

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE NICARAGUA**

**UNAN-MANAGUA**

**RECINTO UNIVERSITARIO RUBEN DARIO**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS**

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCION**



**Microzonificación Sísmica en el Sector Noreste del Área Urbana de la  
Ciudad de Managua.**

**Investigación Monográfica para obtener el Título de Ingeniero Civil.**

**Autores:**

**Br. Adriana de Jesús García.**

**Br. Néstor Javier López Palacios.**

**Tutor:**

**Msc. Ing. Edwin Nadir Castrillo.**

**Managua, Nicaragua  
Diciembre, 2014**



## **DEDICATORIAS**

### **Por Adriana Garcia**

Dedico esta tesis primeramente a **Dios**, por ser la luz en mi caminar y permitirme llegar hasta acá.

A mis Padres **Paula García** y **Carlos Maltez**, quienes me han apoyado incondicionalmente ya que sin ellos no pudiera ser lo que hoy en día soy; espero honrarles toda la vida y ser siempre un motivo de orgullo para ellos.

A mis **hermanos y amigos**, por ser una parte valiosa en mi vida, porque a pesar del tiempo y la distancia sé que cuento con amigos incondicionales, sus palabras de aliento han llegado en el momento justo y han sido reconfortante a lo largo de mi vida, gracias por todo su apoyo recibido, Dios los guarde y guie siempre, se les quiere mucho y están siempre en mi corazón.

Asi mismo y no menos significativo, dedico esta investigación a todos los **estudiantes** que están en esta Alma Mater con el sueño de alcanzar un día el título de Ing. Civil. Sabemos que el camino es difícil, pero no imposible, luchen siempre por alcanzar sus metas, hoy somos nosotros, mañana serán ustedes. Sólo crean en ustedes mismos, den lo mejor de sí siempre, nunca paren de luchar sin importar las derrotas que surjan y confíen en Dios, porque bajo su dirección todo es posible.



### **Por Néstor López**

A Dios primero por haberme dado la vida, salud y sabiduría para llegar hasta este momento tan importante de mi vida.

A mi mamá Ángela Palacios, quien ha sido la mejor madre que pude haber deseado y estar siempre dándome ese amor y cariño tan único como ningún otro y apoyarme siempre en los buenos y malos momentos. Te amo madre.

A mi papá Juan López por ser un excelente guía a lo largo de mi vida y ser esa persona que siempre estuvo para ayudarme cuando lo necesitaba, además de preocuparse siempre por mi formación académica. Gracias padre por confiar en mí.

A mis hermanos Kenia, Yader y Flor con quienes he compartido alegrías, tristezas, retos y triunfo. Gracias hermanos por su apoyo los quiero mucho.

A mis abuelos Cristina Arias y Juan Palacios por su cariño y por enseñarme la importancia de la espiritualidad y siempre haberme deseado lo mejor. Gracias abuelo por darme siempre su bendición.

A mis amigos de la carrera con quienes compartí durante cinco años aprendizaje y trabajo en equipo Adriana, Freddy y Darwin. Gracias amigos por compartir esos buenos momentos y sigamos siempre adelante cumpliendo metas.

Finalmente les doy las gracias a todas esas personas que siempre confiaron en mí. Gracias por todo.



## AGRADECIMIENTO

### Por Adriana y Néstor

*La oportunidad que nos brinda la vida de expresar nuestro agradecimiento, a cada una de aquellas personas que hacen posible la culminación y el alcance de las metas propuestas, es la mejor recompensa al trabajo realizado (Bonett, 2003).*

En primer lugar, queremos agradecer a **Dios y a la Virgen**, por habernos permitido culminar nuestra meta, por poner en nuestro camino toda las personas especiales que han marcado nuestras vidas, por cada prueba y bendiciones que han llegado, las cuales nos han fortalecido cada día, porque sabemos que contamos con la guía de un Dios vivo, ya que sin él no estaríamos aquí.

A nuestros **Padres**, gracias por estar siempre allí, acompañándonos, apoyándonos y escuchándonos, porque si bien sabemos no fue fácil y sin embargo siempre tuvimos una palabra de apoyo y de compañía cuando más la necesitamos, gracias por enseñarnos tanto, por demostrarnos que si se puede, sin duda alguna con el apoyo de ustedes siempre todo se hizo más fácil. A nuestros hermanos porque de una u otra manera nos han apoyaron en este caminar.

Agradecemos también al **Msc. Edwin Castrillo** por brindar sus conocimientos y vasta experiencia en esta línea de investigación lo cual permitió se pudiera llevar a cabo, y por el grado de compromiso con que asumió la tutoría. Sin duda alguna es un docente con un gran nivel de preparación; siempre nos motivó para continuar con el trabajo incursionado en el área de ingeniería sísmica. Además de tutor, se ha convertido en un gran amigo por el cual hoy podemos culminar con este sueño que inició hace cinco años.

Al Instituto de Geología y Geofísica (**GIG**) de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua), quien nos facilitó los equipos utilizados para la adquisición de datos, y el traslado de los mismo durante el tiempo que se requirió la ejecución de recolección de registros en esta investigación; agradecemos también a las personas de dicho Instituto que nos apoyaron en el trabajo de campo.

A todos los **docentes** de la carrera que por cinco años fueron facilitadores de conocimientos y por quienes hoy podemos estar aquí. Especialmente al **Ing. Bayardo Altamirano** por su gran labor como docente.

A los **amigos** dentro y fuera de la carrera, gracias a todos ellos, por todos los excelentes momentos que vivimos juntos y por los que faltan, por acompañarnos y ayudarnos, gracias por la gran amistad que nos brindan, porque han sido y seguirán siendo una pieza importante en nuestro caminar por esta vida.

Mil Gracias a todos...



## LISTADO DE FIGURAS

**Fig. 2.1** Emplazamiento tectónico de Nicaragua (INETER, 2000).

**Fig. 2.2** Microlocalización del área de estudio en el sector Noreste de la ciudad de Managua (Google earth).

**Fig. 2.3** Situación de Fallamiento Geológico de Managua. (INETER, 2000).

**Fig. 2.4** Perfil N-S de estratigrafía de la ciudad de Managua (Faccioli, 1973).

**Fig. 2.5** Perfil E-W de estratigrafía en la zona costera al lago de Managua (Faccioli, 1973).

**Fig. 2.6** Perfil E-W de estratigrafía en la zona central de la ciudad de Managua (Faccioli, 1973).

**Fig. 2.7** Clasificación de suelos para la ciudad de Managua (Hernandez, 2009).

**Fig. 3.1** Modelo de propagación de Ondas P.

**Fig. 3.2** Modelo de propagación de ondas S.

**Fig. 3.3** Modelo de propagación de Ondas Love.

**Fig. 3.4** Modelo de propagación de Ondas Rayleigh.

**Fig. 3.5** Tipos de fuentes de origen natural y artificial que originan la vibración ambiental (Lermo J & Chavez Garcia F. J., 1994a).

**Fig. 3.6** Curvas de módulo de rigidez y factor de amortiguamiento para materiales visco-elásticos (Robinson et al., 2006).

**Fig. 3.7** Arreglo para levantamiento del perfil Técnica MASW (Park C Miller., 2001).

**Fig. 3.8** Idealización de una respuesta de sitio (Kramer, 1996).

**Fig. 3.9** Esquema del Método de (Nakamura, 1989).

**Fig. 3.10** (a) Geometría del subsuelo y (b) Modelo de las fuentes de microtemblores para formular la relación teórica H/V de ondas superficiales (Arai H & Tokimatsu K., 2000).

**Fig. 3.11** Sistema de un grado de libertad: a) fuerza aplicada  $P(t)$ ; b) fuerza inducida por un terremoto (Chopra, 1995).

**Fig. 3.12** Espectro de respuesta para diferentes movimientos de sismos (Chopra, 1995).

**Fig. 3.13** Espectro de diseño según RNC-07.

**Fig. 4.1** Ubicación de los puntos de microtemblores en el sitio de estudio.

**Fig. 4.2** Acelerómetro McSEIS-MT NEO y sismómetros empleados en el estudio.



**Fig. 4.3** Interfaz gráfica para el procesamiento y selección de ventanas con los segmentos de registro más limpios de punto de medición en sus tres componentes.

**Fig. 4.4 a)** La selección de la ventana muestra la grabación de microtremor destacando la parte que se va analizar del primer registro, b) se muestra con un aumento de visualización la parte que va a ser tomada para el análisis.

**Fig. 4.5 a)** Muestra la función de transferencia empírica para dos ventanas de un registro dado, b) muestra el promedio de FTE en las dos ventanas.

**Fig.4.6** Resultado del registro de microtremor con la rutina HV, exportado a Excel y grafica de la curva espectral para el sitio; obteniendo a su vez la desviación estándar (+/- Std) para los valores límites de la curva media REHV.

**Fig. 4.7** El mapa muestra la localización de los perfiles seleccionados para el registro de MASW y SPAC, el polígono representa el área de estudio.

**Fig. 4.8** Procedimiento del trabajo de campo, en el cuarto perfil para obtener el registro de MASW.

**Fig. 4.9** Sismógrafo marca GEODE utilizado para mediciones de MASW (Propiedad del CIGEO de la UNAN-Managua).

**Fig. 4.10** Esquema de los arreglos con el método SPAC utilizados en esta investigación.

**Fig. 4.11** Registro tomado en Chico Pelón perfil uno, utilizando la técnica SPAC.

**Fig. 4.12** Sismograma del perfil registrado en Chico Pelón, utilizando el método MASW.

**Fig. 4.13** Curva de dispersión del perfil de Chico Pelón.

**Fig. 4.14** Modelo de capas de espesores con velocidades obtenido para el primer perfil.

**Fig. 4.15** Ejemplos de Coeficientes SPAC, a) registrado en Chico Pelón b) registro obtenido en las Torres, c) registro obtenido en INETER d) registro obtenido en el Dorado, c) registro obtenido en las Américas 1; todos con arreglo de 45m.

**Fig. 4.16** Muestra el ajuste de las funciones Bessel de primer tipo y orden cero para frecuencia de 2.83 Hz.

**Fig. 4.17** Muestra la velocidad de Fase de ondas Rayleigh de la componente vertical de microtemblores. La línea discontinua de color rojo representa la curva de dispersión teórica.

**Fig. 4.18** Interfaz gráfica del proceso para la obtención del acelerograma deconvolucionado.

**Fig. 4.19** Interfaz gráfica del software DEEPSOIL V5.0 para el análisis lineal equivalente.



**Fig. 5.1** El mapa muestra el área del estudio y la ubicación de los 43 puntos dónde se registraron los datos de microtemores que están siendo utilizados.

**Fig. 5.2** Curvas de relación H/V agrupadas en función de la zona 1 y de su contenido de los periodos dominantes.

**Fig. 5.3** Familia Espectral 2, agrupadas en función de su contenido de periodos dominantes.

**Fig.5.4** Mapa de zonificación en base a sus periodos fundamentales.

**Fig. 5.5** Mapa de zonificación basada en los periodos fundamentales en el sitio de estudio.

**Fig. 5.6** Curva de dispersión ajustada para el 4to perfil del Dorado.

**Fig. 5.7** Curva de inversión del 4to perfil ubicado en el Dorado.

**Fig. 5.8** Grafica correspondiente a la zona 1.

**Fig. 5.9** Grafica correspondiente a la zona 2.

**Fig. 5.10** Modelo unidimensional de ondas de cortante en los arreglos de Chico Pelón, las Torres, INETER, el Dorado y las Américas uno, estimados con el método SPAC.

**Fig. 5.11** Mapa de zonificación del área de estudio basado en Vs 30.

**Fig. 5.12** Registro de acelerograma terremoto 1972, componente E-O.

**Fig.5.13** Acelerograma deconvolucionado del terremoto de Managua de 1972, componente E-O.

**Fig.5.14** Acelerograma de superficie para el perfil INETER.

**Fig.5.15** Espectro de respuesta obtenido para el perfil INETER.

**Fig.5.16** Comparación del espectro de respuesta del sitio y RNC\_07.

**Fig.5.17** Comparación entre la función de transferencia de sitio de INETER y los promedios obtenidas por H/V.

**Fig.5.18** Comparación entre la función de transferencia de sitio de Chico Pelón y los promedios obtenidas por H/V.

**Fig.5.19** Comparación entre la función de transferencia de sitio de las Torres y los promedios obtenidas por H/V.

**Fig.5.20** Comparación entre la función de transferencia de sitio de el Dorado y los promedios obtenidas por H/V.

**Fig.5.21** Comparación entre la función de transferencia de sitio las Américas 1 y los promedios obtenidas por H/V.



## **LISTADO DE TABLAS**

**Tabla 2.1** Sismos Históricos en la ciudad de Managua (INETER, 2000).

**Tabla 3.1** Clasificación de las fuentes de ondas sísmicas según su origen (Modificado de Lay y Wallace 1995).

**Tabla 3.2** Métodos aplicados al efecto de sitio (Chávez et al, 1987).

**Tabla. 3.3** Clasificación de suelos según el RNC-07.

**Tabla. 3.4** Clasificación de suelos de acuerdo al código NEHRP, (2003).

**Tabla. 4.1** Longitud de onda del modo fundamental de las ondas Rayleigh.

**Tabla. 5.1** Obtención de registros de microtemores en 43 puntos del sitio de estudio.

**Tabla. 5.2** Selección de archivos correspondiente a la familia espectral.

**Tabla. 5.3** Registros MASW en el sitio de estudio.

**Tabla 5.4** Zona 1 de acuerdo a su profundidad.

**Tabla. 5.5** Zona 2 de acuerdo a su profundidad.

**Tabla. 5.6** Ubicación de registros SPAC.

**Tabla 5.7** Modelos estratigráficos calculados con SPAC para los arreglos de 45m.

**Tabla 5.8** Ejemplo de perfil invertido en INETER con los valores de error estimados para cada parámetro.

**Tabla 5.9** Clasificación de sitio calculada según NEHRP.

**Tabla 5.10** Límites y parámetros del espectro de diseño del RNC-07.



## RESUMEN

Managua capital de Nicaragua tiene una densidad poblacional de 4,314 hab/km<sup>2</sup> (INIDE, 2012), esta se ubica en la región del Pacífico donde existe el mayor riesgo sísmico. De acuerdo con algunos investigadores como Faccioli (1973), Escobar, E & Corea (1988), Hernández (2009), entre otros, respecto a estudios de microzonificación sísmica, las propiedades de los suelos son unos de los factores más significativos, que aumenta el daño de un terremoto.

En esta investigación se realizó una evaluación de microzonificación sísmica en el sector Noreste de la Ciudad de Managua, en el cual se estimaron los periodos fundamentales, obtenidos en base a mediciones de microtemores en 43 sitios del área de estudio, y usando la técnica de Nakamura se estimó las funciones de transferencia empírica para cada sitio. Así mismo se aplicó el criterio  $V_{s30}$ , utilizando el NEHRP-03; con el fin de ampliar la profundidad de exploración se hace uso de los métodos de Ondas Superficiales (MASW) y el método de Autocorrelación Espacial (SPAC), lo que permitió obtener modelos de velocidades de corte en profundidades de hasta 64.39m en 5 sitios distintos de la ciudad.

Mediante los resultados obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones. En principio, la resonancia fundamental se produce en un rango de tiempo de 0.07 a 0.13 s y el segundo modo de vibrar ocurre en un rango de 0.13 a 0.36 s en el sector Noreste de Managua, observando un aumento del periodo fundamental de Sur a Norte. Respecto a las velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) obtenidas con el código NEHRP-03 muestran una buena correlación con los periodos de vibración. Estos resultados son muy importantes para la Ciudad de Managua dado que la mayoría de las construcciones han venido innovando sus diseños y por lo general los edificios son de mediana altura.

Como parte del estudio se tomó en cuenta la respuesta sísmica de sitio y corroborar como se encuentra el área con respecto al espectro de diseño del RNC-07; realizándose un análisis comparativo entre el registro del sismo ocurrido en 1972 y el perfil obtenido en INETER, el cual se generó utilizando dicho evento sísmico, evidenciando que los modos de vibrar del sitio de estudio corresponden muy bien a los periodos de vibración calculados en la técnica H/V, así mismo se obtuvo la comparación con RNC-07 cuyas aceleraciones espectrales presentan una sobre estimación.



## INDICE GENERAL

<b>DEDICATORIAS</b> .....	<i>ii</i>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<i>iv</i>
<b>LISTADO DE FIGURAS</b> .....	<i>v</i>
<b>LISTADO DE TABLAS</b> .....	<i>viii</i>
<b>RESUMEN</b> .....	<i>ix</i>
<b>1. GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Antecedentes</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3. Planteamiento del Problema</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4. Justificación</b> .....	<b>4</b>
<b>1.5. Limitaciones</b> .....	<b>5</b>
<b>1.6. Objetivos</b> .....	<b>6</b>
<b>1.6.1. Objetivo general</b> .....	<b>6</b>
<b>1.6.2. Objetivos específicos</b> .....	<b>6</b>
<b>2. MANAGUA</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1. Datos Generales</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2. Geología de la Ciudad de Managua</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3. Terremotos Históricos</b> .....	<b>10</b>
<b>2.4. Geotecnia de Managua</b> .....	<b>12</b>
<b>2.4.1. Estudios Dinámicos de los Suelos de Managua</b> .....	<b>13</b>
<b>3. FUNDAMENTOS TEORICOS</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1. Ondas Sísmicas</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1.1. Ondas Internas</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1.2. Ondas Superficiales</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1.3. Fuentes de Ondas Sísmicas Superficiales</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2. Métodos Experimentales y Empíricos para Evaluar el Efecto de Sitio</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2.1. Movimientos Sísmicos Fuertes</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2.2. Movimiento Sísmico Débiles o Moderados</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2.3. Microtremores</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3. Métodos teóricos y Numéricos</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3.1. Métodos Lineal Equivalente</b> .....	<b>21</b>
<b>3.4. Métodos de Prospección Sísmica</b> .....	<b>23</b>
<b>3.4.1. Métodos Pasivos</b> .....	<b>23</b>
<b>3.4.1.1. Técnica de Autocorrelación Espacial (SPAC)</b> .....	<b>23</b>
<b>3.4.2. Métodos Activos</b> .....	<b>25</b>
<b>3.4.2.1. Multi-Channel Analysis of Surface Wave (MASW)</b> .....	<b>26</b>



3.4.3.	Métodos Híbridos.....	27
3.4.3.1.	Análisis de Microtremores; Refracción Microtremor (REMI).....	27
3.5.	Caracterización de Sitio.....	27
3.5.1.	Microzonificación Sísmica.....	27
3.5.2.	Efecto de Sitio.....	29
3.5.2.1.	Evaluación del Efecto de Sitio.....	30
3.5.2.2.	Razón Espectral Relativa a un Sitio de Referencia.....	31
3.5.2.3.	Razón Espectral H/V para un Mismo Sitio.....	31
3.5.2.4.	Modelamiento de función de transferencia empírica.....	34
3.5.3.	Criterios para Clasificación de Sitio.....	35
3.6.	Análisis De Respuesta Sísmica De Sitio.....	37
3.6.1.	Teoría de Deconvolución.....	38
3.6.2.	Espectros de Respuesta.....	38
3.6.2.1.	Espectro de Respuesta de Deformación.....	39
3.6.2.2.	Espectro de Respuesta de Pseudo-Velocidad.....	39
3.6.2.3.	Espectro de Respuesta de Pseudo-aceleración.....	39
4.	<b>ADQUISICION Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....</b>	<b>41</b>
4.1.	Microtremores.....	42
4.1.1.	Área de Estudio.....	42
4.1.2.	Equipo de Medición.....	42
4.1.3.	Trabajo de Campo.....	43
4.1.4.	Obtención de FTE.....	44
4.2.	Análisis Multicanal De Ondas Superficiales (MASW) y Técnica de Autocorrelación Espacial (SPAC).....	47
4.2.1.	Equipos de Medición Utilizado en MASW y SPAC.....	47
4.2.2.	Trabajo de Campo de MASW.....	48
4.2.3.	Trabajo de Campo con el Método SPAC.....	49
4.2.4.	Procesamiento de Registros de Ondas Superficiales MASW.....	50
4.2.5.	Procesamiento de Registros de ondas superficiales SPAC.....	52
4.3.	Análisis de Deconvolución.....	55
4.4.	Evaluación de Respuesta Sísmica de Sitio.....	56
5.	<b>ANALISIS Y RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
5.1.	Periodos Fundamentales y Ubicación de los Registros de Microtremores.....	57
5.2.	Agrupación de sitios de acuerdo a la Familias Espectrales To.....	59
5.2.1.	Agrupación de las funciones de transferencia empírica, en función de los periodos dominantes.....	60
5.2.2.	Mapa de microzonificación en función de los periodos dominantes.....	61
5.2.3.	Clasificación de las familias espectrales para cada zona.....	62
5.3.	Obtención de curva de dispersión e inversión de modelos de velocidades.....	62
5.3.1.	Curva de dispersión.....	63
5.3.2.	Inversión de la curva de dispersión.....	64
5.3.3.	Clasificación de zona de acuerdo al V <sub>30</sub> superficial.....	65
5.4.	Análisis de resultado con el método de Autocorrelación Espacial (SPAC).....	67
5.4.1.	Estratigrafía de los perfiles estudiados.....	67
5.5.	Propuesta de Clasificación de Tipos de Suelos para el Área de Estudio.....	72



5.5.1. Cálculo de Vs30 Utilizando Los Criterios del NEHRP. ....72

5.6. Espectro de Respuesta Sísmica de la Zona. ....73

5.6.1 Comparación Entre el Espectro de Respuesta de Sitio y el Espectro de Diseño RNC\_07. ....75

5.6.2 Comparación Entre la Función de Transferencia de Sitio y las Obtenidas por H/V. .76

6. **CONCLUSIONES** ..... 79

7. **RECOMENDACIONES**.....82

8. **REFERENCIAS**.....83

**ANEXOS** .....87

Anexo I: Graficas de FTE en los Puntos de Estudio. ....88

Anexo II: Sitios donde fueron tomados los registros de perfiles MASW y SPAC. ....103

Anexo III: Curvas de Dispersión e Inversión para cada Perfil Utilizando MASW...108



## **1. GENERALIDADES**

### **1.1. Introducción**

En los últimos años se ha adquirido un mejor conocimiento sobre el comportamiento de los suelos ante la llegada de un sismo; en general se puede decir que cada tipo de suelo responde de forma diferente a la onda incidente procedente de un terremoto; la cuantificación y predicción de esta respuesta forma parte de los principales objetivos considerados por la Ingeniería Sísmica. Hasta ahora no se ha desarrollado una tecnología que realmente ayude a predecir los terremotos; pero se puede reducir el riesgo para minimizar sus efectos destructores, una de las formas de hacerlo es estudiando y comprendiendo a fondo la amenaza.

En este estudio se ha seleccionado la ciudad de Managua, capital de Nicaragua siendo la zona más vulnerable a eventos sísmicos. Esta es afectada por dos fuentes sísmicas principales que son la zona de subducción y el sistema de fallas locales, debido a estas fallas Managua tiene una alta probabilidad de experimentar terremotos frecuentemente como fue la experiencia en el caso de los tres últimos terremotos ocurrido en 1931 y 1972 y el de Abril del 2014 producidos por las fallas locales.

Particularmente en este trabajo se pretende realizar un estudio de microzonificación sísmica en el sector Noreste del área urbana de la ciudad de Managua con el fin de definir el comportamiento dinámico de los suelos a través de métodos que nos ayuden a definir los efectos locales que presentan los suelos superficiales en el área de estudio; así como la medición de ondas de corte Vs; esta investigación se llevó a efecto utilizando los métodos de Ruido Ambiental, SPAC y MASW, así como programas actualizados y empleando información geotécnica confiable. Los resultados de este estudio serán de suma importancia para una correcta planificación del uso de los terrenos y el diseño de las estructuras según la respuesta sísmica que presente cada sitio de la zona de estudio.

Los principales resultados fueron los mapas de microzonificación que muestran las diferentes zonas del área de estudio; con esta investigación se pretende aportar información confiable que se puede complementar con estudios antes realizados, para que las autoridades competentes la implementen con el objetivo de reducir el riesgo sísmico en que se encuentra nuestro país y principalmente la capital Managua.



## 1.2. Antecedentes

Managua por su ubicación geológica y tectónica en el transcurso del tiempo ha sido una de las áreas más afectadas por los procesos geológicos de considerable magnitud que a través de las distintas eras y periodos han influido ampliamente en la formación de su relieve y topografía; sin descartar que es una zona continuamente afectada por sismos de variada intensidad generados en la zona de subducción, (Moore, 2004).

