



Características espectrales del ruido sísmico en un emplazamiento sujeto a fuentes de interferencia cultural

Spectral characteristics of seismic noise at a site subjected to cultural interference sources.

CARLOS TENORIO¹, DUNIA CRUZ², MANUEL RODRÍGUEZ³

Recibido: 11 de mayo de 2022 / Aceptado: 2 de junio de 2022

¹Departamento de Física de la Tierra,
Escuela de Física. Universidad Nacional
Autónoma de Honduras.
email: carlos.tenorio@unah.edu.hn

²Departamento de Física de la Tierra,
Escuela de Física. Universidad Nacional
Autónoma de Honduras.
email: duniaatereza@gmail.com

³Departamento de Física de la Tierra,
Escuela de Física. Universidad Nacional
Autónoma de Honduras.
email: mrodriguez@unah.edu.hn

Agradecimientos para Lidia Elizabeth
Torres Bernhard.

Special Thanks

RESUMEN

La observación de los tiempos de arribo de las ondas P y S en un sismograma puede verse afectada por ruido sísmico ambiental generado por múltiples fuentes naturales y artificiales. Con el fin de explorar la utilidad de un emplazamiento sujeto a altos niveles de interferencia, se calculó la Densidad Espectral de Potencia (PSD) en la banda de 1 a 40 Hz para la componente vertical del ruido sísmico registrado por un sismómetro de período corto Raspberry Shake 1D, con respuesta de amplitud plana entre 1 y 20 Hz. Se obtuvieron Valores de PSD para 56 ventanas de 15 minutos de ruido sísmico tomadas a las 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 horas durante una semana para explorar las variaciones diarias y horarias del ruido ambiental. Los resultados obtenidos indican la naturaleza antropogénica de la señal y la ausencia de fuentes naturales transitorias de ruido, como viento o lluvia. La comparación de la PSD de las ventanas de ruido con modelos estandarizados de ruido sísmico ambiental indican que los niveles de ruido sísmico de la estación no son mayores que los valores representativos de lapsos de actividad ambiental alta registrados por la mayoría de las estaciones sismológicas a nivel global. Nuestros resultados y revisión de las limitaciones que derivan del ruido propio instrumental y de la respuesta en frecuencia de estos sensores son relevantes para evaluar de forma rápida y preliminar los sitios de instalación de futuras estaciones.

ABSTRACT

Observations of P and S arrival times on a seismogram can be affected by ambient noise from a variety of natural and artificial sources. In order to assess the convenience of a site prone to high levels of cultural interference, we calculated the Power Spectral Density (PSD) of seismic noise in the frequency band between 1 and 40 Hz registered by the vertical component of a short-period Raspberry Shake 1D sensor, which has a flat amplitude response curve between 1 and 20 Hz. PSD curves were obtained for 56

* Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial 4.0 Internacional ©(i)®

* This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. ©(i)®

fifteen-minute windows of ambient noise occurring at 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, and 21 hours for an entire week with the aim of exploring the daily and hourly variations of noise amplitude. Our results are indicative of the antropogenic nature of the signal and the absense of transient sources of natural noise, like wind or rain. Comparison of PSD estimates with standardized models of seismic noise suggests that the ambient noise levels at our station do not exceed representative values of high ambient noise activity registered in seismological stations worldwide. Our results and review of the limitations imposed by the sensor self-noise and frequency response are relevant for a fast preliminary evaluation of potential sites for future stations.

PALABRAS CLAVES

Ruido sísmico, densidad espectral de potencia, ruido instrumental, sismómetros, estaciones sismológicas, respuesta en frecuencia.

KEYWORDS

Seismic noise, power spectral density, instrumental noise, seismometers, seismic stations, frequency response.

I | INTRODUCCIÓN

La identificación inequívoca de los arribos de las ondas P y S en un sismograma es indispensable para determinar la localización de los terremotos y las características del medio de propagación Kulhánek (2012); Stein y Wysession (2009). A partir de mediciones precisas de las amplitudes de las fases y de sus tiempos de arribo se obtienen estimaciones del hipocentro, de la magnitud, y del mecanismo focal de la fuente; información que permite determinar, por ejemplo, el tensor de tensiones y la estructura de velocidades en la corteza terrestre. Siendo la Tierra un sistema dinámico complejo, todo registro de una onda transitoria está sujeto a la adición de ruido generado por vibraciones terrestres que emanan de múltiples fuentes naturales (cambios de presión atmosférica, mareas, oleajes, viento) y artificiales (tránsito vehicular y peatonal, maquinaria, etc). Asimismo, inherente al equipo de medición existe una componente de ruido instrumental cuya amplitud debe estar por debajo de los niveles del movimiento del suelo que se desea registrar. Estos dos tipos de interferencia se suman a la señal de interés y contribuyen a limitar la capacidad de detección de las fases sísmicas en un emplazamiento dado.

El Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT) de la U.N.A.H, con apoyo del proyecto RIESCA de la Agencia Italiana de Cooperación para el Desarrollo RIESCA (2020) ha emplazado una red sismológica de sismómetros Raspberry Shake 1D y 3D Shake (2020) con el fin de fortalecer el monitoreo de la actividad sísmica local y regional. Los niveles altos de ruido cultural en áreas urbanas pueden ocultar los arribos de las fases en el sismograma en la banda de 1 a 10 Hz, un rango de frecuencias crucial para la localización de los terremotos Nakata, Gualtieri, y Fichtner (2019), de ahí la importancia de conocer las características del ruido sísmico ambiental en una ubicación potencial para una estación sismológica. Esta situación a su vez plantea el problema de ¿qué niveles de ruido instrumental y cultural son aceptables en cuanto a las características del sismómetro y el tipo de sismicidad que se desea registrar con él?

Los requerimientos de un sitio ideal para la instalación de una estación sismológica pueden ser muy exigentes en cuanto a las características geológicas, topográficas, climáticas y de presencia de ruido de fondo Bormann (2002); IGN (2002), sobre todo para instrumentos de banda ancha Uhrhammer, Karavas, y Romanowicz (1998), requiriendo un estudio de campo previo a la selección definitiva del lugar. Además, la instalación depende del tipo de sensor y de si el registro de datos es remoto o local Havskov y Alguacil (2004), pudiendo requerir la construcción de infraestructura de protección y conectividad a un costo adicional. A pesar de esos requerimientos, y considerando que los costos de exploración y operación en sitios ideales son onerosos, se plantea el uso de emplazamientos preliminares en oficinas de centros universitarios regionales, a fin de garantizar la seguridad del equipo y su conectividad a bajo costo a cambio de una cierta disminución en la capacidad de detección, debida a niveles de ruido propios de un entorno urbano.

El objetivo de este estudio, por consiguiente, es evaluar la viabilidad de un emplazamiento propenso a sufrir altos niveles de interferencia cultural (tránsito cercano de personas, vibraciones estructurales del edificio y aparatos cercanos, vehículos, etc). La banda de frecuencia que nos interesa, por tanto, está entre 1 y 40 Hz; rango propio del ruido producido por actividad humana. En concreto, se eligió la estación piloto R909F EHZ dentro de una zona residencial de la ciudad de Tegucigalpa (figura 5) para procesar un conjunto de muestras de

15 minutos de ruido sísmico por cada hora de cada día de la semana (días no necesariamente consecutivos) y comparar sus espectros de densidad de potencia con los Nuevos Modelos de Ruido sísmico Alto y Bajo (NHNM y NLNM, respectivamente) de Peterson Peterson (1993).

En oposición al aspecto del ruido sísmico como interferencia aditiva no deseada sobre los sismogramas, el mismo ruido también puede considerarse como una señal de interés por derecho propio, y ha sido utilizado como tal en una gran variedad de estudios, por ejemplo, para investigar ciclos de acoplamiento entre la atmósfera, el océano y el fondo marino Rhie y Romanowicz (2004), para observar efectos del cambio climático sobre el ruido de fondo Bromirski (2009); Ebeling (2012) o para comprobar la disminución de los niveles de ruido cultural durante períodos de confinamiento debido a la pandemia global de COVID19 Lecocq y cols. (2020). Sin embargo, dado que el espectro del ruido sísmico abarca desde períodos tan pequeños como 0.1 s hasta 130 s, Nakata y cols. (2019), la respuesta en frecuencia del sismómetro Raspberry Shake 1D limita el tipo de estudios que puedan emprenderse con señales de ruido que no sean encubiertas por el propio ruido instrumental. Así, una revisión de las frecuencias propias de cada componente del ruido sísmico ambiental de la Tierra determinará la banda de aplicabilidad de este sistema para este tipo de estudios.

II | RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL Y MODELOS DE RUIDO NHNM Y NLNM DE PETERSON.

El espectro de ruido sísmico ambiental es muy extenso y varía desde períodos de 0.01s (frecuencias de 100 Hz) generadas por explosiones industriales registradas a distancias cortas Kulhánek (2012) hasta "zumbidos" de períodos largos, entre 30 y 500s (frecuencias menores que 0.03 Hz) producidos por el acoplamiento entre las perturbaciones oceánicas causadas por las tormentas y las plataformas continentales Nakata y cols. (2019); Webb (2007). Al ruido de frecuencias mayores a 0.5 Hz (períodos menores a 2 s) suele llamársele "microtremores", y para períodos más largos el término utilizado suele ser "microsismos", o "microtremores de período largo", véase, por ejemplo Yamanaka, Takemura, Ishida, y Niwa (1994). Los microsismos producidos por perturbaciones pielágicas Cessaro (1994); Longuet-Higgins (1950) pueden mostrar períodos de 1 a 10 s (frecuencias de 0.1 a 1 Hz) que coinciden con los períodos dominantes de las ondas P y S de eventos distantes Kulhánek (2012). Este ruido sísmico ambiental se propaga de forma muy eficiente en trayectos continentales a través de la capa granítica en forma de fases R_g y L_g Lermo y Chávez-García (1994) y su característica más saliente es la presencia de dos máximos que se han observado en todas las estaciones de banda ancha a lo largo del globo: el primero entre 10 y 16 s, llamado "primario", o pico de frecuencia única, y un segundo pico de mayor amplitud a períodos más cortos, entre 4 y 8 s, llamado "secundario", o pico de frecuencia doble McNamara y Buland (2004).

Para períodos cortos debemos hacer una distinción importante entre los microtremores producidos por fuentes naturales como corrientes de agua rápidas y el viento, que hace vibrar los árboles y estructuras acoplando esa energía hacia la tierra, y los microtremores producidos por fuentes artificiales (tráfico o maquinaria), los cuales excitan ondas de Rayleigh de período corto en la vecindad de las estaciones, aumentando el nivel de ruido entre 2 y 3 veces el nivel del ruido de fondo natural Hough y cols. (1992); Nogoshi (1978). Estas perturbaciones de naturaleza antropogénica se conocen como "ruido cultural", dominando el espectro de

ruido entre períodos de 0.1 y 1 s, (frecuencias entre 1 y 10 Hz) con una variación diurna muy pronunciada, del orden entre 10 y 20 dB Bormann (2002), influenciando así el importante rango de frecuencias donde ocurren las detecciones de eventos locales y telesísmicos, entre 0.5 y 20 Hz Bormann (2002); Nakata y cols. (2019).

En la Figura 1, reproducida de Nakata y cols. (2019), se muestran los principales componentes del espectro del ruido sísmico ambiental. Es práctica estándar en sismología representar el espectro del ruido como un espectro de densidad de potencia de aceleración $P_a(f)$, en unidades dB referidas a $1 (m/s^2)^2 / Hz$. El nivel de ruido es calculado como Havskov y Ottemoller (2010):

$$\text{Nivel de ruido} = 10 \log \left[P_a(f) / \left(m/s^2 \right)^2 / Hz \right] \quad (1)$$

Peterson (1993) construyó el Nuevo Modelo de Ruido Alto y Bajo, NHNM y NLNM, respectivamente, sustrayendo señales transitorias de los registros sísmológicos de 75 estaciones de la Red Sísmológica Global GSN distribuidas alrededor del mundo (líneas grises en las Figuras 1 y 3). De acuerdo a Peterson (1993), estos modelos no deben interpretarse simplemente como el registro más bajo de la estación más tranquila o el registro más ruidoso del sitio más activo, sino más bien como los valores más representativos de lapsos de quietud y de actividad alta para estaciones en escudos continentales. Estas curvas, por tanto, representan los límites esperados del ruido sísmico y se han convertido en el patrón contra el cual se evalúa el nivel de ruido en las estaciones sísmológicas alrededor del mundo Bormann (2002); Havskov y Ottemoller (2010). El Nuevo Modelo de Ruido Bajo NLNM, en particular, es extremadamente útil para evaluar tanto la calidad de un emplazamiento potencial para una estación como el desempeño esperado de un instrumento. A períodos cortos, menores de 2 s, un nivel de ruido dentro de un factor de 10 del NLNM se puede considerar muy bueno Bormann (2002).

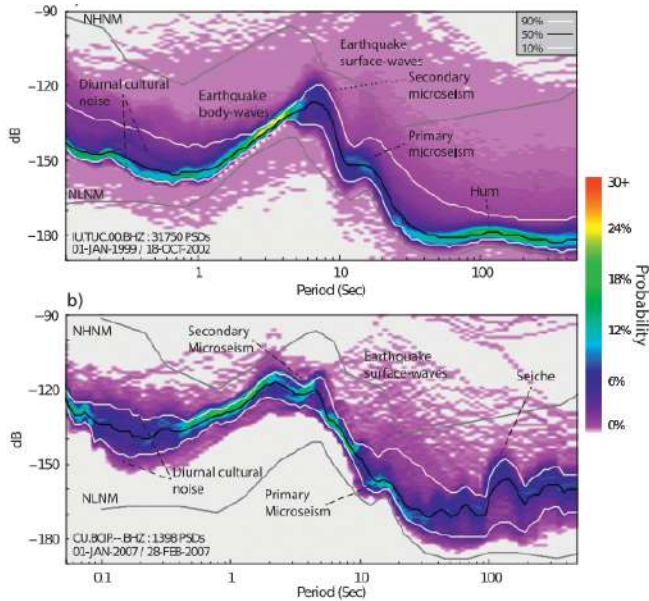


Figura 1: Principales componentes del ruido sísmico ambiental, reproducido de Nakata y cols. (2019). Nótese la banda del ruido cultural, de interés en este estudio, en el extremo izquierdo del gráfico, entre períodos de 0.1 y 1 s (frecuencias de 1 a 10Hz). Las líneas grises arriba y abajo representan las curvas del Nuevo Modelo de Ruido Alto y Bajo de Peterson (1993), NHHM y NLNM, respectivamente.

III | SENSOR RASPBERRY SHAKE 1D

El equipo Raspberry Shake 1D utilizado en este estudio consiste de un geófono vertical como sensor de velocidad, con período natural de 4.5 Hz extendido electrónicamente hasta 0.7 Hz, un convertidor analógico digital de 24-bit a 100 muestras/s con rango dinámico de 144 dB, y una computadora Raspberry Pi 3 modelo B. Shake (2020). Dado que no se dispone de equipo para realizar una calibración del sensor, se utilizó la respuesta nominal del sistema. En los cuadros 1 y 2 se listan los ceros y polos complejos de la respuesta nominal para nuestra estación R909F EHZ, tomados de los servicios web de la Federación Internacional de Redes Sismológicas Digitales, FSDN Suárez y cols. (2008). La ganancia del sistema es $G = 3.814066 \times 10^8$ a 5 Hz y el factor de normalización es $A_0 = 65354.1$.

Tabla 1: Ceros Complejos z_i (4) Raspberry Shake 1D R909F EHZ.

Parte real	Parte imaginaria
-4.511870e+00	3.080224e+02
-4.511870e+00	-3.080224e+02
0.000000e+00	0.000000e+00
0.000000e+00	0.000000e+00

La respuesta en frecuencia del sensor como sistema lineal invariante en el tiempo está dada por Havskov y Alguacil (2004):

Tabla 2: Polos Complejos p_i (6) Raspberry Shake 1D R909F EHZ.

Parte real	Parte imaginaria
-4.88255e+01	3.063452e+02
-4.88255e+01	- 3.063452e+02
-2.223508e+02	+ 1.180665e+02
-2.223508e+02	- 1.180665e+02
-3.328820e+00	+ 1.984022e+00
-3.328820e+00	- 1.984022e+00

$$H(\omega) = A_0 G \frac{(\omega - z_1)(\omega - z_2) \cdots (\omega - z_4)}{(\omega - p_1)(\omega - p_2) \cdots (\omega - p_6)} \quad (2)$$

La respuesta de amplitud $\log_{10} |H(\omega)|$ se observa en la Figura 2 en función de la frecuencia, y combina la respuesta del sensor y la ganancia del digitalizador. La parte plana está entre 0.8 y 30 Hz, que corresponde a la máxima amplificación que el instrumento le confiere al movimiento del suelo sin que exista distorsión en las amplitudes de sus características espectrales a esas frecuencias.

