

CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO SÍSMICO EN VENEZUELA UTILIZANDO REDES SISMOLOGICAS

JOSÉ TOMÁS DEL CASTILLO^{1,a}, MICHAEL SCHMITZ^{1,2,b}, HERBERT RENDÓN^{2,c}

¹Universidad Simón Bolívar (USB), Caracas, Venezuela

²Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas, Venezuela

e-mail: ^ajosetdcm@gmail.com, ^bschmitzschutt@gmail.com, ^chrendon@funvisis.gob.ve

Recibido: marzo de 2021

Aprobado para publicación: junio de 2021

RESUMEN

Se presenta la caracterización del ruido sísmico en Venezuela utilizando registros sísmicos obtenidos por las estaciones de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). A estos, se les realizó un análisis espectral de potencia para el período de cuatro meses entre septiembre y diciembre de 2016. A cada estación se le extrajeron los valores más representativos de los rangos de período correspondientes al ruido cultural (0,1-1 s) y el microsismo de frecuencia doble (4-8 s), para caracterizar el comportamiento de estos fenómenos a lo largo de territorio nacional. Los valores de ruido cultural obtenidos varían entre los -145 dB y los -82 dB, mostrando sus máximos en el occidente del país. Debido a las medidas de confinamiento, consecuencia de la pandemia por COVID-19, la actividad diaria de la población se redujo, resultando en una disminución del ruido cultural de aproximadamente 4 dB en la estación FUNV. El microsismo de frecuencia doble arrojó amplitudes entre -139,5 dB y -121,5 dB. Estos valores se incrementan en las cuencas sedimentarias y disminuyen en los sistemas montañosos de los Andes de Mérida y del Caribe. Este comportamiento sugiere que, la geología de la región donde se ubica la estación, es más influyente en los valores de amplitud del microsismo de frecuencia doble que la distancia entre la fuente y la estación. El desempeño obtenido por las estaciones de la RSSN es el adecuado para la localización de sismos locales y regionales y se identificaron problemas en las estaciones BENV, JACV y TURV que deben ser atendidas pronto.

Palabras claves: Ruido sísmico, ruido cultural, microsismo de frecuencia doble, análisis espectral de potencia, período.

CHARACTERIZATION OF SEISMIC NOISE IN VENEZUELA USING SEISMOLOGICAL NETWORKS

ABSTRACT

We present a seismic noise characterization in Venezuela using seismic records obtained by the stations of the Venezuelan Foundation of Seismological Research (FUNVISIS). To these records, we applied a power spectral analysis for a three-month time period between September and December 2016. The most representative values of the period ranges corresponding to cultural noise (0.1-1 s) and double frequency microseism (4-8 s) were extracted from each station to characterize the behavior of these phenomena across Venezuela. The values of cultural noise vary between -145 dB and -82 dB, showing their maximums in the western part of the country. Due to the confinement measures, a consequence of the COVID-19 pandemic, the daily activity of the population was reduced, resulting in a decrease in cultural noise of approximately 4 dB at the FUNV station. The double frequency microseism yielded amplitudes between -139.5 dB and -121.5 dB. These values increase in the sedimentary basins and decrease in the mountain systems of the Venezuelan Andes and the Caribbean. This behavior suggests that the geology of the region where the station is located has more influence on the amplitude values of double frequency microseism than the distance between the source and the station. The performance obtained by the RSSN stations is satisfying for locating local and regional earthquakes and failures have been identified at the stations BENV, JACV y TURV, which should be resolved soon.

Keywords: Seismic noise, cultural noise, double-frequency microseism, power spectral analysis, period.

INTRODUCCIÓN

En cuanto a la detección de terremotos, cualquier señal cuyo origen no es producto de la ruptura de una falla, es considerado ruido sísmico. Dependiendo del origen del

ruido, se pueden definir el ruido instrumental, relacionado directamente con el comportamiento del sismómetro y el ruido sísmico producto de las vibraciones de la Tierra (Havskov y Alguacil, 2004). Estas vibraciones pueden tener origen por fenómenos naturales, como los microsismos oceánicos, o fenómenos artificiales, como el ruido cultural.

Los microsismos son señales sísmicas generadas en el océano y que se presentan en un rango de períodos de 1-20 s (Peterson, 1993). Este fenómeno se puede dividir en microsismos de frecuencia simple (MFS) y microsismos de frecuencia doble (MFD). El MFS se origina de dos maneras; por cambios verticales de presión, o por el choque de las olas con la costa (Bormann y Wielandt, 2013) y se presenta en el rango de 10-16 s (McNamara y Buland, 2004; Demuth, y otros, 2016). Por otra parte, el MFD es generado por la superposición de ondas marinas del igual período, pero que viajan en direcciones opuestas. Esta superposición genera ondas de gravedad con la mitad de período que las ondas superpuestas, las cuales generan perturbaciones que se propagan hacia el fondo marino (Havskov y Alguacil, 2004). Autores como Demuth y otros (2016) y McNamara y Buland (2004), concuerdan en que este fenómeno se presenta en el rango de 4-8 s. Por otra parte, el ruido cultural puede presentarse por fenómenos naturales como el choque del viento con los árboles o montañas, agua corriendo en cascadas o ríos, pero la fuente más común es la acción humana (Bormann y Wielandt, 2013). Según McNamara y Buland (2004), la energía producida por el tránsito vehicular y maquinaria pesada es inducida a la Tierra generando ondas superficiales de bajo período (0,1-1 s), que se atenúan con el aumento de la distancia y la profundidad, por este motivo, este ruido suele ser casi insignificante en pozos, cuevas profundas o túneles (Havskov y Alguacil, 2004). Autores como Stutzmann, y otros (2000), Bormann, y otros (2012) y Sheen, y otros (2009), coinciden en que el rango donde se puede observar este fenómeno se encuentra en períodos menores a 1 s.

Con el objetivo de que las estaciones sismológicas presenten la menor cantidad de ruido, para garantizar la detección de los eventos tectónicos, es necesario el estudio y cuantificación del ruido sísmico. Los resultados obtenidos en el presente estudio representan un monitoreo del desempeño de la RSSN, capaz de detectar remotamente fallas en los equipos. Además, se caracterizará el ruido sísmico a nivel nacional para ubicar zonas de bajo ruido para la instalación de nuevas estaciones sismológicas.

PROVINCIAS GEOLÓGICAS

La interacción entre la placa Caribe y la placa Sudamericana, sumado a la actividad de los sistemas de fallas presentes en Venezuela, dieron origen a una amplia variedad de accidentes geográficos. En el occidente del país, se encuentra la parte venezolana de la cordillera de los Andes, mientras que, en el centro y oriente del país, se elevan la cordillera de la Costa y la serranía del Interior. Estos sistemas montañosos abarcan solo una cuarta parte de la superficie continental de Venezuela, mientras que, los otros tres cuartos de superficie, se dividen en llanuras, cuencas y mesetas (Audemard, y otros 2000). Con base en la geología y las provincias geológicas presentadas por Hackley, y otros (2006) y Urbani (2018), Schmitz y otros (2021) muestran las provincias distribuidas como se muestra en la Figura 1.

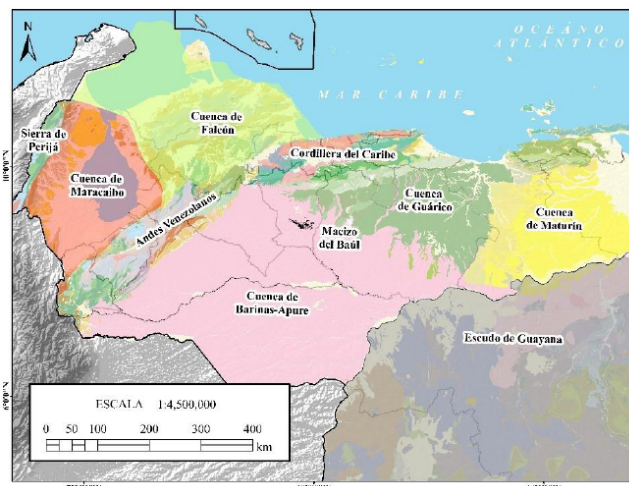


Figura 1. Provincias geológicas de Venezuela tomadas de Schmitz y otros (2021) con base en la geología de Hackley y otros (2006) y la clasificación dada por Urbani (2018).

SIERRA DE PERIJÁ

Esta cadena montañosa se ubica en la parte noroeste de Venezuela, en la frontera con Colombia. El punto más alto de esta cordillera se presenta a los 3750 m de altura, el cual disminuye hasta mantenerse en unos 2200 a 2060 metros generando un flanco oeste de gran inclinación que disminuye abruptamente hacia la cuenca de Maracaibo (González de Juana y otros, 1980). Según Yoris y Ostos (1997), la interacción entre la parte norte de la placa Sudamericana y la placa del Caribe definen la interacción de esta zona desde el Eoceno hasta el presente.

CUENCA DE MARACAIBO

La cuenca de Maracaibo se encuentra ubicada en el occidente de Venezuela, con su mayor expresión en el estado Zulia y menores expresiones en los estados Táchira, Mérida y Trujillo. Está limitada al noroeste por la Sierra de Perijá, los Andes de Mérida al suroeste y noreste y el Mar Caribe y la cuenca de Falcón al norte (González de Juana y otros, 1980). Esta cuenca está rellena de sedimentos del Cretácico inferior y Pleistoceno y forma parte del bloque de Maracaibo (Audemard y Audemard, 2002).