Todas las investigaciones referentes al comportamiento de los suelos ante eventos sísmicos y geología se iniciaron después del terremoto de 1972, entre ellas, fueron discutidas causas y efectos del evento, problemas constructivos y la geología de Nicaragua. Los siguientes son algunos estudios que se orientaron para determinar los daños producidos por el sismo del 23 de diciembre de 1972:

- Daños causados por los temblores del 23 de diciembre de 1972 en las construcciones de Managua, "Enrique Del Valle C". 1973.
- Isoleismal maps of the Managua December 23, 1972. *Earthquake Engineering Research Institute, Conference Proceedings, California*. "Hansen, F., & Cavez, V." 1973.
- Managua Antisísmica, "Gabriel Estrada Uribe" 1973.
- Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua earthquake of December 23, 1972. *U.S. Government Printing Office*. "Brown, R. D., Ward, P. L., & Plafker, G." (1973).
- Seismic hazard analysis of Managua, Nicaragua, "Johansson" 1988.
- Microzonificación Sísmica de la ciudad de Managua, "Escobar, E & Corea, M" 1998.
- Microzonificación Sísmica Managua, INETER, Junio 2000.
- Reevaluación del efecto de sitio y propuesta de clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico para Managua, Nicaragua. Orlando Hernandez Rubio., 2009.
- Local site effect characterization in the old downtown área of Managua city, Nicaragua based on long period microtremores. Castrillo E. N., Eto K., Yokoi T., Ulriksen P., 2014.

A partir de estos estudios se puede retomar los siguientes aspectos: desde su existencia la ciudad de Managua ha sido afectada por sismos originados por diferentes fuentes. Los sismos que más destrucción causaron a Managua sucedieron en el pasado siglo (1931 y 1972), generados por la activación de fallas locales (propriadamente debajo de la ciudad); es por tal razón que se requiere de una evaluación minuciosa de las propiedades y características dinámicas de los suelos; a fin de caracterizar debidamente las fuerzas a las que estarán expuestas las obras de desarrollo e infraestructura, lo que resulta crucial en la economía emergente de nuestro país.



### **1.3. Planteamiento del Problema**

Tradicionalmente, los métodos geofísicos aplicados a la geotecnia se han utilizado para la caracterización de sitio, permitiendo obtener los principales parámetros del subsuelo, como son: Los espesores de las primeras capas y la velocidad de la onda S en una determinada zona, con el fin de cumplir con los requisitos que se ajusten a la normativa vigente de construcción.

Con el paso del tiempo la puesta en práctica de los métodos geofísicos tradicionales aplicados a la geotecnia, han presentado cada vez más complicaciones debido a la dificultad de su implementación en zonas densamente pobladas y con altos niveles de ruido ambiental, así como el aumento en sus costos de ejecución y las exigencias propias de la complejidad en el campo de la construcción tal es el caso de las pruebas SPT, esto hace necesario el uso y combinación de diferentes métodos, menos invasivos, más económicos y que además provean la mayor cantidad de información posible para la caracterización del suelo y el cálculo del riesgo sísmico en el área determinada.

Por cuanto este estudio se realizó utilizando métodos no invasivos, económicos y prácticos principalmente en la zonas urbanas como es el sector noreste de Managua; siendo el objetivo principal de esta investigación obtener mapas de zonificación basados en los periodos dominantes de vibración, así como también el efecto incidente de las ondas sísmicas que el sitio de estudio posee; para la adquisición de mapas se utilizó el software ArcGis 10.1.



#### **1.4. Justificación**

Teniendo en cuenta que la ciudad de Managua es la que presenta mayor incremento en el desarrollo de infraestructura de todo el territorio nacional y se encuentra ubicada en la zona de mayor actividad sísmica de Nicaragua, es necesario tener estudios de microzonificación sísmica del suelo que a su vez permitan construir las obras civiles en concordancia al ambiente sísmico donde se emplazaran y de esta manera minimizar la posibilidad de daños severos en las mismas.

Este estudio se plantea para cubrir la necesidad de conocer las propiedades dinámicas de los suelos del sector noreste de la ciudad de Managua con fines de microzonificación en él que se permitan evaluar las condiciones locales de los suelos considerando los contrastes de impedancia a mayores profundidades que las obtenidas a la fecha con estudios de SPT y otros estudios con vibración ambiental con instrumentos de periodo corto; esto con el fin de tener un diseño más ajustado a la realidad y poder así reducir el grado de incertidumbre en cuanto al comportamiento de las estructuras durante la sollicitación sísmica.

La propuesta de microzonificación de esta investigación se basa en el análisis de datos de Microtremores, Autocorrelación Espacial (SPAC) y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). Los métodos utilizados en nuestra investigación se caracterizan por la facilidad de su aplicación en zonas urbanas, permitiendo utilizar el ruido ambiental como fuente de energía, disminuyendo ampliamente los costos de ejecución y obteniendo a partir de ellos gran parte de los parámetros requeridos para cumplir con las normativas vigentes de construcción, por lo que se propone combinar el uso de estas tres técnicas para la caracterización del sitio con el fin de reducir costos, facilitar la adquisición y acelerar el procesamiento de los datos adquiridos.



## **1.5. Limitaciones**

Siendo una de nuestras limitaciones el tiempo y disponibilidad de los equipos, ya que las expectativas de este trabajo monográfico estaba orientada a cubrir todo la parte noreste del área urbana de Managua, pero por lo anterior no se abarco el sector norte (periféricas del aeropuerto) donde posiblemente se podría obtener facilidad de recolección de datos. No se contó con datos previos de SPT en la zona; por lo que se utilizaran técnicas indirectas.

En relación a la técnica de Autocorrelación Espacial (SPAC), nos encontramos con ciertas limitaciones en cuanto a la ubicación del punto de estudio ya que en el sector de estudio no existen tantas áreas verdes con el espaciamiento necesario para desplegar el arreglo geométrico como mínimo de 45m. Otro factor importante en relación a la calidad de los datos requeridos fueron las irregularidades en el terreno superficial en algunos sitios de medición, lo cual no permitía una buena nivelación de los sensores para así poder obtener resultados confiables, tales registros donde sucedió esto fueron desechados.

No obstante, este estudio es un primer paso hacia una microzonificación sísmica de la ciudad de Managua, es decir que permitirá dar inicio a posibles discusiones en cuanto a la necesidad de elaborar microzonificaciones y abrirá el conocimiento para la futuras técnicas investigativas que permitan evaluar los métodos propuestos y desarrollarlos en el resto del país.



## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo general**

Proponer una Microzonificación sísmica en el sector Noreste de la ciudad de Managua; usando los métodos sísmicos: Análisis de Microtremores, MASW y SPAC.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

- Determinar los modos fundamentales de vibración de los suelos del sitio de estudio.
- Definir perfiles de velocidad de ondas de corte en sitios seleccionados del área de estudio.
- Analizar la distribución de rigidez en función de los periodos fundamentales y perfiles de velocidad de ondas del sitio.
- Proponer zonificación del área de acuerdo al parámetro Vs30.
- Determinar el espectro de respuesta elástico, utilizando los datos de Vs30 y el registro de aceleraciones del terremoto de Managua de 1972.



## 2. MANAGUA

Nicaragua es afectada constantemente por fenómenos naturales, encontrándose situada contiguo al denominado Cinturón de Fuego Circum-Pacífico; históricamente el país ha experimentado una alta actividad sísmica y volcánica, la cual es el resultado del proceso de colisión de las placas Coco y Caribe, proceso que resulta en la subducción de la primera (Martínez, 1993). La región del Pacífico de Nicaragua, está formada por una estructura geológica de gran extensión, denominada Depresión o Graben Nicaragüense la cual se encuentra constituida por rocas volcánicas y numerosos fallamientos locales (Woodward Clyde Consultants, 1975).

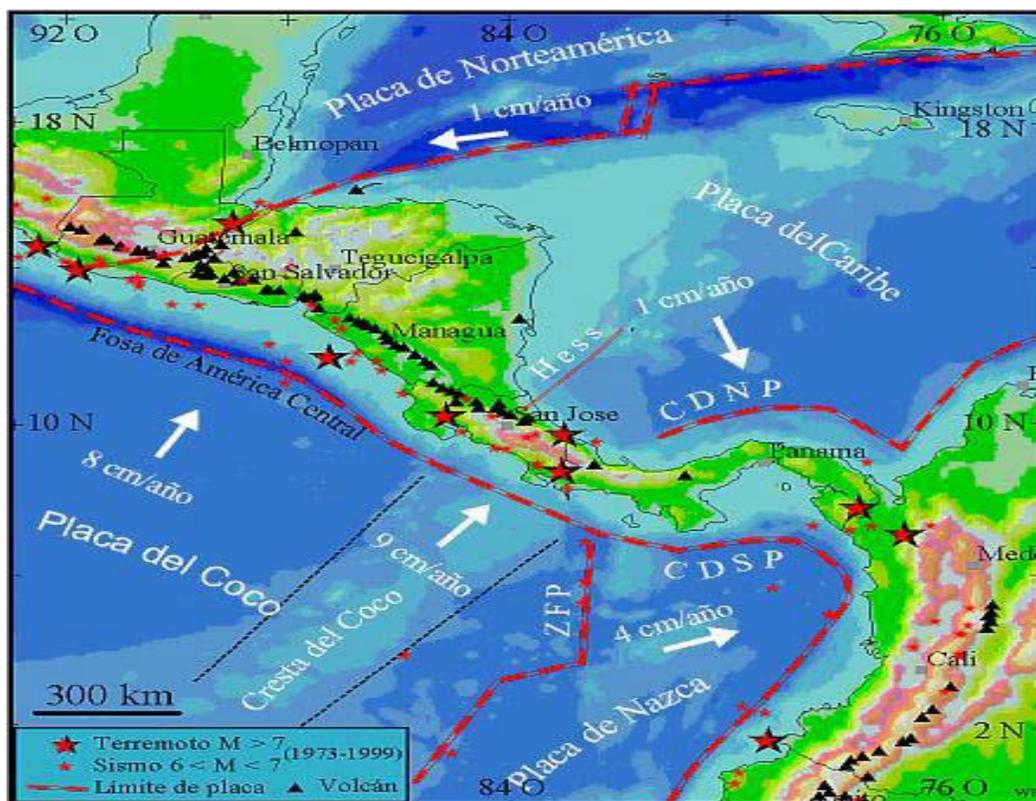


Fig. 2.1 Emplazamiento tectónico de Nicaragua (INETER, 2000).

### 2.1. Datos Generales

Managua capital de Nicaragua, fue fundada el 24 de Marzo de 1819 se ubica en el suroeste de Nicaragua específicamente en la cuenca sur del Lago de Managua (Xolotlán). El municipio tiene un área total de 237.4 km<sup>2</sup> de extensión, de los cuales 173.7 km<sup>2</sup> son del área urbana. La población estimada es de 1,028,808 habitantes lo que representa una sexta parte de la población total (INIDE, 2012). La altitud promedio es de alrededor de 80 m s.n.m, el clima es tropical y las temperaturas promedio oscilan entre 27° a 32°C, con una precipitación anual promedio de 1,125 milímetros de agua.



El área de estudio en esta monografía corresponde al sector Noreste de la ciudad de Managua, entre las coordenadas 581100E-1344000N y 586000E-1341400N (figura 2.2). Esta limita al norte con el lago Xolotlán, al sur con el municipio de Ticuantepe, al este con el municipio de Tipitapa y al oeste con los municipios de Ciudad Sandino y Villa Carlos Fonseca.

La figura 2.2 muestra el área de estudio seleccionada para llevar a cabo esta investigación.



**Fig. 2.2** Microlocalización del área de estudio en el sector Noreste de la ciudad de Managua (Google earth).

## **2.2. Geología de la Ciudad de Managua**

Litológicamente, la ciudad de Managua esta sobre suelos volcánicos en su mayoría piroclásticos que comprende escorias, cenizas, tobas, pómez, lahares, ignimbritas, coluviales, paleosuelos y material meteorizado. Todos estos materiales se establecieron discordantemente sobre ignimbritas conocidos como Grupo Las Sierras (Hradecky P., 2000).

La ciudad de Managua y sus alrededores, se ubica dentro de una depresión tectónica denominada Graben de Managua, localizada sobre una activa cordillera volcánica



Cuaternaria, que atraviesa el territorio nacional de sureste a noroeste y representa el límite de una estructura deprimida regional, llamada Depresión de Nicaragua.

El Graben de Managua, de orientación norte-sur, se relaciona probablemente con un desplazamiento dextral de la cadena volcánica, asociado a una estructura más joven, de orientación norte-sur, el lineamiento volcánico Nejapa-Miraflores, que la limita al oeste. En tanto, al este, está limitada otra estructura, también de orientación norte-sur, el llamado Sistema de Falla Cofradía. Hacia el norte el graben se pierde dentro del Lago de Managua, mientras hacia el sur, su límite se reconoce que se encuentra dentro de la caldera del Complejo Volcán Masaya. Se trata de una estructura reciente, de tipo trans-tensional y activa que muestra un intenso fracturamiento interno.

Se han reconocido tres diferentes familias de fallas, cuyo origen y actividad se asocian al campo tensional neotectónico.

1. La primera familia de fallas son transcurrentes y ocurren de orientación noreste-suroeste con desplazamiento lateral-izquierdo, como los desplazamientos de la Falla Tiscapa y fallas asociadas. Estas fallas fueron activadas durante los terremotos de 1931 y 1972.
2. El segundo rasgo son de rumbo nor-noroeste-sur-sureste, muestran desplazamiento lateral-derecho y constituye un sistema conjugado con la primera familia de fallas. Este tipo de fallas, ocurren entre otras, a lo largo del Alineamiento Volcánico de Nejapa-Miraflores.
3. La tercera son fallas normales de orientación norte-sur que por su naturaleza tensional, promueven el ascenso de magma. Esto está corroborado por el alineamiento de estructuras volcánica de Nejapa-Miraflores y Veracruz.

Weinberg (1992) y Frischbutter (2002), asocian la actividad de las fallas, dentro del Graben de Managua, a un sistema de compresión orientado norte-sur, relacionado con el hundimiento activo de una cuenca "*pull-apart*". En este modelo, las fallas transcurrentes constituyen un sistema conjugado con desplazamiento lateral derecho (orientación noreste-suroeste-sur-sureste) e izquierdo (orientación noreste-suroeste).

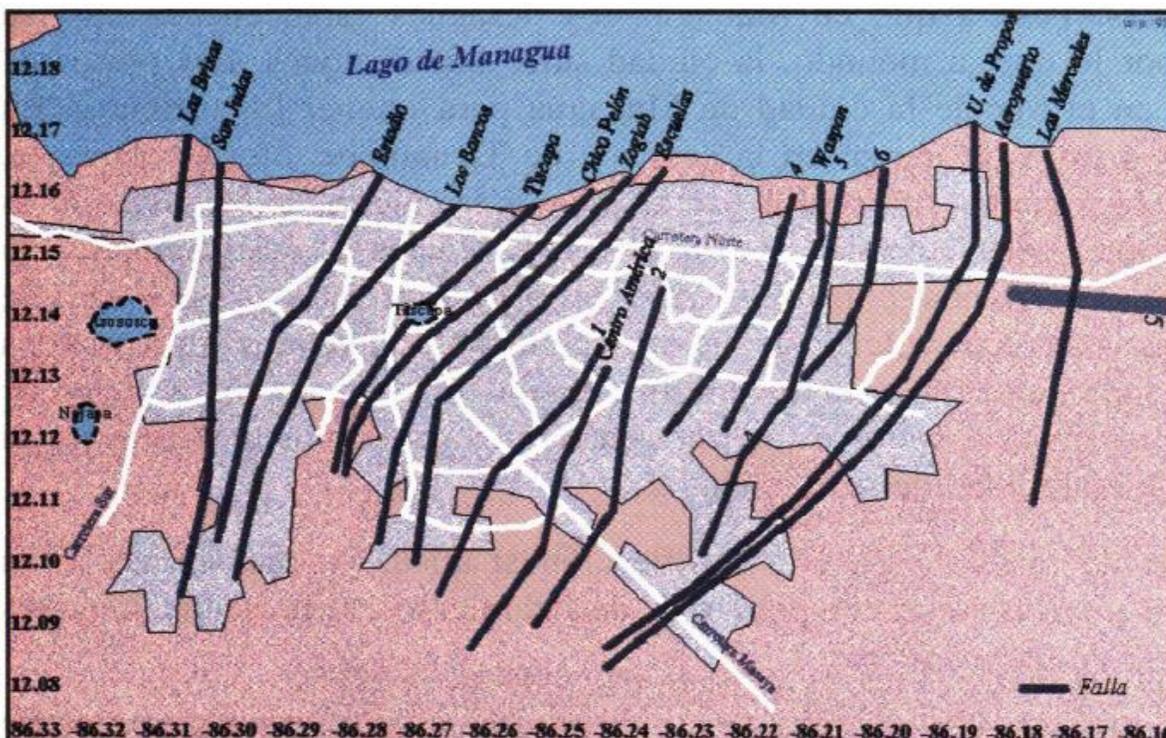


Fig. 2.3 Situación de Fallamiento Geológico de Managua. (INETER, 2000).

### 2.3. Terremotos Históricos

Es conocido por la literatura que la Ciudad de Managua ha sufrido con relativa frecuencia daños producto de sismos originados por diferentes fuentes geológicas. Estos fuertes movimientos telúricos ocasionaron a la ciudad y la nación grandes pérdidas, tanto en las obras de infraestructura construidas en dicha área, como de vidas humanas.

En la tabla 2.1 se presenta un resumen de los sismos históricos que han afectado significativamente la ciudad de Managua durante el periodo de 1885 a 2014.

Tabla 2.1 Sismos Históricos en la ciudad de Managua (INETER, 2000).

Sismos que afectaron Managua	Daños Causados
1885, 11 Nov. 21:30	Terremoto regional en el Océano Pacífico; uno más destructivos causando daños en las ciudades del litoral del pacífico.
1898, 29 Abril. 10:45	Terremoto regional en el Océano Pacífico, causo daños en todo el pacífico; La iglesia San Miguel, el Banco, el Cabildo y Penitenciaría quedaron en ruinas.



1919, 29 Junio. 18:30	Terremoto en el Océano Pacífico; sacudida que fue sentida en Nicaragua, Honduras y el Salvador; violenta sacudida sísmica paralizó el tráfico y hubo daños en el Palacio Nacional.
1926, 05 Nov. 02:20	Violento terremoto, iglesias, establecimientos comerciales, edificios y casas particulares quedaron en escombros. Los daños mayores fueron en León, Managua y Chinandega.
1931, 31 Marzo. 10:19	Ocurrió el 31 de marzo, fue causado por la activación de fallas locales con magnitud de 5.6 (ML). Se estimó que perdieron la vida alrededor de 1,100 personas y los daños se estimaron en \$15 millones.
1938, 11 Mayo. 10:25	Terremoto al Oeste de Managua; provoca pánico en la ciudad e innumerables daños en las infraestructuras, causó derrumbes en Managua, Miraflores, la mina de piedra de Batahola y cerro de las Piedrecitas.
1968, 04 Enero 04:05	El 04 de enero la Ciudad es sacudida por un sismo, sentido además en los departamentos de Masaya, Granada y Carazo. Este tuvo una magnitud de 4.6 (ML) con intensidad máxima de VII y su epicentro estuvo a 6 km hacia el Sur de la Colonia Centroamérica, y la profundidad del foco no fue mayor de 10 kilómetros.
1972, 23 Dic. 00:29	El 23 de diciembre Managua nuevamente es sacudida por el terremoto más devastador que ha sufrido hasta los días de hoy. Este fue causado por la activación de fallas locales y su magnitud fue estimada en 6.2 (ML), con una intensidad variable en distintas zonas de la ciudad, en el orden VIII-IX de la escala modificada de Mercalli.
2014, 10 Abril. 05:40	El 10 de abril Managua nuevamente sufre un terremoto de magnitud 6.2 en la escala de Richter sacudiendo el pacífico de Nicaragua, lo cual causó la muerte de una persona y daños varias viviendas en Mateare, Nagarote, y en algunos barrios capitalinos; el movimiento telúrico ocurrió exactamente en el lago de Managua, frente al municipio de Nagarote, a una profundidad de 10 kilómetros, y con una duración de 45 segundos; además se produjeron unas 350 réplicas al norte del Lago de Managua, tres de ellas con magnitudes considerables: 4.6, 4.4, y 5.4 en la escala de Richter, y a 5 kilómetros de profundidad (INETER, 2014).



### 2.4. Geotecnia de Managua

El primer esfuerzo por caracterizar algunas propiedades de los suelos de Managua se dio después del terremoto de 1972 y uno de los primeros en intentarlo fue Faccioli (1973) quien elaboró un estudio de microzonificación en el área de Managua con propósitos de cimentación; realizando una propuesta de estratigrafía en base al valor de N de los ensayos SPT abordados en su estudio. Los ensayos SPT tuvieron en promedio una penetración de 15 metros. Faccioli (1973), sugiere agrupar los suelos de Managua en tres categorías de acuerdo al número de golpe por pie de penetración (N):

- ➡ Suelos blandos ( $N < 10$ )
- ➡ Suelos medianamente densos ( $10 < N < 50$ )
- ➡ Suelos firmes o compactos ( $N > 50$ )

De acuerdo a su clasificación los suelos superficiales, o suelos blandos, están compuestos por arenas limosas y pertenecen a los suelos de origen aluviales. La segunda capa está compuesta de suelos medianamente densos, y corresponde a arenas de densidad media, pómez, gravas y canteras. La tercera capa corresponde a arenas limosas muy compactadas o talpetate.

Los estudios abordados por Faccioli (1973) permitieron obtener tres perfiles estratigráficos de la ciudad, uno en la dirección N-S y dos en E-W donde se puede apreciar las variaciones en los espesores de las capas del suelo propuesta en las siguientes figuras.

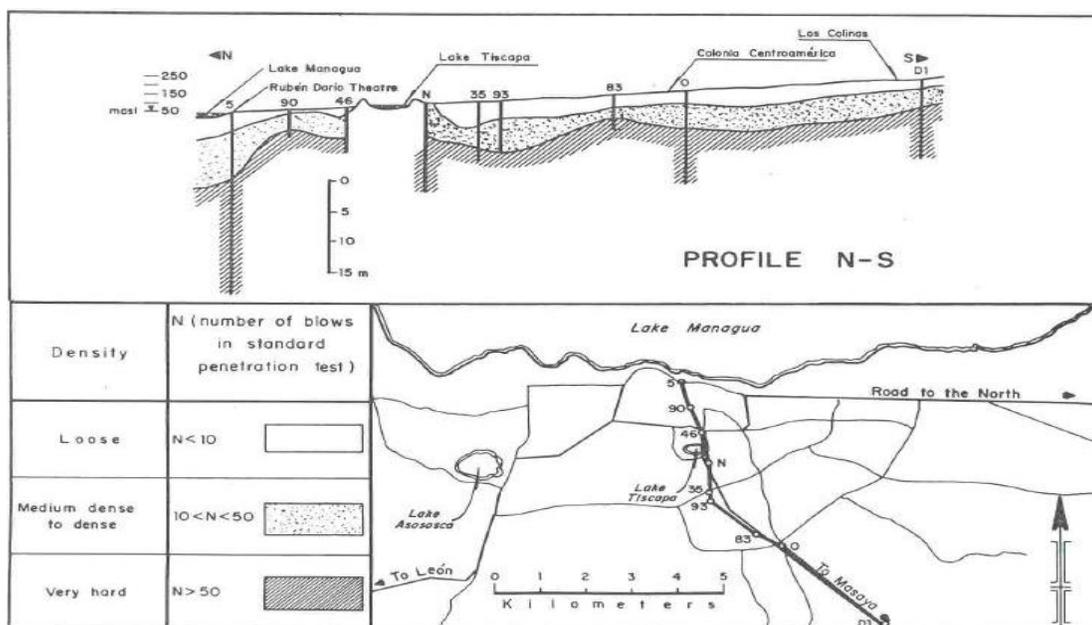


Fig. 2.4 Perfil N-S de estratigrafía de la ciudad de Managua (Faccioli, 1973).

