

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**“CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE ESTUDIOS DE RUIDO
SÍSMICO AMBIENTAL, EN EL ÁREA SUROESTE DE LA CUENCA DE
MARACAIBO.”**

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
Optar al título de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Macero Alarcón Ricardo

Caracas, noviembre de 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**“CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE ESTUDIOS DE RUIDO
SÍSMICO AMBIENTAL, EN EL ÁREA SUROESTE DE LA CUENCA DE
MARACAIBO.”**

Tutor Académico: Prof. Jesús González

Tutor Industrial: Ing. Luis Yegres

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
Optar al título de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Macero Alarcón Ricardo

Caracas, noviembre de 2014

Caracas, noviembre de 2014

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller RICARDO JOSÉ MACERO ALARCÓN, titulado:

“Caracterización geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental, en el área suroeste de la cuenca de Maracaibo”

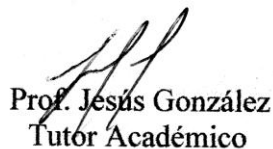
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. José Cavada
Jurado



Prof. Cecilio Morales
Jurado



Prof. Jesús González
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Dios, por iluminar siempre mis pasos.

A mis padres, porque su amor nunca contempló lo imposible.

A mis familiares y amigos, porque siempre han estado allí cuando los he necesitado.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, que siempre ha guiado mis pasos a lo largo de toda mi vida.

A mis padres, Alberto Macero y Nérida Alarcón. A mi padre, por haber sembrado en mí la idea de que los ingenieros estamos por encima de todas las cosas; nunca dejaré de creer en ello. A mi madre, por apoyarme incondicionalmente frente a cualquier vicisitud, por creer en mí cuando todos pensaban que mis sueños eran imposibles de realizar, por escuchar mis palabras y aconsejarme cuando mis ideas estuvieran completamente erradas. Después de Dios eres lo más sagrado en mi vida. Te amo; gracias por ser mi amiga, por ser mi apoyo y por ser mi madre.

A mi familia, en especial a mi tía Tamara, a mi abuela Celina, mi tía Ana, mi tía Eliodina, a mi tío Jesús, a mi tío Noel y a mi tercera madre, Carmen Graterol, por apoyarme a lo largo de todo este camino. Sin ustedes hubiera sido imposible lograrlo.

A Elizabeth Angulo, por ser mi guía espiritual, aconsejarme en todo momento y ayudarme ante cualquier problema, despejando mi mente, fortaleciendo mi salud y disminuyendo mis preocupaciones acerca de lo que pudiera pasar en un futuro.

A Héctor Alejandro, gracias por ser el hermano que nunca tuve; sabes que te admiro por lo que eres y por lo que quieres llegar a ser; no desistas hasta que lo consigas. Al resto de mis hermanos, Miguel, Juan, Rubén, Johnny, Jorge, Henry, Dionisio, Armando Natera, Carlos Fuenmayor, Daniel Mata, Mauricio Osorio y a Mariano Arnaiz. A mis hermanos moteros, esos con los que pasé excelentes momentos: Julio Cesar Rangel, Alejandro Villegas, Rafael Pérez y William Pérez. Gracias por estar conmigo en todo momento, gracias por formar parte de mi familia. Son mi apoyo, mi motivación; Lograr esto sin ustedes era imposible.

A Elsa María De Abreu, gracias por apoyarme y creer en mí a lo largo de este camino. Discúlpame porque las cosas no salieron como lo planificamos. Espero que en algún momento volvamos a encontrarnos.

A mis amigos de la universidad, porque nunca los consideré sólo compañeros... En especial a Fiorella Daza, Juan Natera, José Campos, Katuska Sánchez, Aurora Natale, Andrea Peña, María Grazia Machado, Jesús García, Kathryn Pérez, Carlos Corredor, María Beatriz Guillén, Wens Jonás Alonso, Evis Ramírez, Elizabeth Salazar, Miguel Camacho, Marcos Colina, Jonman Báez, Karen Montoya, Laura Itriago, Andrei Ichaso, Pedro Ledezma, Jesús Martínez, Gabriel Kobritz, Martín Serpa, Luis Tovar, Karina De Mendonca, Luis López, Krizia Colomé, Humberto Rodríguez, Adriana Gutiérrez, Atilio Torres, Jorge García, Halis Benítez y a Sofía Villanueva. A otros excelentes amigos: Gilberto Gutiérrez, Mirka Farfán y Johan Pérez. Infinitas gracias a todos.

A todos mis profesores, en especial a mi tutor Jesús González, Antonio Ughi, Ricardo Vargas, Ander De Abrisqueta, Michael Schmitz, Yaraixa Pérez, José Cavada, Ricardo Alezones, Rafael Falcón, Luis González, Hely Cordero, Josefina Riveros, Dalia Borges y a todos aquellos que con sus conocimientos transformaron mi mente para poder alcanzar absolutamente todas mis metas.

A todos los integrantes de la familia de Amundaray Instrumentos Geotécnicos; a José Luis Oliver, a Jennifer Bellardi, Peggy Zerpa, Joseph Mardini y especialmente al ingeniero Moisés Araque, por ayudarme incondicionalmente con la culminación de esta investigación.

A FUNVISIS y a todos los que permitieron la realización de este proyecto, en especial a mi tutor Luis Yegres, a Pedro Medina, Javier Parra, Jesús Ávila, Cecilio Morales y a Víctor Rocabado.

Disculpen aquellas personas a las que olvidé mencionar, alguna probablemente la pasaré por alto; lamentablemente la memoria no es una de mis virtudes.

De verdad, gracias infinitas... gracias, gracias, gracias...

“Caracterización geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental, en el área suroeste de la Cuenca de Maracaibo”.

Autor: Ricardo Macero.

Tutor Académico: Prof. Jesús González. **Tutor Industrial:** Ing. Luis Yegres.

Palabras Claves: Ruido sísmico ambiental, período fundamental del suelo, espesor de sedimentos, Método de Nakamura.

RESUMEN

En busca de delimitar la respuesta del subsuelo en diferentes áreas del país, así como también evaluar y estimar los efectos de sitio, se ha desarrollado el proyecto “Geociencia Integral de los Andes de Mérida (GIAME)”, contemplando entre otras cosas la adquisición de datos de ruido sísmico ambiental en las diversas ciudades que conforman la cadena montañosa de los Andes de Mérida.

El propósito de la presente investigación contempla una evaluación geofísica mediante el estudio de ruido sísmico ambiental, a través del Método de Nakamura (1989), el cual permite la obtención de los períodos de vibración del suelo en el área de estudio, lo que permite posteriormente estimar el espesor de sedimentos.

Se generaron mapas de períodos de vibración del suelo con los valores adquiridos en el área suroeste de la Cuenca de Maracaibo, dichos mapas tienen referencia con las tres mayores amplitudes observadas en las relaciones espectrales H/V, las cuales pudieran ser indicador de diversas características geológicas, que pudieran estar asociadas a las distintas formaciones de período cuaternario, terciario y en casos puntuales cretácico. Se observó que los períodos registrados se encuentran comprendidos entre 0.13 s y 9.65 s, con tres subpoblaciones bastante marcadas dentro de este rango, indicando el contraste entre los diversos materiales presentes en el área. Los espesores determinados a partir de dichos períodos, presentan un rango que oscila desde los 35 m hasta los 5507 m dentro de la zona de estudio. En función de esto, posiblemente se pudiera estar en presencia de los contactos entre las épocas Pleistoceno – Mioceno, Mioceno – Eoceno y Eoceno – Paleoceno.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
CAPÍTULO I.....	14
INTRODUCCIÓN	14
I.1 Planteamiento del problema	14
I.2 Objetivos.....	15
I.2.1 Objetivo General	15
I.2.2 Objetivos específicos.....	15
I.3 Justificación.....	16
I.4 Ubicación del área de estudio.....	16
I.5 Antecedentes.....	17
CAPÍTULO II	22
MARCO GEOLÓGICO.....	22
II.1 Formación del lago de Maracaibo.....	22
II.2 Planicie del lago de Maracaibo	24
II.3 Cuenca del lago de Maracaibo	24
II.4 Evolución tectónica de la cuenca de Maracaibo	25
II.5 Caracteres distintivos de las unidades litológicas	31
CAPÍTULO III.....	39
MARCO TEÓRICO.....	39
III.1 Definición de onda.....	39
III.2 Ecuación de onda.....	39
III.3 Ondas de cuerpo.....	39
III.3.1 Ondas P u ondas longitudinales.....	39

III.3.2 Ondas S u ondas transversales.....	39
III.4 Ondas superficiales	40
III.4.1 Ondas Rayleigh	40
IV.4.2 Ondas Love	40
III.5 Efectos de sitio.....	40
III.6 Factor de amplificación	41
III.7 Microtremores.....	42
III.8 Método de Nakamura o relación H/V	43
III.9 Relación entre el período de vibración y el espesor de sedimentos.....	45
CAPÍTULO IV	47
METODOLOGÍA	47
IV.1 Selección del área de estudio.....	47
IV.2 Mediciones de ruido ambiental.....	47
IV.2.1 Metodología de adquisición	47
IV.2.2 Metodología para conversión de datos a formato .SAF	50
IV.2.3 Metodología de procesamiento	56
IV.3 Análisis geoestadístico	63
IV.4 Relación período de vibración – espesor de sedimentos	64
CAPÍTULO V	67
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
V.1 Análisis estadístico.....	67
V.1.2 Medidas de dispersión y tendencia central	67
V. 1.3 Histograma de frecuencia	68
V. 1.4 Diagrama de caja y bigotes	68
V.2 Ruido ambiental: períodos de vibración	69
V.3 Relación período de vibración – Profundidad de sedimentos.....	75
CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
APÉNDICE A.....	91

APÉNDICE B 93
APÉNDICE C 103

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio con estaciones de medición	17
Figura 2. Mapa del período fundamental de vibración del suelo para las zonas de Macuto, Caraballeda y Tanaguarena	19
Figura 3. Mapa de períodos fundamentales para el municipio Zamora.....	20
Figura 4. Mapa de isoperíodos del área metropolitana de Barquisimeto.....	21
Figura 5. Sección O-E de la cuenca de Maracaibo	23
Figura 6. Corte estructural NW-SE a través de la cuenca de Maracaibo, desde los Andes Merideños hasta la serranía de Perijá.....	28
Figura 7. Columna estratigráfica compuesta de la cuenca de Maracaibo hacia el Flanco Norandino.....	31
Figura 8. Estructuras y configuraciones que pueden dar lugar a efectos de sitio	41
Figura 9. Sismómetro de tres componentes REF TEK 151-30A.....	48
Figura 10. Sismógrafo con cables de corriente, cable del sensor y de GPS	50
Figura 11. Palm empleada durante la adquisición	50
Figura 12. Archivos TXT con horas y nombres de las estaciones.....	51
Figura 13. Ventana del programa arcfetch.vi.....	52
Figura 14. Ventana del programa rtcnvt.vi.....	53
Figura 15. Ventana del programa movedata.vi	54
Figura 16. Ventana del programa Ref2Saf.....	56
Figura 17. Ventana "Load Signals" para cargar archivos .saf.....	57
Figura 18. Ventana de la señal en sus diversas componentes	58
Figura 19. Ventana de diálogo "Frequency filter"	59

Figura 20. Ventana de diálogo "H/V Toolbox"	60
Figura 21. Componentes de la señal con ventanas seleccionadas por el programa ..	62
Figura 22. Espectro H/V	63
Figura 23. Relación empírica entre la densidad y las velocidades de onda P y S para sedimentos saturados, rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas.	65
Figura 24. Modelo gravimétrico estructural de uno de los perfiles realizados en el análisis gravimétrico flexural del occidente de Venezuela.	66
Figura 25. Transecto sísmico obtenido en los estudios de cinemática del flanco noroccidental de los Andes de Mérida.	67
Figura 26. Histograma de frecuencia de los períodos determinados.	68
Figura 27. Diagrama de caja y bigotes de los períodos determinados.	69
Figura 28. Pico predominante en el espectro H/V.	70
Figura 29. Mapa de períodos asociado a la primera amplitud de los espectros.	72
Figura 30. Mapa de períodos asociado a la segunda amplitud de los espectros.	73
Figura 31. Mapa de períodos asociado a la tercera amplitud de los espectros.	74
Figura 32. Ejemplo de picos dobles y triples determinados en la zona de estudio... ..	75
Figura 33. Mapa de espesor asociado a la primera amplitud de los espectros H/V junto a períodos correspondientes.	79
Figura 34. Mapa de espesor asociado a la segunda amplitud de los espectros H/V junto a períodos correspondientes.	80
Figura 35. Mapa de espesor asociado a la tercera amplitud de los espectros H/V junto a períodos correspondientes.	81

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Densidades obtenidas por Camacho (2013) en la generación del mapa de basamento de la cuenca de Maracaibo, a partir de datos gravimétricos y magnéticos satelitales.....	65
Tabla 2. Medidas de dispersión y tendencia central	67
Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas.....	93
Tabla 4. Espesores estimados a partir de los períodos obtenidos.....	103

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 Planteamiento del problema

La cordillera de los Andes, producto de la interacción entre las placas Suramericana y del Caribe, produjo una depresión estructural situada al noroeste de Venezuela, la cual posee gran cantidad de sedimentos acumulados y que se denomina cuenca de Maracaibo. Dicha cuenca, limita al oeste por la sierra de Perijá y al este por la serranía de Trujillo y el flanco occidental de Los Andes, ocupando una depresión de 52.000 km cuadrados de extensión, donde se han acumulado más de 10.000 metros de espesor de sedimentos cuyas edades se extienden desde el Cretácico hasta el Cuaternario; por otra parte, constituye la cuenca petrolífera más rica de América del Sur. Tectónicamente, se relaciona con el levantamiento post-Eoceno de la sierra de Perijá y de la cordillera de Los Andes. (PDVSA – Intevep, 1997).

Para el estudio de las diversas cuencas del país, es necesaria la aplicación de un método que sea práctico, rápido y económico y con el cual se puedan obtener entre otras cosas la estimación de efectos de sitio, periodo fundamental del subsuelo y espesor de sedimentos mediante registros instrumentales; este método consiste básicamente en las mediciones de ruido ambiental. En Venezuela se han obtenido resultados alentadores al aplicar este método en diferentes ambientes sedimentarios como por ejemplo Cumaná y Cariaco, así como en algunas cuencas urbanas de espesores considerables de sedimentos como Caracas, Barquisimeto, entre otras. En vista de que este método ha sido implementado en Venezuela recientemente, existen muchas zonas del país de las cuales no se posee información a partir de la aplicación del mismo.

La Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, FUNVISIS, en conjunto con instituciones nacionales, ha desarrollado diversos estudios para la medición de ruido sísmico ambiental en diferentes sitios del país, como Caracas (Rocabado *et al*, 2007) y Barquisimeto (Rocabado *et al*, 2005), éstos con el fin de estimar los efectos de sitio. El presente trabajo está enmarcado dentro del Geociencia Integral de los Andes de Mérida (GIAME) y contempla la adquisición de datos de ruido sísmico ambiental en las diversas ciudades que conforman la cadena montañosa de los Andes de Mérida.

Para el estudio de ruido ambiental, se emplea la relación espectral H/V o método de Nakamura (1989). Dicho método propone que las vibraciones del suelo, producto de fuentes naturales (microsismos) así como también fuentes antrópicas (microtremores) pueden ser empleadas para evaluar los efectos de sitio tomando en consideración la relación entre las componentes horizontal y vertical de movimiento en superficie de la capa sedimentaria (Nakamura, 1989), lo cual permite obtener los periodos fundamentales del suelo, y esto a su vez permite generar mapa de períodos de vibración del suelo en el área de estudio.

I.2 Objetivos

I.2.1 Objetivo General

Caracterizar la capa sedimentaria del área suroeste de la cuenca de Maracaibo, mediante el estudio de ruido sísmico ambiental utilizando el método de Nakamura o Relación Espectral (H/V).

I.2.2 Objetivos específicos

- Determinar el período de vibración del suelo, a partir de mediciones de ruido ambiental mediante el método de Nakamura o Relación Espectral (H/V).
- Estimar espesores de sedimentos a partir de la medición de períodos de vibración del suelo.

- Generar mapas de períodos de vibración del suelo mediante análisis H/V.
- Generar mapas de espesores de sedimentos.

I.3 Justificación

En el marco del proyecto GIAME, desarrollado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología en conjunto con la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), PDVSA, la universidad Central de Venezuela y la universidad Simón Bolívar, se pretende estudiar de forma general las estructuras geológicas y geomorfológicas de la cadena montañosa de los Andes de Mérida con el fin de precisar el riesgo sísmico de la región, elaborar mapas geológicos, estructurales, sismogénicos y geomorfológicos, así como modelos que servirán de base a la exploración de las cuencas petrolíferas de la zona, siendo la contribución del presente trabajo de investigación la caracterización geofísica a través de mediciones de ruido ambiental, aplicando el método de Nakamura, con la finalidad de determinar el período de vibración del suelo, con lo cual se espera estimar el espesor sedimentario y generar mapas de períodos predominantes del suelo y de espesores.

Todo lo anterior, aunado a estudios de tipo geológicos, geotécnicos y afines, permitirán delimitar a futuro zonas con similar comportamiento.

A través de un análisis comparativo se pretende determinar una relación entre el período de vibración del suelo y la estimación del espesor de sedimentos de una manera eficiente, implicando en ello la reducción de costos respecto a la aplicación de otros métodos.

I.4 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en parte de los estados Zulia y Mérida, los cuales se encuentran en la zona noroccidente del país. El estado Zulia limita al oeste con Colombia, hacia el sur con los estados Táchira, Mérida y Trujillo y hacia la zona este con Lara y Falcón. Por otra parte, el estado Mérida limita al norte con los estados

Zulia y parte de Trujillo, al sur con Táchira y Barinas, al este con parte de Trujillo y Barinas y al oeste con Táchira y Zulia (figura 1).

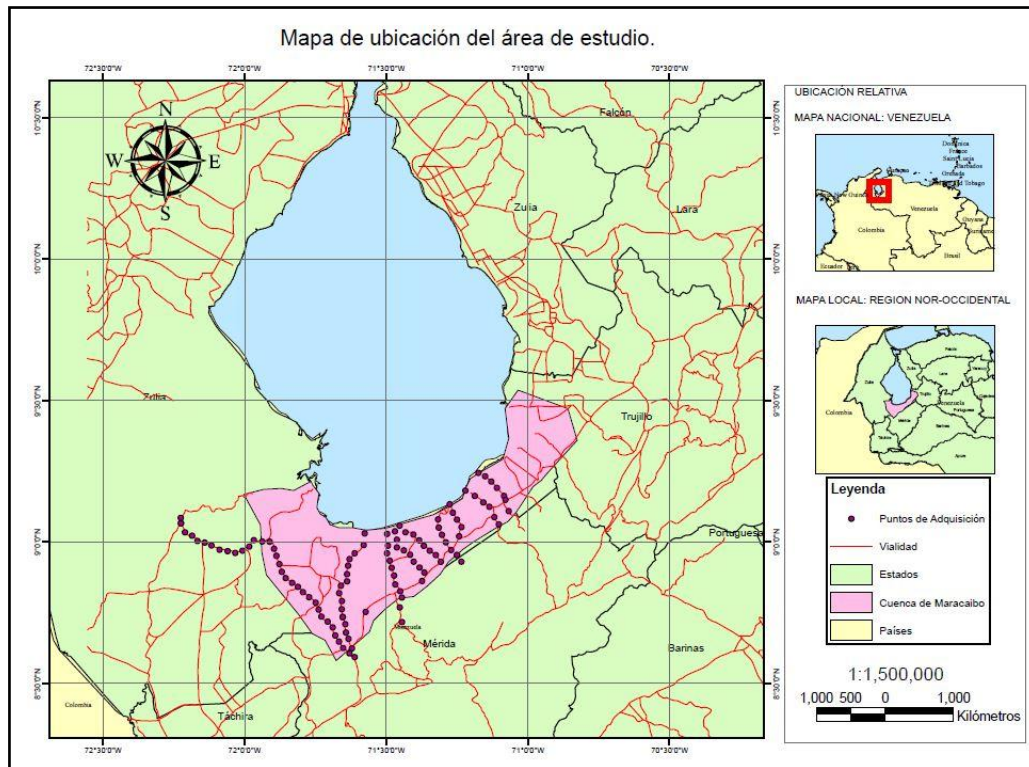


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio con estaciones de medición.

I.5 Antecedentes

A efectos del método empleado en esta investigación, no hay registro de estudios realizados en el área anteriormente expuesta, sin embargo, existen otro tipo estudios realizados en dicha zona (entre los que se pueden destacar los estudios gravimétricos). Cabe mencionar, que el método ha sido empleado en otras zonas del país con fines de microzonificación sísmica y no para la caracterización profunda de cuencas.

Mazuera, *et al.* (2009) determinaron los períodos fundamentales asociados al suelo de la ciudad de Mérida, Venezuela, a partir de mediciones de ruido sísmico ambiental, aplicando el método de Nakamura. Para realizar lo anterior, realizaron 164 mediciones en diversas partes de la ciudad, con el fin de cubrir la totalidad de los

sedimentos blandos que conforman las terrazas y el límite de éstos con rocas del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico. Las estaciones fueron colocadas a espaciamiento de 500 metros aproximadamente, con un tiempo de grabación en un rango entre 15 y 25 minutos. Por medio de los programas LabView y Sesame, obtuvieron los espectros H/V y elaboraron un mapa de distribución de períodos, donde se refleja un mínimo de período fundamental de 0,087 segundos y un máximo de 1 segundo. Dichos datos, en conjunto con los obtenidos de un modelado gravimétrico del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida, permitieron definir una relación entre el período y el espesor de sedimentos del abanico, donde los rangos altos de período corresponden con mayores espesores de sedimentos.

Romero, *et al.* (2002): realizaron una caracterización de los suelos a partir de estudios de sismica de refracción, gravimetría y ruido ambiental en el estado Vargas (La Guaira, Macuto, Caraballeda y Tanaguarena). Respecto al ruido ambiental se midieron un total de 130 estaciones con una separación de 250 m entre estaciones, tomando muestras de 300 segundos. El equipo utilizado para dicha adquisición fue un sismómetro Nanometrics modelo Orion-3S. Para el procesamiento de los datos, se seleccionaron dos ventanas de 30 segundos donde la señal fue considerada más estable. Para cada ventana, se obtuvo el espectro de Fourier y la relación H/V, lo cual fue graficado para la obtención de los valores de períodos fundamentales del suelo (figura 2). Al obtener dichos valores de períodos para cada ventana, los mismos se promediaron para obtener un valor de período definitivo (en el caso de que superaran los 0.2 segundos de diferencia entre sí). En caso contrario, se reprocesaron los datos y se tomaron ventanas de 30 segundos, sin solape. Para cada ventana se calcula el espectro de Fourier, promediando las componentes y la relación H/V con los valores obtenidos para lograr el valor de período definitivo. Los valores de período fundamental de vibración del suelo se ubican entre 0.9 y 1.8 segundos.

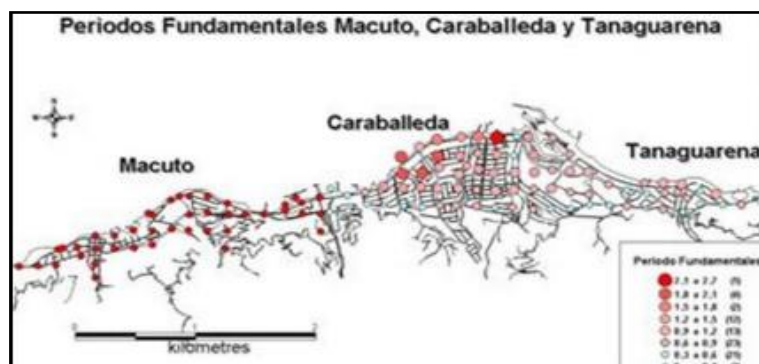


Figura 2. Mapa del período fundamental de vibración del suelo para las zonas de Macuto, Caraballeda y Tanaguarenas (Tomado de Romero et al., 2002).

Rocabado, *et al.* (2011) relacionaron el periodo del suelo y la profundidad de los sedimentos para la ciudad de Caracas, Venezuela. En este estudio, se plantea el uso de una nueva relación que permita incluir el efecto correspondiente a las capas superficiales de sedimentos, considerando los valores de velocidades de ondas de corte para los primeros 30 m (V_{s30}) y el valor V_s para el estrato más profundo. Los resultados obtenidos en dicha investigación indican que la nueva relación entre período y profundidad permite generar estimaciones más exactas del espesor de sedimentos. Dicha relación fue calibrada y verificada con valores reales de profundidad de 4 pozos realizados en la ciudad de Caracas obteniendo resultados acorde a los valores reportados en dichas perforaciones. Se pretende además que dicha relación pueda ser aplicada en otros trabajos que se desarrollen en otras zonas del país, disponiendo de relaciones propias para cada sector, considerando los efectos locales del suelo y así obtener mapas preliminares de sedimentos aproximados a la realidad geológica del sitio a partir de mediciones de ruido ambiental.

