

# CIENCIAS GEOGRÁFICAS

Revista de la Sección Nacional de Dominicana  
Instituto Panamericano de Geografía e Historia



# **Análisis espacial de la atenuación de las ondas sísmicas en la República Dominicana**

## **Spatial Analysis of the Attenuation of Seismic Waves in the Dominican Republic**

ANDRÉS MARÍA MORETA ROSARIO<sup>1</sup>

### **Resumen**

Esta investigación constituye un análisis espacial de la atenuación de las ondas sísmicas en la República Dominicana. Para ello, se seleccionó una muestra de 10,248 eventos sísmicos de la base de datos del Centro Nacional de Sismología de la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD). Se extrajo un factor de calidad (Q) en cinco frecuencias, que indica el decaimiento de la onda sísmica en cada una de estas. Luego, se hizo un análisis exploratorio y estadístico a los datos para ver su distribución espacial y observar qué tan normal es su distribución. Se busca un interpolador que de alguna manera responda lo mejor posible a estas estadísticas, se interpolan los datos y, finalmente, se obtienen los mapas que muestran la atenuación de las ondas sísmicas en todo el país y en cada una de las provincias de manera particular.

---

<sup>1</sup> Centro Nacional de Sismología, Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD). Correos electrónicos: amoreta78@uasd.edu.do; andresmoreta.r@gmail.com.

El estudio concluye que las provincias que presentan mayor nivel de atenuación en su territorio son Barahona y Pedernales, en tanto que el Distrito Nacional y la provincia Santo Domingo presentaron los niveles más bajos de atenuación de las ondas sísmicas.

**Palabras clave:** atenuación, frecuencia, clases.

### **Abstract**

In the present work, end of Master, a spatial analysis of the attenuation of seismic waves in the Dominican Republic is made. For this, 10,248 seismic events were selected from the database of the National Seismology Center of the Autonomous University of Santo Domingo. A quality factor (Q) is extracted, in five frequencies, which indicates the decay of the seismic wave in each of these. An exploratory analysis is made to the data to see the spatial distribution of the same, then a statistical analysis is carried out to observe how normal the distribution of these data is, an interpolator is sought that somehow responds as best as possible to these data statistics, the data is interpolated and finally the maps showing the attenuation of seismic waves throughout the country and in each of the provinces in a particular way are obtained, evidencing that the provinces with the highest level of attenuation in their territory are Barahona and Pedernales, while the National District and the Santo Domingo province were the ones that presented the lowest levels of seismic wave attenuation.

**Keyword:** attenuation, frequency, classes.

## Introducción

La seguridad ha sido una preocupación desde los anales de la historia del ser humano. En la antigüedad, el hombre se enfrentó a diversos peligros que ponían en riesgo su vida, de tal forma que centró sus esfuerzos en poner todos los medios necesarios para salvaguardarla. Por eso se vio en la imperiosa necesidad de crear herramientas de protección ante todo tipo de amenazas, principalmente de origen natural, tales como terremotos y otros fenómenos de igual índole (INCIBE, 2015).

Aún en nuestros días la ocurrencia de los mismos representa peligro, por lo que seguimos desarrollando herramientas que nos ayuden a minimizar los posibles daños que pudiésemos enfrentar ante estos fenómenos. Una de esas herramientas son los sistemas de información geográfica, los cuales nos permiten hacer análisis espacial para conocer mejor el área geográfica en la que nos desenvolvemos y así tomar las medidas que sean necesarias para evitar daños a nuestra integridad física y bienes materiales.

El análisis espacial de la información generada en los estudios geocientíficos ha consistido generalmente en la superposición de los datos analógicos recopilados y plasmados en forma de mapas en una mesa para realizar un posterior análisis visual (Bonham-Carter, 1994). Este nos permite la manipulación de datos espaciales en diferentes formas y hace posible extraer como resultado conocimientos adicionales sobre los procesos que ocurren en el espacio de interés para tener una mejor comprensión de estos (Ojeda & Tovar, 2016).

La República Dominicana se encuentra localizada en la parte norte de la placa tectónica del Caribe, donde esta

interactúa con la norteamericana, y presenta varios sistemas de fallas geológicas importantes, lo que la hace propicia para la ocurrencia de terremotos destructivos (Mann, Grenville, & Lewis, 1991). Además, ha sido escenario de grandes terremotos en el pasado, como fueron los sismos de 1842 y 1946 (Delanoy, 1995), lo que evidencia su alto potencial sísmico.

Debido a que la generación de sismos es un proceso permanente y continuo, es de esperarse la ocurrencia de nuevos terremotos, en tanto que las grandes concentraciones poblacionales en las principales ciudades del país han contribuido con el aumento de la vulnerabilidad ante estos eventos. El aumento de la construcción de edificaciones en lugares riesgosos, sumado a la carencia de regulaciones eficientes para las edificaciones y para el uso del suelo ha conllevado a un alto nivel del riesgo sísmico en el país (Polanco, 2012) .

Esta investigación tiene como finalidad fundamental analizar el comportamiento de las ondas sísmicas en cuanto a su propagación y atenuación en el subsuelo de la República Dominicana, a partir del análisis de los registros obtenidos con la Red Sísmica Nacional durante el periodo comprendido entre 2010 y 2020 se identifica la atenuación espacialmente y se elaboran mapas para todo el país.

El desarrollo de esta investigación busca relacionar el comportamiento de las ondas sísmicas con las características y heterogeneidades de la corteza y su efecto de amplificación del subsuelo, y persigue obtener las informaciones sobre la atenuación del subsuelo, necesaria para que los planificadores urbanos y económicos, los ingenieros, los tomadores de decisiones y las instituciones de respuesta ante riesgo de desastres implementen las medidas para garantizar el desarrollo sostenible que demanda la sociedad actual.

En este estudio se determinará la atenuación dependiente de la frecuencia que llamaremos  $Z$ , la cual dependerá del decaimiento de la onda sísmica secundaria ( $S$ ). Esta nos dirá qué tanto se atenúa la onda sísmica desde el epicentro del evento hasta el lugar geográfico de la estación sísmica. Estos valores serán tomados en un rango de frecuencia de 0 a 10Hz. Con ellos se hará un análisis espacial de la atenuación de las ondas sísmicas para cada una de las provincias de la República Dominicana.

## **Metodología**

La metodología empleada para realizar este estudio consistió en tomar una serie de eventos sísmicos de una base de datos, explorarlos, modelarlos, interpolarlos y mapearlos con un *software* de sistema de información geográfica.

