



## **Caracterización de periodos de suelo y estimación de efecto de sitio en el Casco Antiguo de la Ciudad de Panamá como apoyo a la preservación del patrimonio histórico de Panamá**

### **Characterization of the site effect with the Nakamura technique in the Panama City Old Quarter as support for the preservation of Panama historical heritage of**

**Néstor Luque**

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.

[nestor.luque@up.ac.pa](mailto:nestor.luque@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0000-0003-4564-1947>

**Javier Francisco Lermo Samaniego**

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México.

[jlermos@iingen.unam.mx](mailto:jlermos@iingen.unam.mx),

<https://orcid.org/0000-0002-5336-5332>

**Julissa Sanjur**

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Panamá.

[julissa.sanjur@up.ac.pa](mailto:julissa.sanjur@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0009-0000-1845-9651>

**Arkin Tapia**

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

[arkin.tapiae@up.ac.pa](mailto:arkin.tapiae@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0000-0003-2355-4615>

**Héctor Pineda**

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

[hector.pineda-s@up.ac.pa](mailto:hector.pineda-s@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0009-0009-1302-2843>

**Johnny Gil**

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

[johnny.gils@up.ac.pa](mailto:johnny.gils@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0009-0001-8887-5236>

**Yadira Echeverria**

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

[yadira.echeverriad@up.ac.pa](mailto:yadira.echeverriad@up.ac.pa)

<https://orcid.org/0009-0007-6681-5025>

**Fecha de recepción:** 13 de marzo de 2025

**Fecha de aceptación:** 22 de mayo 2025

**DOI:** <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7674>

## **RESUMEN**

Las zonas propensas a la generación de terremotos que dejan daños considerables requieren de estudios de amenaza sísmica. Hacer un análisis del efecto de sitio es uno de los parámetros más importantes en este proceso. Para conocer el efecto de sitio existen diversas técnicas, una de ellas es la metodología empírica de la razón espectral H/V (es decir, la razón entre el espectro de amplitudes de Fourier de las componentes horizontal y vertical de microsismos). La técnica desarrollada por Nogoshi & Igarashi (1971) y difundida por Nakamura (1989) como la relación espectral H/V, permite la obtención de los periodos fundamentales del suelo en la región de estudio. Esta es una de las técnicas que emplean microtemores para la microzonificación sísmica (Rivera-Alvarez, 2019).

Aplicamos esta técnica en diferentes puntos, especialmente cerca de edificaciones de importancia, en el Casco Viejo de la Ciudad de Panamá como apoyo a la preservación del patrimonio histórico de Panamá, con sismómetros banda ancha. Teniendo como resultado suelos que en su mayoría comprenden suelos duros a compactos con periodos cortos, menores a 0.25 segundos.

## **PALABRAS CLAVE**

Ondas sísmicas, dinámica de suelos, Geotecnia, patrimonio histórico, Panamá.

## **ABSTRACT**

Areas prone to the generation of earthquakes that leave considerable damage require seismic hazard studies. Performing a site effect analysis is one of the most important parameters in this process. To know the site effect, there are various techniques, one of them is the empirical methodology of the H/V spectral ratio (that is, the ratio between the Fourier amplitude spectrum of the horizontal and vertical components of microseisms). The technique developed by Nogoshi and Igarashi (1971) and disseminated by Nakamura (1989) as the H/V spectral ratio, allows obtaining the fundamental periods of the ground in the study region. This is one of the techniques that microtremors use for seismic microzonation (Rivera-Alvarez, 2019).

We apply this technique at different points, especially near important buildings, in the Casco Viejo of Panama City as support for the preservation of the historical heritage of Panama, with broadband seismometers. Resulting in soils that mostly comprise hard to compact soils with short periods, less than 0.25 seconds.

## **KEY WORDS**

Seismic waves, soil dynamics, Geotechnics, historical heritage, Panama

## INTRODUCCIÓN

La respuesta de una estructura sometida a acciones dinámicas en general y en particular a terremotos, depende fundamentalmente de las características de la estructura y el suelo donde está emplazado (Bazán et al., 1992; Kramer & Stewart, 2024).