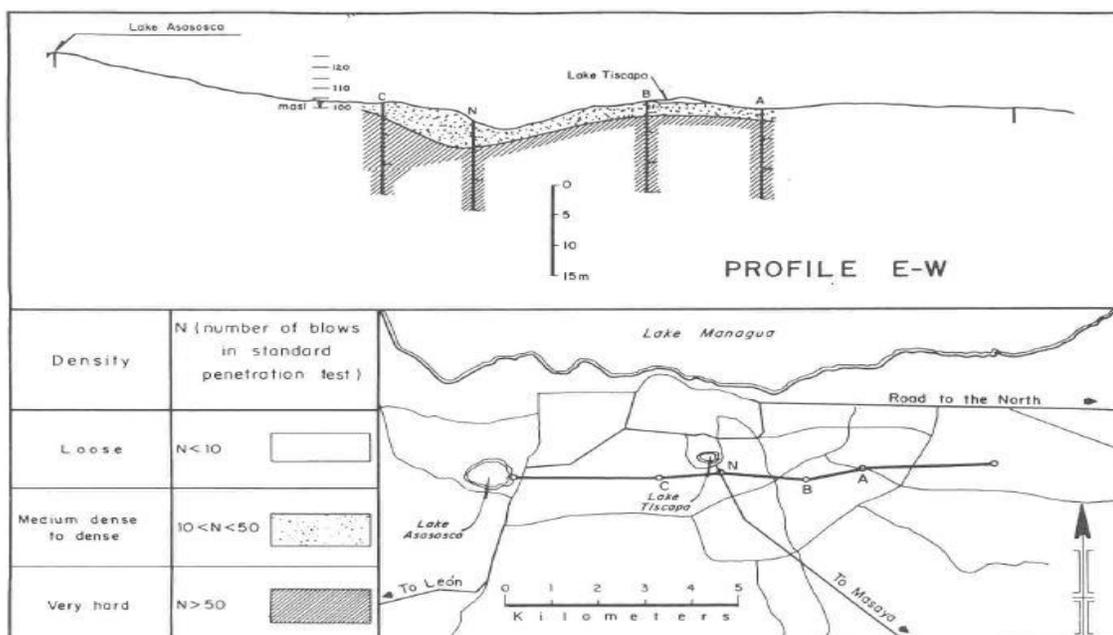


Fig. 2.5 Perfil E-W de estratigrafía en la zona costera al lago de Managua (Faccioli, 1973).

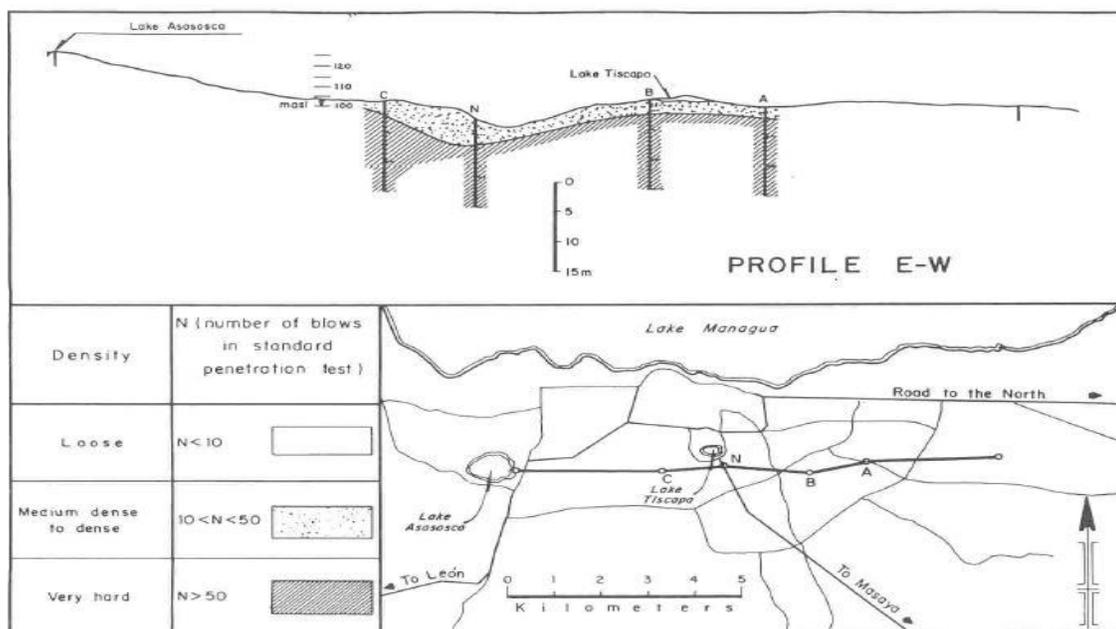


Fig. 2.6 Perfil E-W de estratigrafía en la zona central de la ciudad de Managua (Faccioli, 1973).

### 2.4.1. Estudios Dinámicos de los Suelos de Managua

Las características dinámicas de los suelos de Managua, por lo general se ha basado en ensayos de estudios SPT, de manera que se establece una correlación entre el valor de N y la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) de los diferentes estratos que pudieran componer el suelo.



Para cada sitio de Managua Faccioli (1973), propuso modelos de velocidades en tres estratos (exceptuando el sector de la refinería que contenía dos estratos). Las velocidades en basamento propuestas se encontraban en un rango de 550 a 600 m/s por lo que probablemente, se requiere de perforaciones a mayores profundidades para encontrar un basamento con características de roca (velocidades superiores a 760 m/s).

Escobar y Corea (1998) y R.M. Parrales y Picado (2001) desarrollaron investigaciones que permitieron realizar propuestas de modelos de velocidades para cada sitio de estudio basándose en perforaciones para ensayos SPT. Sin embargo, estas investigaciones no pudieron superar las limitantes en cuanto a profundidad de sondeo que tuvo Faccioli et al. (1973), de manera que las profundidades de exploración en promedio no superaron los 20 metros.

En la actualidad se cuenta con una considerable cantidad de estudios para determinar parámetros dinámicos del suelo en la ciudad de Managua; pero, en sitios muy localizados. Dichos estudios realizados, fueron elaborados con fines de determinar el periodo fundamental de los suelos de Managua, lo cual es importante tenerse en cuenta en el momento del diseño de estructuras civiles; uno de ellos fue elaborado para estudiar periodos cortos de vibración (menor o igual que 1s) por Hernández (2009), en él se desarrolló una propuesta de zonificación de la ciudad en base a mediciones de ruido ambiental.

Así mismo Escorcia & Ochoa (2013) y Castillo & Zepeda (2013), desarrollaron modelos de velocidades de ondas de corte con la aplicación y análisis del método MASW, obteniendo perfiles de hasta 50 m de profundidad.

También se cuenta con estudios recientes elaborados en el 2014 por Castrillo et al (2014) presentaron un estudio con mediciones a detalles para proponer una microzonificación sísmica en el antiguo sector central de Managua, este estudio se basó en periodos largos de vibración de los suelos (0.1 a 10s). Ambos estudios realizaron una agrupación por familias de los cocientes o razones espectrales (H/V) que tuvieran una similitud en frecuencia y amplificación. De esta manera se logró agrupar suelos que tuvieran una respuesta sísmica muy similar.



El mapa de la Figura 2.7 representa la zonificación propuesta en base al periodo corto de vibración de los suelos en Managua.

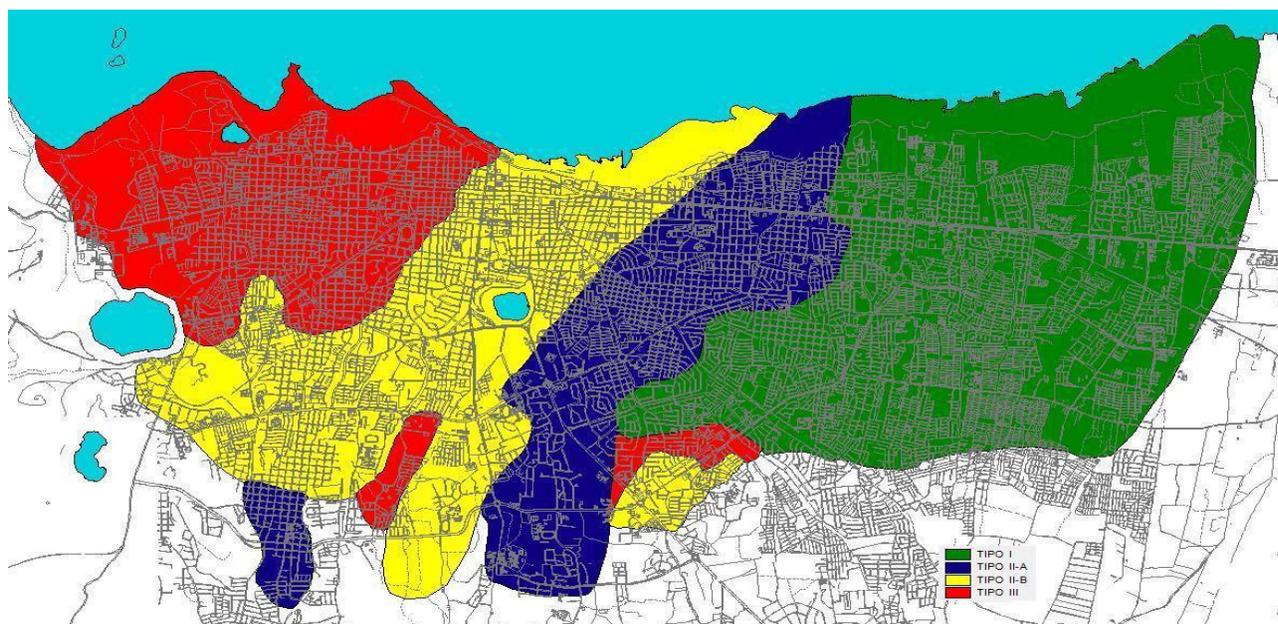


Fig. 2.7 Clasificación de suelos para la ciudad de Managua (Hernandez, 2009).

### 3. FUNDAMENTOS TEORICOS

#### 3.1. Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas son vibraciones que viajan a través de la Tierra, originadas súbitamente por el fracturamiento del material rocoso en el interior de la Tierra debido a diversas fuentes. Dichas ondas están compuestas por energía que viaja a través de la Tierra y son registradas por diversos aparatos, como son los sismógrafos. Las ondas sísmicas se pueden dividir en dos categorías: las **ondas internas** que viajan por el interior de la Tierra y las **ondas superficiales** que viajan por la superficie de la interface terrestre, (Biot, 1962).

##### 3.1.1. Ondas Internas

Las ondas internas o de cuerpo viajan a través del interior de la Tierra, siguiendo caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la Tierra. Este efecto es similar al de refracción de ondas de luz. Las ondas de cuerpo transmiten los temblores preliminares de un terremoto pero poseen poco poder destructivo. Estas son divididas en dos grupos: ondas primarias (P) y secundarias (S), (Stein & Wysession, 2003).



## Ondas P

Las ondas P son longitudinales o compresionales; estas ondas causan que el suelo se comprima y se dilate en la dirección de la propagación las que son capaces de viajar a través de cualquier material. Su velocidad es 1,73 veces mayor que la velocidad de las ondas S además pueden viajar a través de cualquier tipo de material; las velocidades típicas en que viajan estas ondas en el aire esta entre 330 m/s, en el agua de 1450 m/s y cerca del granito es de 5000 m/s por lo estas son las primeras ondas registradas en el sismograma, (Stein & Wysession, 2003).

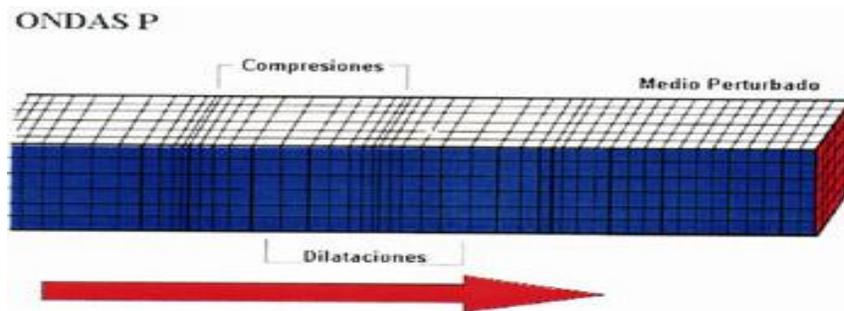


Fig. 3.1 Modelo de propagación de Ondas P.

## Ondas S

Las ondas S son ondas de corte o transversales, lo cual significa que el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternándose hacia un lado y otro. Su propagación depende del módulo de corte y de la densidad del medio; por lo que viajan únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no soportan esfuerzos de corte. Teniendo una velocidad de aproximadamente el 58 % al de una onda P para cualquier material sólido por lo que su amplitud es mayor, estas ondas en la región próxima al epicentro del sismo son capaces de generar la mayoría de los daños, ya que generan la deformación del terreno, (Stein & Wysession, 2003).

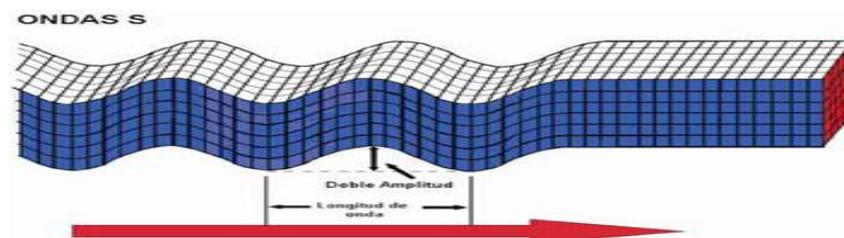


Fig. 3.2 Modelo de propagación de ondas S.



### 3.1.2. Ondas Superficiales

Las ondas superficiales son análogas a las ondas de agua y viajan sobre la superficie de la Tierra, estas se desplazan a menor velocidad que las ondas de cuerpo. Debido a su baja frecuencia provocan resonancia en edificios con mayor facilidad que las ondas de cuerpo y son por ende las ondas sísmicas más destructivas. Existen dos tipos de ondas superficiales: ondas Rayleigh y ondas Love, (Stein & Wysession, 2003).

#### Ondas LOVE

Las ondas Love producen un movimiento horizontal de corte en la superficie, su velocidad es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh, representando un 90% de la velocidad de las ondas S. Fueron bautizadas por A.E.H. Love, un matemático británico que creó un modelo matemático de las ondas en 1911 (Stein & Wysession, 2003).

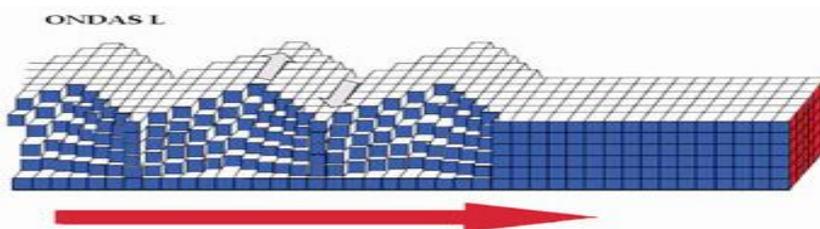


Fig. 3.3 Modelo de propagación de Ondas Love.

#### Ondas RAYLEIGH

Las ondas Rayleigh, producen un movimiento elíptico retrogrado del suelo; su velocidad de propagación es aproximadamente un 70% de la velocidad de las ondas S. La amplitud de su movimiento disminuye exponencialmente con la profundidad, estas ondas pueden ser generadas por fuentes activas, como terremotos, explosiones, golpes de martillo, o por fuentes pasivas tales como el movimiento de vehículos, efectos causados por viento, mareas, etc; la existencia de estas ondas fue predicha por John William Strutt (Stein & Wysession, 2003).

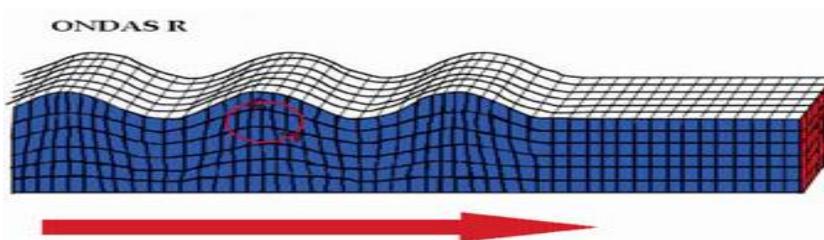


Fig. 3.4 Modelo de propagación de Ondas Rayleigh.



### 3.1.3. Fuentes de Ondas Sísmicas Superficiales

Las ondas sísmicas superficiales provienen de diferentes fuentes, a continuación se presenta una tabla donde se clasifican estas fuentes según su origen con respecto a la Tierra.

**Tabla 3.1** Clasificación de las fuentes de ondas sísmicas según su origen (Modificado de Lay y Wallace 1995).

Internas	Externas	Mixtas
Fallas Sísmicas.	Vientos, Presión Atmosférica.	Erupciones Volcánicas.
Explosiones Internas.	Oleaje y Mareas.	Deslizamientos.
Flujo Hidrológico.	Ruido Cultural (Tráfico y Trenes).	Avalanchas.
Movimientos del Agua.	Impacto de meteoritos.	
Explotación Minera Subterránea.	Exploración Minera Superficial.	
	Lanzamiento de Cohetes.	
	Aterrizaje y Decolaje de Aviones.	

### 3.2. Métodos Experimentales y Empíricos para Evaluar el Efecto de Sitio.

Para determinar la amplificación relativa ( $A_r$ ) y el periodo natural de vibración ( $T_0$ ) del suelo, se utilizan los registros de: movimientos sísmicos fuertes, movimientos sísmicos débiles o moderados y microtemores (vibración ambiental). Con estos registros se obtienen resultados que se complementan con los adquiridos a partir de modelos analíticos de propagación de ondas que idealizan la estratigrafía superficial como un medio continuo o uno discreto (Ohtsuki A y Yamahara, 1984); cabe decir que para la aplicación de estos modelos Chávez et al., (1987), es necesario contar con información sismológica de la región donde se encuentra el sitio de interés, así como con información geotécnica de la estratigrafía en dicho sitio.

#### 3.2.1. Movimientos Sísmicos Fuertes

Un estudio importante sobre efectos de sitio que es utilizado en microzonación sísmica, es el uso directo de registros de movimientos sísmicos fuertes, debido a que incluyen efectos no lineales y amplios contenidos de frecuencias. Una de las restricciones en este análisis de movimientos sísmicos fuertes es que sólo se aplica para los lugares donde los instrumentos de registro están densamente colocados y donde la sismicidad es elevada, Chavez et al., (1987).



### **3.2.2. Movimiento Sísmico Débiles o Moderados**

Estudios de Lermo. J., & Chavez Garcia F.J., (1994a), entre otros demostraron una correlación del factor de amplificación para un sitio entre datos de movimientos débiles o moderados y datos de movimientos fuertes. Una parte debatida de la aplicabilidad de estos registros es la presencia de efectos no lineales durante movimientos sísmicos fuertes del terreno. Así mismo estos aportan información útil para realizar una estimación preliminar del nivel de amplificación del suelo durante un sismo.

### **3.2.3. Microtremores**

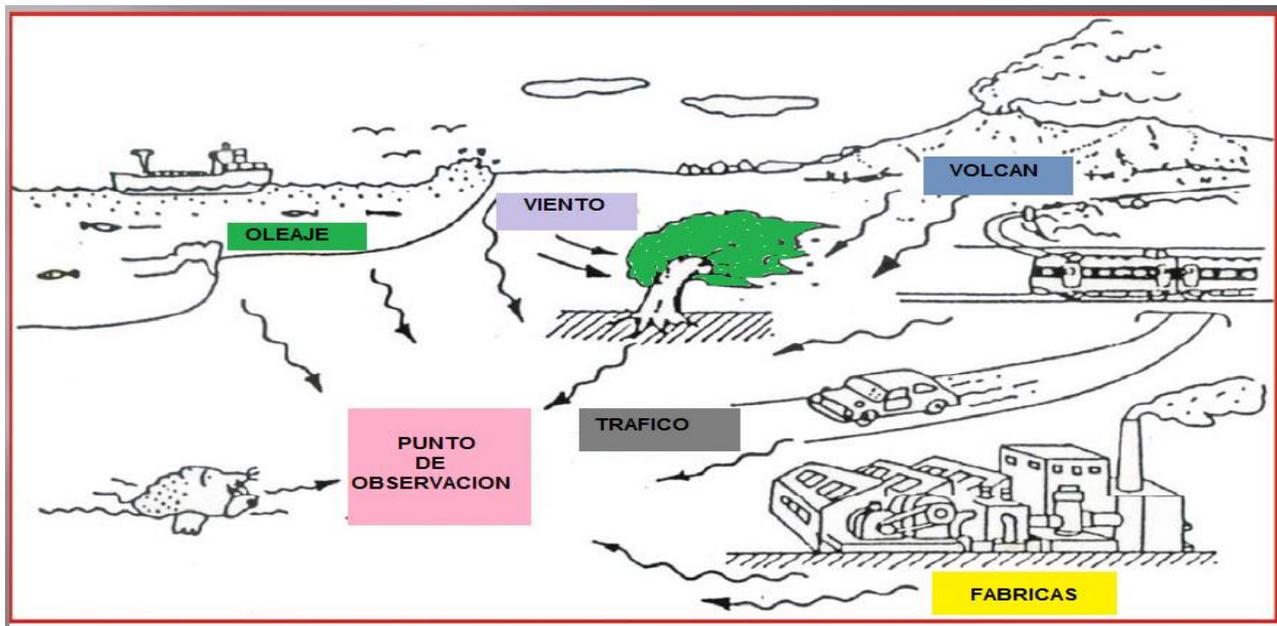
También son conocidos como microtrepidaciones, microsismos, vibración o ruido ambiental, pueden definirse de varias maneras: a) vibraciones en la superficie debidas a la incidencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía; b) una superposición de ondas superficiales, que constituyen un campo estacionario y homogéneo; c) el ruido ambiental generado por fuentes naturales y culturales, como el tráfico vehicular o la actividad humana (Flores-Estrella H., 2004) y d) ondas sísmica con energía relativamente baja, con amplitudes típicas dentro del rango de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  mm, (Roberts, 2004).

Los microtremores han sido utilizados en la ingeniería sísmica desde mediados del siglo XX, con el fin de caracterizar suelos y estructuras; inicialmente su utilización se centró en la determinación de emplazamientos para estaciones sismológicas, aplicación que se sigue dando en la actualidad; la segunda utilización de los microtremores es la caracterización dinámica de suelos y estructuras, es decir, la determinación de la función de transferencia, la cual incluye la información de los periodos dominantes y las amplificaciones asociadas, (Peterson, 1993).

El ruido ambiental es la superposición de las vibraciones del suelo producidas por efectos naturales o artificiales; puesto que la superficie terrestre vibra constantemente, con amplitudes muy pequeñas del orden de micrómetros. Los microtremores se definen como vibraciones del suelo con amplitudes entre  $1 \times 10^{-5}$  y  $1 \times 10^{-4}$  cm, con periodos de 0.05, 0.1 a 1.0, 2.0s, generados por el tránsito vehicular, maquinaria, vibraciones de las estructuras civiles, ferrocarriles, viento que hace oscilar árboles, etc; los resultado de las investigaciones con microtremores, concluyeron que el periodo dominante para un movimiento sísmico fuerte o débil está bastante relacionado con el periodo dominante para microtremores (Kanai K y Tanaka T., 1961).



Así mismo los periodos asociados a los máximos espectrales de microtremores ocurren, aproximadamente para los mismos periodos asociados a los máximos del espectro de Fourier de aceleración de movimientos fuertes (Lermo J & Chavez Garcia F. J., 1994a); no obstante las mediciones de microtremores han presentado un alto atractivo para la caracterización de la respuesta de un sitio, tanto por su sencillez de operación y su bajo costo como por la rapidez con que se obtienen resultados.



**Fig. 3.5** Tipos de fuentes de origen natural y artificial que originan la vibración ambiental (Lermo J & Chavez Garcia F. J., 1994a).

### **3.3. Métodos teóricos y Numéricos**

Los resultados que se obtienen a partir de las técnicas empíricas, pueden complementarse con los obtenidos a partir de modelos analíticos de propagación de ondas que idealizan la estratigrafía superficial como un medio continuo o uno discreto (Ohtsuki y Yamahara, 1984). Para aplicar los modelos teóricos y numéricos es necesario contar con información sísmológica de la región donde se encuentra el sitio de interés, así como con información geofísica y geotécnica de la estratigrafía en dicho sitio.

Uno de los resultados de estos métodos es el resuelto por Thomson-Haskel que es un método matricial que permite calcular la función de transferencia de una estratigrafía. Aunque sólo admite estratos planos horizontales y paralelos, la solución satisface exactamente condiciones de frontera en todo el dominio y permite considerar incidencia oblicua de ondas *SH* (ondas S polarizadas horizontalmente), (Chávez-García y Sánchez-Saesma, 1986).