La variable a evaluar es la atenuación de la onda sísmica, la cual se obtiene, evidenciando la disminución de la amplitud de la onda sísmica a través de un factor de calidad, denominado  $Q$ .

## **Obtención de los datos**

Para obtener los datos se seleccionó una muestra de 10,248 eventos sísmicos de la base de datos del Centro Nacional de Sismología (CNS) de la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), en la que los principales campos son los siguientes: fecha y hora de ocurrencia del evento sísmico, latitud, longitud, profundidad en kilómetros, error residual medio de las llegadas de las ondas sísmicas a las estaciones sismológicas y la magnitud, como el fragmento que se muestra en la Tabla 1.

La ventana de tiempo seleccionada se extiende desde el 1 de enero de 2010 hasta el 31 de diciembre de 2020, con todos los eventos sísmicos registrados en las coordenadas 17.0 a 20.2 latitud norte y -72.2 a -68.0 longitud oeste, como se muestra en la Figura 1.

La atenuación de las ondas sísmicas, descrita habitualmente por el parámetro adimensional  $Q$ , llamado ‘factor de calidad específico’, expresa la disminución de la amplitud de onda que ocurre cuando una onda se propaga a través de medios reales (Ambeh & Fairhead, 1989). El factor de calidad  $Q(f)$  se obtiene mediante la siguiente ecuación (McNamara, et al., 2012):

$$Q(f) = Q_0 (f/f_0)^\eta$$

Ecuación 1

Donde  $Q(f)$  se expresa en función de una frecuencia de referencia  $f_0$ , generalmente 1Hz.  $Q_0$  es el valor de  $Q$  a esa frecuencia de referencia; y  $\eta$  es una constante frente a todas las frecuencias consideradas, la cual depende de la relación de velocidad de la onda sísmica primaria y la secundaria.

De acuerdo con el modelo de retrodispersión simple (Aki & Chouet, 1975),  $Q$  se estima a partir del decaimiento de amplitud de las ondas sísmicas.

En nuestro caso, para obtener los valores de  $Q$  se usó el programa informático CODAQ, el cual está bajo la plataforma SEISAN, un programa especializado para la localización y análisis de eventos sísmicos desarrollado por el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Bergen de Noruega y por el Servicio Geológico de Dinamarca y Groenlandia (Ottemoller, Voss & Havskov, 2020).

El programa calcula el factor  $Q$  para una serie de eventos y estaciones a frecuencias determinadas.

Las frecuencias seleccionadas son 1, 3, 5, 7 y 9Hz, cada una con un ancho de banda de 2Hz, es decir  $1 \pm 1\text{Hz}$ ,  $3 \pm 1\text{Hz}$ ... Esto garantiza la obtención de información en un espectro que va desde 0 hasta 10Hz.

## Exploración de los datos

Al trabajar con datos espaciales es necesario observar una serie de implicaciones que han de considerarse con detenimiento antes de llevar a cabo análisis complejos. Conocer en profundidad el dato espacial es, por tanto, imprescindible, no solo en lo relativo a su forma, su manejo, sino también en lo referente a su análisis y cómo ha de tratarse e interpretarse la información que contiene (Ojeda y Tovar, 2016).

Al hacer un análisis espacial es recomendable comprender los supuestos de la autocorrelación y modelización espacial. Las pruebas y gráficos requieren interpretación; al realizarlas, varios supuestos se dan por satisfechos. En tal sentido, también se requiere conocer tanto los datos como los supuestos.

Los supuestos básicos que deben cumplir las observaciones son **normalidad** y **homocedasticidad**. La evaluación de normalidad es un requisito estricto al evaluar la autocorrelación espacial y al realizar modelización espacial. Esta comprobación determina qué tanto se acerca la distribución de los datos al modelo de la distribución normal. La mayoría de modelos estocásticos asume que las observaciones se aproximan a una media y que se sitúan en torno a ella de forma

aleatoria, siguiendo dicha distribución. Si este supuesto no se cumple, las técnicas de modelización pierden potencia o podrían arrojar relaciones erróneas. Por otra parte, la homocedasticidad aplicada al análisis espacial asume que la media y la varianza son constantes en el espacio, es decir, se asume que no existe tendencia en los datos, y que la dispersión es invariable en las distintas localidades del conjunto de datos. No es un requisito estricto al evaluar autocorrelación, pero sí debe considerarse o atenuarse al realizar modelizaciones. La normalidad se evalúa comúnmente con la gráfica cuantilar normal, así como con pruebas estadísticas (Martínez, 2019).

En este estudio se tomaron en cuenta estos supuestos para hacer el análisis espacial.

## **Exploración estadística a los datos**

Para el análisis estadístico se usó el *software* RStudio, que es bastante robusto para este tipo de análisis. Aquí se buscó identificar los máximos, mínimos, cuartiles y media de los datos obtenidos para cada una de las frecuencias (Tabla 2).

## **Prueba de Shapiro Wilks**

Se aplicó la prueba de Shapiro Wilks, que es uno de los estadísticos empleados para determinar normalidad en datos de análisis espacial. Este se fundamenta estadísticamente en una gráfica de probabilidad, en la que se considera la regresión de las observaciones sobre los valores esperados de la distribución hipotetizada, donde su estadístico  $W$  representa el cociente de dos estimaciones de la varianza de una distribución normal (Pedrosa, 2015).

El test de Shapiro-Wilks plantea la hipótesis nula de que una muestra proviene de una distribución normal. Elegimos un nivel de significancia (*P valor*), el cual normalmente es 0,05 y tenemos una hipótesis alternativa que sostiene que la distribución no es normal.

En ocasiones se suele hacer una transformación a los datos para ver si se ajustan mejor a la normalidad, que considerándolos lineales (Martínez, 2019). En nuestro caso, además de hacer las corridas con los datos lineales ( $Z_n$ ), también se aplicó una transformación logarítmica, esta nueva variable es llamada  $Z_n\text{Log}$  (atenuación normalizada logarítmica). El cálculo se hizo con el programa RStudio, mediante las sentencias `shapiro.test(x)` y `shapiro.test(log(x))`.

## Pruebas gráficas

Las pruebas gráficas son imágenes que reflejan los datos, los cuales hay que interpretar, estas nos indican qué tan dispersos pueden estar los datos, entre ellas tenemos los histogramas, los cuartiles, diagramas de cajas, entre otras. Para los fines de este artículo, solo usaremos el histograma, una prueba gráfica en forma de barras con la que se puede representar variables, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Este tipo de prueba permite tener una visión general de la distribución de los datos (Martínez, 2019).

