el terreno montañoso. Los depósitos costeros se ubican a lo largo de la costa de la Bahía de Mayagüez. Los valles aluviales en cambio se encuentran en los alrededores de los principales ríos del área, llamados ríos Yagüez y Guanajibo, debido a que fueron formados por la deposición de depósitos aluviales de estos ríos. La porción más ancha del llano costero está situada en la boca del Río Guanajibo, que está situado en la parte Sur de la Ciudad de Mayagüez. Por otro lado, la zona montañosa está situada sobre la parte Este de la ciudad, comenzando cerca del área costera y elevándose rápidamente hasta 350 metros sobre el nivel del mar.

3.2 Mediciones de vibración ambiental

Las mediciones de vibración ambiental fueron realizadas utilizando acelerógrafos Etna de la compañía Kinematics adquiridos con fondos del Programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico. En su configuración típica como acelerógrafo de movimiento fuerte, el Etna incluye internamente un acelerómetro triaxial de fuerza balanceada (EpiSensor ES-T) y un sistema de GPS (Sistema de Posicionamiento Global) el cual fue utilizado para registrar la posición de cada sitio medido para luego ser volcados en un mapa. Se utilizaron dos tipos de instrumentos Etna, uno con un rango dinámico de medición de $\pm 2,0$ g (siendo g la aceleración de la gravedad) y otro con un rango dinámico de medición de $\pm 0,25$ g.

Para realizar un estudio de microzonificación sísmica de la Ciudad de Mayagüez y confeccionar un mapa de isoperiodos de suelo, se llevaron a cabo dos campañas de mediciones de vibración ambiental que cubrieron un total de 134 sitios medidos (ver Figura 8).

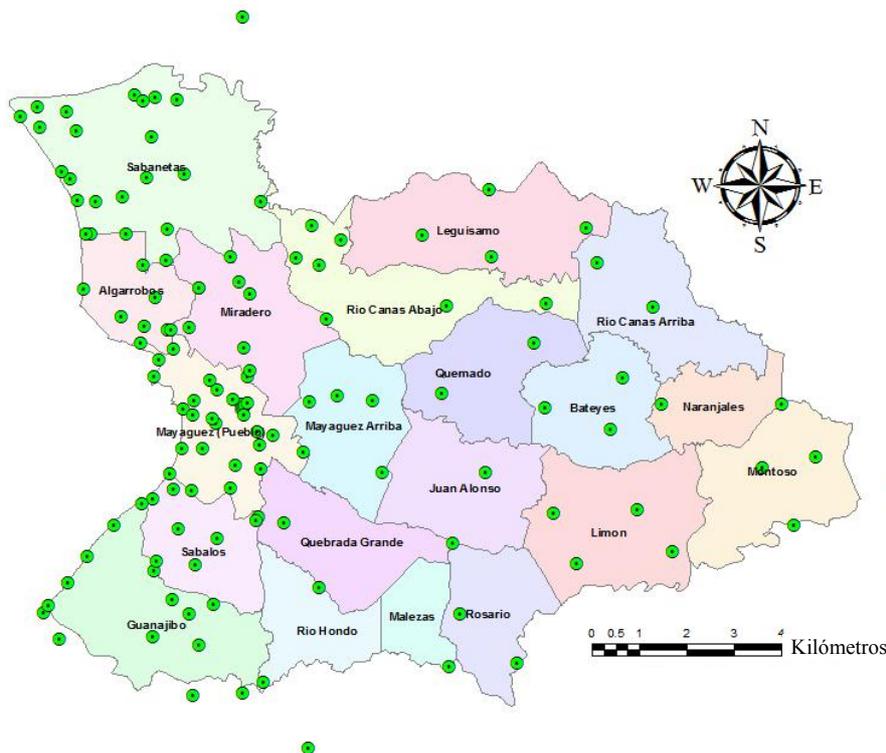


Figura 8: Ubicación de los sitios donde se registraron vibraciones ambientales.

Inicialmente las mediciones se concentraron en el sector más densamente poblado de la ciudad y luego se extendieron hacia la periferia. En la primera campaña de mediciones, se tomaron registros de vibración ambiental en 111 sitios y en la segunda campaña se agregaron 23 sitios nuevos. Todas las mediciones se realizaron durante una hora y usando una razón de muestreo de 100 muestras por segundo (mps), lo que equivale a una frecuencia de plegado (frecuencia de Nyquist) de 50 Hz. La Figura 9 muestra el acelerómetro junto al ordenador portátil utilizado para configurar y accionar manualmente el instrumento.



Figura 9: Acelerómetro Etna y ordenador.

Como puede observarse en la Figura 9, el instrumento se encuentra montado sobre una placa de acero con el objeto de lograr un mejor acoplamiento instrumento-terreno. En todos los sitios donde se encontró grama sobre el terreno, ésta fue retirada para poder ubicar el instrumento directamente sobre la superficie del terreno y evitar así posibles errores en las mediciones, como lo recomienda la literatura especializada (Chatelain *et al.*, 2008).

