



Caracterización de periodos de suelos y estimación del efecto de sito en el distrito de Arraiján, Provincia de Panamá Oeste, Panamá

Characterization of Soil Periods and Estimation of Site Effects in the District of Arraiján, Panama Oeste Province, Panama

Katherine M. Flores,

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

katherine-m.flores@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0002-1999-6429>

Néstor Luque

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

nestor.luque@up.ac.pa

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

Javier Lermo,

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

jlermoS@iingen.unam.mx

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

Héctor Pineda

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

hector.pineda-s@up.ac.pa

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

Patricia Camarena

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá.

patricia.camarena@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0009-6758-0322>

Ariadna Flores

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Panamá.

ariadna.flores@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0002-4724-542X>

Fecha de recepción: 4 de abril de 2025

Fecha de aceptación: 25 de abril 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7660>

RESUMEN

Los sismos constituyen una de las amenazas geológicas más sensitivas ya que, a nivel mundial tiene un mayor potencial destructor (Benito Oterino, 2013). El rápido crecimiento urbano, impulsado por la creciente demanda

habitacional, ha favorecido la expansión de asentamientos hacia zonas que carecen de un plan de ordenamiento territorial (INEC, 2023), y pueden estar expuestas a una amenaza geológica, esta ausencia de planificación ha generado el interés de realizar investigaciones que permitan caracterizar las condiciones del terreno, para ello se planea un análisis de las vibraciones ambientales empleando la técnica de Nakamura H/V (Nakamura, 2019) utilizando sismómetros de banda ancha, identificando zonas con posible amplificación local de ondas, junto con la evaluación de las características geotécnicas de la zona, que abarca materiales desde el Oligoceno hasta el Cuaternario (Cowan et al., 1998; García, 2010; Rockwell et al., 2010). Se han identificado en las giras de campo diversos tipos de rocas, suelos residuales y coluviales, cada uno con características específicas de meteorización y composición.

El proyecto se centró en la recopilación de datos de 40 puntos de muestreo con sismómetro de banda ancha, recolección de suelos para identificar propiedades geotécnicas y geofísicas, análisis de perforaciones realizadas en construcciones dentro del área de estudio, con el objetivo de elaborar un modelo estratigráfico que será utilizado en DEGTRA (Lermo & Chávez-García, 1994). En consecuencia, para darle un valor de detalle se incorporó un histograma de sismicidad un total de 213 eventos sísmicos registrados por el Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá durante el periodo comprendido entre 2016 y 2023, con el fin de respaldar la evaluación de la actividad sísmica.

PALABRAS CLAVE

Ondas sísmicas, dinámica de suelos, Geotecnia, Panamá

ABSTRACT

Earthquakes represent one of the most significant geological hazards, as they possess the highest destructive potential worldwide (Benito Oterino, 2013). Rapid urban growth, driven by increasing housing demand, has led to the expansion of settlements into areas lacking territorial planning (INEC, 2023), which may be exposed to geological hazards. This absence of planning has sparked interest in conducting investigations aimed at characterizing ground conditions. To this end, an analysis of ambient vibrations is proposed using the Nakamura H/V technique (Nakamura, 2019) with broadband seismometers, to identify areas with

potential local wave amplification, along with the assessment of the geotechnical characteristics of the zone, which includes materials ranging from the Oligocene to the Quaternary (Cowan et al., 1998; García, 2010; Rockwell et al., 2010). Field campaigns have identified various types of rocks, residual soils, and colluvial deposits, each exhibiting specific weathering and compositional characteristics.

The project focused on the collection of data from 40 sampling points using broadband seismometers, soil sampling to identify geotechnical and geophysical properties, and the analysis of borehole data from constructions within the study area, with the objective of developing a stratigraphic model to be implemented in DEGTRA (Lermo & Chávez-García, 1994). Consequently, to enhance the level of detail, a seismicity histogram was incorporated, comprising a total of 213 seismic events recorded by the Institute of Geosciences of the University of Panama during the period between 2016 and 2023, in order to support the assessment of seismic activity.

KEYWORDS

Seismic waves, soil dynamics, Geotechnics, Panama

INTRODUCCIÓN

A partir del terremoto de Michoacán, México de 1985 se reconoció el factor fundamental que juegan las condiciones locales del terreno en la severidad de los daños (Campillo et al., 1985) Los estudios de amplificación sísmica se realizan como un insumo para una mejor planificación urbana eficiente y segura (Tallini et al., 2024). En nuestro país los planes de planificación territorial pueden ser escasos o inexistentes, lo que conlleva un surgimientos de asentamientos espontáneos (De León, 2023), algunos de los cuales se ubican en zonas sísmicamente activas. Por lo tanto, es crucial identificar los efectos del sitio en las comunidades analizando las características específicas del suelo. Esta información es vital para el desarrollo de modelos de construcción que ayuden a reducir las vulnerabilidades asociadas a este riesgo. Para dar con este análisis se aplicó la técnica H/V (Coban, 2024), sondeos MASW, así como también perforaciones mecánicas de recuperación continua. Estas técnicas fueron realizadas en la ampliación a 8 carriles de la vía Roberto Chiari, la línea 3 del metro de Panamá en los corregimientos de Arraiján Cabecera, Veracruz, Burunga, Cáceres, Provincia de Panamá Oeste, Panamá; Posteriormente se unificaron los criterios, para luego evaluar en conjunto los insumos (Pistillo et al., 2024); seguidamente identificar familias espectrales distintas, agrupadas por sus características de amplificación en diversos rangos de frecuencia (Toala et al., 2024). Se elaboraron mapas de periodos y amplitud relativa para identificar zonas de mayor amenaza, utilizando el programa ArcGIS (ESRI, 2021) basándose en familia espectral, variabilidad espacial (Rivas Orellana, 2024).

