

Variaciones de las frecuencias naturales de suelos en un eje Este-Oeste del Gran Mendoza, Argentina.

Emilce G. Giolo^a, Francisco Calderón^a, Alfredo Cueto^a, Sebastián Vía^a, Fabián Luján^a y Carlos Frau^a

^a Investigadores, CEREDETEC – Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Facultad Mendoza – Argentina.

emilce.giolo@frm.utn.edu.ar

Resumen

La identificación de fuentes potenciales de la actividad sísmica es de gran importancia para la evaluación de la peligrosidad sísmica. Las vibraciones ambientales son inducidas en las masas de suelo y son provocadas por fuentes naturales; a través de ellas es posible determinar la frecuencia natural de un sitio. La determinación de las frecuencias naturales se realiza mediante la técnica conocida como relación espectral H/V a partir de registros de aceleración correspondientes a vibraciones ambientales. Por otro lado, fuertes variaciones de la frecuencia natural en cortas distancias pueden estar revelando la presencia de ciertas estructuras geológicas subyacentes. Así, esta técnica, sencilla y económica, sirve como primer paso para la posible identificación de fuentes potenciales de la actividad sísmica. En el presente trabajo se presentan las frecuencias naturales de suelo para un perfil con eje Este-Oeste que atraviesa el Gran Mendoza. En él se analiza la variación de las frecuencias naturales en paralelo con el perfil topográfico. Los resultados obtenidos son contrastados con los obtenidos en estudios previos sobre una falla geológica conocida. Se concluye que existen algunas variaciones que motivan a realizar estudios más específicos para constatar o descartar la presencia de fuentes ciegas de actividad sísmica.

Palabras Clave: Frecuencias naturales, Peligrosidad Sísmica, Fuentes de Actividad Sísmica.

1 Introducción

El Centro Oeste Argentino posee importantes fuentes potenciales de actividad sísmica: el área urbana conocida como Gran Mendoza se encuentra enclavada en la zona de mayor peligrosidad sísmica del territorio argentino. Un parámetro importante para evaluar la sismicidad del lugar es la geología local, debido a su influencia en el tipo de respuesta de sitio. Los daños causados por terremotos recientes demuestran la importancia que tiene el estudio de los efectos de sitio, ya que los daños en las construcciones suelen relacionarse con amplificaciones de las ondas sísmicas según las condiciones geológicas presentes en el lugar. En terrenos blandos, los efectos de sitio producen graves daños debido a la amplificación de las ondas sísmicas en estructuras de periodo largo, por esta razón resulta importante evaluar el comportamiento de los suelos donde se conocen ciertas características geotécnicas, tal es el caso de suelos de distintas zonas de Guaymallén y del Este mendocino que presentan napas freáticas superficiales. La respuesta sísmica local de un sitio hace referencia a la influencia de una masa relativamente superficial sobre las ondas de cuerpo viajando en sentido vertical. En virtud de esto, han sido utilizados distintos esquemas de clasificación para representar las condiciones locales de cada sitio. Entre las más relevantes se encuentran: a) datos geotécnicos (Seed and Idriss, 1982; Rodríguez-Marek et al., 2001); b) geología de superficie (Stewart et al., 2003) y c) la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 m de profundidad (Borcherdt, 1994; Dobry et al., 2000). En los reglamentos antiguos, la influencia del suelo se relaciona con la capacidad portante del mismo para el diseño de las fundaciones. Sin embargo, distintas investigaciones han demostrado que la respuesta sísmica de una estructura se relaciona con una masa más importante de suelo y no con un parámetro geotécnico de un estrato determinado. De los tres tipos de clasificación citados, el de la velocidad de la onda de corte promedio en los primeros 30 metros superiores del terreno (V_{s30}) es el parámetro más utilizado en la

mayoría de los códigos de diseño sísmico (ASCE/SEI 7-10, 2010), pero este método, en ciertas ocasiones, no permite obtener resultados satisfactorios (Pitilakis, K., 2004), y su uso para caracterizar sitios ha sido cuestionado (Pitilakis, K. et al, 2013). Por lo tanto, resulta de interés utilizar procedimientos alternativos que permitan la caracterización del sitio, obteniendo parámetros de clasificación de forma confiable y con un bajo costo.

En cuanto a las estructuras geológicas subyacentes, los métodos geofísicos han demostrado ser una poderosa y exitosa herramienta para los estudios en paleo sismología y han sido utilizados de tres maneras distintas: 1) como una técnica de reconocimiento para dilucidar la estratigrafía del subsuelo y la estructura de una zona de falla, en orden de optimizar y localizar los sitios para el desarrollo de trincheras o perforaciones; 2) para definir fallas que se expresan a profundidades mayores de las que pueden alcanzar una trinchera o perforación, y 3) para detectar fallas ocultas que no tengan ningún tipo de expresión superficial (McCalping, 2009). Diversos autores mencionan el uso de la técnica del cociente espectral H/V como un método alternativo para la identificación de fallas ciegas, sugiriendo estudios geofísicos complementarios para corroborar los resultados (Giolo, E. et al. 2018, 2019).

