

Microzonificación sísmica basada en efectos de sitio para el área metropolitana de Mendoza

Sismic Microzonation based on Site Effects in the Metropolitan Area of Mendoza

Doctoranda:

Emilce Gisela Giolo

<https://orcid.org/0009-0003-8220-9616>

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina.
emilce.giolo@frm.utn.edu.ar

Director:

Carlos Daniel Frau

Co-directores:

Bertrand Guillier

Miguel Eduardo Tornello

Resumen

El ordenamiento territorial de una región debe contemplar diversos aspectos vinculados con las características del entorno y del hábitat humano que se desarrolla en él. En regiones sísmicamente activas, entre los peligros potenciales asociados a la actividad sísmica se encuentran la licuación de suelos, los deslizamientos de tierra, la caída de rocas y los efectos de sitio, entre otros fenómenos capaces de incrementar la vulnerabilidad de las áreas urbanas. La respuesta sísmica local puede evaluarse mediante métodos teóricos y empíricos. Los primeros permiten analizar con mayor detalle las características y propiedades de los distintos estratos del subsuelo, mientras que los métodos empíricos se basan en el registro de vibraciones producidas por terremotos u otras fuentes de excitación en sitios con diferentes condiciones geológicas y geotécnicas. Entre las técnicas experimentales destinadas a evaluar los efectos locales, los métodos basados en el registro de vibraciones ambientales han adquirido una amplia aceptación durante las últimas décadas. En el presente trabajo se analiza un área de elevada densidad poblacional correspondiente al Área Metropolitana de Mendoza, Argentina, con el objetivo de contribuir a su microzonificación sísmica a partir de la determinación de las frecuencias predominantes del suelo mediante el método del cociente espectral H/V. Como aplicación representativa, se analiza un perfil con orientación Oeste-Este que atraviesa diferentes condiciones geológicas y geotécnicas de la región, a fin de evaluar la capacidad del método para identificar variaciones en la respuesta dinámica local del suelo. A partir del análisis de la distribución de las frecuencias predominantes, se busca identificar sectores potencialmente expuestos a fenómenos de amplificación sísmica durante la ocurrencia de terremotos de magnitud moderada a elevada. El estudio se encuentra actualmente en proceso de elaboración final para la totalidad del Área Metropolitana de Mendoza y permitirá disponer de información de utilidad para el ordenamiento territorial, la planificación urbana y la gestión del riesgo sísmico.

Palabras clave: Microzonificación sísmica; frecuencia del suelo; efecto de sitio; vibraciones ambientales; cociente espectral H/V

Abstract

Land-use planning in a region must consider various aspects related to the characteristics of the environment and the human habitat developed within it. In seismically active regions, potential hazards associated with seismic activity include soil liquefaction, landslides, rockfalls, and site effects, among other phenomena that may increase the vulnerability of urban areas. Local seismic response can be evaluated using theoretical and empirical methods. The former allow a more detailed analysis of the characteristics and properties of the different subsurface layers, whereas empirical methods are based on the

recording of vibrations generated by earthquakes or other sources of excitation at sites with different geological and geotechnical conditions. Among the experimental techniques used to assess local effects, methods based on ambient vibration recordings have gained wide acceptance over the last decades. This study analyzes a densely populated area of the Mendoza Metropolitan Area, Argentina, with the aim of contributing to its seismic microzonation through the determination of the predominant soil frequencies using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (H/V) method. As a representative application, a West–East-oriented profile crossing different geological and geotechnical conditions of the region is analyzed in order to evaluate the ability of the method to identify variations in the local dynamic response of the soil. Based on the spatial distribution of the predominant frequencies, the study aims to identify sectors potentially exposed to seismic amplification phenomena during the occurrence of moderate- to high-magnitude earthquakes. The study is currently in its final stage of development for the entire Mendoza Metropolitan Area and will provide useful information for land-use planning, urban planning, and seismic risk management.

Keywords: Seismic Microzonation; Frequency of Soil; Site Effect; ambient vibrations; Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (H/V).