## Modelización de los datos

Al predecir y simular fenómenos espacialmente continuos es necesario modelar el comportamiento del movimiento de

los datos (Martínez, 2019). Una forma común de hacerlo es viendo la variabilidad del dato al interpolarlo con sus vecinos. Algunos interpoladores, como el kriging, utilizan un modelo para ponderar las observaciones cercanas, denominado variograma o semivariograma.

El variograma es el gráfico de representación de estimaciones de la semivarianza ( $\gamma$ ); mide el grado de dependencia espacial entre muestras. En la medida en que aumenta la distancia entre pares de observaciones, se asume que la semivarianza aumenta igualmente. Observaciones cercanas obtendrán semivarianzas pequeñas, puesto que, si existe autocorrelación espacial, observaciones cercanas serán muy parecidas (Martínez, 2019), en tanto que observaciones lejanas tendrán semivarianzas grandes.

Se utilizan distintos variogramas teóricos, siendo los más comunes el exponencial, el esférico y el gaussiano. En las imágenes de la 8 a la 12 se presentan los variogramas de las diferentes frecuencias en estudio.

## Interpolación de los datos

En ciertos casos el usuario conoce el valor de una función  $f(x)$  en una serie de puntos  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , pero no se conoce una expresión analítica de  $f(x)$  que permita calcular el valor de la función para un punto arbitrario.

La idea de la interpolación es poder estimar  $f(x)$  para un  $x$  arbitrario, a partir de la construcción de una curva o superficie que une los puntos donde se han realizado las mediciones y cuyo valor si se conoce. Se asume que el punto arbitrario  $x$  se encuentra dentro de los límites de los puntos de medición.

Se plantea que a partir de  $n$  parejas de puntos  $(x_k, y_k)$ , se pueda obtener una función  $f$  que verifique que:  $f(x_k)=y_k$ .

La interpolación consiste en hallar un dato dentro de un intervalo en el que conocemos los valores en los extremos. También, puede ser que tengamos varios puntos y queremos hallar el valor entre estos.

Existen varios métodos de interpolación. En nuestro caso, solo abordaremos el interpolador kriging, por ser este uno de los más comunes y usados en el análisis espacial en los sistemas de información geográfica.

El kriging es una técnica de interpolación que está basada en modelos estadísticos que incluye la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos y el variograma para medir la autocorrelación espacial (Esri, s. f.). Además, asume linealidad e insegadez y minimiza el error cuadrático a través del método de Lagrange (Brea, 2013).

Según las literaturas consultadas, debemos considerar que para obtener resultados aceptables usando el interpolador kriging, los datos tienen que presentar normalidad, y puesto que al hacer el análisis exploratorio hemos visto que los datos que más se acercan a la normalidad son los que hemos transformado logarítmicamente, se usaron estos para la interpolación. En tanto que, en la modelización, los variogramas nos indican que los datos se ajustan más a una curva exponencial, por lo que se empleó un semivariograma exponencial.

Los datos estaban en coordenadas geográficas, por lo que fue necesario llevarlos a coordenadas métricas para una mejor interpretación del espacio muestreado y tener una mejor familiaridad con las unidades de medidas. Se empleó una

celda de 30x30m, por considerarla suficiente para distinguir diferencias en el espacio a analizar y garantizar un procesado relativamente rápido de los datos. Se utilizaron los 12 puntos más cercanos para interpolar y conseguir la información en los lugares donde no la hay.

Para hacer la clasificación se tomaron cinco (5) clases a iguales intervalos de datos. En tal sentido, contamos con cinco quintiles, el que contiene los valores más bajos se considera como la atenuación más baja y a valores más altos, mayor atenuación. Se tomó una paleta de colores que va de amarillo a rojo, el amarillo para los colores bajos y según aumenta la atenuación, aumenta la tonalidad, hasta llegar a rojo, correspondiéndose a la más alta atenuación. La asignación de los colores corresponde a la librería de ArcGis 10.3 y está definida como se muestra en la Tabla 4. Asimismo, en la Tabla 5 se presenta los diferentes niveles de atenuación para cada una de las frecuencias.

## **Mapas elaborados con los datos**

En las imágenes de la 13 a la 17 se presentan los mapas obtenidos a partir de los datos para todo el país para la atenuación de las ondas sísmicas de las diferentes frecuencias en estudio, con una escala de 1:1,800,000, esto indica que una porción de un centímetro vista en el mapa, equivale a un millón ochocientos mil centímetros medidos en tierra, es decir, en el área de estudio de esta investigación.

## Resultados

### Distribución espacial

En el mapa de sismicidad 2010-2020 (Figura 1) se puede visualizar que la nube de puntos o eventos sísmicos seleccionados entre las coordenadas escogidas cubre por completo la República Dominicana y los alrededores que pudieran aportar sismos que generen ondas con amplitudes suficientes para producir perturbaciones significativas en el suelo del país. De igual manera, la cantidad de datos obtenidos para las frecuencias en estudio están distribuidos en todo el territorio dominicano y sus alrededores, lo que garantiza información de atenuación en todas las provincias.

### Prueba estadística

El estadístico ( $W$ ), como se puede apreciar en la Tabla 3, presenta una excelente confianza para todas las frecuencias en la variable transformada ( $Z_n \text{Log}$ ), aunque no así para la variable no transformada ( $Z_n$ ). En ambos casos, el nivel de significancia ( $p$ ) es muy bajo, lo que nos indica que, aunque los datos tienen una buena distribución, estos no siguen una distribución completamente normal.

### Pruebas gráficas

En las imágenes de la 2 a la 6, en los histogramas de las primeras frecuencias, 1 a 5Hz, se puede ver que los datos transformados presentan bastante normalidad, no así para la variable original, ya que estos presentan un sesgo a la derecha de la media. Para las frecuencias mayores a 5Hz, el sesgo va aumentando para ambas variables.

## Modelización

Observando los variogramas de las figuras de la 8 a la 12, estos nos indican que los datos se ajustan más a una curva exponencial que a los otros dos modelos empleados, también se nota que a medida que aumenta la frecuencia los datos se alejan de la curva del modelo, lo que nos indica que va perdiendo la normalidad.