Las condiciones locales propias de cada emplazamiento, como son: la naturaleza de los suelos, la topografía, la profundidad del basamento y del nivel freático, etc., pueden producir variaciones en las ondas sísmicas, en espacio, amplitud, contenido de frecuencia y duración, al propagarse dentro del entorno geográfico considerado. El conocimiento de estos fenómenos, también llamados efectos de sitio se consideran de gran importancia para la planificación y el diseño sismorresistente de las edificaciones (Chávez, 2014; Kramer & Stewart, 2024).

Debido que en muchas partes del mundo los sismos no son muy frecuentes, por lo cual habría que esperar décadas para hacer estimaciones de respuesta local de los suelos bajo una ciudad o zona urbana, en las últimas décadas ha tomado un gran auge el uso de los microtemores, microtrepidaciones, ruido sísmico de fondo o el ruido sísmico ambiental para estimar la respuesta local de sitio haciendo uso de la técnica de las tasas espectrales o HVSR. Esta técnica fue popularizada por Nakamura (1989), y se usa para determinar la frecuencia natural de vibración del terreno en un espacio de tiempo corto y a un bajo costo (Cara et al., 2008; Duval et al., 2001; Lebrun et al., 2001; Lermo et al., 1988; Lermo et al., 1993; Panou et al., 2005; Yamazaki y Anzari, 1997). Además, se ha comprobado que los resultados de esta técnica se correlacionan con la distribución espacial de daños por sismo, cuando los mismos son controlados por la geología superficial somera (Lachet et al., 1996; Teves-Costa et al., 2001).

El suelo esta siempre moviéndose ligeramente bajo influencia de golpes, desplazamientos o traslación de masas de origen natural o cultural. Se conocen como microtemores al ruido sísmico ambiental o de fondo de periodo corto, producto de fuerzas aleatorias y superficiales. Experimentos numéricos indican que estos son en esencia ondas superficiales tipo Rayleigh (de origen atmosférico, oceánico y artificial) propagadas lateralmente en todas las direcciones. La experiencia y sugerencia de Nakamura (1989) está basada en obtener datos empíricos de la oscilación ambiental, y dar información de la frecuencia natural del terreno, al dividir el espectro de amplitud de Fourier del movimiento horizontal entre el vertical.

Debido a la relación que existe entre la naturaleza de los microtemores y el comportamiento dinámico de las capas superficiales de los suelos, esas pequeñas vibraciones son empleadas en el campo de la ingeniería sísmica, con la finalidad de caracterizar los suelos y estructuras, determinando la función de transferencia, la cual incluye información referente a los periodos

predominantes. De las diferentes técnicas que emplean microtemblores para la microzonificación sísmica, la técnica desarrollada por Nogoshi & Igarashi (1971) y difundida por Nakamura (1989) como la relación espectral H/V, permite la obtención de los periodos fundamentales del suelo en la región de estudio. El producto final es la generación de mapas de isoperiodos predominantes del suelo, mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Considerando la importancia de la preservación del patrimonio histórico de Panamá, el contexto geodinámico de la región y su exposición a la amenaza sísmica se plantea realizar una zonificación en el sector del Casco Antiguo de la Ciudad de Panamá, como apoyo para mitigar el riesgo a pérdida de los edificios históricos e incluso vidas humanas.

## **ANTECEDENTES**

Al igual que en otras partes del mundo (Schmidt-Díaz & Esquivel-Salas, 2024; Uyanik, 2023) en Panamá se han realizado varios estudios de microzonación sísmica (Grajales et al., 2023; Guardia et al., 2012; Lermo et al., 2014;)

Por lo tanto, cuando las ondas del sismo se ven modificada por las características geológicas y topográficas en un punto dado, y las mismas se encuentren en la parte somera del subsuelo durante y después de un sismo se le conoce como efecto de sitio. Por lo general, esta modificación actúa principalmente amplificando la señal y hacen que estas tengan una mayor duración. Para zonas que presenten grandes densidades de construcción de edificaciones esto puede ser devastador, produciendo grandes daños a estas.

Existen diversas técnicas para conocer el efecto de sitio, estas pueden ser directas, empíricas y numéricas. En este estudio se empleará la técnica empírica, específicamente razón espectral utilizando vibraciones ambientales, H/V.

### **Ruido sísmico ambiental**

También conocidos como microtemblores, microtrepidaciones, microtemblores, oscilaciones omnipresentes y ruido de fondo. Son vibraciones aleatorias inducidas en las masas de suelo y roca por fuentes naturales y artificiales definido por Gascón (2009). Estas se observan en un rango de frecuencia entre 0,001 a 30 Hz.