Hecht (2005) realizó una caracterización de la cuenca de Guatire mediante la aplicación de refracción somera, ruido sísmico ambiental y gravimetría en el municipio Zamora, Guatire, Venezuela. Respecto a los estudios de ruido sísmico ambiental, elabora un mapa de períodos fundamentales de dicha cuenca (Figura 3). Obtuvo valores de períodos entre 0.9 y 2.2 s asociados a un mayor espesor de

sedimentos desde la zona central del mapa hacia el este. Para el resto de la región los valores oscilaron entre 0.6 y 0.9 s, disminuyendo gradualmente hacia el sur y el norte. Dicho estudio, en conjunto con los estudios gravimétricos permite elaborar un modelo de cuenca a partir de los mapas de anomalías gravimétricas; dicho modelo permite establecer una relación aparente período-profundidad para la ventana de estudios mediante la elaboración de perfiles.

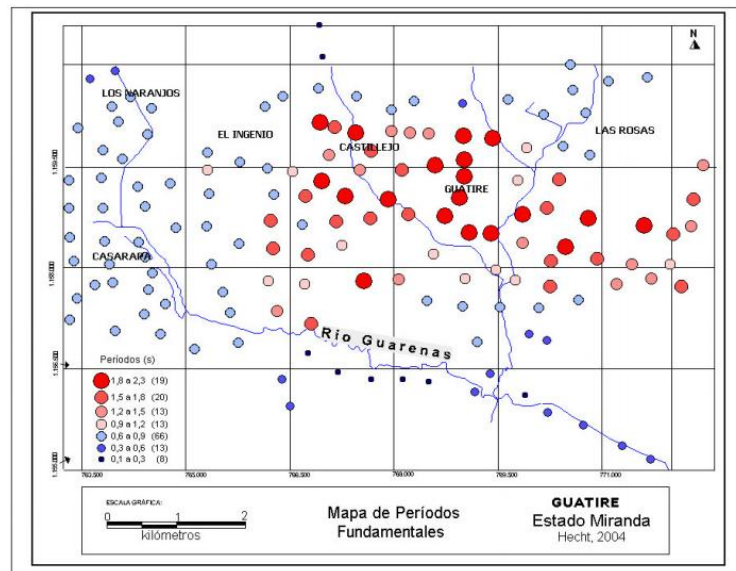


Figura 3. Mapa de períodos fundamentales para el Municipio Zamora (Guatire), estado Miranda (Hecht *et al.*, 2005).

Reinoza, *et al.* (2011) determinaron espesores de sedimentos en las ciudades de Cabudare y Barquisimeto a partir de un modelado gravimétrico 3D considerando la geología local, modelos gravimétricos previos y espesores de sedimentos preliminares estimados a partir de la relación H/V, de información de pozos y de resultados de sismica de refracción. Se realizaron aproximadamente 1200 mediciones de ruido sísmico ambiental. Se encontraron períodos entre 0.2 y 3.0 s, con valores máximos de 0.8 y 3.0 en Barquisimeto y Cabudare respectivamente. En función a la relación entre el período fundamental y el espesor de sedimentos tomada de estudios previos realizados en la Ciudad de Caracas por Rocabado en el año 2002, se pudo

estimar una profundidad máxima de sedimentos superior a los 100 m en Barquisimeto y de 400 m de profundidad en Cabudare (figura 4).



Figura 4. Mapa de isoperíodos del área metropolitana de Barquisimeto (Reinoza *et al.*, 2011).

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

Formación del lago de Maracaibo

El lago de Maracaibo forma parte de lo que geográficamente se conoce como el Sistema del Lago de Maracaibo, que lo completan el estrecho de Maracaibo, la bahía El Tablazo y el golfo de Venezuela (es el único lago de agua dulce en el mundo que tiene una conexión directa, y natural, con el mar). Así, el lago de Maracaibo es junto con los llanos, el delta de río Orinoco y el lago de Valencia, forma parte de los principales humedales de Venezuela (Sánchez, 2007).

Respecto a su formación, “el comienzo de la sedimentación miocena en la Cuenca de Maracaibo se caracteriza por una transgresión marina de considerable extensión territorial dentro de los límites del lago de Maracaibo, pero de duración relativamente corta” (González de Juana *et al.*, 1980). De manera similar, el autor anterior menciona que la invasión marina se inició en sentido noreste a suroeste desde Falcón a Zulia, pero la correlación de La Rosa con la formación o formaciones de la región falconiana que ocasionaron la invasión marina en el lago de Maracaibo no está adecuadamente definida.

En el mismo orden de ideas, González de Juana *et al.* (1980) mencionan que el evento más destacado durante el Mioceno en la cuenca de Maracaibo es la transgresión marina que ocasionó la sedimentación de la formación La Rosa. Este marcador marino se extiende diacrónicamente en toda la cuenca; la base de la transgresión de la formación La Rosa está representada por un intervalo arenoso conocido como Arena de Santa Bárbara o mejor, como miembro Santa Bárbara de la formación La Rosa.

Esta arena tiene particular interés por su contenido de petróleo y su gran extensión como manto, localmente discontinuo, perforado en el lago de Maracaibo.

De igual forma, González de Juana *et al.* (1980) menciona que por encima de la formación La Rosa, se encuentra la formación Lagunillas, la cual es otra de las grandes formaciones petrolíferas de la cuenca y la cual presenta ambientes variables desde ligeramente marinos a salobres, indicados por la presencia de glauconita y por fósiles adecuados para definir ambientes, pero poco diagnósticos de edad. En este intervalo inferior se encuentran las arenas petrolíferas, en particular la denominada Arena Inferior de Lagunillas o miembro Marlago; la sedimentación más joven de Lagunillas representa el comienzo de la sedimentación continental en la cuenca de Maracaibo, que perdura hasta nuestros días. La sedimentación continental suprayacente a Lagunillas fue designada formación La Puerta (figura 5). Según PDVSA Intevep (2011), “el término La Puerta para designar afloramientos cerca del pueblo del mismo nombre en Falcón occidental”.

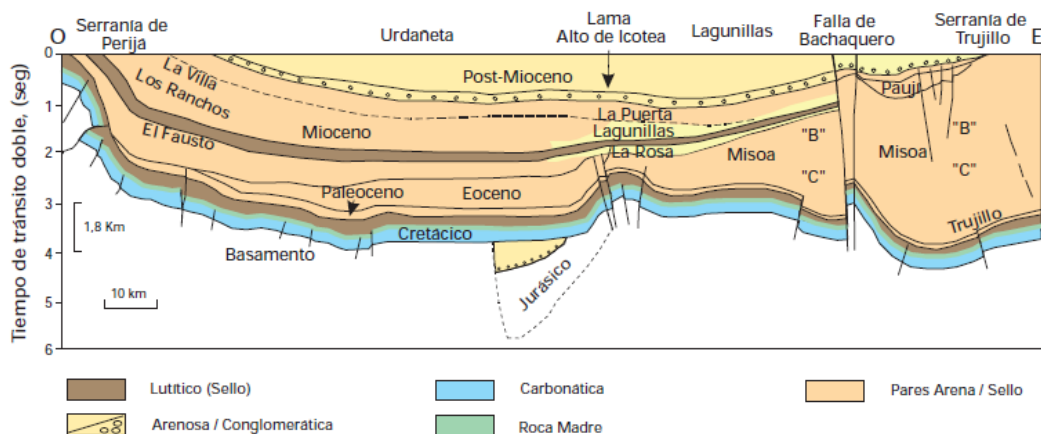


Figura 5. Sección O-E de la cuenca de Maracaibo (WEC 1997).

En el mismo orden de ideas, González de Juana *et al.* (1980) mencionan que se emplea el nombre de Formación Onia para la secuencia continental más joven suprayacente a la Formación La Puerta.

Planicie del lago de Maracaibo

Según Mendoza (2005), la planicie circundante del lago de Maracaibo está conformada de la siguiente manera por el piedemonte de Perijá y la sierra de Corojo al oeste, por el piedemonte de los Andes de Mérida al sureste y por las estribaciones de la Serranía de Trujillo al noreste, formando el contorno del lago de Maracaibo que ocupa su parte central. Se destacan los terrenos bajos, pantanosos y anegadizos de las llanadas altas a la cota 30-40 metros sobre el nivel del mar. Casi toda la cobertura del lago de Maracaibo son sedimentos cuaternarios y solamente en el sector occidental del lago se encuentran algunos afloramientos de rocas del Paleógeno, así como en Maracaibo y en las crestas de las estructuras de La Paz y Mara. El comienzo del piedemonte está marcado por rocas del Neógeno que afloran en la parte centro-occidental de esta provincia fisiográfica. La historia reciente de la depresión es la de relleno progresivo y continuo de detritos provenientes de las cordilleras circundantes y la poca capacidad de transporte de los detritos al caer al agua del lago ancestral. Levantamientos recientes, sedimentación y relleno rápidos condicionan la vida del lago hacia su extinción final.

Cuenca del lago de Maracaibo

Está situada al noreste de Venezuela y se extiende sobre toda el área ocupada por las aguas del lago y los terrenos planos que la circundan. Cabe destacar que es la cuenca petrolífera más importante de Venezuela. Por otra parte, “la roca madre por excelencia es la formación La Luna de edad Cretácico Tardío, cuyas facies se encuentran por toda Venezuela occidental hasta Colombia” (Lessmann, 2004).

Según González de Juana *et al.* (1980), el lago de Maracaibo estuvo sometido a oscilaciones en el nivel de sus aguas durante el Pleistoceno, como consecuencia de las glaciaciones que influenciaron las condiciones climáticas. Es probable que el lago existiera como tal durante la mayor parte del Cuaternario, aunque las condiciones pluviales actuales en la región corresponden al interglacial del Holoceno, y que

durante la última glaciación, no sólo predominaron condiciones más secas en Los Andes, sino también en extensas regiones de los Llanos y Guayana.

Por otra parte González de Juana *et al.* (1980) también señalan que la depresión ocupada por el lago está bordeada por las elevaciones de los Andes y Perijá. Por el norte está separado del golfo de Venezuela por el arco de Maracaibo, un alto estructural cubierto por una secuencia de sedimentos paludales y fluviales interrumpida por discordancias marcadas por paleosuelos oxidados. La unidad litológica más joven se describe como formación el Milagro, de facies arenosas con notables niveles de ferrolita y lechos arcillosos y ferruginosos con madera silicificada. En la depresión del lago de Maracaibo se usan los nombres formacionales de Onia y El Milagro, ambas poco conocidas, porque el revestimiento de superficie de las perforaciones petroleras las elimina parcial o totalmente de los registros y se carece de muestras adecuadas.

De igual forma, Lessmann (2004) señala que la geología de la Cuenca de Maracaibo se relaciona al movimiento transcurrente de la placa del Caribe contra la placa Sudamericana. A consecuencia de dicho movimiento se produjeron esfuerzos de transpresión al tectonismo andino durante el Terciario Inferior, y desplazamientos tectónicos en la sierra de Perijá durante el Oligoceno- Mioceno y en los Andes de Mérida durante el Plioceno- Pleistoceno. Estos múltiples eventos tectónicos asociados a la formación de esta cuenca foredeep combinados con la fluctuación relativa del nivel del mar y la gran disponibilidad de sedimentos, dieron origen a una gruesa columna de sedimentos que sufrió varios ciclos de maduración termal dando lugar a la formación de numerosos yacimientos petrolíferos.

Evolución tectónica de la cuenca de Maracaibo

La evolución tectónica de dicha cuenca está enmarcada en cuatro eventos principales:

Un periodo denominado Jurásico- Cretáceo Temprano, el cual está representado por la ruptura de Pangea, lo que trajo como consecuencia la generación de valles de

extensión o *half grabens*, los cuales fueron rellenos sintectónicamente por las formaciones Río Negro y La Quinta, con orientación noreste. Se plantea también que la separación entre la placa Suramericana y los bloques Chortis, Oaxaca y Yucatán se relaciona con la apertura del golfo de México o Proto-Caribe, en el cual se generaron patrones de fracturas las cuales en su gran mayoría fueron reactivadas ya sea por el hundimiento de bloques durante la sedimentación comprendida en el Eoceno-Oligoceno o el levantamiento orogénico en el Neógeno. Por otra parte la sedimentación cretácica post-rifting en Barinas, marca una subsidencia continua en un margen pasivo, generando fallamientos predominantemente normales con orientación NO-SE (García, 2001)

Un período denominado Cretácico Tardío- Paleoceno, el cual fue una fase compresiva relacionada con la orogénesis de los Andes Centrales Colombianos.

Otro período denominado Paleoceno- Eoceno, en donde se generaron cuatro fases de deformación: la primera fase denominada Fase Distensiva, comprendida entre los periodos Eoceno temprano a medio, la cual afecta a las unidades cretácicas y a la parte inferior del Eoceno medio y cuyo fallamiento es normal con dirección NE-SO. Una fase denominada Fase Compresiva, comprendida en el Eoceno medio y la cual se encuentra asociada a la llegada de las Napas de Lara al norte de Venezuela, originando predominantemente fallas de tipo inversas con orientación NO-SE. Otra fase denominada Fase Distensiva, la cual se encuentra comprendida entre los periodos Eoceno medio a tardío, y en el cual se origina un fallamiento con una orientación preferencial NE-SE, afectando las secuencias cretácicas y terciarias. Finalmente una fase denominada Fase Compresiva, comprendida en el periodo Eoceno tardío y la cual se encuentra asociada al último empuje de las napas y al inicio de los Andes Orientales Colombianos; dicha fase origina un fallamiento inverso con una orientación preferencial E-O, NE-SO.

Finalmente, un periodo denominado Mioceno Tardío- Holoceno, la cual es una fase asociada al levantamiento de los Andes y cuya deformación se encuentra controlada

principalmente por tectónica a nivel de basamento. Dicho sistema se caracteriza por corrimientos que involucran al basamento con rumbo NE-SO, los cuales se imbrican en despegues profundos en la corteza, con transporte hacia el noroeste y retrocorrimientos menores con vergencia opuesta. Dicha deformación se localizó a lo largo del sistema de rift jurásico, produciendo la inversión de los grabens preexistentes. (García, 2001).

Otros autores señalan que la historia geológica de la cuenca se puede dividir en dos megaciclos, los cuales estuvieron separados por el evento de apertura del Jurásico; un primer megaciclo Paleozoico y un segundo megaciclo Mesozoico- Cenozoico (León, 2008).

El primer evento, durante el primer megaciclo se conoce como Compresión Paleozoica y dentro del mismo se pueden distinguir varios eventos de deformación. Dichos eventos, podrían estar asociados tanto a la orogénesis del Precámbrico tardío como a la del Paleozoico tardío; estos eventos influyeron sobre la configuración actual de la cuenca y sobre la configuración estructural presente, a excepción del evento tectotermal del Permo Triásico, la cual con la formación del arco de Mérida, preparó el marco adecuado para la sedimentación del intervalo de calizas cretácicas (Steve, 2000).

En el segundo megaciclo se encuentra el evento que marcó la separación entre el norte y el sur de América, el cual se conoce como la Apertura Jurásica, donde espesas secuencias volcánico- clásticas continentales (formación La Quinta) se depositaron en un sistema de grábenes y semigrábenes orientados en dirección NNE-SSO. Dichas estructuras distensivas se encuentran invertidas en la actualidad y se desarrollaron principalmente en la porción meridional de los Andes de Mérida y en la región de la Sierra de Perijá. (De Toni *et al.*, 1994).

Según Steve (2000) la mayoría de las estructuras jurásicas se originaron a partir de cabalgamientos paleozoicos en forma de despegues extensionales. Las direcciones de los alineamientos distensivos van a influir de gran forma en deformaciones

posteriores, donde dichos alineamientos representan estructuras importantes que fueron reactivadas por transpresión, transtensión e inversión (falla Urdaneta, Lama-Icotea, entre otras) (figura 6).

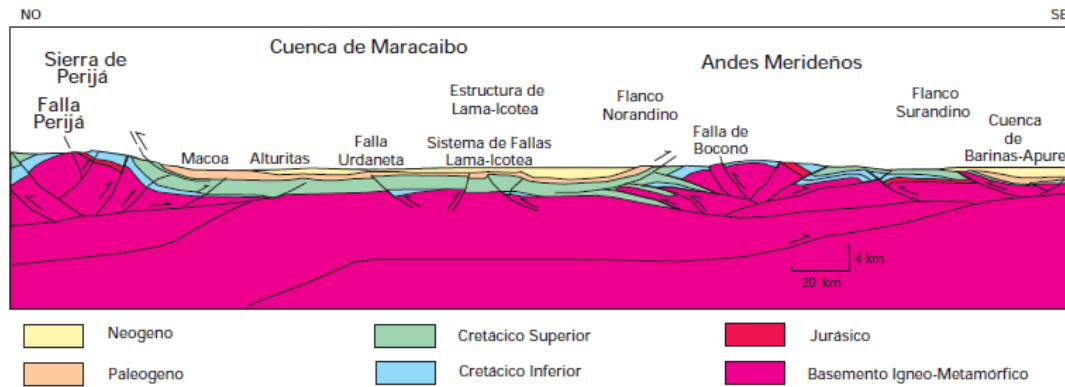


Figura 6. Corte estructural NW-SE a través de la cuenca de Maracaibo, desde los Andes Merideños hasta la serranía de Perijá (WEC 1997).

Posterior a esto y después del periodo Jurásico, se desarrolla la denominada Subsistencia Termal Cretácica, el cual corresponde a un periodo de tranquilidad tectónica. La culminación de la ruptura de Pangea ocurre en el Jurásico tardío y abarca parte del Cretácico Temprano. (De Toni *et al.*, 1994).

Según Steve (2000), al inicio del Cretácico se desarrolla un sistema fluvial del Neocomiense?- Barremiense. Dicha serie continental está representada por los sedimentos de la formación Río Negro. Posterior a esto se generalizó un evento transgresivo relacionado con los cambios eustáticos a nivel mundial y el cual finaliza durante el Cenomaniense- Campaniense. Dicho evento se origina como resultado de la invasión marina de la plataforma y la instalación progresiva de un ambiente de plataforma interna a media durante el Aptiense- Cenomaniense propiciando principalmente la sedimentación de calizas. En la zona del lago de Maracaibo estas calizas están representadas por el grupo Cogollo, el cual se encuentra constituido por las formaciones Apón, Lisure y Maraca (León, 2008). El máximo de invasión marina se logra para el Cenomaniense tardío- Campaniense temprano, en donde se desarrolla

un ambiente de plataforma media con depósitos de calizas y lutitas con abundante contenido en materia orgánica; estos sedimentos están representados por lo que actualmente se conoce como la formación La Luna y la Formación Capacho (Steve, 2000).

Según León (2008) durante el Cretácico tardío- Paleoceno, existe un margen activo al oeste y pasivo al este. La colisión al oeste de la placa Suramericana con la placa del Caribe convierte el margen pasivo en un margen activo creando una cuenca de tipo antepaís en el área de Perijá. Durante dicho periodo se desarrolla un ambiente de plataforma externa a batial con facies lutíticas en el área correspondiente al lago de Maracaibo. Esta secuencia en la actualidad está representada por la formación Colón, la cual es uno de las principales capa sello del sistema petrolero del área. Según Steve (2000) posterior a la sedimentación de la Formación Colon se genera un sistema encadenado de alto nivel, alimentado desde una zona positiva al oeste y el cual genera depósitos más clásticos, representado por las areniscas de la formación Mito Juan.

Durante el Paleoceno tardío- Eoceno Medio se inicia de manera progresiva y oblicua la acreción del terreno Caribe contra el borde septentrional de la placa Suramericana, conocida como la Compresión Caribe y flexión antepaís. La deformación asociada produjo el emplazamiento de las napas de Lara, generando nuevas antefosas y propiciando la depositación de tres secuencias en un sistema encadenado transgresivo y uno regresivo. En la zona del lago, ocurrió una sedimentación de plataforma marina arenosa-lutítica donde se deposita la formación Misoa (León, 2008). Durante este período también tuvo lugar la formación de la falla de Oca, la cual representa el límite norte de la cuenca del lago de Maracaibo (De Toni *et al.*, 1994).

En el período comprendido entre el Eoceno Medio-Oligoceno temprano se registra un periodo importante de erosión hacia la parte central y oriental del lago de Maracaibo y hacia Barinas-Apure. De manera simultánea, se redistribuyen los depocentros hacia el oeste y sur del área, lo cual promueve el levantamiento de la Proto-Sierra de Perijá (De Toni *et al.*, 1994). La colisión del terreno de Panamá-Baudo contra la esquina

noroccidental de Suramérica produjo un evento compresivo de gran importancia en el occidente el país, el cual recibe el nombre de Compresión Neógena Andina. Durante este período (Mioceno Medio-tardío- Holoceno) los Andes venezolanos y la sierra de Perijá adquieren su morfología actual. Este evento también fue responsable de los levantamientos del macizo de Santa Marta, macizo de Santander y de la cordillera Oriental de Colombia. Durante el Mioceno, de igual manera se depositaron las formaciones La Rosa y Lagunillas, cuya composición es principalmente arcillosa. A lo largo de los Andes se desarrollaron facies más molásicas que dieron como resultado un rápido soterramiento asociado a sedimentos fríos (De Toni *et al.*, 1994).

Formación Lagunillas

González de Juana *et al.* (1980) mencionan que la formación se compone principalmente de una intercalación de lutitas, arcilitas, arenas, areniscas mal consolidadas y algunos lignitos. La parte inferior, de 100 a 150 m de espesor, denominada Arena Inferior de Lagunillas contiene arenas petrolíferas importantes intercaladas con arcillas y lutitas carbonosas abigarradas, cuya base se coloca donde aparecen las primeras faunas marinas de la Formación la Rosa. El tope se coloca en la base de las lutitas fosilíferas del Miembro Laguna. La mitad superior se denomina Miembro Bachaquero y se compone de intercalaciones de arcillas, lutitas arenosas y areniscas pobremente consolidadas, con capas ocasionales de lignitos de hasta 1,5 m de espesor.

Formación La Rosa

Según González de Juana *et al.* (1980), la Formación La Rosa se puede definir como el conjunto de sedimentos marinos de edad Mioceno depositados sobre la formación Icotea o sobre la superficie truncada del Eoceno; sus linderos superiores están marcados por la terminación de un ambiente favorable a la vida marina normal. Según los autores anteriormente mencionados, en la sección tipo la litología consiste en su mayor parte en lutitas arcillosas, verdosas, más o menos fosilíferas, con una cantidad subordinada de capas de areniscas e interlaminación de areniscas y lutitas. En el lado oeste del lago la formación consiste casi completamente en lutitas arcillosas, verdosas y fosilíferas, con una pequeña cantidad de areniscas.

Formación Icotea

La formación Icotea consiste en limolitas y arcilitas duras, macizas blancas a gris claro, ocasionalmente carbonáceas y moteadas de verde claro, amarillo y marrón rojizo. Son frecuentes esferulitas de siderita, capas ocasionales de lutitas y areniscas verdosas a gris. En el área de Boscán, la formación es predominantemente lutítica,

con capas de areniscas de 10 a 15 pies (3 a 4,5 m) de espesor, localmente petrolíferas. (PDVSA - Intevep, 2011).

Formación Los Ranchos

Según González de Juana *et al.* (1980), la Formación Los Ranchos es una unidad con más de 50% de arenisca; un 50 o 60% de la formación en la sección es arenisca y el resto en su mayor parte es arcillita”. El mismo autor menciona que existen también cantidades menores de limolita y conglomerado de guijarros o arenisca conglomerática.

Formación Cuiba

Se describe litológicamente la formación como arcilitas verde aceituna, moteadas en verde aceituna claro y gris, rojo oscuro, rojo púrpura, grisáceo y marrón, las arcilitas son limosas y arenosas, y están intercaladas con cantidades menores de areniscas color verde aceituna grisáceo claro, de grano fino a medio. Se encuentran algunas capas de lignito y pelotillas de siderita. En el campo Alpuf, se describen arcilitas abigarradas en tonos gris claro, gris verdoso, amarillo naranja, marrón, púrpura y rojizo, las areniscas son de grano fino a medio, subredondeado a subangular, moderadamente consolidadas (PDVSA - Intevep, 2011).

Formación Macoa

Según PDVSA - Intevep (2011), la formación Macoa está compuesta por arcilitas y limolitas, con cantidades variables y subordinas de areniscas. Las areniscas son de grano fino a medio, con colores gris, aceitunado o marrón. En el campo Alpuf, se describen arcilitas gris a gris verdoso a veces moteadas en amarillo y marrón, especialmente al este del campo, lutitas grises, gris oscuro o gris verdoso, limolíticas, carbonáceas y piríticas y areniscas blancas a gris claro, de grano fino a medio, subredondeado, con escogimiento moderado y cemento silíceo, o a veces calcáreo. Las areniscas presentan glauconita, y al oeste del campo, fragmentos de chert.