SISTEMA MONTAÑOSO DE LOS ANDES DE MÉRIDA

Los Andes venezolanos presentan el punto más alto de Venezuela (4.970 m) y se extienden desde el suroeste de Venezuela, específicamente en la depresión de Táchira, hasta la depresión de Barquisimeto en el noreste (González de Juana y otros, 1980). Se le considera continuación de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, aunque no existan indicios de similitud genética entre ellas (Audemard y Audemard, 2002). En los flancos limita con la cuenca de Maracaibo al noroeste y la cuenca de Barinas-Apure al sureste.

CUENCA DE FALCÓN

La cuenca de Falcón limita con la línea de costa del golfo de Venezuela y su prolongación hasta el golfo Triste al norte y este, la cuenca de Maracaibo y los Andes de Mérida al oeste y la sierra de Churuguara al sur (González de Juana y otros, 1980). Según Muessig (1984), la cuenca de Falcón es una cuenca pull-apart formada por un movimiento transcurrente entre la placa Caribe y la placa de Sudamericana durante el Eoceno Tardío y el Oligoceno.

SISTEMA MONTAÑOSO DEL CARIBE

El sistema montañoso del Caribe se extiende desde la Sierra Nevada de Santa Marta hasta Trinidad (Urbani, 2014). Geográficamente, la parte central de este sistema puede dividirse en dos cinturones montañosos paralelos entre sí, divididos por valles controlados por el sistema de fallas de La Victoria (Urbani, 2018). Estos dos sistemas montañosos se conocen como Serranía del Litoral, al norte, y la Serranía del Interior, al sur. Al oriente de Venezuela, se observa continuidad de este sistema en las penínsulas de Paria y Araya y en la isla de Margarita, mientras que al occidente se observa en la península de Paraguana, Siquisique y la península de la Guajira (González de Juana y otros, 1980). Algunas islas pequeñas, como el archipiélago de Los Monjes en el occidente, Gran Roque y La Orchila, muestran también presencia de características de este sistema (Urbani, 2018).

CUENCA DE BARINAS-APURE

La cuenca Barinas-Apure es una cuenca foreland que guarda una relación importante con la cuenca de Maracaibo. Según Arnaiz y otros (2011) y González de Juana y otros (1980), el origen de ambas cuencas es similar y, además, en un momento formaron una única cuenca que se separó durante el Cenozoico producto del levantamiento de los Andes venezolanos. Está limitada al norte por el Macizo del Baúl, al noroeste por los Andes de Mérida y al sur por el Escudo de Guayana (Schmitz y otros, 2021).

MACIZO DEL BAÚL

El macizo de El Baúl es una zona de la parte centro-occidental de Venezuela que se encuentra entre la cuenca de Guárico y la cuenca Barinas - Apure y se distingue por el abrupto cambio de altura respecto a los llanos que lo rodean. El basamento de esta zona forma parte de un cinturón orogénico Paleozoico (Feo-Codecido y otros, 1984) que presenta características geológicas similares a la de los Andes de Mérida y se presenta como un alto estructural del basamento de esta zona (Viscarret y otros, 2012).

CUENCA DE GUÁRICO

La cuenca de Guárico se ubica entre la cuenca de Barinas - Apure y la cuenca de Maturín, al sur del sistema montañoso del Caribe. Los sedimentos depositados en esta cuenca son de origen Eoceno a Oligoceno y presentan espesores promedio de 6 km que aumentan de oeste a este hasta llegar a profundidades entre 10 - 12 km en la cuenca de Maturín y

la zona meridional de Trinidad (González de Juana y otros, 1980; Jácome y otros, 2008). Características extensionales jurásicas como el Espino Graben se desarrollaron sobre el basamento Precámbrico y Paleozoico de esta cuenca (González de Juana y otros, 1980).

CUENCA DE MATURÍN

La cuenca de Maturín limita con la cuenca de Guárico al oeste, al norte con el sistema montañoso del Caribe, al sur el Escudo de Guayana y al este con el golfo de Paria y la parte oceánica del delta del Orinoco (González de Juana y otros, 1980). La dinámica de esta subducción y la carga de napas sobre esta zona, forzaron el hundimiento que fue rellenado por sedimentos del Neógeno proveniente de otras provincias (Schmitz y otros, 2008). Pozos en la zona muestran columnas de sedimentos de hasta 6,1 km de espesor (Hung, 1997), mientras que, estudios de sismica profunda realizados por Liuzzi y otros (2006) sugieren un espesor de sedimentos de 3 km al norte de la cuenca de que se profundizan al sur hasta unos 5 km de espesor.

ESCUDO DE GUAYANA

El Escudo de Guayana es parte del núcleo cratónico de América del Sur en el sur de Venezuela (Mendoza, 1977). Debido a sus afloramientos de origen Precámbrico, se considera la zona más antigua de Venezuela con edades de hasta 3500. Esta zona está dividida en cuatro provincias: Imataca en el norte con gneis félsicos a máficos del Arcaico e intrusiones de granitos, Pastora al sur con rocas volcánicas y sedimentarias del Proterozoico Inferior, Cuchivero en el suroeste con rocas riolíticas del Proterozoico medio y Roraima ubicado entre Pastora y Cuchivero con rocas sedimentarias e intrusivas del Proterozoico medio (Feo-Codecido y otros, 1984; González de Juana y otros 1980).

REGISTROS SISMOLÓGICOS

Se revisaron los registros sismológicos de la Red Sismológica Satelital Nacional (RSSN), el proyecto Geociencia Integral de los Andes de Mérida (GIAME) y el proyecto Investigación de subducción *Flat Slab* y de la tectónica de Borde de Placas en el norte de América del Sur (CARMA).

Se contó con registros entre los años 2014 y 2018 de aproximadamente 20 estaciones de la RSSN, la mayoría de ellas con sensores de banda ancha *Guralp* CMG-40T (0,1-30 s), a excepción de la estación PCRV con sensor *Guralp* CMG-3TB (0,2-100 s) y SDV con sensor *Streckeisen* STS-2 (0,05-100 s). Del proyecto CARMA, el cual estuvo operativo entre abril de 2016 y abril de 2018, se tuvo disponibilidad de registros de 40 estaciones de banda ancha con sensores *Guralp* CMG-3T (0,1-50 s), instaladas en el occidente de Venezuela. En cuanto al proyecto GIAME, las estaciones estuvieron operativas durante noviembre de 2015 y abril de 2018 y se pudo contar con registros de 10 estaciones con sensores de banda ancha *Reftek* 151A/B (0,1-50 s) y *Guralp* CMG-40T (0,1-50 s), instaladas también en el occidente del país.

De los proyectos CARMA y GIAME se pudo hacer uso de casi la totalidad de los registros, a excepción de algunas estaciones que presentaron fallas por cortos períodos de tiempo debido a que sufrieron inundaciones. Por otra parte, la disponibilidad de archivos de la RSSN fue baja, esto debido a fallas en el almacenamiento y respaldo de los registros. Para evitar que los resultados del estudio se vieran afectados por vacíos de información, se decidió utilizar una ventana de tiempo donde la mayor cantidad de estaciones disponibles hubiesen grabado en días continuos. La ventana de tiempo seleccionada fue entre el 16 de septiembre de 2016 y el 31 de diciembre de 2016, aproximadamente tres meses y medio de registros. Finalmente, la cantidad de estaciones utilizadas para procesar los registros (Tabla 1) se vio reducida de 70 a 45, con la mayor parte ubicadas en el occidente de Venezuela (Figura 2).

Tabla 1. Estaciones utilizadas para procesar los registros sísmológicos.

Red	Código	Red	Código	Red	Código
RSSN	SDV	RSSN	MAPV	CARMA	VA01
RSSN	FUNV	RSSN	CARV	CARMA	VA04
RSSN	CRUV	RSSN	TACV	CARMA	VA06
RSSN	BAUV	RSSN	CACV	CARMA	FC01
RSSN	MERV	RSSN	BENV	CARMA	FC02
RSSN	DABV	GIAME	CCMV	CARMA	FC04
RSSN	ORIV	GIAME	HATO	CARMA	FC05
RSSN	SIQV	GIAME	CAPO	CARMA	ML02
RSSN	CURV	CARMA	SL01	CARMA	NL02
RSSN	CAPV	CARMA	SL03	CARMA	NL04
RSSN	JACV	CARMA	SL04	CARMA	NL05
RSSN	TURV	CARMA	SL07	CARMA	NL07
RSSN	SOCV	CARMA	SL09	CARMA	NL08
RSSN	PCRV	CARMA	SL10	CARMA	NL10
RSSN	PRGV	CARMA	SL11	CARMA	NL11