En este trabajo se presentan las frecuencias naturales de suelo para un perfil con eje Este-Oeste que atraviesa un sector de la zona urbana del Gran Mendoza. En él se analiza la variación de las frecuencias naturales en paralelo con el perfil topográfico en dicha zona. Los resultados obtenidos son contrastados con los obtenidos en estudios previos sobre una falla geológica conocida.

2 Marco teórico

2.1 Efectos de Sitio

La experiencia de terremotos pasados ha mostrado en repetidas oportunidades que la intensidad del movimiento del suelo y el daño que producen están fuertemente influenciados por las condiciones locales de cada sitio. Ante un mismo terremoto, sitios cercanos entre sí pueden presentar respuestas muy diferentes en función de las condiciones particulares. Posibles efectos de sitio, efecto de cuenca o variaciones de la topografía superficial conducen a una variación en la respuesta del sitio. Así, el término efecto de sitio representa los efectos en la respuesta local del suelo. Esto es la influencia de los materiales de las capas superficiales sobre la propagación vertical de las ondas de cuerpo. El término efecto de cuenca hace referencia a la influencia de una cuenca sedimentaria bi-dimensional o tri-dimensional sobre el movimiento del suelo debido a la reflexión de las ondas de cuerpo en los límites de la cuenca y la generación de ondas de superficie. Los accidentes topográficos pueden generar amplificaciones del movimiento debido a la presencia de escarpes o en la parte superior de taludes; ciertas circunstancias pueden provocar una de-amplificación como es el caso del pie de taludes (Kramer 1996, Kramer y Stewart 2004).

2.2 Frecuencia natural de un sitio

Existe una relación teórica entre la velocidad de la onda de corte V_s y el periodo o frecuencia del suelo f , donde V_s representa en cierta medida la rigidez de los estratos que atraviesa, por lo que suelos más rígidos tendrán velocidades mayores que suelos menos rígidos. Adicionalmente la profundidad (H) del estrato nos da una idea de la masa involucrada por lo que esta relación es:

$$f = \frac{V_s}{4H} \quad (1)$$

En los últimos años, el método HVSR (horizontal to vertical ratio spectra) también conocido como método de Nakamura o QTS (Quasi Transfer Spectrum) ha sido uno de los procedimientos más utilizados para determinar la frecuencia natural de suelos y amplificación sísmica (Nakamura 1989, Nakamura 2000, Nakamura 2008). Esto es debido a que el procedimiento es expeditivo y de bajo costo computacional. Existen nuevas clasificaciones de sitios basadas en el uso del período natural del depósito de suelo (Japan Road Association 1990, Hassani y Atkinson 2016. Otros métodos para la determinación de efecto de sitios se pueden encontrar en Calderón et al. (2017).

2.3 Identificación de fallas aplicando la técnica del cociente espectral H/V

La técnica del cociente espectral H/V aplicado a vibraciones ambientales puede permitir identificar o sospechar la presencia de estructuras sin expresión morfológica o indicios geológicos en superficie. Esta información de obtención expeditiva puede ayudar a direccionar estudios confirmatorios más específicos en superficie o en subsuelo. La misma se basa en el concepto de función de transferencia entre componentes vibratorias de movimientos horizontales y verticales (Giolo, E. et al. 2019). Esta técnica es ampliamente utilizada como método para la determinación de efectos de sitio en la ingeniería sísmica (Calderón, et al. 2017). La aplicación de este método se ha utilizado con éxito en la ciudad de Boumerdes en Argelia (Hellel et al. 2012) para la detección de una falla ciega, donde los resultados han sido corroborados con perforaciones y mediciones de velocidad de onda de corte. Gosar y Lenart (2010) utilizaron las vibraciones ambientales para estimar el espesor de sedimentos en Ljubljana, Eslovenia y compararon los resultados con un perfil realizado con refracción sísmica, obteniendo una buena correlación.

2.4 Metodología del cociente espectral H/V

El método del cociente espectral H/V consiste en la utilización de un registro de microtemores para la determinación de efectos de sitio a través de la frecuencia natural y mediante la realización de un cociente entre los espectros de Fourier de las componentes horizontales y verticales en el sitio estudiado. El método plantea las siguientes hipótesis. El efecto de la fuente se minimiza al realizar la división entre las amplitudes del espectro de vibraciones ambientales horizontales sobre las verticales. Se estima que los microtemores contienen predominantemente ondas S, por lo que la relación espectral H/V es igual a la función de transferencia de dichas ondas entre la superficie y la base de la capa sedimentaria; así, el pico del espectro resultante es el correspondiente a la frecuencia fundamental del sitio. De esta manera, la excitación de la capa superficial provoca la amplificación del efecto de sitio producto de las ondas S. Por otro lado, las ondas Rayleigh que se propagan en las capas sedimentarias sobre lechos rocosos provocan el mismo efecto en las componentes horizontales y verticales del movimiento en la superficie. La metodología propuesta por Nakamura trata de eliminar el efecto que producen las ondas Rayleigh, de esa manera la función de transferencia queda determinada por ondas de cuerpo S. Simplificadamente se plantea un modelo, Fig. 1, donde un suelo sedimentario está apoyado sobre un estrato rocoso donde la principal diferencia entre estos estratos es la velocidad de la onda S, lo cual implica que los movimientos se amplifican por el principio de conservación de la energía.