Formación Peroc

Según PDVSA - Intevep (2011) la formación Peroc se subdivide en tres miembros informales, inferior, medio y superior con las siguientes características litológicas el miembro Inferior, comienza con lodolitas o limolitas verdosas, seguidas hacia arriba por una intercalación de lutitas, limolitas, arcilitas y areniscas y lignitos con cantidades menores de calizas pardo-azuladas y calizas arcillosas. Se cita una Arenisca Basal como una capa de 27 m de arenisca micácea color gris claro, de grano grueso, mal escogido y con láminas delgadas de lutita. El miembro Medio, el cual está formado principalmente por lutitas gris oscuro o gris verdoso, con menor proporción de arcilitas pardo claro, limolitas gris claro y lignito. Se describe el miembro Superior, como una arcilita color pardo claro, con intercalaciones menores moteadas en rojo, gris, púrpura, rosado y blanco. Hacia el sur, predominan lutitas y arcilitas verdes, con intercalaciones de arcilitas marrón claro, púrpura y gris. Por otra parte, según González de Juana (2011), la formación Peroc consiste principalmente en arcillitas y limolitas abigarradas en tonos aceituna, gris pardo y localmente diversas tonalidades de rojo y púrpura. En toda la sección hay areniscas delgadas distribuidas irregularmente.

Formación Misoa

Las características de los sedimentos de la formación Misoa dependen de su posición en la cuenca, del ambiente de sedimentación, de la distancia entre ellos y de la fuente de los mismos. Hacia el noreste hay más lutitas y areniscas de grano fino, mientras que hacia el sur y sureste, el porcentaje de arena aumenta al 80 y 90% de la sección, y los granos se hacen más gruesos. Se encuentran además, areniscas, limolitas y lutitas intercaladas y hacia otras áreas, capas de caliza en la parte inferior. Hacia el norte del lago, dicha formación posee un espesor preservado de 3000 m y aproximadamente 1500 m erosionados. La formación Misoa se reconoce en el subsuelo del lago de Maracaibo y al oeste del mismo, desde el campo Mara a Alturitas, al suroeste de

extiende hacia el campo de Tarra donde se relaciona lateralmente con la Formación Mirador (PDVSA - Intevep, 2011).

Formación Mito Juan

Se caracteriza por arcillas grises, gris verdosa y negras, localmente arenosas, en las cuales el contenido de limo y arena aumenta en sentido ascendente y en cuya parte superior se encuentran a veces capas delgadas de calizas y areniscas. En la parte inferior de la formación hay algunas arcillas laminares. Posee espesores de 100 a 300 m para la formación (PDVSA -Intevep, 2011).

Formación Mirador

Según González de Juana *et al.* (1980) la sección tipo se caracteriza por areniscas blancas de grano fino a medio con capas delgadas de gránulos o guijarros de cuarzo; toda la sección presenta material carbonáceo, observándose algunas intercalaciones de lutitas en su tercio superior y capas delgadas de carbón interestratificadas con las mismas.

Según los autores anteriormente citados, la formación Mirador se divide en tres unidades informales. El intervalo inferior está constituido por areniscas macizas de grano grueso con estratificación cruzada en la escala de metros, intercaladas con arcillas limosas y arenosas. Hacia el sur se observan algunos niveles conglomeráticos, en el subsuelo de Alturitas, las areniscas son de grano fino y laminadas; se menciona la presencia en el subsuelo de un intervalo lutítico de 20 a 30 m de espesor, que se caracteriza por arcillitas y lutitas gris oliva claro, localmente carbonáceas y con una o dos capas lenticulares de carbón. Este intervalo constituye un marcador notorio en los registros eléctricos de pozos relativamente cercanos, y no parece tener continuidad regional, como sucede al sur de Táchira donde está ausente. El intervalo superior, muestra areniscas cuarzosas limpias de grano grueso a conglomeráticas.

Formación Los Cuervos

Según - PDVSA Intevep (2011) está constituida principalmente por arcilitas y lutitas con capas de carbón en la base y algunas capas de arenisca a través de la sección. Posee también 75 m inferiores las cuales consisten en lutitas y arcilitas gris oscuro, carbonáceas, intercaladas con limolitas micáceas y carbonáceas, areniscas de grano fino y carbón. Las capas de carbón varían en espesor entre 0,5 y 2,5 m. La parte superior de la sección consiste en arcilitas gris a gris verdoso, parcialmente limolíticas y sideríticas, con esferulitas de siderita. La formación Los Cuervos aflora en la parte suroeste de la cuenca Maracaibo (Concesión Barco de Colombia y el antiguo distrito Colón de Zulia), al sur del piedemonte de la sierra de Perijá, en la depresión de Táchira y en el flanco norandino.

Formación Barco

Según PDVSA - Intevep (2011) la formación Barco está compuesta por areniscas, lutitas y limolitas intercaladas. El espesor de la formación varía de 150 a 278 m, con un promedio de 194 m. Dicha formación ha sido reconocida en el suroeste del Zulia y en los estados Táchira y Mérida.

Formación Colón

Según PDVSA - Intevep (2011), la formación se caracteriza por lutitas microfósilíferas gris oscuro a negras, macizas, piríticas y ocasionalmente micáceas o glauconíticas, con margas y capas de caliza subordinada. Las lutitas son más arenosas hacia la base y hacia la parte superior, donde la unidad cambia transicionalmente a la formación Mito Juan. En la cuenca de Maracaibo y en la sierra de Perijá el espesor es de 470 m y se extiende por toda la cuenca de Maracaibo y en la cuenca Barinas-Apure.

Formación La Luna

La formación La Luna consiste típicamente de calizas y lutitas calcáreas fértidas, con abundante materia orgánica laminada y finamente dispersa, delgadamente estratificadas y laminadas, densas, de color gris oscuro a negro; la ftanita negra es frecuente en forma de vetas, nódulos y capas delgadas. Las capas de caliza varían en espesor de 1 – 2 cm hasta unos 50 cm, con estratificación uniforme y monótona. (PDVSA - Intevep, 2011).

Grupo Cogollo

Según PDVSA - Intevep (2011) de base a tope se caracteriza por calizas densas, fosilíferas, con cantidades subordinadas de lutitas oscuras y pocas arenas calcáreas. Posee un espesor aproximado de 370 m y abarca desde la península de La Guajira, área de Perijá- Machiques hasta la plataforma de Maracaibo.

Formación Maraca

Según PDVSA - Intevep (2011) la formación Maraca está compuesta principalmente por calizas cristalinas en capas gruesas con abundantes *Ostrea* sp., intercaladas con lutitas y margas; hacia la base se encuentran areniscas glauconíticas. El espesor de la formación oscila desde los 10 hasta los 120 metros.

Formación Lisure

La formación Lisure se compone predominantemente de areniscas glauconíticas y calizas arenosas, intercaladas con arcillas laminares arenosas y algunas capas de caliza conchífera. Se presentan espesores entre 55 y 180 metros (PDVSA - Intevep, 2011).

Formación Apón

Consiste en calizas gruesamente estratificadas, gris claro, gris y gris azulado, localmente pueden ser duras, densas y muy fosilíferas, interestratificadas con

cantidades subordinadas de lutitas gris oscuro, calcáreas y margas. Posee un espesor que varía entre 510 y 850 m y se extiende por Venezuela occidental y este de Colombia; por las cuencas de Maracaibo y Apure (PDVSA - Intevep, 2011).

Formación Isnotú

Según González de Juana *et al.* (1980), esta unidad se caracteriza por la intercalación de arcillas y areniscas, con cantidades subordinadas de arcillas laminares, carbón y conglomerados. Las arcillas que constituyen el 65% de la formación, son macizas, localmente arenosas, suaves al tacto y de color gris claro, frecuentemente moteadas en rojo púrpura y amarillo, algunas arcillas son carbonosas y contienen restos de plantas. Las areniscas se presentan en capas de 2 a 3 m, y son gris claro a blancas, de grano fino a finamente conglomeráticas, localmente micáceas y con rizaduras.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

III.1 Definición de onda

Una onda puede definirse como la propagación de una perturbación en un medio. Por extensión, en el caso del suelo, podemos considerar una onda como la propagación de energía a través del mismo, provocando una perturbación en las partículas que lo conforman.

III.2 Ecuación de onda

Esta ecuación diferencial en derivadas parciales, lineal y de segundo orden se utiliza para definir toda clase de onda física. “Dicha ecuación, se trata de una ecuación diferencial en derivadas parciales porque la onda tiene que estar escrita en función de varias variables independientes, es decir, las de espacio y tiempo” (Guerrero, 2007). Por tanto, la ecuación de onda se puede representar de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (1)$$

III.3 Ondas de cuerpo

III.3.1 Onda P u ondas longitudinales

Una onda P puede definirse como aquella en donde las partículas del medio perturbado se mueven en la misma dirección a la dirección de propagación de la onda.

III.3.2 Onda S u ondas transversales

Por otra parte, una onda S puede definirse como aquella en donde las partículas del medio perturbado se mueven en dirección perpendicular a la dirección de

propagación de la onda. “La velocidad de la onda S puede tomar valores que oscilan desde cero hasta un 70% con respecto a la velocidad de la onda P” (Telford, 2004). Cabe destacar que las ondas S no pueden propagarse a través de los fluidos.

III.4 Ondas superficiales

III.4.1 Ondas Rayleigh

Estas ondas viajan a través de la superficie de la tierra y consisten en una combinación de movimientos longitudinales y transversales con una relación de fase definida, una respecto de la otra (Telford, 2004).

Cabe destacar que el autor anterior menciona que la amplitud de este tipo de ondas decrece exponencialmente con la profundidad. El movimiento de las partículas se encuentra confinado en un plano vertical en la dirección de propagación de la onda. Durante el pasar de la onda, una partícula recorre una trayectoria elíptica y el eje mayor es vertical (cerca de la superficie). La dirección de movimiento de la partícula alrededor de la elipse es llamado retrógrado debido a que se opone a la dirección de movimiento de las partículas de las olas en la superficie del agua.

III.4.1 Ondas Love

Las ondas Love “implican movimientos transversales paralelos a la superficie de la tierra y a veces se les denomina ondas SH. Poseen velocidades intermedias entre la velocidad de las ondas S en la superficie y en las capas más profundas presentan dispersión” (Telford, 2004).

III.5 Efectos de sitio

La modificación de la señal sísmica debida a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas, se conoce como efecto de sitio y consiste en la amplificación de dicha señal en varios órdenes de magnitud (García, 2006).

En el mismo orden de ideas, el autor citado anteriormente también menciona que la respuesta y la magnitud de la amplificación de la señal está controlada principalmente por las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, especialmente por sus características dinámicas, así como el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso (figura 8).

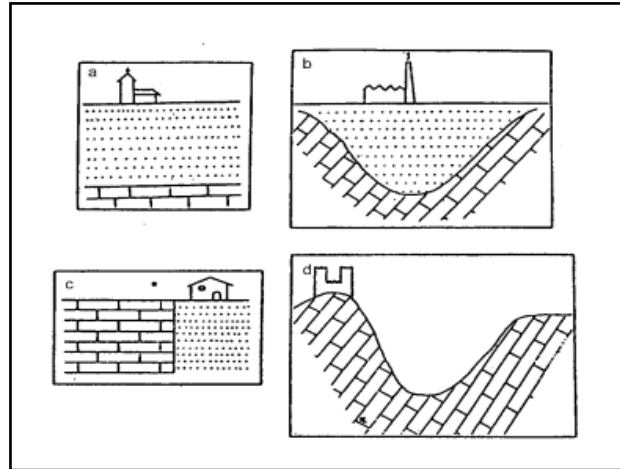


Figura 8. Estructuras y configuraciones tipo que pueden dar lugar a efectos de sitio. a) Capas sedimentarias horizontales sobre un sustrato rocoso; b) relleno sedimentario de un valle; c) discontinuidades laterales bruscas; d) relieves (efectos topográficos) (Moncayo y Edmundo, 2002).

III.6 Factor de amplificación

La amplificación de un movimiento sísmico depende principalmente del espesor de sedimentos y del contraste de impedancia entre el material en superficie y el basamento. Según Vásquez (2008) se considera la contribución de los 30 metros superficiales de sedimentos a la amplificación del movimiento, ya que las capas de espesores mayores o iguales a 100 metros pueden tener un efecto de amortiguamiento sobre el efecto de absorción, anulando el efecto de amplificación.

El autor anterior menciona que existe otro mecanismo de amplificación del movimiento en casos de alto contraste entre la velocidad de las ondas en roca y suelo

conocido como resonancia se presenta cuando la onda se refleja en la superficie y se propaga hacia el subsuelo hasta que nuevamente se refleja en la roca, quedando atrapada dentro de la capa de sedimentos. Este efecto puede aumentar la amplitud de las ondas y también prolongar el tiempo de duración de las ondas sísmicas. El efecto de resonancia es máximo cuando el período de las ondas sísmicas coincide con el período de vibración de la capa de sedimentos. En este caso, la amplificación puede ser muy grande y el período natural del suelo llega a ser dominante en el movimiento.

III.7 Microtremores

Las vibraciones del suelo han sido estudiadas para conocer su estructura y geometría, y para poder tratar de predecir el comportamiento del mismo frente a un evento sísmico de gran magnitud. Según Moros (2004) estas vibraciones pueden ser generadas por fuentes de origen natural y fuentes artificiales u originadas por el hombre, estos dos tipos de vibraciones son conocidas como microsismos y microtremores respectivamente. Por otra parte, según Moreno (2000) los microtremores son vibraciones generadas por eventos artificiales producto de la actividad humana tales como tráfico, maquinaria industrial y explosiones; están compuestos principalmente por ondas Rayleigh y S y son de período corto, con un rango de medición menor a 1 o 2 segundos. Sin embargo, existen excepciones como por ejemplo Ciudad de México, donde los microtremores de período mayor a 5 segundos han sido originados por acción humana debido a la existencia de sedimentos muy blandos.

En el mismo orden de ideas, según Flores- Estrella *et al.* (2004) los registros de microtremores en la banda de 0,1 a 0,5 segundos pueden ser utilizados para responder a uno de los problemas en la ingeniería sísmica: establecer el espesor y la velocidad de cizalla de sedimentos no consolidados que sobreyacen a la roca del basamento, dado que en este intervalo se propagan en el modo fundamental y en modos superiores de ondas Rayleigh. Además, ya que los microtremores se pueden considerar como un campo estacionario y homogéneo de ondas superficiales, se

puede calcular la velocidad de fase de ondas Rayleigh, la cual se encuentra controlada predominantemente por la velocidad de ondas S, y proveer información adecuada sobre el modelo de velocidad de onda S, a partir del cual se puede obtener una estimación de los efectos de sitio.

De igual forma, el autor anteriormente citado menciona respecto a las fuentes que producen los microtemores que a bajas frecuencias (por debajo de 0,3 y hasta 0,5 Hz) son causados por olas oceánicas que ocurren a grandes distancias, y es posible encontrar buena correlación de los microtemores con condiciones meteorológicas de gran escala en el océano; a frecuencias intermedias (entre 0,3 y 0,5 Hz y 1 Hz) los microtemores son generados por el oleaje que rompe en las costas, por lo que su estabilidad es significativamente menor; para altas frecuencias (mayores a 1 Hz) las fuentes de los microtemores están ligadas a la actividad humana por lo que reflejan los ciclos de ésta, poniéndose de manifiesto por cambios en la amplitud de los espectros cuando se utilizan registros de microtemores en la estimación de efectos de sitio se supone que las trayectorias de las ondas son simples y similares; esto es, que no existe dispersión tridimensional, y que las trayectorias pueden ser aproximadas por la dispersión geométrica elemental y por la atenuación inelástica (Flores- Estrella *et al.*, 2004).

III.8 Método de Nakamura o relación H/V

El método de Nakamura (1989) se basa en la relación entre los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical de registros de microsismos en superficie. Dicho método, permite estimar la respuesta empírica de las capas superficiales del suelo, suponiendo que el ruido de los microtemores está compuesto por varios tipos de ondas. Además, pretende eliminar el efecto de las ondas Rayleigh. Se considera que las componentes horizontal y vertical del registro son similares en la base de la roca (Moncayo y Edmundo, 2002).

Los autores anteriores mencionan también que los registros obtenidos, son amplificados por las capas de suelo blando que se encuentran sobre el substrato

rocoso. Se considera además que las componentes horizontales se amplifican debido a multirreflexiones de la onda S, en tanto que los microtemores verticales lo hacen por multirreflexiones de la onda P. Cabe destacar que la velocidad de propagación de la onda P es generalmente mayor que 100 m/s, y los movimientos con frecuencias aproximadamente de 10 Hz o menos pueden no amplificarse, debido a la multirreflexión en las capas superficiales de varias decenas de metros de espesor.

En el mismo orden de ideas, la amplificación o efecto del suelo es la relación entre la amplitud de la componente horizontal del movimiento sísmico en el basamento rocoso y en la superficie (Franklin *et al.*, 2006). A nivel espectral su función de transferencia sería:

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

Donde S_{HS} y S_{HB} son respectivamente, el espectro horizontal del suelo en la superficie y en el basamento.

El espectro horizontal en superficie S_{HS} viene contaminada por las ondas superficiales de Rayleigh y por tanto, para que este cociente espectral sea realmente una función de transferencia, hay que eliminarle la parte debida a las ondas Rayleigh.

Por otra parte, como se supone que la componente vertical no es amplificada por el efecto de suelo, podemos utilizar el cociente espectral de esta componente para evaluar la contaminación, que provocan las ondas de Rayleigh (Franklin *et al.*, 2006). Por lo que se define el cociente espectral de las componentes verticales S_V como:

$$S_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (3)$$

Donde S_{VS} y S_{VB} son los espectros verticales en la superficie y en el basamento respectivamente. Si no se estuviera en presencia de ondas de Rayleigh, S_V sería igual a 1. Por otra parte, suponiendo que el efecto en la superficie de las ondas de Rayleigh es igual en las componentes vertical y horizontal, este último cociente sirve para eliminar la amplificación aparente, que provocan éstas en el cociente S_T (Franklin *et al.*, 2006). Por tanto, la función de amplificación del suelo viene dada por:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{S_V} = \frac{\frac{S_{HS}}{S_{HB}}}{\frac{S_{VS}}{S_{VB}}} = \frac{R_S}{R_B} \quad (4)$$

Donde $R_S = S_{HS}/S_{VS}$ y $R_B = S_{HB}/S_{VB}$.

Según Franklin *et al.* (2006), normalmente “para ruido ambiental, $R_B \approx 1$, por lo que $S_{TT} = R_S$ puede ser considerada una buena aproximación a la función de transferencia del suelo”.

Finalmente la expresión que permite obtener un estimado del efecto de sitio, y la cual está dada por la relación entre las componentes horizontal y vertical del movimiento en superficie de la capa de sedimentos viene dada por:

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (5)$$

Dicha ecuación, fue verificada de manera experimental por Yutaka Nakamura en el año 1989 utilizando registros de microtemores obtenidos en diversas perforaciones de pozos.

III.9 Relación entre el período fundamental y el espesor de sedimentos

Los períodos predominantes pueden ser identificados a partir de funciones empíricas de transferencia, partiendo de las mediciones de microtemores obtenidas en zonas donde la relación de la velocidad de la onda de corte es lo suficientemente grande.

Dicho período está relacionado con las condiciones del suelo a través de la relación elástica formulada por Kramer en el año de 1996, donde relaciona períodos predominantes, valores de V_s y espesores de los sedimentos:

$$T_0 = \frac{4H}{V_s} \quad (6)$$

Donde T_0 corresponde al período predominante, H al espesor del estrato compresible y V_s es la velocidad de onda de corte.

Cabe mencionar que la relación que existe entre el período fundamental del suelo y el espesor de sedimentos radica en que los mayores períodos de vibración se encuentran asociados a los sitios en donde la profundidad de sedimentos es mayor (Rocabado *et al.*, 2004) y viceversa, es decir, los menores períodos de vibración se encuentran asociados a los sitios en donde la profundidad de sedimentos es menor.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

IV.1 Selección del área de estudio

Según la geometría de la cuenca a estudiar y del área de la misma escogida para tal fin, fue necesaria la aplicación de un mallado con espaciamiento entre puntos de medición a una distancia aproximada de 3 km. Esto se realiza con la finalidad de obtener un mayor volumen de datos en vías de fácil acceso en vías principales. De igual forma, también se colocan puntos en la malla con un espaciamiento entre 5 a 6 km para el caso de vías secundarias. Esto se realiza para obtener mayor información en toda la extensión del área escogida. Para esto, se utilizó el programa ArcGis, en conjunto con diversos *preplots* suministrados por Funvisis (carreteras principales y secundarias, geometría de la cuenca en estudio, entre otros).

Por otra parte, en función del volumen aproximado de sedimentos que se encuentran en la zona, así como también la posible profundidad del basamento cretácico, se realizaron las mediciones con un tiempo de registro de 40 minutos.

Se procuró entre otras cosas ubicar dichos puntos de manera perpendicular a la cordillera de los Andes; esto con la finalidad de observar con mayor claridad el aumento de espesor en los sedimentos hacia la zona del lago de Maracaibo y la disminución de los mismos hacia la cordillera anteriormente mencionada.

IV.2 Medición de ruido ambiental

IV.2.1 Metodología de adquisición

La adquisición de los datos se realizó en su totalidad con un sismómetro de tres componentes REF TEK 151- 30A, como el que se observa en la figura 9. También se utilizó un sismógrafo REF TEK 130B junto a dos memorias de 16 Gb cada una (figura 9). De igual manera, se utilizó una agenda electrónica de bolsillo marca *Palm*

o un Ipad, para controlar el programa RefTek IFSC que se emplea a la hora de realizar la adquisición de los datos.



Figura 9. Sismómetro de tres componentes REF TEK 151-30A.

Por otra parte, a la hora de realizar la adquisición, se procedió de la siguiente forma:

- Se colocó el sensor (sismómetro REF TEK 151- 30A) a una distancia entre 5 y 6 metros respecto al sismógrafo REF TEK 130B, sin realizar el desbloqueo de los seguros laterales de dicho sensor y cerciorándose de que la placa de identificación del mismo se encontrase ubicada en dirección al norte geográfico.
- Se conectaron los cables al sismógrafo (figura 10), a saber: cable para GPS, cable de conexión hacia la Palm, cable de conexión hacia el sensor y cable de corriente (el cual no debe conectarse a la batería hasta el momento en el que se liberan las masas del sensor).

- Se revisó que dentro del sismógrafo se encontraran las dos memorias mencionadas anteriormente.
- Se colocó el GPS en un lugar donde hubiese la menor perturbación posible.
- Se realizó la nivelación del sismómetro por medio de tres niveles de burbuja que se encuentran a los laterales de dicho sensor.
- Se liberaron las masas del sensor.
- Se conectó la corriente al dispositivo.

Una vez realizado lo que se describe anteriormente, por medio de una Palm (figura 11) se verificaron los detalles de grabación:

- En la opción *Monitor*, se realizaron las pruebas con cada uno de los tres canales (dos horizontales y uno vertical).
- En la opción *Status*, se seleccionó *Start Acquisition* y se anotó la hora de inicio que aparece en la pantalla del sismógrafo y la hora de cualquier reloj convencional para controlar luego el tiempo de grabación.
- Se anotaron las coordenadas observadas en el sismógrafo (las cuales se encuentran en grados y minutos) y también las coordenadas obtenidas por medio de un GPS (preferiblemente en coordenadas geográficas y UTM).
- Se procedió a la adquisición de datos en función de los parámetros de grabación establecidos con anterioridad.
- Una vez transcurrido el tiempo de adquisición, se seleccionó en la Palm la opción *Stop Acquisition* y se anotó la hora final de la adquisición que se observó en el sismógrafo.
- Se desconectó el cable de corriente del sistema.
- Finalmente se bloquearon las masas del sensor para su posterior traslado a la próxima estación.

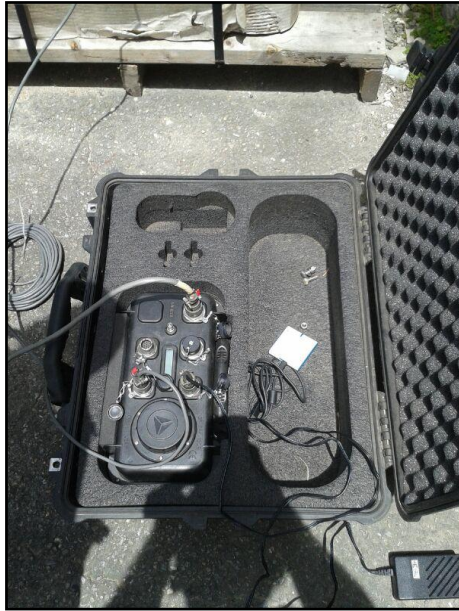


Figura 10. Sismógrafo con cables de corriente, cable del sensor y de GPS.



Figura 11. Palm empleada durante la adquisición.

IV.2.2 Metodología para conversión de datos a formato .SAF

Una vez realizada la adquisición de datos en campo se realizó lo siguiente:

- Se extrajeron las memorias *Flash Card* que se colocaron en el equipo durante la adquisición. Las mismas, se conectaron a una computadora mediante un adaptador.
- Los datos adquiridos durante el día se descargaron en la computadora; los archivos descargados se organizaron en carpetas (con el nombre de cada punto realizado durante el día) y se colocaron de acuerdo a la hora en la que comienza la adquisición de dicho punto.
- Se verificaron las señales obtenidas en cada punto por medio del programa RT View.

A continuación, se presenta parte del tutorial para el uso del equipo RefTek 130 para estudios de ruido ambiental (Rocabado, 2012):

- Se deben crear dos archivos TXT; uno que incluye las horas de registro por cada estación correspondiente al día juliano de adquisición y otro con los nombres de las estaciones (figura 12).