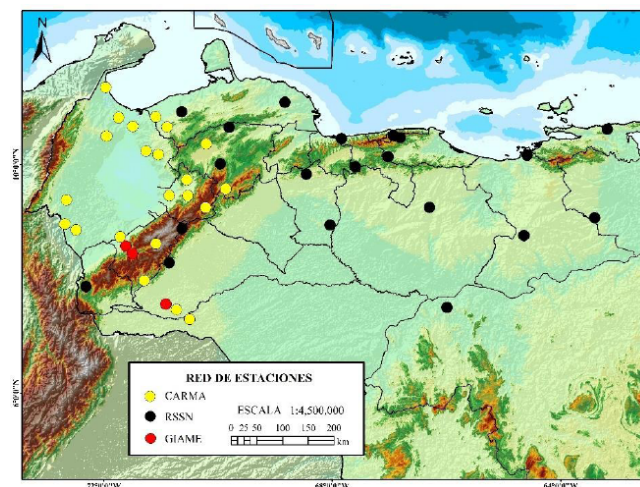


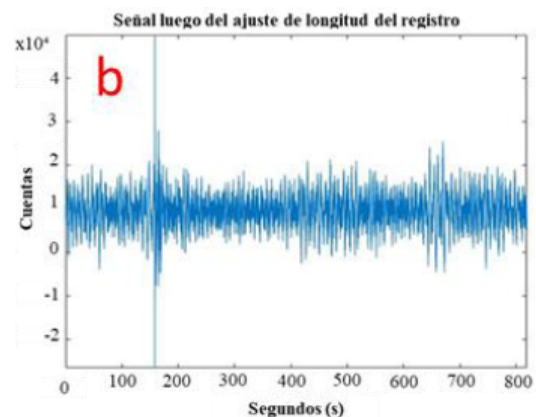
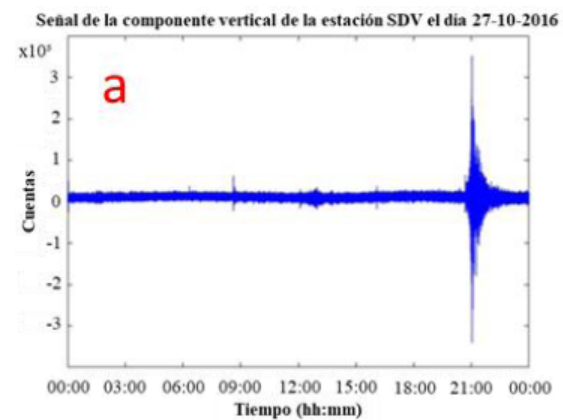
Figura 2. Distribución de las estaciones de los proyectos GIAME y CARMA y la RSSN utilizadas para procesar los registros sísmicos.

MÉTODO DE PROCESAMIENTO

PREPROCESAMIENTO

Para obtener el comportamiento del ruido sísmico para un sitio determinado, se aplicó el procedimiento planteado por McNamara y Buland (2004) a cada conjunto de registros de cada una de las estaciones utilizadas. Este procedimiento toma en cuenta eventos sísmicos, pulsos de calibración y fallas momentáneas del equipo debido a que son fenómenos de baja ocurrencia que no contaminan las señales de alta ocurrencia como el ruido sísmico.

Para mostrar los resultados obtenidos en cada paso del procesamiento, se utiliza como ejemplo el registro sísmico de la estación SDV el día 27 de octubre de 2016 (Figura 3a), en el cual se observa un sismo. Los registros sísmicos dentro de la ventana de tiempo del estudio se dividieron en segmentos de una hora superpuestos 50% entre ellos. Cada uno de estos segmentos son divididos nuevamente en 13 segmentos de 15 minutos, superpuestos 75% (Figura 3b). A cada una de estas 13 fracciones de tiempo, se le sustrajo la media, para obtener una media de valor cero en cada segmento. Además, debido a que los sismómetros de banda ancha producen pulsos de alto período que distorsionan la señal entre los 10 y 100 s, la tendencia de largo período es removida (Figura 3c). Luego, para suavizar las discontinuidades en los extremos de cada segmento, se aplicó una ventana del tipo coseno de 10% (Figura 3d).



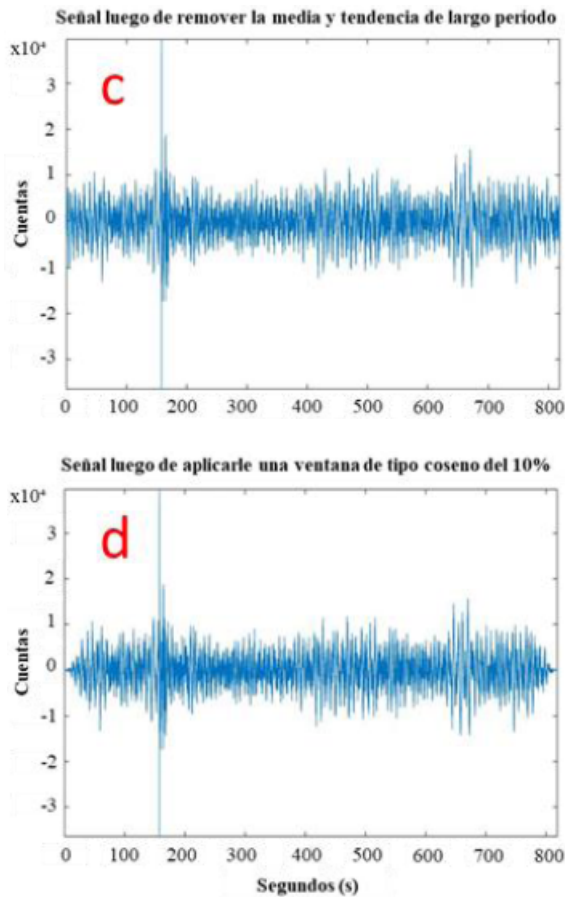


Figura 3. a) Registro sísmico sin alteraciones de la componente vertical de la estación SDV el día 27-10-2016. b) Segmento del registro obtenido luego de dividir la señal de una hora en 13 segmentos de igual longitud y superpuestos un 75%. c) Segmento luego de remover la media y la tendencia de largo periodo. d) Segmento luego de aplicar una ventana de tipo coseno del 10% en los extremos.

PROCESAMIENTO

Densidad espectral de potencia

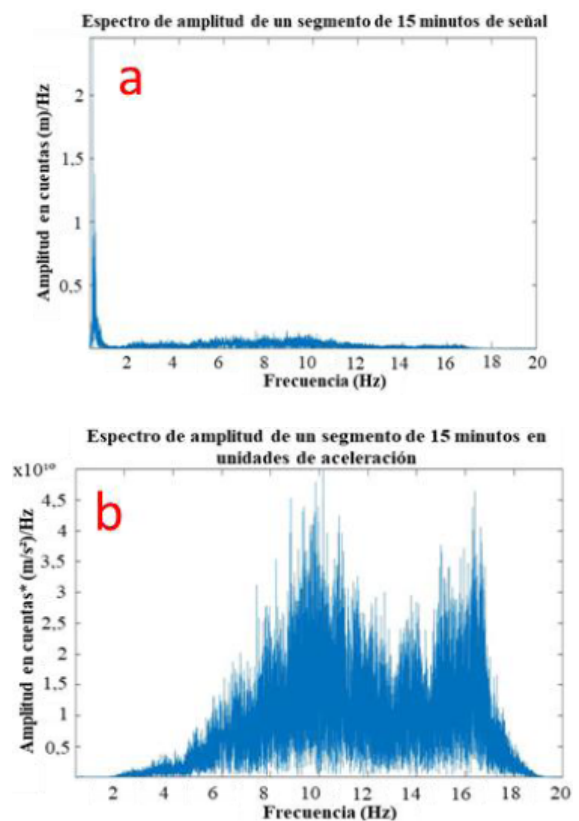
Luego de realizar los ajustes a los segmentos de 15 minutos, a cada una de estas fracciones de tiempo se les calculó la densidad espectral de potencia (DEP) (Figura 4a). El método utilizado para obtener el contenido de energía de la señal, es la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) utilizando el método de Cooley-Tukey (1965).

Como se aprecia en la Figura 4a, el mayor contenido de energía se presenta para frecuencias menores a 1 Hz. Según Krzywosz (2015), los microsismos, que se encuentran en rangos de frecuencia menores a 1 Hz, presentan una respuesta plana cuando se utilizan unidades de aceleración,

lo que permite que otras características de la señal puedan ser apreciadas con más detalle. Por este motivo, las unidades de desplazamiento son transformadas a unidades de aceleración (Figura 4b) para poder apreciar con mayor detalle el comportamiento de la energía para frecuencias mayores a 1 s.

Una vez obtenido el contenido de energía de cada segmento de 15 minutos, se promediaron estos valores para obtener una DEP del fragmento de tiempo de una hora. Luego, la respuesta del equipo, en unidades de aceleración, fue removida en el dominio de la frecuencia. Finalmente, las unidades de aceleración fueron transformadas a decibeles (Figura 4c).

Luego de realizar este procedimiento para todos los segmentos de una hora del día 27 de octubre de 2016, se obtuvo el gráfico de la Figura 4d. Este gráfico muestra el contenido de energía de los 47 segmentos de una hora con superposición del 50% obtenidos del registro sísmico del día 27 de octubre de 2016. En el caso de este estudio, la ventana de tiempo no fue de un solo día. En el procedimiento anteriormente mostrado, se tomó como ejemplo el día 27 de octubre de 2016 para procesar la señal, sin embargo, este procedimiento fue aplicado para 106 días, correspondientes a la ventana de estudio definida como el período entre el 16 de septiembre de 2016 y el 31 de diciembre de 2016.