## Mapas obtenidos fruto de la interpolación

En este artículo solo se presentan los cinco mapas para los cinco rangos de frecuencias empleados para toda la República Dominicana, en tanto que en la tesis “Análisis Espacial de la Atenuación de las Ondas Sísmicas en República Dominicana” (Moreta, 2022) se encuentran los mapas individualizados para todas las provincias del país, así como para el Distrito Nacional.

### *Mapa de atenuación de ondas sísmicas para frecuencia de 1Hz*

Las ondas sísmicas presentan una atenuación con una importante variabilidad para todo el país. Las provincias que presentan la atenuación más alta son: Pedernales (esta no fue muestreada en su totalidad por insuficiencia de datos en su parte sur) y San Cristóbal; las que presentaron la atenuación más baja fueron Dajabón, Distrito Nacional, Espaillat, Hermanas Mirabal, Monte Cristi y Puerto Plata. Para una mejor comprensión, véase el mapa en la Figura 13.

*Mapa de atenuación de ondas sísmicas para frecuencia de 3Hz*

En el mapa (Figura 14) correspondiente a la frecuencia de 3Hz, podemos ver que el país sigue presentando una variación importante de la atenuación de las ondas sísmicas para esta frecuencia. Las provincias que presentan mayor área de alta atenuación son Barahona y Pedernales, mientras que la mayor parte de las demás provincias no presentaron áreas afectadas por alta atenuación a esta frecuencia.

*Mapa de atenuación de ondas sísmicas para frecuencia de 5Hz*

En este mapa (Figura 15) podemos observar que la parte este del país presenta baja y medio baja atenuación, en tanto que el sur y la parte norte siguen presentando importantes concentraciones de alta y medio alta atención de las ondas sísmicas. Solo la provincia Barahona tiene la mayor parte de su área con una alta atenuación; la mayoría de las demás provincias registran baja o medio baja atenuación.

*Mapa de atenuación de ondas sísmicas para frecuencia de 7Hz*

Siguiendo la Figura 16 en el mapa podemos ver que solo las provincias del suroeste del país tienen la mayor parte de su área con una alta atenuación, mientras que la mayoría de las provincias registran baja o medio baja atenuación.

*Mapa de atenuación de ondas sísmicas para frecuencia de 9Hz*

En este mapa (Figura 17) podemos observar que solo la provincia Barahona tiene la mayor parte de su área con una

alta atenuación, seguida de Independencia y Pedernales; la mayoría del resto de las provincias registran desde moderada hasta baja atenuación al paso de las ondas producidas por terremotos.

## Conclusiones

En este análisis espacial de la atenuación de las ondas sísmicas en la República Dominicana se pudo observar gráficamente que, en términos generales, los datos empleados tienen una distribución homogénea geográficamente para todo el país en cada una de las frecuencias empleadas, con excepción de algunas provincias en las que se notó ciertas deficiencias de estos y en otras pocas, algunas aglomeraciones.

Para el análisis estadístico se hizo una transformación logarítmica a los datos, resultando esta con mayor normalidad que los datos originales en todas las pruebas, por lo que esta variable fue la empleada para todo el trabajo final, el peso ( $W$ ) de los datos resultó bastante significativo ( $> 93$ ), mientras que el estadístico ( $P$  valor) presentó valores muy bajos, en relación con el número de referencia (0.05). Asimismo, en las pruebas gráficas se evidenció que para las frecuencias más bajas los datos tienen más normalidad, es decir, que a medida que aumenta la frecuencia los datos tienden a ser menos normales estadísticamente. Los datos se modelaron con tres variogramas: esférico, exponencial y gaussiano, presentando el exponencial mejor ajuste a los datos. El interpolador empleado fue el kriging por ser este uno de los más empleados en este tipo de análisis, ya que presenta parámetros de ajuste y de corrección.

En los mapas resultantes se observó que para las primeras frecuencias (0 a 2Hz) la atenuación de las ondas sísmicas presenta una importante variabilidad para todo el país; solo una provincia presentó más del 50 % de su territorio con alta atenuación, seis presentaron alrededor de un 20 % y la gran mayoría menos de 15 %; y seis de estas, 0 %.

Para las frecuencias de 2 a 4Hz, el país sigue presentando una importante variabilidad de atenuación, en tanto que solo diez provincias presentaron repuesta a la alta atenuación, una de ellas alrededor del 50 %, cinco entre 23 % y 14 %; y las otras cuatro, menos de 10 %.

De 4 a 6Hz, para la parte este del país se evidencia baja y medio baja atenuación; mientras que el sur y la parte norte siguen presentando importantes áreas de alta y medio alta atenuación al paso de las ondas sísmicas. Sólo se observó alta atenuación en siete provincias, en una de ellas algo más del 50 % de su territorio, cinco entre 35 % y 16 % y 1 % en otra.

En las frecuencias de 6 a 8Hz se observó que sólo las provincias del suroeste del país tienen mayor parte de sus áreas con alta atenuación, en tanto que la mayoría de las provincias de las demás regiones presentaron baja o medio baja atenuación; nueve provincias presentaron alta atenuación a las ondas sísmicas, tres de ellas 75 % o más; cuatro, entre 27 % y 14 %; y dos, un 1 %.

Para el último rango de frecuencias estudiado, 8 a 10Hz, se notó que la República Dominicana no presenta alta atenuación al paso de las ondas sísmica en gran parte de su territorio, ya que solo cinco provincias presentaron alta atenuación, cuatro de ellas en el suroeste con 79, 39, 30 y 4 por ciento, respectivamente, y una en el noreste con apenas un 2 %.

Finalmente, podemos decir que, según los resultados obtenidos, la mayor parte del territorio dominicano presenta baja o medio baja atenuación a las ondas sísmicas para un rango de frecuencia que va de 0 a 10Hz, lo que es lo mismo que para períodos de vibración mayores a 0.10 segundos. Las provincias que presentan mayor nivel de atenuación en su territorio son Barahona y Pedernales; en tanto que el Distrito Nacional y la provincia Santo Domingo presentaron los niveles más bajos de atenuación de las ondas sísmicas.

Esperamos que los resultados obtenidos con esta investigación puedan ser usados en la gestión de riesgo sísmico, ya que el país carece de este tipo de estudio que caracterizan el suelo independientemente de la fuente sísmica.