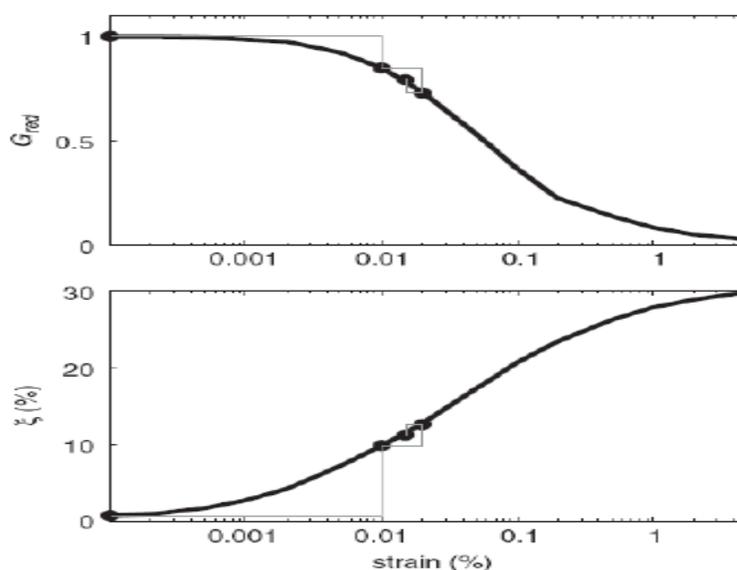


### 3.3.1. Métodos Lineal Equivalente

La evaluación numérica de respuesta sísmica de sitio está sustentada en la teoría de propagación de ondas en una dimensión originalmente formulada por Haskell (1953). Esta teoría, sin embargo, se limita a la idea de que los estratos son de espesor uniforme en la dirección horizontal, por tanto no considera el efecto de variación lateral del suelo (heterogeneidad). Para considerar este efecto se requiere del uso de algoritmos más avanzados tales como los métodos de elemento finito o diferencia finita.

Teniendo la teoría de propagación de ondas y basados en la práctica, se conoce que el módulo de rigidez ( $G$ ) y amortiguamiento ( $\xi$ ) tienen una dependencia funcional con la deformación ( $\gamma$ ). El material de suelo es aproximado asumiendo un material tipo Kelvin-Voigt ampliamente usado por muchos autores (Bardet & Tobita, 2001; Joyner & Chen, 1975). Sin embargo, esto requiere la obtención de información geotécnica que en estudios a escala no es una solución viable. Por consiguiente se debe adoptar un enfoque iterativo que permita la obtención de un valor probable para el manejo de ecuaciones diferenciales lineales (Bardet, Ichii, & Lin, 2000; Idriss & Sun, 1992; Schnabel, Lysmer, & Seed, 1972).

El análisis lineal equivalente para respuesta de sitio se basa en las relaciones existentes entre  $G$ ,  $\xi$  y  $\gamma$ . Esta relación es cuantificada en términos del módulo de rigidez y el factor de amortiguamiento a través de curvas que permiten relacionar ambos con el porcentaje de deformación en el suelo.



**Fig. 3.6** Curvas de módulo de rigidez y factor de amortiguamiento para materiales viscoelásticos (Robinson et al., 2006).



El módulo de rigidez ( $G_{red}$ ) está dado por:  $G_{red} = \frac{G_{sec}}{G_{max}}$  (Ecuación 3.1)

Dónde:  $G_{max} = \rho(V_s^2)$  y  $G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$  (Ecuación 3.2 y 3.3)

Donde,  $\tau_c$  y  $\gamma_c$  y representan la amplitud por el esfuerzo cortante y la deformación por corte, respectivamente (Kramer, 1996). Las curvas del módulo de rigidez y amortiguamiento deben ser seleccionadas para cada una de las capas de los estratos que conforman el modelo del suelo. Estas curvas permiten cuantificar como cada estrato está actuando cuando están expuestos a la energía de propagación de terremoto. Un análisis lineal equivalente de sitio se desarrolla bajo los siguientes pasos:

- a. Asignar valores iniciales para el  $G_{red}$  y  $\xi$  para cada estrato por una lectura del primer valor en sus respectivas curvas. Este primer valor corresponde al esfuerzo más pequeño probable con el que la curva es definida.
- b. Utilizar el valor de  $G_{red}$  y  $\xi$  asignado previamente para calcular el esfuerzo en función del tiempo como se describió previamente.
- c. Calcular el esfuerzo máximo en cada estrato  $\gamma_j^{(max)}$  y el esfuerzo efectivo por corte en cada estrato utilizando:

$$\gamma_j^{(eff)} = R_\gamma \gamma_j^{(max)} \quad \text{(Ecuación 3.4)}$$

Donde,  $R_\gamma$  representa la tasa de variación del esfuerzo de tensión. El esfuerzo de tensión efectivo representa una medida más realista de la tensión inducida por un periodo de tiempo como esfuerzo máximo, ya que el máximo se alcanza solamente para intervalos cortos de tiempo. Por lo general, se elige un valor de 0.65 para la tasa de variación del esfuerzo de tensión. Sin embargo, para mayor precisión,  $R_\gamma$  puede calcularse a partir de la magnitud del sismo (Idriss & Sun, 1992) utilizando la ecuación:

$$R_\gamma = \frac{M - 1}{10} \quad \text{(Ecuación 3.5)}$$

- d. Calcular  $\log_{10} = (\gamma_j^{(eff)})$  y utilizarlo para determinar nuevos valores de  $G_{red}$  y  $\xi$  por interpolación lineal en las curvas de módulo de rigidez y amortiguamiento.
- e. Comparar las diferencias porcentuales usando las ecuaciones (3.6) y (3.7) para una tolerancia predefinida.



$$\frac{100|G_{red}^{(i)} - G_{red}^{(i+1)}|}{G_{red}^{(i+1)}}; \frac{100|G_{red}^{(i)} - G_{red}^{(i+1)}|}{G_{red}^{(i)}} \quad \text{(Ecuación 3.6)}$$

$$\frac{100|\xi_{red}^{(i)} - \xi_{red}^{(i+1)}|}{\xi_{red}^{(i+1)}}; \frac{100|\xi_{red}^{(i)} - \xi_{red}^{(i+1)}|}{\xi_{red}^{(i)}} \quad \text{(Ecuación 3.7)}$$

Donde  $i$  y  $i + 1$  se refieren a la iteración previa y la actual, respectivamente. Si ninguna de las diferencias porcentuales es mayores que la tolerancia,  $G_{red}$  y  $\xi$  y son reasignados al valor  $i + 1$ , y se repite el proceso de la etapa b usando los nuevos valores de  $G_{red}$  y  $\xi$ . Este procedimiento iterativo se ilustra en la Figura 3.6. Por el contrario, si todos los porcentajes son más pequeños que la tolerancia, los parámetros actuales son aceptados. Una tolerancia del 5% es generalmente aceptada y por lo general conduce a la convergencia en 3 a 4 iteraciones.

### **3.4. Métodos de Prospección Sísmica.**

#### **3.4.1. Métodos Pasivos**

Son los métodos geofísicos basados en el análisis de los microtemores; estos no requieren que se genere ninguna señal, como por ejemplo las producidas por las explosiones en la prospección sísmica (Castellaro et al, 2005). El objetivo de los métodos de Sísmica Pasiva es evaluar de forma indirecta y no destructiva algunas propiedades de los suelos, registrando vibración ambiental. Para ello se utiliza un arreglo instrumental bidimensional sobre la superficie o un sólo instrumento; es decir, puede registrarse sólo la componente vertical (Z) o las tres componentes de movimiento (X-Y-Z). El análisis de estos datos se puede realizar con métodos de dispersión de ondas superficiales o por medio de las características de las capas más superficiales como son: la frecuencia fundamental y la amplificación asociada (Flores-Estrella H., 2004).

##### **3.4.1.1. Técnica de Autocorrelación Espacial (SPAC)**

Esta técnica de sísmica pasiva se basa en la suposición de que los microtemores están formados por ondas superficiales, y tiene como objetivo calcular la velocidad de fase para cada frecuencia, a partir de registros simultáneos de microtemores obtenidos de un arreglo instrumental formado por al menos cuatro estaciones (Alfaro,2005a,2005b).

La técnica de Autocorrelación Espacial (SPAC, por su siglas en inglés) fue desarrollada por Aki (1957, 1965) donde presento los fundamentos teóricos para estimar las velocidades de fase, utilizada por Okada (2003) y Morikawa et al. (2004). Aki demostró teóricamente que



una función de autocorrelación espacial entre dos estaciones será una función Bessel de primer tipo y orden cero con el argumento de número de onda bajo la suposición de distribución aleatoria de la dirección de propagación con una velocidad fija. Usando estas relaciones, el autor obtuvo curvas de dispersión de ondas superficiales observadas de un arreglo de datos de microtemores. Es importante mencionar otra técnica, el método del espectro Frecuencia-Número de Onda (F-K) desarrollada por Capon (1969) y aplicada a microtemores por Horike (1985). La segunda tuvo mayor auge dado que permite, adicionalmente determinar el origen de la fuente que produce la señal sísmica. En las últimas décadas las dos técnicas se han utilizado más, debido a la posibilidad del registro digital y a la reducción del costo de los sismógrafos, lo que ha facilitado la realización de los arreglos y el procesamiento de los datos.

La técnica SPAC permite obtener los perfiles de Vs, la posibilidad de alcanzar importantes profundidades en áreas urbanas, comparado con los métodos convencionales de prospección geofísica, hacen del Método de Exploración con arreglos de microtemores, una herramienta atractiva y útil para estudios de microzonificación en países en vías de desarrollo como es Nicaragua.

La función de Autocorrelación Espacial se define en las siguientes ecuaciones:

$$\phi(\omega, r, \theta) = \langle u(t; \omega, 0, 0) * u(t; \omega, r, \theta) \rangle \tag{Ecuación 3.8}$$

Dónde:  $\langle u(t; \omega, 0, 0) * u(t; \omega, r, \theta) \rangle$  denotan las ondas armónicas con una frecuencia angular  $\omega$ , las cuales se obtienen en el centro del arreglo y en los diferentes puntos (Morikawa *et al.*, 2004).

Los coeficientes de la Autocorrelación Espacial están definidos como el promedio de las funciones SPAC evaluadas en todos los puntos de observación del arreglo circular, como se muestra en la ecuación 3.9.

$$\rho(\omega, r) = \frac{1}{2\pi * \phi(\omega, 0, 0)} \int_0^{2\pi} \phi(\omega, r, \theta) d\theta \tag{Ecuación 3.9}$$

En la ecuación 3.9  $\phi(\omega; 0, 0)$  es la función de Autocorrelación en el centro C (0,0). Después de una simplificación matemática, la integral de la ecuación 3.9 se puede reescribir como se muestra en la ecuación 3.10.



$$\rho(\omega; r) = J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

Donde  $J_0$  es la función *Bessel* de tipo uno, de orden cero y  $c(\omega)$  es la velocidad de fase a la frecuencia  $\omega$  de las ondas Rayleigh con el modo fundamental.

Los coeficientes SPAC de la ecuación 3.9 pueden calcularse directamente en el dominio de la frecuencia utilizando la Transformada de Fourier de los microtemblores como se muestra en la ecuación 3.11.

$$\rho(\omega; r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\text{real}[S_{cx}(\omega; r, \theta)]}{\sqrt{S_c(\omega; 0, 0) * S_x(\omega; r, \theta)}} d\theta \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

Donde  $\text{real} [ ]$  denota la parte real del número complejo,  $S_c(\omega; 0, 0)$  y  $S_x(\omega; r, \theta)$  son los espectros de potencia de los microtemblores en los sitios,  $C(0, 0)$  y  $X(r, \theta)$  respectivamente.  $S_{cx}(\omega; r, \theta)$  es el espectro cruzado entre  $S_c(\omega; 0, 0)$  y  $S_x(\omega; r, \theta)$ .

Se puede observar en las ecuaciones 3.9 y 3.11 que los coeficientes SPAC se obtienen promediando las funciones de coherencia de acuerdo con la localización  $\theta$ , donde las funciones de coherencia se definen como la parte real del espectro cruzado  $S_{cx}(\omega; r, \theta)$  normalizado por el espectro de potencia en  $C(0, 0)$ .

Los coeficientes SPAC  $\rho(\omega, r)$  pueden ser calculados directamente a partir de los datos observados utilizando la ecuación (3.11). Lo cual es fácil de realizar aplicando alguna técnica numérica tal como la transformada rápida de Fourier (FFT). Adicionalmente, la velocidad de fase a una frecuencia  $\omega$  puede obtenerse del argumento de la función Bessel en la ecuación (3.10).

### 3.4.2. Métodos Activos

En el método activo, una fuente transitoria o continua se usa para generar ondas superficiales con un rango de frecuencias variable según el interés de la investigación, y además se usa un arreglo de receptores en una dimensión es decir lineal, para monitorear la respuesta del suelo causado por la propagación de las ondas. El método está limitado en su habilidad para muestrear suelos profundos, debido a la dificultad de generar energía de baja frecuencia con fuentes razonables, (Park., Miller 2001).

### 3.4.2.1. Multi-Channel Analysis of Surface Wave (MASW)

La técnica de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), se han convertido en una alternativa atractiva para la caracterización de las propiedades dinámicas del suelo, pues muestran resultados satisfactorios en un gran número de casos; este método sísmico es no destructivo, permitiendo evaluar el espesor de las capas del subsuelo, así como también los módulos elásticos lineales de los materiales por debajo del subsuelo (Park C Miller., 2001).

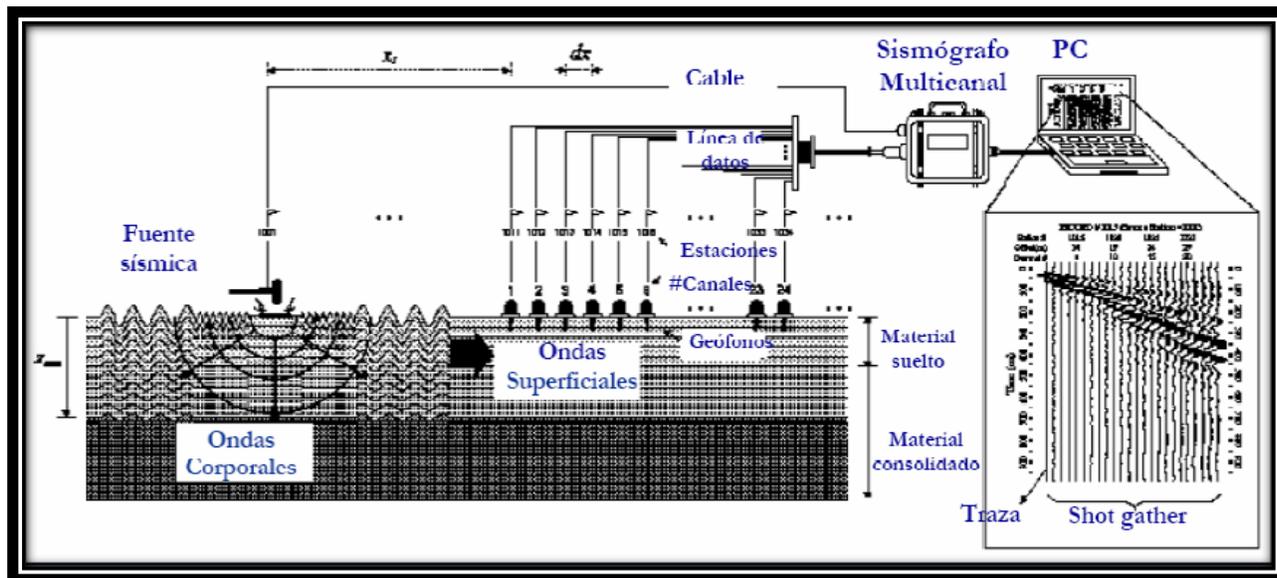


Fig. 3.7 Arreglo para levantamiento del perfil Técnica MASW (Park C Miller., 2001).

#### Procedimiento general en cada etapa del método:

##### ➡ Adquisición.

Esta etapa consiste en la adquisición de datos de campo, la cual se hace por medio de una línea de geófonos como se muestra en la figura 3.8. Los geófonos se colocan espaciados de manera uniforme y las ondas de superficie se generan usando el impacto de un martillo en una placa metálica que se ubica una cierta distancia de uno de los geófonos de los extremos de la línea de sondeo.

##### ➡ Extracción de curva de dispersión.

Una vez adquiridos los sismogramas para cada geófono en la posición indicada, se pasa a la siguiente etapa que consiste en el procesamiento de las trazas para obtener la curva de dispersión, la cual se extrae de la porción de ondas de superficie que contienen los registros.



### ➔ **Inversión.**

Habiendo obtenido la curva de dispersión de campo, se hace el proceso de inversión para obtener el modelo de velocidad de cortante para el sitio.

### **3.4.3. Métodos Híbridos.**

Resultan de una combinación entre los métodos activos y los métodos pasivos.

#### **3.4.3.1. Análisis de Microtremores; Refracción Microtremor (REMI).**

Este método de la Sísmica Pasiva consiste básicamente en determinar la distribución de los valores de la velocidad de transmisión de las ondas de cizalla ( $V_s$ ) a través del terreno, a partir del análisis espectral del ruido sísmico ambiental (Granda et al, 2005). El importante significado geotécnico de los valores de  $V_s$  del terreno hace que el método que se presenta sea de indudable interés. La puesta en práctica de este método se realiza siguiendo tres pasos principales (Granda et al, 2005):

- ➔ Análisis Espectral de Velocidades
- ➔ Selección de la Dispersión Fase-Velocidad de la onda Rayleigh.
- ➔ Modelado de la velocidad de onda S.

A partir de las mediciones sísmicas mediante el método ReMi adquiridas en campo, se obtiene el modelo geológico superficial del sitio de estudio, así como la velocidad de ondas de corte, respecto a la profundidad del modelo geológico obtenido. Este parámetro, junto con la clasificación de suelos, el período fundamental de vibración y factor de amplificación, son los denominados parámetros geotécnicos y permiten la descripción mecánica, hidráulica e ingenieril del suelo a ser empleado para una determinada construcción, con la finalidad de evitar el riesgo a la estructura y, por lo tanto, al ser humano, (Jhon Louis, 2001).

### **3.5. Caracterización de Sitio.**

#### **3.5.1. Microzonificación Sísmica.**

La microzonificación Sísmica es un procedimiento para la estimación de la amenaza sísmica a partir de parámetros de cuantificación del movimiento del suelo y algunos fenómenos relacionados, tomando en cuenta los efectos de las condiciones locales del sitio. El subsuelo y las condiciones topográficas pueden amplificar o reducir el pico de aceleración del suelo en un sitio con respecto a lo que podría esperarse para un substrato consolidado en ese mismo punto.



Los efectos locales de sitio son la base de lo que sería un mapa de microzonificación sísmica. Cuando se encuentran disponibles, los parámetros de microzonificación sísmica pueden utilizarse conjuntamente con otros datos científicos, integrándolos en un sistema adecuado de procesamiento e interpretación para realizar mapas de planificación urbana, preparados a partir de la interacción entre los sistemas de: tierra sólida, ambiental, social, económico y político, con el fin de proveer datos de entrada confiables a los ingenieros estructurales para el diseño de edificaciones sismorresistentes (Dasmohapatra, 2005).

Los aspectos más significativos a estudiar en los estudios de microzonificación son:

- Propiedades geotécnicas de los suelos, espesor, densidad, velocidad de ondas transversales, módulo de rigidez, resistencia, SPT, etc.
- Condiciones topográficas que puedan amplificar la respuesta sísmica.
- Peligrosidad frente a tsunamis en zonas costeras.

Para la estimar los efectos de sitio en la microzonificación sísmica, se debe conocer las características del basamento en donde el movimiento del suelo es aplicado. El basamento está dividido en 2 tipos: el basamento geológico es la roca rígida que contiene velocidades de onda de corte de más de 3, 000 m/s y el basamento ingenieril es la roca elástica, con velocidades de onda de corte de más de 700 m/s, la que usualmente se utiliza para el diseño de estructuras.

En un estudio de microzonificación se requiere estimar la amplificación sísmica generada por un movimiento en el suelo (Figura 3.8). Mediante un proceso de deconvolución el registro obtenido en superficie de un sismo se transmite a la roca para aproximar el movimiento puro en el basamento.

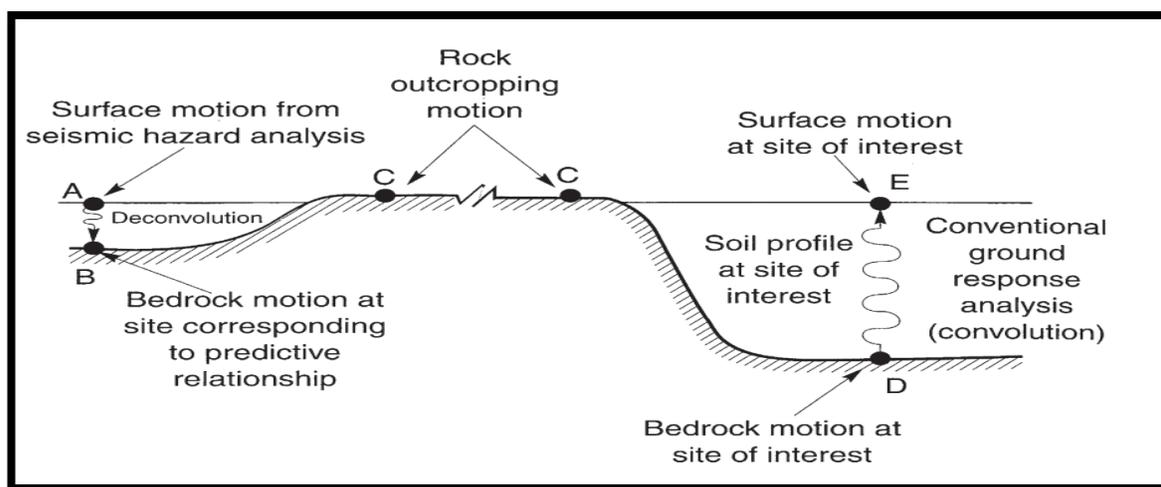


Fig. 3.8 Idealización de una respuesta de sitio (Kramer, 1996).



### **3.5.2. Efecto de Sitio.**

En los estudios de efecto local o de sitio se deben de considerar; las propiedades geológicas y dinámicas del material en el sitio, la topografía superficial, la composición y dirección de la radiación incidente en la base rocosa (Chavez et al., 1987). Sin embargo, dada la complejidad del problema, la mayoría de los estudios se realizan considerando solamente algunos de los elementos antes descritos o una combinación de ellos. Así, el efecto local se puede enfocar abordándose solo desde el punto de vista de la geología superficial.

Las principales variables que influyen en la severidad de un sismo y por tanto en la amenaza sísmica son:

- ➡ Ubicación del epicentro, dada por sus coordenadas y su profundidad focal, con lo cual queda señalada la ubicación del foco.
- ➡ Tamaño o magnitud del sismo.
- ➡ Mecanismo de generación y la dirección de propagación de la ruptura.
- ➡ Las características del medio a través del cual viajan las ondas sísmicas.
- ➡ La distancia epicentral.
- ➡ Las características locales del sitio de observación.

Esta última se le conoce como efecto de sitio y se define como la influencia de las propiedades geotécnicas, geológicas y topográficas de los estratos más superficiales de la corteza terrestre en las características de los movimientos sísmicos esperados para un sitio (Chávez et al., 1987).

El efecto de sitio se manifiesta en los estratos superficiales de la corteza terrestre, para cuantificarlo es necesario determinar la respuesta dinámica de la estratigrafía de suelo en el sitio de estudio; el subsuelo puede presentarse como un depósito de suelos con diferentes propiedades mecánicas cuya base es una formación rocosa; el cual tiene una profundidad de roca basal que podría estar a varias decenas o centenas de metros bajo la superficie del terreno (Trueba, 1991).

Ante la ocurrencia de un terremoto, la señal sísmica llega a la formación rocosa basal filtrándose a través del medio estratificado y finalmente se manifiesta en la superficie libre. Si la amplitud de la señal sísmica en superficie libre es mayor que la correspondiente en la formación rocosa basal, ocurre una amplificación del movimiento respecto a la base rocosa.



De modo que los parámetros que se obtienen para cuantificar el efecto de sitio son: la amplificación relativa y el periodo natural de vibración del suelo.

**3.5.2.1. Evaluación del Efecto de Sitio.**

Para la evaluación de los efectos locales de un sitio, se deben tomar en cuenta aspectos como la tectónica y sismicidad de la región que se va a trabajar, así como la geología, topografía y geomorfología local de la zona, otros muy importantes como la hidrología y geotecnia; los cuales son estudios previos de gran utilidad para dicha valoración (Chávez et al, 1987).

La evaluación del efecto de sitio se da a partir de la información disponible, en donde es posible ubicar los puntos de interés en el área de estudio para registrar movimientos sísmicos del terreno, lo que se conoce como la determinación de las microzonas, o zonas con gran potencial sísmico; para esto se emplean diferentes métodos para evaluar el comportamiento dinámico de cada microzona, determinar las propiedades de los suelos y cuantificarlas. Los métodos de evaluación se detallan en la siguiente tabla.

