

HACIA UNA MEJOR COMPREENSIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DEL VALLE DE MÉXICO

HUGO CRUZ, JOSÉ A. MARTÍNEZ, ADRIÁN RUELAS,
MARIO A. ORTEGA, SUNYOUNG PARK, JAVIER
LERMO Y FRANCISCO J. SÁNCHEZ SESMA

Existen numerosos estudios destinados a entender la respuesta sísmica del valle de la Ciudad de México; sin embargo, se requiere reforzar nuestro escrutinio para comprender con detalle las grandes diferencias en las amplificaciones de sitio, las duraciones y las características espectrales entre las diferentes estaciones sísmicas. En esta investigación se analizaron los registros de aceleración de seis temblores producidos por mecanismos de extensión de esfuerzos (fallamiento normal, en geología) ocurridos a profundidad intermedia. Se explicaron las características de los espectros de Fourier en varios sitios dentro de la cuenca, para ello, se utilizaron tres técnicas: EHVSr, SSR y la MHVSr.

En la primera técnica se compararon los cocientes espectrales H/V para sismos (EHVSr por sus siglas en inglés) en varios sitios considerando los trenes de ondas Primarias (P) y de ondas Secundarias (S), con el cociente espectral por

componentes, tomando como referencia los registros en la estación CU que se ubica en una zona de terreno firme. Este cociente (llamado Cociente Espectral Estándar o SSR, por sus siglas en inglés) tradicionalmente se considera como función de transferencia empírica. Como referencia, también se calcularon los cocientes espectrales H/V utilizando vibraciones ambientales (microtemblores) (MHVSr, por sus siglas en inglés) en ocho estaciones. Los resultados de las tres técnicas (EHVSr, SSR y MHVSr) muestran la complejidad de la respuesta sísmica de la cuenca del Valle de México. Además, con el fin de acotar los valores de las velocidades de propagación identificadas en estratos someros se recurrió al estudio de las polarizaciones del movimiento asociado a las ondas P, las cuales se presentan al inicio de los sismogramas pues se ha demostrado que están relacionados.

En este trabajo se tomaron en cuenta los registros obtenidos en las estaciones de la red acelerométrica del Valle de México (CIRES) que produjeron seis sismos de fallamiento normal de profundidad intermedia. Los sismos tuvieron magnitudes M_w entre 5.4 y 7.1, ocurrieron en profundidades entre 45 y 61 km, localizados a distancias epicentrales entre 120 (sismo de 2017) y 185 km (sismo de 2011) de la cuenca. En la figura 1a se muestran las localizaciones de los seis sismos y las estaciones del Valle de México.

En esta investigación, también se tomaron mediciones de vibraciones ambientales en ocho estaciones: AU11, CJ03, DX37, JA43, LI33, LV17, MY19 y TP13 (ver Fig. 1b).