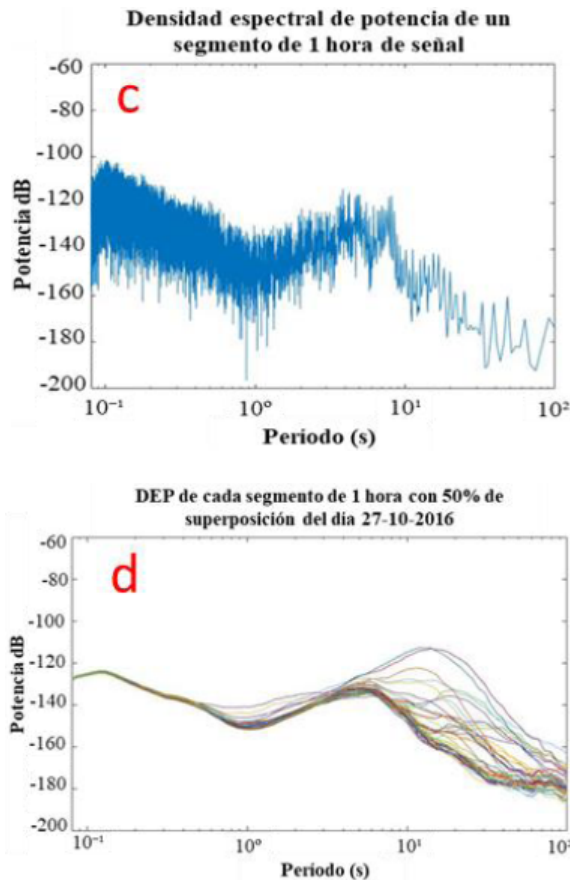


Figura 4. a) Contenido de energía del segmento de 15 minutos, en unidades de desplazamiento. b) Contenido de energía del segmento de 15 minutos, en unidades de aceleración. c) DEP en decibeles, del segmento de una hora de longitud luego de remover la respuesta del equipo y transformar a unidades de decibeles. d) 47 DEP calculadas para de cada segmento de una hora con 50% de superposición del día 27-10-2016.

Función de densidad de probabilidad

Utilizando la cantidad total de DEP obtenidas para cada segmento de una hora, se procedió a generar las funciones de densidad de probabilidad (FDP) para estimar la variación del ruido para cada estación. Cada DEP se divide en celdas de 0,125 Hz de ancho en frecuencia y 1 dB de largo en potencia. Estas celdas se van acumulando y se cuantifica la repetición de cada valor de potencia dentro de determinada banda de período interés. Luego, el número de repeticiones de este valor de potencia se divide por el total de potencias obtenidas en este rango de período. De esta manera, para cada período de estudio, se obtiene una curva de probabilidad de los valores de potencia para cada período.

Curvas de ocurrencia de ruido sísmico

Utilizando las FDP obtenidas mediante el uso de las DEP calculadas, se generó una gráfica que representa la probabilidad de ocurrencia de cierto valor de potencia para

un cierto período (Figura 5). Para evaluar el desempeño de la estación, el modelo de ruido alto (HNM por sus siglas en inglés) y el modelo de ruido bajo (LNM por sus siglas en inglés) generado por Peterson (1993) se muestran en la gráfica de la Figura 5. Estos modelos definen los límites donde se esperaría obtener los valores de ruido captados por una estación sismológica para calificarla con un correcto funcionamiento para la detección de eventos sísmicos. También se incluye la media, el percentil 5% y el percentil 95% para obtener información a partir de medidas estadísticas. Estas gráficas fueron generadas para el registro sísmico continuo y para el período diurno (5 am - 7 pm) y nocturno (7 pm - 5 am) durante la ventana de tiempo definida.

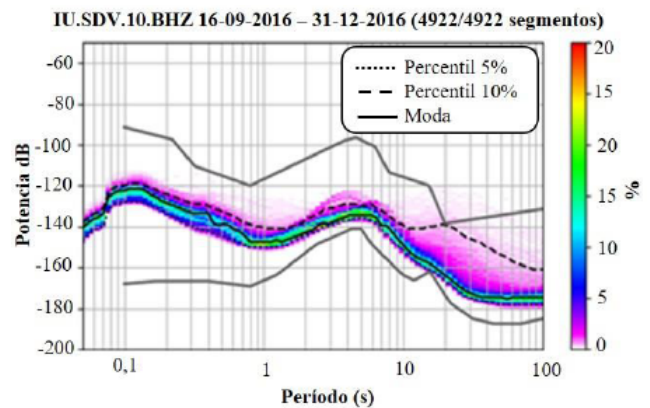


Figura 5. Curva de ocurrencia de ruido sísmico de la componente vertical de la estación SDV.

DESEMPEÑO DE LA RED SISMOLÓGICA SATELITAL NACIONAL

El desempeño de cada componente de cada estación de la RSSN, fue evaluado para detectar posibles fallas o valores inusuales de ruido. La manera de realizar el estudio del desempeño de las estaciones fue por medio de las curvas de ocurrencia de ruido sísmico. Una estación con un buen desempeño presentará los valores de ruido entre los modelos HNM y LNM, lo contrario definirá un mal desempeño de la estación, sumado a comportamientos anómalos de los valores de ruido dentro de las curvas.

Estaciones con fallas

De las 20 estaciones de la RSSN únicamente tres estaciones presentaron un mal desempeño. La curva de la estación BENV (figura 6a), muestra un comportamiento fuera de lo esperado en el rango del MFD, al presentar los valores de la moda bajo el LNM. Para descartar que este comportamiento haya sido generado por algún fenómeno transitorio, se procedió a generar la misma curva para una fecha más reciente entre el 01/01/2020 y el 12/03/2020 (Figura 6b). El comportamiento de la estación BENV en los meses de enero, febrero y marzo del año 2020 (Figura 6b) es, en cuanto a la forma de las gráficas, el mismo que en la Figura 6a.

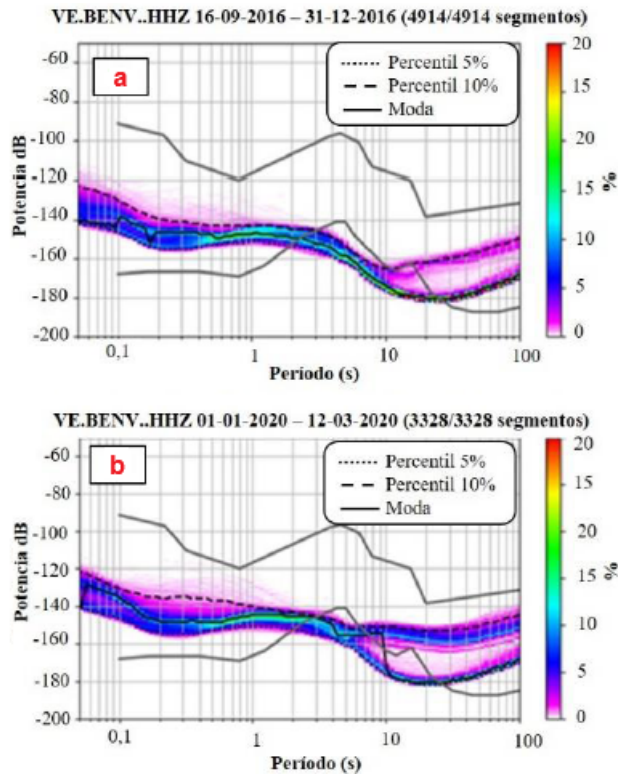


Figura 6. Curva de ocurrencia de ruido sísmico de la componente vertical de la estación BENV. a) fecha del presente estudio y b) fechas recientes

El mismo comportamiento de la estación BENV se vio en la estación JACV (Figura 7a). En el rango del MDF los valores de ruido se encuentran bajo el LNM, con poca dispersión de los valores de amplitud, como lo evidencia la cercanía entre la moda y los percentiles 5% y 95%. Al igual que al estudiar el comportamiento de la estación BENV, se procedió a generar la misma curva, pero con registros sísmicos para una fecha reciente (Figura 7b). El comportamiento para ambas curvas fue el mismo, lo que sugiere el comportamiento anómalo persiste en la estación.

Otra de las estaciones que presentó un comportamiento anómalo fue la estación TURV (Figura 8a). A diferencia de la estación BENV y JACV, la estación TURV si muestra un comportamiento entre los modelos de ruido para la curva generada con registros sísmicos de fechas recientes (Figura 8b).

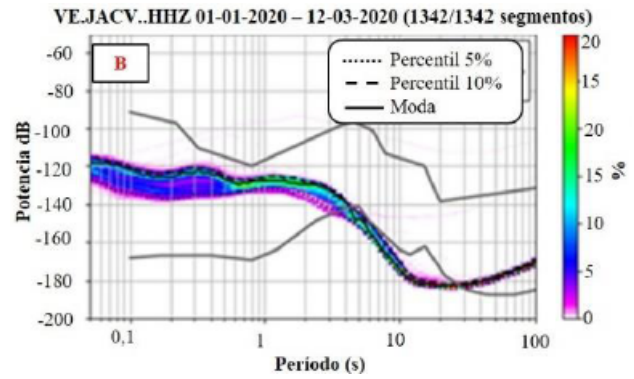
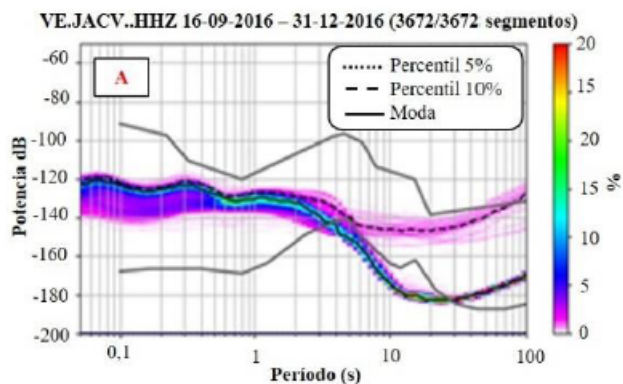


Figura 7. Curva de ocurrencia de ruido sísmico de la componente vertical de la estación JACV. a) fecha del presente estudio y b) fechas recientes.