**Tabla 3.2** Métodos aplicados al efecto de sitio (Chávez et al, 1987).

<b>MÉTODOS APLICADOS AL EFECTO DE SITIO</b>	
Métodos Experimentales y Empíricos Aproximación instrumental (in situ)	Métodos Teóricos y Numéricos Aproximación teórica
Método estándar de las razones espectrales Requieren un emplazamiento de referencia	Métodos Teóricos Analíticos
Métodos de las razones espectrales (H/V o HVSR) no requiere un emplazamiento de referencia.	Métodos de Simulación
Técnica de NAKAMURA	Métodos Numéricos

En los métodos experimentales se hace un monitoreo sísmico para la determinación de funciones de transferencia empíricas, las cuales a su vez, pueden ser caracterizadas por su amplificación máxima relativa ( $A_0$ ) y su frecuencia asociada a ese máximo ( $F_0$ ); siendo para los métodos numéricos el cálculo de la respuesta teórica en superficie un modelo unidimensional de capas planas ante incidencia vertical de ondas SH, que incluya los valores de velocidad de ondas-S y espesores estimados (para la estimación de las ondas-S y sus espesores se utilizan nuevas técnicas como lo son MASW Y SPAC).



### 3.5.2.2. Razón Espectral Relativa a un Sitio de Referencia

La técnica de funciones de transferencia empírica ha resultado ser muy útil para evaluar efectos de sitio en una amplia variedad de ambientes Singh et al. (1988); esta técnica tiene límites para estimar los efectos de sitio; uno de los más importantes es que requiere una estación de referencia adecuada.

Debido a esto el cálculo del cociente de amplitudes espectrales se tiene que el numerador corresponde al espectro de amplitudes de Fourier de la señal sísmica registrada en el sitio de interés, y el denominador es el espectro de amplitudes de Fourier de la señal sísmica registrada en un sitio de referencia. Como se pretende determinar la respuesta dinámica de la estratigrafía de suelo en el sitio que servirá como referencia, debe seleccionarse cuidadosamente de manera que sus niveles de amplificación sean los mínimos, (Borcherdt, 1970).

Para recurrir a esta técnica es necesario contar con dos registros sísmicos simultáneos: que es el sitio de interés y el sitio de referencia. En ocasiones esto no es posible, ya sea por una falla instrumental en alguna de las estaciones, o por la escasa instrumentación sísmica que impide la obtención de registros en los sitios de interés (Borcherdt, 1970).

### 3.5.2.3. Razón Espectral H/V para un Mismo Sitio

La técnica de Nakamura planteó una alternativa para evaluar la función de transferencia empírica sin requerir una estación de referencia para interpretar mediciones de microtremores. A esta técnica se le conoce como técnica H/V o simplemente REHV, y puede aplicarse incluso a los registros de movimientos sísmicos fuertes o débiles (Lermo J & Chavez Garcia, 1993).

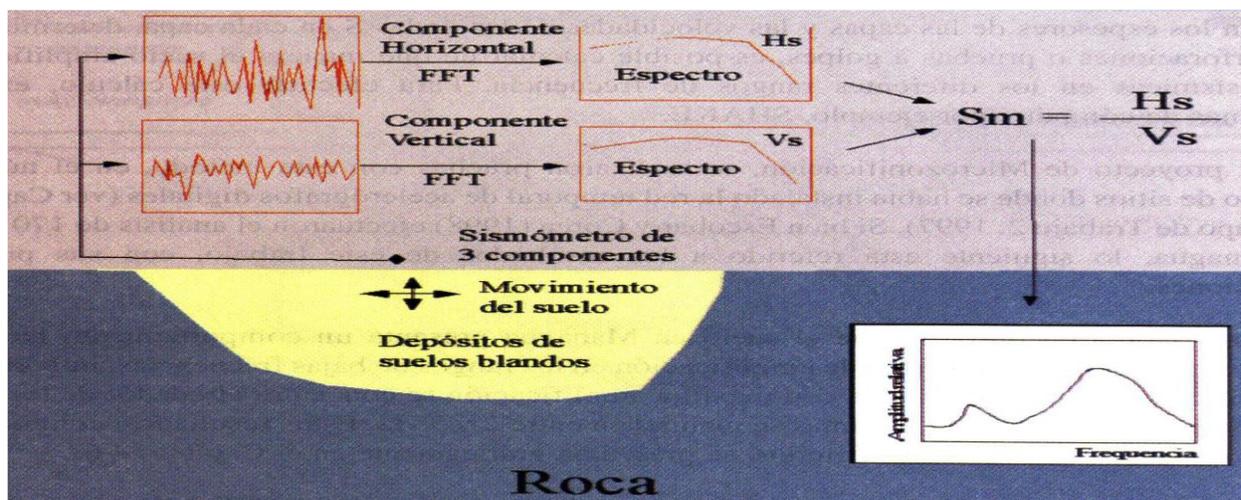


Fig. 3.9 Esquema del Método de (Nakamura, 1989).



El método de Nakamura consiste en calcular un cociente de amplitudes espectrales, donde el numerador corresponde a las amplitudes del espectro de Fourier de la componente Norte-Sur o la Este-Oeste del registro obtenido, y el denominador corresponde a las amplitudes del espectro de Fourier de la componente vertical del mismo registro.

Dicha técnica es aplicada a registros de microtemores, la cual ofrece una estimación aproximada de la frecuencia natural de vibración del terreno, pero subestima demasiado los valores de amplificación relativa del suelo (Lermo J & Chavez Garcia., 1994b).

Es por eso que la razón espectral estándar aplicada a sismos fuertes o débiles es más confiable, ya que permite obtener los niveles de amplificación relativa más severos dentro de los eventos registrados, y además permite definir los periodos asociados a modos de vibración superiores (Lermo J & Chavez Garcia F. J., 1994a).

Los efectos que se obtuvieron de la técnica REHV fueron con comparados por Lermo & Chávez Garcia (1994); para la aplicación a microtemores con los que obtuvieron de la técnica razón espectral estándar aplicada a registros de temblores. Concluyendo que los microtemores, cuando son analizados con la técnica REHV permiten una estimación bastante aproximada del periodo dominante ( $T_0$ ) de sedimentos sujetos a amplificación dinámica, en un intervalo de frecuencias de 0.3 a 10 Hz, junto con una estimación preliminar del nivel de amplificación relativa ( $A_0$ ).

Los resultados de los estudios de efecto de sitio están enfocados a determinar los siguientes parámetros de comportamiento dinámico:

- ➡ Periodos dominantes de vibración los cuales pueden presentarse en mapas de distribución de periodos o en mapas de curvas de isoperiodo.
- ➡ Amplificaciones relativas del movimiento se representan en mapas de distribución de amplificaciones relativas o en mapas de curvas de isoamplificación relativa.
- ➡ Mapas de microzonificación sísmica, son basados en la configuración de las curvas de isoperiodo.

Para el desarrollo de esta técnica conocida como cociente horizontal sobre vertical (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR, por sus siglas en inglés), Nakamura plantea varias hipótesis:



- Supone que los microtremores consisten fundamentalmente en ondas Rayleigh y que los efectos de amplificación de un sitio, son debidos a la presencia de un estrato blando sobre un semi-espacio.
- Según Nakamura, en el dominio de la frecuencia hay 4 amplitudes espectrales comprometidas: las componentes horizontales y verticales del movimiento en la superficie y en la base del estrato blando.
- Por otro lado, asume que el movimiento del microtremor es producido por fuentes muy locales.

Suponiendo que las fuentes locales no afectan el movimiento del microtremor en la base del estrato del suelo, es posible estimar la amplitud de la fuente,  $A_s$ , por el cociente:

$$A_s = \frac{V_s}{V_b} \quad \text{(Ecuación 3.12)}$$

Donde  $V_s$  es la amplitud del espectro del componente vertical del movimiento en la superficie y  $V_b$  es la amplitud del espectro del componente vertical del movimiento la base del estrato. Nakamura define una estimación de los efectos de sitio,  $S_e$  cómo el cociente:

$$S_e = \frac{H_s}{H_b} \quad \text{(Ecuación 3.13)}$$

Donde  $H_s$  es la amplitud del espectro de Fourier del componente horizontal del movimiento en la superficie y  $H_b$  es la amplitud del espectro de Fourier del componente horizontal del movimiento en la base del estrato.

Para compensar los efectos de sitio ( $S_e$ ) por el efecto de la fuente, se calculan los efectos de sitio modificados,  $S_m$  así:

$$S_m = \frac{S_e}{A_s} \quad \text{(Ecuación 3.14)}$$

Después de sustituir las ecuaciones (3.12) y (3.13) en la (3.14), se obtiene:

$$S_m = \frac{H_s / V_s}{H_b / V_b} \quad \text{(Ecuación 3.15)}$$

Nakamura verificó experimentalmente, usando registros de microtremores obtenidos con mediciones en pozo, que el cociente  $H_b/V_b = 1$ . Siendo los efectos de sitio corregidos por la fuente lo que resultan en:



$$S_m = \frac{H_s}{V_s} \quad (\text{Ecuación 3.16})$$

Esto muestra que la estimación de los efectos de sitio está dada por el cociente espectral de la componente horizontal sobre la componente vertical del movimiento en la superficie. Resumiendo, esta descripción teórica implica que un estimado práctico de la respuesta del sitio puede ser obtenido registrando el ruido ambiental con un sismógrafo sencillo de 3 componentes (X-Y-Z).

La técnica de Nakamura fue creada para analizar ondas de Rayleigh presentes en las grabaciones de microtemblores, pero se ha demostrado que también puede ser utilizada en registros de temblores para evaluar los efectos de sitio debido a la topografía o a la geología local (Lermo J & Chavez Garcia, 1993).

El método de Nakamura descrito permitiría obtener la función de transferencia completa del suelo en período y amplificación. Sin embargo, se ha comprobado empíricamente que la principal utilidad está en la determinación del período fundamental del suelo (Bonilla et al, 1997; Lachet y Bard, 1994).

#### **3.5.2.4. Modelamiento de función de transferencia empírica.**

El cuestionamiento acerca de los planteamientos teóricos del método de la relación espectral H/V aparentemente fue resuelto por Arai y Tokimatsu (2000, 2004). De acuerdo con el desarrollo matemático de los mismos en el 2000 y con la inversión de la relación H/V para obtener las velocidades de ondas de corte Vs se llenó el vacío teórico existente en cuanto a la validez de la utilización de la relación H/V para determinar la función de transferencia del suelo (Arai H y Tokimatsu K., 2004).

Arai H & Tokimatsu K., (2000), basados en la teoría propuesta por Harkrider (1964) para ondas superficiales que se propagan en un semi-espacio compuesto por diferentes capas, desarrollaron formulas teóricas para la simulación de espectros de microtemblores, en las cuales pueden ser considerados los modos fundamental y más altos. Ellos mostraron que el espectro teórico H/V para un perfil dado de suelo puede ajustar muy bien con la relación espectral de microtemblores y así, la estructura de velocidades de ondas de corte Vs puede ser estimada a partir de la inversión de la relación espectral de microtemblores H/V (Arai H y Tokimatsu K., 2004).



La figura 3.10 (a) muestra un modelo de subsuelo donde se quiere determinar la relación espectral H/V. El modelo de capas del subsuelo es un medio semi- infinito elástico compuesto de N capas paralelas, sólidas, homogéneas e isotrópicas. Cada capa está caracterizada por su espesor H, densidad  $\rho$ , Velocidad de ondas de compresión  $V_p$  y velocidad de ondas de corte  $V_s$ . Según análisis de sensibilidad han demostrado que  $V_s$  y H tienen mayor influencia en las curvas de dispersión de las ondas Rayleigh y en las ondas superficiales H/V (Tsuboi y Saito, 1983; Horike, 1985; Arai H y Tokimatsu K., 2004).

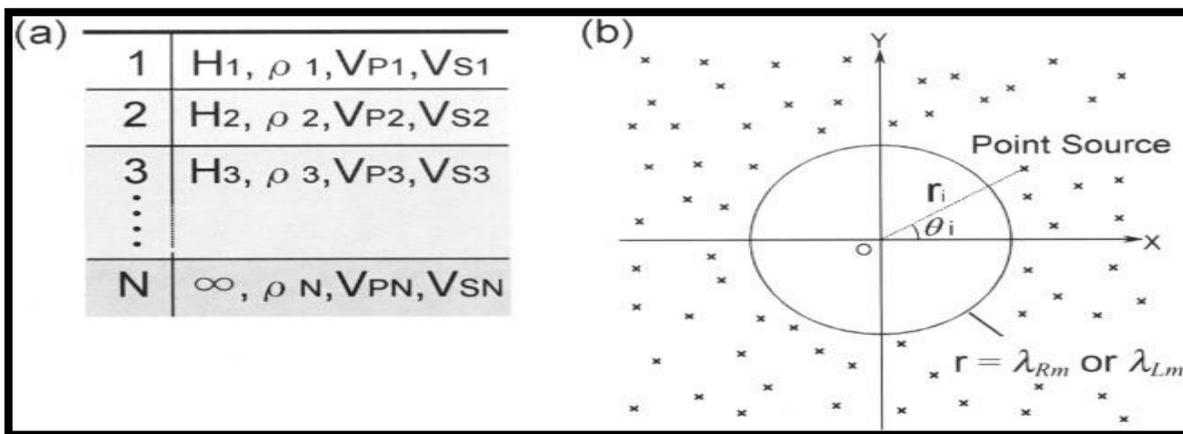


Fig. 3.10 (a) Geometría del subsuelo y (b) Modelo de las fuentes de microtemblores para formular la relación teórica H/V de ondas superficiales (Arai H & Tokimatsu K., 2000).

Se asume que las transformadas de Fourier en el tiempo de las fuerzas vertical y horizontal  $L_V(w)$  y  $L_H(w)$  que tiene una frecuencia angular  $w$ , se encuentran distribuidas aleatoriamente en el suelo (Lachet y Bard, 1994) a distancias mayores que la longitud de onda del punto de observación, que es el punto de origen en la figura (b).

### 3.5.3. Criterios para Clasificación de Sitio.

En la clasificación de sitio es importante tomar en cuenta varios parámetros, y uno de los más importantes es la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ), que permite describir confiablemente las características estáticas y dinámicas de los materiales (Alfaro, 2007). En este estudio se plantea una clasificación de acuerdo a las velocidades de ondas de corte encontradas tomando en cuenta la propuesta de clasificación del Reglamento Nacional de Construcción de Nicaragua del 2007 (RNC-07) y la Norma NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program, 2003), los cuales recomiendan que el perfil de ondas de corte se debe obtener a una profundidad de 30 metros, esto permite obtener una velocidad



equivalente ( $V_{s30}$ ) que caracteriza de manera global el sitio y así poder estimar confiablemente la respuesta sísmica de este.

De acuerdo al Reglamento Nacional de la Construcción vigente en Nicaragua (RNC-07), los suelos se clasifican en cuatro grupos como se muestran en la Tabla 3.3, siendo  $V_s$  la velocidad promedio de ondas de corte calculada a una profundidad no menor de 10m, que se determinará como:

$$V_s = \frac{\sum_{n=1}^N h_n}{\sum_{n=1}^N \frac{h_n}{V_n}} \quad \text{(Ecuación 3.17)}$$

Donde:

$h_n$ = espesor del n-esimo estrato.

$V_n$ = velocidad de ondas de corte del n-esimo estrato.

$N$  = número de estratos.

**Tabla. 3.3** Clasificación de suelos según el RNC-07.

Tipo de Suelo	Descripción del Suelo	$V_s$ (m/s)
Tipo I	Afloramiento rocoso	$>750$
Tipo II	Suelo firme	$360 \leq V_s \leq 750$
Tipo III	Suelo moderadamente blando	$180 \leq V_s \leq 360$
Tipo IV	Suelos muy blando	$<180$

A diferencia del RNC-07 la norma NEHRP (2003), clasifican los suelos en seis categorías posibles en función de la velocidad de ondas de corte promedio ( $V_s$ ), número de golpes de ensayos de penetración estándar ( $N_u$ ), y resistencia al corte sin drenar ( $S_u$ ), siendo que la determinación de la velocidad de ondas de corte  $V_s$  viene dada de la misma manera:

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad \text{(Ecuación 3.18)}$$

Donde:

$$\sum_{i=1}^n d_i = 30m$$

$V_{si}$ = velocidad de ondas de corte en el estrato  $i$  (m/s).

$d_i$  = Espesor del estrato  $i$  (m).



En la Tabla 3.4 se definen los límites o rangos establecidos para estos parámetros según cada categoría o tipo de clasificación de sitio:

**Tabla. 3.4** Clasificación de suelos de acuerdo al código NEHRP, (2003).

Clasificación de sitio	$V_s$ (m/s)	$N_u$ o $N_{oh}$	$S_u$ (psf)
A. Roca fuerte	$V_s > 1500$	NA	NA
B. Roca	$760 < V_s < 1500$	NA	NA
C. Suelo muy denso y roca blanda	$360 < V_s < 760$	$> 50$	$> 2000$
D. Suelo rígido	$180 < V_s < 360$	15 a 20	1000 a 2000
E. Suelo blando	$V_s < 180$	$< 15$	$< 1000$
	También se considera suelo blando cualquier capa de suelo con más de 10 pies que tenga las siguientes características:		
	1. Índice de plasticidad $PI > 20$		
	2. Contenido de humedad $w \geq 40\%$		
	3. Resistencia al corte sin drenar $S_u < 500$ psf		
F. Suelos que requieren una evaluación específica	1. Suelos que podrían sufrir licuefacción durante un sismo fuerte.		
	2. Turbas y/o arcillas con una gran cantidad de material orgánico con más de 10 ft de espesor.		
	3. Arcillas de alta plasticidad con más de 25 ft de espesor y $PI > 75$		
	4. Arcillas blandas con un espesor mayor a 120 ft y $S_u < 1000$ psf.		

La velocidad de onda de corte promedio en los primeros treinta metros ( $V_{s30}$ ) del terreno son conocidos como el sustrato geotécnico y la determinación de su valor es útil para:

- ➡ Valorar la acción sísmica en el proyecto a nivel de las bases de cualquier estructura.
- ➡ Valorar la amplificación de las ondas sísmicas en el terreno.
- ➡ Valorar el riesgo de licuefacción del suelo en el sitio.
- ➡ Valorar la transmisión de vibraciones generadas de trenes, explosiones en superficie o subterráneas y del tráfico vehicular.

### 3.6. Análisis De Respuesta Sísmica De Sitio

La evaluación de la respuesta de sitio se utiliza para predecir los efectos de movimientos en la superficie ante propagaciones de ondas mediante espectros de respuesta de diseño, evaluando los esfuerzos dinámicos y deformaciones para el análisis de riesgos de licuefacción y determinar las fuerzas sísmicas inducidas que pueden afectar la estabilidad de las estructuras (Kramer, 1996).



### 3.6.1. Teoría de Deconvolución

Si el movimiento de cualquier punto de un perfil de suelo es conocido, el movimiento en otro punto puede ser estimado. Las funciones de transferencia relacionan movimientos a diferentes profundidades que pueden ser derivadas sin dificultad. Un problema importante de interés implica conocer el movimiento del basamento a partir de un movimiento en la superficie. Este proceso, conocido como *Deconvolución*, es útil en la interpretación de actuales registros de movimientos en los depósitos superficiales de los suelos (Kramer, 1996).

### 3.6.2. Espectros de Respuesta

En 1932 M.A. Biot inicialmente propuso el concepto de espectro de respuesta, y luego desarrollados por G.W. Housner, Newmark y muchos otros investigadores para definir de una manera practica el movimiento del suelo y sus efectos en las estructuras (Chopra, 1995). En la actualidad el concepto de espectro de respuesta es una herramienta útil en ingeniería sísmica, el cual se define como la máxima respuesta de un sistema de un grado de libertad (1GDL) de cada componente de un movimiento en específico del suelo en términos de su frecuencia natural (o periodo fundamental), y además en función del radio de amortiguamiento del sistema de 1GDL (figura 3.11), (Kramer, 1996).

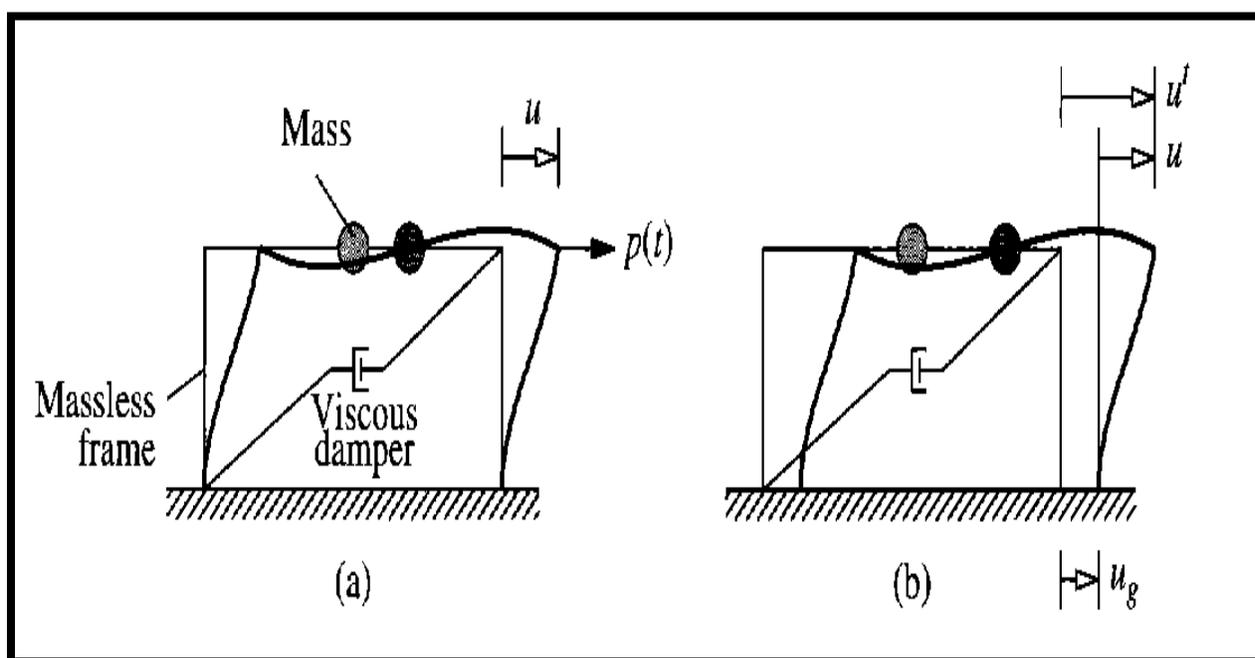


Fig. 3.11 Sistema de un grado de libertad: a) fuerza aplicada  $P(t)$ ; b) fuerza inducida por un terremoto (Chopra, 1995).



Los espectros de respuesta pueden ser expresados en términos de aceleración, velocidad y deformación. Los máximos valores de estos parámetros dependerán únicamente de la frecuencia natural (o periodo natural) y el radio de amortiguamiento del sistema (Kramer, 1996).

### 3.6.2.1. Espectro de Respuesta de Deformación

Para determinar el espectro de respuesta de deformación, el valor de la amplitud  $u_0$ , es determinado en cada sistema del valor pico en el espectro de respuesta de deformación inducida por el movimiento del suelo, para un rango de valores de  $T_n$  manteniendo constante  $\xi$  (Chopra, 1995).

Dónde:

$u_0$ : Espectro de respuesta de deformación.

$T_n$ : Periodo natural de vibración.

$\xi$ : Amortiguamiento.

### 3.6.2.2. Espectro de Respuesta de Pseudo-Velocidad

Se puede considerar como una cantidad ( $V$ ) para un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural  $\omega_n$ , y que tiene una deformación máximo  $D \equiv u_{\max}$  producto de un evento sísmico del suelo, a partir de la siguiente expresión (Chopra, 1995):

$$V \equiv \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (\text{Ecuación 3.19})$$

$V$ : Pseudo-velocidad pico.

### 3.6.2.3. Espectro de Respuesta de Pseudo-aceleración

Se puede considerar como una cantidad ( $A$ ) para un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural  $\omega_n$ , relacionada con una deformación máximo  $D \equiv u_{\max}$  debido a un evento sísmico del suelo, a partir de la siguiente expresión (K.Chopra, 1995):

$$A \equiv \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad (\text{Ecuación 3.20})$$

$A$ : Pseudo-aceleración pico

Por otro lado, los espectros de diseño son generalmente graficas suavizadas con promedios y envolventes de los espectros de respuesta de una familia de registros acelerográficos de sismos, que se esperan en cierta región (figura 3.12). Sin embargo, el uso de espectros de



diseño, debe ser representativo de movimientos del suelo registrados en el sitio durante sismos pasados, si no existen registros sísmicos en el lugar, entonces el espectro de diseño se debe basar en movimientos del suelo registrados en otros sitios bajo condiciones similares tales como magnitud del sismo, distancia que existe del sitio a la falla sísmica, mecanismo de falla, condiciones locales del suelo en el sitio. (Kramer, 1996).