Las vibraciones pueden ser naturales o microsismos y de origen artificial o macrosismos, las primeras están relacionadas a las fuentes internas de la Tierra como actividad tectónica y a fuentes externas como actividad de las mareas, el viento y otras, siendo comunmente de baja frecuencia. La segunda por la actividad humana (actividades industriales y tráfico) de alta frecuencia (Ritta et al., 2012).

## **Periodo fundamental del suelo**

Es un indicador para conocer el efecto de sitio en una zona determinada, y es uno de los más utilizados por la comunidad científica a nivel mundial. El tiempo que tardan las vibraciones en dar su ciclo completo en determinado entorno del subsuelo se le conoce como periodo fundamental, o su inversa, la frecuencia fundamental.

Las modificaciones que sufre el suelo ante un evento sísmico son principalmente las fuertes amplificaciones. Suelos blandos con grandes potencias (espesores) tienen tendencias a generar mayores periodos fundamentales, predominando mayores amplificaciones.

## **Técnica Nakamura**

Una de las técnicas empíricas de estimación del efecto de sitio donde la medición, procesamiento e interpretación de ruido ambiental, es parte del procesado, es el método de Nakamura. Esta técnica se basa en la interpretación de los espectros de Fourier de las componentes horizontales y verticales de microtremores, como ondas superficiales Rayleigh, las cuales se propagan en una capa blanda de sedimentos sobre un medio rocoso (Gascón, 2009).

Según Rivera-Alvarez (2019) La razón espectral H/V (es decir, la razón entre el espectro de amplitudes de Fourier de las componentes horizontal y vertical de microsismos) fue introducida primeramente por Nogoshi e Igarashi (1971) y extendida por Nakamura (1989, 1996, 2000).

En todo momento, las capas de sedimento, así como las rocas están sometidas a vibraciones ambientales, las cuales pueden ser clasificadas en dos principales categorías: las naturales y las artificiales.

La superficie de los suelos siempre está vibrando con periodos de 0,1 a 10 segundos. La distinción entre el ruido de largo periodo ( $T > 1$  s) y de corto periodo ( $T < 1$  s) corresponde a la distinción tradicional entre microsismos de origen natural, y microtremores de origen artificial, respectivamente.

Es importante resaltar que en la denominación actual de microtremores se incluyen los de corto periodo y los de largo periodo, es decir, los debidos a las actividades humanas y los debido a causas naturales.

Nakamura (1989) se basó en las siguientes suposiciones:

- Los microtemores están compuestos por diferentes tipos de ondas, en especial de ondas Rayleigh, que se propagan en una capa blanda de sedimentos que yace sobre un medio rocoso. El efecto, de estas ondas, es igual tanto para las componentes verticales como para las horizontales en superficie.
- La amplificación del efecto de sitio es debido a una capa que se ubica por encima de una capa considerada como “espacio infinito”, donde la excitación está dada por un plano armónico de onda S. La componente vertical del movimiento no se amplifica por la capa sedimentaria.
- Igualmente, supone que las fuentes profundas son despreciadas y por lo tanto, el movimiento es debido a fuentes locales, las cuales no afectan el movimiento de los microtemores en la base de la capa de sedimentos.

## **METODOLOGÍA**

### **Ubicación de la zona de estudio**

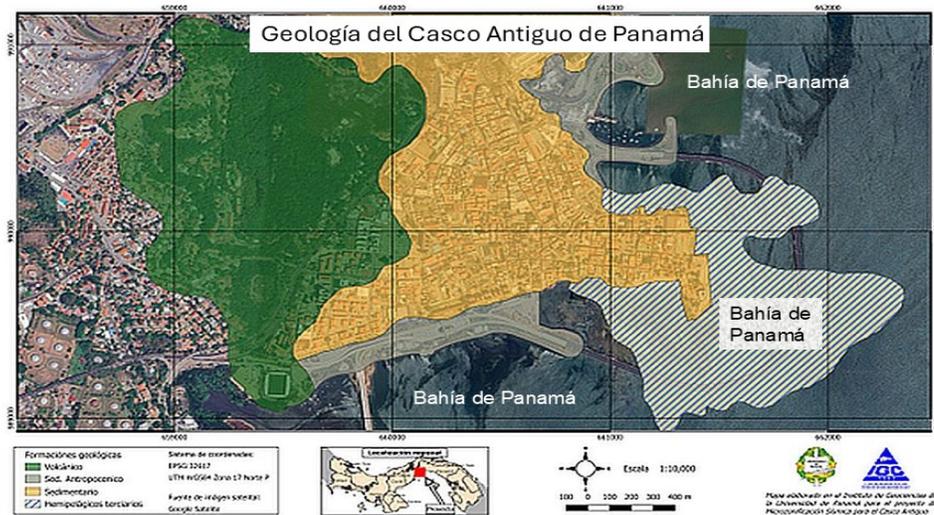
Este estudio hace parte del distrito de Panamá, comprenden los corregimientos de San Felipe, El Chorrillo y Santa Ana, especialmente de la zona del Casco Antiguo. Entre las coordenadas UTM 659000 E / 989000 N como punto suroccidental y 662000 E / 991000 N como el extremo nororiental (Ver figura 1)