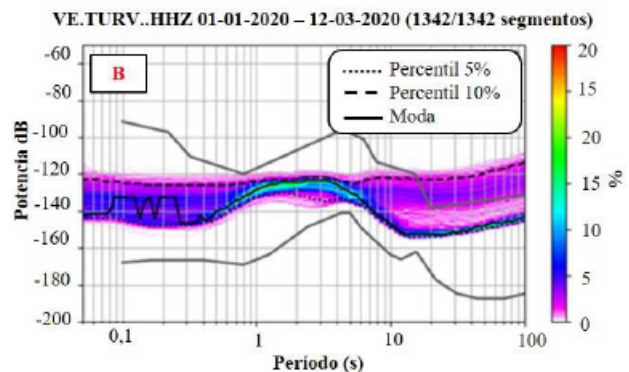
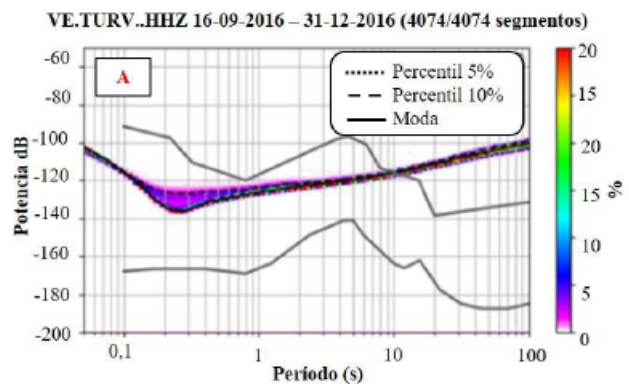


Figura 8. Curva de ocurrencia de ruido sísmico de la componente vertical de la estación TURV. a) fecha del presente estudio y b) fechas recientes.

El comportamiento de las curvas de ruido de las estaciones BENV, JACV y TURV, sugiere que las estaciones presentan fallas, y por consecuencia, los valores de ruido obtenidos no representan una verdadera representación del ruido sísmico en estas zonas. Por este motivo, estas estaciones no fueron utilizadas para estudiar las variaciones del ruido sísmico a nivel nacional. Así, el número de estaciones utilizadas se redujo de 45 a 42.

Microsismo de frecuencia simple (MFS)

Al momento de evaluar el desempeño de las estaciones de la RSSN, el pico característico del MFS se logró apreciar

únicamente en las estaciones SDV y PCRV. Esto puede deberse a que estas dos estaciones son las únicas que utilizan un sensor de altos períodos capaz de recuperar la respuesta del desplazamiento del terreno para períodos mayores a 30 s. En este sentido, los valores de amplitud a partir de los 30 s aumentan bruscamente, lo que evita la aparición del pico característico del MFS. Por este motivo, no fue posible estudiar el comportamiento del MFS en Venezuela.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Según Berger, y otros (2004), las componentes horizontales de un sismómetro tienen un aumento considerable en el ruido que se acentúa en los altos períodos, a diferencia de la componente vertical, posiblemente por fluctuaciones en la presión atmosférica. Por este motivo, únicamente las curvas de ocurrencia de ruido sísmico de las componentes verticales fueron utilizadas para la caracterización del ruido sísmico. De las curvas de ocurrencia, se extrajeron los valores máximos de la moda para el rango de ruido cultural (0,1-1 s) y MFD (4-8 s). El valor máximo de la moda fue elegido para representar el mayor valor de ruido esperado entre los valores de mayor ocurrencia dentro del rango de períodos.

TIEMPO CONTINUO

Ruido cultural

Para representar el comportamiento del ruido sísmico cultural para los registros continuos, se generó el mapa de la Figura 9. Cada círculo representa una estación sismológica y el color define el valor de ruido cultural de mayor ocurrencia.

Al sur de Venezuela, en el Escudo de Guayana, la estación CACV presentó los valores de ruido más bajos (-145,5 dB) entre todas las estaciones utilizadas. La zona oriental se caracteriza por estaciones con valores ligeramente por encima del valor medio respecto a las estaciones de mayor y menor ruido cultural. El rango de valores se encuentra entre -117,5 dB (CRUV) y -131,5 dB (PCRIV) con valores de -121,5 dB presentados por PRGV y ORIV. La estación PCRIV presenta valores bajos de ruido cultural a pesar de encontrarse cerca de zonas urbanas. Esto puede deberse a que el sensor de esta estación se encuentra instalado a 45 metros de profundidad. Según Bethmann, y otros (2012) y Prevedel y otros (2015), la instalación de sensores en pozo reduce el ruido sísmico proveniente de fuentes en superficie debido a la atenuación de las ondas sísmicas a medida que aumenta la profundidad. Hacia el norte, las estaciones FUNV y CARV presentan valores altos de ruido (-115,5 dB y -110,5 dB, respectivamente). A pesar de que estas estaciones se encuentran instaladas en roca, los valores de ruido mostrados se pueden deber a que se encuentran instaladas en (1) la zona urbana con mayor actividad cultural del país y (2) un valle relleno de sedimentos.

La densidad de estaciones en el occidente del país define una zona llamativa. Los altos valores de ruido se muestran en sensores instalados en las cuencas de Maracaibo y Barinas - Apure. Las estaciones SIQV, DABV, CURV, FC01, FC04 y NL07, ubicadas en los Andes de Mérida, muestran los valores de ruido cultural más bajos del occidente del país (-140,5 dB a -125,5). Este rango de valores se prolonga hacia el sur siguiendo la línea definida por las estaciones VA06, NL02, SDV, SOCV, HTOV y SL03.

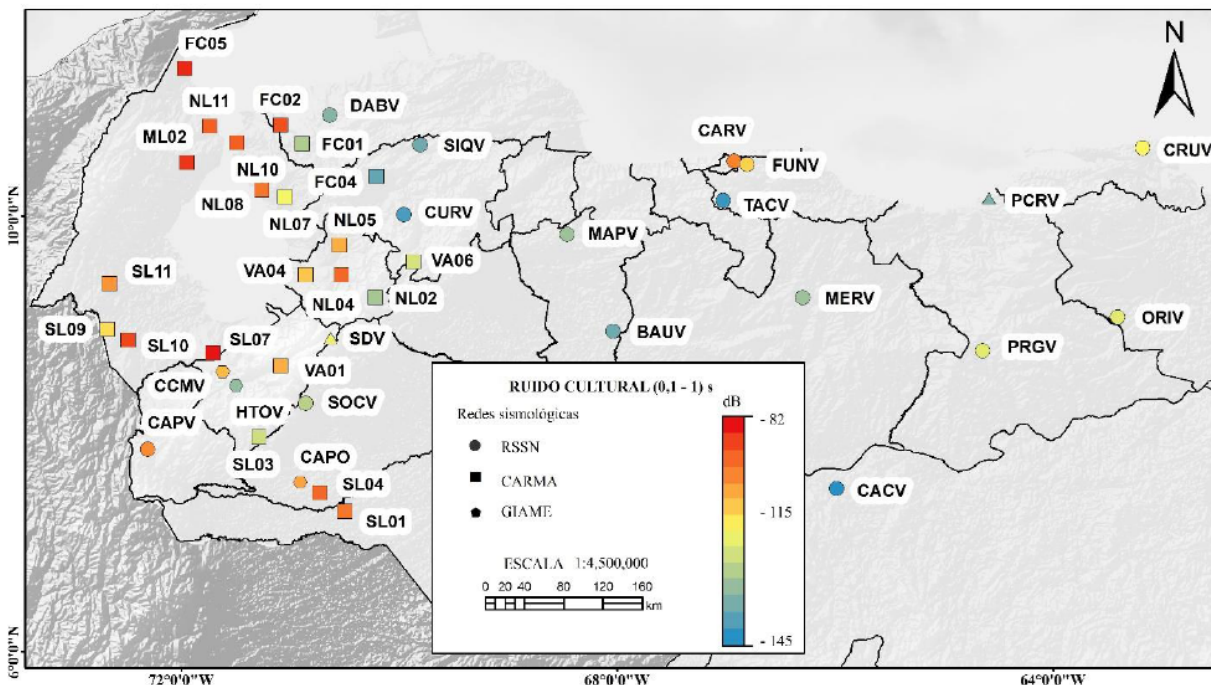


Figura 9. Ruido sísmico cultural en Venezuela (0,1s - 1s).

A simple vista, en el occidente del país, pareciera ocurrir un marcado aumento de ruido cultural generada por la contribución de las características litológicas de las provincias geológicas de esta zona. La presencia de columnas de sedimentos que favorecen la ocurrencia del fenómeno de dispersión de la energía en las cuencas de Barinas - Apure y Maracaibo, sumado a la actividad cultural, pareciera ser la razón de los altos valores de ruido de bajos períodos. Por otro lado, la disminución de estos valores hacia los Andes de Mérida puede deberse a la naturaleza rocosa de esta provincia, desfavoreciendo la presencia de la dispersión de energía.