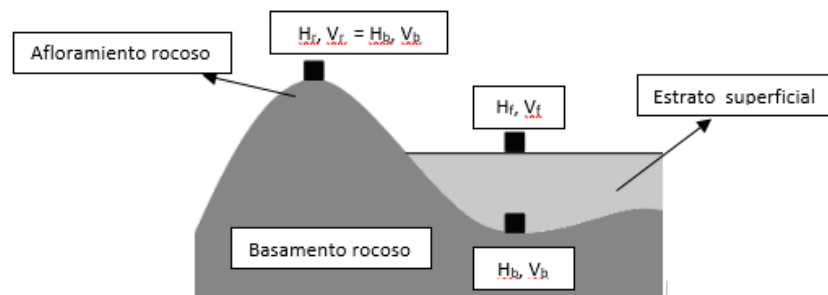


Fig. 1. Estructura de un basamento sedimentario para el planteo del modelo simplificado.

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 $V_r(\omega)$ (Figura 1). Esto puede considerarse como una aproximación ya que, si bien los picos entre estos valores coinciden, las magnitudes no. Si se tienen los espectros de amplitud en la capa rocosa, es decir H_b y V_b , se podrían realizar los cocientes entre las componentes horizontales y verticales entre el estrato superficial y el basamento rocoso, obteniendo funciones de transferencia (ecuación 2) $T_h(\omega)$ y $T_v(\omega)$ que permitirían eliminar el efecto de la fuente y obtener las frecuencias naturales de los suelos, si el valor de $T_v(\omega)$ es cercano a 1, entonces el efecto de las ondas Rayleigh es cercano a cero.

$$T_v(\omega) = \frac{V_f(\omega)}{V_b(\omega)} \quad T_h(\omega) = \frac{H_f(\omega)}{H_b(\omega)} \quad (2)$$

En muchas ocasiones es difícil poseer los valores de las componentes de movimiento en el basamento rocoso H_b y V_b , por lo que Nakamura propone la utilización de una función de frecuencia modificada $T_m(\omega)$, la cual relaciona las funciones de transferencia $T_h(\omega)$ y $T_v(\omega)$:

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

Si se considera que para un amplio rango de frecuencias, donde existe un sustrato firme, la relación entre $H_b(\omega)$ y $V_b(\omega)$ es aproximadamente igual a uno, entonces el cociente será:

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

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, es decir el cociente H/V , presenta un pico en concordancia con la frecuencia fundamental del depósito de suelo ω asociada a las vibraciones horizontales (Ritta R. et. al, 2012).

3 Mediciones y descripción del perfil estudiado

3.1 Instrumentos de medición

Los instrumentos utilizados para la medición de microtemores son sensores de velocidad o aceleración. En este trabajo se utilizaron acelerómetros modelo Basalt de Kinematics. Posee un sensor triaxial interno (Epi Sensor Force Balance) por lo que son capaces de registrar en tres componentes (dos horizontales perpendiculares entre sí y la otra vertical), además cuenta con un GPS que permite obtener la posición del sitio donde se efectuó la medición y la sincronización horaria. El sensor permite configurar el rango de aceleraciones y la frecuencia de muestreo entre 1 y 200 Hz. El sensor tiene un amortiguamiento del 70% y la frecuencia natural es de 200 Hz. Además, este equipo tiene incorporado un digitalizador de 24 bits. Complementando el acelerómetro, se dispuso de una batería de 12 Volt y una computadora personal.

3.2 Mediciones

Actualmente no existe un acuerdo generalizado sobre la metodología para la toma de datos, el procesamiento de los mismos y la interpretación de los resultados obtenidos. Estudios realizados en los últimos años destacan la importancia de la influencia de una interface entre el equipo de medición y el suelo en la fiabilidad de los resultados obtenidos; así las condiciones climáticas, estructuras cercanas, ruido transitorio o una incorrecta operación de los equipos repercute en los resultados, por lo que es necesario controlar frecuentemente los equipos con datos certeros de zonas ya conocidas (Chatelain et al 2007, Borchardt 1994). En nuestro estudio se siguieron las directrices dada por el manual del proyecto SESAME (2004). Las mediciones se realizaron en horarios donde la influencia del ruido transitorio fuera bajo, utilizando una razón de muestreo de 200 Hz y la duración de cada registro fue de 10 minutos. El tiempo de duración de cada medición fue de aproximadamente 40 minutos para poder obtener entre dos y tres registros completos. No se utilizó interface entre el instrumento y el suelo colocándolo preferiblemente sobre suelo consolidado, solados o pavimentos de hormigón o asfalto.