La geología de la zona de estudio está en su totalidad compuesta de rocas sedimentarias, de depósitos aluviales y marinos, además de rellenos (Ver figura 2). Esto contrasta con la información del mapa geológico presentado en el Atlas Nacional del Instituto Geográfico Nacional del Tommy Guarda.

**Figura 1.**  
*Corregimientos de la zona de estudio*



**Figura 2.**  
*Formaciones geológicas del Casco Antiguo de la ciudad de Panamá tomadas en campo.*



### Recolección de datos

Como primera parte de este estudio se recopiló información bibliográfica asociada a la geología del área bajo estudio, trabajos previos de microzonificación sísmica desarrollándose en Panamá y en la región, el fundamento de la técnica de Nakamura, la geotecnia, aspectos geofísicos, entre otros.

A partir de la hoja topográfica, a escala 1:25 000 de la Ciudad de Panamá, cuyo código es 4242 I NE, elaborada por el Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia, se digitalizaron los principales elementos como curvas de nivel, carreteras, edificios, parques. Posteriormente se realizó una selección de probables sitios en los corregimientos de San Felipe, El Chorrillo y Santa Ana, para hacer las mediciones en campo abierto; ponderando el nivel de riesgo, el acceso por ciertas calles y el tráfico vehicular. En este sentido se seleccionaron cerca de 30 puntos a los cuales se podía tener acceso (ver figura 3).

### Figura 3.

*Polígono a trabajar en el Casco Antiguo de la ciudad de Panamá.*



En la fase de campo se utilizaron equipos sismómetros de banda ancha de 3 componentes (dos sismómetros GURALP SYSTEMS, triaxiales de periodo largo, CMAG-6TD y un sismómetro Nanometrics triaxial de periodo 120 segundos, TRILIUM COMPACT 120P) con sus respectivos digitalizadores. En los puntos seleccionados llevamos a cabo mediciones con un tiempo de muestreo de 30 minutos.

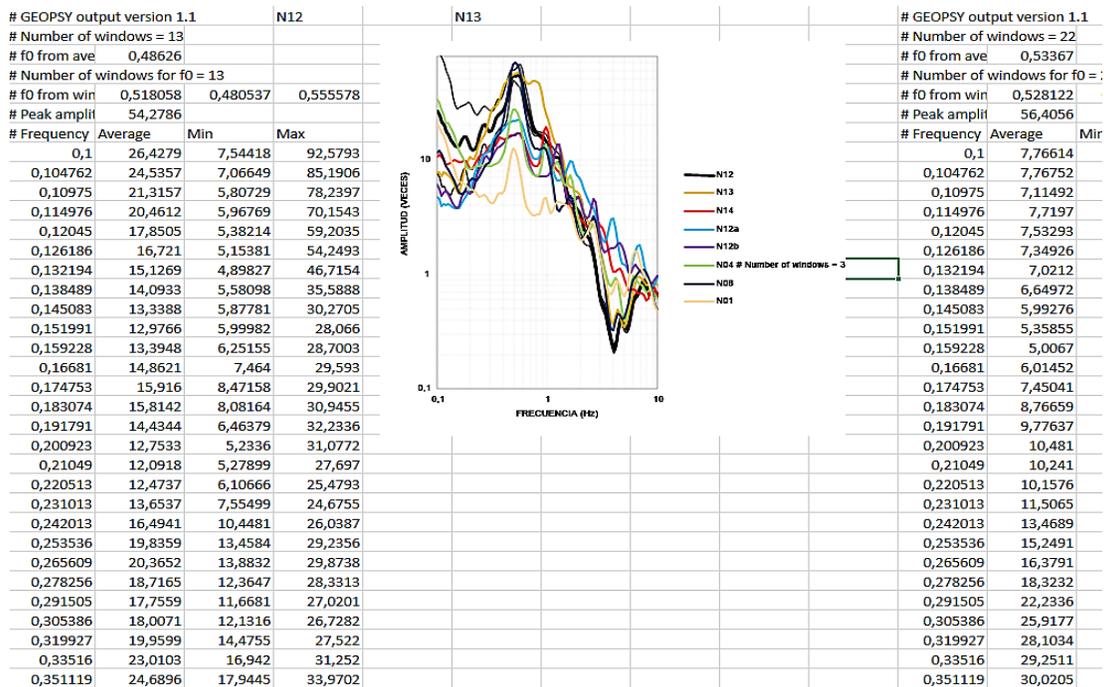
En el lugar se revisaba que los datos adquiridos cumplieran con la calidad requerida para el posterior procesamiento con la técnica, en caso contrario, se repetía la medición.