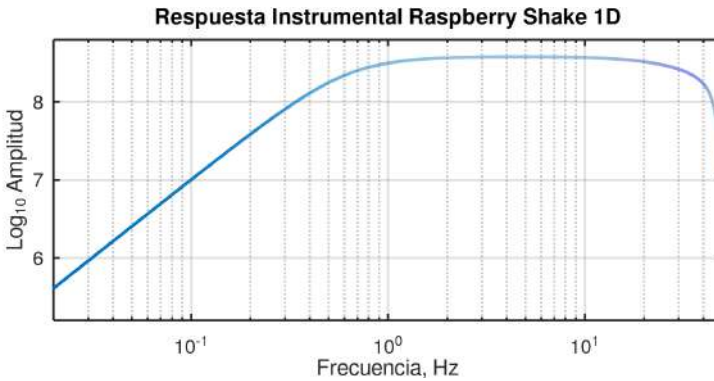


Figura 2: Respuesta instrumental nominal para el sistema Raspberry Shake 1D de la estación R909F EHZ utilizada en este estudio. La respuesta es plana aproximadamente entre 1 y 30 Hz, con puntos de -3 dB en 0.8 y 29 Hz.

IV | RUIDO PROPIO INSTRUMENTAL

El movimiento de suelo más pequeño capaz de ser registrado por un sensor está limitado por su propio ruido instrumental. Una parte de éste es generado por el movimiento Browniano térmico en la masa y el resorte y por lo general carece de importancia práctica Havskov y Alguacil (2004); Richards y Aki (1980), pero puede ser observable cuando la masa es menor que unos cuantos gramos Bormann (2002). El sensor Raspberry Shake 1D utiliza geófonos Racotech RGI-20DX con una masa de apenas 11g cuyo ruido Browniano podría acercarse al

nivel del New Low Noise Model NLNM de Peterson (1993), pero el factor limitante para la sensibilidad de todo sismógrafo es el ruido generado por el paso de la corriente a través de las bobinas de calibración y resistencias de amortiguamiento, al que se añaden las perturbaciones provenientes de componentes electrónicos como amplificadores y digitalizadores Bormann (2002), efectos éstos que tienden a incrementarse drásticamente a frecuencias bajas Havskov y Alguacil (2004). Cualquier señal que caiga a más de 5 dB bajo el ruido instrumental no será registrada y aquéllas que tengan amplitudes similares serán difíciles de descifrar Anthony, Ringler, Wilson, y Wolin (2019). El procedimiento para medir estos efectos, propuesto por Sleeman, Van Wettum, y Trampert (2006), está basado en análisis de correlación en varios canales de sensores diferentes, obtenidos a partir de una señal de entrada libre de transitorios, donde el movimiento real del suelo es coherente en los tres registros y la parte incoherente se atribuye al ruido propio instrumental. Los niveles de estas pruebas para el Raspberry Shake 1D se muestran en la Figura 3, tomada de Shake (2020).

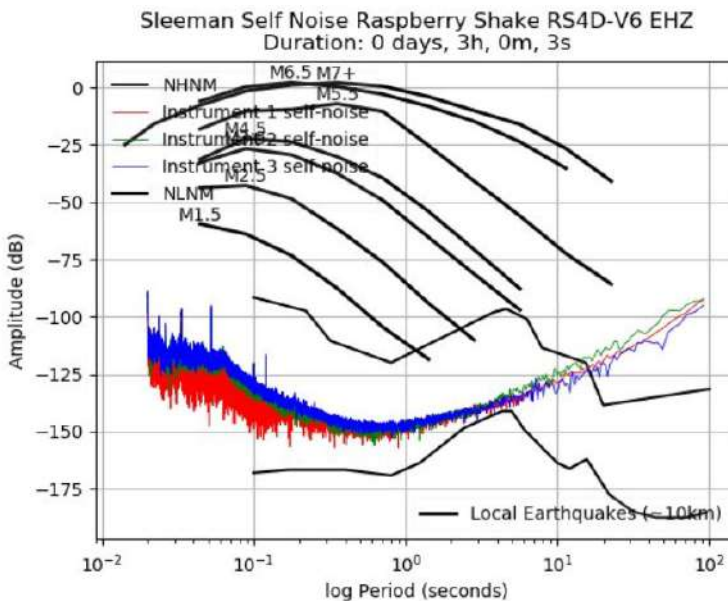


Figura 3: Ruido instrumental propio (prueba de Sleeman) para el Raspberry Shake RS4D V6 EHZ, tomado de Shake (2020). Observe el crecimiento de los niveles de ruido a partir de los 6s, dificultando estudios de ruido ambiental a períodos mayores.

En la Figura 3 vemos que el ruido instrumental del sistema Raspberry Shake 1D nunca está por debajo del Nuevo Modelo de Ruido Bajo NLNM de Peterson Peterson (1993). En la banda propia del ruido cultural (0.1 a 1 s o entre 1 y 10 Hz) dicho ruido siempre está cerca de 20 dB en exceso del NLNM, incrementándose hacia períodos cortos. El ruido en esta ventana de frecuencias se debe principalmente a la señal térmica del geófono, banda que también coincide con la parte plana de la respuesta del sistema (Figura 2), aunque cabe notar un pico notable a 36 Hz, llamado "tono inactivo" (*idle tone*), producido por el ruido interno del digitalizador, Anthony y cols. (2019), aparente en los gráficos de la Densidad Espectral de Potencia PSD,

véase por ejemplo la Figura ?? . El ruido instrumental es mínimo alrededor de 1 s, donde todavía supera al NLNM por al menos 10 dB y a partir de allí, yendo hacia períodos largos, vuelve a elevarse en forma casi simétrica por efecto de los semiconductores del digitalizador. En relación a las curvas de Peterson, vemos que el ruido solo es comparable al NLNM alrededor de los 4 s, período del pico secundario del ruido sísmico ambiental, separándose a partir de allí hasta superar incluso al Nuevo Modelo de Ruido Alto NHHM después de los 20 s. Si consideramos que, en la Figura 2, la amplificación del sensor es pequeña a períodos superiores a 10 s (frecuencias inferiores a 0.1 Hz), cualquier respuesta del sensor a una señal de ruido sísmico ambiental pequeña de períodos mayores que 20 s quedará ahogada bajo el ruido instrumental o, si la señal es detectable, el ruido contribuirá a sobreestimar su amplitud. Como ilustración, en la Figura 4 hemos calculado un estimado de la PSD promedio para el ruido de un día en particular, en la banda de períodos desde 0.0025 s a 100 s, donde vemos que a partir de los 3 s el sistema Raspberry Shake no es capaz de resolver ninguno de los picos de ruido macrosísmico observados en instrumentos de banda ancha alrededor del globo, y que para períodos mayores a 10 s la señal está completamente dominada por el ruido instrumental, en coincidencia con la Figura 3. Los altos niveles de ruido instrumental en los sistemas Raspberry Shake ha sido señalado por Anthony y cols. (2019) como causante de una sobreestimación en las magnitudes de los terremotos, al amplificar los registros del movimiento del suelo períodos superiores a 3 s (o frecuencias inferiores a 0.33 Hz).

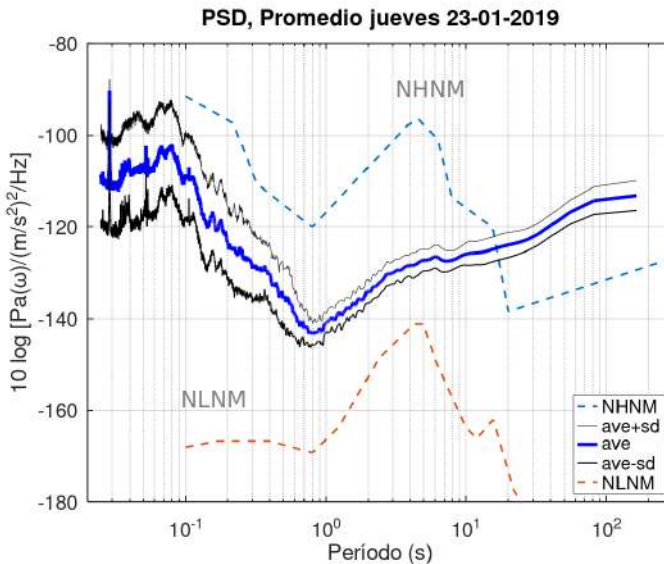


Figura 4: Promedio diario de la PSD, más menos desviación estándar, para el día jueves 23-01-2019 en la estación R909F EHZ. Nótese la dispersión en la banda de ruido cultural, abajo de 1s, y el predominio del ruido instrumental a partir de 3s

V | CARACTERÍSTICAS DEL SITIO, PREPARACIÓN DE LOS DATOS Y MÉTODO DE LA DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA.