## **Referencias**

- Aki, K., & Chouet, B. (1975). Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects. *Journal Geophysical Research*, 80, 3322-3342.
- Alperín, M., Borges, V., & Sarandón, R. (2002). Caracterización espacial de los tipos de cobertura de suelo usando técnicas geoestadísticas a partir de información satelital. *Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Plata*, 105 (1).
- Ambegh, W. B., & Fairhead, J. D. (1989). Coda Q estimates in the Mount Cameroon volcanic region, West Africa. *Seismological Society of America*, 79, 1589-1600.
- Bonham-Carter, G. F. (1994). Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. *Pergamon*, 398.

- Brea, L. M. (2013). "Kriging" y teoría del muestreo. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. [https://www.ucm.es/data/cont/docs/112-2013-10-15-presentacion\\_krigeado\\_130215\\_paraImprimir.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/docs/112-2013-10-15-presentacion_krigeado_130215_paraImprimir.pdf).
- Delanoy, R. (1995). *Aspecto de Sismología Dominicana*. Santo Domingo: Impresos Gabi.
- Esri. (s. f.). *Cómo funciona Kriging*. From <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- INCIBE. (2015). *La seguridad desde sus inicios*. España: <https://www.iniseg.es/blog/seguridad/754/>.
- Mann, P. D., Grenville, D., & Lewis, J. F. (1991). Geologic and Tectonic Development of the North America-Caribbean Plate Boundary in Hispaniola. *The Geological Society of American*.
- Martínez, J. R. (2019). *Material de apoyo de la asignatura Análisis Espacial de la maestría en Teledetección y Ciencias Geográficas*. Santo Domingo: Universidad Autónoma de Santo Domingo.
- McNamara, D., Meremonte, M., Maharrey, L., Mildore, S.-L., Altidore, J., Anglade, D., et al. (2012). Frequency-Dependent Seismic S Attenuation within the Hispaniola Island Region of the Caribbean Sea. *Seismological Society of America*, Vol. 102, No. 2.
- Moreta, A. (2022). *Análisis Espacial de la Atenuación de las Ondas Sísmicas en República Dominicana*. Santo Domingo: Universidad Autónoma de Santo Domingo.
- Ojeda, T., & Tovar, L. (2016). El análisis espacial como una herramienta para el estudio del transporte de carga urbano. *XII Congreso de Ingeniería del Transporte*. Universitat Politècnica de València.

Ottmoller, L., Voss, P., & Havskov, J. (2020). Seisan earthquake analysis software for windows, solaris, linux and macosx. *Seismological Research Letters*.

Pedrosa, I. J.-B.-F.-C. (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica*, 245-254.

Polanco, E. (2012). *Propagación y atenuación de las ondas sísmicas, aceleraciones y fuentes de terremotos en la República Dominicana*. Santo Domingo: Proyecto FONDOCyT.

Wikipedia. (s.f.). *Histograma*. Retrieved 15 de 4 de 2021 from <https://es.wikipedia.org/wiki/Histograma>

## Anexos

### Tablas

**Tabla 1.** Estructura principal de la base de datos del CNS

Fecha y hora	Latitud	Longitud	Prof.	RMS	M
2018-01-10 22:07:00.10	17.971	-71.321	20.7	0.50	2.8
2018-01-11 03:13:52.80	17.837	-69.111	15	0.90	3.4
2018-01-11 18:06:41.30	18.988	-70.199	6.9	0.40	3
2018-01-12 17:40:25.50	19.046	-70.159	12.8	0.20	2.8
2018-01-13 15:25:39.10	18.633	-69.804	136.9	0.80	3.1
2018-01-14 04:07:17.30	18.819	-70.272	92.6	0.80	3.3
2018-01-14 16:31:11.50	19.801	-70.846	11.4	0.50	3.6
2018-01-15 01:48:01.60	17.445	-68.138	98.3	0.70	3.3
2018-01-16 09:07:39.00	19.097	-71.48	71.7	0.80	3
2018-01-16 10:37:26.00	19.131	-71.411	74.2	0.80	3
2018-01-16 20:20:03.70	19.287	-73.046	31.1	0.50	3.8
2018-01-17 09:02:18.30	19.333	-72.994	19.9	0.70	3.4
2018-01-17 11:39:31.90	19.16	-68.418	18.4	0.80	3.1

**Tabla 2.** Estadísticos básicos de los valores de atenuación para todas las frecuencias en estudio

Frecuencias	Datos	Mínimo	1er cuartil	Mediana	Media	3er cuartil	Máximo
1Hz	808	0.002377	0.007299	0.010199	0.011000	0.013870	0.033003
3Hz	2600	0.001646	0.003407	0.004269	0.004644	0.005552	0.014368
5Hz	2601	0.001177	0.002130	0.002710	0.003031	0.003604	0.013405
7Hz	2299	0.0009147	0.0015738	0.0019142	0.0022040	0.0025141	0.0069156
9Hz	1910	0.0007126	0.0012262	0.0014678	0.0017057	0.0018693	0.0052910






**Tabla 3.** Estadístico de Shapiro Wilks para los datos de las frecuencias en estudio

Frecuencias	Zn		ZnLog	
	W	P	W	P
1Hz	0.95062	8.306-16	0.99548	0.0181
3Hz	0.92098	< 2.2-16	0.99672	2.083-05
5Hz	0.89398	< 2.2-16	0.98326	< 2.2-16
7Hz	0.84463	< 2.2-16	0.95768	< 2.2-16
9Hz	0.80041	< 2.2-16	0.93447	< 2.2-16

**Tabla 4.** Colores asignados a las clases

Colores	R,G,B	Atenuación
Amarillo	245,245,0	Baja
Naranja	245,184,0	Medio Baja
Amarillo-anaranjado	245,122,0	Moderada
Rojo-anaranjado	245,61,0	Medio Alta
Rojo	245,0,0	Alta

**Tabla 5.** Niveles de atenuación para cada una de las clases

Color	Nivel	1Hz	3Hz	5Hz	7Hz	9Hz
	Baja	0.002377 a 0.007513	0.001646 a 0.003512	0.001177 a 0.002225	0.000915 a 0.001784	0.000713 a 0.001372
	Medio Baja	0.007514 a 0.010707	0.003513 a 0.004776	0.002226 a 0.002953	0.001785 a 0.002453	0.001373 a 0.001872
	Moderada	0.010708 a 0.014327	0.004777 a 0.006313	0.002954 a 0.003891	0.002454 a 0.003342	0.001873 a 0.002606
	Medio Alta	0.014328 a 0.019493	0.006314 a 0.008628	0.003892 a 0.005233	0.003343 a 0.004513	0.002607 a 0.003602
	Alta	0.019494 a 0.033003	0.008629 a 0.014368	0.005234 a 0.013405	0.004514 a 0.006916	0.003603 a 0.005291