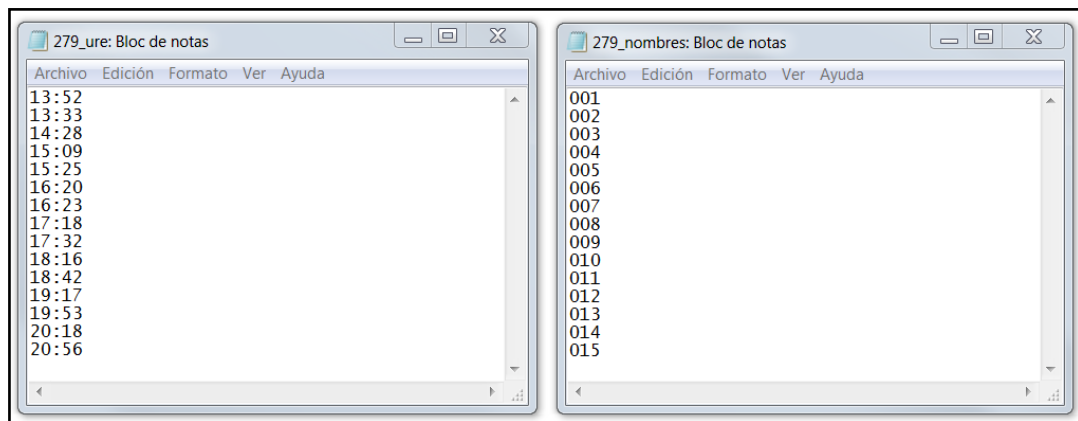


Figura 12. Archivos TXT con horas y nombres de las estaciones.

Se debe tomar nota del número de estaciones o entradas incluidas en el archivo anterior, ya que será uno de los parámetros solicitados por el programa a la hora de pre-procesar los datos.

- Para realizar completamente la conversión, se deben ejecutar en forma secuencial las siguientes rutinas: arcfetch.vi, rtcnvr.vi, movedata.vi y ref2saf.vi.
- Se debe ubicar y ejecutar el programa arcfetch.vi en el directorio donde se haya almacenado; una vez abierta la ventana de dicho programa se debe completar la siguiente información: número de estaciones a procesar, año (colocando sólo los dos últimos dígitos), el día juliano y la duración (en minutos). Luego de este paso y previo a la ejecución del programa, debe aparecer una ventana como la que se muestra a continuación (figura 13):

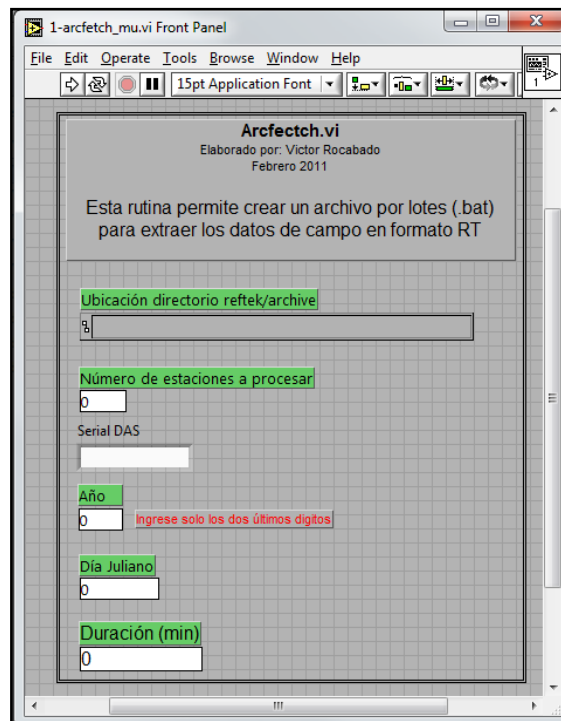


Figura 13. Ventana del programa arcfetch.vi.

Posterior a esto, aparece una ventana donde se solicita la ubicación del directorio archive; luego de esto se debe hacer clic en la opción “Select Cur Dir”.

- A continuación el programa le pide la ubicación del archivo .txt que contiene la información sobre las horas de registro; se debe ubicar el directorio donde se haya almacenado y seleccionarlo.
- Luego, el programa le solicita escoger un archivo para guardar, el cual corresponde a un archivo.bat, el cual se desea crear, por lo que se recomienda escribir el nombre del archivo en el formato arcfetch_XXX, donde XXX corresponde al número del día juliano que se está procesando.
- Ya realizado el paso anterior, el programa finaliza y debe aparecer en la carpeta indicada el archivo.bat que se indicó previamente. Dicho archivo debe ser ejecutado para que aparezcan una serie de archivos de extensión .rt en la carpeta en la cual se encontraba ubicado. Estos archivos corresponden a los datos en formato reftek para cada una de las horas indicadas extraídos del directorio archive.
- Posteriormente se ejecuta la rutina rtcnvr.vi la cual permite exportar los datos actuales a formato ASCII (figura 14).

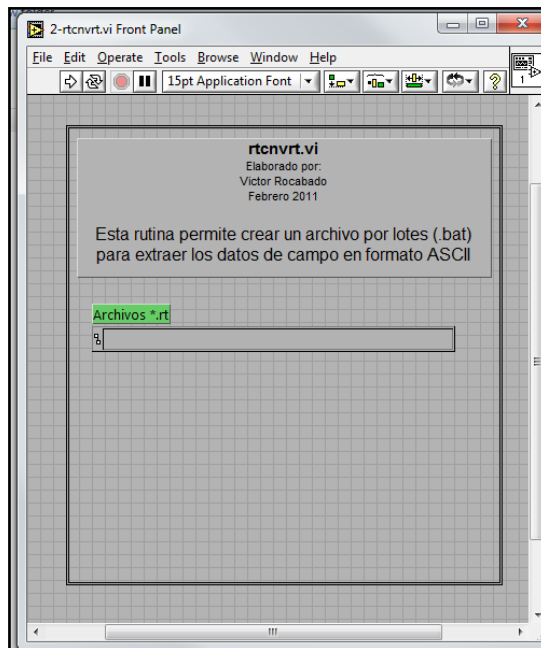


Figura 14. Ventana del programa rtcnvr.vi.

- El programa anteriormente mencionado pide como dato de entrada la ubicación del directorio que contiene los archivos .rt. Cuando se encuentre dentro de este directorio debe hacer clic en la opción “Select cur dir”.
- Luego, el programa le solicita el nombre del archivo a guardar, al igual que su ubicación. Para esto, se recomienda utilizar el formato rtenvrt_XXX, donde XXX corresponde al número del día juliano que se está procesando, añadiendo la extensión .bat para finalmente darle click en la opción OK.
- Posteriormente se debe ubicar el archivo por lotes recién creado (.bat) y debe ser ejecutado; una vez culmine la ejecución del mismo, se debe tener en el directorio sobre el cual se haya ejecutado la rutina, una carpeta con el año y día juliano que se está procesando.
- Una vez se hayan realizado los pasos anteriores se debe ejecutar el programa “3-movedata.vi”, el cual debe indicar previo a su ejecución, el número del canal a procesar (canal 1,2 o 3); se debe ejecutar la rutina para cada uno de los tres canales. Una vez se haya indicado el canal a procesar, se debe seleccionar la opción RUN (figura 15).

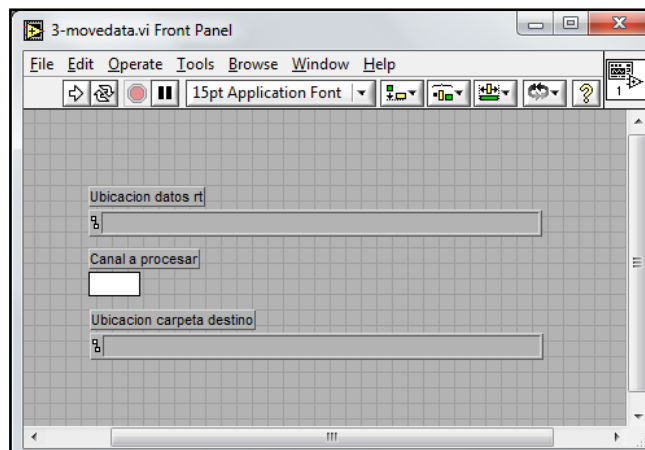


Figura 15. Ventana del programa movedata.vi

- Posterior a esto debe aparecer una ventana donde se solicita la ubicación de la carpeta de salida, para lo cual se debe crear la carpeta “ascii” y en su interior

tres nuevas subcarpetas con las etiquetas canal_1, canal_2 y canal_3 respectivamente. Luego de crear las tres subcarpetas se debe ingresar al primer canal y seleccionar la opción “SelectCurDir”.

- La ventana de dialogo que se despliega luego de ejecutar la opción anterior pide la ubicación de la carpeta que contiene los datos que se encuentran en formato .dat. Una vez ubicada la carpeta, se ingresa en la misma y se selecciona la opción “SelectCurDir”.
- Posterior a esto el programa pregunta por el archivo que desea guardar, por lo que siguiendo la convección de nomenclatura se debe colocar movedata_XXX_Z, donde xxx corresponde al número del día juliano que se esté procesando y “Z” al canal que también se encuentra en procesamiento (la extensión de este archivo debe ser .bat). Cabe destacar que el procedimiento anterior debe ser repetido para los canales restantes y debe ser ejecutado de manera individual cada uno de los archivos.
- Por último, se debe ejecutar el programa cuya función es realizar la conversión de datos en formato ASCII a SAF, para ello se debe ubicar el programa “4-Ref2Saf.vi” (figura 16). Al ejecutar dicho programa se deben ingresar los siguientes datos: 1) duración (en minutos), 2) frecuencia de muestreo (en mps) y 3) tipo de sensor.

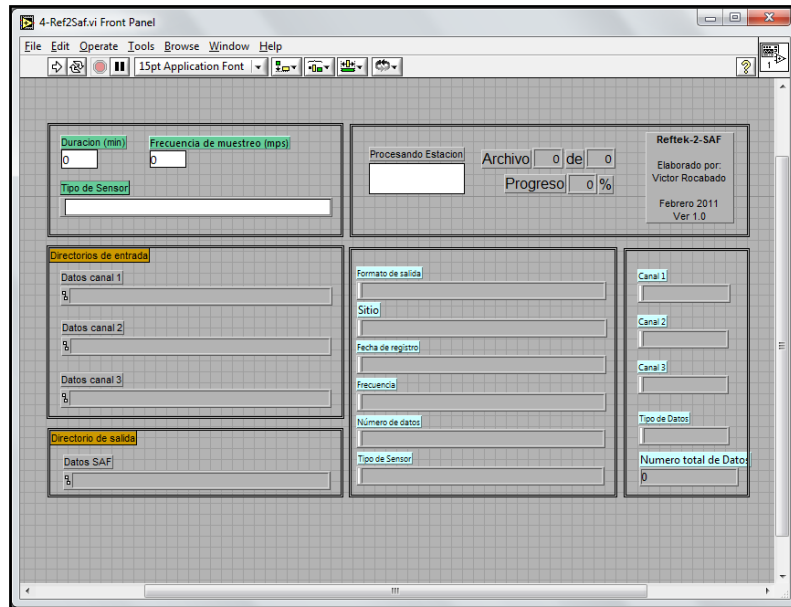


Figura 16. Ventana del programa Ref2Saf.

- El programa debe pedir la ubicación del archivo de texto que contiene los nombres de las estaciones correspondientes al día de medición; una vez seleccionado se le debe hacer click a la opción OK.
- En las próximas ventanas se pregunta por la ubicación de los datos ASCII correspondientes a los canales 1, 2 y 3 respectivamente. Se debe ubicar el directorio correspondiente en cada caso, ubicarse dentro del mismo y hacer en click en la opción “SelectCurDir”.
- Probablemente el programa pregunte previo a la ubicación de los directorios de los canales 2 y 3, la ubicación del lugar donde serán almacenados los datos en formato SAF, en ese caso se debe crear el directorio SAF; se debe ubicar en el interior del mismo y seleccionar “SelectCurDir”.
- Una vez completado, el programa comienza a crear los archivos .SAF.

IV.2.3 Metodología de procesamiento

Una vez que se tienen los archivos en formatos .SAF, se realiza el procesamiento en el programa Geopsy. Dicho programa permite obtener el período fundamental del

suelo a través del máximo pico reportado en el espectro obtenido, todo esto, asociado a los contrastes de impedancia de los estratos que se encuentran presentes en el subsuelo.

Al abrir Geopsy, se realiza lo siguiente:

- Se hace click en el botón “Import Signal” para desplegar una ventana y escoger la opción “File”; esto con la finalidad de buscar el archivo .saf que se desea procesar. Al hacer click en “File” aparece una ventana denominada “Load Signals” (figura 17) donde se debe buscar la carpeta donde se encuentran los archivos .saf. Una vez se elija el archivo de interés se procede a darle click al botón “Open”.

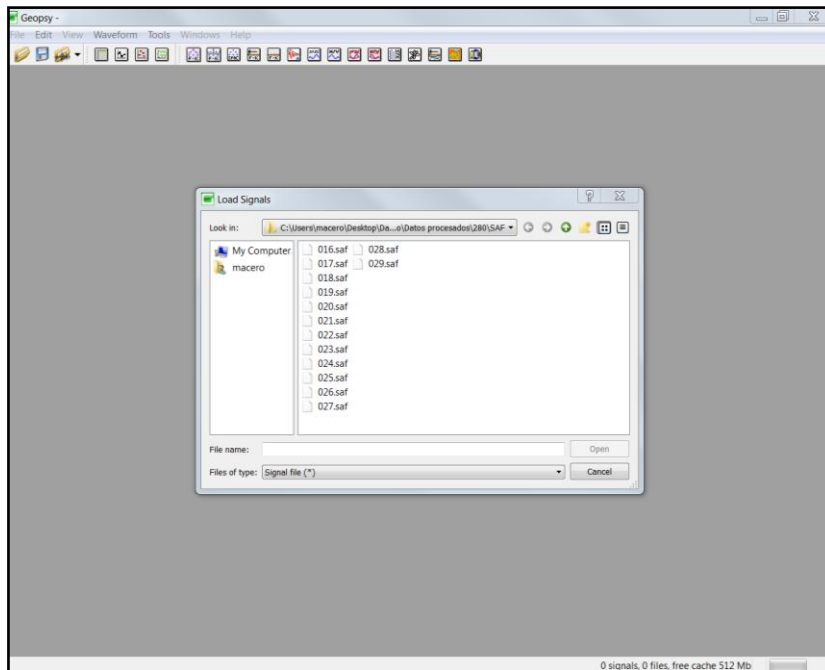


Figura 17. Ventana “Load Signals” para cargar archivos .saf

- Luego de darle click al botón “Open” aparecen dos ventanas; una con los datos de la señal como la componente, tiempo de inicio y fin de la grabación frecuencia de muestreo, entre otras; y otra ventana donde aparecen las señales

en sus diversas componentes, a saber, vertical, norte- sur y este- oeste (figura 18).

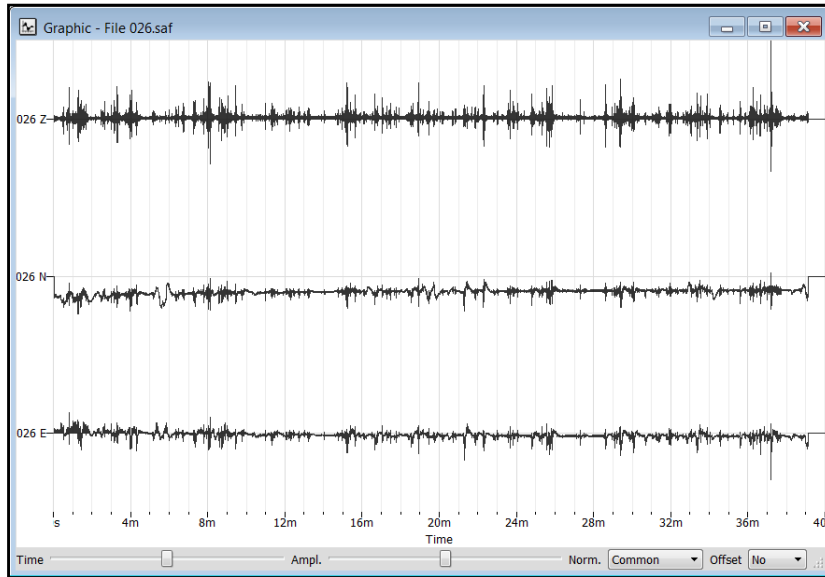


Figura 18. Ventana de la señal en sus diversas componentes.

- Posteriormente, se le da click a la opción “Waveform” ubicada en el panel superior de la ventana del programa, se despliega una ventana y seleccionamos la opción “Subtract value”; dicha opción permite corregir la señal por offset. Al seleccionar esta opción se despliega una ventana de diálogo donde se debe seleccionar la opción “Mean value” con el fin de remover el promedio aritmético de la amplitud de la señal calculado en toda la duración de la misma.
- Una vez realizado lo anterior, nuevamente se hace click en la opción “Waveform” para desplegar la ventana y seleccionar la opción “Filter”, la cual es una de las herramientas básicas de procesamiento de la señal. Al seleccionar esta opción se despliega una ventana de diálogo denominada “Frequency filter” (figura 19) la cual permite escoger entre otras cosas el tipo de filtro (pasa bajo, pasa alto, pasa banda, entre otros) y el método de filtrado, por medio de un filtro de Butterworth o a través de una convolución por una

función ventana. Para el caso de esta investigación, se toma un filtro pasa banda, con la finalidad de remover todas aquellas frecuencias que se encuentran fuera del rango de interés; dicho rango de frecuencias se establece según el tipo de vibración de interés para ruido sísmico ambiental. Para este caso, se elige un rango de frecuencia entre 0.20 y 15 Hz, para poder captar frecuencias provenientes del oleaje y frecuencias provenientes de fuentes antrópicas. Por otra parte, el método de filtrado se realiza a través de un filtro de Butterworth de orden 1; el orden tan bajo se debe a que se desea afectar la señal en menor proporción en el dominio del tiempo. Una vez establecidos estos parámetros se hace click en el botón “OK”.

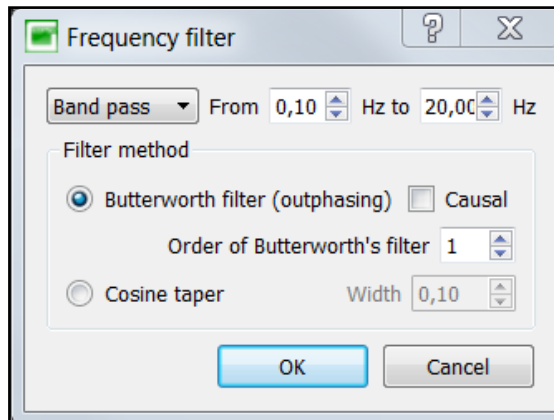


Figura 19. Ventana de diálogo “Frequency filter”.

- Luego de realizar lo anterior, nuevamente se selecciona la opción “Waveform” del panel superior del programa, se despliega una ventana y se selecciona la opción “AGC”, la cual modifica la amplitud de la señal para generar una nueva señal con un valor de RMS constante. Al hacer click en la opción AGC, se despliega una ventana de diálogo donde se debe colocar el ancho de la ventana (que de forma predeterminada es 0,1 s), esta longitud de la ventana permite calcular el valor promedio de RMS por el cual será dividido la amplitud. Para el caso de esta investigación se elige una ventana de 3 s.

- Posterior a esto, se selecciona el ícono H/V que se encuentra en el panel superior del programa o en su defecto se elige la opción “Tools” ubicada también en el mismo panel y se selecciona la opción correspondiente a H/V; esto permite que se despliegue una ventana de diálogo donde se deben escoger una serie de parámetros acordes a la investigación; dicha ventana se denomina “H/V Toolbox” (figura 20).

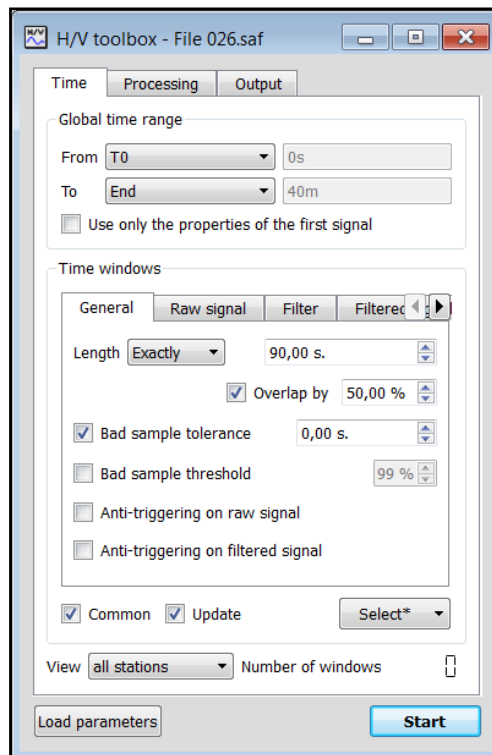


Figura 20. Ventana de diálogo “H/V Toolbox”.

- En la ventana anterior, se elige la pestaña “Time” y se selecciona la pestaña denominada “General”, se debe seleccionar “Length” para ajustar la longitud de las ventanas y poder realizar el análisis individual de cada una de las mismas. Aquí, se escoge la opción “Exactly” para que tome exactamente la longitud de la ventana de tiempo, según se coloque en el cuadro editable correspondiente a esa opción. Se toman longitudes de ventana de 120 s para poder observar con mayor claridad los períodos que se encuentren por encima

de 6 segundos. Por otra parte, se selecciona la opción “Overlap by” y se coloca el porcentaje de solapamiento para que las ventanas contiguas seleccionadas se superpongan o no. Cuando la opción se encuentra habilitada, las ventanas contiguas se solapan en función del porcentaje seleccionado; cuando dicha opción no se encuentra habilitada, ninguna ventana queda solapada; para el caso de esta investigación, se coloca un solapamiento del 50%. De igual manera, se selecciona la opción “Bad sample tolerance” para eliminar las partes donde se recorta la señal y también para que exista un rango de tolerancia en los criterios de selección de las ventanas (por ejemplo, para una muestra donde la amplitud sea demasiado alta). De igual forma, se selecciona la opción “Anti-triggering on filtered signal” para mantener la parte estacionaria de la vibración ambiental. También, se selecciona la casilla “Common” para que las ventanas seleccionadas sean colocadas de forma simultánea en toda la señal.

- Posterior a lo anterior, se elige la pestaña “Processing” para elegir parámetros como tipo de suavizado, la constante de suavizado, entre otros. En la opción “Smoothing type” se escoge la opción “Konno & Ohmachi”, la cual es una función de suavizado que mejora la estimación del período del sitio y el factor de amplificación; es de tipo trigonométrico- logarítmico y toma en cuenta la frecuencia central de máxima amplitud aplicando un coeficiente exponencial (Jaramillo, 2013). Se selecciona también la opción “Smoothing constant” con un valor de 20. Esta función de suavizado tiene forma triangular, se encuentra centrada en la frecuencia actual y su ancho es igual al ancho de banda escogido por el usuario; dicho ancho de banda varía desde cero (para un gran suavizado en el espectro) hasta 100 (para un bajo suavizado). Se escoge además la opción “Use cosine taper” para aplicar minimizar los efectos de borde debido a la extracción de ventanas para mejorar sus propiedades en el dominio de la frecuencia. Dicho ancho se ajusta en un cuadro contiguo a la opción.

- Además de lo descrito anteriormente, se selecciona la pestaña “Output” para escoger entre otras cosas la frecuencia de muestreo, el directorio de salida para los archivos, entre otros. Para el caso de la frecuencia de muestreo que oscila desde 0.2 Hz hasta 15 Hz. La frecuencia máxima está determinada por la frecuencia de Nyquist. Por otra parte, la frecuencia mínima se estima a partir de la longitud de las ventanas. Para el caso de la salida de los datos, se escoge la opción “Output” y se coloca el directorio de salida de los archivos generados.
- Luego de establecer los parámetros anteriores, se selecciona nuevamente la pestaña “Time”, se hace click en la opción “Select” para que se despliega una ventana y se elige la opción “auto” para que el programa escoja automáticamente las ventanas que se encuentran dentro del rango según los parámetros establecidos anteriormente (figura 21). Finalmente se hace click en el botón “Start”.