Para la recopilación de datos, se desplegaron sismómetros Trillium Compact de 120s, orientados al norte y colocados en condiciones controladas para evitar interferencias. Estos dispositivos se utilizaron en un área de 7.39 km², con una distribución precisa de puntos de medición a menos de 1 km de distancia entre sí. Se prestó especial atención en evitar sitios con vegetación densa, suelos saturados o estructuras cercanas que pudieran afectar las mediciones siguiendo la guía sugerida por el proyecto SESAME (2004), El equipo fue protegido contra condiciones meteorológicas adversas mediante un empaquetado especializado.

ANTECEDENTES

Técnica de Nakamura

El método de Nakamura (1989), para estimar el efecto de sitio en estudios sísmicos, propuso que el cociente entre las componentes horizontal y vertical de la respuesta sísmica en el

dominio frecuencial puede ser un buen indicador del efecto de sitio (Nakamura, 2019). Este método, aplicado inicialmente a micro temblores en áreas urbanas de Japón, se ha popularizado debido a su fiabilidad, rapidez al realizar las mediciones su tiempo es corto y economía por tener costos bajos en equipos.

La primera definición de la relación H/V es una amplificación obtenida usando la razón espectral de la componente horizontal respecto a la vertical (Schmidt, 2016). La técnica de Nakamura consiste en la determinación de los espectros de Fourier de las componentes horizontales y de la vertical de registros de vibraciones ambientales, obtenidos con un velocímetro o un acelerógrafo triaxial (Nakamura, 2000).

El efecto de las ondas Rayleigh es visible principalmente en el movimiento vertical, y por tanto se puede definir la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (1)$$

S_{VS} : Espectro vertical de amplitudes de Fourier medido en la superficie del suelo (denotada como S).

S_{VB} : Espectro vertical de amplitudes de Fourier medido en la base del nivel de suelo (denotada como B).

Si el valor es de uno indica que no hay presencia significativa de ondas Rayleigh, sugiriendo que las componentes verticales y horizontales de las ondas sísmicas se comportan de manera similar, pero si el valor es menor a uno indica una mayor presencia de ondas Rayleigh. En este caso, la componente vertical del espectro es relativamente baja en comparación con la componente horizontal, reflejando el impacto de las ondas superficiales en el suelo (Sandoval & Vera, 2013).

Nakamura propone que el efecto de las ondas Rayleigh se manifiesta principalmente en el movimiento vertical. Para corregir este efecto, se utilizan dos razones espectrales: la razón de la componente vertical y la función de transferencia modificada para las ondas Rayleigh. La razón vertical se define como la relación entre el espectro vertical en la superficie y en la base del nivel de suelo. Esta razón ayuda a identificar la presencia de ondas Rayleigh, mientras que la función de transferencia modificada considera el efecto de estas ondas para proporcionar una estimación más precisa del efecto de sitio (Sandoval & Vera, 2013).

La ecuación de función de transferencia se muestra de la siguiente manera:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (2)$$

Nakamura propuso la siguiente ecuación:

$$S_M = \frac{S_T}{E_s} = \frac{S_{HS} * S_{VB}}{S_{HB} * S_{VS}} \quad (3)$$

Espectro Vertical en la Superficie (S_{VS}): Representa la amplitud de las ondas verticales en la superficie del suelo. Las ondas Rayleigh, al ser ondas superficiales, tienen una mayor influencia en el movimiento vertical cerca de la superficie. Por lo tanto, captura el efecto de estas ondas en la capa superior del suelo (Johnson & DeGraff, 1988).

Espectro Vertical en la Base (S_{VB}): Representa la amplitud de las ondas verticales en la base del nivel de suelo, justo sobre el sustrato rocoso. En la base, el efecto de las ondas Rayleigh es menos prominente, y proporciona una medida de cómo las ondas verticales se comportan en el sustrato o en la parte inferior del perfil del suelo (Johnson & DeGraff, 1988).

Hay desafíos en la estimación de la frecuencia natural del suelo utilizando registros de ruido ambiental. Destacan algunas investigaciones que el proceso de estimación es complejo debido a la presencia de ruidos impulsionales, que son cortos pero intensos, y que la técnica actual requiere una eliminación manual de estos ruidos para obtener una señal más clara. Esto ralentiza el proceso y carece de un criterio estandarizado (Sandoval & Vera, 2013). Los métodos existentes para automatizar la eliminación de ruidos, como los algoritmos *anti-trigger*, tienen limitaciones, ya que se basan en umbrales definidos arbitrariamente. Además, hay una falta de estudios sobre el impacto de estos ruidos en la precisión de la estimación espectral.