## Figuras

Figura 1. Mapa de sismicidad de la República Dominicana 2010-2020

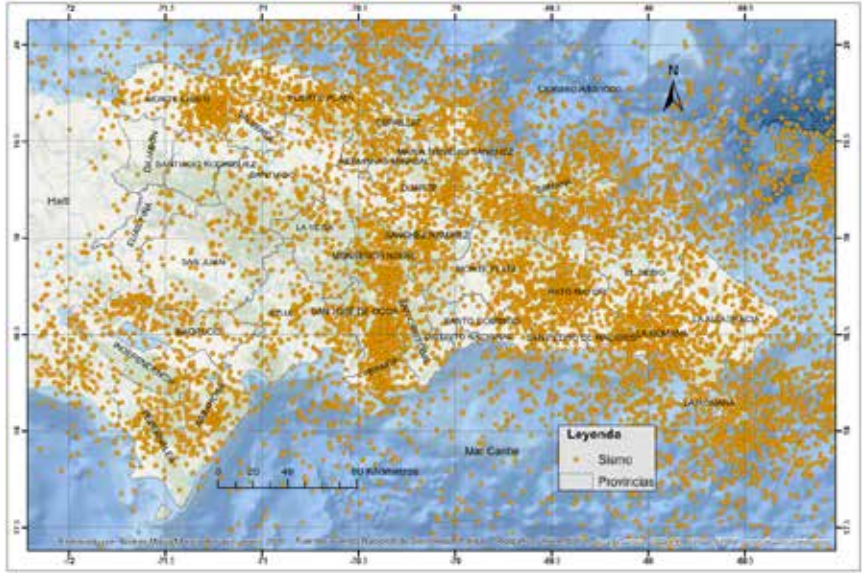


Figura 2. Histogramas para frecuencia de 1Hz

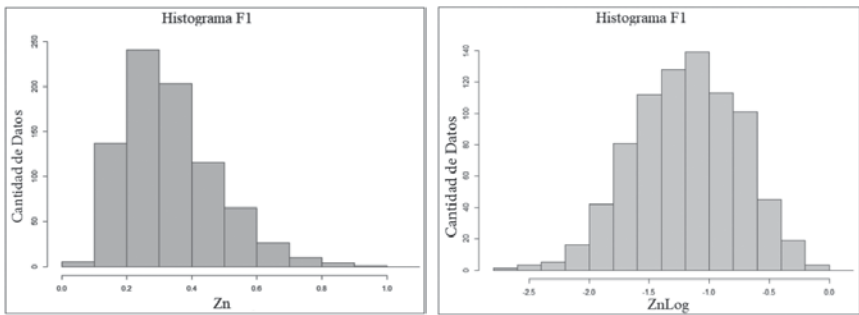


Figura 3. Histogramas para frecuencia de 3Hz

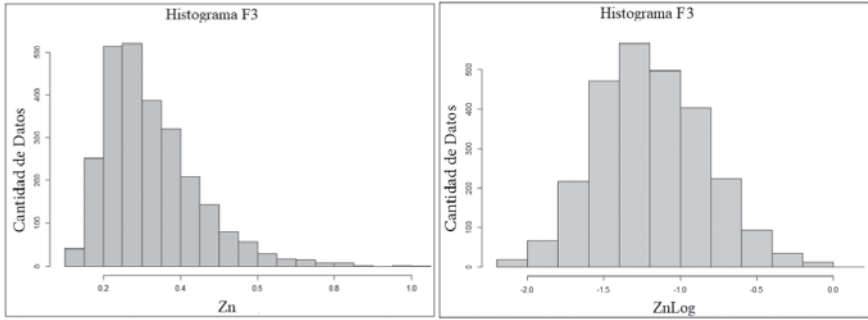


Figura 4. Histogramas para frecuencia de 5Hz

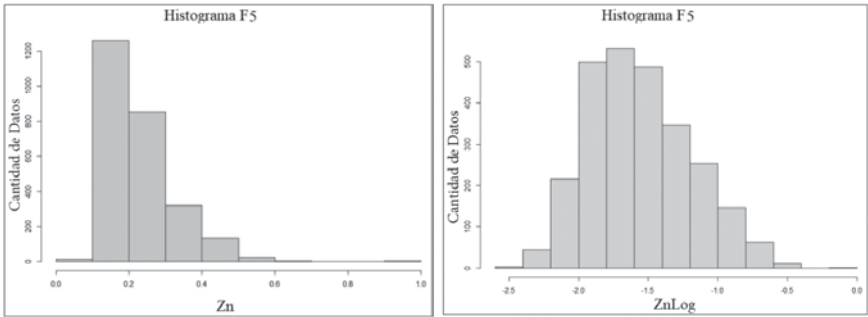


Figura 5. Histogramas para frecuencia de 7Hz

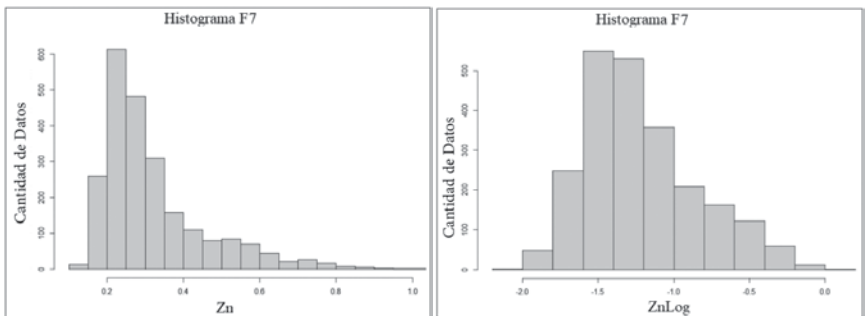


Figura 6. Histogramas para frecuencia de 9Hz

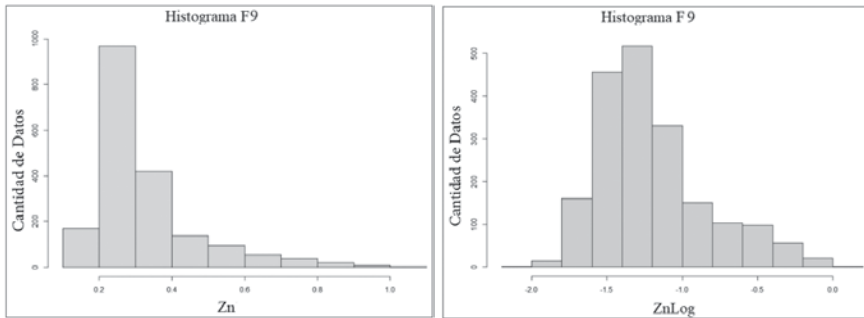


Figura 7. Variogramas exponencial y esférico. Tomado de Alperín, Borges & Sarandón, 2002