3.3 Procesado de las mediciones: influencia de los parámetros de procesado

El procesado de las mediciones se realizó utilizando un programa ad-hoc escrito en MATLAB. El programa procesa el registro de cada canal del instrumento realizando las siguientes tareas:

- i) remoción de la media del registro,
- ii) selección automática de ventanas basado en parámetros definidos por el usuario,
- iii) multiplicación de cada ventana por una ventana de Hanning,
- iv) cálculo de la transformada de Fourier y suavizado de la misma para cada ventana,
- v) cálculo de la media de los espectros de Fourier de todas las ventanas y finalmente
- vi) cálculo de los cocientes espectrales NS/V , EO/V y H_c/V (donde H_c son las componentes horizontales combinadas).

La combinación de las componentes horizontales se realizó de la siguiente manera:

$$\frac{H_c}{V} = \sqrt{\frac{H_{E-O}^2 + H_{N-S}^2}{2V^2}} \quad (5)$$

donde H_{E-O} , H_{N-S} y V son, respectivamente, las amplitudes espectrales de Fourier en las direcciones E-O, N-S y vertical.

Con el objeto de conservar las partes más estacionarias del ruido ambiental y evitar así los transitorios frecuentemente asociados con fuentes puntuales (peatones, tráfico cercano, maquinaria en funcionamiento, etc.), al programa escrito en Matlab utilizado para el procesamiento de los registros de vibración ambiental se le incorporó un módulo para la selección automática de ventanas. Este módulo consiste en un algoritmo conocido en inglés como *antitrigger*, el cual detecta transitorios y los elimina del procesamiento.

El procedimiento para detectar transitorios se basa en una comparación entre dos promedios de amplitudes de la señal analizada. Uno de ellos es un promedio de periodo corto (*sta*, por las siglas de *short term average*), o sea, el promedio de la amplitud de la señal durante un periodo corto de tiempo, denotado "*tsta*" (típicamente 0,5 – 2,0 s). El otro es un promedio de periodo largo (*lta*, por las siglas de *long term average*), o sea, el promedio de la amplitud de la señal durante un periodo largo de tiempo, denotado "*lta*" (típicamente varias decenas de segundos). Cuando el cociente *sta/lta* excede un umbral previamente establecido, se considera que se detecta un "evento". Este criterio para seleccionar ventanas fue tomado del programa J-Sesame, un programa que surge del proyecto europeo SESAME, anteriormente nombrado. El funcionamiento de este módulo requiere que el usuario introduzca valores a diferentes parámetros.

Para el procesamiento de los datos se escogieron los valores que se resumen en la Tabla 1, valores que el programa J-Sesame tiene por defecto.

Longitud de la ventana (sec.)	20
Solape de las ventanas (% de la longitud de la ventana)	10
Longitud de la ventana para el promedio de corto plazo (sec.)	1
Longitud de la ventana para el promedio de largo plazo (sec.)	25
Nivel mínimo para el umbral de <i>sta/lta</i>	0,5
Nivel máximo para el umbral de <i>sta/lta</i>	2

Tabla 1: Tabla de los parámetros utilizados durante el procesamiento.

Con el propósito de estudiar la influencia de los distintos parámetros involucrados en el procesamiento se escogió un sitio y se procesó una medición de vibración ambiental utilizando primero los parámetros presentados en la Tabla 1, obteniendo el resultado mostrado en la Figura 10, es decir una frecuencia fundamental de sitio de 2,6 Hz y, posteriormente, variando estos parámetros, pero solo uno a la vez.

Luego de modificar los diferentes parámetros, se llegó a la conclusión de que, en términos generales, la modificación de los parámetros no tiene una influencia marcada en los valores del periodo fundamental obtenido y que sólo pueden causarse leves corrimientos en el valor o modificaciones en la forma de los cocientes espectrales obtenidos. Como recomendación, conviene realizar un procesamiento inicial con valores por defecto indicados en la Tabla 1 y posteriormente pueden ser modificados según la necesidad.