Introducción

El ordenamiento territorial de una región debe contemplar distintos aspectos que hacen a las características del entorno y al hábitat humano inserto en ella. Entre los aspectos a considerar se encuentran los riesgos naturales. Si la región geográfica en cuestión es una zona tectónicamente activa, deben contemplarse los múltiples aspectos relacionados con la ocurrencia de terremotos. La identificación de áreas con diferentes potenciales de amenaza sísmica es necesaria para el ordenamiento territorial de aquellas ciudades cercanas a fuentes sísmicas en orden a reducir el riesgo y la vulnerabilidad de los edificios y de las obras de infraestructura. Algunos de los peligros potenciales asociados a la actividad sísmica son la licuación de suelos, deslizamiento de tierras, caída de rocas, efectos de sitio debido a terremotos, variaciones topográficas, tsunamis entre otros. Desde hace ya varias décadas que la inclusión de efectos de sitio en los códigos de diseño sísmico ha recibido gran atención por parte de la comunidad ingenieril (Chavez-García y Faccioli 2004, Adams y Atkinson 2003).

La respuesta de sitio puede ser evaluada por métodos teóricos o empíricos. Entre los métodos experimentales para considerar efectos locales, han tenido gran aceptación en las últimas décadas los basados en microtremores o vibraciones ambientales. Mediante el análisis de las mediciones de vibraciones ambientales se puede determinar el período fundamental de oscilación cuando existe un contraste de impedancia importante entre los estratos que conforman el depósito sedimentario (Lermo y Chavez-García 1994).

Entre las diferentes técnicas que utilizan microtremores, el método de las relaciones espectrales H/V conocido como método de Nakamura (Nakamura 1989, Nakamura 2000) ha alcanzado una gran aceptación por lo que ha sido aplicado en un gran número de regiones diferentes en todo el mundo. Entre otras razones, su amplia difusión se debe a que sólo requiere analizar los datos registrados por una estación de tres componentes emplazada en la superficie del sitio a auscultar.

La sismicidad de Argentina es consecuencia de la convergencia de las placas Sudamericana y de Nazca; dentro de este marco, el piedemonte andino de la Provincia de Mendoza reúne una buena parte de la deformación tectónica reciente asociada al crecimiento de la Cordillera de los Andes que se manifiesta por la concentración de la sismicidad (Bastías et al. 1993, Modaressi et al. 1998). Los epicentros de los sismos registrados indican que la mayor parte de la actividad sísmica se concentra en el centro-oeste de nuestro país caracterizando a la región como de “elevada actividad sísmica”. Esta elevada sismicidad puede conjugarse con características particulares del subsuelo provocando efectos de sitio, esto es amplificación de las ondas sísmicas debido a la baja rigidez del sustrato que media entre la superficie del suelo y el basamento. La exposición a este tipo de peligros es particularmente relevante para centros urbanos e infraestructuras críticas, por las potenciales pérdidas de vidas humanas y bienes que pueden resultar de ello.

En el presente trabajo se escoge el área metropolitana de la provincia de Mendoza, Argentina para realizar una microzonificación sísmica en base a frecuencias naturales de suelo que se obtienen mediante el procedimiento del cociente espectral H/V. De esta manera se identifican las áreas expuestas al fenómeno de amplificación sísmica cuando sobrevenga un terremoto de mediana o elevada magnitud. Esta microzonificación permitirá contar con información de utilidad para la

organización del uso del suelo y la planificación urbana.

Desarrollo

Efectos de Sitio

Se conoce como efecto de sitio a la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional. En otras palabras, podría decirse que el efecto de sitio es la transformación que sufren las ondas sísmicas desde la roca base hasta la superficie, pudiendo variar la amplificación de la onda en varios órdenes de magnitud. La naturaleza y la distribución de los daños que se pueden producir en las estructuras con la ocurrencia de un terremoto, está muy influenciada por la respuesta del terreno frente a cargas cíclicas, como consecuencia de lo cual se produce una modificación de la señal sísmica (Aki, K. 1998). El estudio de la respuesta dinámica del suelo en el análisis de riesgo sísmico y en el diseño sismorresistente está siendo objeto de numerosos trabajos de investigación, sobre todo luego de los recientes terremotos ocurridos en el mundo (Northridge, 1994; Kobe, 1995; Turquía, 1999; El Salvador, 2001; Chile, 2010; Nepal, 2015; Ecuador, 2016).

La presencia de terrenos, considerados geotécnicamente como blandos, causa un aumento considerable de los daños generados por terremotos en todo tipo de estructuras situadas sobre ellos. La respuesta y la magnitud de la amplificación de la señal están controladas principalmente por las propiedades de los materiales geológicos, especialmente por sus características dinámicas como, las velocidades de corte, el espesor de las capas, la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso, y finalmente la diferencia de las Vs entre roca sísmica (± 800 m/s) y sedimentos (Aki, K. 1998, Borchardt, R. D. 1970).