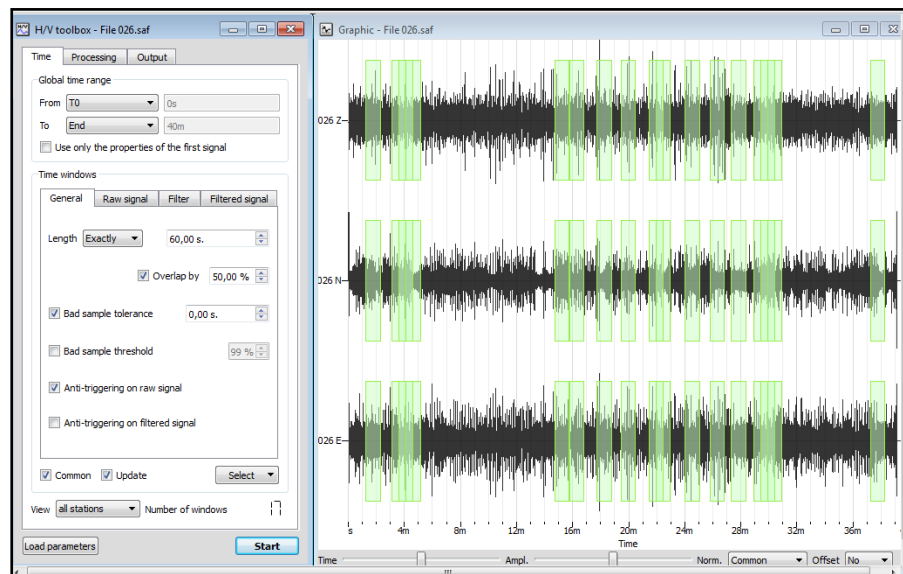


Figura 21. Componentes de la señal con ventanas seleccionadas por el programa.

- Luego de hacer click en “Start” se genera un espectro (figura 22) en donde se encuentran entre otras cosas el espectro promedio H/V (línea continua negra),

los espectros individuales H/V (espectro de colores), la desviación estándar por exceso y por defecto (línea punteada negra), el promedio de los picos de los periodos y su desviación estándar (áreas grises) y dos valores correspondientes al periodo del pico predominante (primera medida) y a la amplitud del pico predominante (segunda medida).

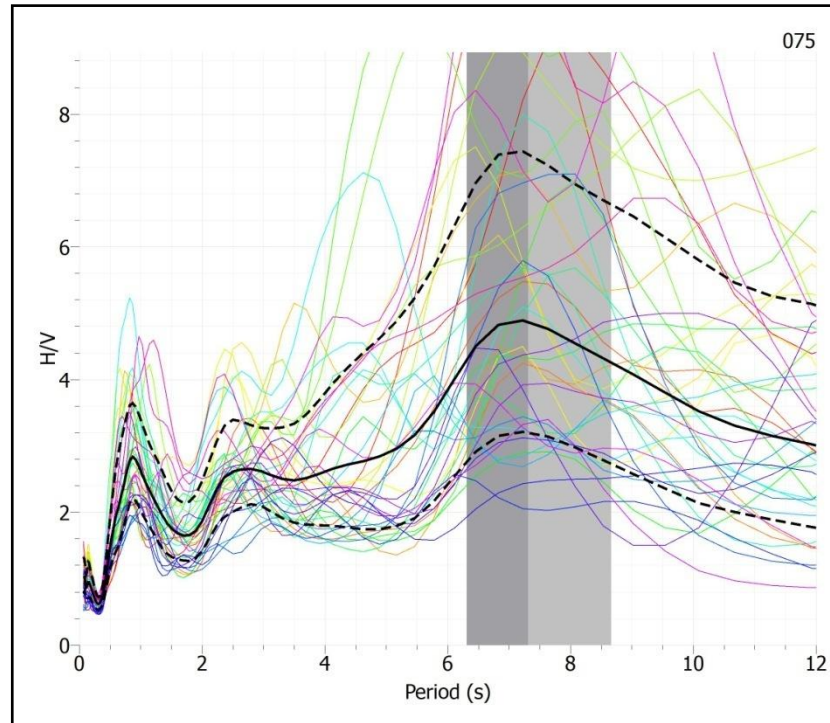


Figura 22. Espectro H/V.

- Cabe destacar que el espectro generado está expresado en función de la frecuencia y para el caso de esta investigación se debe colocar en función del período. Además de esto, se debe ajustar el alto y el ancho de la imagen generada (sólo por cuestiones de presentación y mejor visualización).

IV.3 Análisis geoestadístico

Se realiza un análisis estadístico con lo que se estudia una serie de medidas de tendencia central (media, mediana y moda), medidas de dispersión central (rango,

varianza y desviación estándar), histograma de frecuencias y un diagrama de caja y bigotes, lo cual permite dividir los diferentes datos en grupos que indican la presencia de distintos materiales que conforman el subsuelo. Dichos grupos se determinan después de observar el histograma de frecuencias, el cual permite determinar la cantidad de subpoblaciones presentes.

IV.4 Relación período fundamental – espesor de sedimentos

Para el cálculo de los espesores, se parte de la relación entre período fundamental y el espesor de sedimentos propuesta por Kramer (1996):

$$T_0 = \frac{4H}{V_s}$$

La obtención de velocidades se realiza a partir de la relación empírica entre la densidad y las velocidades de onda P y S para sedimentos saturados, rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas realizadas por Ludwig *et al.*, en el año 1970 (figura 23). Dichas velocidades se obtienen a partir de la composición de las formaciones presentes en la zona de estudio (sedimentos y rocas sedimentarias), tomando un valor promedio de densidades para cada material que lo conforma y luego verificando las velocidades correspondientes para esas densidades en la relación empírica para ondas S mencionada anteriormente. También, se toma como referencia para dichas densidades las obtenidas en los estudios de Camacho en el año 2013, donde se genera un mapa de basamento de la cuenca de Maracaibo, a partir de datos gravimétricos y magnéticos satelitales (tabla 1). Dichas densidades fueron corroboradas a partir de los estudios de Arnaiz, *et al.* (2011), en los cuales se realiza un análisis gravimétrico y flexural del occidente de Venezuela (figura 24). Además de lo anterior, se toma como guía para el cálculo de espesor, los estudios referentes a la cinemática del flanco noroccidental de los Andes de Mérida, Venezuela y la interacción entre estructuras de piel fina y piel gruesa, elaborado por Requena y Turienzo en el año 2014 (figura 25), lo cuales se realizaron en una zona cercana a la zona de estudio donde se llevó a cabo esta investigación.

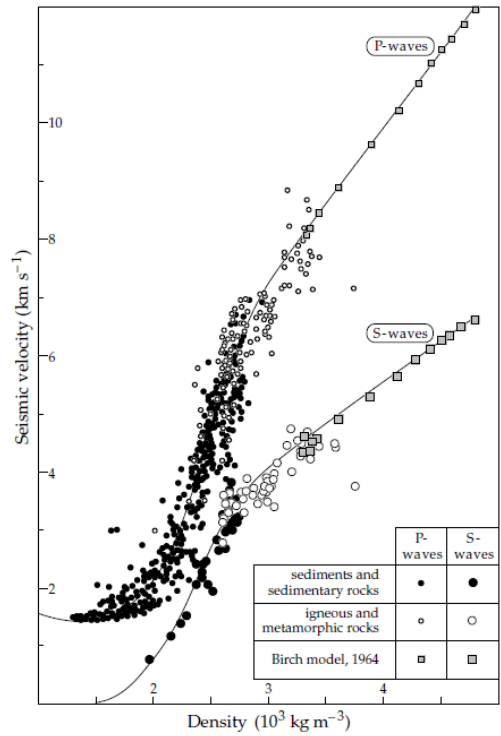


Figura 23. Relación empírica entre la densidad y las velocidades de onda P y S para sedimentos saturados, rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas (Lowrie, 2007).

Tabla 1. Densidades obtenidas por Camacho (2013) en la generación del mapa de basamento de la cuenca de Maracaibo, a partir de datos gravimétricos y magnéticos satelitales (Modificado de Camacho, 2013).

Edad		Formación	Densidad (g/cm ³)	
Cuaternario	Holoceno	Lagunillas	2.51 - 2.55	
	Pleistoceno			
Terciario	Neógeno	Plioceno		
		Mioceno		
	Paleógeno	Oligoceno		Misoa
		Eoceno		
		Paleoceno		
Cretácico		La Luna		2.65 - 2.69
		Lisure		
		Apón		

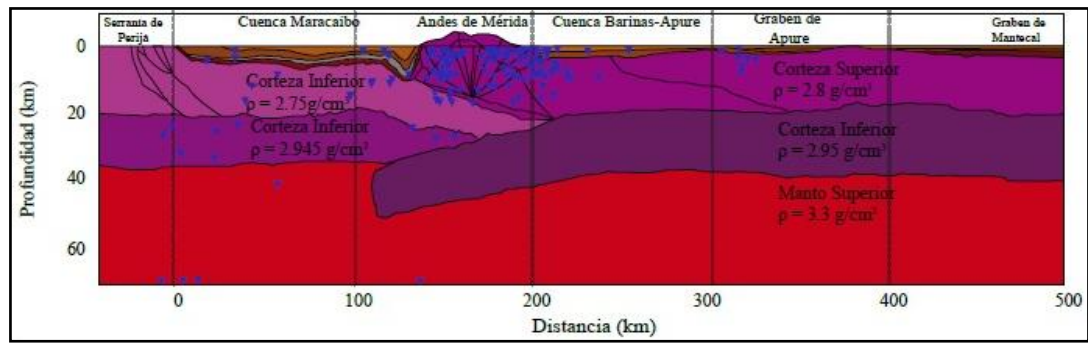


Figura 24. Modelo gravimétrico estructural de uno de los perfiles realizados en el análisis gravimétrico flexural del occidente de Venezuela (Arnaiz *et al*, 2011).

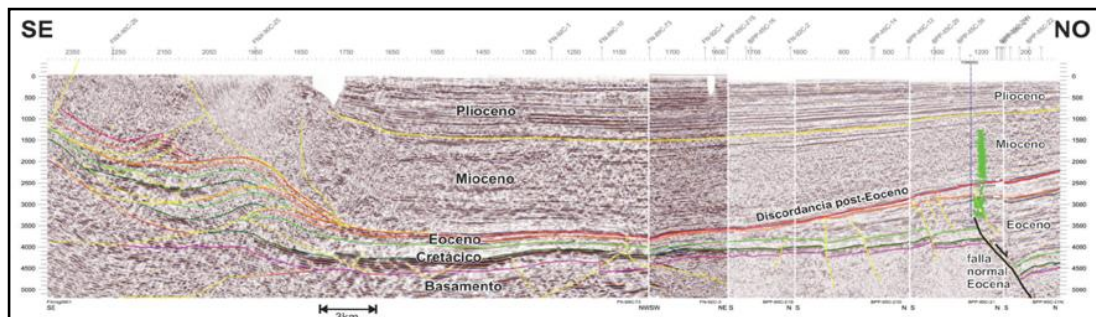


Figura 25. Transecto sísmico obtenido en los estudios de cinemática del flanco noroccidental de los Andes de Mérida (Requena y Turienzo, 2014).

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

V.1 Análisis estadístico

Una vez obtenidos los valores de período de vibración del suelo, se procede a realizar un análisis estadístico a partir de medidas de tendencia central y de dispersión, histogramas de frecuencia y diagrama de caja y bigotes, para determinar el comportamiento de los datos, observar valores atípicos y generar un mapa de períodos por rango del área de estudio. De lo anterior se obtienen los siguientes resultados:

V.1.2 Medidas de dispersión y tendencia central

De acuerdo con la tabla 2, los datos poseen una media de 3.523 s, una mediana de 2.470 y una moda de 0.950 s. Debido a que la media es mayor al valor de mediana, los datos poseen un comportamiento de una distribución asimétrica sesgada a la derecha. Posee además una desviación estándar de 2.840 s y una varianza de 8.077 s. Aunado a lo anterior, presentan un rango de 9.520 s, un mínimo de 0.130 s y un máximo de 9.650 s.

Tabla 2. Medidas de dispersión y tendencia central

N° de estaciones	86	Validas	77
		Perdidas	9
Media	3.523		
Mediana	2.470		
Moda	0.950		
Desviación estándar	2.840		
Varianza	8.077		
Rango	9.520		
Mínimo	0.130		
Máximo	9.650		

V.1.3 Histograma de frecuencia

La figura 26 corresponde al histograma de frecuencias de los períodos determinados; se observa en ella una distribución trimodal, por lo que los datos presentan al menos tres subpoblaciones. Dichas subpoblaciones se dividen entre 0.13 s a 1.87 s; 1.87 a 4.60 s y 4.60 s a 9.65 s. Lo anterior indica que el área de estudio posee por lo menos tres características geológicas distintas, que pueden estar influenciadas por las distintas formaciones o grupos presentes en la misma.

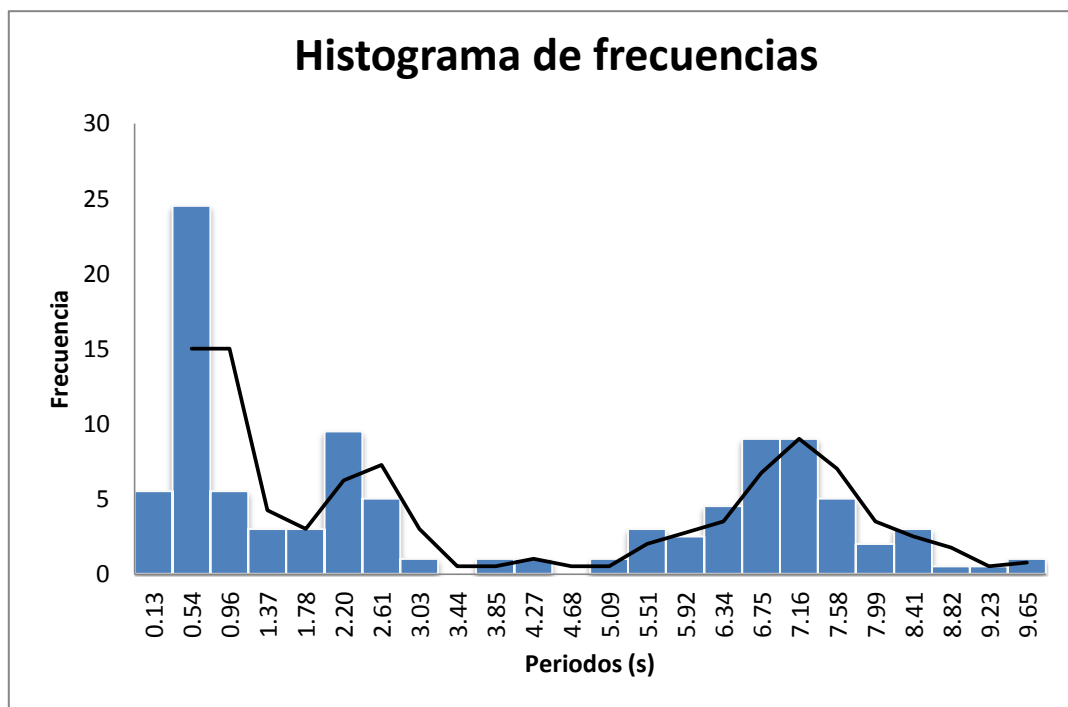


Figura 26. Histograma de frecuencia de los períodos determinados.

V.1.4 Diagrama de caja y bigotes

En el diagrama de caja y bigotes correspondiente a la figura 27, se puede observar una mediana de 2.470 s, un valor máximo de 9.650 s, un valor mínimo de 0.130 s; se observa además que el primer cuartil se encuentra 0.855 s, el tercer cuartil a los 6.80 s y posee un rango intercuartílico 5.945 s. Mucha de esta información se observa también en el histograma presentado anteriormente.

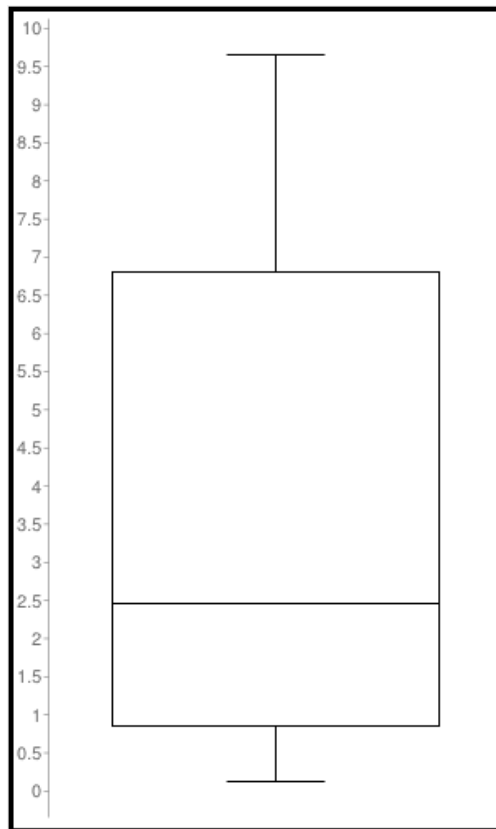


Figura 27. Diagrama de caja y bigotes de los períodos determinados.

V.2 Ruido ambiental: períodos de vibración

Posterior a la determinación de los picos predominantes para la zona de estudio (figura 28), se obtienen los valores de período de vibración.

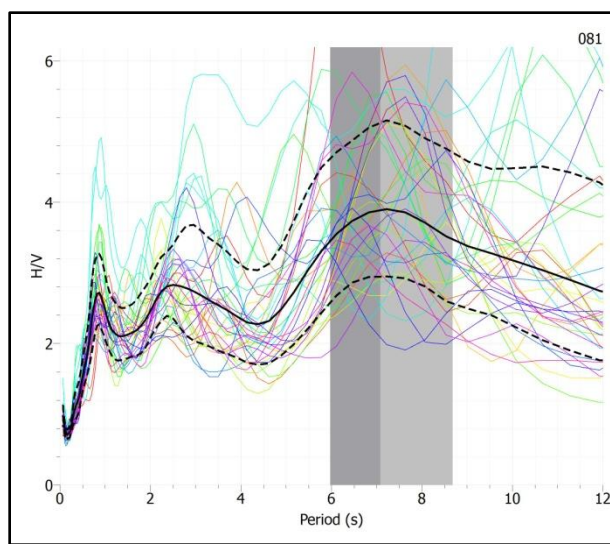


Figura 28. Pico predominante en el espectro H/V (área gris).

Una vez obtenidos dichos valores, se realizan mapas de períodos por rango asociados a las amplitudes o picos obtenidos en cada espectro. Como se observaron tres amplitudes en la mayoría de los espectros, se realizan mapas asociados al primero, al segundo y al tercer pico observado.

Para la primera amplitud o primer pico observado en los espectros, se elabora un mapa (figura 29) donde se observa que el rango de períodos asociados a este primer pico se encuentra en un rango comprendido entre 0.13 s y 1.87 s. En general, los mayores valores se encuentran ubicados hacia la zona noroeste del mapa (períodos entre 0.87 s y 1.87 s), aunque se pueden ver algunas zonas bastantes puntuales que se comportan de la misma manera hacia la parte noreste y sureste del área de estudio, mientras que los menores valores de período asociados al primer pico se observan en mayor proporción hacia la zona sur y noreste de la ventana de estudio (períodos por debajo 0.87 s). En línea general, los períodos asociados a este primer pico observado en los espectros aumentan como se dijo anteriormente, hacia la parte noreste de la zona de estudio y disminuyen hacia el sur y noreste de la misma.

Igualmente, respecto a la segunda amplitud o segundo pico observado en los espectros, se elabora un mapa (figura 30) donde se observa que el rango de períodos

asociado al segundo pico oscila entre 1.87 s y 4.60 s. En general, los valores de período más altos relacionados con el segundo pico (entre 3.35 s y 4.60 s) se encuentran hacia la zona noroeste y noreste de la zona de estudio. Valores de período que pueden ser considerados como intermedios (entre 2.22 s y 3.35 s) hacia la zona noreste y los valores más bajos (períodos por debajo de 2.22 s) hacia la zona sur de la ventana de estudio. Para este segundo mapas, la densidad de puntos que se observa es menor. Esto pudiera ser debido a que el contraste de impedancia entre los estratos que ocasionan un aumento en la amplitud del espectro H/V es bajo (o nulo) en algunos lugares donde se realizó la medición.

Finalmente, respecto a la tercera amplitud o tercer pico observado en el espectro se elabora un mapa (figura 31) donde se observa que el rango de períodos asociado a este pico se encuentra entre 4.60 s y 9.65 s. Se observa que los valores más altos de período (por encima de 6.68 s) se encuentran distribuidos de manera casi uniforme a lo largo de toda la ventana de estudio (hacia noroeste, parte sur y parte noreste). Algunos valores considerado bajos y que se encuentran asociados al tercer pico (valores por debajo de 5.90 s) se encuentran ubicados hacia la zona noroeste y otros hacia el noreste de la ventana de estudio. En líneas generales, los períodos asociados al tercer pico o tercera amplitud en los espectros H/V fueron bastantes altos.

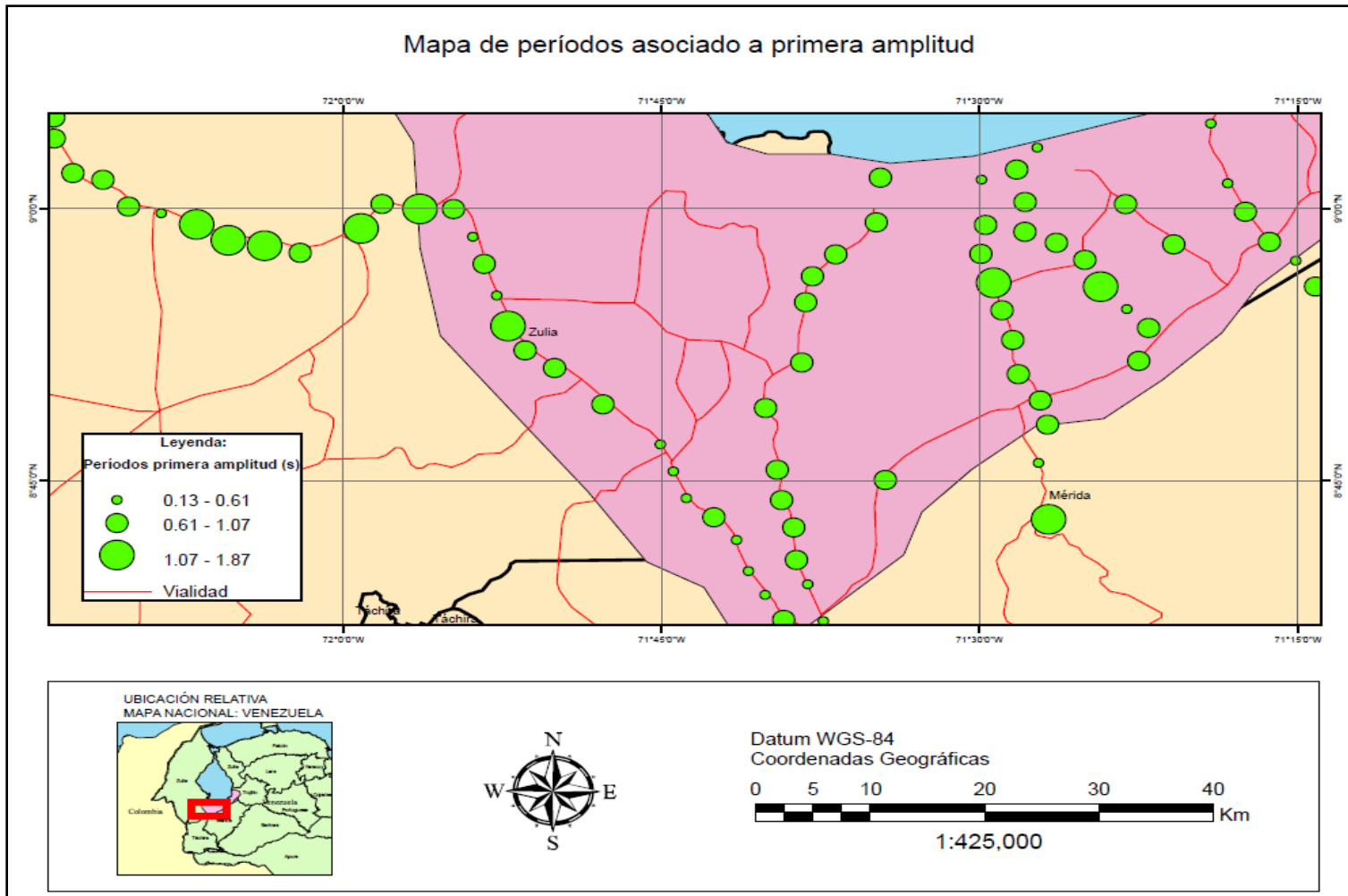


Figura 29. Mapa de períodos asociado a la primera amplitud de los espectros H/V.