Aunque la litología sobre la que se encuentran instaladas las estaciones contribuye al aumento o disminución del ruido, otro aspecto de la zona oeste del país pudiese ser el principal motivo de estos altos valores. De las 33 estaciones instaladas en el occidente de Venezuela, 28 pertenecen a una red temporal (proyectos CARMA y GIAME) y solo cinco a una permanente (RSSN). La corta duración de los proyectos de redes temporales ejecutados en el occidente del país, no llevó a la misma planificación de localización de estaciones que para la RSSN. En los proyectos CARMA y GIAME, los sensores fueron instalados en lugares rodeados de fuentes de ruido cultural. Casas, bases militares o fincas son algunos de los lugares de instalación. Por otro lado, las estaciones de la RSSN llevan mayor planificación en vista de que forman parte de una red permanente.

Microsismo de frecuencia doble

A diferencia del ruido cultural, la fuente del MFD no es local, por lo que, en vez de representar los valores para cada estación, se realizó una interpolación de los valores de ruido (Figura 10).

Las estaciones ubicadas en las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure presentan los mayores valores de ruido (-121,5 dB a 129,5 dB) y la interpolación genera una silueta parecida a la extensión de las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure. Este mismo fenómeno, pero con valores de ruido menores, se da con las estaciones ubicada en el estado Falcón y la zona oeste de Maracaibo, generando la silueta de la cuenca de Falcón.

El contraste de los valores mostrados en las cuencas de Falcón, Maracaibo y Barinas - Apure se da en los Andes de Mérida, donde se presentan valores de ruido entre -135,5 dB y -139,5 dB (coloración azul). Hacia los flancos de los Andes de Mérida, los valores de ruido disminuyen (coloración verde), representando amplitudes medias, alrededor de los -130,5 dB, lo que podría deberse al contenido de sedimentos en las laderas de las montañas, el cual incrementa hacia las cuencas.

Los valores medios del microsismo de frecuencia doble se prolongan sobre la cordillera del Caribe presentando un ligero aumento del ruido en las estaciones FUNV y CARV, que pudiese atribuirse a su ubicación sobre el valle de Caracas. En la zona oriental de este sistema montañoso, se muestra una ligera disminución de los valores de ruido respecto a los presentados en la zona central.

Hacia el sur de Anzoátegui y Monagas, las estaciones PRGV y ORIV muestran un aumento del ruido (aproximadamente 3 dB) respecto a los valores presentados al norte. Este aumento del ruido pareciera definir parte de la cuenca oriental. Hacia el sur, los valores disminuyen hacia el Escudo de Guayana con los 130,5 dB que presenta la estación CACV. Al sur (estados Bolívar y Amazonas) y al este (Delta Amacuro) de esta estación, no se prolongó la interpolación debido a la ausencia de estaciones en esta zona.

Se pudo observar que el ruido sísmico proveniente del microsismo de frecuencia doble pareciera estar influenciado, en mayor parte, por la litología que infrayace la estación y no por la distancia entre la estación y la fuente de ruido. Los valores de ruido más altos se presentan en las cuencas de Maracaibo y Barinas - Apure, con valores ligeramente menores en la cuenca Oriental y de Falcón. Por otro lado, en las cordilleras y el Escudo de Guayana los valores de ruido por influencia del microsismo de frecuencia doble son bajos.

La estación BAUV contradice la hipótesis antes expuesta, al encontrarse instalada sobre el Macizo del Baúl, un elevado rocoso donde se esperaría percibir valores bajos de ruido.

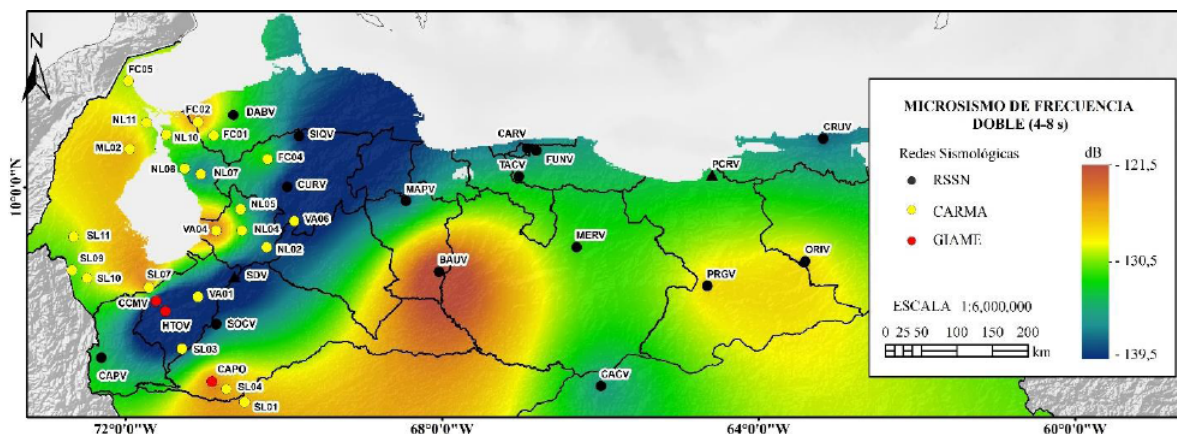


Figura 10. Interpolación de los valores de ruido sísmico en el rango del microsismo de frecuencia doble (4 - 8 s).

Una posible causa de los altos valores de ruido en el rango de los 4 - 8 s pudiera ser que estas amplitudes estuviesen asociadas al modo normal de vibración del alto del Baúl y no a la influencia del microsismo de frecuencia doble.

Las conclusiones obtenidas con base en la interpolación de la figura 10, coinciden con el estudio realizado por Koper y Burlacu (2015). Estos autores, utilizando un arreglo de 1768 estaciones transportables, generaron una interpolación del valor de la amplitud del MFD a lo largo de Estados Unidos. Con base en esta interpolación, concluyeron que las estaciones cercanas a la costa presentarán una amplitud mayor que las instaladas dentro del continente, pero que la presencia de columnas de sedimentos amplifica la señal debido a el fenómeno de la dispersión de la energía.

Otro fenómeno que los autores nombran es la notoriedad de las variaciones de la amplitud en los límites de provincias geológicas, fenómeno que se presenta en la Figura 10 en la transición entre los Andes de Mérida, sus laderas y las cuencas de Maracaibo y Barinas - Apure.

VARIACIONES ENTRE EL DÍA Y LA NOCHE

El MDF presentó variaciones mínimas de ± 1 dB, esto muestra que el momento del día no es influyente en la energía proveniente del MFD. Por otra parte, en el rango de ruido cultural si se vieron fluctuaciones considerables.

Ruido cultural

La representación de las variaciones de ruido cultural entre el día y la noche se presenta en el mapa de la Figura 11. La escala de colores representa el ruido cultural durante el período diurno. El tamaño del triángulo indica el aumento o disminución del valor de ruido para el período nocturno y la posición de los triángulos indica una variación positiva o negativa. Los círculos indican que no hubo variación entre el día y la noche.

La mayor variación de ruido cultural entre el día y la noche la presentan las estaciones NL05 (-17 dB) y SL10 (-15 dB).

Utilizando imágenes satelitales se pudo observar que la estación NL05 fue instalada cercana a lo que parece ser una cantera, mientras que SL10 se encontraba instalada en una finca con una amplia zona de cultivo. Ambas actividades son una fuente potencial de ruido cultural debido a la maquinaria pesada que se utiliza. Su disminución de ruido en las noches se puede deber a que, en estos horarios, las maquinarias dejan de utilizarse por la culminación del horario laboral.

En cuanto al aumento del ruido en el período nocturno, se ven variaciones entre 1 y 3 dB en varias estaciones, que pudiesen ser debido al encendido de equipos del hogar que generar vibraciones de bajos períodos, como pudiesen ser aires acondicionados o plantas eléctricas. La variación más llamativa ocurre en la estación HTOV, donde el ruido cultural en la noche es 7 dB mayor que en el día. Utilizando imágenes satelitales no se logró observar el posible origen de esta variación.

Los valores sin variación definen un comportamiento significativo, ya que sugieren una fuente continua de ruido cultural. La estación SDV, no presenta variación de ruido de bajos períodos debido a que se ubica en las instalaciones de la represa de Santo Domingo y la descarga de agua, que genera estas ondas, es continua.

Variaciones entre épocas del año

En Venezuela existen dos períodos climáticos a lo largo del año, el período de lluvia, entre los meses de mayo y octubre, y el período de sequía, entre los meses de noviembre y abril. El ruido cultural se esperaría que no variara con la estación del año, debido a que su origen depende de la actividad humana y no de un factor climático. Por otro lado, para el rango del MFD, sí se esperan variaciones, ya que estos se originan en el océano por la interacción entre las olas y la energía que estas presentan y sus características varían según la estación del año. Para representar la variación del ruido sísmico en función de la estación del año, se utilizaron los registros sísmicos de las estaciones BAUV y CAPV, para generar espectrogramas que mostraran la variación del ruido entre las estaciones del año.