Metodología

El método H/V consiste en la utilización de microtemores para la determinación de efectos de sitio a través de la frecuencia natural, mediante la realización de un cociente entre los espectros de Fourier de las componentes horizontales y verticales de un registro en el sitio estudiado. 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. Esta metodología 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 en el cual un suelo sedimentario está apoyado sobre un estrato rocoso donde la principal diferencia entre estos estratos es la velocidad de la onda S. Para el desarrollo del procedimiento, se plantea una serie de relaciones entre las amplitudes de los espectros de Fourier de las distintas componentes del movimiento tanto en superficie como en el lecho rocoso. Siendo Hb y Vb, las amplitudes espectrales del movimiento horizontal y vertical en el lecho rocoso respectivamente, y Hs y Vs las amplitudes espectrales de las componentes horizontal y vertical del movimiento en superficie. Considera que en el lecho rocoso la propagación de las ondas va a ser la misma en todas las direcciones $H_b(\omega) = V_b(\omega)$ se llega a la ecuación (1). Se puede estimar el efecto de sitio mediante $SM(\omega)$, la ecuación (1) es conocida como Espectro de Cuasi Transferencia (QTS).

$$SM(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)} \quad (1)$$

Las mediciones se realizaron con acelerómetros modelo Basalt de Kinemetrics. Poseen un sensor triaxial interno (Epi Sensor Force Balance) y se alimentan con una batería de 12 V. Los acelerómetros fueron configurados para medir de forma continua, almacenando los registros cada 10 minutos, con una frecuencia de muestreo de 200 Hz. En este estudio se han seguido las directrices dada por el manual del proyecto SESAME (European Research Program, 2004) y el software Geopsy

para el procesamiento de señales.

Área de estudio

El área de estudio considerada encierra el área metropolitana de Mendoza, ésta incluye la zona más comercial de la Ciudad de Mendoza, administrativa y Centro Cívico, incluye también zonas residenciales de distintas jerarquías con edificios de altura. Comprende también el área netamente comercial del Departamento de Godoy Cruz, fundamentalmente en torno a los ejes de calle San Martín Sur y calle Brasil; el área residencial, se desarrolla en todo el Departamento, pero se halla de forma conjunta con la comercial; en este aspecto se incluye francamente a la zona de Villa Marini, la cual sufriera los mayores daños durante el terremoto de Mendoza de 1985. En cuanto al Departamento de Las Heras se contempla el área cívico y más comercial en su proximidad con la Ciudad Capital, donde también se produjeron importantes daños en el terremoto de 1985. En la figura 1 se observa el área Metropolitana de Mendoza de acuerdo al plan de ejecución Metropolitana del programa DAMI efectuado en el año 2013. Dentro del área Metropolitana se definió una grilla con los puntos a medir, la misma fue realizada con una separación de 1000 m en toda la extensión, con un total de 298 puntos medidos (Figura 2).

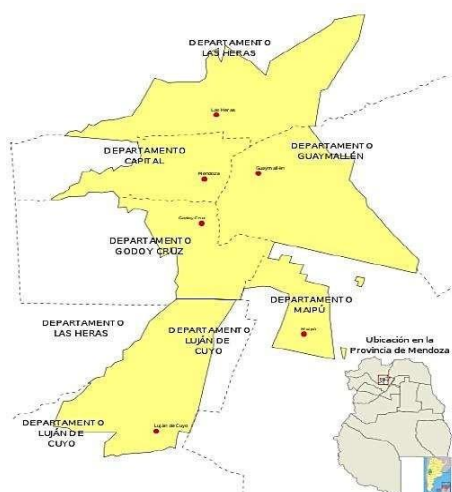


Figura 1: Área Metropolitana de Mendoza a estudiar 1000 m.

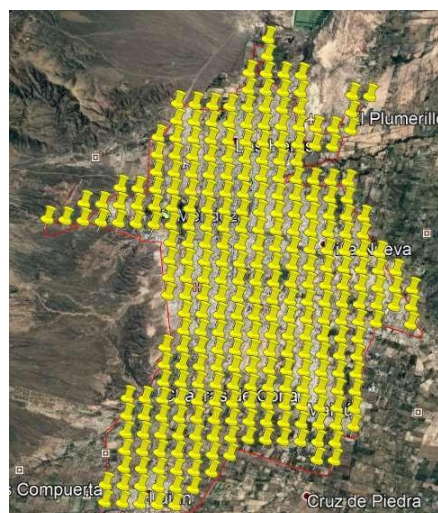


Figura 2: Puntos a medir obtenidos mediante grilla con pasos cada 1000 m.