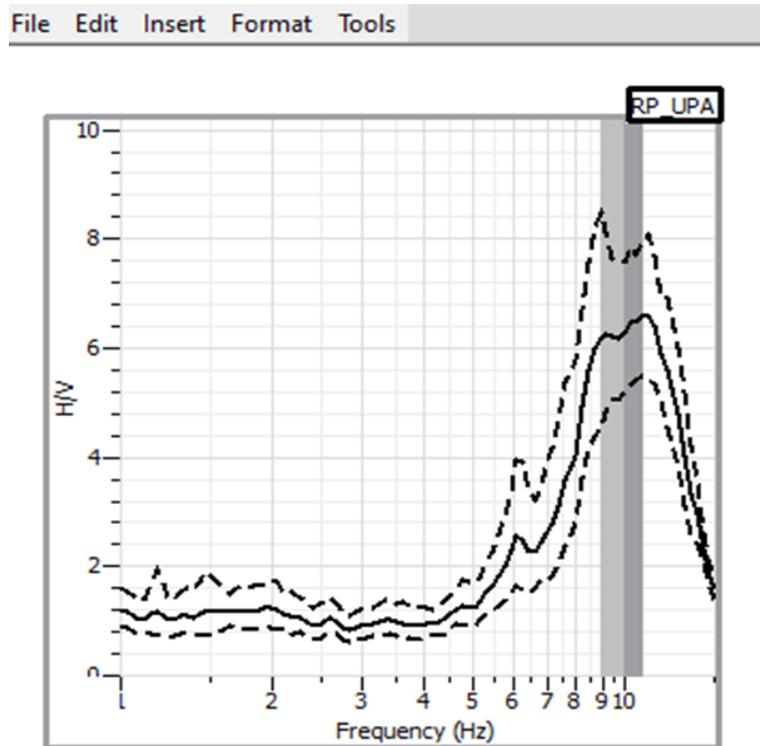
Efecto de sitio

Los suelos blandos, debido a su baja rigidez, tienen la capacidad de amplificar las ondas sísmicas, lo que incrementa el riesgo de daños en las estructuras. Los estudios de riesgo sísmico se enfocan en evaluar y caracterizar estos suelos para predecir cómo se comportarán durante un sismo. De acuerdo con la teoría, la transformada de Fourier juega un papel fundamental en este análisis. Si el cálculo de la frecuencia supera 3 en amplitud, se observa una amplificación relativa en un periodo específico, indicando una mayor vulnerabilidad. Por el contrario, si la frecuencia es inferior a 3 H/V, la energía se disipa, reduciendo el riesgo de amplificación.

Esto queda evidenciado en la *Figura 1*, que muestra una amplificación relativa para una frecuencia de 10 Hz, en campo se puede apreciar que es una zona de deposición de material coluvial, para disminuir la contaminación industrial se toman más de 10 ciclos significativos tener una disminuir la incertidumbre.

Figura 1.

Amplitud vs Frecuencia resultante en el punto PP-6



Dinámica de suelos

Las señales procesadas en H/V permiten visualizar y comparar las características del terreno en diferentes zonas. facilitando la identificación de zonas con características geotécnicas-geológicas equivalentes, la dinámica de suelos considera los efectos locales que pueden amplificar o modificar la respuesta sísmica en función de la estructura del subsuelo y las condiciones topográficas.

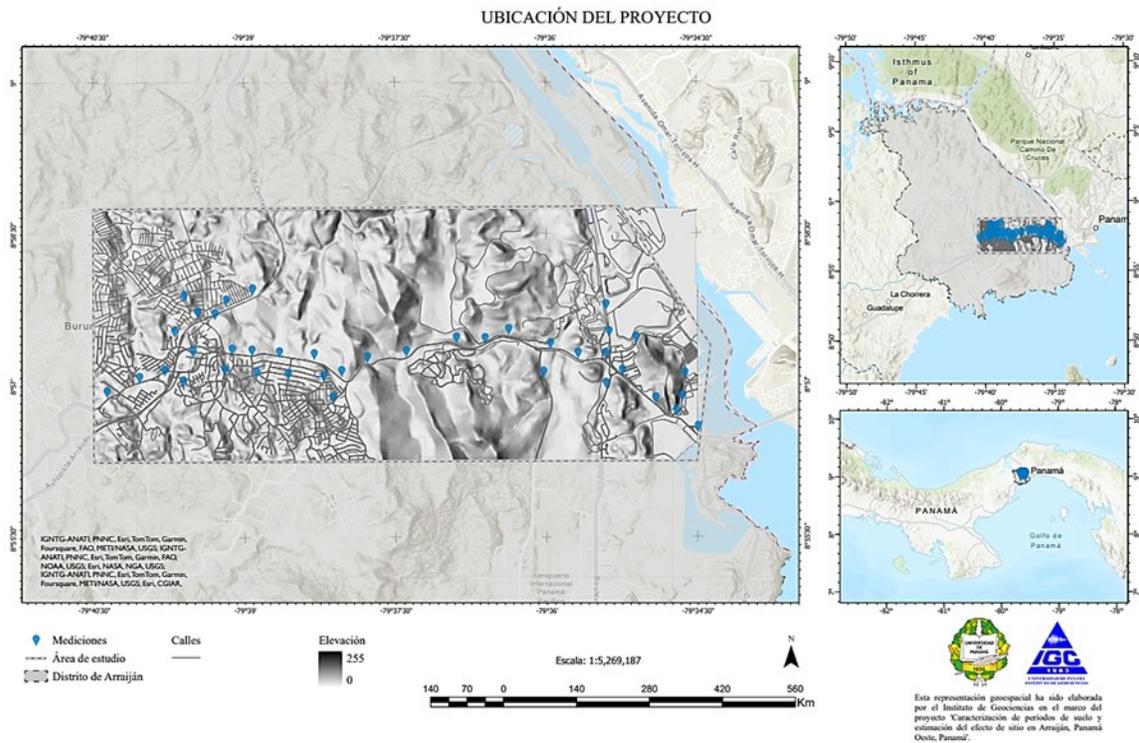
ZONA OBJETO DE ESTUDIO

El objetivo general de este trabajo es determinar el periodo y amplificación de ondas sísmicas

en áreas de Burunga, Arraiján, y en la carretera Interamericana tramo Arraiján – Puente de las Américas, mediante el método de Nakamura H/V. Finalmente cartografiar zonas por isoperiodos y amplificaciones relativas.

Figura 2.

Localización del área de estudio.