La Figura 5 muestra la ubicación del sismógrafo Raspberry Shake 1D-RS-V6 de la estación AM.R909F EHZ en una zona residencial densamente poblada de la ciudad de Tegucigalpa (marcador amarillo). Las coordenadas del emplazamiento son $14^{\circ}02'27''$ N y $87^{\circ}10'49''$ O. Los señales de ruido pertenecen a los meses de enero y febrero de 2020, anteriores al confinamiento debido a la pandemia de la COVID19. El sitio se encuentra a 400 m del estacionamiento de un campus universitario y a 750 m del anillo periférico de Tegucigalpa, una de las arterias más transitadas de la ciudad. Aparte de estar ubicado dentro de un entorno elevado de ruido sísmico cultural, la estación yace a 520 m del cauce del río Jacaleapa, un torrente de curso alto que forma un valle en forma de V, de escaso caudal a inicios de la estación seca, el cual sería la principal fuente de ruido sísmico cercano de origen natural puesto que la cobertura boscosa en la zona es escasa o nula a 10km a la redonda, en el caso de haber vientos.



Figura 5: Ubicación del sismógrafo Raspberry Shake 1D-RS-V6 de la estación AM.R909F EHZ ($14^{\circ}02'27''$ N y $87^{\circ}10'49''$ O) en una zona residencial de la ciudad de Tegucigalpa (marcador amarillo) con alta densidad de población y tráfico vehicular.

En la figura 6 se muestra una señal de ruido típica utilizada para este estudio, de 15 min de duración, con el correspondiente espectrograma donde se observa un comportamiento estacionario de las características espectrales de la señal a lo largo del tiempo. El procedimiento implementado para realizar este estudio, que describiremos a continuación, está explicado con más detalle en IGN (2002) y en Nakata y cols. (2019). El método fue desarrollado por Peterson Peterson (1993), quien a su vez utilizó los procedimientos de Bendat y Piersol (2011) para el cálculo de la densidad espectral de potencia PSD, y se ha convertido en el estándar con el fin de comparar resultados locales de niveles de ruido sísmico con los niveles de amplitud de los modelos NHNM y NLNM de Peterson explicados en la sección 2.

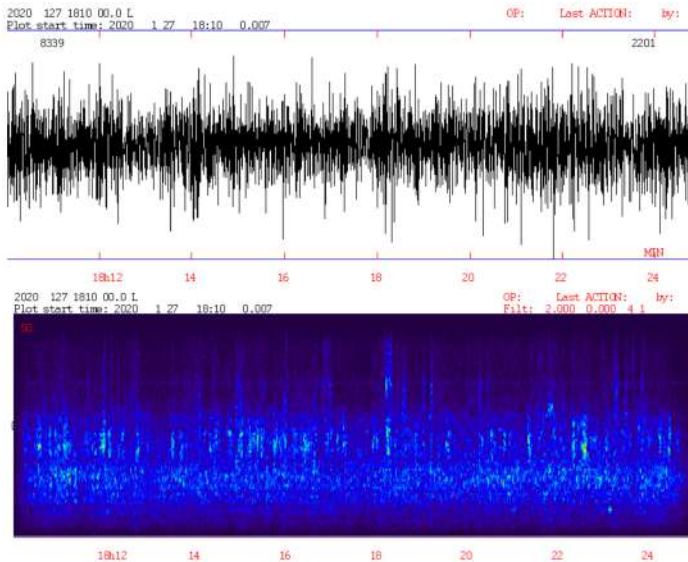


Figura 6: Ejemplo de una señal de ruido, de 15 min de duración, registrada el día lunes 27 de enero de 2020 a las 18 horas 10 min en el emplazamiento de este estudio, con el correspondiente espectrograma donde se observa un comportamiento estacionario de las características espectrales de la señal a lo largo del tiempo. La frecuencia de Nyquist para el espectrograma es de 50 Hz. Estas gráficas fueron producidas por el sistema de análisis sísmológico digital SEISAN Havskov y Ottemöller (1999)

Para un estudio rápido de viabilidad del emplazamiento estamos interesados en explorar únicamente la banda de 1 a 40 Hz propia del ruido cultural, utilizando datos recopilados para cada hora de cada día de la semana. Las señales escogidas deberán estar libres de interferencias transitorias como eventos sísmicos, picos, cortes, rampas, o pérdidas de datos. Cabe destacar que esta ventana de frecuencias coincide con la máxima amplificación constante en la respuesta instrumental del sísmógrafo Raspberry Shake (Figura 2), y por tanto, no se producirán distorsiones en la forma del espectro del movimiento del suelo. Como se observa en la figura 4, extender el análisis por fuera de esta banda implica recibir señales cada vez más fuertes del ruido propio del instrumento. Los días elegidos no fueron consecutivos de una sola semana, debido a la imposibilidad de encontrar ventanas que cumplan todos los requisitos en ciertos lapsos donde hay interrupciones en la toma de datos o fue impo-

sible encontrar períodos de calma a ciertas horas. Así, los días elegidos aparecen en el cuadro 3:

Tabla 3: Días y fechas de muestreo horario, estación R909F EHZ.

Día	Fecha
Domingo	02/02/2020
Lunes	27/01/2020
Martes	04/02/2020
Miércoles	29/01/2020
Jueves	23/01/2020
Viernes	31/01/2020
Sábado	25/01/2020

Cuando la longitud de una serie de tiempo es comparable al período de una se'nal se producen distorsiones muy grandes en el dominio de la frecuencia debido al derramamiento espectral (*leakage*). Es práctica estándar elegir una longitud de entre 10 y 20 veces el período más largo de interés Nakata y cols. (2019). En nuestro caso, disponemos de ventanas de 15 minutos (900 s), que serían suficientes para resolver con holgura períodos de hasta 45s en un instrumento de banda ancha. Sin embargo, vemos de la Figura 2 que la amplificación de la respuesta instrumental se reduce drásticamente después de 20 s (0.5 Hz), y de las Figuras 3 y 4 notamos que a períodos mayores de 6s (cercaos al pico secundario de ruido microsísmico), el ruido instrumental del sistema Raspberry Shake crece rápidamente y dominará cualquier registro de ruido a esas frecuencias.

Se seleccionaron para este análisis ventanas de 15 min obtenidas a las 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 y 21 horas de tiempo local por cada día de la semana, para visualizar la variación diaria y luego calcular promedios por cada hora sobre toda la semana y también promedios diarios sobre todas las horas. En la Figura xx se exhibe una selección típica de series de ruido a distintas horas para un día de la semana. Previo al cálculo de las amplitudes de densidad espectral de potencia, cualquier tendencia o media no nula presente en las trazas debe eliminarse con el fin de sustraer componentes de frecuencia con períodos mayores a la longitud del registro (en nuestro caso, la respuesta instrumental ya garantiza que esas amplitudes serán despreciables). Además, con el fin de redistribuir el derramamiento espectral se multiplica cada muestra por una ventana tipo coseno al 10% que suaviza el corte abrupto en los extremos de las series de tiempo.

Siguiendo la técnica sugerida en IGN (2002), cada ventana de 15 min fué dividida en 10 segmentos de 162 s, con semi-solapamiento de 50% con el fin de reducir la varianza en las estimaciones de la densidad espectral de potencia PSD Bendat y Piersol (2011). Por cada segmento se calcula la PSD y estos estimados se promedian sobre los nueve segmentos separados. El cálculo de la PSD utiliza la transformada de Fourier discreta DFT Ingle y Proakis (2016) de una serie finita de muestras $x(k\Delta t)$, donde Δt es el intervalo de muestreo, en nuestro caso de 0.01s, y k varía sobre las $N = 16,200$ muestras tomadas para cada segmento

de $T = 162\text{s}$.