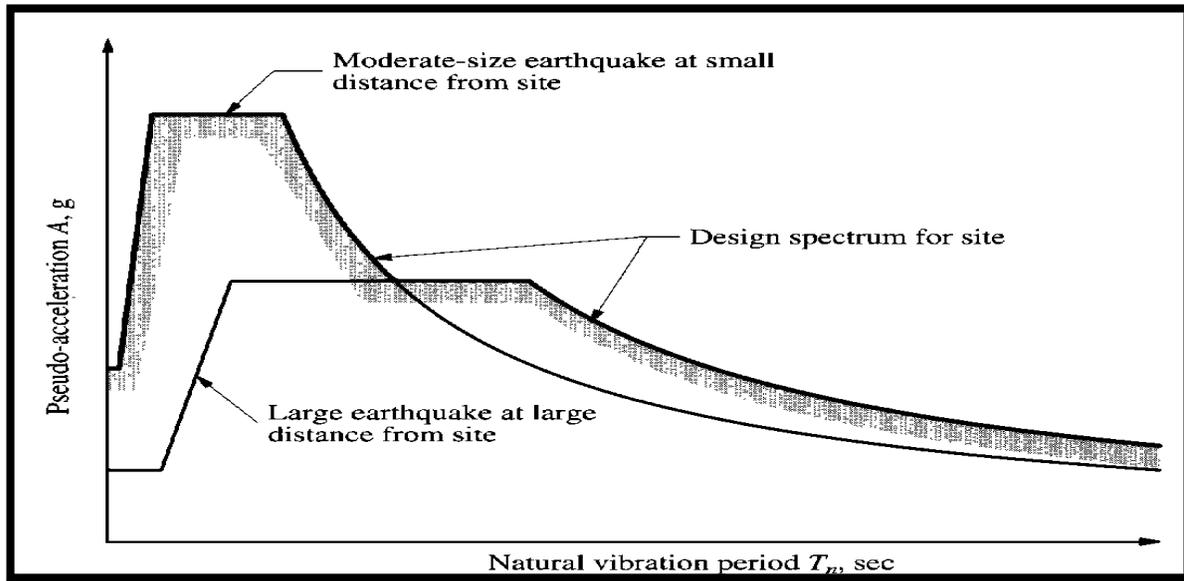


Fig. 3.12 Espectro de respuesta para diferentes movimientos de sismos (Chopra, 1995).

De acuerdo al Reglamento Nacional de la Construcción vigente en Nicaragua (RNC-07), el espectro de diseño (figura 3.13) que se utiliza en todo el territorio nacional se obtiene según las siguientes ecuaciones.

$$a = \begin{cases} s \left[ a_0 + (d - a_0) \frac{T}{T_a} \right] & \text{Si } T < T_a \text{ (Ecuación 3.21)} \\ S_d & \text{Si } T_a \leq T \leq T_b \text{ (Ecuación 3.22)} \\ S_d \left( \frac{T_b}{T} \right) & \text{Si } T_b \leq T \leq T_c \text{ (Ecuación 3.23)} \\ S_d \left( \frac{T_b}{T_c} \right) \left( \frac{T_c}{T} \right)^2 & \text{Si } T > T_c \text{ (Ecuación 3.24)} \end{cases}$$

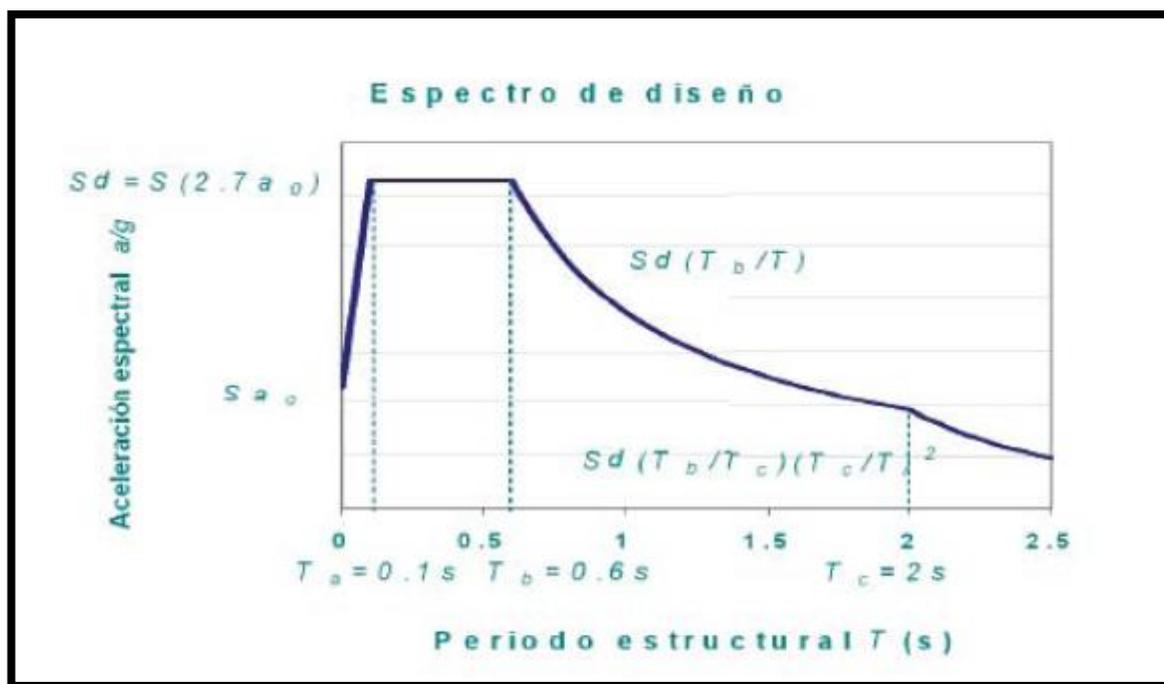


Fig. 3.13 Espectro de diseño según RNC-07.

#### 4. ADQUISICION Y PROCESAMIENTO DE DATOS

En este acápite se describe la instrumentación empleada para la adquisición de los registros de campo de microtemores los cuales fueron recolectados en 95 puntos distribuidos en el sector NE del área urbana de Managua, de los cuales solo los registros de 43 puntos fueron empleados en esta investigación, esto debido a que solo estos registros cumplieron con los requerimientos de ruido durante el procesamiento de datos. Además se realizaron mediciones en 9 perfiles en varios sitios del área para el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y el Análisis de Autocorrelación Espacial (SPAC) con los cuales se pudo obtener velocidad de ondas S 1-D con profundidad variable; los equipos empleados y procedimientos para la adquisición de los registros, son detallados por cada método y software utilizado. La campaña de campo se llevó a cabo a partir del 20 de Marzo, culminando el 23 Mayo del 2014.



## 4.1. Microtremores

### 4.1.1. Área de Estudio



Fig. 4.1 Ubicación de los puntos de microtremores en el sitio de estudio.

### 4.1.2. Equipo de Medición

En la realización de las mediciones de vibración del suelo en el sector Noreste de la Ciudad de Managua, se utilizó un acelerógrafo:

Modelo McSIES-MT NEO, Marca OYO; propiedad del Instituto de Geología y Geofísica IGG-CIGEO, el cual tiene las siguientes características:

- ➡ El movimiento del suelo lo detecta en tres sismómetros periodos largos con componentes: Dos Horizontal (H) cuya dirección está orientada en NS y al EW del sistema de coordenadas geográficas y Una Vertical (UD).
- ➡ El registro digital se efectúa desde la tarjeta de memoria SD de 2 GB, el cual permita iniciar grabación sin ninguna dificultad; cuyas capacidades son suficientes para almacenar datos de sismos.
- ➡ Cuenta con Reloj GPS el que le permite precisión en el tiempo.



- La señal que registran los sensores son digitalizadas con un convertidor analógico-digital de 32 bits, el rango de entrada externa  $\pm 2.5V$  máx, con impedancia de  $1M\Omega$  y la banda de frecuencia esta entre  $0.1 \sim 200Hz$ .



**Fig. 4.2** Acelerómetro McSEIS-MT NEO y sismómetros empleados en el estudio.

### **4.1.3. Trabajo de Campo**

El desarrollo del trabajo de campo en las mediciones de vibración ambiental, en el sector Noreste de Managua se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Mediante un mapa de la ciudad de Managua en Google Earth se ubicaron los puntos de medición con un espaciado aproximado de 500 mts entre cada punto.
- Utilizando el mapa con las coordenadas de los puntos de medición, mediante un GPS GARMIN; se llegó a cada uno de los puntos de interés para tomar los registros necesarios.
- Para registrar la vibración del suelo, se colocó el acelerómetro McSEIS-MT NEO conectándose por medio de tres cables los sismómetros de periodos largos en el sitio de interés.
- Una vez ubicados en el punto de interés con la ayuda de la brújula se orientaron los sensores según las coordenadas geográficas de cada uno.
- Se programaba el equipo con algunos minutos de antelación antes de la medición para permitir que los sensores se estabilizaran, la duración programada de cada registro fue de 35 minutos, el registro se almacenaba en la memoria SD del acelerómetro.



- ➔ En cada medición se procuró que el equipo se situara propiamente sobre el punto seleccionado en el mapa, sin embargo en algunos sitios esto no se lograba debido a la existencia de algún obstáculo, en tales casos el sitio de medición se reubico lo más próximo posible al lugar proyectado inicialmente.

#### **4.1.4. Obtención de FTE**

Los registros de microtemores se almacenaban en la computadora, extrayendo así los datos de las tres componentes (NS, EW y UD), para su posterior conversión del formato mtn a ascii.

Seguidamente se utilizó la rutina HV, desarrollada en MATLAB que fue creada y facilitada por Msc. Edwin Castrillo (Castrillo et al 2014), la cual ha sido utilizada en otros estudios, esta fue diseñada para facilitar de datos de vibración y mediante su aplicación facilitar la selección de los registros que cumplen con los criterios estándares de procesamiento. Se corcoro con respecto al software Geopsy y los resultados de las funciones de tranferencia empírica son similares a los obtenidos en la rutina HV. El procedimiento se puede resumir de la siguiente manera: primero se aplicó corrección de línea base, posteriormente en el dominio del tiempo, suavizamos el registro mediante la aplicación de una función sinusoidal. Si la ventana de tiempo no era una potencia de dos, se completó el registro con cero hasta tener una potencia de 2.

Luego se aplicó la transformada rápida de Fourier y se suavizo el registro en el dominio de la frecuencia mediante la aplicación de la ventana Parzen. Posteriormente se obtuvo la relación de H sobre V tomando la raíz cuadrada de la suma de las componentes espectros horizontal y dividido por el espectro de componente vertical.

El resultado fue tomado como aceptable basado en +/- una desviación estándar de la curva media REHV. En la figura 4.4 y 4.5 se refleja el procesamiento de datos de microtemores para obtener la curva de razón espectral H/V.

Los resultados se exportaron a Excel con el fin de graficar las curvas espectrales para cada sitio y obtener el valor promedio de las mismas; obteniendo también la desviación estándar para adquirir los valores límites (máximos y mínimos) probables para la amplificación y frecuencia de la curva espectral promedio obtenida en cada punto.

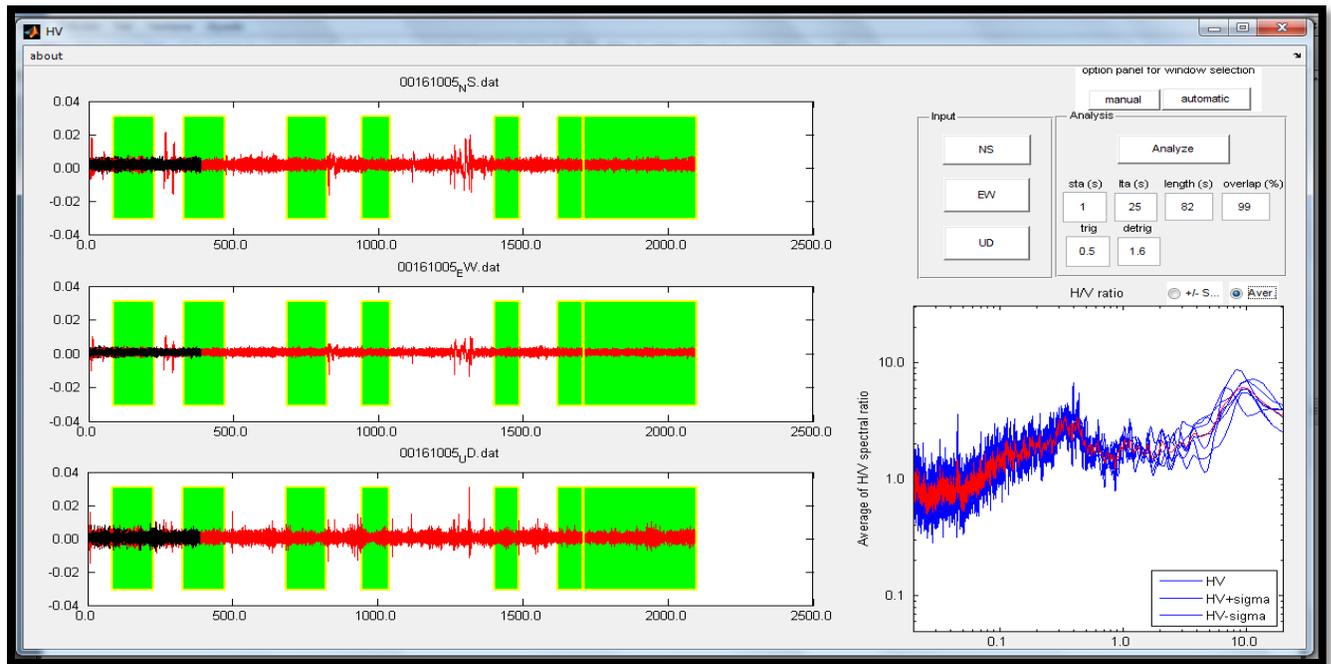


Fig. 4.3 Interfaz gráfica para el procesamiento y selección de ventanas con los segmentos de registro más limpios de punto de medición en sus tres componentes.

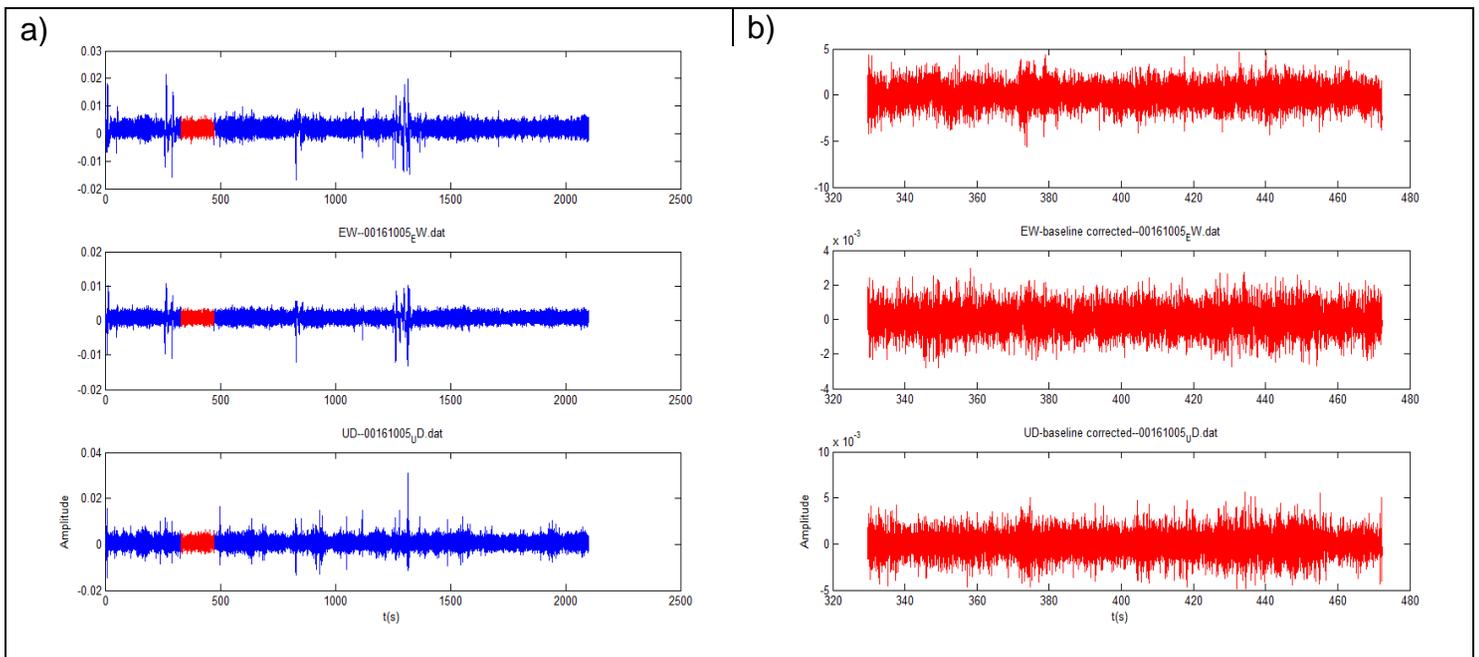


Fig. 4.4 a) La selección de la ventana muestra la grabación de microtremor destacando la parte que se va analizar del primer registro, b) se muestra con un aumento de visualización la parte que va a ser tomada para el análisis.

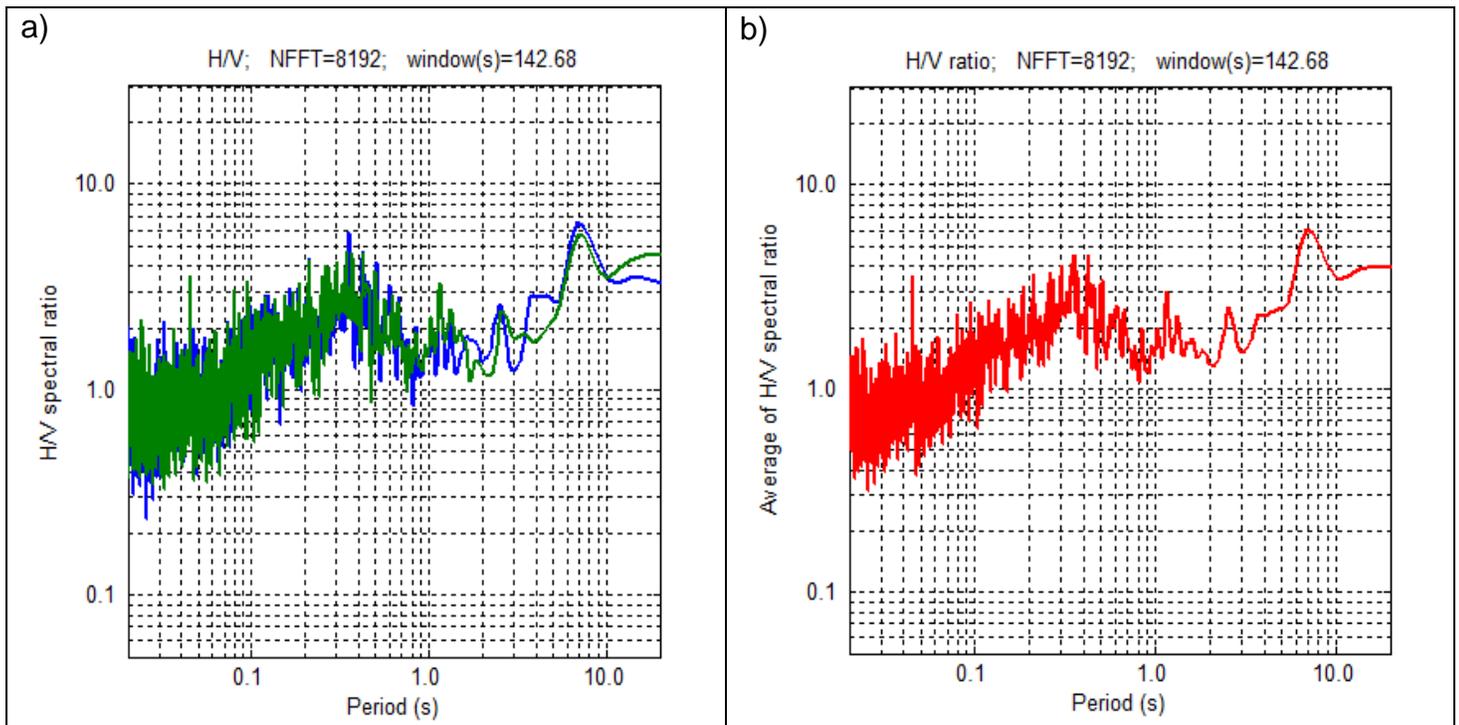


Fig. 4.5 a) Muestra la función de transferencia empírica para dos ventanas de un registro dado, b) muestra el promedio de FTE en las dos ventanas.

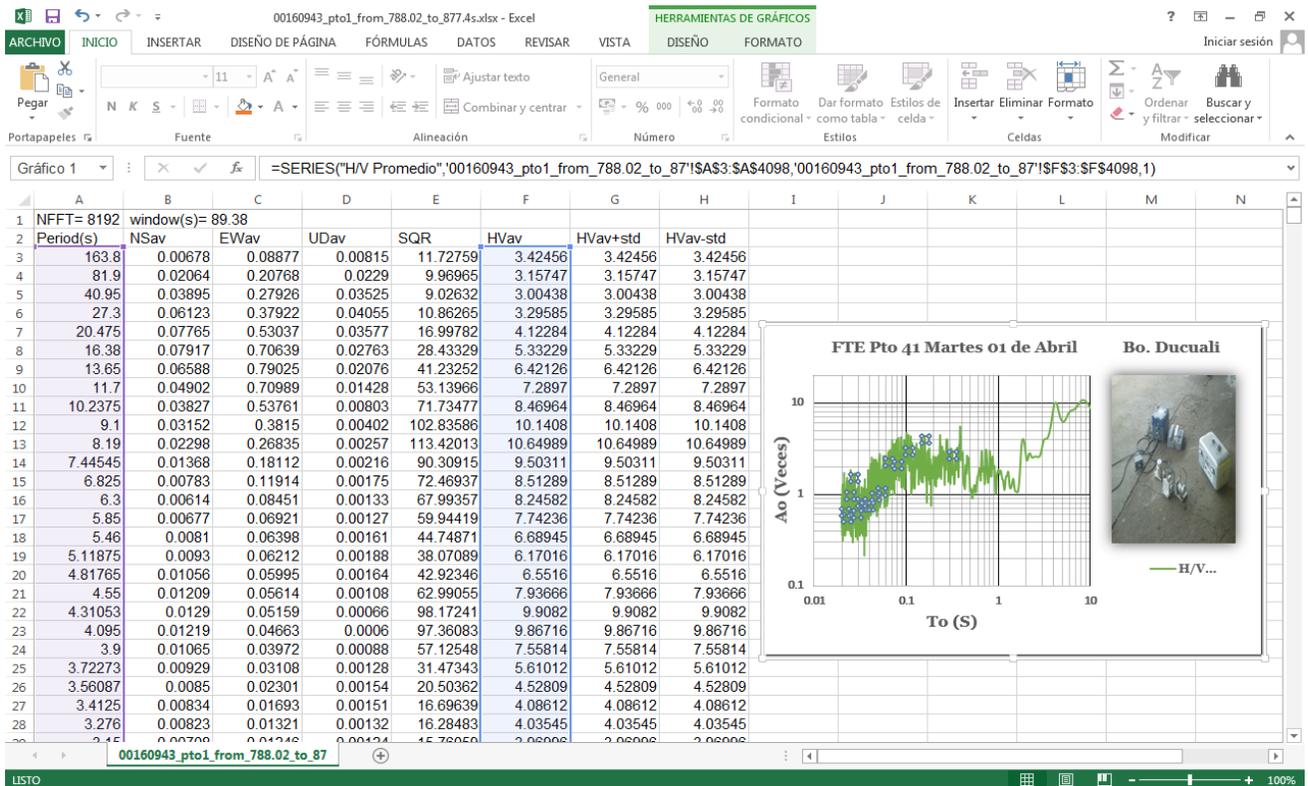
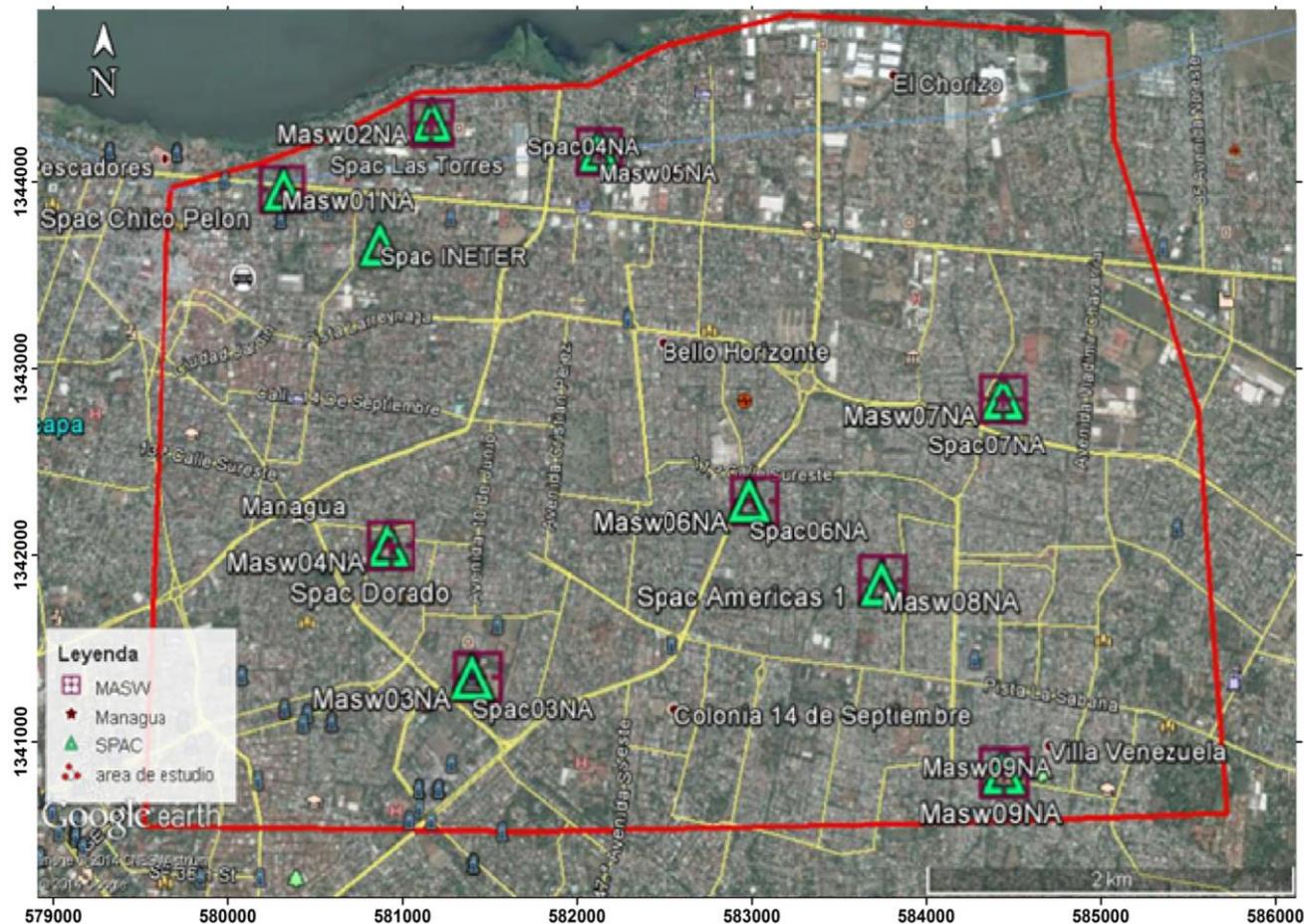


Fig.4.6 Resultado del registro de microtremor con la rutina HV, exportado a Excel y grafica de la curva espectral para el sitio; obteniendo a su vez la desviación estándar (+/- Std) para los valores límites de la curva media REHV.