Resultados

Debido a la magnitud de los datos procesados y resultados obtenidos, sólo se volcará en el presente apartado los resultados de las mediciones obtenidas en un perfil representativo Oeste-Este el cual se encuentra dentro de la zona de estudio. Este perfil muestra un total de 14 puntos estudiados, comenzando en el oeste de la zona Metropolitana, zona pedemontana con elevaciones y características de suelos rígidos, hasta un sector del departamento de Guaymallén, donde se identifican condiciones asociadas a la presencia de napas freáticas superficiales. Una síntesis de los resultados obtenidos se presenta en la tabla 1, dónde además de las frecuencias se muestran los periodos de cada punto, y en la Figura 3, a la izquierda se muestra la ubicación y designación de los puntos de medición, y en la figura de la derecha se representan las frecuencias naturales del suelo obtenidas en cada uno de ellos. En la figura puede observarse una tendencia general de frecuencias elevadas hacia el oeste del perfil, correspondiente al piedemonte mendocino, en concordancia con las características geotécnicas y geológicas predominantes en dicho sector. A medida que el perfil avanza hacia el este, se observa una disminución de las frecuencias naturales del suelo. Sin embargo, en las proximidades del canal Cacique Guaymallén se identifica una variación abrupta, caracterizada por un incremento de las frecuencias en los puntos localizados inmediatamente al este del canal. Esta anomalía podría estar asociada a una modificación de las condiciones del subsuelo, vinculada con variaciones en parámetros tales como la velocidad de onda de corte (V_s) y/o el espesor de los sedimentos (Giolo, E. et al., 2018). Posteriormente, hacia el este del perfil, se observa nuevamente una disminución abrupta de las frecuencias naturales, alcanzándose los valores más bajos en

los puntos 12, 13 y 14. Este comportamiento se encuentra asociado a las características del sector, donde se reconoce la presencia de niveles freáticos superficiales. Investigaciones recientes (ej.: Hellel et al. 2012) han utilizado el método de Nakamura como complemento en la investigación de fallamientos y profundidad de estratos hasta el lecho rocoso. Considerando que existe una relación teórica entre la velocidad de la onda de corte V_s y el periodo o frecuencia del suelo f , donde la V_s representa en cierta medida la rigidez de los estratos que atraviesa, es decir que suelos más rígidos tendrán velocidades mayores que suelos menos rígidos. En este contexto, las variaciones abruptas de frecuencia observadas a ambos lados del canal Cacique Guaymallén podrían indicar la existencia de cambios significativos en las condiciones del subsuelo. Estas variaciones podrían estar asociadas a diferencias en la velocidad de onda de corte, a modificaciones en el espesor de los estratos involucrados o a cambios en la profundidad del estrato que participa predominantemente en la respuesta sísmica local.

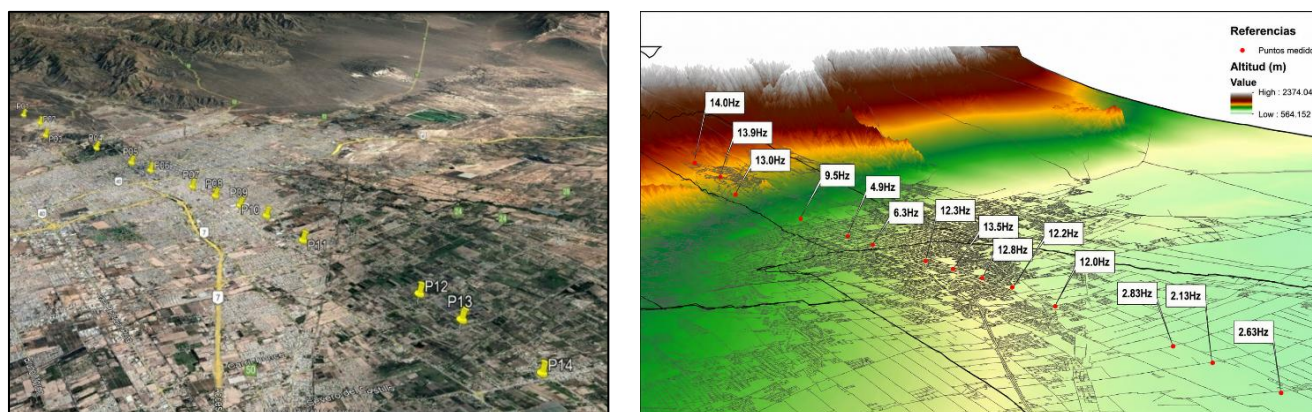


Figura 3: mapa de frecuencias del suelo tomando un perfil Oeste-Este ubicado dentro del área de estudio general. Izquierda: ubicación y designación de los puntos de medición, desde P1 hasta P14. Derecha: frecuencias naturales del suelo obtenidas en cada punto estudiado.