3.3 Zona de estudio

Para este estudio se analizó un perfil en dirección Oeste-Este, el cual atraviesa el sector norte de la Ciudad de Mendoza hasta llegar a la zona de la localidad de Los Corralitos, en el departamento de Guaymallén (Fig. 2). Dicho perfil comienza en el punto denominado P1, sobre el pedemonte mendocino, cuyas coordenadas aproximadas son: 32° 53' 32" de latitud Sur de y 68° 55' 17" de longitud Oeste;

finalizando en el punto designado como P14, en el Distrito Los Corralitos, con coordenadas $32^{\circ} 54' 11''$ de latitud Sur y $68^{\circ} 41' 52''$ de longitud Oeste. En la zona estudiada, las pendientes del terreno, van disminuyendo desde la zona pedemontana, en el Oeste, hasta el punto final de estudio en el Este (Fig. 3).



Fig. 2. Perfil Oeste-Este estudiado.

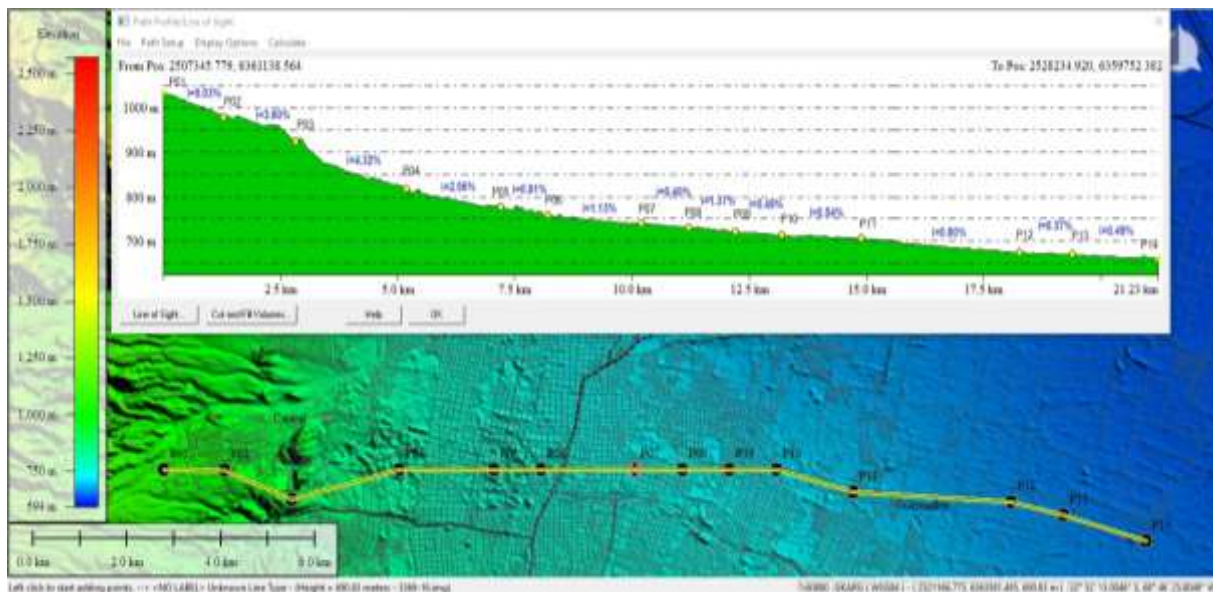


Fig. 3. Pendientes del perfil Oeste-Este estudiado.

3.4 Litología del lugar y unidades estructurales

El margen este de los Andes entre los 30° y 33° S, al sur del segmento de subducción subhorizontal de la placa de Nazca es una de las zonas históricamente más activas del mundo (Costa et al. 2006, Moreiras et al. 2014). En el perfil estudiado, las unidades litológicas (Fig. 4), se encuentran representadas por rocas sedimentarias. Se han identificado ocho unidades estratigráficas pre cuaternarias, que van desde sedimentitas cámbricas ordovícicas química-clásticas hasta sedimentos conglomerádicos de la Formación Mogotes.