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t) e^{-ik(\frac{2\pi}{N})n} \quad (3)$$

En la práctica, la DFT se implementa con el algoritmo de la transformada rápida de Fourier FFT de Cooley y Tukey (1965). Considerando solamente frecuencias positivas, el espectro de densidad de potencia PSD se define como Bendat y Piersol (2011):

$$P_n = \frac{2\Delta t^2}{T} |F_n|^2 \quad (4)$$

Para terminar, se divide la PSD por la función de respuesta instrumental para obtener valores de amplitud espectral $|F_n|$ en unidades de aceleración en el dominio de la frecuencia, de manera que las unidades resultantes de la densidad espectral de potencia PSD sean $(m/s^2)/Hz$. El proceso descrito se implementó a través del programa SPEC contenido en el sistema de análisis sísmológico digital SEISAN Havskov y Ottemöller (1999), y los resultados se graficaron utilizando OCTAVE Eaton, Bateman, y Hauberg (2013).

VI | RESULTADOS

De las 56 trazas de ruido analizadas para la estación R909F EHZ (Figura 7), de 15 min cada una, ninguna exhibe amplitudes de la densidad espectral de potencia de aceleración mayores que el New High Noise Model (NHNM) de Peterson (1993). Esto significa que, en la banda de 1 a 10 Hz, la componente vertical del ruido en el emplazamiento tiene cae dentro del estándar utilizado en sismología para evaluar la viabilidad de la estación Bormann (2002); Havskov y Ottemoller (2010). Las ventanas fueron extraídas inspeccionando lapsos de quietud dentro de las 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 hora local (zona UTC-6) en cada día de la semana; subsecuentemente analizadas en la banda propia del ruido cultural (1 a 40 Hz), misma que también coincide con la parte plana de la respuesta instrumental (puntos de -3 dB en 0.8 y 39 Hz, ver Figura 2.) La dispersión entre las curvas a partir de 1 Hz refleja las diferencias horarias de intensidad e indica claramente que la naturaleza del ruido es antropogénica. Por inspección de la Figura 3 observamos que los niveles más bajos del ruido cultural están muy próximos al ruido instrumental, particularmente a 10 Hz, donde podemos considerar que las señales de ruido de más baja intensidad en la Figura 7 reciben una contribución importante del ruido instrumental.

La Figura 8 cada gráfico muestra la variación de la PSD dentro de cada una de las 8 horas seleccionadas (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 hora local, zona UTC-6) a lo largo de los 7 días de la semana. Nótese que a las 00 y 03 AM se presentan los niveles de ruido más bajos en el sitio, independiente del día, equidistantes de las curvas de Peterson y con escasa dispersión. Estos niveles menores, como se ha mencionado, son muy cercanos al nivel nominal del ruido intrínseco instrumental en esta banda Shake (2020) ver Figura 3. Si nos alejamos de las 00 y 03 horas la dispersión semanal se incrementa, así como las amplitudes, alcanzando sus máximos a las 09, 12 y 15 horas en días laborables, para luego descender gradualmente en horas de la madrugada. A las 09, 12, y 15 horas también se observa una disminución clara en los niveles de ruido para los fines de semana, más pronunciada arriba de 10 Hz; merma aparente en la separación de las curvas, indicando que los niveles de ruido a frecuencias altas se deben

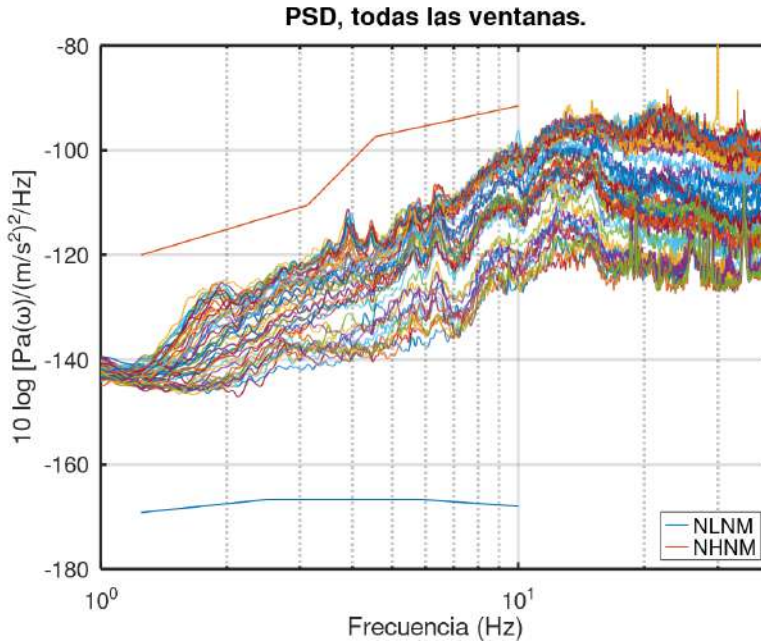


Figura 7: Curvas de densidad espectral de potencia (PSD), de la estación R909F EHZ para las 56 ventanas de tiempo de 15 min utilizadas en este estudio, seleccionadas dentro de las 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 hora local (zona UTC-6) en cada día de la semana. Las líneas de trazos rectos arriba y abajo corresponden al New High Noise Model (NHNM, en rojo) y New Low Noise Model (NLNM, en azul) de Peterson (1993), respectivamente.

sobre todo a actividad cultural con una pequeña contribución del ruido instrumental difícil de precisar. Como anomalía se registran niveles altos de ruido el día jueves a las 21 horas, sin disponer de información para determinar si este comportamiento es una característica del sitio. Otro panorama de la variación horaria del ruido cultural por cada día de la semana puede verse en la Figura 9, donde se vuelve a apreciar que los niveles de ruido son más bajos a las 00 y 03 horas a lo largo de la semana, manteniendo aproximadamente constante su amplitud a esas horas; en cambio, a partir de las 06 hasta las 12 horas se observa un incremento sustancial del ruido cultural de lunes a viernes, con una reducción significativa los fines de semana, cuando se exhiben caídas de aproximadamente 10 dB alrededor de 10 Hz.

Es de esperar, por tanto, que los promedios diarios en los estimados de la densidad espectral de potencia PSD estén rodeados por una desviación estándar mayor que los promedios del ruido por cada hora a lo largo de la semana, valores que exhiben escasa dispersión. Este comportamiento se exhibe claramente en las Figuras 10 y 11, respectivamente. Nótese en la Figura 10 que los valores promedios diarios (línea azul) son prácticamente idénticos a lo largo de los siete días de la semana; sin embargo, entre lunes y viernes la dispersión alcanza cerca de 20 dB entre amplitudes máximas y mínimas cercanas de 10 Hz, lo cual contrasta con las desviaciones estándar pequeñas en los días sábado y domingo. Esto nos indica que el valor promedio diario por sí solo no es adecuado para evaluar el comportamiento del sitio, que puede presentar a ciertas horas del día niveles de PSD altos en comparación al promedio,

como se observa en la Figura 9.

La Figura 11 muestra los promedios de densidad espectral de potencia (PSD) para cada una de las horas seleccionadas en este estudio (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 hora local, zona UTC-6), tomados a lo largo de cada día de la semana (días no consecutivos, ver fechas en el cuadro 3). Observe la clara variación de amplitud de los promedios entre una hora y otra (línea azul) y la escasa dispersión, entre 1 y 10 Hz, para cada uno de ellos, indicando características espectrales estacionarias para cada hora a lo largo de la semana, como buena aproximación. Esto indica que, en este emplazamiento, podemos considerar que la actividad cultural tiene un período de 24 horas, pues las variaciones son poco significativas de un día a otro a una hora determinada, y además que, factores que podrían causar variaciones a cierta hora a lo largo de días diferentes, como fuentes de ruido natural debidas a condiciones meteorológicas (viento y lluvia) han sido escasas o nulas a lo largo de la semana elegida para este estudio, un intervalo demasiado corto como para reflejar variaciones estacionales debidas a fuentes de ruido ajenas a la actividad cultural.

Finalmente, en la Figura 12 mostramos todos los promedios diarios (izquierda) y promedios por hora (derecha) de la densidad espectral de potencia PSD para el emplazamiento elegido para este estudio. En la primera gráfica vemos nuevamente que, si bien la PSD del sábado y domingo es ligeramente inferior a las del resto de la semana, es el comportamiento horario (derecha) el que nos sugiere que las variaciones más pronunciadas en la amplitud espectral del ruido se deben al ciclo diario de actividad cultural alrededor de la estación, con amplitudes mínimas a las 03 hora local, alcanzando niveles mayores entre 09 y 18 hora local a lo largo del ancho de banda entre 1 y 40 Hz. La dispersión asociada a cada uno de estos promedios horarios es pequeña (ver figura 6) indicando condiciones estacionarias y características espectrales constantes para cada hora a lo largo de la semana elegida para este estudio.