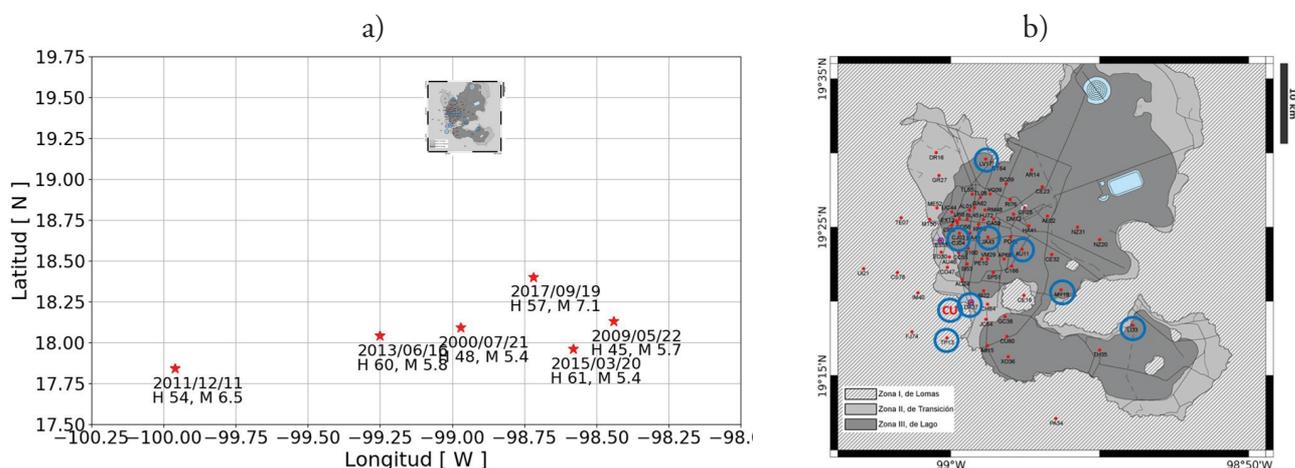


Figura 1. a) Epicentros (estrellas rojas) de los seis sismos de fallamiento normal considerados en este estudio. Se muestran las fechas de origen, la profundidad (H) y magnitud (M) de cada evento. b) Localización de las estaciones de la red acelerométrica del Valle de México (CIRES). Las estaciones CU (referencia) y las ocho estaciones donde se tomaron mediciones de vibraciones ambientales se encierran en los círculos azules.

Se calcularon espectros y cocientes para varias estaciones considerando los registros de los seis sismos. Se observaron diversos comportamientos entre EHVSR y MHVSR (de sismos y vibraciones ambientales, respectivamente) y las funciones de transferencia empírica (SSR). Se seleccionó la estación MY19 ubicada en la zona de lago al norte de la sierra de Sta. Catarina (ver Fig. 1b) para ilustrar esta variabilidad. Para nuestro análisis escogimos una ventana de 100s a partir del arribo de la onda Primaria (P).

En la figura 2 se presenta un ejemplo de los acelerogramas de los seis sismos para la estación MY19 y se muestran los componentes en las direcciones Radial (R), Vertical (V) y Transversal (T). En la figura 3a se muestran los espectros de Fourier correspondientes para cada sismo y componente (Radial, Vertical y Transversal). Los espectros o transformadas de Fourier indican la manera en que una señal arbitraria puede descomponerse en señales armónicas sencillas. Son una herramienta indispensable en la ciencia y la ingeniería.