Tabla 1: resultados de frecuencias y periodos del suelo en el perfil estudiado.

ID PUNTOS	FRECUENCIA [Hz]	PERIODO [s]	TIPO DE ZONA
1	14	0,07	Zona pedemontana
2	13,9	0,07	
3	13	0,08	
4	9,5	0,11	Zona urbana en la ciudad de Mendoza
5	4,9	0,2	
6	6,3	0,16	
7	12,3	0,08	Zona urbana al este del canal Cacique Guaymallén
8	13,52	0,07	
9	12,36	0,08	
10	10,2	0,09	
11	12	0,08	Zona periurbana con napa freática superficial
12	2,83	0,35	
13	2,13	0,47	
14	2,63	0,38	

Conclusiones

En el área de estudio las frecuencias naturales de suelo encontradas presentan variaciones considerables que van desde los 2 Hz, suelos más blandos desde el punto de vista del diseño sismorresistente de estructuras, a los 14 Hz aproximadamente, siendo estos suelos más rígidos. Los resultados obtenidos a lo largo del perfil analizado evidencian variaciones espaciales significativas en la respuesta dinámica del suelo. En particular, las variaciones abruptas de frecuencia observadas en las proximidades del canal Cacique Guaymallén sugieren la existencia de cambios en las condiciones del subsuelo, que podrían

estar relacionados con variaciones en la velocidad de onda de corte, el espesor de los sedimentos o la configuración de los estratos que participan en la respuesta sísmica local. De acuerdo con investigaciones previas, la técnica del coeficiente espectral H/V puede detectar variaciones en las condiciones del subsuelo y, por lo tanto, constituir una herramienta complementaria para la identificación de estructuras ciegas u otras estructuras potencialmente sismogénicas (Giolo et al., 2019). Si bien en el presente trabajo se analiza únicamente un perfil de orientación Oeste–Este con el objetivo de ejemplificar la aplicación y eficacia del método empleado, el análisis completo de la distribución de las frecuencias naturales del suelo en el Área Metropolitana de Mendoza forma parte de una investigación de mayor alcance, cuyos resultados serán desarrollados en la tesis doctoral actualmente en elaboración.

Referencias

- Adams, J., y G. Atkinson, 2003. Development of seismic hazard maps for the proposed 2005 edition of National Building Code of Canada. *Journal of Civil Engineering*: 30:255-71.
- Aki, K. (1988). Local site effects on ground motion, in *Earthquake. Engineering and Soil Dynamics. Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, J. L. Von Thun (Editor), Geotechnical Special Publication No. 20, Am. Soc. Civil Eng., New York, pp. 103- 155.
- Bastías, H., G. Perucca, y J. Paredes 1993. Peligro sísmico y neotectónica. En XII Congreso Geológico Argentino Relatorio, de V. Ramos, 645-658.
- Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motions near San Francisco Bay. En: *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 60, pp. 29 – 61.
- Chavez-García, F. J., y Faccioli E. 2004. Complex site effects and building code: making the leap. *Seismol J.*: 4(1):23-40.
- Giolo, E., Calderón, F., Pagano, S., Vía Gatica, S., Frau C. (2019). *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* N° 43, pag. 55 – 67 (2019).
- Giolo, E., Frau, C., Calderón, F., Pagano, S., Tornello, M. (2018). Frecuencias naturales de suelos en el núcleo urbano de la ciudad de Mendoza. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras* Vol. 23,2, 157 - 188 (2018), doi: 10.24133/riie.v23i2.967.
- 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.
- Lermo, J., y Chavez-García, F. 1994. Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletiin of Seism. Soc. American*, San Francisco: 1350-64.
- Modaressi, H., Mellal, A., y Bour, M. 1998. Evaluation of seismic response spectra using a unified numerical approach. *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*. Amsterdam: Balkema.
- 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.
- SESAME European Research Program 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, measurements, processing and interpretation.