Las unidades 1, 2 y 3 responden al basamento de la zona de estudio (Rocas duras o bien consolidadas), estas unidades se extienden a la Precordillera, Cordillera Frontal, Cerrillada Pedemontana y Bloques de San Rafael, es decir, se encuentran en zonas elevadas, con escasos afloramientos en las llanuras; mientras que las unidades 4, 5, 6, 7 y 8 responden a la cubierta sedimentaria poco consolidada (Carta de Peligrosidad Geológica 3369-II MENDOZA, 2022). En la zona de estudio, el frente orogénico presenta

un intenso neotectonismo que se evidencia por un importante fallamiento de las unidades cuaternarias nombradas, lo que indica que la actividad sísmica tuvo lugar en la región durante este período. Estructuralmente, el frente orogénico activo está compuesto por una serie de fallas inversas con orientación meridional e inclinación tanto al este como al oeste, interceptado por fallamientos transversales que desplazan las estructuras principales. La mayor parte de estas fallas poseen registro de actividad holocénica, es decir dentro de los últimos 10.000 años, afectando a unidades cuaternarias. De acuerdo con lo expuesto, en la zona de estudio se identificaron las estructuras con evidencias de actividad cuaternaria en el piedemonte mendocino, en este sector se presentan fallas compresivas conocidas, como la falla del Cerro La Cal, Sistema de fallas Cerro de la Gloria y Cerro del Cristo, y falla de Las Avispas. En la Figura 4 se observa que el perfil estudiado, atraviesa dicho sistema de fallamiento en el pedemonte mendocino, además se puede ver que atraviesa fallas inferidas del tipo compresivas, denominada como falla Cacique Guaymallén (Fig. 4).

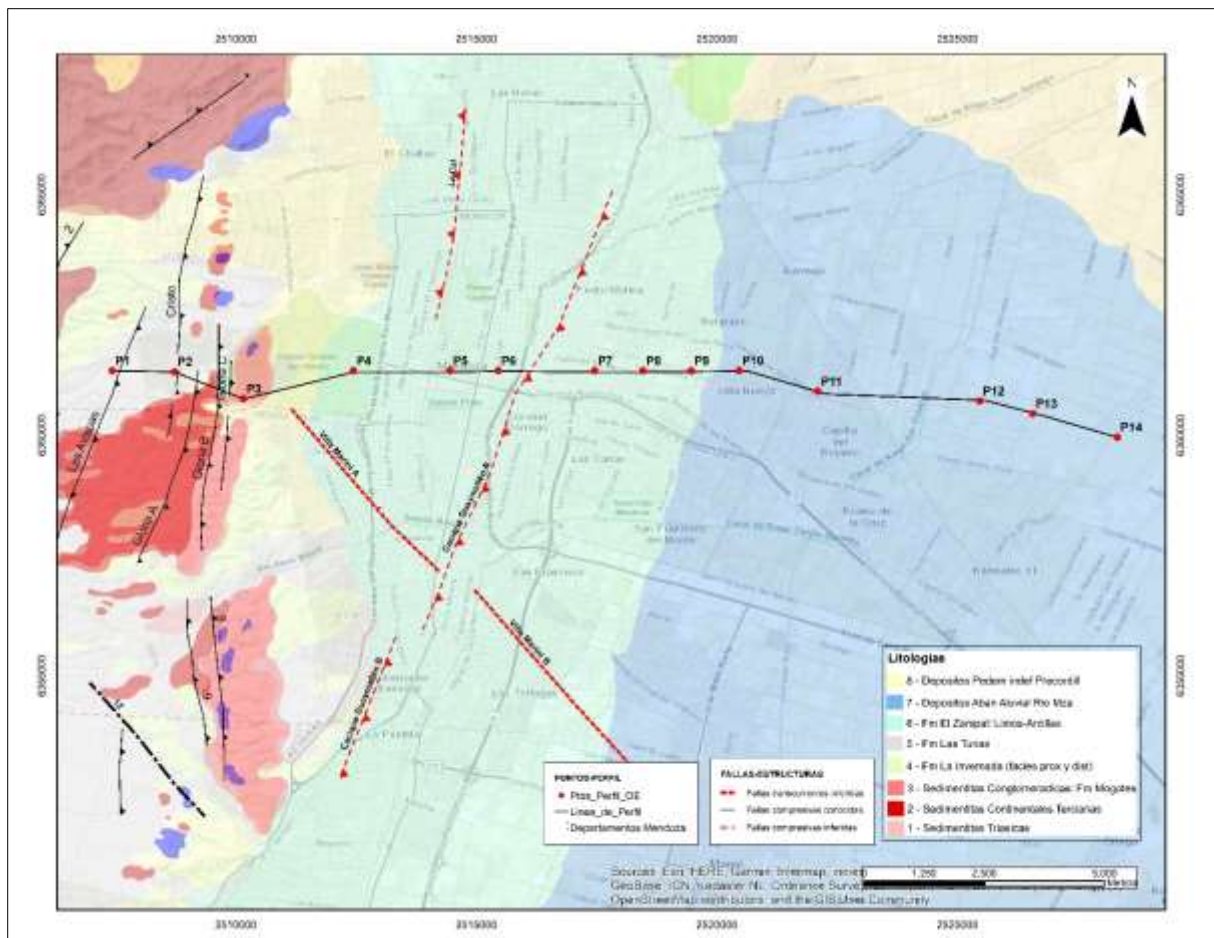


Fig. 4. Unidades litológicas y estructurales atravesadas por el perfil Oeste-Este estudiado.