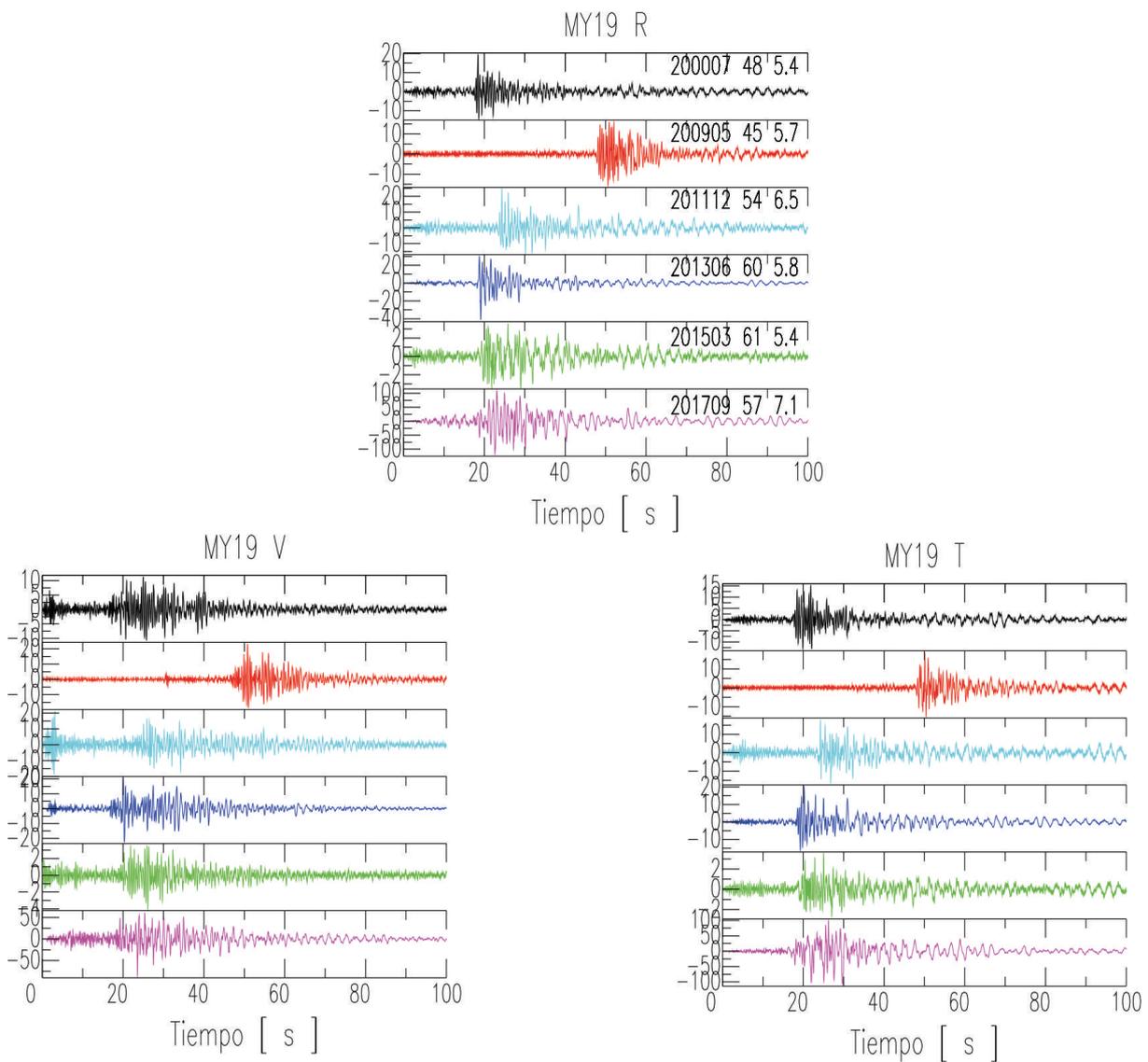


Figura 2. Acelerogramas registrados en la estación MY19 de los seis sismos (Fig. 1a). Se presentan los tres componentes: Radial (R), Vertical (V) y Transversal (T). Los números en los acelerogramas radiales indican el año y mes del sismo, así como la profundidad y magnitud.