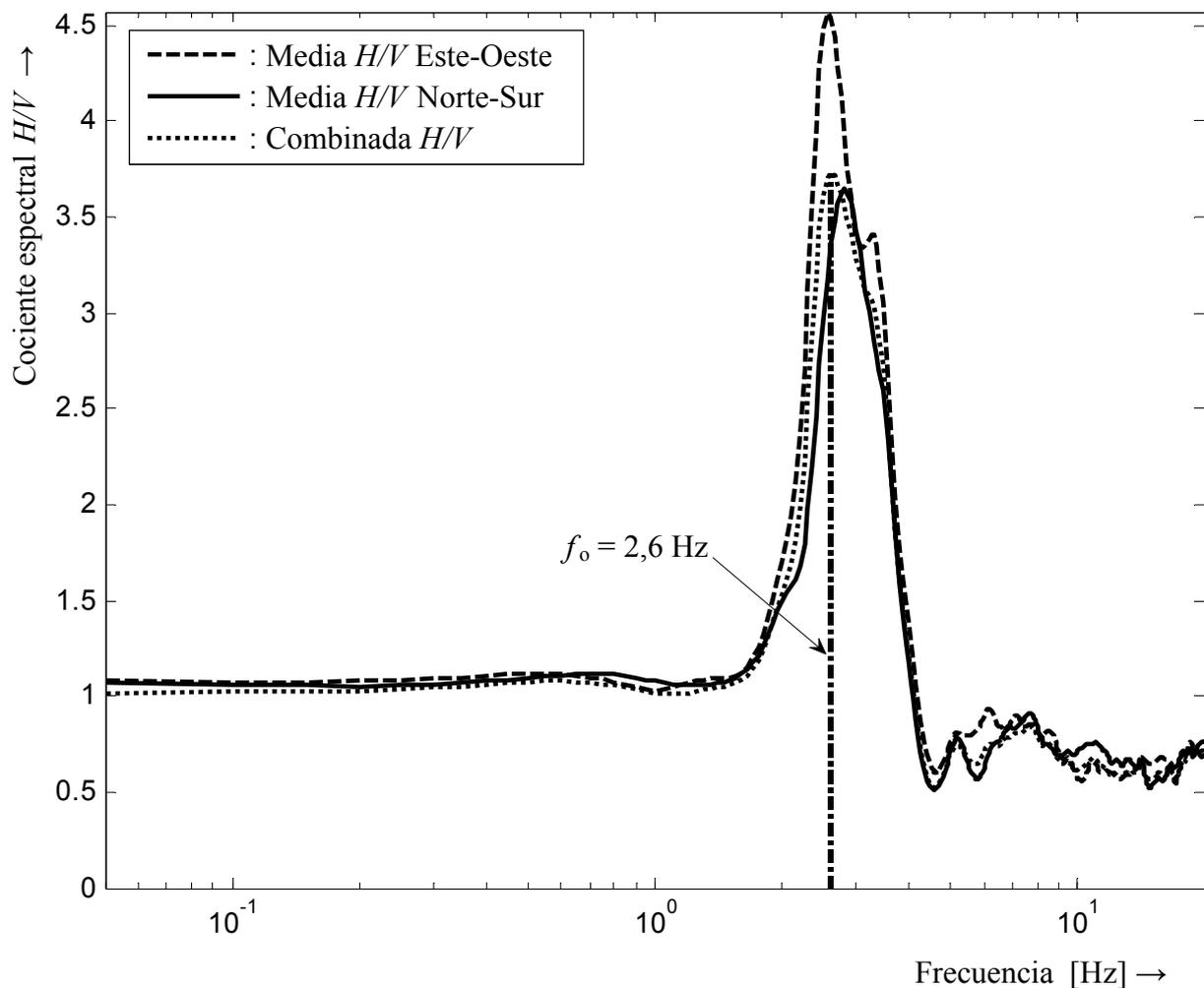


Figura 10: Cociente espectral H/V para el sitio de estudio.

3.4 Análisis de la estabilidad del método del cociente espectral

Para demostrar la estabilidad del método de los cocientes espectrales utilizando mediciones de vibración ambiental para determinar la frecuencia fundamental de un determinado sitio, se decidió tomar un registro de un día de duración y procesar luego distintas horas del día. El sitio escogido para hacer el análisis fue una estación sísmica llamada Catedral de Mayagüez, perteneciente al Programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico.

El instrumento utilizado para tomar la medición fue un acelerómetro ETNA de $\pm 2g$ y la medición fue tomada a 100 muestras por segundo. Las diferentes horas analizadas fueron procesadas utilizando los parámetros de la Tabla 1. Se consideraron 12 horas usando para esto las horas impares. La Figura 11 muestra los cocientes H/V para las diferentes horas procesadas. Como puede observarse, la frecuencia fundamental del terreno obtenida fue la misma, independientemente de la hora del día procesada. Esto demuestra la estabilidad del método y que la frecuencia fundamental es una propiedad del terreno, que no depende del tipo de excitación al cual esté sometido. Puede observarse también que la amplitud del cociente espectral varía según la hora del día en que se tome la medición. Esto coincide con lo reportado por Kanai y Tanaka, 1961; Nakamura, 1989 y Alfaro, 2006. Las amplitudes más bajas ocurren durante la noche, momento en que la actividad humana e industrial se reduce, mientras que las amplitudes más altas ocurren durante el día.