4 Resultados

En la tabla 1 se han resumido los resultados obtenidos para cada uno de los puntos medidos. Se puede observar que los valores pico de las frecuencias naturales obtenidas, varían gradualmente de un punto al siguiente, excepto en la zona urbana de la Ciudad de Mendoza donde se presenta un cambio de frecuencias entre dicha zona y la correspondiente al sector ubicado al Este del canal Cacique Guaymallén, esta variación brusca de una zona a otra coincide con la estructura de tipo inversa sugerida por Giolo, E. et. al 2018, 2019. Se observó además que vuelve a haber una variación brusca a medida que nos dirigimos hacia el Este. El comienzo de esta última variación parece estar relacionada con la intersección del arroyo “Canal Pescara”. En la Figura 5 se muestran la variación de frecuencias de los puntos medidos a lo largo de todo el perfil estudiado.

Tabla 1. Resultados obtenidos en el perfil O-E en estudio.

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Frecuencia [Hz]	14	13.9	13	9.5	4.9	6.3	12.3	13.5	12.4	12.2	12	2.8	2.1	2.6
Periodo [s]	0.07	0.07	0.08	0.11	0.2	0.16	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.35	0.47	0.38
Zona	Pedemonte			Ciudad de Mendoza			Zona urbana al este del canal Cacique Guaymallén					Los Corralito (suelos blandos y napa freática)		

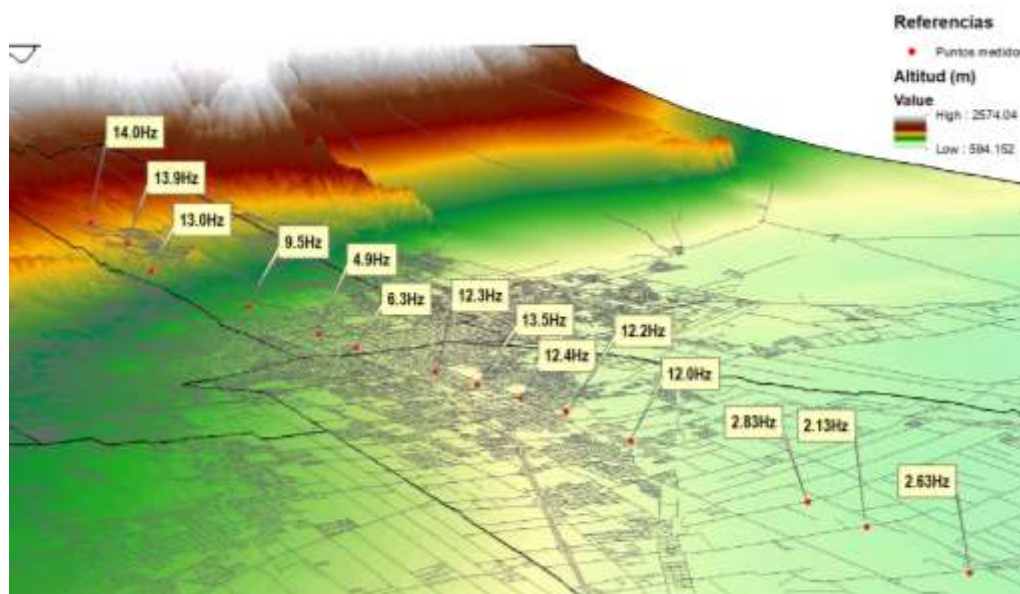


Fig. 5. Frecuencias obtenidas en cada punto del perfil Oeste-Este.

5 Conclusiones

En este trabajo se estudió la variación de frecuencias predominante del suelo para un eje Este-Oeste que atraviesa el área urbana del Gran Mendoza. A partir de los resultados obtenidos y como se suponía a priori, las frecuencias más altas corresponden a la zona del pedemonte, donde los suelos tienen velocidades de onda de corte altas (gravas) y van disminuyendo hacia el Este debido a la presencia de suelos más finos en el microcentro de la Ciudad de Mendoza. Esta tendencia decreciente se ve interrumpida al atravesar el canal Cacique Guaymallén donde las frecuencias vuelven a tener valores elevados, pero con una tendencia decreciente nuevamente hacia el Este, donde se observa un nuevo cambio abrupto al llegar al arroyo “Canal Pescara”. Debido a estos resultados se ha generado una nueva hipótesis, cuya demostración escapa a este trabajo. Como se puede apreciar en la Fig. 6, al norte de la zona estudiada, se encuentra el Anticlinal Borbollón, el cual se interrumpe en la zona del Aeropuerto de Mendoza. Un anticlinal es un pliegue de la corteza terrestre que presenta los estratos más antiguos en su núcleo (forma de \cap o \wedge). En vista de la forma que toma la frecuencia al ser graficada a lo largo del perfil (Fig. 7) y a los cambios abruptos encontrados, es posible que exista una estructura de esta forma en dicho perfil. Como trabajos futuros se prevé la utilización de otros métodos geofísicos (p.e. gravimetría) a fin de poder corroborar la existencia de este tipo de estructura o de descartar la hipótesis presentada en este trabajo. La determinación de estas estructuras permitirá generar mapas de peligrosidad sísmica de gran utilidad.