## 4.2. Análisis Multicanal De Ondas Superficiales (MASW) y Técnica de Autocorrelación Espacial (SPAC).



**Fig. 4.7** El mapa muestra la localización de los perfiles seleccionados para el registro de MASW y SPAC, el polígono representa el área de estudio.

### 4.2.1. Equipos de Medición Utilizado en MASW y SPAC.

Para la obtención de registros MASW y SPAC se usaron los siguientes equipos campo:

- ➡ Sismógrafo digital Geode de 24 canales.
- ➡ 24 Geófonos verticales de 4.5 Hz de frecuencia natural utilizado para MASW.
- ➡ Cable de adquisición de 24 conectores, estos se usaron para ambos métodos.
- ➡ Cable disparador para generación de registros MASW.
- ➡ Martillo de 20 libras para generación de ondas.
- ➡ Placa metálica circular de 30 cm de diámetro para punto de impacto.
- ➡ Batería como fuente de energía para el sismógrafo utilizado para ambos métodos.
- ➡ Computadora laptop equipada especialmente para trabajo de campo.
- ➡ El GPS GARMIN, permitiendo la ubicación del sitio de estudio.
- ➡ Nivel y brújula utilizada en el método de SPAC.3



#### **4.2.2. Trabajo de Campo de MASW.**

Como antes mencionamos los registros se realizaron en 9 sitios distintos del área de estudio, procedimiento que se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Inicialmente se plantan los 24 geófonos en orden vertical y linealmente con distancias simétricas entre cada uno de estos.
- Luego se desplegaron dos cables para geófonos, conectando apropiadamente cada uno de los geófonos plantados.
- Se desplego un cable para la fuente sísmica que se conecta tanto al martillo como a la computadora; de tal forma que cuando el martillo golpee la placa metálica se genere el sistema de registro y este empieza a grabar.
- Una vez instalado el equipo de medición se inició generando una perturbación en la superficie usando una fuente puntual dinámica; en este caso el martillo y la placa metálica.
- La Ubicación del primer y último disparos, se hizo a 5m del primer geófono; con un apilamiento de 3 por cada registro; la separación entre geófonos, fue de 1m dependiendo el área de trabajo, dado que algunos se tomaron de 1.5m.
- Posteriormente se realizaron disparos en medio de cada geófono; los cuales son la unidad en contacto directo con la superficie terrestre, que convierte el movimiento de la tierra en señales eléctricas, detectando las ondas posteriormente.



**Fig. 4.8** Procedimiento del trabajo de campo, en el cuarto perfil para obtener el registro de MASW.



Fig. 4.9 Sismógrafo marca GEODE utilizado para mediciones de MASW (Propiedad del CIGEO de la UNAN-Managua).

### 4.2.3. Trabajo de Campo con el Método SPAC.

Al igual que en el método MASW, se realizaron 9 mediciones con el método SPAC, trabajo que se realizó de la siguiente manera:

- Mediante el GPS se seleccionó el sitio de estudio, y posteriormente se procede a la instalación de los equipos.
- Con la utilización de los cables conectores, los siete sensores, la batería como fuente de energía, la laptop y un sismógrafo de componente vertical y con frecuencia natural de 2 Hz se tiene listo el equipo.
- La dimensión de los lados mayores del arreglo fue de 45 metros, con este tamaño de arreglo fue posible observar la estructura del subsuelo a profundidades mayores de 30 metros, un esquema del arreglo se presenta en la Figura 4.10.

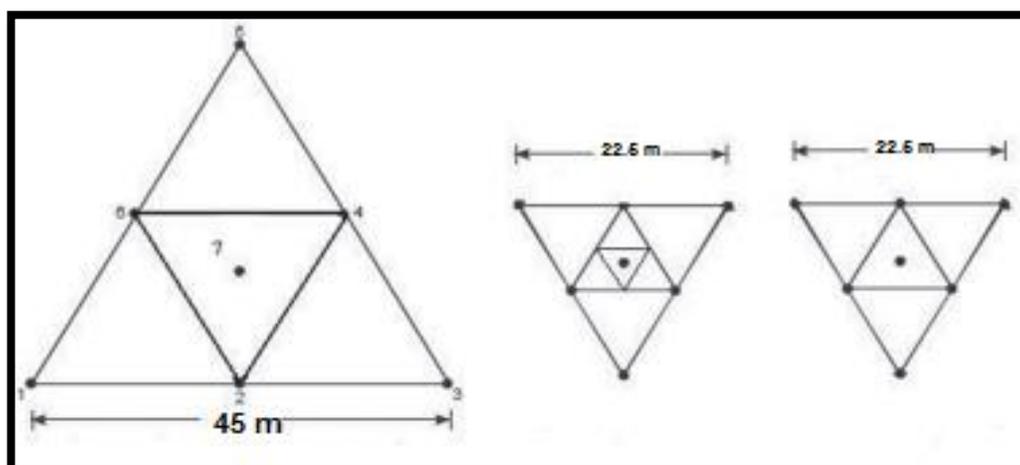


Fig. 4.10 Esquema de los arreglos con el método SPAC utilizados en esta investigación.



Fig. 4.11 Registro tomado en Chico Pelón perfil uno, utilizando la técnica SPAC.

#### 4.2.4. Procesamiento de Registros de Ondas Superficiales MASW

El procesamiento de cada registro se realizó con el software *SurfSeis V 2.0*, en la figura 4.12 se muestra unos de los registros de MASW.

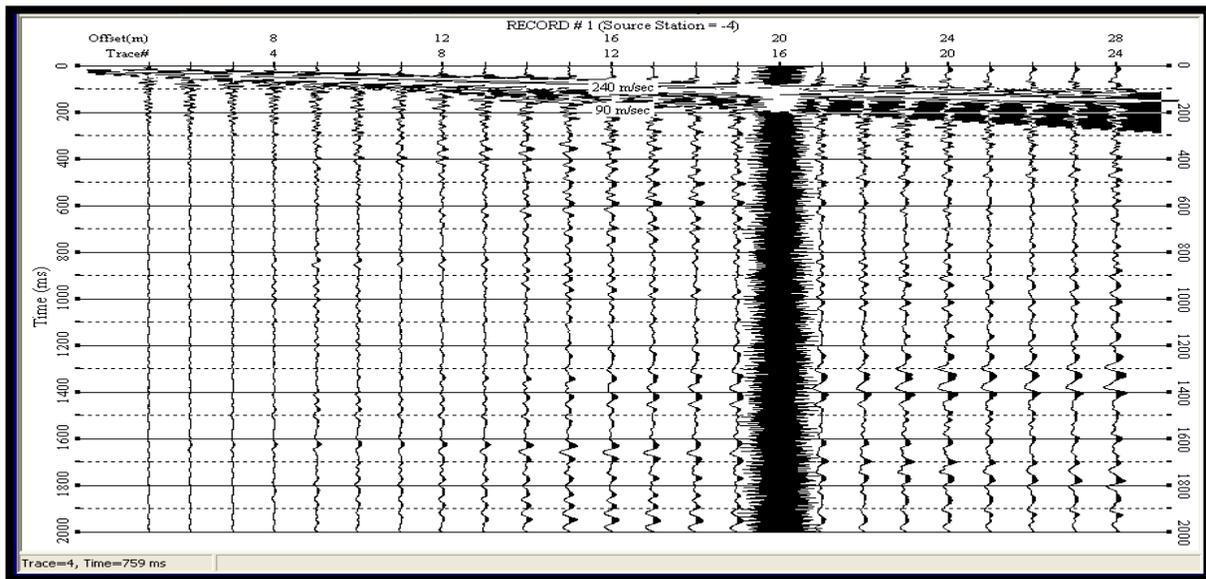


Fig. 4.12 Sismograma del perfil registrado en Chico Pelón, utilizando el método MASW.

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentran; este método el cual se basa en el principio de dispersión o a la determinación de la variación de la velocidad de ondas con respecto a la frecuencia, también conocida como curva de dispersión. Dándonos cuenta que la determinación de la curva de dispersión (Figura 4.13) es la etapa más importante en este proceso, dado a que la calidad de los resultados está condicionada por el grado de exactitud en la obtención de la curva.

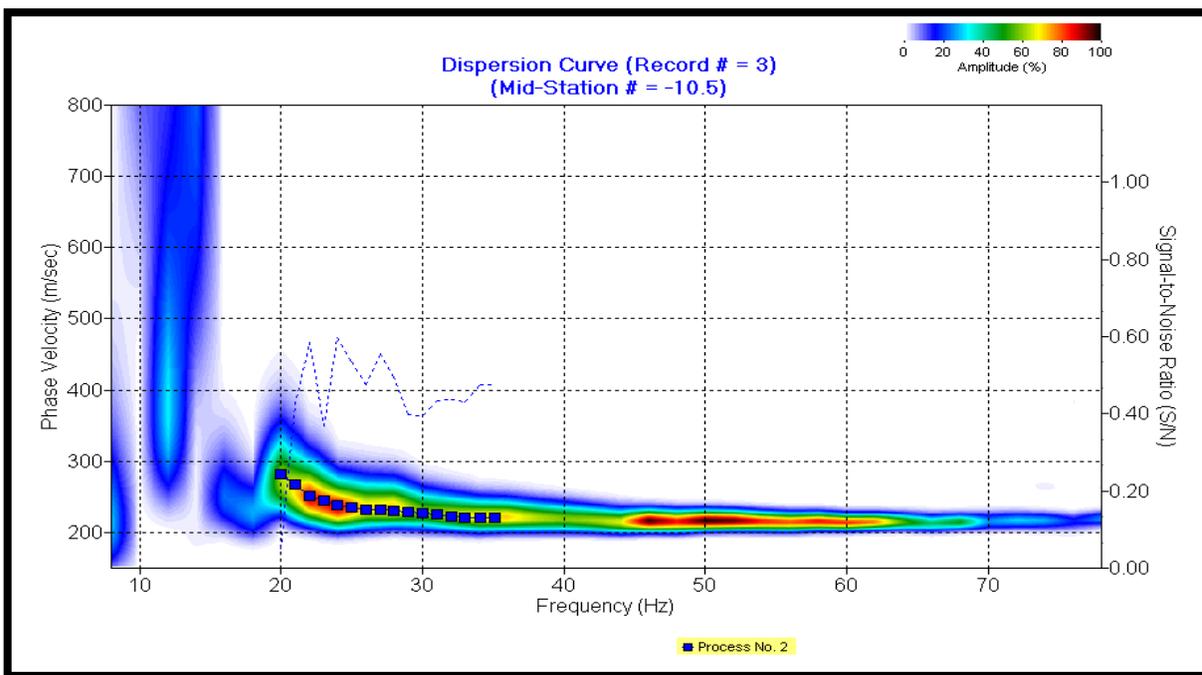


Fig. 4.13 Curva de dispersión del perfil de Chico Pelón.

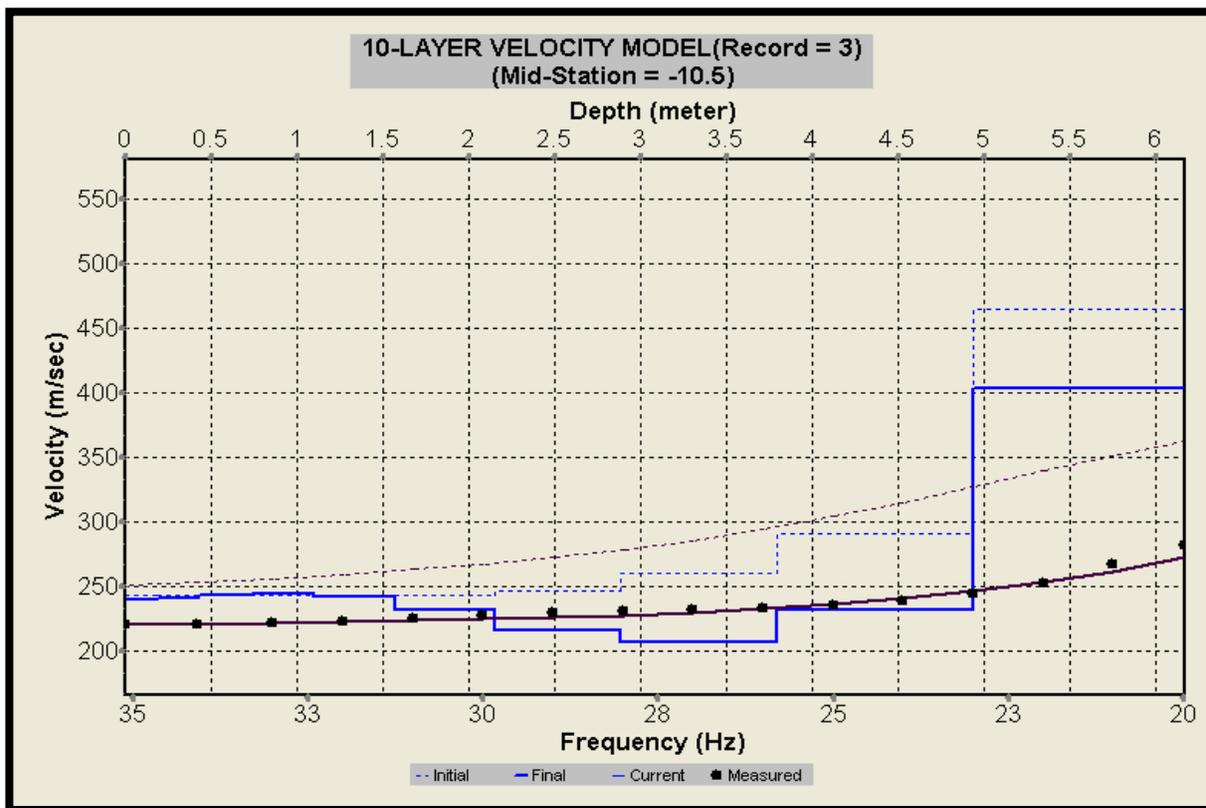
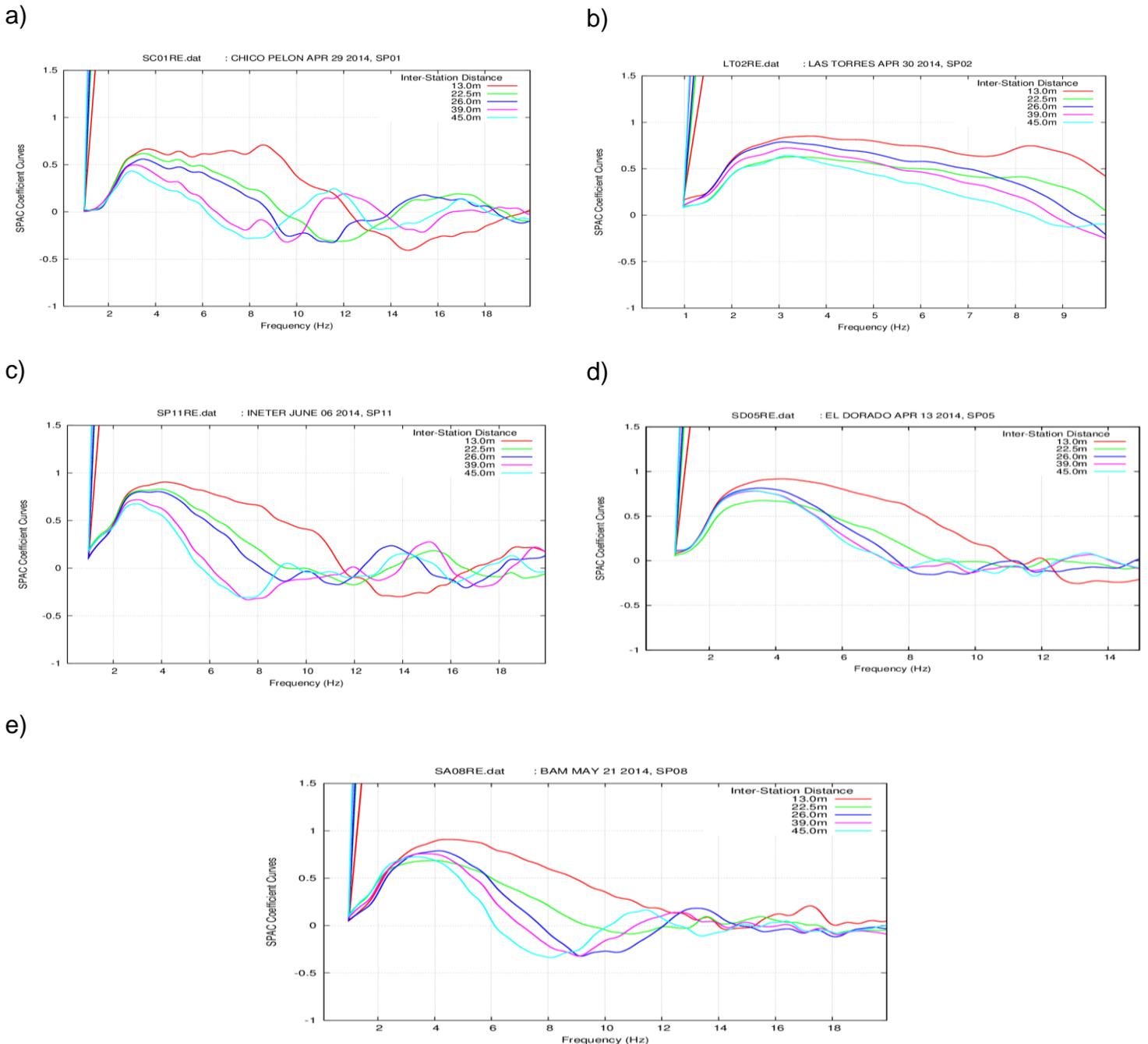


Fig. 4.14 Modelo de capas de espesores con velocidades obtenido para el primer perfil.



### 4.2.5. Procesamiento de Registros de ondas superficiales SPAC.

Utilizando la ecuación (3.11) es posible evaluar los coeficientes SPAC, tal es el caso de figura 4.15; estos son función de la distancia y de la frecuencia, para bajas frecuencias los valores son máximos, los coeficientes SPAC van disminuyendo su valor en la medida en la que aumenta la distancia.

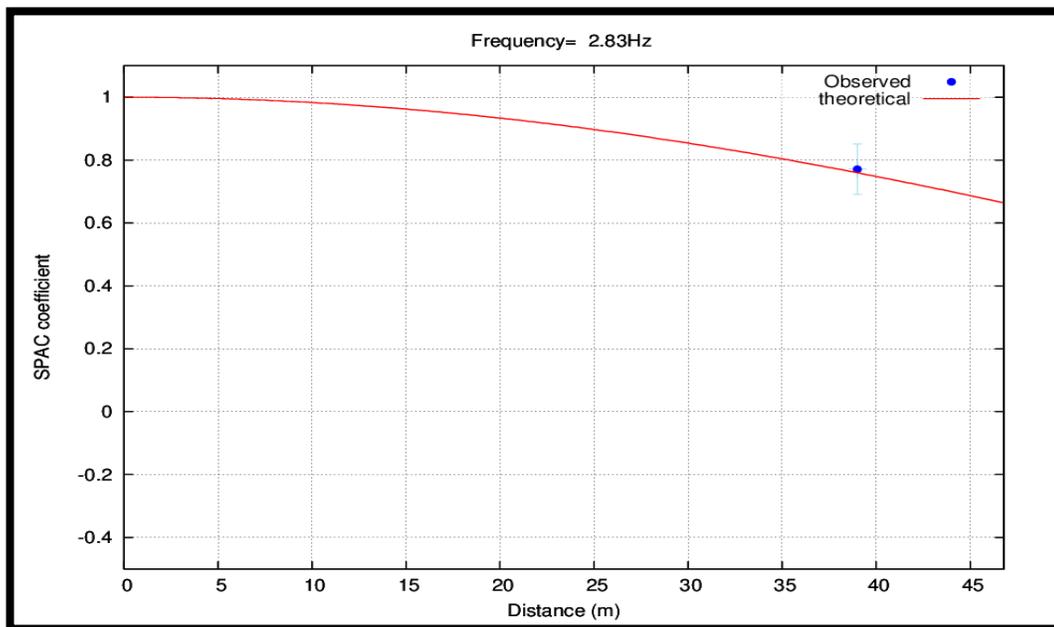


**Fig. 4.15** Ejemplos de Coeficientes SPAC, a) registrado en Chico Pelón b) registro obtenido en las Torres, c) registro obtenido en INETER d) registro obtenido en el Dorado, e) registro obtenido en las Américas 1; todos con arreglo de 45m.