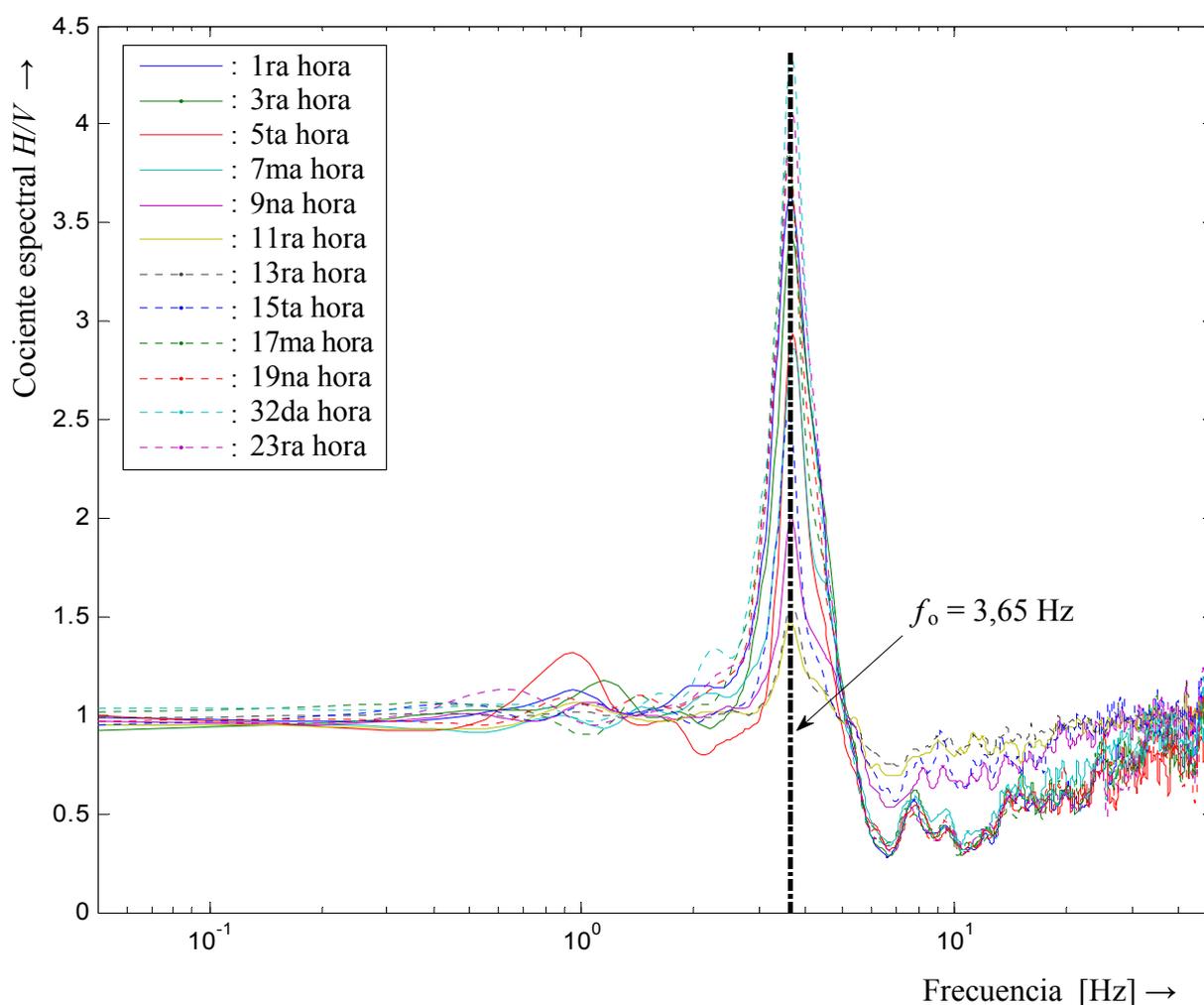


Figura 11: Cociente espectral H/V para distintas horas del día para la estación sísmica Catedral de Mayagüez.

4 MAPA DE ISOPERÍODOS DE SUELO PARA LA CIUDAD DE MAYAGÜEZ

Al procesar las 111 mediciones realizadas durante la primera campaña de mediciones, en 22 de los sitios no se logró obtener un valor claro de período fundamental. En algunos sitios, esto se debió a que el suelo era demasiado rígido y en ese caso no hay amplificación en ninguna frecuencia, o si la hay, es en alguna frecuencia muy alta, mientras que en otros casos simplemente no se obtuvo una frecuencia dominante sobre el resto. Como todas las mediciones iniciales habían sido obtenidas empleando un acelerómetro ETNA de $\pm 2,0g$, se decidió repetir las mediciones empleando en esa oportunidad un acelerómetro ETNA de $\pm 0,25g$ que posee mayor sensibilidad que el anterior. Estas nuevas mediciones permitieron, una vez procesadas, determinar el período fundamental en 18 de los 22 sitios problemáticos. Adicionalmente, en la segunda campaña de mediciones se tomó registro de vibración ambiental en 23 nuevos sitios. Una vez procesados se logró determinar el valor del período fundamental en 19 de esos 23 sitios medidos. Por lo tanto, de un total de 134 sitios medidos en la ciudad de Mayagüez, 126 permitieron obtener la frecuencia fundamental del suelo, mientras que los 8 restantes no arrojaron un valor claro.