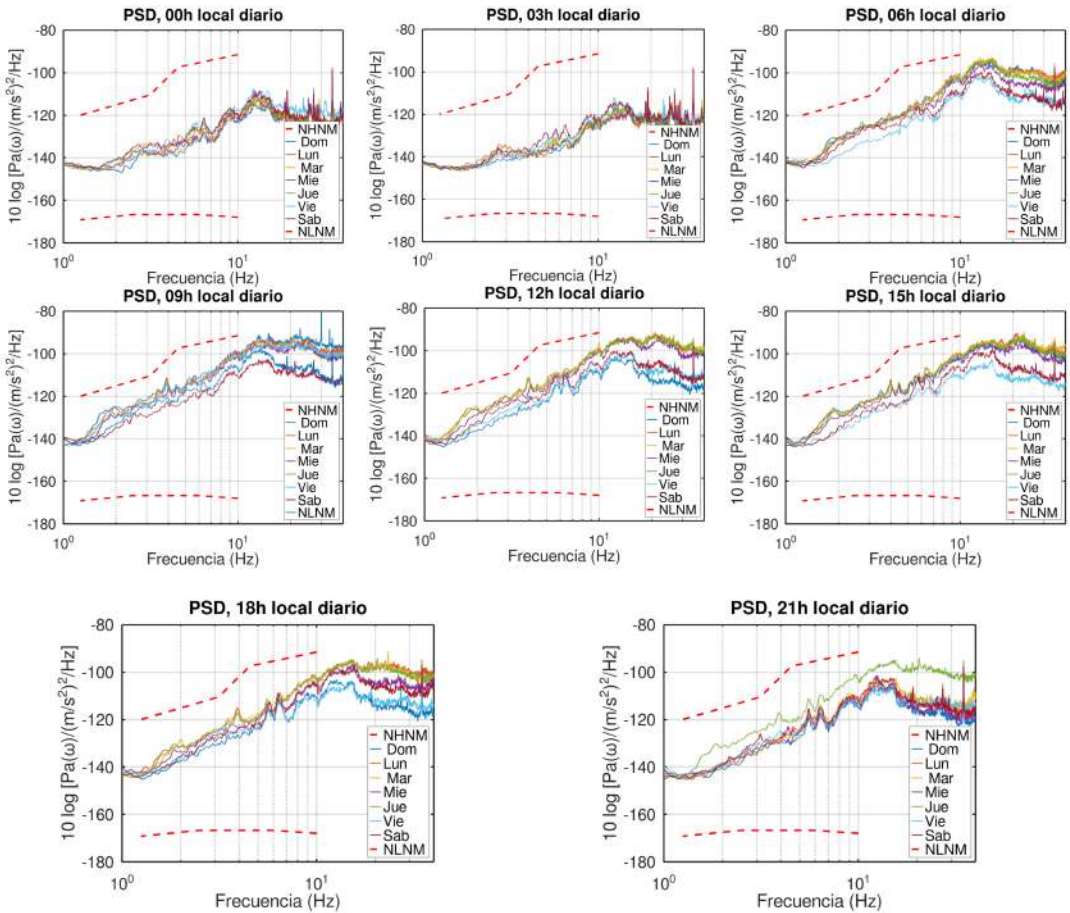


Figura 8: Densidad espectral de potencia (PSD), para cada una de las horas seleccionadas (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 hora local de la zona UTC-6) a lo largo de la semana (ventanas de 15 min por hora). Nótese que a las 6 y 9 horas se presentan los niveles de ruido más bajos en el sitio, independientes del día, equidistantes de las curvas de Peterson y con escasa dispersión.

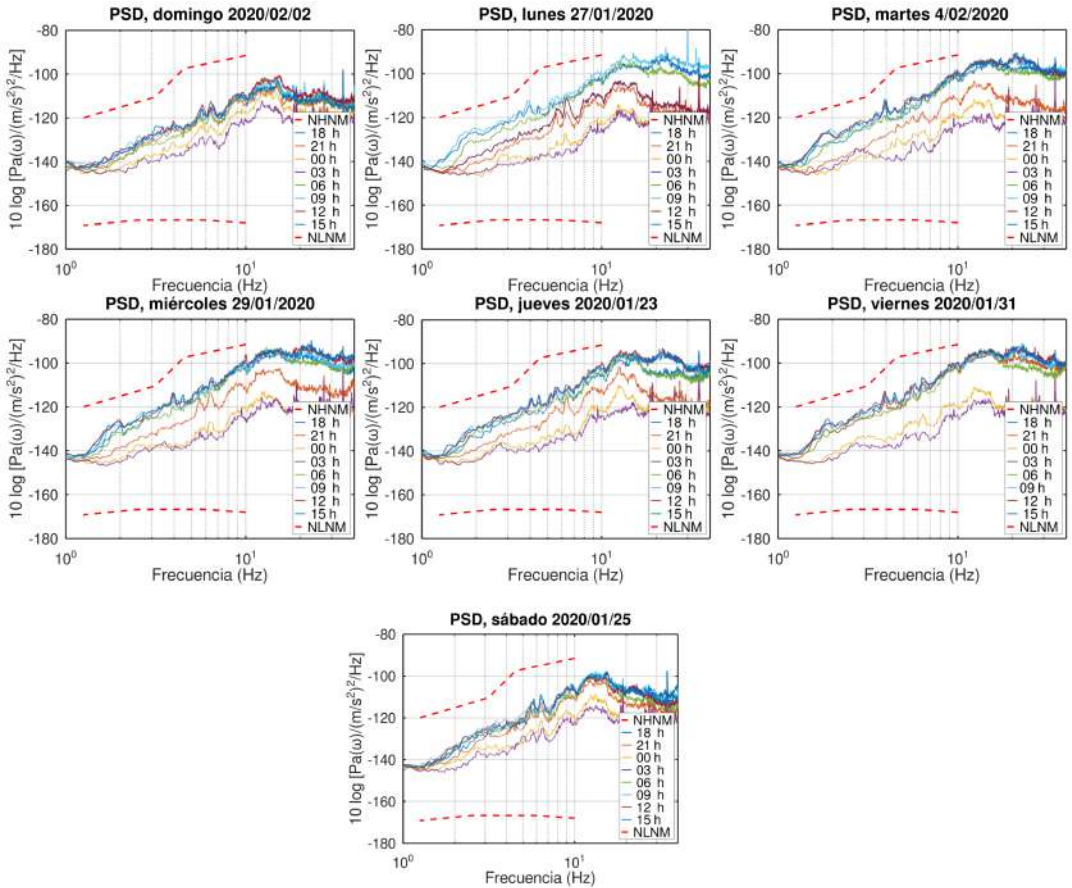


Figura 9: Comportamiento diario de las curvas de densidad espectral de potencia (PSD), de la estación R909F EHZ. En cada gráfico, correspondiente a cada día de las semana, se observa la evolución del ruido a las 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 hora local, zona UTC-6. Las líneas de trazos punteados arriba y abajo corresponden al New High Noise Model (NHNM, en rojo) y New Low Noise Model (NLNM, en azul) de Peterson Peterson (1993), respectivamente.