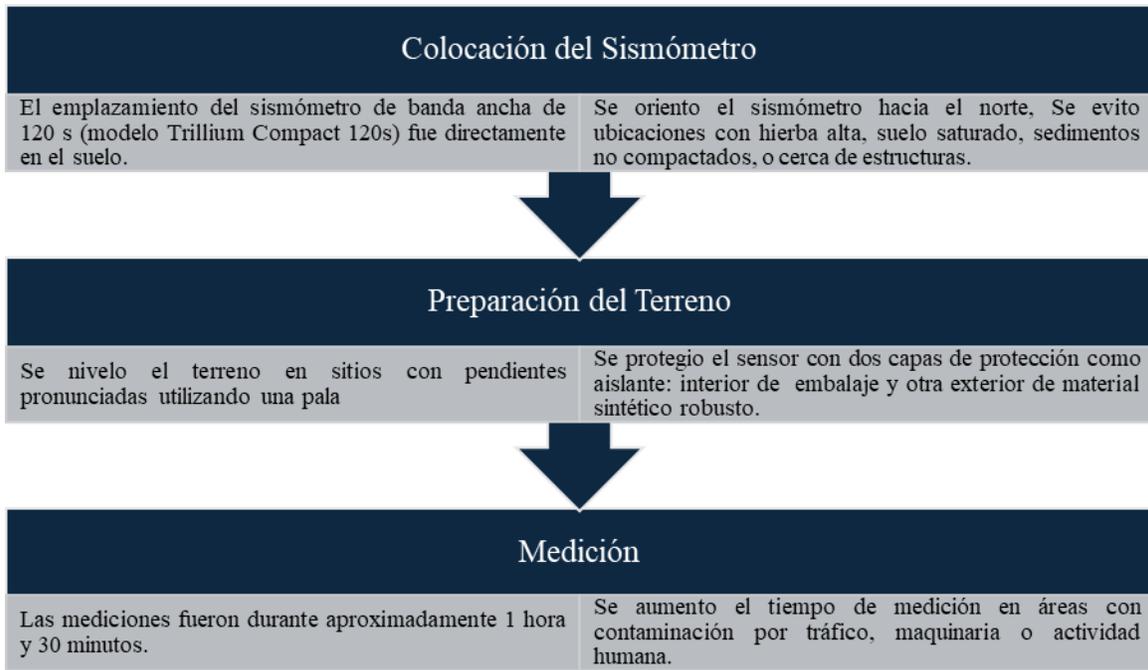
METODOLOGIA

Obtención de datos

Los datos fueron obtenidos mediante giras de campo realizadas en las que se midieron 40 puntos en diversas zonas del distrito de Arraiján, utilizando sismómetros de banda ancha Trillium compact de 120 s.

Figura 3.

Diagrama que indica el método de obtención de vibraciones ambientales



Procesamiento de señales para cálculo de H/V:

Para el procesamiento de los datos se utilizó el programa Geopsy versión 2.9.0

Con el propósito de obtener al menos 10 ciclos significativos en cada ventana se debe cumplir la siguiente condición: $F_0 > 10 / L_w$.

Donde F_0 corresponde a la frecuencia fundamental del lugar donde se toman los datos, medida en Hz y L_w al ancho de la ventana, en segundos (Ulloa, 2018).

Figura 4.

Cuadros de diálogos de la medición PP-17 con las ventanas estacionarias para el cálculo de las transformadas de Fourier en GEOPSY.

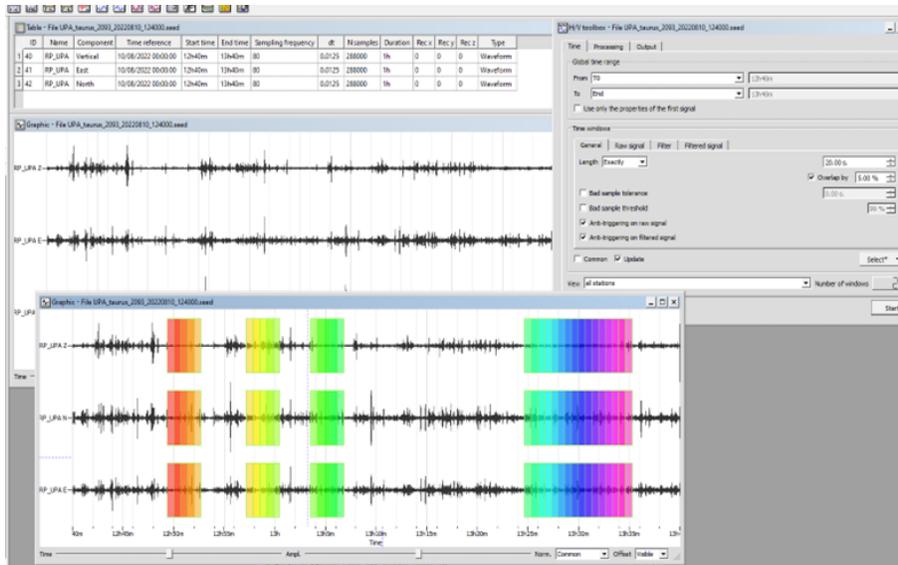
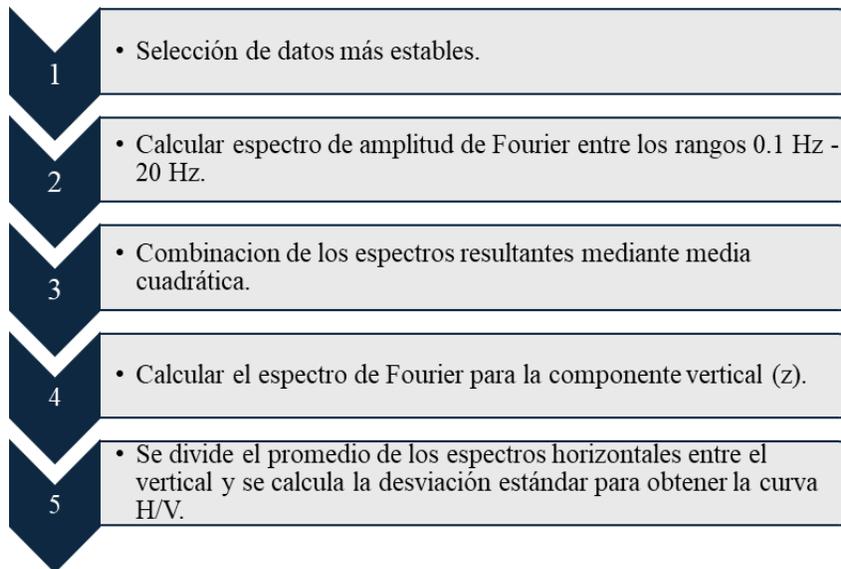