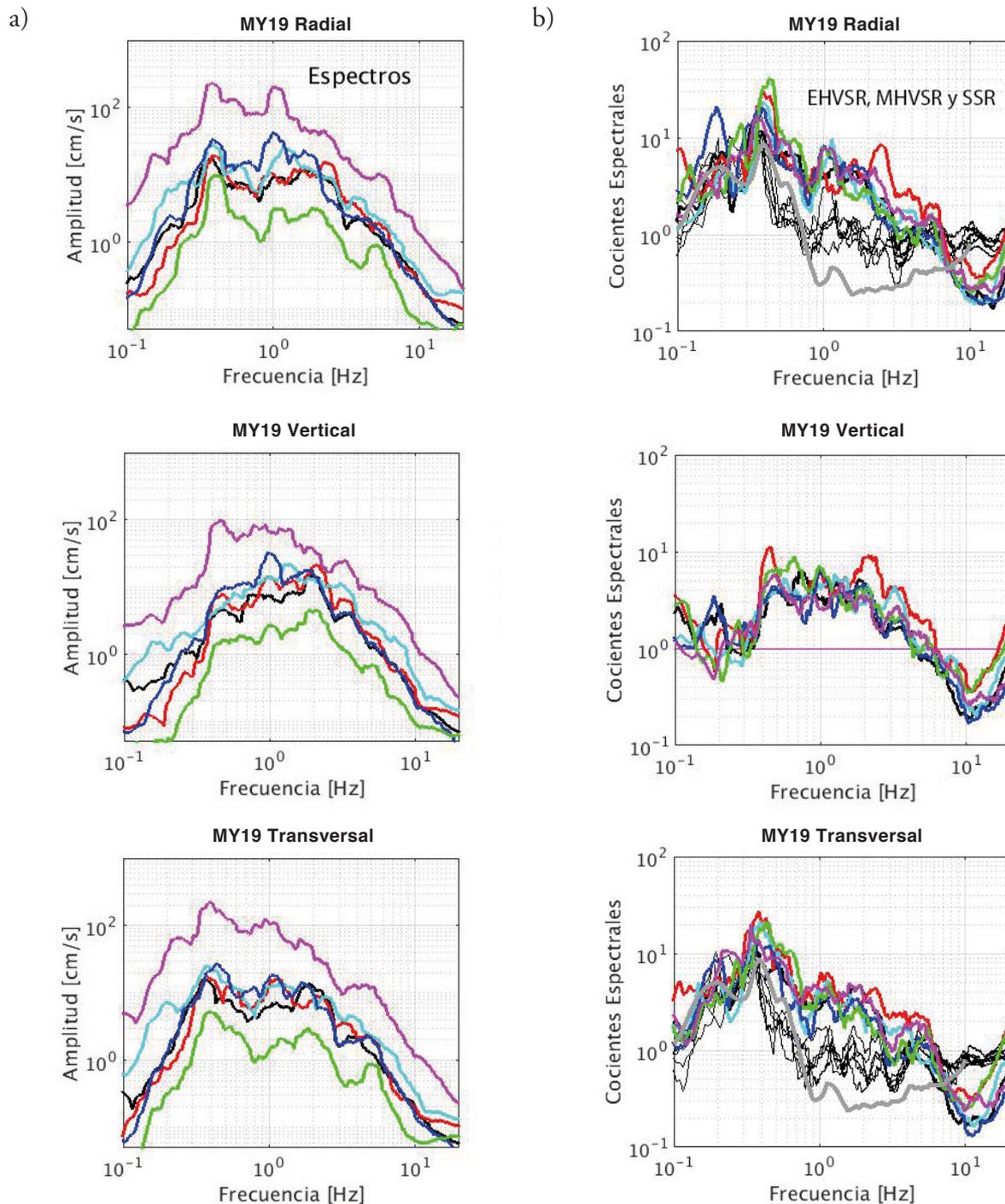


Figura 3. a) Espectros de Fourier de los tres componentes de los acelerogramas de la estación MY19 (ver Fig. 2). b) Cocientes espectrales EHVSR (líneas negras) y MHVSR (línea gris) de los componentes Radial/Vertical (primer renglón) y Transversal/Vertical (tercer renglón). Los cocientes espectrales respecto a CU (SSR) para los tres componentes se dan con los colores usados para cada sismo.

Las diferencias en las amplitudes espectrales están relacionadas con las magnitudes de los sismos. Las irregularidades pueden denotar efectos de fuente, de trayecto y de sitio. Los espectros de los seis sismos dan tres niveles espectrales. Los correspondientes al movimiento vertical parecen ser más uniformes.

A continuación, se observan tanto los cocientes espectrales de tipo H/V (para sismos y vibraciones ambientales) como las funciones de transferencia empíricas. Estas funciones permiten relacionar la entrada y la salida de un sistema lineal en los términos de sus espectros de Fourier. De manera empírica se obtienen a partir de los cocientes de los espectros de movimiento en suelo relativos a los correspondientes movimientos en terreno firme, aceptando que los efectos de sitio en suelo firme son despreciables.

En la figura 3b aparecen con trazas negras los cocientes EHVS (Nakamura, 1989) Radial/Vertical (primer renglón) y Transversal/Vertical (tercer renglón) de los registros de los seis sismos. Los cocientes de vibraciones ambientales, MHVS (línea gris) se calculan con base en las densidades espectrales direccionales (DED, Sánchez Sesma *et al.*, 2011). Además, se muestran los cocientes espectrales respecto a CU (SSR) para los tres componentes y se indican con los mismos colores que aparecen en los acelerogramas de la figura 2.