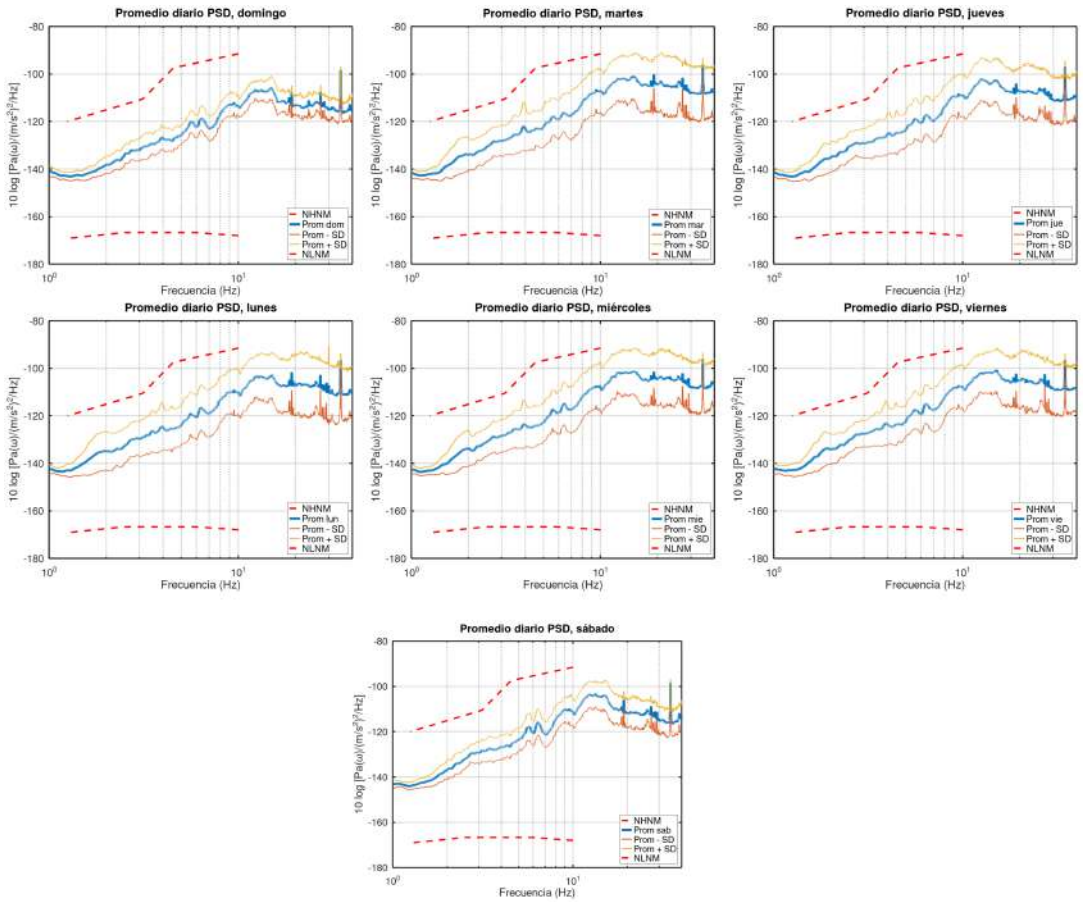


Figura 10: Promedios diarios de las curvas de densidad espectral de potencia (PSD), de la estación R909F E Z tomados, por cada día, sobre los espectros de las 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 hora local, zona UTC-6. Nótese que los valores promedios diarios (línea azul) son prácticamente idénticos a lo largo de los siete días de la semana. Las líneas de trazos punteados arriba y abajo corresponden al New High Noise Model (NHHM, en rojo) y New Low Noise Model (NLNM, en azul) de Peterson Peterson (1993), respectivamente.

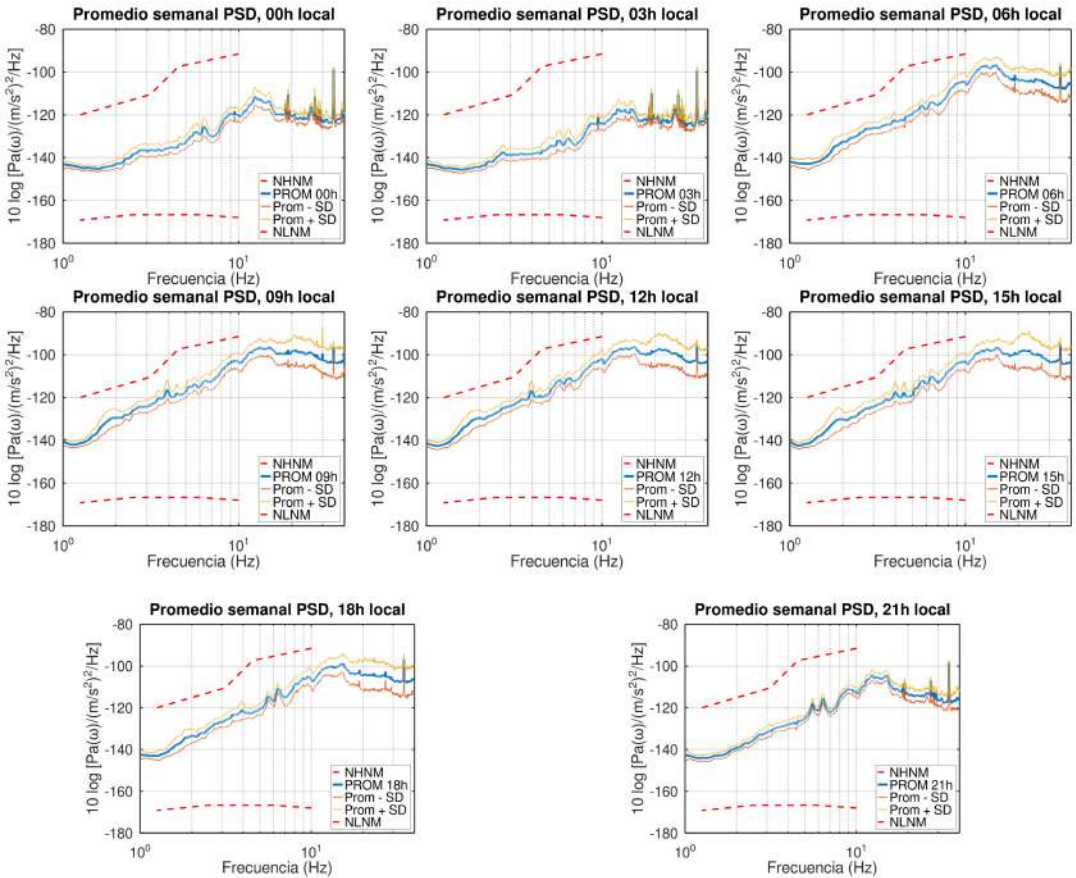


Figura 11: Promedios de densidad espectral de potencia (PSD) por cada una de las horas seleccionadas en este estudio (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 hora local, zona UTC-6) tomados a lo largo de una semana para la estación R909 F ZHE. Observe la clara variación de amplitud de los promedios entre una hora y otra (línea azul) y la escasa dispersión, entre 1 y 10 Hz, para cada uno de ellos, indicando características espectrales estacionarias en cada hora a lo largo de la semana elegida en este estudio. Las líneas de trazos punteados arriba y abajo corresponden al New High Noise Model (NHHM, en rojo) y New Low Noise Model (NLNM, en azul) de Peterson (1993), respectivamente.

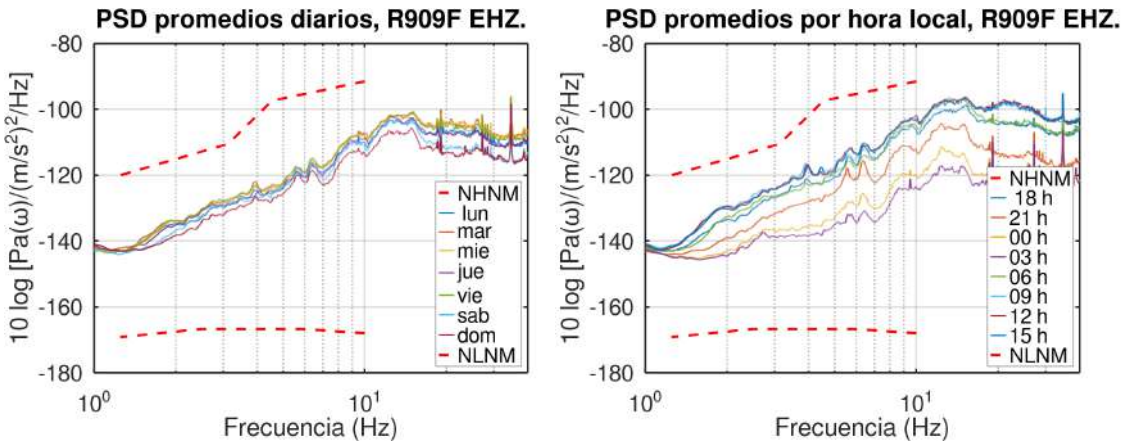


Figura 12: Promedios diarios (izquierda) y promedios por hora (derecha) de la densidad espectral de potencia PSD para el emplazamiento de la estación R909F EHZ. En la primera gráfica vemos que, si bien existe una clara separación de las curvas de PSD del sábado y domingo, ligeramente inferiores a las del resto de la semana, es el comportamiento horario (derecha) el que nos sugiere que las variaciones más pronunciadas en la amplitud espectral del ruido se deben al ciclo diario de actividad cultural alrededor de la estación, con amplitudes mínimas a las 03 hora local, alcanzando niveles mayores entre 09 y 18 horas a lo largo del ancho de banda entre 1 y 40 Hz. La dispersión asociada a cada uno de estos promedios horarios es pequeña (ver figura 6) indicando condiciones estacionarias y características espectrales constantes para cada hora a lo largo de la semana elegida para este estudio. Las líneas de trazos punteados arriba y abajo corresponden al New High Noise Model (NHNM, en rojo) y New Low Noise Model (NLNM, en azul) de Peterson (1993), respectivamente.