A partir de los resultados obtenidos de las 134 mediciones de vibración ambiental que se llevaron a cabo durante el trabajo de investigación y con la ayuda del programa ESRI® ArcMap 9.3 (<http://www.esri.com/>) se confeccionó un mapa de isoperíodos de suelo para la

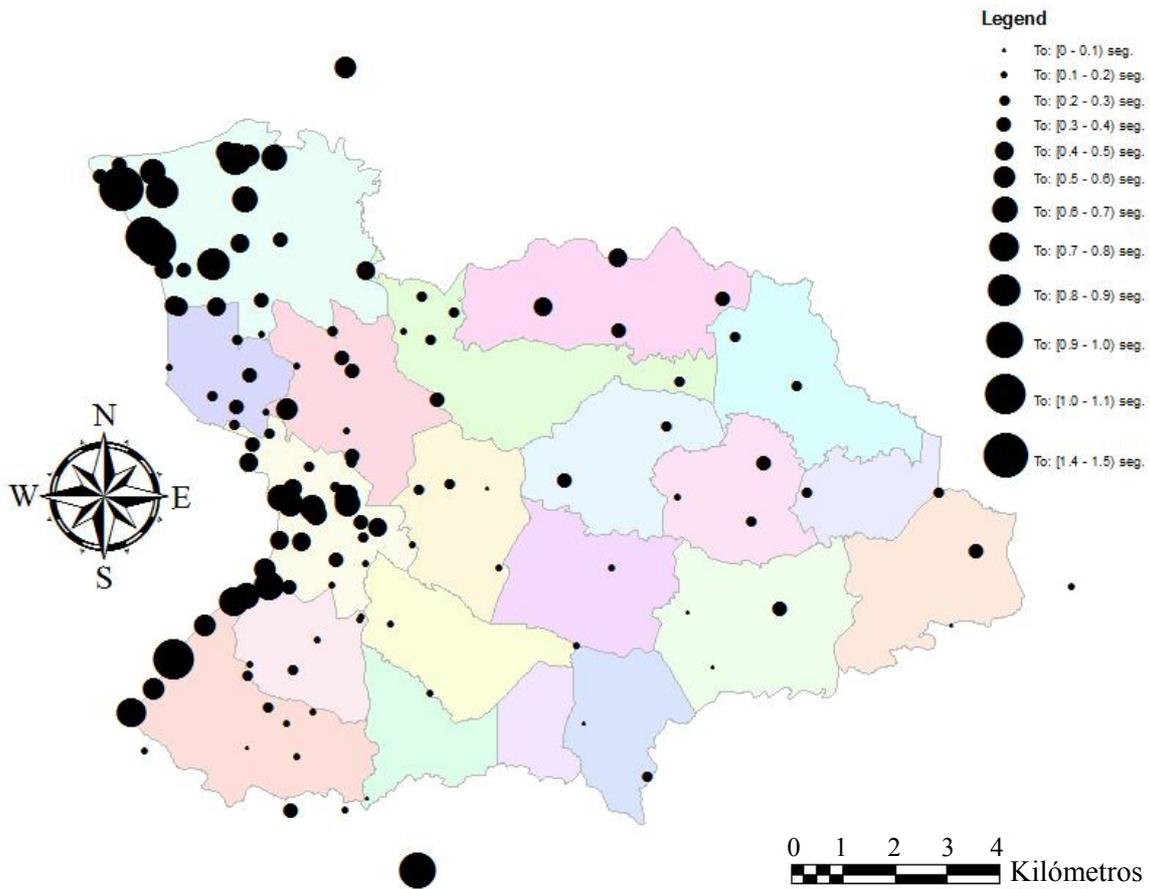


Figura 12: Mapa de periodos fundamentales de sitio de la Ciudad de Mayagüez.