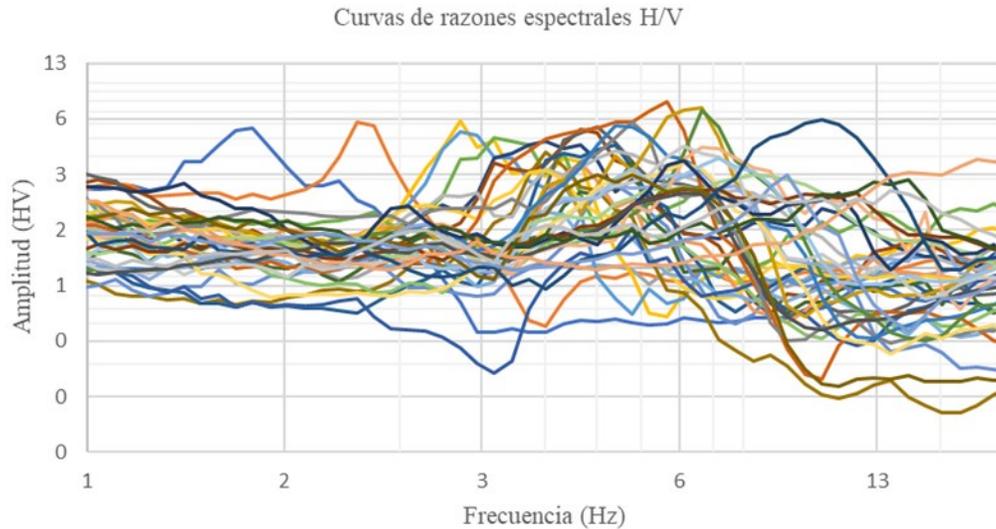
Figura 5.

Diagrama del procesamiento de los datos



Una vez calculadas todas las curvas H/V de los 40 puntos medidos en campo, los datos se grafican en Excel, donde se comparan las relaciones de amplitud vs frecuencia.

Figura 6.
Curvas resultantes de 40 puntos de medición.



Se utilizó el software GEOPSY que fue creado durante el proyecto europeo SESAME, ha proporcionado las herramientas para el procesamiento de vibraciones ambientales con caracterización de sitio (Sandoval & Vera, 2013).

La separación de las curvas espectrales permite identificar aquellas curvas con amplitudes similares en un rango específico de frecuencias, lo que facilita la clasificación de suelos con características mecánicas similares por este tipo de agrupación de curvas ya identificadas en un área cercana, dado que la amplificación de las ondas sísmicas depende de la frecuencia fundamental del suelo, esta separación ayuda a distinguir zonas con mayor o menor vulnerabilidad a la amplificación. Al agrupar las curvas en función de su amplitud, se logra una modelación geotécnica más precisa, adaptada a los diferentes comportamientos del terreno.

RESULTADOS

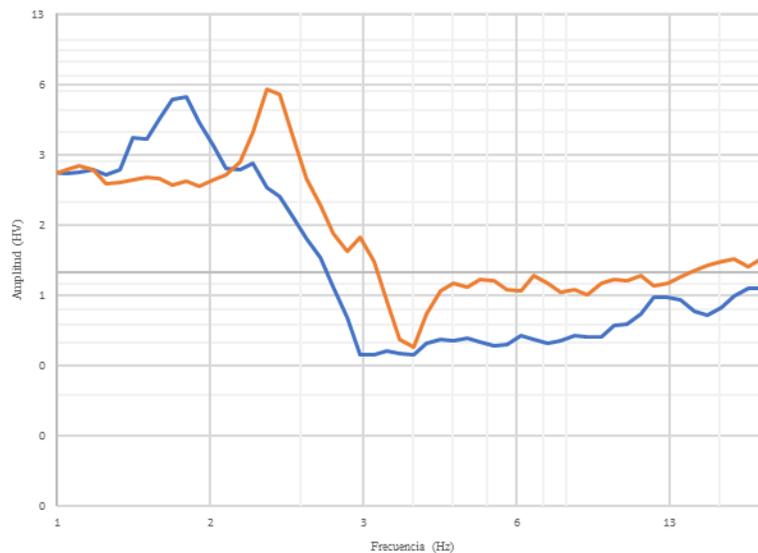
Luego de realizar el procesamiento de los 40 puntos, se procedió a analizar las curvas resultantes agrupándolas por rangos de frecuencia y amplificaciones relativas (denominadas familias espectrales).

- 1- Familia 1 (0.8 Hz - 2.50 Hz): Esta grafica del grupo 1 muestra picos de amplificación hasta 6 veces en frecuencias bajas entre los rangos de 0.8 Hz a 2.50 Hz (1.2 s a 0.4 s), puede estar relacionado a depósitos superficiales constituidos principalmente de

- 2- suelos que varían entre los limos plásticos a arcilla con espesores entre los rangos de 25 a 30 metros profundidad, adicional mediante el análisis de mecánica de suelo se determinó que los suelos presentes en esta medición tenían características LL 70 %, LP 39 %, IP 31 % y una densidad específica de 2.73 g/cm^3 lo que indica un comportamiento de suelo blando y altamente plástico definido en las muestras de laboratorio como un Limo plástico (MH) en los rangos de A-7-5. Estas condiciones favorecen a las amplificaciones sísmicas a baja frecuencia. Sin embargo, este grupo se mantiene con pocas curvas a interpolar, por tanto, se recomienda aumentar la densidad de puntos en las áreas cercanas para disminuir el margen de error; la función de transferencia se muestra en la figura 7.