VII | CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento de la Densidad Espectral de Potencia (PSD) de la componente vertical del ruido sísmico en un emplazamiento sujeto a altos niveles de interferencia cultural. El análisis se efectuó en la banda a 1 a 40 Hz típica del ruido antrópico utilizando un sismógrafo Raspberry Shake 1D Shake (2020) con respuesta instrumental plana en esta ventana de frecuencias (Figura 2). En total se calcularon estimados de la PSD para 56 ventanas de 15 minutos de ruido sísmico tomadas a las 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 hora local (zona UTC-6) durante una semana y se compararon sus niveles con los nuevos modelos de ruido sísmico alto y bajo (NHNM y NLNM, respectivamente) de Peterson Peterson (1993) (Figura 7) para determinar la viabilidad del emplazamiento.

Los niveles de ruido exhiben fluctuaciones horarias significativas a frecuencias superiores a 1 Hz (Figura 12, derecha), comportamiento que se replica para cada día de la semana elegida para este estudio, demostrando así la naturaleza antropogénica de estas señales. Para cada hora considerada, los niveles mantienen su forma y amplitud con escasa dispersión de lunes a domingo, ver Figura 11; comportamiento que sugiere la ausencia de fuentes esporádicas de ruido natural en esa banda, como viento o lluvia, a excepción quizás del día jueves a las 21 h. Los niveles más altos de ruido se alcanzan entre las 09 y 18 horas y los más bajos a las 03 horas (Figura 12, derecha). Nótese que esta última traza yace muy cercana al ruido propio instrumental del sistema Raspberry Shake 1D Shake (2020) de la Figura 3, de modo que es probable que lo que estamos viendo en esta señal sea una fuerte componente del ruido del geófono. Es importante destacar que niveles de ruido sísmico ambiental inferiores en 5dB al ruido exhibido en este sitio a las 9 horas son por esta razón indetectables. Este hecho ilustra la inconveniencia e inadecuación del sistema Raspberry Shake 1D para realizar estudios donde la señal de interés sea el ruido sísmico ambiental de la Tierra.

En cuanto a las amplitudes espectrales de la PSD, en la Figura 11 vemos que los niveles de ruido entre las 09 y las 18 horas, son considerables en relación al NLNM de Peterson y parten desde un exceso de 30 dB sobre el NLNM a 1 Hz, incrementándose de forma gradual hasta llegar a 70 dB (a 10 Hz) sobre el mismo. Si consideramos que el ruido a períodos cortos tiende a ser mayor en las componentes horizontales que en la componente vertical Bormann (2002), es posible que un geófono de tres componentes exhiba en este sitio niveles cercanos al NHNM (Modelo Alto) de Peterson en el movimiento horizontal, o que incluso lo sobrepase. Por otro lado, en ninguna instancia se observó que la componente vertical del ruido superara la cota del Nuevo Modelo de Ruido Alto NHNM. Por lo tanto, los niveles de ruido de este emplazamiento son inferiores o similares a los más altos presentes en las estaciones de la GSN (Global Seismic Network) utilizadas por Peterson Peterson (1993) para determinar sus modelos, y por tanto se consideran, para esta ubicación en cuestión, lo suficientemente bajos para permitir la detección de terremotos locales y regionales.

| REFERENCIAS

- Anthony, R. E., Ringler, A. T., Wilson, D. C., y Wolin, E. (2019). Do low-cost seismographs perform well enough for your network? an overview of laboratory tests and field observations of the osop raspberry shake 4d. *Seismological Research Letters*, 90(1), 219–228.
- Bendat, J. S., y Piersol, A. G. (2011). *Random data: analysis and measurement procedures* (Vol. 729). John Wiley & Sons.
- Bormann, P. (2002). New manual of seismological observatory practice.
- Bromirski, P. D. (2009). Earth vibrations. *Science*, 324(5930), 1026–1027.
- Cessaro, R. K. (1994). Sources of primary and secondary microseisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(1), 142–148.
- Cooley, J. W., y Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of computation*, 19(90), 297–301.
- Eaton, J. W., Bateman, D., y Hauberg, S. (2013). Gnu octave. *GNU Octave*.
- Ebeling, C. W. (2012). Inferring ocean storm characteristics from ambient seismic noise: A historical perspective. En *Advances in geophysics* (Vol. 53, pp. 1–33). Elsevier.
- Havskov, J., y Alguacil, G. (2004). *Instrumentation in earthquake seismology* (Vol. 358). Springer.
- Havskov, J., y Ottemöller, L. (1999). Seisan earthquake analysis software. *Seismol. Res. Lett.*, 70(5), 532–534.
- Havskov, J., y Ottemoller, L. (2010). *Routine data processing in earthquake seismology: With sample data, exercises and software*. Springer Science & Business Media.
- Hough, S., Seeber, L., Rovelli, A., Malagnini, L., DeCesare, A., Selveggi, G., y Lerner-Lam, A. (1992). Ambient noise and weak-motion excitation of sediment resonances: results from the tiber valley, italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(3), 1186–1205.
- IGN. (2002). *Análisis de datos sísmicos digitales, técnicas de lectura* (Inf. Téc.). Instituto Geográfico Nacional, Madrid, España.
- Ingle, V. K., y Proakis, J. G. (2016). *Digital signal processing using matlab: a problem solving companion*. Cengage Learning.
- Kulháněk, O. (2012). *Anatomy of seismograms: For the iaspei/unesco working group on manual of seismogram interpretation*. Elsevier.
- Lecocq, T., Hicks, S. P., Van Noten, K., Van Wijk, K., Koelemeijer, P., De Plaen, R. S., ... others (2020). Global quieting of high-frequency seismic noise due to covid-19 pandemic lockdown measures. *Science*, 369(6509), 1338–1343.
- Lermo, J., y Chávez-García, F. J. (1994). Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletin of the seismological society of America*, 84(5), 1350–1364.
- Longuet-Higgins, M. S. (1950). A theory of the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 243(857), 1–35.
- McNamara, D. E., y Buland, R. P. (2004). Ambient noise levels in the continental united states. *Bulletin of the seismological society of America*, 94(4), 1517–1527.
- Nakata, N., Gualtieri, L., y Fichtner, A. (2019). *Seismic ambient noise*. Cambridge University Press.
- Nogoshi, M. (1978). On fundamental nature of microtremors and its application. *Journal of the Mining College, Akita University. Ser. A, Mining geology*, 5(3), 1–51.
- Peterson, J. R. (1993). *Observations and modeling of seismic background noise* (Inf. Téc.). US Geological Survey.
- Rhie, J., y Romanowicz, B. (2004). Excitation of earth's continuous free oscillations by atmosphere–ocean–seafloor coupling. *Nature*, 431(7008), 552–556.
- Richards, P. G., y Aki, K. (1980). *Quantitative seismology: theory and methods* (Vol. 859). Freeman San Francisco, CA.
- RIESCA. (2020). *Riesca – proyecto regional de formación aplicada a los escenarios de riesgos con vigilancia y monitoreo de los fenómenos volcánicos, sísmicos, hidrogeológicos en centro américa* (Inf. Téc.). Agencia Italiana de Cooperación para el desarrollo <https://sansalvador.aics.gov.it/fotos/riesca/>.
- Shake, R. (2020). *Specifications for the original (1d) raspberry shake* (Inf. Téc.). rasberryshake.org.
- Sleeman, R., Van Wettum, A., y Trampert, J. (2006). Three-channel correlation analysis: A new technique to measure instrumental noise of digitizers and seismic sensors. *Bulletin of the Seismological Society*

- of America*, 96(1), 258–271.
- Stein, S., y Wysession, M. (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons.
- Suárez, G., van Eck, T., Giardini, D., Ahern, T., Butler, R., y Tsuboi, S. (2008). The international federation of digital seismograph networks (fdsn): An integrated system of seismological observatories. *IEEE Systems Journal*, 2(3), 431–438.
- Uhrhammer, R. A., Karavas, W., y Romanowicz, B. (1998). Broadband seismic station installation guidelines. *Seismological Research Letters*, 69(1), 15–26.
- Webb, S. C. (2007). The earth's 'hum' is driven by ocean waves over the continental shelves. *Nature*, 445(7129), 754–756.
- Yamanaka, H., Takemura, M., Ishida, H., y Niwa, M. (1994). Characteristics of long-period microtremors and their applicability in exploration of deep sedimentary layers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(6), 1831–1841.