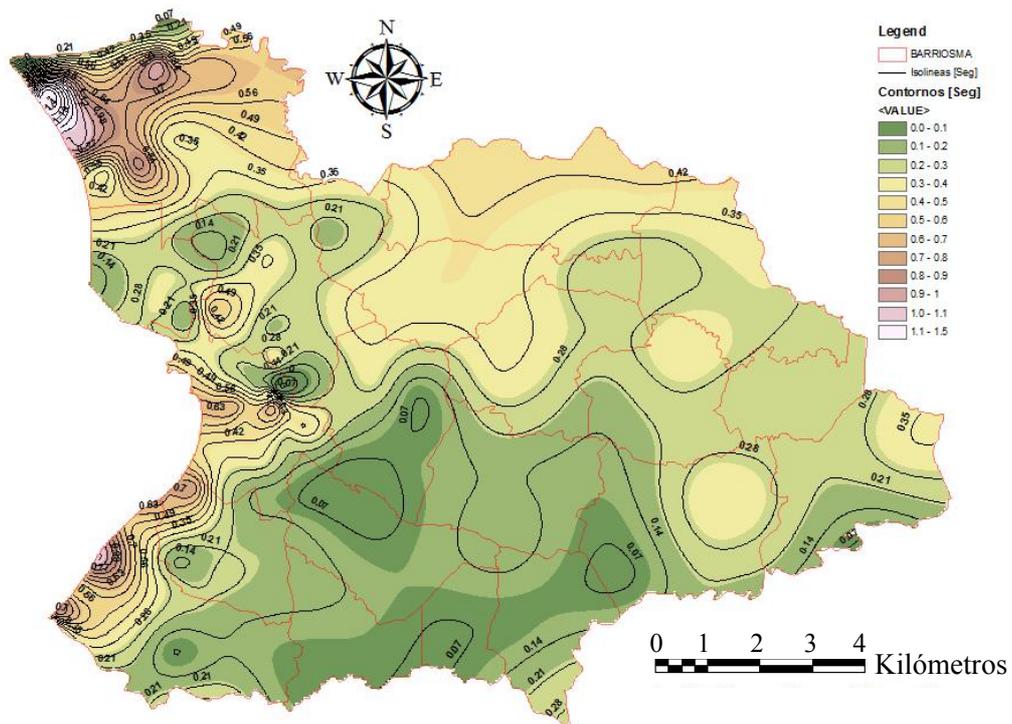


Figura 13: Mapa de isoperiodos fundamentales de sitio de la Ciudad de Mayagüez

Ciudad de Mayagüez. Para esto se utilizó como punto de partida la base geotécnica de datos confeccionada por Lugo (2007) en su tesis de maestría. Sobre esa base de datos se cargaron los 126 sitios en los cuales se logró determinar el periodo fundamental del suelo. Una vez que los sitios fueron ubicados geográficamente en el mapa, se decidió clasificarlos de acuerdo a su periodo fundamental, agrupando aquellos sitios cuyo periodo se encuentra dentro del intervalo semiabierto $[0 - 0,1)$ segundos, $[0,1 - 0,2)$ segundos y así sucesivamente. Una vez clasificados, se le asignó a cada grupo una etiqueta que consistió en un círculo de color negro cuyo tamaño indica el valor del periodo fundamental de sitio. El mapa resultante se muestra en la Figura 12. Posteriormente se decidió construir, con la ayuda del programa ArcMap, un mapa de isoperiodos de suelo para la Ciudad de Mayagüez (ver Figura 13), esto es, un mapa de isolíneas donde cada línea representa un valor constante para el periodo fundamental del suelo.

Se puede comprobar que existe una buena correlación entre las Figuras 12 y 13. Además, se observa que existe una zona de periodos altos en la región costera de Mayagüez (hacia el Oeste), lo que es característico de depósitos blandos. En la parte central y hacia el Este de la Ciudad, donde la topografía es montañosa, los periodos son más bajos.

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió la aplicabilidad de la técnica de los cocientes espectrales horizontal/vertical (H/V) a registros de microtemblores o vibración ambiental para la determinación del periodo fundamental de vibración de depósitos de suelo. Como caso de estudio se eligió la Ciudad de Mayagüez: se efectuaron mediciones en 134 sitios y se confeccionó un programa para realizar el procesado de las mediciones al cual se le incluyó un módulo para eliminar los transitorios registrados por el instrumento y conservar sólo la parte estacionaria de la vibración medida. Se analizó la estabilidad de la técnica del cociente espectral H/V y finalmente se construyó un mapa de isoperiodos de suelo para la ciudad de Mayagüez.

A partir de los resultados obtenidos se concluye que el uso de vibración ambiental es una excelente alternativa, que brinda muy buenos resultados, comparados con los obtenidos con otras técnicas. Además, cabe aclarar que el uso de vibración ambiental es una herramienta muy simple y económica, que se puede aplicar en cualquier momento y no requiere esperar, como con otras técnicas, la ocurrencia de un terremoto. Esto es una importante ventaja, sobre todo para aquellas regiones de baja sismicidad. Además, como se demostró, la técnica del cociente espectral H/V es estable con el tiempo. Esto quiere decir, que el periodo fundamental obtenido no depende del momento en el cual se tomó la medición.

Durante las mediciones realizadas se dispuso de tres tipos de instrumentos, dos acelerómetros ETNA, uno de 0,25 g y otro de 2,0 g y un sismómetro de banda ancha. Se escogieron ciertos sitios y se tomaron registros con más de un instrumento al mismo tiempo. Los resultados obtenidos permiten concluir que si bien los tres instrumentos son capaces de determinar el periodo fundamental en la mayoría de los sitios, es preferible utilizar instrumentos con mayor sensibilidad, ya que permiten detectar variaciones más pequeñas en la cantidad medida.