Fig. 6. Imagen satelital del Gran Mendoza con estructuras tectónicas (fuente: SEGEMAR) donde se ha agregado el posible anticlinal descrito en las conclusiones.

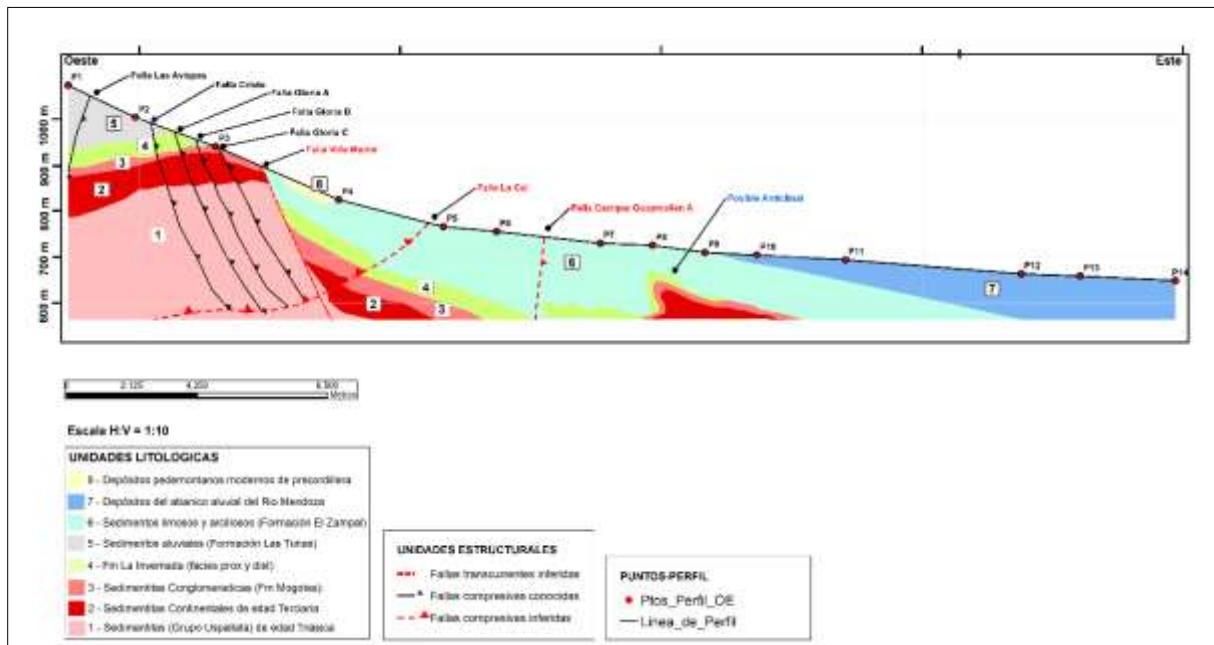
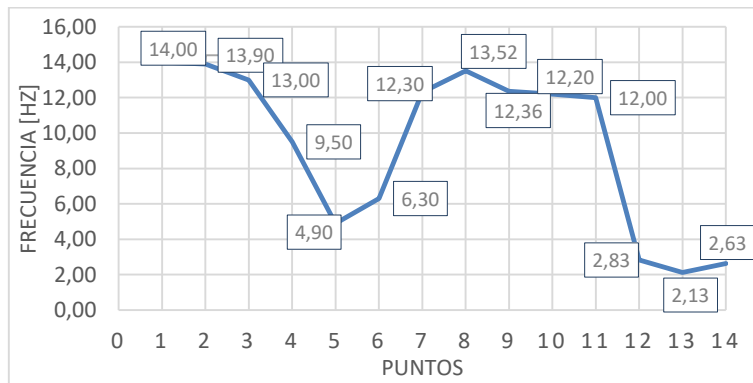


Fig. 7. Arriba: frecuencias obtenidas en cada punto del perfil Oeste-Este estudiado. Abajo: perfil litológico con la posible ubicación de la estructura geológica (anticlinal).

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado de la Universidad Tecnológica Nacional, dado que la presente investigación se desarrolló en el marco del proyecto “Evaluación de la amenaza sísmica del Gran Mendoza para ordenamiento territorial y uso del suelo” (PID ECECBME0008099TC).