Los cocientes espectrales (Fig. 3b) y las SSR son muy similares a frecuencias menores a ~ 0.8 Hz aunque las SSR presentan amplitudes mayores. Para frecuencias mayores se aprecian diferencias significativas de los cocientes espectrales para sismos y vibraciones ambientales. En las vibraciones ambientales prácticamente se cancelan los modos superiores (lo que hace pensar en un claro efecto tridimensional), en cambio, los de sismos muestran débilmente la emergencia de modos superiores. Por otra parte, las SSR muestran modos superiores con grandes amplitudes y anchos espectrales significativos. Las amplitudes obtenidas para vibraciones ambientales con las DED son menores pues no son funciones de transferencia. El comportamiento es similar para ambos componentes horizontales. En la figura 3b (renglón central) se muestran los SSR entre los componentes verticales de MY19 con respecto a sus contrapartes de CU para los seis sismos. Se aprecia un aumento casi constante de amplitud entre 0.5 y 2.0 Hz con valores que exceden de 5.0. Este cociente podría usarse para corregir los valores de H/V de vibraciones ambientales de manera semejante a la propuesta de Kawase *et al.* (2018).

Las grandes variaciones en SSR sugieren diversos fenómenos asociados a la irregularidad lateral del subsuelo ya detectadas en los acelerogramas. Al parecer, las ondas superficiales debidas a estratos inclinados, aun con valores tan pequeños como un grado, se generan prácticamente de manera continua en función del espesor. Las ondas superficiales generadas localmente surgen al inicio del tren de la onda cortante o secundaria (S), aunque también podrían estar presentes en la parte de ondas primarias (P). Estas ondas superficiales parecen ser el efecto de una heterogeneidad lateral generalizada, incluso en las partes más planas, en las que se encuentran las estaciones de registro. El modelo clásico de respuesta sísmica 1D sólo se puede reproducir (tanto en amplitud como en las frecuencias resonantes) en muy pocas estaciones, mientras que en otras se deben invocar efectos 3D del subsuelo (tanto por enfocamiento como por el arribo de ondas superficiales). La semejanza de EHVS con MHVS sugiere, al menos en frecuencias menores a ~ 0.8 Hz, que existe un arribo multidireccional de ondas superficiales casi uniforme.

Conclusiones

Nadie pudo imaginar que así como el fantasma de Canterville, de Oscar Wilde, fue maltratado por los gemelos Otis un 19 de septiembre, en esa misma fecha la Ciudad de México también fue maltratada por dos sismos destructivos. Seguirán ocurriendo más sismos que afectarán el valle de la Ciudad de México, y para lograr una mejor comprensión de su respuesta sísmica, en este estudio analizamos los registros de terremotos de fallas normales de profundidad intermedia. Exploramos estos sismos pues las ondas incidentes parecen tener una escasa participación de ondas superficiales regionales. Encontramos una importante generación local de ondas superficiales. Comparamos las relaciones espectrales H/V de sismos (EHVS) con la relación espectral estándar (SSR) con respecto a la CU, que tradicionalmente se considera como un sitio de referencia. También calculamos las relaciones espectrales H/V a partir del ruido ambiental sísmico (microtemblores) en ocho estaciones (MHVS). Los resultados muestran que las diferencias significativas entre los enfoques H/V y SSR son el efecto de heterogeneidad lateral generalizada.

También investigamos las polarizaciones de ondas de cuerpo con el fin de establecer restricciones independientes en la estructura cercana a la superficie, proporcionando información sobre la presencia de heterogeneidad lateral. |

Referencias

1. Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of the Railway Tech. Res. Inst.*, 30:1, 25-33.
2. Sánchez Sesma, F.; Rodríguez, M.; Iturrarán Viveros, U.; Luzón, F.; Campillo, M.; Margerin, L.; García Jerez, A.; Suarez, M.; Santoyo, M. y Rodríguez Castellanos, A. (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophys. J. Int.* 186, 221-225.
3. Kawase, H.; Nagashima, F.; Nakano, K. y Mori Y. (2018). Direct evaluation of S-wave amplification factors from microtremor H/V ratios: Double empirical corrections to “Nakamura” method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.