Luego de procesar las mediciones realizadas durante la primera campaña de mediciones se encontró que muchos sitios mostraban, además de la frecuencia fundamental, picos de alta frecuencia. Por esto se realizó una prueba que consistió en efectuar mediciones en dirección perpendicular, alejándose de una línea de transmisión de energía de alta tensión. El procesado de las mediciones no permitió obtener una idea clara de cómo las líneas de alta tensión afectan al instrumento. Sin embargo, y debido a que no se encontró otra posible causa que explique estos picos, es probable que las líneas de transmisión de energía afecten al instrumento.

Finalmente, luego de procesar todas las mediciones de vibración ambiental, se construyó, con ayuda del programa ArcMap 9.3, un mapa de isoperiodos de suelo para la ciudad de Mayagüez. Este mapa permite conocer el comportamiento dinámico del suelo que se presenta en Mayagüez a través de su periodo fundamental de vibración que es un parámetro muy útil a la hora del diseño sismo-resistente de nuevas estructuras. Esto puede ser utilizado en la etapa de diseño para reducir el riesgo sísmico frente a posibles futuros terremotos.

REFERENCIAS

- Alfaro, A., Caracterización dinámica de suelos mediante microtemblores HVSR y arreglos, *Universidad de La Salle*, ISBN: 978-958-9290-73-6, 2006.
- Al-Qaryouti, M. and Al-Tarazi, E.A., Local site effects estimated from ambient vibration measurements at Aqaba City, Jordan, *Journal of Earthquake Engineering*, 11(1):1-12, 2007.
- Apostolidis, P.I., Raptakis, D.G., Pandi, K.K., Manakou, M.V. and Pitilakis, K.D., Definition of subsoil structure and preliminary ground response in Aigion City (Greece) using microtremor and earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(10):922-940, 2006.
- Bour, M., Fouissac, D., Dominique P. and Martin, C., On the use of microtremor recordings in seismic microzonation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(7-8):465-474, 1998.
- Cano, L., On time-frequency analysis for structural damage detection, *PhD thesis, Civil Engineering Department, University of Puerto Rico, Mayagüez*, 2008.
- Chatelain, J.L., Guillier, B., Cara, F., Duval, A.M., Atakan, K. and Bard, P.Y., The WP02 SESAME team. Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6:33-74, 2008.
- Clinton, J.F., Cua, G., Huérfano, C.V., von Hillerbrandt-Andrade, C.G., and Martínez-Cruzado, J., The current state of seismic monitoring in Puerto Rico, *Seismological Research Letters*, 77(5), 12 p., 2006.
- Curet, A.F., Geologic Map of the Mayagüez and Rosario Quadrangles, Puerto Rico, Map I-1657, *US Geological Survey*, 1986.
- Duval, A.M., Bard, P.Y., Lebrun, B., Lacave-Lachet, C., Riepl, J. and Hatzfeld, D., H/V technique for site response analysis: synthesis of data from various surveys, *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 43(3-4):267-280, 2001.
- Fäh, D. and Suhadolc, P., Application of numerical wave propagation techniques to study local soil effects: The case of Benevento (Italy), *Pure and Applied Geophysics*, 143(4):513-536, 1994.
- Field, E. and Jacob, K., The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, 20(24):2925-2928, 1993.
- Field, E.H. and Jacob, K.H., A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(4):1127-1143, 1995.
- Gosar, A., Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw 5.6 and 2004 Mw 5.2 earthquakes, *Engineering Geology*, 91(2-4):178-193, 2007.
- Hasancebi, N. and Ulusay, R., Evaluation of site amplification and site period using different methods for an earthquake-prone settlement in Western Turkey, *Engineering Geology*, 87(1-2):85-104, 2006.
- Huang, H.C. and Teng, T.L., An evaluation on H/V ratio vs. spectral ratio for siteresponse estimation using the 1994 Northridge earthquake sequences, *Pure and Applied Geophysics*, 156(4):631-649, 1999.