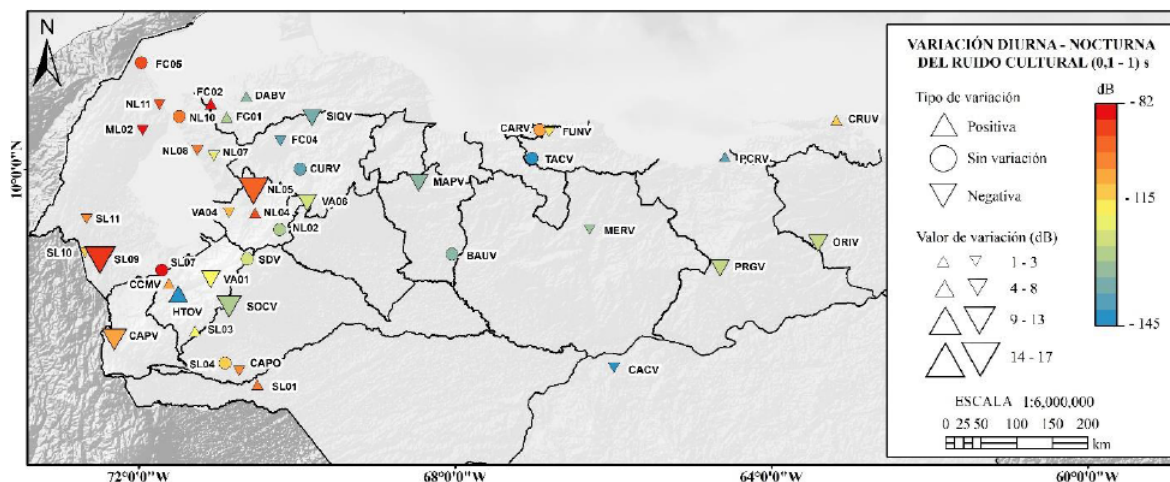


Figura 11. Variación del ruido cultural entre el día y la noche.

Las estaciones BAUV y CAPV presentaron las mismas anomalías en el rango del MFD los días 14 de septiembre y 1 de octubre, ambos del 2016 (Figura 12). Autores como Bromirski, y otros (2013), Gerstoft y Tanimoto (2007) y Schulte, Pelkum, y otros (2004), concuerdan en que la fuente del MFD es la presencia de tormentas en el océano. El periodo de mayor ocurrencia de tormentas en el Atlántico, en el año 2016, fue entre junio y noviembre, por lo que la presencia de estas anomalías entre este periodo pudiera llevar a pensar que este aumento del ruido está relacionado con el aumento de la amplitud de las olas debido a la presencia de tormentas cerca del Caribe.

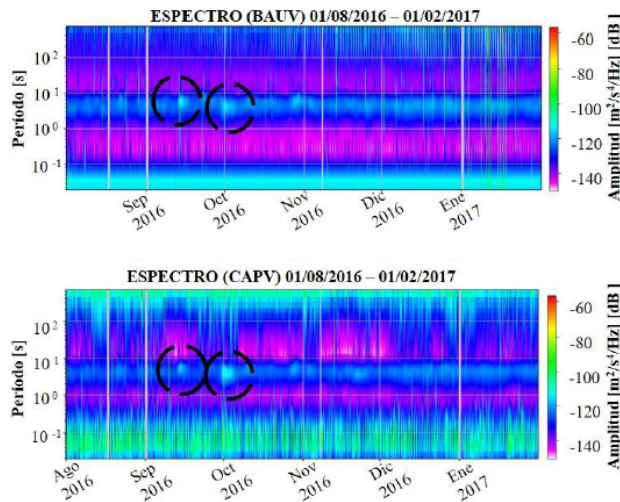


Figura 12. Espectrograma de la estación BAUV y CAPV. Los círculos negros segmentados muestran anomalías destacables.

Etapa de confinamiento por COVID-19

Durante la etapa de confinamiento de la población debido a la pandemia de COVID-19, la actividad cultural diaria se vio reducida. Es de esperarse que los valores de ruido cultural disminuyan a partir de estas medidas de cuarentena. Por problemas técnicos, las únicas estaciones que transmitieron información, antes y durante la etapa de confinamiento, fueron SDV y FUNV. A cada una de ellas se les generó un espectrograma y una gráfica de amplitud contra el tiempo para el rango de período 0,037 s - 0,071 s. De esta manera, se buscaron variaciones en los bajos períodos respecto a las medidas de cuarentena tomadas el 16 de marzo de 2020. Los datos utilizados fueron desde el 7 al 27 de marzo de 2020.

En la Figura 13 no se logra apreciar variaciones de ruido en la estación SDV durante la etapa de confinamiento. Este comportamiento reafirma la teoría de que la fuente de ruido cultural para esta estación es la descarga de agua de la represa Santo Domingo.

Contrario a SDV, la estación FUNV sí presenta una notable disminución en el ruido cultural. El recuadro naranja de la Figura 14 define la semana antes de las medidas de confinamiento sin tomar en cuenta los días sábado y domingo. En este recuadro se ve como el espectro es más brillante que el de los días

posteriores. Los valores de ruido que se presentan los días sábado (S) y domingo (D) que sigue al recuadro naranja, muestran una disminución, la cual es normal debido a que los fines de semana son días de menor actividad cultural.

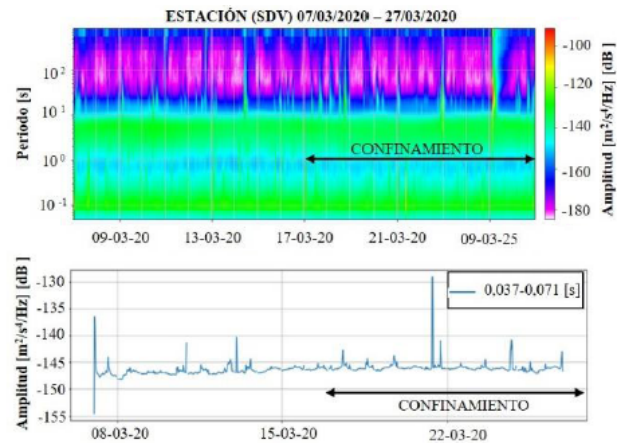


Figura 13. Variación del ruido cultural en la estación SDV durante la etapa de confinamiento debido a la pandemia de COVID-19. Se muestra el espectrograma en la parte de arriba y en la parte de abajo el valor de ruido para el rango de período 0,037 s - 0,071 s.

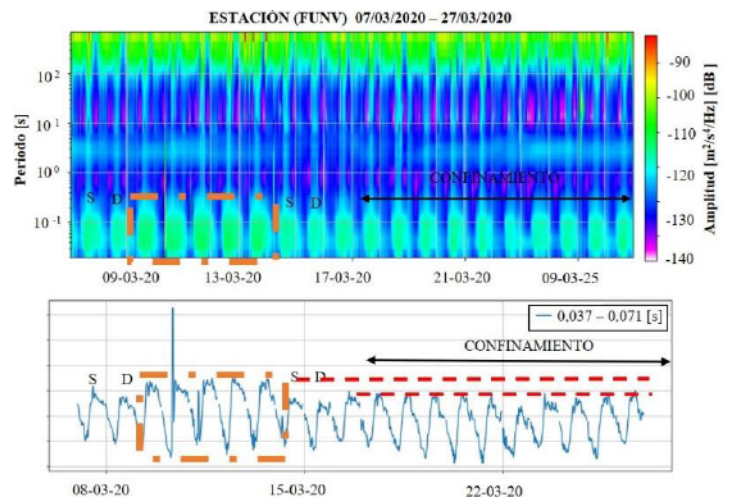


Figura 14. Variación del ruido cultural en la estación FUNV durante la etapa de confinamiento debido a la pandemia de COVID-19. Se muestra el espectrograma en la parte de arriba y en la parte de abajo el valor de ruido para el rango de período 0,037 s - 0,071 s.

Debido a la cuarentena decretada el día 16 de marzo, se observa cómo los valores de ruido se mantienen similares al día domingo. En el gráfico inferior de la Figura 14, se muestra la gráfica de amplitud en función del día. Con líneas rojas segmentadas, se señalan los picos máximos de ruido, aproximadamente de -111 dB, que disminuyen a partir del sábado 15 de marzo hacia los -115 dB. Estos valores de ruido cultural se prolongan hasta el 27 de marzo, mostrando que la disminución de la actividad cultural se mantuvo durante las medidas de cuarentena tomadas.

CONCLUSIONES

Para un lapso de 3 meses a finales del año 2016, se calculó la densidad espectral de potencia y se generaron funciones de densidad de probabilidad a los registros sismológicos de las estaciones de la RSSN y de las redes temporales CARMA y GIAME.

Se generaron representaciones del ruido cultural y del microsismo de frecuencia doble. En el rango de ruido cultural (0,1-1 s), los valores altos de ruido se obtuvieron en estaciones cercanas a lugares donde la actividad cultural es elevada, como zonas urbanas (FUNV), fincas (SL10), canteras (NL05) y bases militares (CAPV). En cuanto al microsismo de frecuencia doble, los valores más elevados se presentaron en estaciones instaladas sobre cuencas sedimentarias, mientras que, los valores más bajos se vieron en el Escudo de Guayana y las cordilleras de los Andes Mérida y del Caribe. En ambos casos, los resultados presentan una mayor veracidad en el occidente del país, debido a la escasa distribución de estaciones en el centro, oriente y sur de Venezuela. Con base en estos comportamientos, se pueden definir zonas favorables para la instalación de estaciones, donde la señal captada será más limpia y con bajo contenido de ruido. Las zonas favorables se pueden definir como aquellas alejadas de la actividad humana y dentro de los límites de las cordilleras y el Escudo de Guayana, mientras que las zonas con elevada influencia de la actividad cultural y ubicadas en cuencas sedimentarias, serán las más desfavorables para obtener una señal sísmica con bajo contenido de ruido.