En la fase de oficina, mediante los sistemas de información geográfica, se crearon las capas geoespaciales con los puntos de muestreo, requeridos para la elaboración del mapa de isoperiodos de los suelos. También mediante el programa Geopsy, que procesa ondas sísmicas, se extrajo la información de las frecuencias obtenidas en el área de estudio.

A continuación, utilizando la información de las tablas, obtuvimos las amplitudes y los períodos mediante el cálculo del inverso de la frecuencia. Se obtuvo información sobre la frecuencia, las amplitudes y los períodos (ver figura 5).

**Figura 4.**

*Vista de los datos tabulares de algunas de las mediciones en campo tales como: Frecuencia promedio, máxima y mínima.*



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 aparecen los periodos fundamentales en los sitios seleccionados en el Casco Antiguo de la ciudad de Panamá, cada uno está georreferenciado en coordenadas UTM.

**Tabla 1.**

*Periodos fundamentales en la zona de estudio, en coordenadas UTM WGS84 Zona 17 Norte P.*

Nombre	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Amplitud	x	y
pe49	10.5	0.095	2.1	660829.68	990189.48
pe50	6.5	0.154	2.8	660793.76	990549.45
pe34	3.4	0.294	1.3	661259.81	990091.59
pe33	1.1	0.909	1.3	660930.3	990030.39
pe31	6.1	0.164	1.1	661140.54	989990.52
pe30	11.1	0.09	1.8	661191.32	989803.31
pe29	11.1	0.09	2	661091	989945
pe17	4.2	0.238	3.3	661387.21	989630.07
pe14	17	0.059	3.7	661355.31	989858.05
pe15	6.8	0.147	4.3	660825.5	989868.02
pe12	8.5	0.118	1.5	660835.71	989752.75
pe11	4.2	0.238	5.7	660833.87	989837.03
pe28-	4.5	0.222	8.5	661230.04	990006.67
canco	3.4	0.294	1.8	659799.91	990175.02
pe45	4.4	0.227	1	660559.85	989936.09
pe47	7.6	0.132	1.6	660288.29	990117.02
pe48	3.4	0.294	1.6	660052.66	990263.4
pe53	6.2	0.161	1.1	660475.68	990285.4
pe51	6.5	0.154	1.7	660715.41	990652.09
pe372	9.4	0.106	1.8	659544.91	989313.8
pe38	3.8	0.263	1.4	659646.93	989533.94
pe39	5.5	0.182	2	659817.3	989715.8
pe40	12	0.083	1.5	660027.65	989901.32
pe42	5.5	0.182	1.8	659895.77	989508.52
pe43	4	0.25	2.8	660271.53	989571.46

En la figura 6 se puede observar la distribución de las frecuencias promedio y mediante modelo de interpolación IDW utilizando QGIS, se elaboró el mapa de isoperiodos como podemos observar en la figura 7.

En el área del Casco Antiguo predominan suelos duros con periodos cortos teniendo como resultado una baja amenaza por amplificación, aunque existen zonas de rellenos, las estructuras están emplazadas en suelos con buen comportamiento ante sismos.