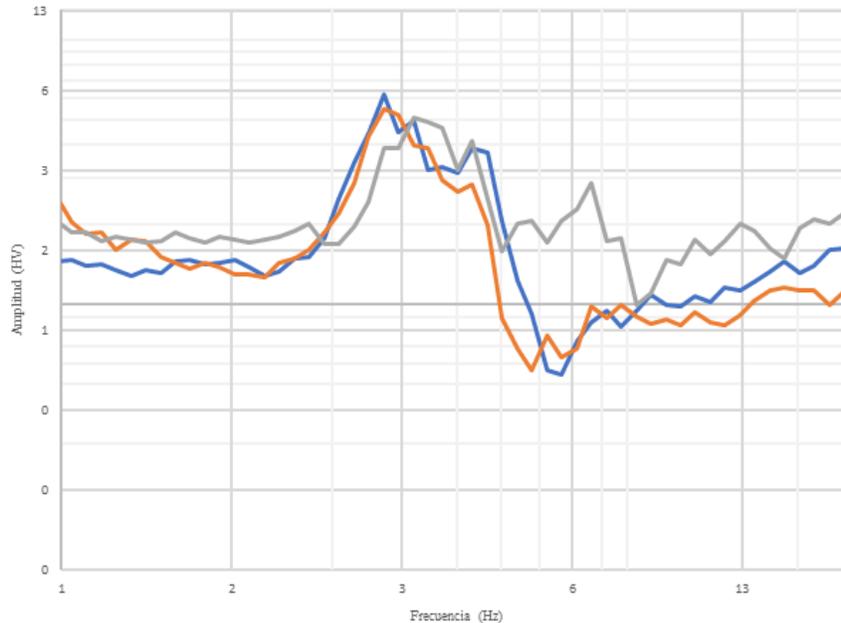
Figura 7.

Curva resultante de familia espectral 1.



- 3- Familia 2 (2.5 Hz – 3.5 Hz): En este grupo muestra picos de amplificación aproximadamente hasta 6 veces en frecuencias bajas entre los rangos de 2.5 Hz a 3.5 Hz (0.4 s a 0.29 s), principalmente estos suelos varían entre los limos a arcillas media a alta plasticidad con espesores entre los 5.0 a 10.0 metros profundidad, adicional mediante el análisis de laboratorio se determinó que los suelos presentes tenían características LL 69 %, LP 33%, IP 37% y una densidad específica de 2.72 g/cm^3 lo que indica un comportamiento de suelo blando y plástico definido en las muestras como una arcilla de alta plasticidad (CH) en los rangos de A-7-5. Estos espesores superficiales de poco espesor indican que este sitio parece ser susceptible a un efecto de amplificación; la función de transferencia se muestra en en la figura 8.

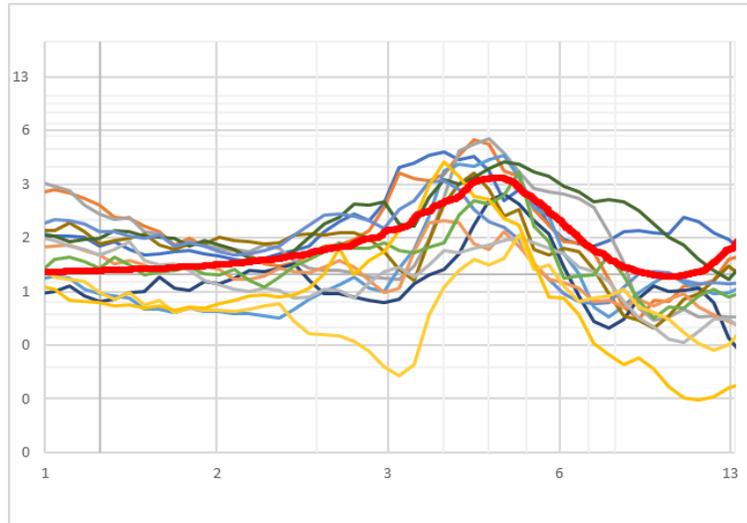
Figura 8.
Curva resultante de familia espectral 2.



- 4- Familia 3 (3.0 Hz - 6.0 Hz): Este pico se ubica en la banda de 4.0Hz a 6.0Hz y presenta amplificaciones mayores a 5, lo que indica una alta respuesta del suelo a las ondas en este rango de frecuencia. Además, esta familia cuenta con un gran número de mediciones como se muestra en la figura 9, lo que proporciona una mayor confiabilidad y precisión en la evaluación del comportamiento de este grupo (0.3 s a 0.16 s), mediante el análisis de laboratorio se determinó que los suelos presentes en este grupo tenían características min *LL* 33 %, max *LL* 67 % prom *LL* 50 %, min *LP* 24 %, max *LP* 43 % prom *LP* 32 %, *IP* 17% y una densidad específica de 2.66 g/cm³ lo que indica un comportamiento de suelo blando y plástico definido en las muestras como limo plástico en su mayoría entre mayor sea la profundidad aumenta el porcentaje arena, adicional arcillas de alta plasticidad entre los rangos de A-4, A-7-5, A-7-6, como presenta varias curvas para hacer un modelo estratigráfico en Degtra, se realizó una función de transferencia quedando resuelta en la figura 9.

Figura 9.