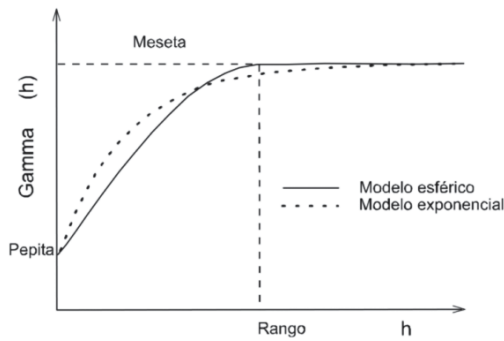


Figura 8. Variogramas para datos de frecuencia a 1Hz

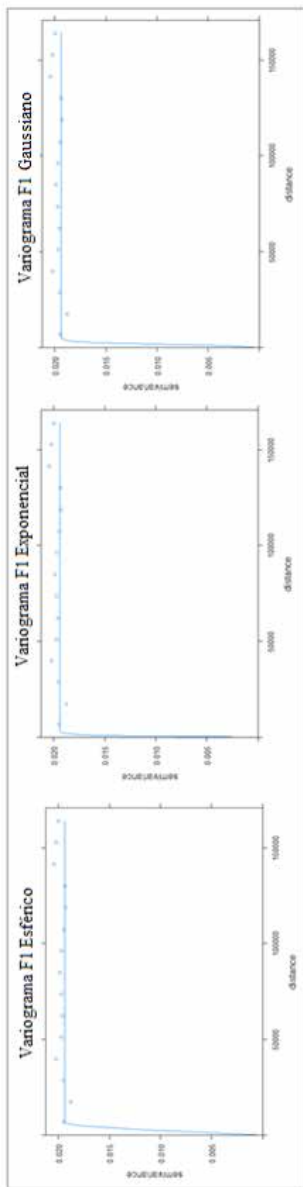


Figura 9. Variogramas para datos de frecuencia a 3Hz

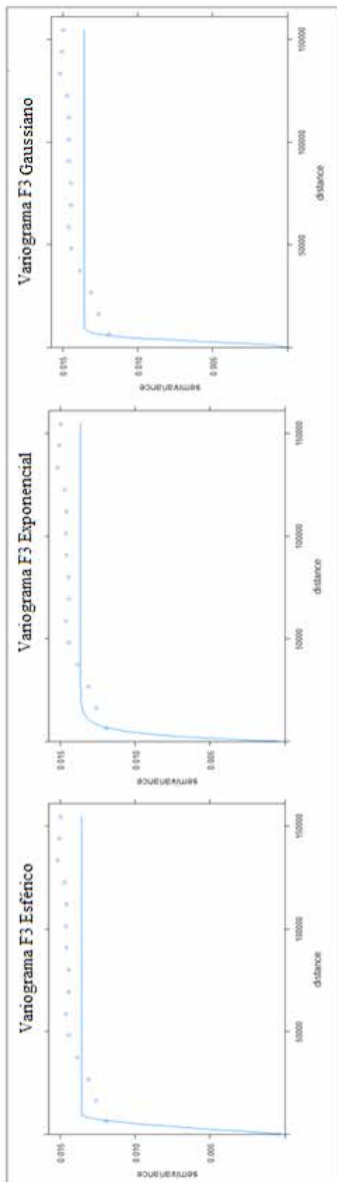


Figura 10. Variogramas para datos de frecuencia a 5Hz

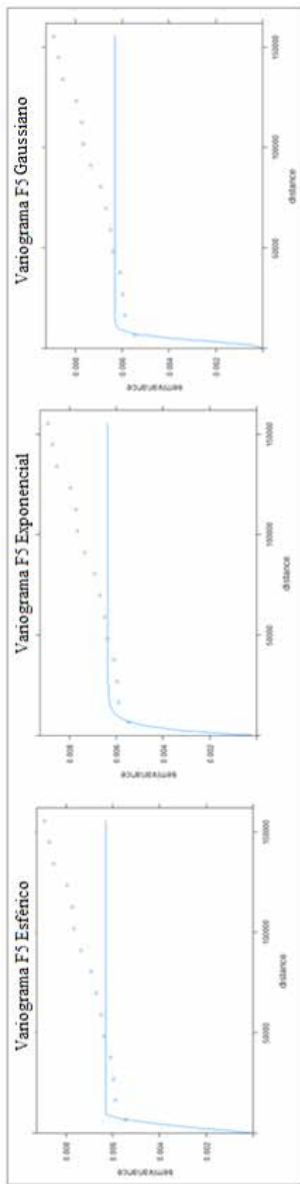


Figura 11. Variogramas para datos de frecuencia a 7Hz

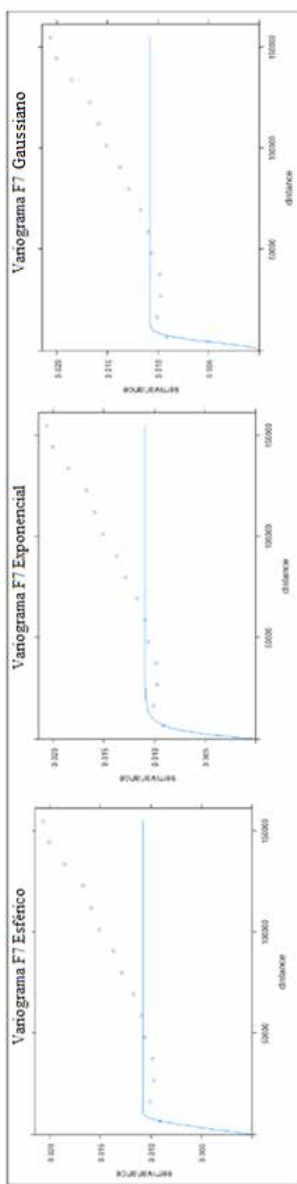


Figura 12. Variogramas para datos de frecuencia a 9Hz

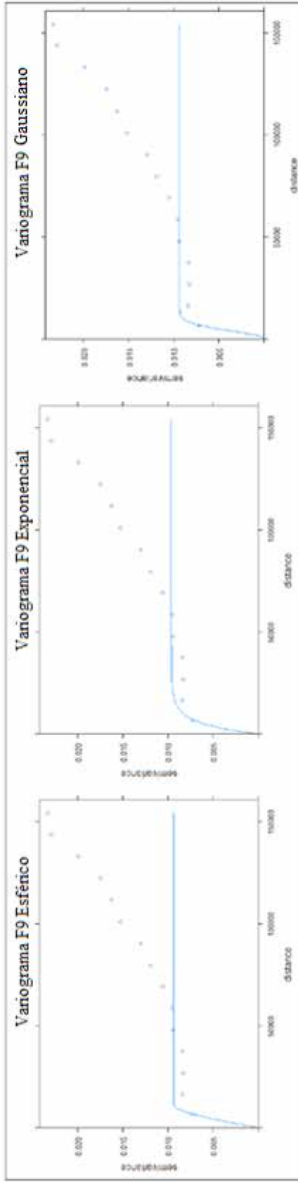