**Figura 5.**

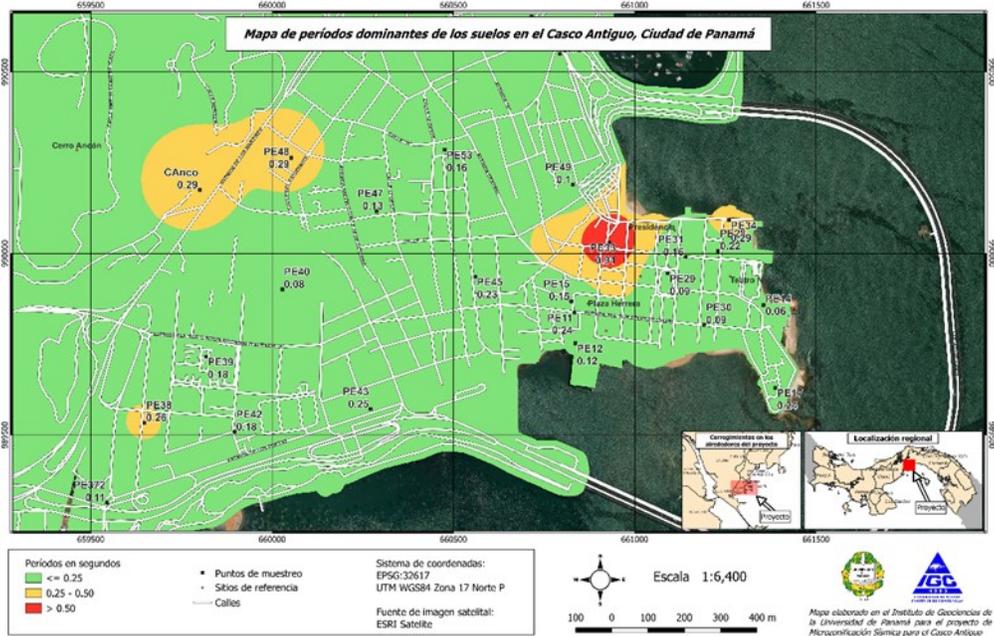
*Se puede observar la distribución de los puntos de muestreos*



**Figura 6.**  
Puntos de frecuencias promedio en la zona de estudio.



**Figura 7.**  
Modelo de periodos dominantes de suelo para la zona del Casco Antiguo, Panamá.



## CONCLUSIONES

Los resultados del estudio corroboran que el uso de los sismómetros banda ancha permite adquirir datos confiables para realizar el cálculo de los isoperiodos del suelo.

Se debe hacer estudios comparativos en Panamá de la señal de los instrumentos sismómetros y comparar los resultados obtenidos con los acelerómetros en la determinación de los periodos de suelo.

Geológicamente la zona presenta rocas sedimentarias, depósitos marinos y aluviales, además de zonas de rellenos como toda ciudad en desarrollo, pero en este estudio no se encontraron zonas de roca suave.

En la zona predominan periodos cortos, menores de 0.25 segundo. Los suelos asignados a estos periodos tienen bajas amplificaciones, comprenden roca dura. Se debe recopilar la información geotécnica de la zona de estudio y en especial hacer refracción sísmica o velocidad de onda de corte para poder hacer una clasificación de suelo, que al relacionar con los periodos predominantes permita determinar el efecto de sitio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlas Nacional de la República de Panamá (2016). Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG).
- Bazán, E. y Meli, R. (1992). Manual de diseño sísmico de edificios. Editorial Limusa S. A., México.
- Cara F.; Cultrera, G., Azzara, R.M., De Rubeis, V., Di Giulio, G., Giammarinaro, M.S. Tosi, P. Vallone, P., & Rovelli, A. (2008). Microtremor Measurements in the City of Palermo, Italy: Analysis of the Correlation between Local Geology and Damage. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, No. 3, pp. 1354–1372
- Chávez-García, F. J., & Montalva, G. A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y proyectos*, (16), 6-30.
- Duval, A. M., S. Vidal, J.-P. Méneroud, A. Singer, F. De Santis, C. Ramos, G. Romero, R. Rodríguez, A. Pernia, N. Reyes, and C. Griman (2001). Caracas, Venezuela, site effect determination with microtremors, *Pure Appl. Geophys.*, 158, 2513–2523.
- Gascón, P. (2009). Caracterización geofísica mediante estudio de ruido sísmico ambiental,

área metropolitana del estado Anzoátegui (Tesis Doctoral no publicada), Universidad Central de Venezuela.