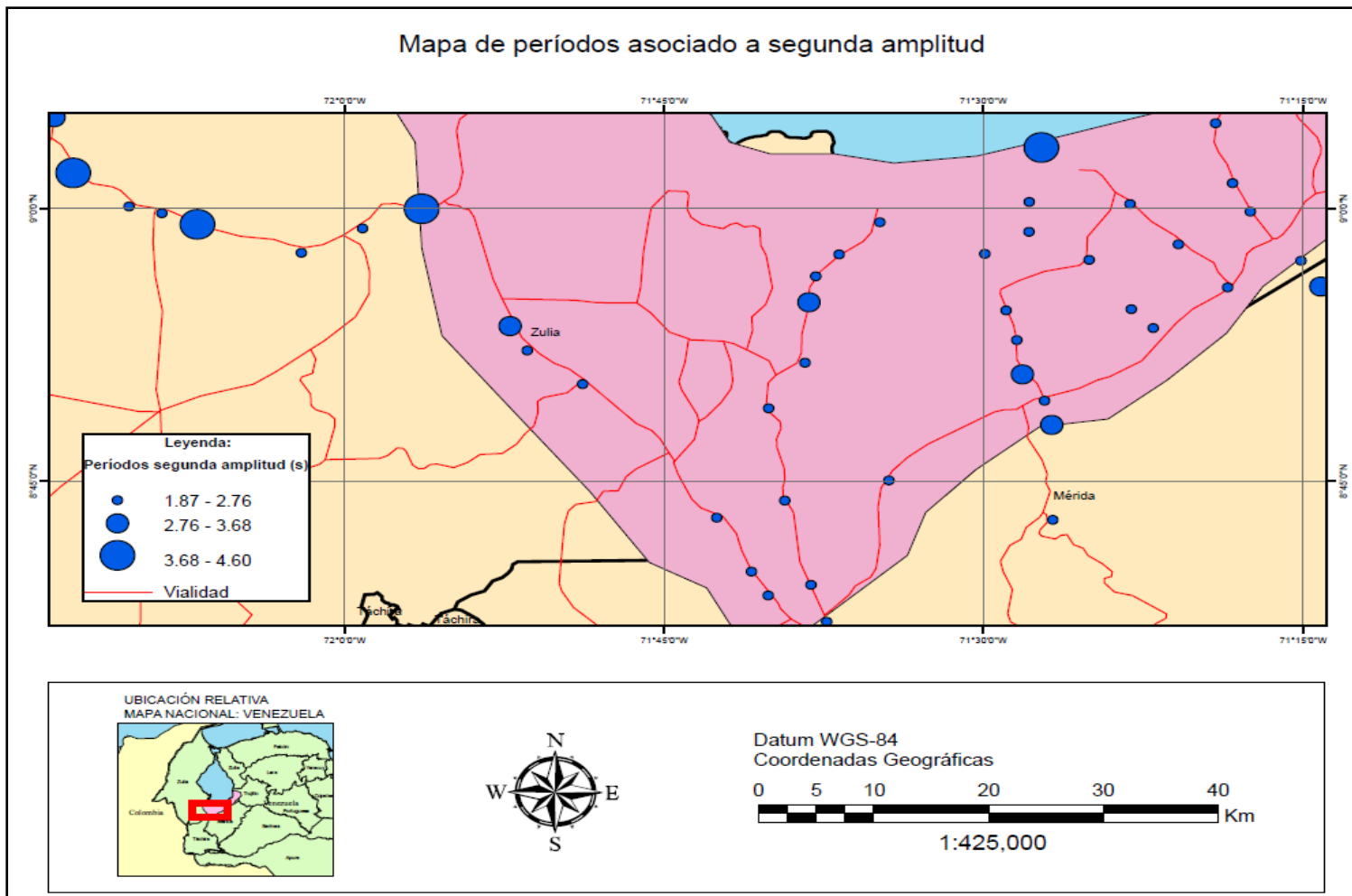


Figura 30. Mapa de períodos asociado a la segunda amplitud de los espectros H/V.

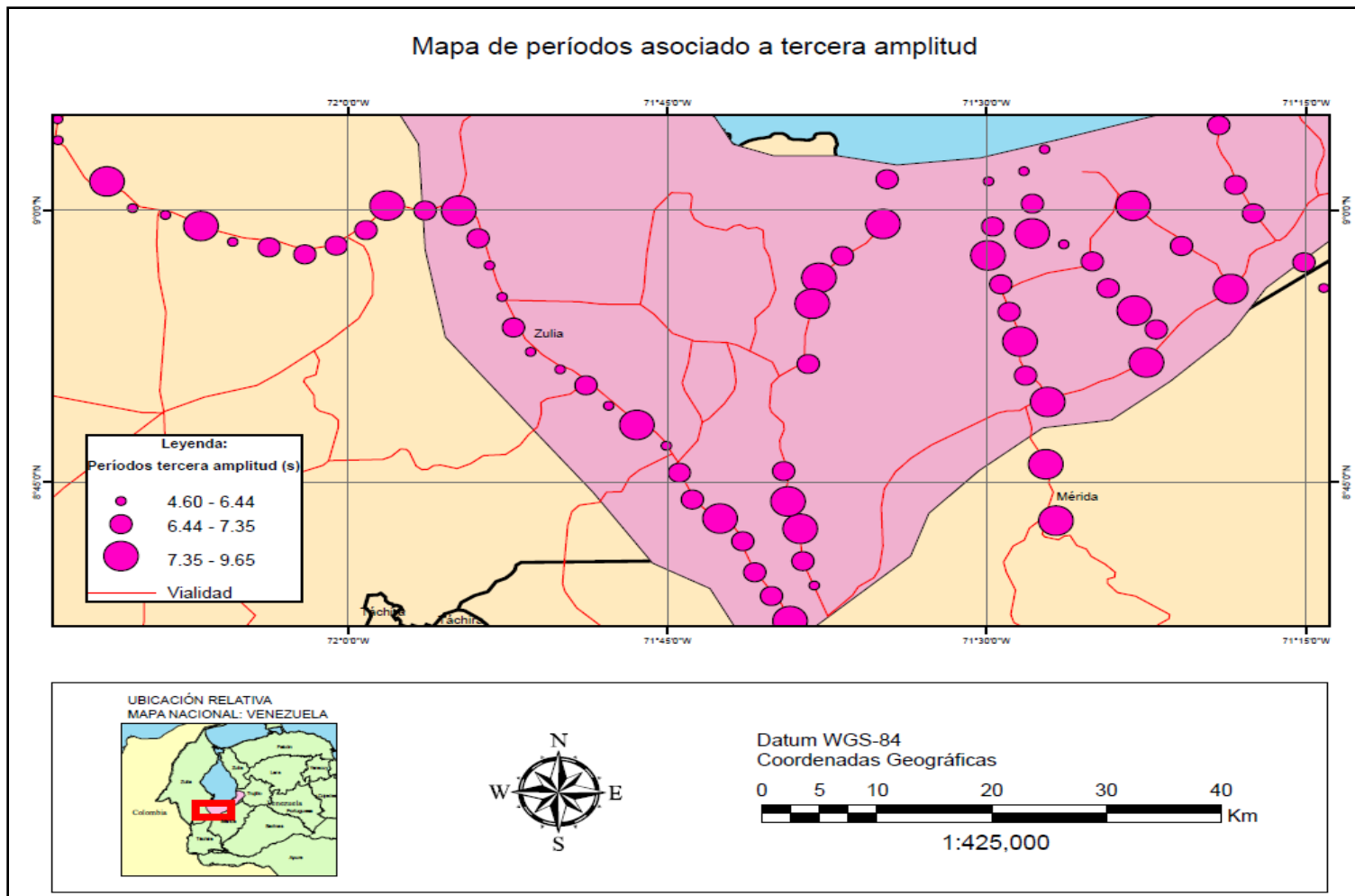


Figura 31. Mapa de períodos asociado a la tercera amplitud de los espectros H/V.

Para el caso de esta investigación, los espectros presentaron dos y tres picos bien definidos. De acuerdo con la guía de SESAME (2004) para la implementación de la relación espectral H/V para la medición, procesamiento e interpretación de ruido ambiental, cada amplitud en el espectro corresponde a una respuesta específica del subsuelo, permitiendo posteriormente obtener información de sitio, como por ejemplo la geometría en profundidad de la zona de estudio.

En general, se notó en los espectros la presencia de dos y hasta tres amplitudes bien definidas (figura 32), lo que indica dos y tres contrastes de impedancia marcados debido a las características geológicas de los materiales presentes *in situ*, pudiendo posiblemente estar en presencia de sedimentos cuaternarios de tipo aluvionales, y otro tipo de materiales presentes en las formaciones que se encuentran en la zona (principalmente formaciones Terciarias).

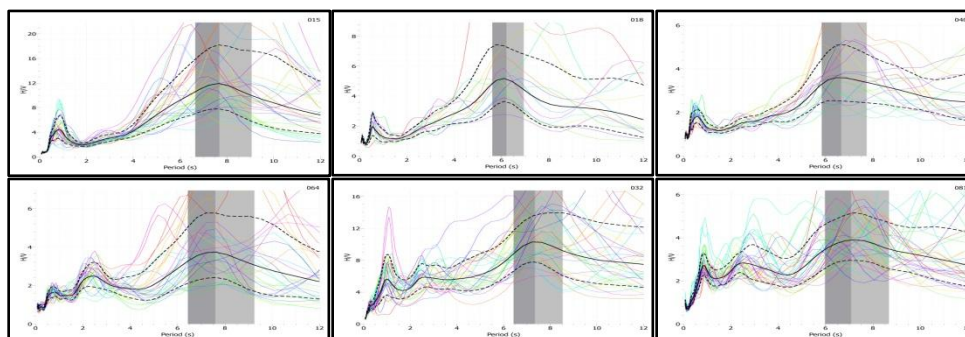


Figura 32. Ejemplo de picos dobles y triples determinados en la zona de estudio.

V.3 Relación período de vibración – Profundidad de sedimentos

En relación con los mapas correspondientes a los períodos y a sus amplitudes en los espectros, se realizan mapas de espesores de sedimentos asociados a cada una de esas amplitudes. Al igual que para los períodos, se realizaron mapas de espesor relacionados con el primero, segundo y tercer pico presente en dichos espectros. Sobre estos mapas se colocaron los valores de período correspondientes a esa amplitud, sólo como referencia.

Con respecto a los espesores asociado a la primera amplitud del espectro H/V (figura 33), se observa que el rango de espesores para este primer pico se encuentra entre 35 m y 510 m

de profundidad. Los mayores valores se encuentran ubicados hacia la zona noroeste de la zona de estudio, aunque también se logra observar un espesor de sedimentos considerables hacia lugares muy puntuales hacia el noreste y sureste del mapa (entre 300 m y 400 m de espesor). Esto guarda relación con lo observado en la figura 29, ya que dichos espesores se encuentran en los lugares donde se registraron los mayores períodos asociados con la primera amplitud en los espectros H/V. Igualmente, se observan espesores intermedios (entre 200 m y 250 m) hacia la zona central del área. De manera similar, los menores valores se encuentran ubicados hacia el área sur y noreste del mapa, donde se observan espesores menores a 200 m de profundidad, lo cual es coherente con los bajos períodos presentes en dicha zona. Por otra parte, se observa que las curvas del mapa que hacen referencia a las profundidades se encuentran bastante distanciadas, lo que puede dar una idea de la suave pendiente de la superficie asociada a esta primera amplitud. Nótese también, los nueve máximos en profundidad asociados con los máximos valores de período para este primer pico, lo que da una idea de la asimetría de ese primer espesor y a los lugares donde existe mayor depositación de sedimentos. En líneas generales, el espesor de sedimentos asociados a la primera amplitud de los espectros H/V aumenta hacia el noroeste y disminuye hacia el sur y noreste del área de estudio y por la profundidad máxima estimada, se pudiera estar en presencia de sedimentos cuaternario de tipo aluvionales, por lo que posiblemente se pudiera estar observando para esta primera amplitud el contacto Pleistoceno – Mioceno. Hacia el pie de monte y en base a la geología que pudiera estar asociada a esta profundidad, esta primera amplitud observada en algunos espectros H/V posiblemente pudiera deberse a la presencia del contacto de la base de sedimentos cuaternarios y el tope de la formación Isnotú.

Respecto a los espesores asociados a la segunda amplitud del espectro H/V (figura 34), se observa que el rango de espesores para este segundo pico se encuentra entre 510 m y 2489 m. Los mayores valores se encuentran ubicados hacia la zona noroeste y noreste del área de estudio, donde se registraron los mayores valores de período asociados a la segunda amplitud en los espectros H/V (por encima de los 1500 m de profundidad). Al igual que en el caso anterior, los mayores espesores se encuentran ubicados hacia la zona donde se registraron los mayores valores de período asociados a la segunda amplitud del espectro H/V. Se observa además, que los valores de espesor considerados como intermedios (por el

orden de los 1000 m) se encuentran ubicados hacia la zona central del área de estudio. Igualmente, los menores valores de profundidad asociados al segundo pico de los espectros H/V se encuentran hacia la zona sur de la ventana de estudio, lo que es congruente con los valores de período registrados en esa zona. Por otra parte, se observa que las curvas del mapa asociadas a las profundidades, se encuentran muy unidas hacia el área noroeste, así como también hacia el área noreste y sur de la ventana de estudio, dando una idea de un mayor aumento en la pendiente de la superficie relacionada con el espesor que se encuentra asociado con la segunda amplitud del espectro H/V hacia esas zonas. Por la profundidad máxima estimada que hace referencia a la segunda amplitud, se pudiera estar en presencia de formaciones Terciarias (por lo observado en la figura 7, algún contacto entre alguna formación del Mioceno y otra del Eoceno). Posiblemente en algunas zonas de la ventana de estudio dichas formaciones pudieran ser por ejemplo, el contacto entre la base de la formación Isnotú y el tope de la formación Mirador (hacia la zona sur del mapa).

Finalmente, en referencia a las profundidades asociadas a la tercera amplitud del espectro H/V (figura 35), se observa que el rango de espesores para este tercer pico se encuentra en el rango entre los 2489 m y 5507 m de profundidad. Los mayores valores se encuentran hacia la zona noroeste y hacia el sureste del mapa, justo en el extremo norte de la Cordillera de los Andes. Al igual que en los casos anteriores, los mayores espesores se encuentran asociados a los mayores períodos obtenidos para la tercera amplitud de los espectros H/V. Los menores espesores asociados a este tercer pico se encuentran hacia la zona media y hacia la zona oeste de la ventana de estudio. Cabe destacar que los mayores valores de sedimentos asociados a la tercera amplitud de los espectros H/V y su distribución respecto a los Andes venezolanos guardan relación con el modelo obtenido por Arnaiz *et al.* (2011) presentado en la figura 24. En él se logra observar una depresión de gran magnitud cercana al orógeno, permitiendo una mayor depositación de sedimentos provenientes de los Andes de Mérida en el pie de monte del mismo. Por la profundidad máxima obtenida al igual que en el caso anterior probablemente se pudiera estar en presencia de formaciones Terciarias, pero relacionadas con el contacto Eoceno – Paleoceno (posiblemente pudiera ser el contacto entre la formación Mirador y la formación Los Cuervos). En zonas muy puntuales (como por ejemplo la zona sureste del mapa), pudiera existir alguna respuesta debido al contacto Paleoceno – Cretácico, esto debido a la profundidad alcanzada y cotejando la

misma con el transecto sísmico elaborado por Requena y Turienzo (2011). En dicho transecto, se logra observar que el contacto con formaciones cretácicas se encuentra aproximadamente a unos 5000 metros de profundidad, lo que concuerda con algunos valores de profundidad estimados para la tercera amplitud de los espectros H/V. Dichos puntos pudieran evidenciar el contacto entre la base de la formación Los Cuervos y el tope de la formación Mito Juan u otra formación Cretácica como por ejemplo la formación Colón, formaciones terciaria y cretácicas respectivamente. También pudiera existir la posibilidad de que el contacto sea entre la formación Los Cuervos y la formación Colón.

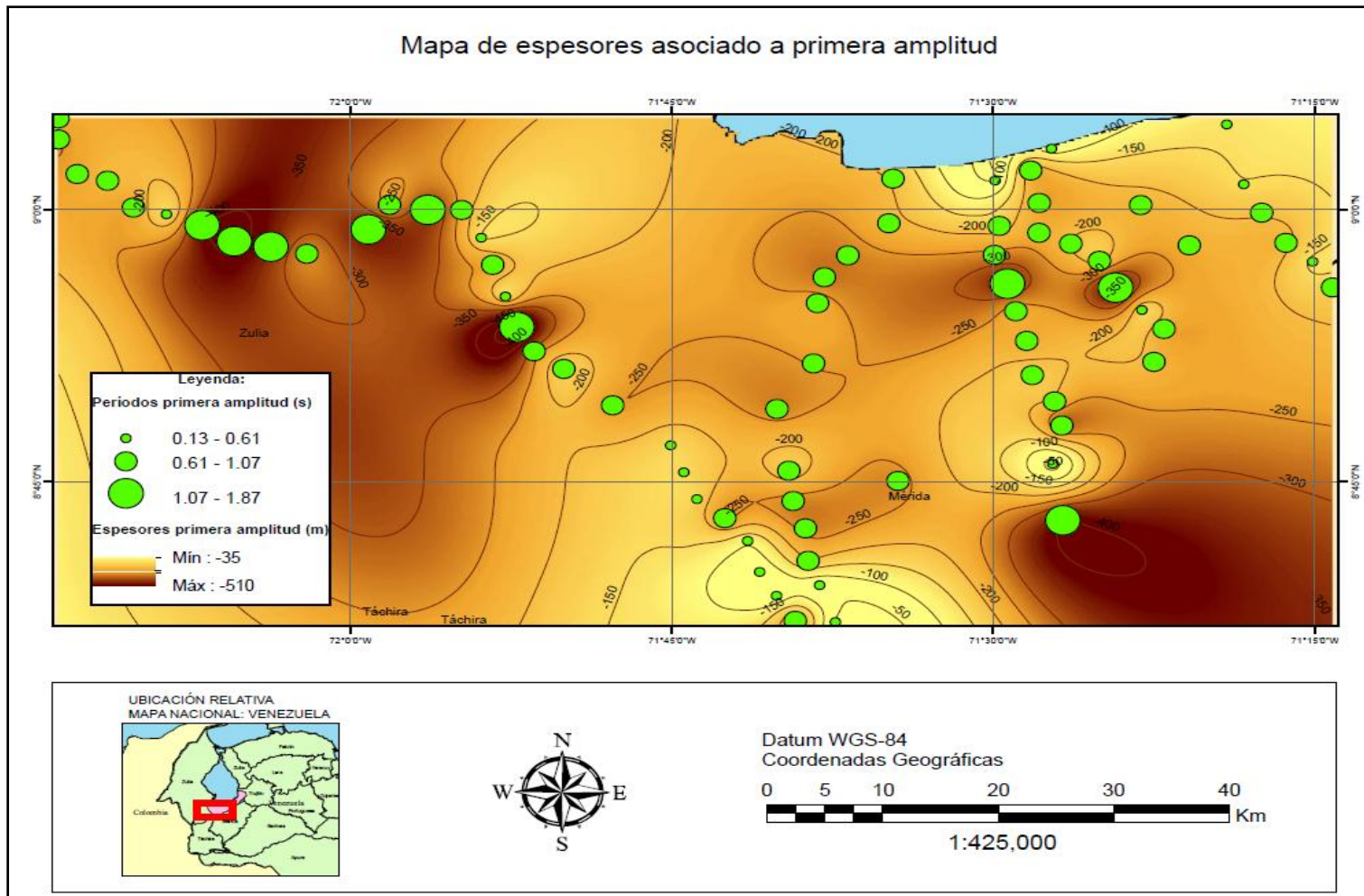


Figura 33. Mapa de espesor asociado a la primera amplitud de los espectros H/V junto a períodos correspondientes.

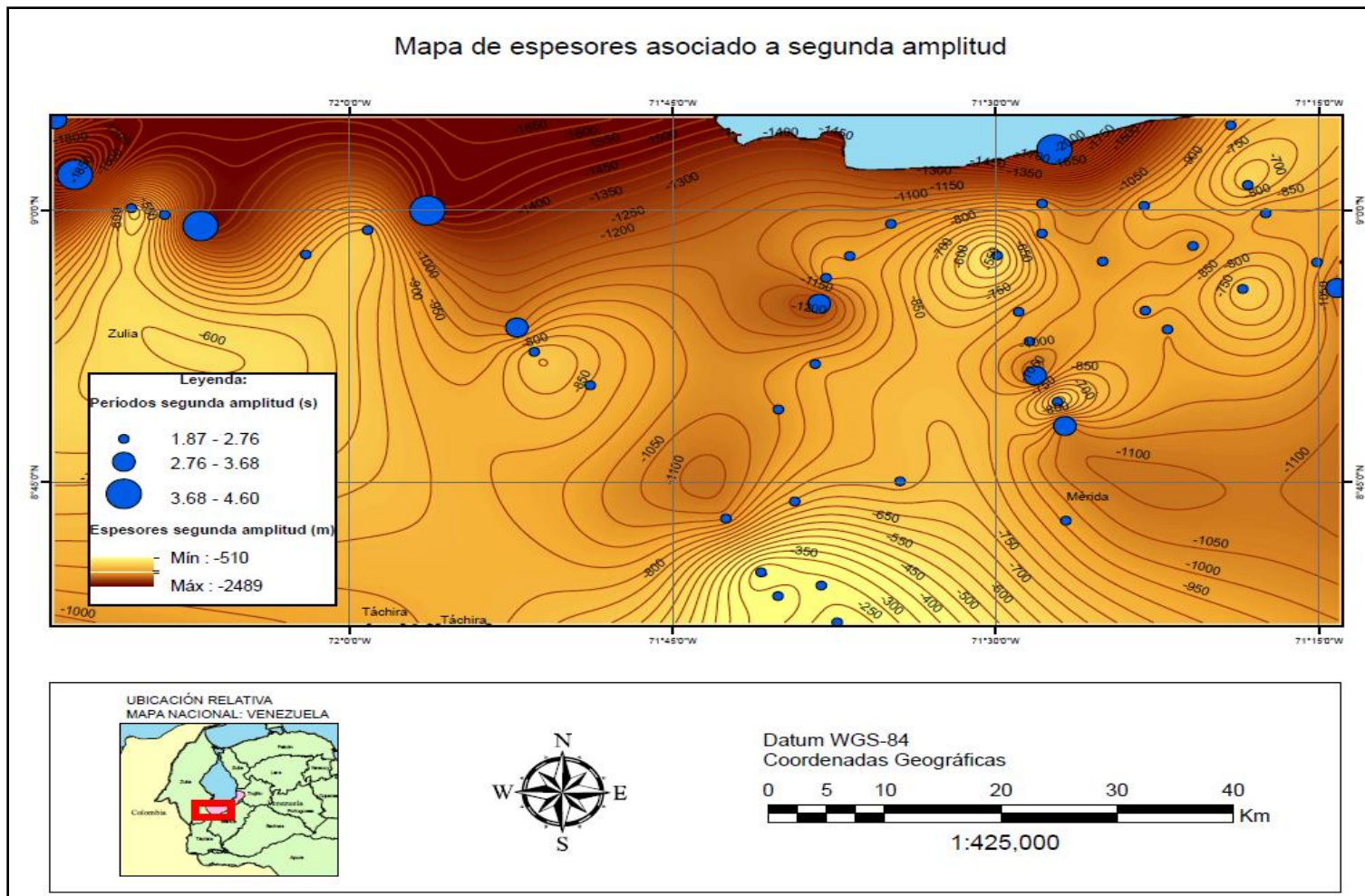


Figura 34. Mapa de espesor asociado a la segunda amplitud de los espectros H/V junto a períodos correspondientes.

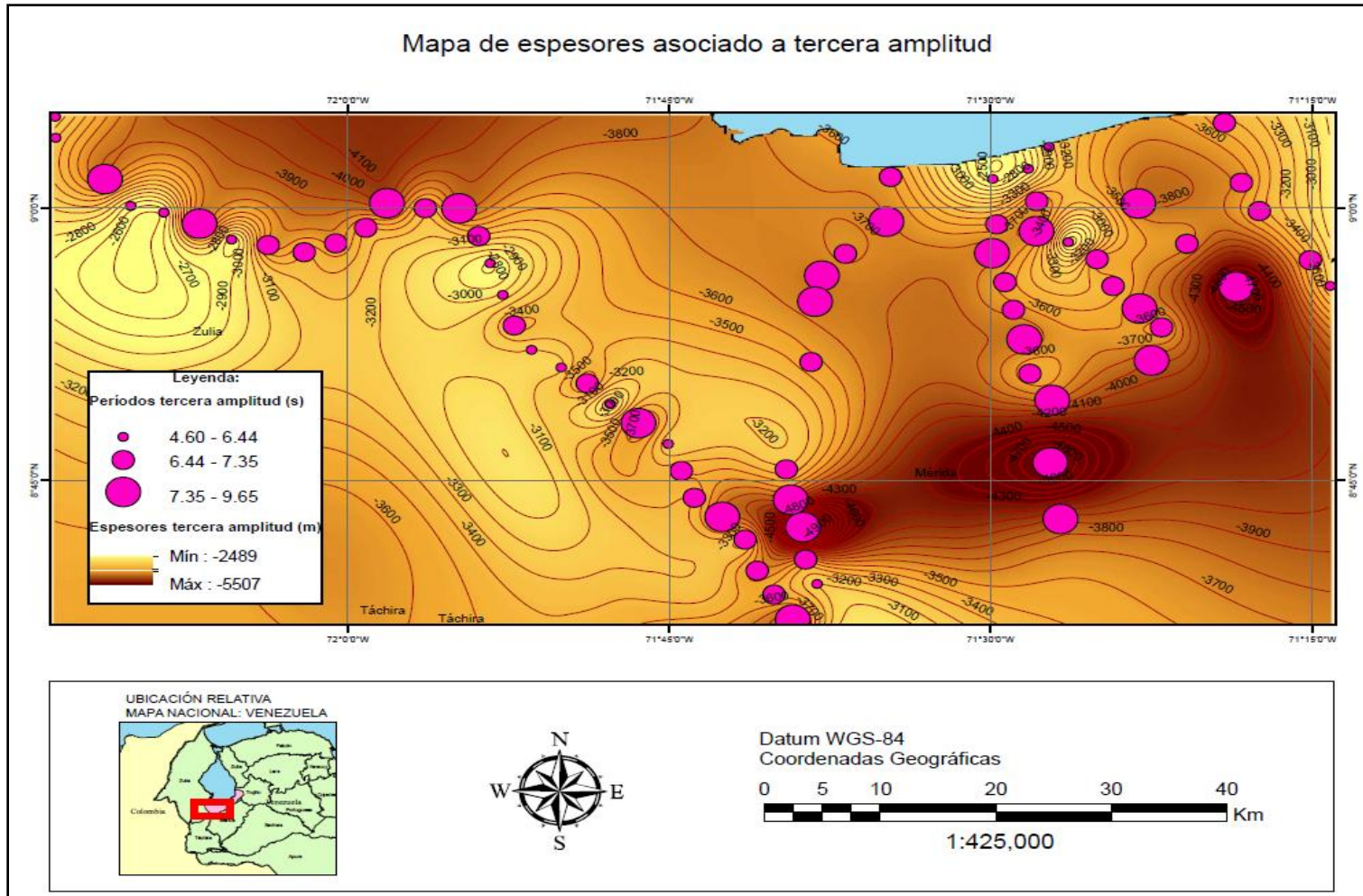


Figura 35. Mapa de espesor asociado a la tercera amplitud de los espectros H/V junto a períodos correspondientes.