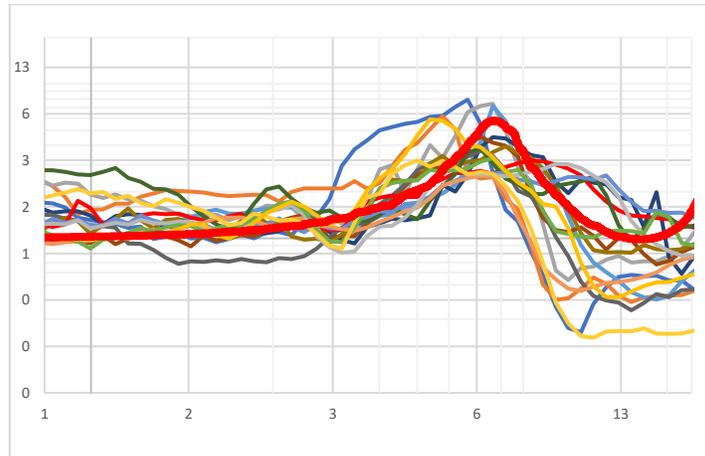
Comparación de espectros de la familia 3 con la respuesta del modelo estratigráfico del sitio (línea roja).



- 5- Familia 4 (6.0 Hz - 7.0 Hz): Se ha identificado esta familia por tener una mayor cantidad de curvas con un pico de amplitud definido entre las frecuencias de 5.50 Hz (0.1 s) a 7.0 Hz (0.1 s), alcanzando amplitudes de hasta 6 veces su valor. Mediante el análisis de laboratorio se determinó que los suelos en este grupo presentan características mecánicas similares a las de la familia 3, con una diferencia en densidad específica promediada de 2.62 g/cm³. Estos valores indican un comportamiento de suelo blando y plástico, compuesto mayormente por limo plástico a arcilla, adicional la meteorización en roca se presentan por fracturas conjugadas por donde los fluidos meteorización en mayor profundidad la roca. Dado que esta familia cuenta con varias curvas de respuesta, se realizó una función de transferencia basada en un modelo estratigráfico del sitio, cuya respuesta se muestra en la Figura 10.

Figura 10.

Comparación de espectros de la familia 4 con la respuesta del modelo estratigráfico del sitio (línea roja).



6- Familia 5 (7.0 Hz): El análisis revela que la familia 5 exhibe un comportamiento interesante en el rango de frecuencias de 0.8 Hz hasta 7.90 Hz, con amplificaciones por debajo de 2.50, lo que sugiere la presencia de un perfil geológico caracterizado por una baja amplificación. Sin embargo, a partir de los 8.0 Hz, se observa un aumento en las amplificaciones, lo que indica la existencia de cambios significativos en la estructura geológica en esa zona, sin embargo, no cuenta con suficiente información estratigráfica más allá de 4 metros de profundidad para realizar modelos. la función de transferencia se muestra en la figura 11.

Figura 11.

Comparación de espectros de la familia 4 con la respuesta del modelo estratigráfico del sitio (línea roja).

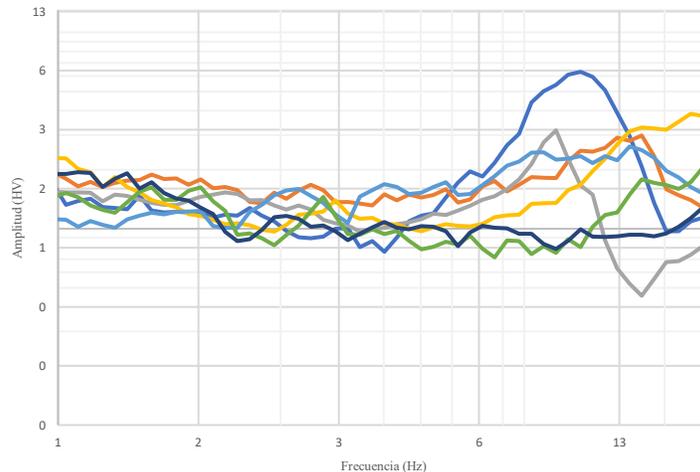


Tabla 1.
Coordenadas y parámetros de los puntos de medición

x	y	Nombre	Amplitud (H/V)	Periodo
-79.654893	8.96082042	PP-1	3.7	0.2
-79.657784	8.96113837	PP-2	4.3	0.2
-79.659993	8.96379591	PP-3	4.0	0.2
-79.653002	8.96308326	PP-4	6.7	0.2
-79.64865	8.96490311	PP-5	6.3	0.1
-79.661583	8.95796667	PP-6	6.2	0.3
-79.66325	8.95158333	PP-7	5.1	0.3
-79.667421	8.950393	PP-8	4.5	0.1
-79.6728	8.94801667	PP-9	3.0	0.1
-79.660132	8.949788	PP-10	1.7	0.2
-79.658541	8.954728	PP-11	4.2	0.2
-79.653288	8.95165105	PP-12	1.6	0.2
-79.65208	8.955014	PP-13	4.4	0.2
-79.648781	8.95482	PP-14	6.1	0.5
-79.648017	8.95117057	PP-15	3.7	0.2
-79.644237	8.954516	PP-16	7.9	0.2
-79.642782	8.950913	PP-17	3.3	0.3
-79.636913	8.950586	PP-18	7.1	0.1
-79.635336	8.94703108	PP-19	5.4	0.3
-79.62967	8.95365584	PP-20	2.8	0.2
-79.633925	8.951391	PP-21	3.8	0.2
-79.638472	8.954195	PP-22	5.4	0.2
-79.610148	8.956733	PP-23	3.2	0.1
-79.606253	8.958219	PP-24	7.9	0.1
-79.599334	8.955839	PP-25	1.9	1.1
-79.600482	8.95118	PP-26	2.0	0.2
-79.590124	8.949325	PP-27	6.1	0.2
-79.590112	8.954255	PP-28	3.2	0.1
-79.58961	8.957806	PP-29	4.5	0.2
-79.594761	8.954293	PP-30	3.3	0.1
-79.6149	8.956843	PP-31	3.2	0.2
-79.623209	8.954636	PP-32	5.8	0.2
-79.585135	8.956895	PP-33	3.9	0.1
-79.590119	8.962275	PP-34	3.8	0.2