Figura 13. Mapa de atenuación de ondas sísmicas para frecuencia de 1Hz

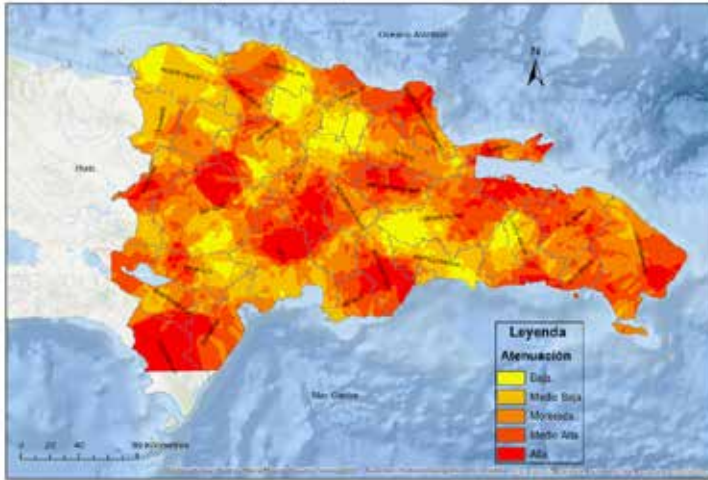


Figura 14. Mapa de atenuación de ondas sísmicas para frecuencia de 3Hz

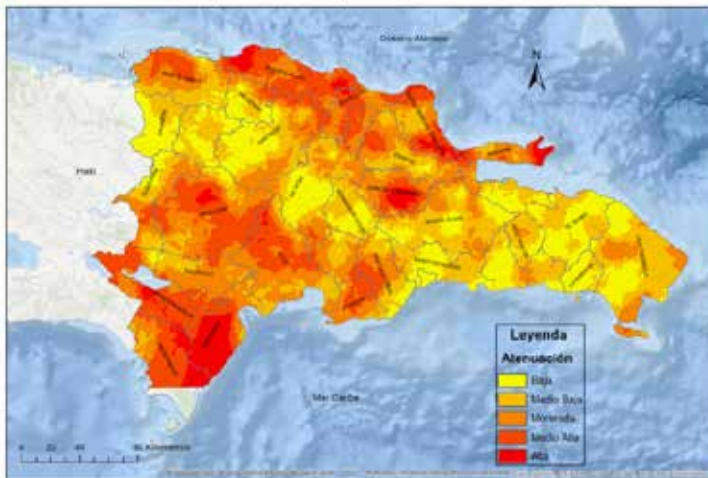


Figura 15. Mapa de atenuación de ondas sísmicas para frecuencia de 5Hz

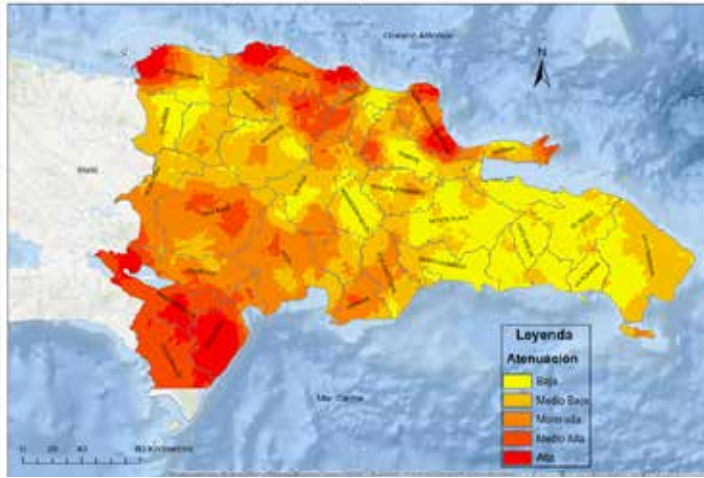
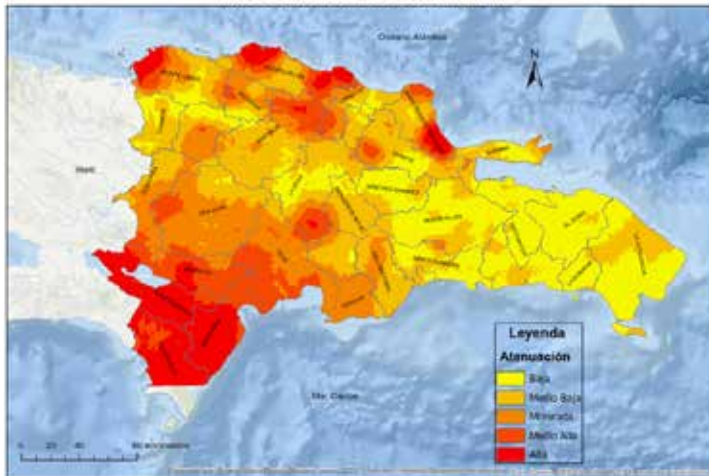


Figura 16. Mapa de atenuación de ondas sísmicas para frecuencia de 7Hz



**Figura 17. Mapa de atenuación de ondas sísmicas para frecuencia de 9Hz**