CONCLUSIONES

Tomando en cuenta los objetivos contemplados en esta investigación, y en función de las etapas de adquisición, procesamiento e interpretación de datos de ruido sísmico ambiental aplicando el método de Nakamura para determinar el período del suelo en el área de estudio, se concluye:

Los períodos del suelo obtenidos en el área de estudio se encuentran en un rango entre 0.13 s y 9.65 s, con tres subpoblaciones marcadas dentro de este rango; a saber, un rango de períodos comprendidos entre 0.13 s y 1.87 s, otro comprendido entre 1.87 s y 4.60 s y el último 4.60 s y 9.65 s. Debido a lo anteriormente expuesto, el rango de espesores estimado se encuentra en un rango entre los 35 m y los 5507 m.

Respecto al rango de períodos comprendidos entre 0.13 s y 1.87 s, se pudo observar que los valores de espesor relacionados con los mismos se encuentran entre 35 m y 510 m. En algunos casos, como por ejemplo hacia la zona suroeste del área de estudio, el primer espesor sedimentario fue disminuyendo desde el norte hacia el sur, siendo más notable este comportamiento hacia el pie de monte andino, donde se obtuvieron espesores alrededor de los 60 m; este cambio pudiera deberse o a la presencia del orógeno hacia el sur y el encañamiento de los sedimentos en dirección hacia el mismo, del ambiente de sedimentación y de la fuente de los mismos. Este primer rango de períodos se debe a un fuerte contraste entre dos medios presentes en la zona que poseen diferentes características geológicas. De acuerdo a la geología presente en el área de estudio y la profundidad máxima encontrada, este contraste posiblemente pueda deberse al contacto Pleistoceno – Mioceno (sedimentos Cuaternarios y formaciones terciarias como por ejemplo la formación Isnotú).

Por otra parte, respecto al rango de períodos comprendidos entre 1.87 s y 4.60 s, se pudo observar que los valores de espesor relacionados con los mismos se encuentran entre 510 m y 2489 m. En promedio, este segundo espesor de sedimentos se encuentra en el orden de los 900 a 1200 m de profundidad, manteniéndose relativamente constante a lo largo de toda el área de estudio. Al igual que para el

primer rango de períodos, este segundo rango se debe a un fuerte contraste entre dos medios con diferentes características geológicas. De manera similar respecto al primer rango de períodos, este contraste observado posiblemente pueda deberse al contacto entre formaciones correspondientes a las épocas Mioceno y Eoceno. En algunas zonas del área de estudio, como por ejemplo el área que se encuentra hacia el pie de monte andino, posiblemente este contraste pueda deberse al contacto entre la formación Isnotú y una formación subyacente, como lo es por ejemplo la formación Mirador.

De igual manera, respecto al rango de períodos comprendidos entre 4.60 s y 9.65 s, se pudo observar que los valores de espesor relacionados con los mismos se encuentran entre 2489 m y 5507 m. En promedio, este espesor de sedimentos se encuentra por el orden de los 3500 m de profundidad, manteniéndose relativamente constante a lo largo de toda la zona de estudio a excepción de la zona norte que bordea los Andes venezolanos, donde el espesor de sedimentos es considerable (entre 4500 y 5000 m de profundidad). Al igual que para los rangos de período anteriores, debido al contraste observado esto puede deberse posiblemente al contacto entre formaciones de los períodos Eoceno y Paleoceno, probablemente el contacto entre la formación Mirador y la formación Los Cuervos. Referente a zonas muy puntuales donde se estimaron profundidades de hasta 5000 m, posiblemente se pudiera estar en presencia del contacto entre formaciones de las épocas Paleoceno y Cretácico, probablemente el contacto entre la formación Los Cuervos y la formación Mito Juan. Pudiera también existir la posibilidad de que el contacto sea entre la formación Los Cuervos y la formación Colón.

De manera general, la cuenca además de lo anterior posee un espesor de sedimentos que aumenta de sur a norte, con una zona de depositación considerable hacia el área norte que bordea el pie de monte andino, lo cual mantiene relación con la distribución de períodos registrados para esta investigación.

De acuerdo a los resultados obtenidos y cotejando los mismos con estudios de gravimetría y sísmica realizados en áreas cercanas a la zona de estudio, el método permitió estimar profundidades las cuales tienen relación con las reportadas en los estudios anteriormente mencionados, por lo que el método fue adecuado para la estimación de profundidades en una cuenca con espesores de sedimentos considerables.

RECOMENDACIONES

Para la estimación del espesor de sedimentos, se recomienda tener mayor información acerca de las velocidades de ondas de corte, ya sea a través de información de pozos, sísmica, entre otras, ya que estos poseen una gran influencia sobre los valores obtenidos. Para la generación de mapas de espesor de sedimentos a partir de mediciones puntuales de ruido sísmico ambiental se debe disponer siempre de información geofísica base (valores de V_s).

Por otra parte, para realizar estudios de ruido sísmico ambiental en zonas de gran extensión, se recomienda densificar el número de estaciones de medición, para generar mapas que contengan mayor información.

Se recomienda además, realizar una revisión minuciosa de los equipos con los que se realizan las adquisiciones de campo, para disminuir la pérdida de estaciones adquiridas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarado, J. y Obagi, J. (2008). Fundamentos de inferencia estadística. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Arnaiz, M., Rodríguez, I. y Audemard, F. (2011). Análisis gravimétrico y flexural del occidente de Venezuela. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*: Vol. 28, No. 3, p. 420 - 438. México.

Berenson, M. y Levine, D. (1996). Estadística básica en administración, conceptos y aplicaciones. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación.

Camacho, M. (2013). Generación de un mapa de basamento de la Cuenca de Maracaibo, a partir de datos gravimétricos y magnéticos satelitales. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

De Toni, B., Loureiro, D., Márquez, C. y Colletta, B. (1994). Eventos y estilos tectónicos en la Cuenca de Barinas- Apure. *Memorias del V Simposio Bolivariano*, Caracas.

Flores- Estrella, H., Lomnitz- Aronsfrau, C. y Yussim- Guarneros, S. (2004). Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC. *Geos*: Vol. 24, No. 3, p. 438 - 445. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Franklin, J., Caselles, J. Canas, J., Pujades, G., Navarro, M., García, F. y Pérez, V. (2006). Estimación de la respuesta de sitio mediante el método del cociente espectral aplicado a ruido ambiental: aplicación a la Ciutat Vella de Valencia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*: Vol.22 (pp.169-191). Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.

García, E. (2008). Caracterización de los yacimientos C-4 LAG3047 y C-5 LAG3047 mediante análisis de sismofacies utilizando redes neuronales. Informe de pasantías, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

García Flórez, M. (2006) Propuesta de clasificación geotécnica del “Efecto sitio” (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia. Geogaceta: Vol.40 (pp.39-42). Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

García, G. (2005). Investigación Comercial. Madrid: Esic Editorial.

González de Juana, C., Iturralde, J. y Picard, X. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Caracas: Ediciones Foninves.

Guerrero, R. (2007). Estudio de la dispersión de las ondas superficiales con fines geotécnicos. Trabajo especial de grado, Universidad de los Andes, Mérida.

Hecht, J. (2005). Caracterización geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental y gravimétricos del municipio Zamora (Guatire), estado Miranda. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Jaramillo, A. (2013). Método H/V para reconfiguración del mapa de periodos predominantes del suelo del DF para diseño por sismo. Geotecnia, (227): 19 – 22, marzo/mayo 2013.

Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

León, R. (2008). Definición sismo-estratigráfica de cuerpos de arena mediante inversión acústica, en un área del sur del lago de Maracaibo. Informe de pasantías, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

Lessmann, M. (2004). Evaluación de AVO en calizas fracturadas en un área al occidente de Venezuela mediante el modelado AVO y el análisis de datos sintéticos VSP Walkaway. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Lowrie, W. (2007). Fundamentals of Geophysics. United Kingdom: Cambridge University Press.

Mazuera, F., González, L., Rocabado, V. y Klarica, S. (2009). Determinación de períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Mérida, Venezuela, a partir de mediciones de ruido sísmico ambiental. *Ciencia e Ingeniería*, (1): 57 – 68, diciembre/marzo 2009.

Mendoza, V. (2005). *Geología de Venezuela. Tomo I: Escudo de Guayana, Andes venezolanos y sistema montañoso del Caribe*. Trabajo no publicado. Universidad de Oriente, Ciudad Bolívar.

Moncayo, C. M y Edmundo, H. (2003). Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. Tesis Doctoral. E.T.S. Ingenieros de camino C. y P. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. p. 24.

Moreno, A. (2000). De los Microsismos a los Microtemblores – Investigaciones en el Instituto Geofísico. VIII Congreso Colombiano de Geotecnia 2000 – Sociedad Colombiana de Geotecnia.

Moros, L. (2004). Relación entre el período fundamental de vibración del suelo y el espesor de sedimentos en el este de la ciudad de Caracas, mediante la aplicación del método de Nakamura a datos obtenidos en una malla de mediciones de 250 metros. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

PDVSA Intevep (2011). [Página Web en Línea]. Disponible: <http://www.pdv.com/lexico/> [Consulta: 2013, agosto 18].

Reinoza, C., Morales, C., Rocabado, V. García K., Sánchez, C., Sánchez, J., Abreu R. y Schmitz, M. Espesores de sedimentos a partir de la integración de datos geofísicos en Barquisimeto y Cabudare, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería*. (26): 67 – 76, julio 2011.

Requena, J. y Turienzo, M. (2014). *Cinemática del Flanco Noroccidental de los Andes de Mérida, Venezuela: Interacción entre estructuras de piel fina y piel gruesa*. PDVSA. Trabajo no publicado.

Rocabado, V., Schmitz, M., Vilotte, J., Rendón, H. y Ampuero, J. (2004). Efectos de los sedimentos y topografía en la respuesta sísmica y períodos fundamentales en la ciudad de Caracas. Trabajo no publicado.

Rocabado, V., Schmitz, M., Hernández, J. y Morales, C. (2009). Relación entre período del suelo y profundidad de los sedimentos para la ciudad de Caracas, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.* (26): 141 – 151, julio 2011.

Ross, S. (2005). *Introducción a la estadística*. Barcelona: Editorial Reverté.

Sesame. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations. Measurements, Processing and interpretation*. Francia: European research project.

Sarabia, J. y Pascual, M. (2005). *Curso Básico de Estadística para Economía y Administración de Empresas*. Santander: Universidad de Cantabria.

Sánchez, F. (2007). El Lago de Maracaibo y su repercusión medioambiental. [Página Web en Línea]. Disponible: <http://web.ua.es/es/giecryal/documentos/alumnos/lago-de-maracaibo.pdf> [Consulta: 2014, junio 15].

Schlumberger (2013). [Página Web en Línea]. Disponible: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/> [Consulta: 2013, agosto 20].

Steve, Y. (2000). *Modelado geoquímico en el sur del lago de Maracaibo*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Telford, W., Geldart, L. y Sheriff, R. (2004). *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Vargas, A. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial*. La Mancha: Universidad de Castilla.

Vásquez, T. (2008). Aplicación de métodos sísmicos: Vibraciones naturales y refracción de microtremores para caracterización de sitio en estudios de ingeniería civil. Informe final de cursos en cooperación, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

APÉNDICE A

ESTADÍSTICA

Se definen a continuación los conceptos básicos de la estadística aplicados a los datos que se obtuvieron en esta investigación:

Estadística: Conjunto de técnicas y métodos científicos que permiten al investigador interpretar la información numérica, elegir muestras representativas para realizar inferencias, contrastar hipótesis, estimar y predecir mediante relaciones causa – efecto y tomar decisiones (Sarabia y Pascual, 2005).

Población: Conjunto de elementos que van a ser observados en la realización de un experimento (Vargas, 1995).

Muestra: Es un subgrupo de los elementos de una población (Ross, 2005).

Medidas de tendencia central: Según García (2005) las medidas de tendencia central son aquellas que permiten condensar, en un único valor, los resultados obtenidos para la totalidad de la muestra y en relación con cada una de las variables consideradas. Ese valor pretende reproducir el comportamiento mayoritario de la muestra. Son tres las medidas de tendencia central:

- **Moda:** Valor que se repite con mayor frecuencia.
- **Mediana:** Si se dispone de forma ordenada un conjunto de observaciones, la mediana es el valor situado en el medio.
- **Media:** Es la suma de valores de la variable dividida por el número de valores observados.

Medidas de dispersión: Son aquellas que permiten evaluar el grado de homogeneidad o heterogeneidad en las contestaciones de la muestra (García, 2005).

Dichas medidas son:

- **Rango o recorrido:** Diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo.
- **Recorrido intercuartílico:** Diferencia entre el tercer cuartil y el primer cuartil.

- **Varianza:** Suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores obtenidos y su media, dividiendo el resultado por el número de casos.
- **Desviación típica:** raíz cuadrada de la varianza.

Histograma de frecuencias: Un histograma de frecuencias representa el comportamiento de las frecuencias de los diferentes valores de una variable escalar de tipo continuo (Alvarado y Obagi, 2008). Son diagramas de barras verticales en los que se construyen barras rectangulares en los límites de cada clase. La variable aleatoria o fenómeno de interés se despliega a lo largo del eje horizontal; el eje vertical representa el número, proporción o porcentaje de observaciones por intervalo de clase, dependiendo de si el histograma particular es, respectivamente, un histograma de frecuencia, un histograma de frecuencia relativa o un histograma de porcentaje (Berenson y Levine, 1996).

Diagrama de caja y bigotes: Mediante el uso de un diagrama de caja y bigotes se busca identificar en una misma figura, valores centrales, estadígrafos de posición, valores posiblemente atípicos y valores extremos de una variable (Alvarado y Obagi, 2008).

APÉNDICE B

Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas (geográficas, datum WGS84), frecuencia (Hz) y período (s) obtenido (2013).

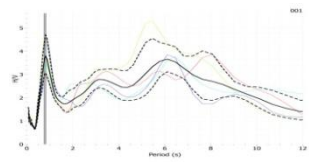
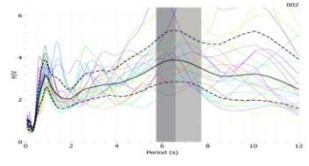
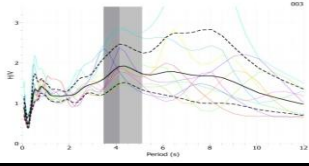
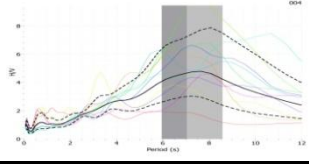
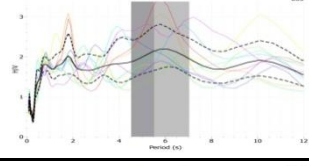
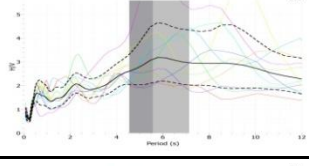
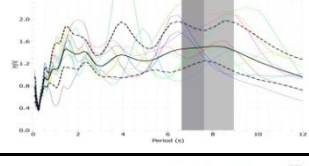
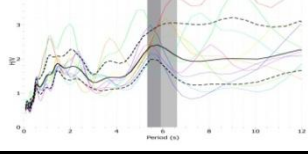
Estación	Latitud	Longitud	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Picos
001	9° 4'59.30"N	72°13'39.80"O	0.829	1.206	
			3.350	0.299	
			6.225	0.161	
002	9° 3'50.12"N	72°13'38.20"O	0.911	1.098	
			6.250	0.160	
			9.825	0.102	
003	9° 1'55.92"N	72°12'45.29"O	0.850	1.176	
			4.300	0.233	
004	9° 1'11.90"N	72°11'15.90"O	0.750	1.333	
			7.500	0.133	
005	9° 0'5.33"N	72°10'7.83"O	0.862	1.160	
			1.820	0.549	
			5.800	0.172	
006	8°59'42.90"N	72° 8'35.50"O	0.570	1.754	
			2.220	0.450	
			5.550	0.180	
007	8°59'6.12"N	72° 7'9.61"O	1.450	0.690	
			3.880	0.258	
			7.600	0.132	
008	8°58'14.02"N	72° 5'25.74"O	1.500	0.667	
			5.720	0.175	

Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas (geográficas, datum WGS84), frecuencia (Hz) y período (s) obtenido (2013).

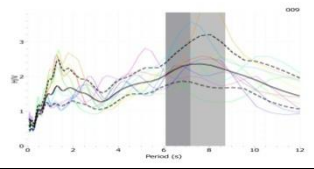
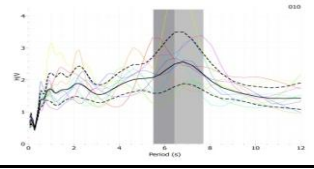
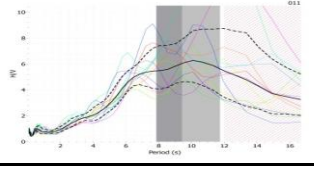
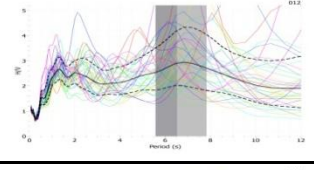
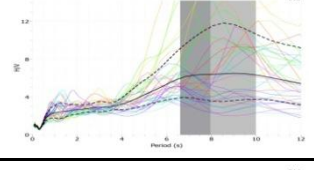
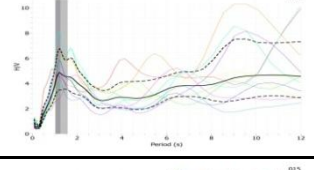
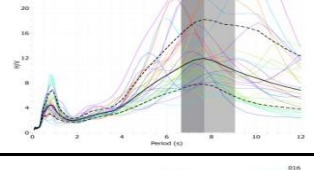
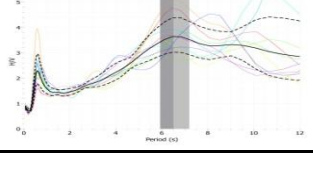
Estación	Latitud	Longitud	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Picos
009	8°57'55.50"N	72° 3'43.20"O	1.300	0.769	
			7.230	0.138	
010	8°57'32.18"N	72° 2'7.28"O	0.950	1.053	
			2.170	0.461	
			6.800	0.147	
011	8°58'1.70"N	72° 0'33.80"O	6.940	0.144	
			10.060	0.099	
012	8°58'52.82"N	71°59'10.11"O	1.322	0.756	
			2.000	0.500	
			6.770	0.148	
013	9° 0'14.10"N	71°58'10.70"O	0.880	1.136	
			7.960	0.126	
014	8°59'57.58"N	71°56'22.97"O	1.236	0.809	
			3.990	0.251	
			6.680	0.150	
015	8°59'56.90"N	71°54'48.30"O	0.830	1.205	
			7.630	0.131	
016	8°58'25.50"N	71°53'53.70"O	0.550	1.818	
			6.550	0.153	

Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas (geográficas, datum WGS84), frecuencia (Hz) y período (s) obtenido (2013).

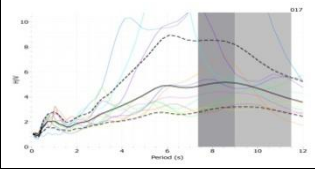
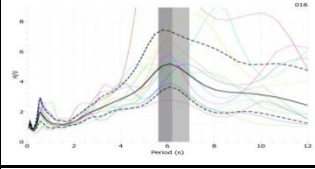
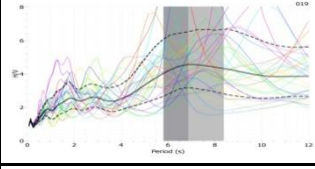
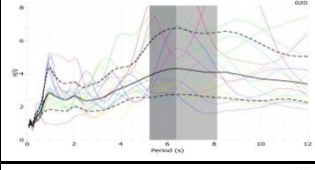
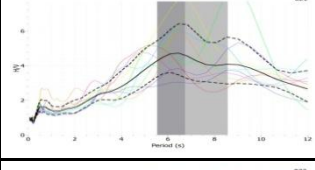
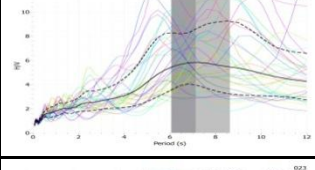
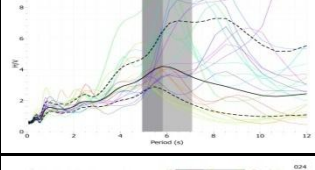
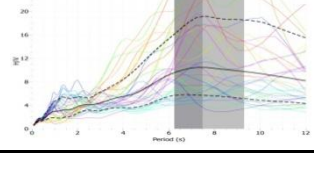
Estación	Latitud	Longitud	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Picos
017	8°56'55.70"N	71°53'21.70"O	0.880	1.136	
			5.880	0.170	
			8.520	0.117	
018	8°55'11.30"N	71°52'45.70"O	0.520	1.923	
			6.075	0.165	
019	8°53'30.70"N	71°52'3.04"O	1.875	0.533	
			2.800	0.357	
			6.850	0.146	
020	8°52'10.50"N	71°51'25.50"O	0.950	1.053	
			2.050	0.488	
			6.400	0.156	
021	8°51'11.90"N	71°50'2.50"O	0.625	1.600	
			6.350	0.157	
022	8°50'19.90"N	71°48'49.20"O	2.280	0.439	
			7.170	0.139	
023	8°49'12.00"N	71°47'45.50"O	0.900	1.111	
			5.900	0.169	
024	8°48'8.60"N	71°46'25.90"O	7.500	0.133	

Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas (geográficas, datum WGS84), frecuencia (Hz) y período (s) obtenido (2013).

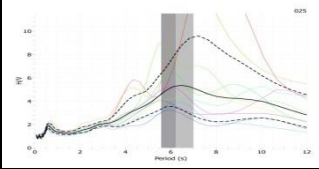
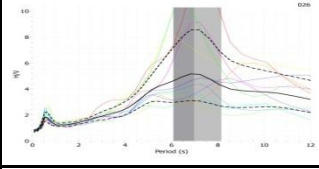
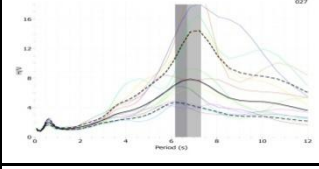
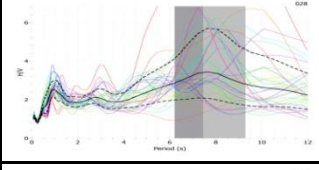
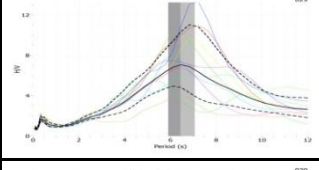
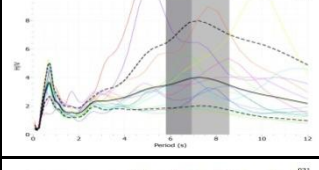
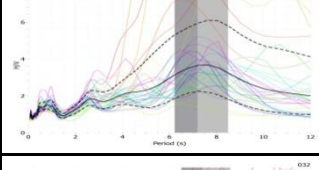
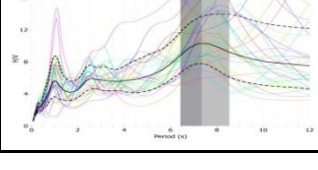
Estación	Latitud	Longitud	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Picos
025	8°46'59.90"N	71°45'2.90"O	0.600	1.667	
			6.440	0.155	
026	8°45'31.00"N	71°44'25.90"O	0.580	1.724	
			7.000	0.143	
027	8°44'2.40"N	71°43'49.50"O	0.61	1.639	
			6.82	0.147	
028	8°42'59.30"N	71°42'31.30"O	0.927	1.079	
			2.704	0.370	
			7.620	0.131	
029	8°41'44.10"N	71°41'27.40"O	0.400	2.500	
			6.520	0.153	
030	9° 1'40.50"N	71°34'40.30"O	0.710	1.408	
			7.200	0.139	
031	8°59'13.30"N	71°34'52.00"O	0.780	1.282	
			2.693	0.371	
			7.420	0.135	
032	8°57'27.20"N	71°36'46.50"O	0.980	1.020	
			2.560	0.391	
			7.350	0.136	

Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas (geográficas, datum WGS84), frecuencia (Hz) y período (s) obtenido (2013).