Referencias

- ASCE/SEI 7_10, 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineering.
- Borcherdt, R. D. 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design. *Earthquake Spectra*: 10:617-653.
- Calderon, F. A., Giolo, E. G., Frau, C. D., Guevara, M. G. J., Rodriguez, H. Tornello, M., Lujan, F. and Gallucci, R. 2017. Seismic Microzonation and Site Effects Detection Through Microtremors Measures: A Review. Chapter 9 in *Handbook of Research on Trends and Digital Advances in Engineering Geology* Edited by Nurcihan Ceryan. pp 326 - 349. DOI: 10.4018/978-1-5225-2709-1.ch009.
- Carta de Peligrosidad Geológica 3369-II MENDOZA. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, Boletín N°324, 2002]
- Chatelain, J. L., Guillier B., Cara F., Duval A., Atakan K. y Bard P. 2007. Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 6, n° 1: 33-74.
- Costa, C. H., Audemard F. A., Bezerra F. H., Lavenu R. A., Machette M. N. y París G. 2006. An overview of the main quaternary deformation of South America. 61, n° 4: 461-479.
- Dobry, R. y otros 2000. New site coefficients and site classifications system used in recent building seismic code provisions *Earthquake Spectra* 16: 41-67.
- E. Giolo. C. Frau, F. Calderon, S. Pagano, M. Tornello. (2018) Frecuencias naturales del suelo en el núcleo urbano de la ciudad de Mendoza, Argentina. *Revista Internacional de Ingeniería de estructuras*. Vol 23. 2, pag. 157-180.
- Giolo, E., Calderon, F., Pagano, S., Via Gatica, S. y Frau, C. (2019). La técnica del cociente espectral h/v como herramienta para la determinación de estructuras ciegas. Un caso de estudio en la ciudad de Mendoza, Argentina. *Revista de Geología Aplicada, a la Ingeniería y al Ambiente*. Número 43 – diciembre 2019. ISSN 2422-5703.
- Gosar, A. and Lenart, A. 2010. Mapping the thickness of sediments in the Ljubljana Moor basin (Slovenia) using microtremors. *Bulletin of Earthquake Engineering* 8:501–518. DOI 10.1007/s10518-009-9115-8.
- Hassani, B. y Atkinson, G. M. 2016. Applicability of NGA-West2 site effects model for central and eastern North America. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 106: 1331-1341.
- Hellel, M., Oubaiche, E. H., Chatelain, J. L., Machane, D., Bensalem, R., Guillier, B. and Cheikhounis, G. 2012. Basement Mapping with Single-Station and Array Ambient Vibration Data: Delineating Faults under Boumerdes City, Algeria. *Seismological Research Letters* Volume 83, Number 5 September/October 2012. doi: 10.1785/0220110142.
- Japan Road Association, 1990. Specifications for Highway Bridges, Part. V, Seismic Design. Maruzen Co., Ltd.
- Kramer, S. L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.

- Kramer, S. L. y Stewart, J. P. 2004. Geotechnical Aspects of Seismic Hazards. En *Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering.*, de Bozorgnia y Bertero. CRC PRESS.
- McCalping, 2009. *Paleoseismology, International Geophysics, 2009* – Elsevier.
- Moreiras, S. M., Giambiagi, L. B., Spagnotto, S., Nacif S., Mescua J., y Toural R. 2014. El frente orogénico activo de Los Andes centrales a la latitud de la ciudad de Mendoza (32°50'-33°S). *Andean geology* 41, n° 2: 342-361.
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quartely Report of Railway Technical Research Institute* 30: 25-33.
- Nakamura, Y. 2000. 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.
- Nakamura, Y. 2008. On the H/V spectrum. *Proceedings of the 14th World Conferencia on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- Pitilakis, K. 2004. Site effects. En *Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation*, de A. Ansal, 139-197. Kluwer, Dordrecht.
- Pitilakis, K., Riga E., and Anastasiadis A. 2013. New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering*: 11, 925-966.
- Ritta R., Suárez L., Pando M. (2012). Determinación del periodo fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral Horizontal/Vertical. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional Vol. XXXI*. Págs. 1399-1419.
- Rodríguez-Marek, A., y Bray, J. D. 2001. An empirical geotechnical seismic site response procedure. *Earthquake Spectra*: 17,65-87.
- Stewart, J. P., Liu A. H. y Choi Y. 2003 Amplification factors for spectral acceleration in tectonically activities regions. *Bull. Seism. Soc. Am.*: 93,332-352.
- Seed, H. B., y Idriss I. M. 1982. *Ground motions and soil liquefactions during earthquakes*. Monograph Series, 5, Earthquake Engineering Research Institute.
- SESAME. European Research Project - Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations. Measurements, processing and interpretation, December 2004.
- Zhao, J. X. 2011. Comparison between Vs30 and site period as site parameter in ground-motion prediction equations for response spectra. 4th. IASPEI / IAEE International Syposium. Santa Barbara, California.
- Zhao, J. X., y otros 2006. An Empirical Site-Classification Method for Strong-Motions Station in Japan Using H/V Response Spectral Ratio. *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, n° 3: 914-925.