- Huang, H.C., Characteristics of earthquake ground motions and the H/V of microtremors in the southwestern part of Taiwan, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(10):1815-1829, 2002.
- Kanai, K. and Tanaka, T., On microtremors. VIII, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 39:97-114, 1961.
- Konno, K. and Ohmachi, T., Ground-motion characteristics from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1):228-241, 1998.
- Lachet, C. and Bard, P.Y. Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *Journal of Physics of the Earth*, 42:377-397, 1994.
- Lermo, J. and Chávez-García, F.J., Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5):1350-1364, 1994.
- Lermo, J. and Chávez-García, F.J., Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(5):1574-1594, 1993.
- Lugo, C.Y., Development of a Geotechnical Database for the City of Mayaguez, Puerto Rico, *Master of Engineering thesis, Civil Engineering & Surveying Department, University of Puerto Rico at Mayagüez*, 2007.
- McCann, W.R., Historic earthquakes and the earthquake hazard of Puerto Rico, *Proceedings Workshop on Assessment of Geologic Hazards and Risk in PR*, May 14-16, USGS Open File Report, 87-008, 1987.
- McCann, W.R., Seismic hazard map for Puerto Rico, *Report to the Seismic Safety Commission of Puerto Rico*, 1993.
- Molnar, S. and Cassidy, J.F., A comparison of site response techniques using weakmotion earthquakes and microtremors, *Earthquake Spectra*, 22(1):169-188, 2006.
- Montejo, L.A. and Suarez, L.E., Wavelet based identification of site frequencies from earthquake records, *Journal of Earthquake Engineering*, 10(4):565-594, 2006.
- Moya, J.C., and McCann, W.R., Earthquake vulnerability study of the Mayagüez Area, Western Puerto Rico, Report presented to the "Comisión de Seguridad Contra Terremotos", 43p, 1992.
- Nakamura, Y., A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface, *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1):25-33, 1989.
- Nakamura, Y., Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, paper 2656, 2000.
- Nakamura, Y., On the H/V Spectrum, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.
- Nakamura, Y., Real time information systems for seismic hazards mitigation UrEDAS, HERAS and PIC, *Quarterly Report of RTRI*, 37(3):112-127, 1996.
- Nogoshi, M. and Igarashi, T., On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2), *Journal of Seismic Society of Japan*, 24:26-40, 1971.
- Ohsaki, Y., Japanese microzonation methods, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 49:161-182, 1972.
- Pando, M., Cano, L., Suárez, L.E., Ritta, R. and Montejo, L.A., Comparison of site fundamental period estimates using weak-motion earthquakes and microtremors. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.

- Panou, A.A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P., Stylianidis, K. and Papazachos, C.B., Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment: the case of the city of Thessaloniki (Northern Greece), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(4):261-274, 2005.
- Panou, A.A., Theodulidis, N.P., Hatzidimitriou, P.M., Savvaidis, A.S. and Papazachos, C.B., Reliability of ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in urban environments: the case of Thessaloniki City (Northern Greece), *Pure and Applied Geophysics*, 162(5):891-912, 2005.
- Parolai, S., Richwalski, S.M., Milkereit, C. and Bormann, P., Assessment of the stability of H/V spectral ratios from ambient noise and comparison with earthquake data in the Cologne area (Germany), *Tectonophysics*, 390(1-4):57-73, 2004.
- Prentice, C.S., Mann, P., and Burr, G., Prehistoric Earthquakes Associated with a Late Quaternary Fault in the Lajas Valley, Southwestern Puerto Rico, *Transactions of the American Geophysical Union* 81, F 1182 (abstract), 2000.
- Prentice, C.S., and Mann, P., Paleoseismic study of the South Lajas Fault: First documentation of an onshore holocene fault in Puerto Rico, Geological Society of America Special Paper 385:215-222, 2005.
- Reid, H.F. and Taber, S., The Puerto Rico Earthquakes of October – November, 1918, *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 9:95-127, 1919.
- SESAME. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, *Research Report WP12*, available online at: <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>, 2004.
- Shimizu, P. and Suehiro, S., Report of survey in Nakamura Town, *Interim Report on Nankaido Earthquake, Central Meteorological Observatory*, 1947.
- Sykes, L., McCann, W.R., and Kafka, A., Motion of Caribbean Plate during last seven million years and implications for earlier Cenozoic movements, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87, pp. 10656-10676, 1982.
- Strollo, A., Bindi, D., Parolai, S. and Jäckel, K.H., On the suitability of 1s geophone for ambient noise measurements in the 0.1-20 Hz frequency range: experimental outcomes, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6:141-147, 2008.
- Theodulidis, N., Cultrera, G., De Rubeis, V., Cara, F., Panou, A., Pagani, M. and Teves-Costa, P., Correlation between damage distribution and ambient noise H/V spectral ratio: the SESAME Project results, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6:109-140, 2008.
- Tuttle, M.P., Dyer-Williams, K., Schweig, E.S., Prentice, C., Moya J.C. and Tucker, K.B., Liquefaction induced by historic and prehistoric earthquakes in western Puerto Rico, *Seismological Research Letters*, 2003.
- Volant, Ph., Orbovic, N. and Dunand, F., Seismic evaluation of existing nuclear facility using ambient vibration test to characterize dynamic behavior of the structure and microtremor measurements to characterize the soil: a case study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9-12):1159-1167, 2002.
- Yokoi, T., Kuwabara, T. and Horiuchi, T., Studies of soil conditions and earthquakes damage in Nagoya, Part 2, *Proceedings of the Architectural Institute of Japan*, 1965.