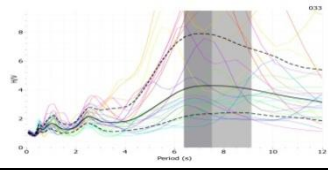
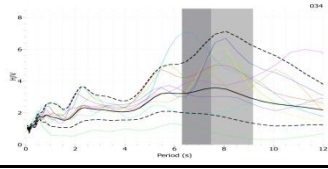
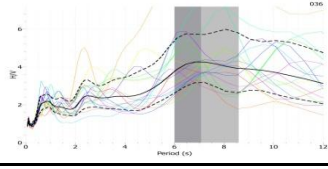
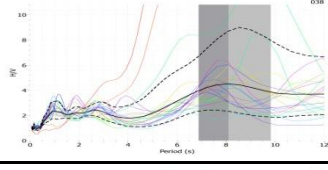
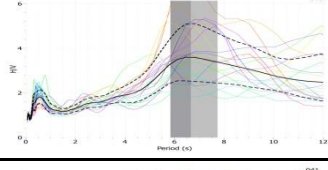
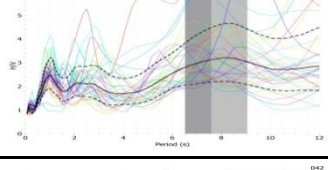
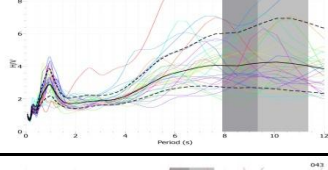
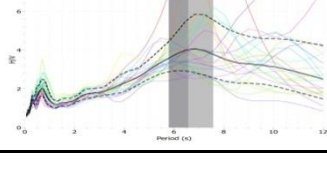
Estación	Latitud	Longitud	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Picos
033	8°56'14.80"N	71°37'52.60"O	1.020	0.980	
			2.521	0.397	
			7.550	0.132	
034	8°54'49.50"N	71°38'11.30"O	0.850	1.176	
			3.320	0.301	
			7.500	0.133	
036	8°51'30.00"N	71°38'22.90"O	0.902	1.109	
			2.470	0.405	
			7.120	0.140	
038	8°48'59.90"N	71°40'5.10"O	0.976	1.025	
			2.660	0.376	
			8.110	0.123	
040	8°45'36.10"N	71°39'31.90"O	0.655	1.527	
			6.650	0.150	
041	8°43'55.90"N	71°39'19.70"O	0.970	1.031	
			2.100	0.476	
			7.620	0.131	
042	8°42'25.60"N	71°38'45.40"O	0.950	1.053	
			9.350	0.107	
043	8°40'38.00"N	71°38'37.80"O	0.720	1.389	
			6.800	0.147	

Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas (geográficas, datum WGS84), frecuencia (Hz) y período (s) obtenido (2013).

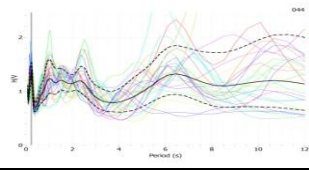
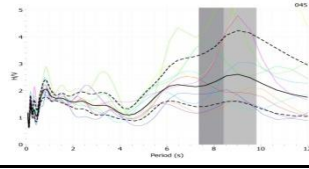
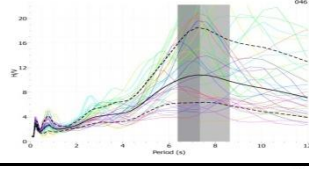
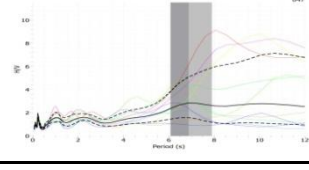
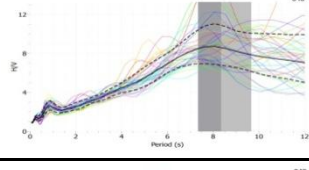
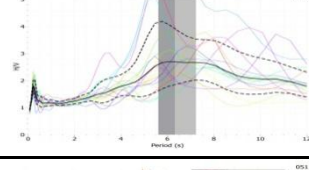
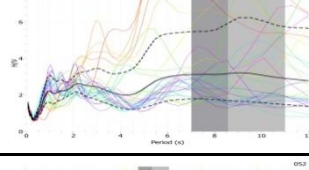
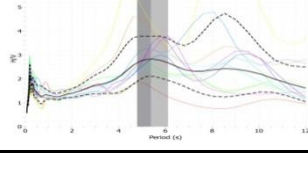
Estación	Latitud	Longitud	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Picos
044	8°39'18.00"N	71°38'5.70"O	0.230	4.348	
			1.010	0.990	
			6.410	0.156	
045	8°37'16.10"N	71°37'21.70"O	0.170	5.882	
			0.800	1.250	
			8.470	0.118	
046	8°40'1.40"N	71°40'53.60"O	0.240	4.167	
			0.770	1.299	
			7.330	0.136	
047	8°38'42.80"N	71°40'6.40"O	0.230	4.348	
			1.040	0.962	
			6.920	0.145	
048	8°37'20.20"N	71°39'13.70"O	0.860	1.163	
			7.890	0.127	
049	8°36'13.90"N	71°37'53.00"O	0.230	4.348	
			6.320	0.158	
051	8°45'2.40"N	71°34'26.10"O	0.950	1.053	
			2.200	0.455	
			8.600	0.116	
052	9° 1'34.30"N	71°29'54.20"O	0.187	5.348	
			5.380	0.186	

Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas (geográficas, datum WGS84), frecuencia (Hz) y período (s) obtenido (2013).

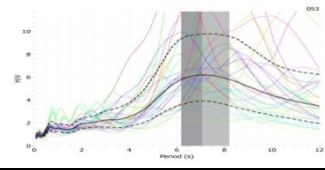
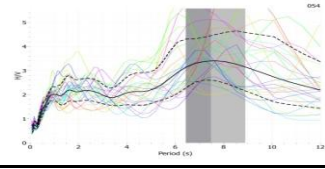
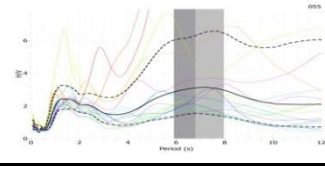
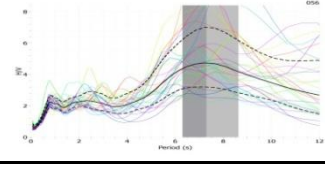
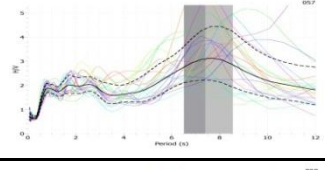
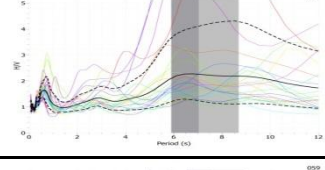
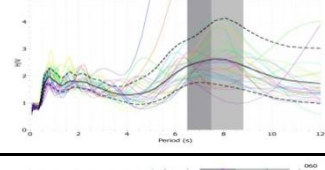
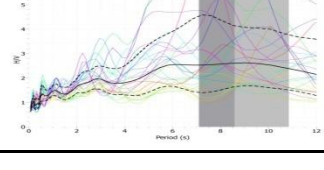
Estación	Latitud	Longitud	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Picos
053	8°59'4.50"N	71°29'42.70"O	0.659	1.517	
			7.070	0.141	
054	8°57'28.80"N	71°29'55.60"O	0.950	1.053	
			1.620	0.617	
			7.470	0.134	
055	8°55'53.20"N	71°29'20.00"O	1.273	0.786	
			7.100	0.141	
056	8°54'22.60"N	71°28'56.10"O	0.820	1.220	
			2.350	0.426	
			7.320	0.137	
057	8°52'44.90"N	71°28'25.50"O	0.850	1.176	
			2.520	0.397	
			7.600	0.132	
058	8°50'51.90"N	71°28'9.90"O	0.650	1.538	
			2.870	0.348	
			7.020	0.142	
059	8°49'24.90"N	71°27'7.50"O	0.750	1.333	
			1.750	0.571	
			7.550	0.132	
060	8°48'5.30"N	71°26'47.40"O	1.070	0.935	
			2.870	0.348	
			8.600	0.116	

Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas (geográficas, datum WGS84), frecuencia (Hz) y período (s) obtenido (2013).

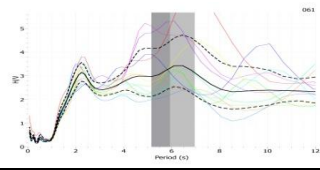
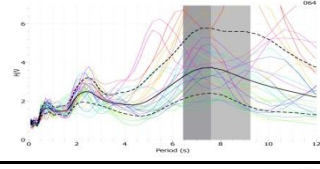
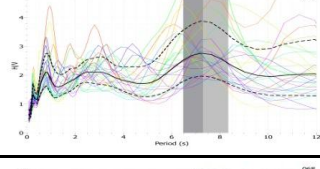
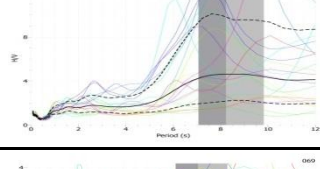
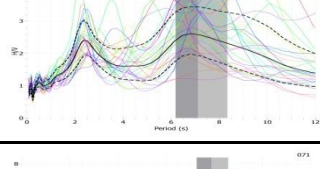
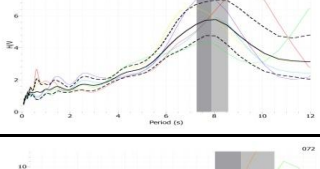
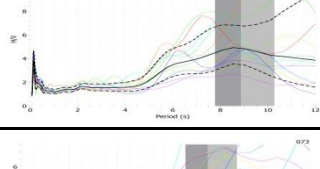
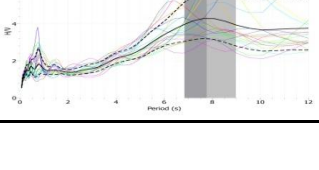
Estación	Latitud	Longitud	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Picos
061	9° 3'19.55"N	71°27'16.10"O	2.250	0.444	
			4.600	0.217	
			6.300	0.159	
064	9° 0'13.10"N	71°23'6.40"O	0.790	1.266	
			2.400	0.417	
			7.600	0.132	
066	8°58'0.20"N	71°20'50.20"O	0.820	1.220	
			2.620	0.382	
			7.320	0.137	
068	8°55'38.40"N	71°18'31.10"O	2.610	0.383	
			8.210	0.122	
069	9° 4'39.65"N	71°19'5.28"O	0.500	2.000	
			2.400	0.417	
			6.870	0.146	
071	8°42'52.10"N	71°26'44.20"O	1.450	0.690	
			2.570	0.389	
			7.870	0.127	
072	8°45'58.44"N	71°27'12.90"O	0.130	7.692	
			8.520	0.117	
073	8°51'35.50"N	71°22'28.80"O	0.770	1.299	
			7.770	0.129	

Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas (geográficas, datum WGS84), frecuencia (Hz) y período (s) obtenido (2013).

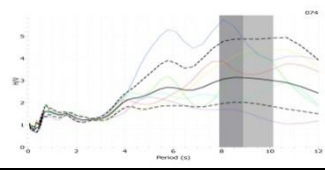
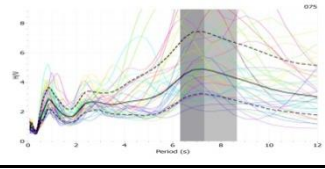
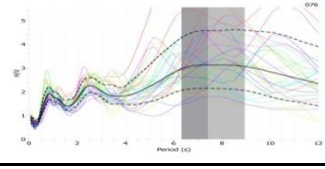
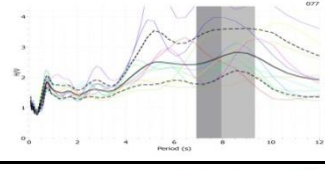
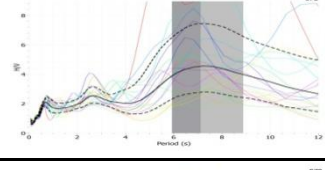
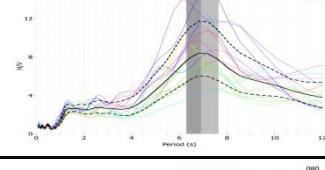
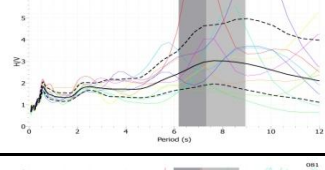
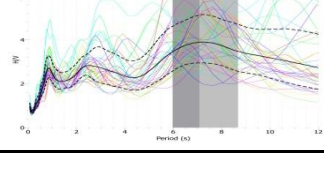
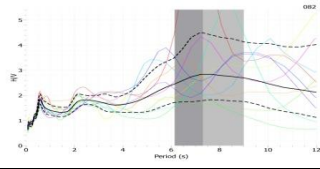
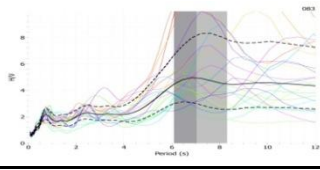
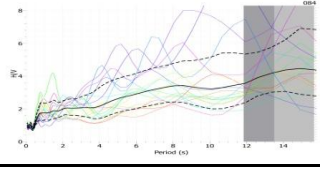
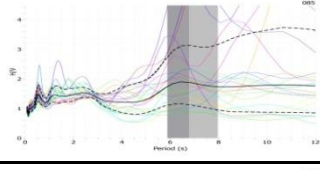
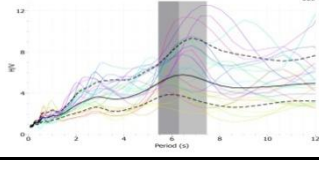
Estación	Latitud	Longitud	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Picos
074	9° 2'7.70"N	71°28'14.60"O	0.820	1.220	
			5.750	0.174	
			8.400	0.119	
075	9° 0'20.19"N	71°27'50.46"O	0.870	1.149	
			2.670	0.375	
			7.220	0.139	
076	8°58'41.68"N	71°27'51.24"O	0.826	1.211	
			2.570	0.389	
			7.420	0.135	
077	8°58'5.80"N	71°26'22.30"O	0.720	1.389	
			5.320	0.188	
			8.470	0.118	
078	8°57'9.00"N	71°25'1.90"O	0.650	1.538	
			2.650	0.377	
			7.120	0.140	
079	8°55'40.70"N	71°24'17.00"O	1.420	0.704	
			6.870	0.146	
080	8°54'26.60"N	71°23'2.60"O	0.570	1.754	
			2.370	0.422	
			7.420	0.135	
081	8°53'24.30"N	71°22'0.90"O	0.850	1.176	
			2.520	0.397	
			7.120	0.140	

Tabla 3. Estaciones medidas con sus respectivas coordenadas (geográficas, datum WGS84), frecuencia (Hz) y período (s) obtenido (2013).

Estación	Latitud	Longitud	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Picos
082	9° 1'21.90"N	71°18'17.16"O	0.560	1.786	
			2.450	0.408	
			7.320	0.137	
083	8°59'48.20"N	71°17'27.50"O	0.710	1.408	
			2.430	0.412	
			6.920	0.145	
084	8°58'8.30"N	71°16'19.20"O	0.760	1.316	
			8.120	0.123	
			13.590	0.074	
085	8°57'6.30"N	71°15'4.60"O	0.520	1.923	
			2.470	0.405	
			6.800	0.147	
086	8°55'41.20"N	71°14'8.90"O	0.630	1.587	
			2.860	0.350	
			6.360	0.157	

APÉNDICE C

Tabla 4. Espesores estimados a partir de los períodos obtenidos.

Estación	Coordenadas (Geográficas)		Períodos (s)			Espesores (m)		
	Latitud	Longitud	1er pico	2do pico	3er pico	1er pico	2do pico	3er pico
1	9° 4'59.30"N	72°13'39.80"O	0.829	3.350	6.225	227.98	1256.25	3112.50
2	9° 3'50.12"N	72°13'38.20"O	0.911	-	6.250	250.53	-	3281.25
3	9° 1'55.92"N	72°12'45.29"O	0.850	4.300	-	233.75	2042.50	-
4	9° 1'11.90"N	72°11'15.90"O	0.750	-	7.500	206.25	-	3750.00
5	9° 0'5.33"N	72°10'7.83"O	0.862	1.820	5.800	237.05	500.50	2755.00
6	8°59'42.90"N	72° 8'35.50"O	0.570	2.220	5.550	156.75	832.50	2636.25
7	8°59'6.12"N	72° 7'9.61"O	1.450	3.880	7.600	398.75	1455.00	3800.00
8	8°58'14.02"N	72° 5'25.74"O	1.500	-	5.720	412.50	-	2717.00
9	8°57'55.50"N	72° 3'43.20"O	1.300	-	7.230	357.50	-	3615.00
10	8°57'32.18"N	72° 2'7.28"O	0.950	2.170	6.800	261.25	813.75	3400.00
11	8°58'1.70"N	72° 0'33.80"O	-	-	6.940	-	-	3643.50
12	8°58'52.82"N	71°59'10.11"O	1.322	2.000	6.770	363.55	750.00	3385.00
13	9° 0'14.10"N	71°58'10.70"O	0.880	-	7.960	242.00	-	3980.00
14	8°59'57.58"N	71°56'22.97"O	1.236	3.990	6.680	339.90	1496.25	3340.00
15	8°59'56.90"N	71°54'48.30"O	0.830	-	7.630	228.25	-	3815.00
16	8°58'25.50"N	71°53'53.70"O	0.550	-	6.550	151.25	-	3275.00
17	8°56'55.70"N	71°53'21.70"O	0.880	-	5.880	242.00	-	2793.00
18	8°55'11.30"N	71°52'45.70"O	0.520	-	6.075	143.00	-	3037.50
19	8°53'30.70"N	71°52'3.04"O	1.875	2.800	6.850	515.63	1050.00	3425.00
20	8°52'10.50"N	71°51'25.50"O	0.950	2.050	6.400	261.25	768.75	3200.00
21	8°51'11.90"N	71°50'2.50"O	0.625	-	6.350	171.88	-	3175.00
22	8°50'19.90"N	71°48'49.20"O	-	2.280	7.170	-	855.00	3585.00
23	8°49'12.00"N	71°47'45.50"O	0.900	-	5.900	247.50	-	2802.50
24	8°48'8.60"N	71°46'25.90"O	-	-	7.500	-	-	3750.00
25	8°46'59.90"N	71°45'2.90"O	0.600	-	6.440	165.00	-	3220.00
26	8°45'31.00"N	71°44'25.90"O	0.580	-	7.000	159.50	-	3500.00
27	8°44'2.40"N	71°43'49.50"O	0.610	-	6.820	167.75	-	3410.00
28	8°42'59.30"N	71°42'31.30"O	0.927	2.704	7.620	254.93	1014.00	3810.00
29	8°41'44.10"N	71°41'27.40"O	0.400	-	6.520	110.00	-	3260.00
30	9° 1'40.50"N	71°34'40.30"O	0.710	-	7.200	195.25	-	3600.00
31	8°59'13.30"N	71°34'52.00"O	0.780	2.693	7.420	214.50	1009.88	3710.00
32	8°57'27.20"N	71°36'46.50"O	0.980	2.560	7.350	269.50	960.00	3675.00
33	8°56'14.80"N	71°37'52.60"O	1.020	2.521	7.550	280.50	945.38	3775.00
34	8°54'49.50"N	71°38'11.30"O	0.850	3.320	7.500	233.75	1245.00	3750.00
36	8°51'30.00"N	71°38'22.90"O	0.902	2.470	7.120	248.05	926.25	3560.00

Tabla 4. Espesores estimados a partir de los períodos obtenidos.

Estación	Coordenadas (Geográficas)		Períodos (s)			Espesores (m)		
	Latitud	Longitud	1er pico	2do pico	3er pico	1er pico	2do pico	3er pico
38	8°48'59.90"N	71°40'5.10"O	0.976	2.660	-	268.40	997.50	-
40	8°45'36.10"N	71°39'31.90"O	0.655	-	6.650	180.13	-	3325.00
41	8°43'55.90"N	71°39'19.70"O	0.970	2.100	7.620	266.75	787.50	3810.00
42	8°42'25.60"N	71°38'45.40"O	0.950	-	9.650	261.25	-	5548.75
43	8°40'38.00"N	71°38'37.80"O	0.720	-	6.800	198.00	-	3400.00
44	8°39'18.00"N	71°38'5.70"O	0.230	1.010	6.410	63.25	277.75	3205.00
45	8°37'16.10"N	71°37'21.70"O	0.170	0.800	-	46.75	220.00	-
46	8°40'1.40"N	71°40'53.60"O	0.240	0.770	7.330	66.00	250.25	3665.00
47	8°38'42.80"N	71°40'6.40"O	0.230	1.040	6.920	63.25	338.00	3460.00
48	8°37'20.20"N	71°39'13.70"O	0.860	-	7.890	236.50	-	3945.00
49	8°36'13.90"N	71°37'53.00"O	0.230	-	6.320	63.25	-	3160.00
51	8°45'2.40"N	71°34'26.10"O	0.950	2.200	-	261.25	825.00	-
52	9° 1'34.30"N	71°29'54.20"O	0.187	-	5.380	51.43	-	2555.50
53	8°59'4.50"N	71°29'42.70"O	0.659	-	7.070	181.23	-	3535.00
54	8°57'28.80"N	71°29'55.60"O	0.950	1.620	7.470	261.25	526.50	3735.00
55	8°55'53.20"N	71°29'20.00"O	1.273	-	7.100	350.08	-	3550.00
56	8°54'22.60"N	71°28'56.10"O	0.820	2.350	7.320	225.50	881.25	3660.00
57	8°52'44.90"N	71°28'25.50"O	0.850	2.520	7.600	233.75	945.00	3800.00
58	8°50'51.90"N	71°28'9.90"O	0.650	2.870	7.020	178.75	1076.25	3510.00
59	8°49'24.90"N	71°27'7.50"O	0.750	1.750	7.550	206.25	568.75	3775.00
60	8°48'5.30"N	71°26'47.40"O	1.070	2.870	-	294.25	1076.25	-
61	9° 3'19.55"N	71°27'16.10"O	0.250	4.600	6.300	65.75	2185.00	3150.00
64	9° 0'13.10"N	71°23'6.40"O	0.790	2.400	7.600	217.25	900.00	3800.00
66	8°58'0.20"N	71°20'50.20"O	0.820	2.620	7.320	225.50	982.50	3660.00
68	8°55'38.40"N	71°18'31.10"O	-	2.610	8.210	-	717.75	4720.75
69	9° 4'39.65"N	71°19'5.28"O	0.500	2.400	6.870	137.50	900.00	3435.00
71	8°42'52.10"N	71°26'44.20"O	1.450	2.570	7.870	398.75	963.75	3935.00
72	8°45'58.44"N	71°27'12.90"O	0.130	-	8.520	35.75	-	4899.00
73	8°51'35.50"N	71°22'28.80"O	0.770	-	7.770	211.75	-	3885.00
74	9° 2'7.70"N	71°28'14.60"O	0.820	-	5.750	225.50	-	2731.25
75	9° 0'20.19"N	71°27'50.46"O	0.870	2.670	7.220	239.25	1001.25	3610.00
76	8°58'41.68"N	71°27'51.24"O	0.826	2.570	7.420	227.15	963.75	3710.00
77	8°58'5.80"N	71°26'22.30"O	0.720	-	5.320	198.00	-	2527.00
78	8°57'9.00"N	71°25'1.90"O	0.650	2.650	7.120	178.75	993.75	3560.00
79	8°55'40.70"N	71°24'17.00"O	1.420	-	6.870	390.50	-	3435.00
80	8°54'26.60"N	71°23'2.60"O	0.570	2.370	7.420	156.75	888.75	3710.00

Tabla 4. Espesores estimados a partir de los períodos obtenidos.

Estación	Coordenadas (Geográficas)		Períodos (s)			Espesores (m)		
	Latitud	Longitud	1er pico	2do pico	3er pico	1er pico	2do pico	3er pico
81	8°53'24.30"N	71°22'0.90"O	0.850	2.520	7.120	233.75	945.00	3560.00
82	9° 1'21.90"N	71°18'17.16"O	0.560	2.450	7.320	154.00	673.75	3660.00
83	8°59'48.20"N	71°17'27.50"O	0.710	2.430	6.920	195.25	911.25	3460.00
84	8°58'8.30"N	71°16'19.20"O	0.760	-	-	209.00	-	-
85	8°57'6.30"N	71°15'4.60"O	0.520	2.470	6.800	143.00	926.25	3400.00
86	8°55'41.20"N	71°14'8.90"O	0.630	2.860	6.360	173.25	1072.50	3180.00