-79.577085	8.95095452	PP-35	3.1	0.1
-79.577475	8.94721823	PP-36	2.6	0.1
-79.578442	8.944811	PP-37	2.7	0.1
-79.581855	8.94689741	PP-38	2.9	0.1
-79.574888	8.94215565	PP-39	5.7	0.7
-79.58742	8.95144504	PP-40	2.6	0.2

CONCLUSIONES

- Se establecieron cinco (5) grupos de familias espectrales en el área de estudio: Familia 1 (0.8 Hz a 2.5 Hz) amplificación 6; familia 2 (2.5 Hz a 4.0 Hz) amplificación > 6; familia 3 (4.0 Hz a 6.0 Hz) amplificación > 5; familia 4 (6.0 Hz a 7.0 Hz) la cual mostró dos regiones de amplificación una de 6 y la otra de 3 y; familia 5 (> 7.0 Hz) amplificaciones < 3.
- Las familias espectrales predominantes fueron la familia 3 y la 4. A estas se aplicó el modelo estratigráfico con base a ensayos MASW.
- Del análisis de los cocientes espectrales H/V se obtuvieron los periodos dominantes de los suelos y la amplificación, que permitieron elaborar un mapa de isoperiodos para la zona de estudio. Las zonas rojas (más vulnerables), corresponde a mayor amplificación de las ondas, se correlacionaron con suelos blandos, en su mayoría compuestos por limos y arcillas plásticas, roca muy fracturada disgregable, por lo general son zonas bajas, donde se acumulan sedimentos.
- Las zonas verdes (menos vulnerables), corresponden a baja amplificación de las ondas sísmicas, se correlacionaron con suelos con menor espesor de suelo y una roca dura RH-2 a RH-3, en lugares de colinas de poca altitud donde aflora roca, estratos rocosos superficiales.
- La tipología de las muestras recolectadas en campo en la zona tiene una clasificación granulométrica de suelos finos pasando más del 85% por el tamiz #200.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benito Oterino, B. (2013). *Geología, Terremotos y Riesgo Sísmico: Avances y Perspectivas*. Encuentros multidisciplinares No 45, Universidad Autónoma de Madrid, <http://www.encuentros-multidisciplinares.org/Revistan%BA45/Be1%E9n%20Benito.pdf>
- Campillo, M., Gareil J.C., Aki, K., & Sanchez-Sesma, F.J. (1989). [Destructive strong ground motion in Mexico City: Source, path, and site effects during great 1985 Michoacán earthquake](#) Bull. Seismo. Soc. of America 79 (6), 1718-1735

- Coban, K. H. (2024). Seismic site classification based on H/V spectral ratio from strong ground motion records: The urban areas of Bursa province. *Journal of Seismology*, 28(2), 321-344. <https://doi.org/10.1007/s10950-024-10206-7>
- Cowan, H., Machette, M. N., Haller, K. M., & Dart, R. L. (1998). *Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Panama and Its Offshore Regions* (p. 43). https://pubs.usgs.gov/of/1998/ofr-98-0779/OFR-98-779_508.pdf
- De León, M. J. (2023). La dinámica del espacio urbano en Panamá. variabilidad, crecimiento o desarrollo causas y consecuencias. *Cátedra*, 20, Article 20. <https://doi.org/10.48204/j.catedra.n23.a4189>
- ESRI. (2021). *How IDW works—ArcGIS Pro | Documentation*. ArcGIS PRO. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.9/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm>
- INEC. (2023). Superficie, población y densidad de población en la República, según provincia, comarca indígena, distrito y corregimiento: *Censos de 2000, 2010 y 2023* (p. 19). Instituto Nacional de Estadística y Censo. <https://www.inec.gob.pa/archivos/P0705547520231109105354CUADRO%2010.pdf>
- Johnson, R. B., & DeGraff, J. V. (1988). *Principles of Engineering Geology*. Wiley.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1994). Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5), 1350-1364. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840051350>
- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of Fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *The 12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Nakamura, Y. (2019). What Is the Nakamura Method? *Seismological Research Letters*, 90(4), 1437-1443. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
- Rivas Orellana, G. E. (2024). *Metodología para validar resultados de razones espectrales H/V considerando variabilidad espacial y temporal en un sitio*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/203741>
- SESAME. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. https://www.researchgate.net/publication/235623175_Guidelines_for_the_implementation_of_the_HV_spectral_ratio_technique_on_ambient_vibrations_measurements_processing_and_interpretation

- Tallini, M., Morana, E., Guerreiro, V., Di Giulio, G., & Vassallo, M. (2024). Seismic Microzonation Mapping for Urban and Land Sustainable Planning in High Seismicity Areas (L'Aquila Municipality, Central Italy): The Contribution of 2D Modeling for the Evaluation of the Amplification Factors. *Sustainability*, *16*(8401), 23.
- Toala, D. D., Frau, C. D., & Maldonado, N. G. (2024). Cociente espectral H/V: Una herramienta para la microzonificación sísmica de la zona urbana de la ciudad de Manta - Ecuador. *AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)*, *AJEA 37*, Article AJEA 37. <https://doi.org/10.33414/ajea.1737.2024>
- Nakamura, Y. (2019). *What Is the Nakamura Method?* *Seismological Research Letters* (2019) 90 (4): 1437–1443. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
- Sandoval, V. H., & Vera, M. J. (2013). *Estudio de la robustez de la Estimación espectral de la Técnica H/V de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos*. Tesis licenciatura , Universidad Austral de Chile, Valdivia. Recuperado el Junio de 2024, de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfcis218e/doc/bmfcis218e.pdf>
- Schmidt, D. (2016). *Aplicación de la técnica H/V en distintos emplazamientos a partir de la medición de vibraciones ambientales y sismos*. San Pedro de Montes de Oca: Revista Geológica de América Central.
- Ulloa, R. (2018). *Aplicación del método de Nakamura H/V, para estudiar el riesgo sísmico en la zona comprendida por el despliegue de estaciones IMAD*. Concepción, Chile.