De las curvas de ocurrencia de ruido sísmico se pudieron detectar comportamientos anómalos que se interpretaron como fallas en los equipos de las estaciones BENV, JACV y TURV que deben ser atendidas para un mejor funcionamiento de la RSSN. El comportamiento del ruido sísmico fue estudiado durante la etapa de confinamiento por la pandemia de COVID-19 en las estaciones SDV y FUNV. Se pudo observar una disminución de 4dB en el rango definido como ruido cultural captado por la estación FUNV (ubicada en la ciudad de Caracas) a partir del inicio de la cuarentena y que se prolongó durante la vigencia de esta medida, mientras que no se observó una variación en la estación SDV (ubicada en los Andes, específicamente en la represa de Santo Domingo), ya que se encuentra lejos de actividades humanas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Leonardo Alvarado, Natalio Reyes, Ricardo López, Julio Delgado y Arturo Pernía del Departamento de Sismología y el Departamento de Instrumentación y Electrónica de FUNVISIS, por la colaboración que brindaron para la realización de este estudio. Se hace especial agradecimiento a Alejandra Martínez y Diego Negrette por los aportes a este trabajo. Se agradece a FUNVISIS, así como a los proyectos CARMA (Investigación de subducción Flat Slab y de la tectónica de Borde de Placas en el norte de América del Sur - Rice University) y GIAME (Geociencia Integral de los Andes de Mérida - FONACIT 2012002202) por los datos sismológicos.

RERERENCIAS

- ARNAIZ, M., RODRÍGUEZ, I. & AUDEMARD, F. A. (2011). Análisis gravimétrico y flexural del occidente de Venezuela. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3), 420-438.
- AUDEMARD, F. E. & AUDEMARD, F. A. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela; relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction, *Tectonophysics*, 345, 299-27. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00218-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00218-9)
- AUDEMARD, F. A., MACHETTE, M., COX, J., DART, R. & HALLER, K. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-18, 78 pp.
- BERGER, J., DAVIS, P. & EKSTROM, G. (2004). Ambient Earth Noise: A Survey of the Global Seismographic Network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B11), 1-10. <https://doi.org/10.1029/2004JB003408>
- BETHMANN, F., DEICHMANN, N. & MAI, P. (2012). Seismic Wave Attenuation from Borehole and Surface Records in the Top 2.5 km Beneath the City of Basel, Switzerland. *Geophysical Journal International*, 90(2), 1257-1270. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05555.x>
- BORMANN, P., ENGDahl B., & KIND R. (2012). *Seismic Wave Propagation and Earth Models*. In: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP2)* (pp. 1-105). Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Germany.
- BORMANN, P. & WIELANDT, E. (2013). *Seismic Signals and Noise*. In: Bormann, P. (Ed), *New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP2)* (pp. 1-62). Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam, Germany.
- BROMIRSKI, P., STEPHEN, R. & GERSTOFT, P. (2013). Are Deep-ocean-generated Surface-wave Microseisms Observed on Land?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7), 3610-3629. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50268>.
- COOLEY, J. & TUKEY, J. (1965). An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*, 19(90), 297-301.

- DEMUTH, A., OTTEMÖLLER, L. & KEERS, H. (2016). Ambient Noise Levels and Detection threshold in Norway. *Journal of Seismology*, 20, 889-904. <https://doi.org/10.1007/s10950-016-9566-8>.
- GERSTOFT, P. & TANIMOTO, T. (2007). A Year of Microseisms in Southern California. *Geophysical Research Letters*, 34(20), 1-6. <https://doi.org/10.1029/2007GL031091>.
- FEO-CODECIDO, G., SMITH, F., ABOUD, N., & DI GIACOMO, E. (1984). *Basament and Paleozoic rocks of the Venezuelan Llanos basins*. In: Bonini, W. E., Hargraves, R. B., & Shagam R. (Eds.) *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics* (162, 175-187), Geol. Soc. Amer. <https://doi.org/10.1130/MEM162-p175>.
- GONZÁLEZ DE JUANA, C., AROZENA, C. J., & PICARD, X. C. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Caracas, Venezuela. FONINVES, 1031 pp.
- HACKLEY, P., URBANI, F., KARLSEN, A.W., GARRITY, C.P. (2006). *Mapa geológico de Venezuela a escala 1:750.000*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2006-1109.
- HAVSKOV, J. & ALGUACIL, G. (2004). Seismic Noise. In: *Instrumentation in Earthquake Seismology* (pp. 77-85). Dordrecht Springer.
- HUNG, E. (1997). *Foredeep and thrust belt interpretation of the Maturin sub-basin, eastern Venezuela basin* [Master's thesis]. Rice University. Houston, Texas, USA, 125 pp.
- JÁCOME, M., RONDÓN, K., SCHMITZ, M., IZARRA, C. & VIERA, E. (2008). Integrated seismic, flexural and gravimetric modelling of the Coastal Cordillera Thrust Belt and the Guárico Basin, North-Central Region, Venezuela. *Tectonophysics*, 459(1-4), 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.03.008>.
- KOPER, K. & BURLACU, R. (2015). The Fine Structure of Double-frequency Microseisms Recorded by Seismometers in North America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3), 1677-1691. <https://doi.org/10.1002/2014JB011820>.
- KRZYWOSZ, N. (2015). *Investigation of Ambient Seismic Noise Using Seismic Interferometry in Western Montana* [Master's thesis]. Montana Technological University, Montana, USA, 124 pp.
- LIUZZI, D., SCHMITZ, M., JÁCOME, M & SÁNCHEZ, J. (2006). Adelgazamiento de sedimentos Cretácicos - Oligocenos bajo de Serranía del Interior, Noreste de Venezuela: Evidencia a partir de observaciones de sísmica profunda. Conference Proceedings, *9th Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas* (Colombia).
- MCNAMARA, D. Y BULAND, R. (2004). Ambient Noise Levels in the Continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(4), 1517-1527. <https://doi.org/10.1785/012003001>.
- MENDOZA, V. (1977). Evolución tectónica del Escudo de Guayana. Cong. Latinoamericano Geol. II, Caracas, Noviembre 1973. Memoria, Bol. Geol., Caracas, Publ. Esp., vol. 7, III, 2001-2270.
- MUESSIG, K. (1984). *Structure and Cenozoic tectonics of the Falcón basin, Venezuela and adjacent areas*. In: Bonini, W.; R. Hargraves & R. Shagam (Eds.). *The Caribbean-South American plate boundary and regional tectonics*. Geological Society of America, Memoir 162, 217-230.
- PETERSON, J. (1993). *Observations and Modeling of Seismic Background Noise*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 93-322, 94 pp.
- PREVEDEL, B., BULUT, F., BOHNHOFF, M., RAUB, C., KARTAL, R., ALVER, F. & MALIN, P. (2015). Downhole Geophysical Observatories: Best Installation Practices and a Case History from Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 104, 1537-1547. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1147-5>.
- SHEEN, D., SHIN, J. & KANG, T. (2009). Seismic Noise Level Variation in South Korea. *Geosciences Journal*, 13, 183-190. <https://doi.org/10.1007/s12303-009-0018-0>.
- SCHMITZ, M., RAMÍREZ, K., MAZUERA, F., ÁVILA, J., YEGRES, L., BEZADA, M., & LEVANDER, A. (2021). Moho Depth Map of Northern Venezuela Based on Wide-Angle Seismic Studies. *Journal of South American Earth Sciences*, 107, 103088. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103088>.
- SCHMITZ, M., BEZADA, M., AVILA, J., VIEIRA, E., YÁNEZ, M., LEVANDER, A., ZELT, C.A., MAGNANI, M. B., JÁCOME, M. I. & GRUPO DE SÍSMICA ACTIVA BOLÍVAR, (2008). Crustal thickness variations in Venezuela from deep seismic observations. *Tectonophysics* 459: 14-26.

- SCHULTE-PELKUM, V., EARLE, P. & VERNON, F. (2004). Strong Directivity of Ocean-generated Seismic Noise. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(3), 1-13. <https://doi.org/10.1029/2003GC000520>.
- STUTZMANN, E., ROULT, G. Y ASTIZ, L. (2000). GEOSCOPE Station Noise Levels. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(3), 690-701. <https://doi.org/10.1785/0119990025>.
- URBANI, F. (2018). Una revisión de los terrenos geológicos del Sistema Montañoso del Caribe, norte de Venezuela. *Boletín de Geología*, XXIII(36), 118-210.
- URBANI, F. (2014). Terrane distribution in north-central Venezuela. En: M. Schmitz, F. Audemard, F. Urbani (Eds.), *El Límite Noreste de la Placa Sudamericana - estructuras litosféricas de la superficie al manto*, Comité Editor Libros y Monografías, Fac. Ing. UCV, 79-102.
- VISCARRET, P., URBANI, F., WRIGHT, J. (2012). Una Nueva Geocronología del Macizo El Baúl, Cojedes, Venezuela. *Geos*, 42, 1-14.
- YORIS, F. G., & OSTOS, M. (1997). Petroleum Gology of Venezuela, In: Singer, J. M. (Ed.) *Well Evaluation Conference: Caracas, Schlumberger Surenco C.A.*, Vol. I, 1-44.