Grajales-Saavedra, F., Mojica, A., Ho, C., Samudio, K., Mejía, G., Li, S., Almengor, L., Miranda, R., & Muñoz, M. (2023). Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios and Refraction Microtremor Analyses for Seismic Site Effects and Soil Classification in the City of David, Western Panama. *Geosciences*, 13, 287. <https://doi.org/10.3390/geosciences13100287>

Guardia, R., Camacho-Astigarrabia, E., Luque, N., Tapia, A., Echeverria, Y., & Anguizola, E. (2012). Modelación Probabilista del Riesgo Sísmico en la Ciudad de David, CAPRA Informe Técnico. Panamá. <https://doi.org/10.13140/2.1.2667.2167>

Kramer, S.L., & Stewart, J.P. (2024). *Geotechnical Earthquake Engineering*, 2nd. Ed. CRC Press.

Lachet, C., D. Hatzfeld, P.-Y. Bard, N. Theodulidis, C. Papaioannou, and A. Savvaidis (1996). Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1692 - 1703.

Lebrun, B., Hatzfeld, D. & Bard, P.Y. (2001). A site effect study in urban area: experimental results in Grenoble (France), *Pure Appl. Geophys.*, 158, 2543–2557.

Lermo S., J.; Rodríguez, M., & Singh, K. (1988). Observaciones de Microtemblores y su Aplicación en la Ingeniería Sísmica. *Revista Geofísica 128, IPGH*. 123-143.

Lermo, J. & Chávez-García, F.J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1574 - 1594.

Lermo-Samaniego, J., Camacho-Astigarrabia, E., Martinez-Gonzalez, J. A., Carbajal-Becerril, E., Luque, N. Tapia, A., Chichaco. E., Gil, J., Echeverria, Y., & Palma R. (2014). Microzonificación sísmica de la ciudad de Panamá, Panamá. Informe Técnico para el Centro de Coordinación para la Prevención de los desastres Naturales en América Central (CEPRENAC).

Nakamura, Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research, 30(1), 25-33. Recuperado de <http://www.rtri.or.jp/eng/>

Nakamura, Y. (1996). Real-time information systems for hazards mitigation. In Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico.

- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental ideas of Nakamura's technique and its applications. In Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand.
- Nogoshi, M. & Igarashi, T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). *Journal of Seismological Society of Japan*, 24(1), 26-40. Recuperado de Doi [https://doi.org/10.4294/zisin1948.24.1\\_26](https://doi.org/10.4294/zisin1948.24.1_26)
- Panou, A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P., Savvaidis, A., & Papazachos, C. (2005). Reliability of ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in urban environments: the case of Thessaloniki city (northern Greece), *Pure Appl. Geophys.* 162, 891–912.
- Ritta, R. J., Suárez, L. E., & Pando, M. A. (2012). Determinación del período fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral horizontal/vertical. *Mecánica computacional*, 31(8), 1399-1419.
- Rivera-Álvarez, Z. C., & Pérez-Aleman, H. A. (2019). Evaluación de los efectos de sitio a partir de la razón espectral h/v de microsismos en zonas aledañas a la bahía de Santiago de Cuba. *Ciencia en su PC*, 1(4), 1-15.
- Schmidt-Díaz, V., & Esquivel-Salas, L. C. (2023). Período fundamental y clasificación de sitios en el cantón Central de San José (Costa Rica) usando la técnica H/V. *Revista geológica De América Central*, 68, 1–17. <https://doi.org/10.15517/rgac.2023.55170>
- Tenorio, C. (1997). Site Response Evaluation: A review of the problem Involved, Estimation Techniques, and Nakamura's Single Station Method. M. Sc. Thesis, Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Norway.
- Teves-Costa, P., Almeida, I. M. & Silva, P. L. (2001). Microzonation of Lisbon: 1D theoretical approach, *Pure Appl. Geophys.* 158, 2579–2596.
- Uyanık, O., Öncü, Z., Uyanık, N. A., & Ekin, N. (2024). Seismic microzonation and geotechnical modeling studies considering local site effects for İnegöl Plain (Bursa-Turkey). *Earth and Space Science*, 11, e2023EA003460. <https://doi.org/10.1029/2023EA003460>
- Yamazaki F., & Ansary, M. A. (1997). Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization. *Earthq. Eng. and Struc. Dyn.*, 26, 671-689.