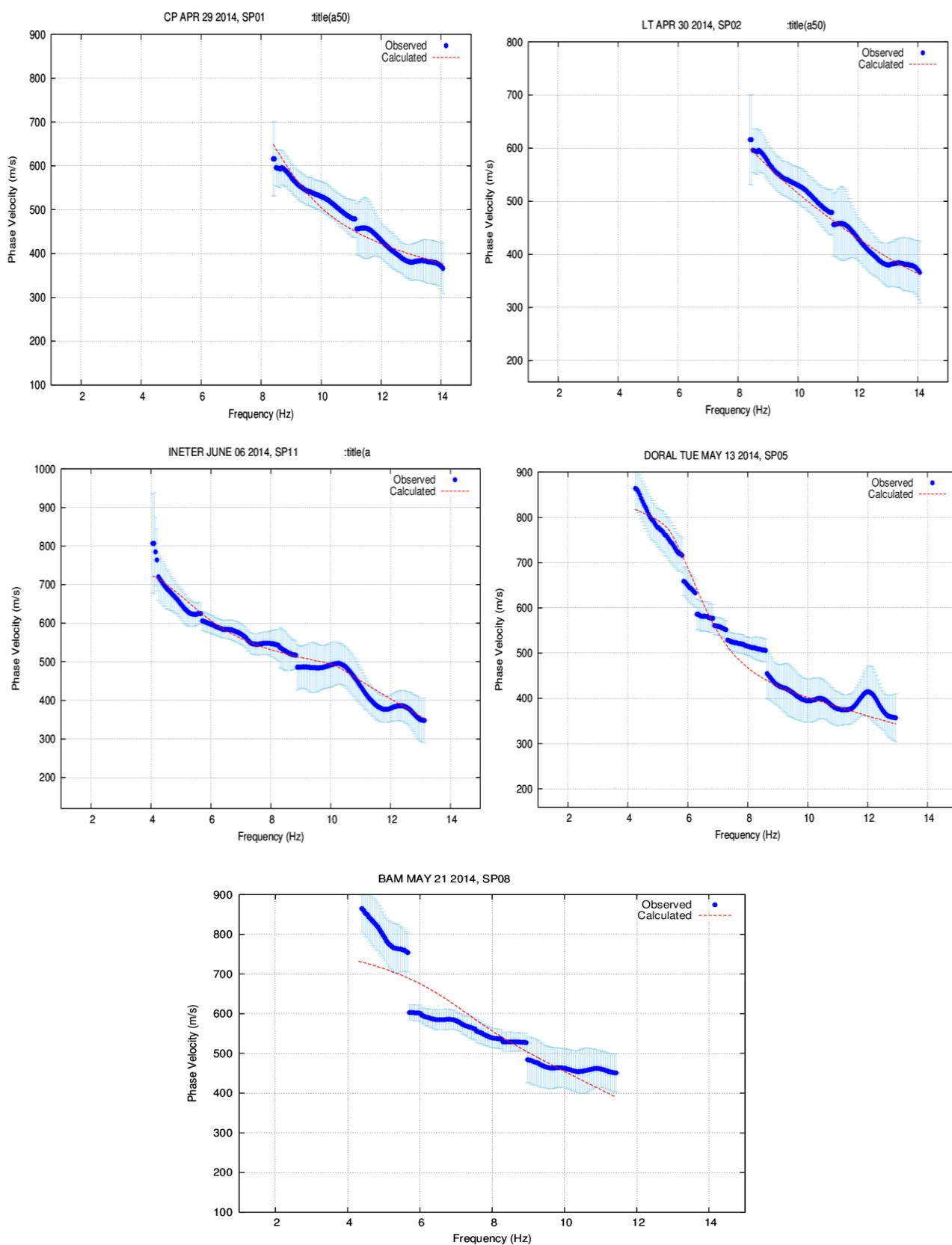
El siguiente paso en el análisis es ajustar las funciones de Bessel para cada frecuencia de acuerdo con la ecuación (3.10), es necesario verificar los datos que pueden ser utilizados en el ajuste. La figura 4.16 muestra el ajuste de las funciones de Bessel, que para ciertas frecuencias es posible usar información de varias distancias, sin embargo, en el caso de bajas frecuencias solo fue posible utilizar la información del arreglo de 45m. Para el procesamiento y obtención de los coeficientes de SPAC se utilizó el método el método *Very Fast Simulated Annealing Method*, que consta de la rutina *b\_fit* entre otras desarrollada por Yokoi, (2012), la cual ofrece la ventaja de estimar el espesor y la  $V_s$ .

Posteriormente del ajuste de las funciones Bessel, se propone un modelo estratigráfico del cual se obtiene una curva de dispersión teórica, la cual se compara con la observada y en caso de no coincidir se propone otro modelo hasta lograr que ambas curvas se aproximen.



**Fig. 4.16** Muestra el ajuste de las funciones Bessel de primer tipo y orden cero para frecuencia de 2.83 Hz.

Mediante la inversión de la ecuación (3.10) se obtienen las curvas de dispersión, que para ajustar los datos se va incrementando poco a poco el número de estratos a fin de generar la curva lo suficientemente adecuada a los datos observados. En la figura 4.17 se presentan las curvas de dispersión para los arreglos en los 5 sitios localizados.



**Fig. 4.17** Muestra la velocidad de Fase de ondas Rayleigh de la componente vertical de microtemblores. La línea discontinua de color rojo representa la curva de dispersión teórica.



Los resultados obtenidos de la longitud de onda del modo fundamental de las ondas Rayleigh se presentan en la tabla 4.1 donde se puede observar los rangos mínimo y máximo de exploración en cada sitio de estudio; obtenido mediante las ecuaciones 3.25 y 3.26.

$$\lambda_{\min} \equiv \frac{V_{s \min}}{f_{\max}} \left( \frac{1}{3} \right) \quad \text{y} \quad \lambda_{\max} \equiv \frac{V_{s \max}}{f_{\min}} \left( \frac{1}{3} \right) \quad \text{Ecuación 3.25, 3.26.}$$

Dónde:  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$   $\equiv$  Longitud de onda mínima y máxima.

$V_{s \min}$ ,  $V_{s \max}$  = Velocidades de onda mínima y máxima.

$f_{\min}$ ,  $f_{\max}$  = Frecuencia mínima y máxima.

$\frac{1}{3}$  = Representa la longitud del arreglo geométrico.

**Tabla. 4.1** Longitud de onda del modo fundamental de las ondas Rayleigh.

	<b>V<sub>Max</sub></b> <b>(m/s)</b>	<b>V<sub>min</sub></b> <b>(m/s)</b>	<b>f<sub>min</sub></b> <b>(Hz)</b>	<b>f<sub>Max</sub></b> <b>(Hz)</b>	<b>λ<sub>Max</sub></b> <b>(m)</b>	<b>λ<sub>min</sub></b> <b>(m)</b>
Chico Pelón	649	377	8.398	14.062	25.760	8.937
Bo. Las Torres	599	362	8.398	14.062	23.776	8.581
INETER	723	353	4.053	13.134	59.462	8.959
El Dorado	817	344	4.248	12.939	64.109	8.862
Bo. Las Américas 1	732	390	4.297	11.426	56.784	11.378

### 4.3. Análisis de Deconvolución

En la evaluación sísmica de sitio se determina un acelerograma o registro de entrada que esté libre de amplificación (señal en roca elástica), en este caso se tomó el registro del terremoto de Managua de 1972, el cual fue utilizado para el proceso de deconvolución.

Para la determinación de un modelo de velocidad apropiado se utilizó el registro obtenido en INETER, con el fin de determinar el nuevo modelo de velocidad para la estación que registró el terremoto de 1972 y para el cálculo del acelerograma deconvolucionado, realizándolo por medio del software Degtra A4 (Figura 4.18).

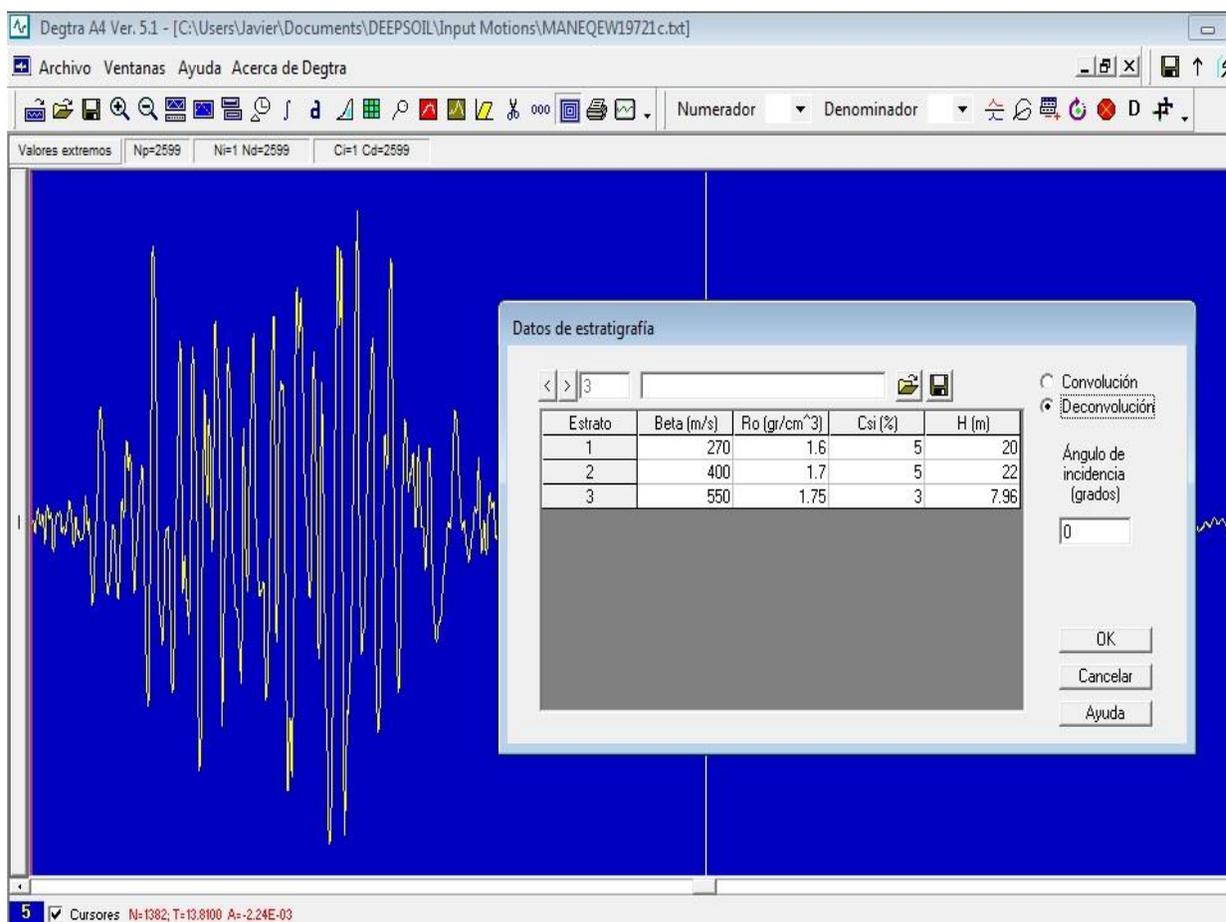


Fig. 4.18 Interfaz gráfica del proceso para la obtención del acelerograma deconvolucionado.

#### 4.4. Evaluación de Respuesta Sísmica de Sitio

Una vez adquiridos los modelos de velocidad de ondas de corte para cada sitio de estudio y el acelerograma del terremoto de 1972 se procedió a evaluar la respuesta sísmica de sitio, a través del software DEEPSOIL v 5.0, utilizando para este caso el análisis lineal equivalente en dominio de frecuencia, posteriormente se introduciendo el número de capas de cada perfil y los modelos de velocidad, no se consideró la acción del agua. Para cada uno de los perfiles se seleccionó las propiedades mecánicas del sitio y las velocidades del estrato rocoso para luego introducir el registro de entrada que fue el acelerograma deconvolucionado del terremoto de 1972, obteniendo de esta manera los espectros de respuesta y las funciones de transferencia teórica para cada sitio.

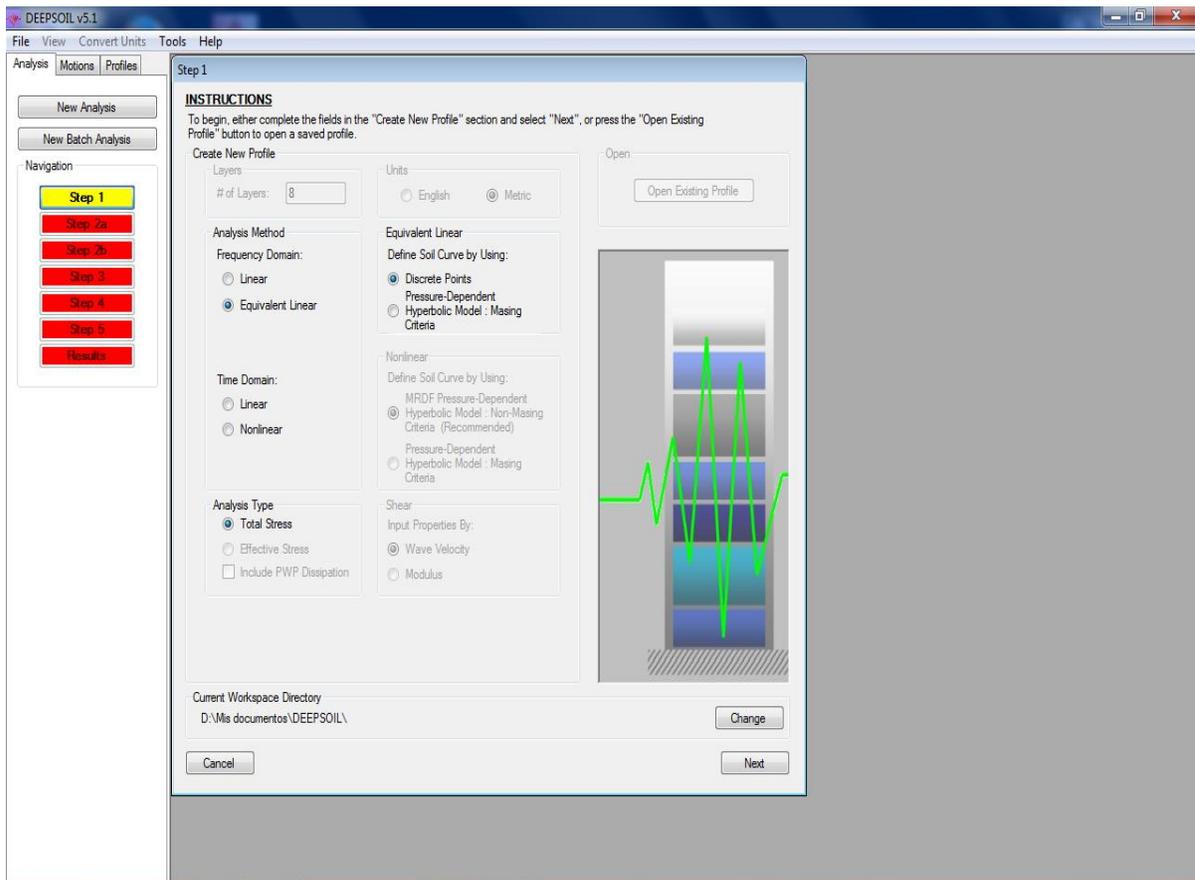


Fig. 4.19 Interfaz gráfica del software DEEPSOIL V5.0 para el análisis lineal equivalente.

## 5. ANALISIS Y RESULTADOS

En esta etapa del trabajo se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de datos realizado, según se explicó en el acápite anterior. Inicialmente se muestran los resultados del análisis de vibración ambiental para cada familia espectral de las cuales se obtuvo una microzonificación en base a sus periodos fundamentales de vibración, posteriormente esta microzonificación se comparó con modelos de velocidad de ondas de corte obtenidas usando el método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y el Análisis de Autocorrelación Espacial (SPAC), a su vez se establecieron comparaciones con el NEHRP (2003).

### 5.1. Periodos Fundamentales y Ubicación de los Registros de Microtremores

En el procesamiento de los registros de vibración ambiental se utilizó la rutina H/V en Matlab la cual permitió la obtención de 43 archivos limpios de la curva razón espectral de las componentes horizontales y verticales (H/V), los cuales han sido tomados para el estudio de Microzonificación en Sector Noreste del área urbana de Managua.



Fig. 5.1 El mapa muestra el área del estudio y la ubicación de los 43 puntos dónde se registraron los datos de microtremores que están siendo utilizados.

En la Tabla adjunta se presentan los resultados de periodos fundamentales y amplitudes relativas, en los puntos donde fueron recolectados los registros de vibración ambiental que están siendo utilizados en esta investigación.

Tabla. 5.1 Obtención de registros de microtremores en 43 puntos del sitio de estudio.

Pto	To (seg)	Ao (veces)	Coordenadas		Ubicación
			X	Y	
1	0.367	3.320	580977	1341035	Máximo Jerez
2	0.235	3.620	580951	1341528	Gasolinera Puma Cristo Rey
3	0.122	4.248	581002	1341940	Bo. Salinas
4	0.121	2.985	581172	1342811	Puma Ciudad Jardín
5	0.129	4.828	580957	1343461	Bo. Los Ángeles
6	0.174	2.88	581454	1343538	Bo. Chico Pelón
7	0.207	4.101	581483	1342115	San José Oriental
8	0.170	5.229	581517	1341449	Bo. Rigüero
9	0.152	3.563	581987	1341001	Bo. Carlos Fonseca
10	0.172	3.558	582022	1343948	Bo. Las Torres
11	0.176	2.880	581933	1341980	Bo. María Auxiliadora
12	0.153	3.722	581956	1341610	El Dorado
13	0.164	4.103	582409	1342614	La Reynaga
14	0.112	3.147	582462	1341464	Bo. Ducuali
15	0.136	3.619	582363	1341053	Don Bosco



16	0.136	3.167	582792	1342089	El Edén
17	0.147	3.962	582964	1343046	Bo. Costa Rica
18	0.106	2.400	583453	1343325	Semáforos la Nissan 1C al sur
19	0.127	3.056	583327	1341034	Bo. Carlos Aguirre
20	0.082	2.312	583990	1341514	Bo. Georgino Andrade
21	0.153	2.146	584042	1342217	Costado Oeste de Multicentro
22	0.097	2.196	583759	1343545	Contiguo a Parmalat
23	0.081	4.819	583980	1344025	Bo. Santa Clara
24	0.103	3.135	584402	1343016	De portezuelo 3C al Sur
25	0.123	2.745	584346	1342303	Rotonda la Virgen 1C al Sur
26	0.129	2.056	584520	1342042	Bo. Villa Progreso
27	0.119	4.156	584550	1341499	Bo. Villa Austria
28	0.133	2.038	585043	1341047	Bo. Villa Bulgaria
29	0.105	2.673	585068	1341423	Bo. Villa Bulgaria
30	0.097	2.631	584960	1341995	Contiguo a UPOLI
31	0.096	2.616	584993	1342444	Bo. Villa Carlos Man
32	0.098	3.301	584828	1344069	Bo La Primavera
33	0.079	3.181	584870	1342757	Villa Xolotlán
34	0.122	3.538	585386	1343875	Contiguo a la cervecería
35	0.079	2.936	585366	1343022	Bo. Mombacho
36	0.081	2.365	585275	1342432	Villa Miguel Gutiérrez
37	0.078	2.544	585478	1341919	Bo. Gabriano
38	0.111	2.939	585456	1341072	Américas 3
39	0.131	4.852	585910	1343525	Bo. José Dolores Estradas
40	0.126	2.332	585774	1343113	Waspan Sur
41	0.109	2.837	585783	1342543	Colonia Villa Miguel Gutiérrez
42	0.107	2.378	585903	1341568	Villa 09 de Junio
43	0.138	2.416	585945	1340951	Villa Revolución

### **5.2. Agrupación de sitios de acuerdo a la Familias Espectrales To.**

El método más conveniente para el cálculo del período es el Método de Nakamura (1989) que establece la relación H/V. Dicha relación espectral se da entre los registros de la componente horizontal H y la componente vertical V, que presenta un pico con características propias de la frecuencia fundamental de resonancia, la cual es el inverso del período fundamental.

De tal forma que los siguientes mapas de zonificación se trazaron teniendo en cuenta la distribución espacial de los puntos, con base a los periodos de vibración de cada registro lo cual se muestra en la tabla 5.1, determinando así las microzonas del área de estudio.



### 5.2.1. Agrupación de las funciones de transferencia empírica, en función de los periodos dominantes.

La selección para la familia espectral se realizó de acuerdo con la distribución espacial de los períodos fundamentales de REHV y agrupando las curvas de función de transferencia empírica; esto se hizo con el fin de especificar mejor el mapa de zonificación.

Zona 1: Los suelos de esta zona tienen períodos fundamentales entre de 0.07 a 0.13s, siendo su modo de vibrar bajo, la curva color negro representa el promedio de las FTE observando que el pico máximo está en 0.94s.

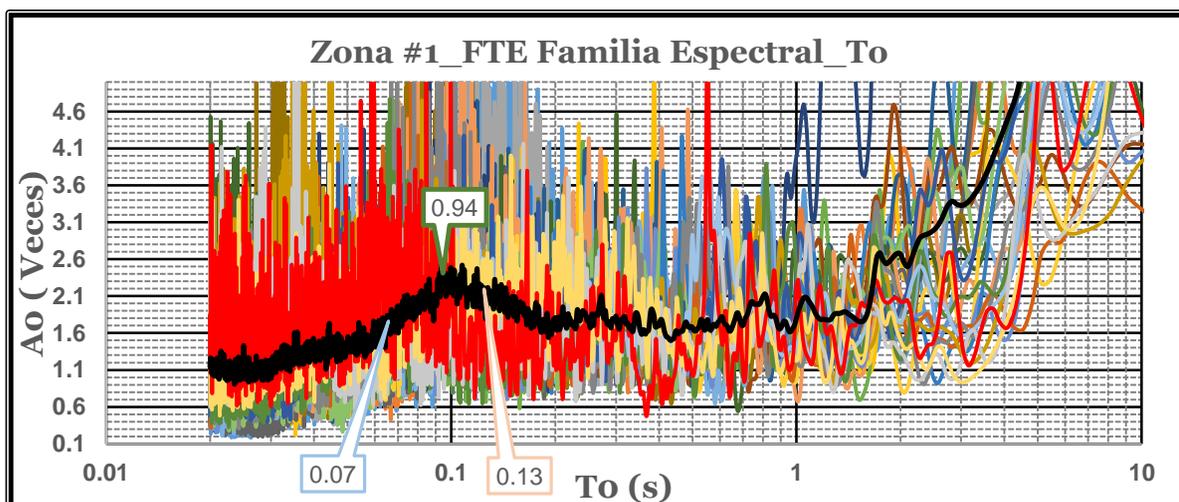


Fig. 5.2 Curvas de relación H/V agrupadas en función de la zona 1 y de su contenido de los periodos dominantes.

Zona 2: En esta zona los suelos tienen períodos fundamentales entre 0.13 hasta 0.36s, su modo de vibrar es más alto respecto a la zona 1, la curva de color negro refleja el promedio de las FTE, obteniendo el pico máximo en 0.17s.

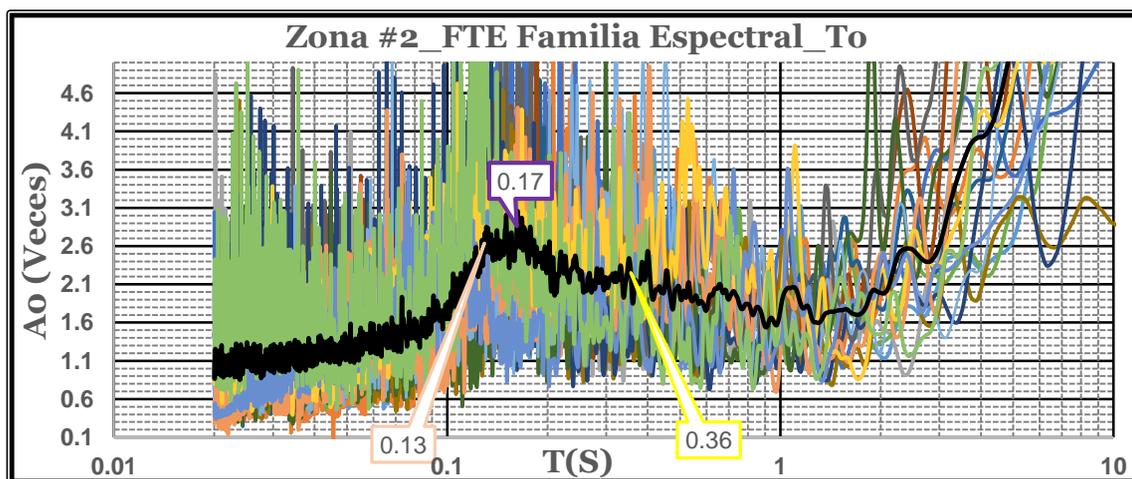


Fig. 5.3 Familia Espectral 2, agrupadas en función de su contenido de periodos dominantes.



En la selección de las familias espectrales de cada zona se tomaron los siguientes registros en función de los periodos en que vibración los suelos de Managua.

Tabla. 5.2 Selección de archivos correspondiente a la familia espectral.

Zonas	Selección de Registros
Zona 1	1, 2, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13, 15, 16, 17, 21, 28, 39, 43.
Zona 2	3, 4, 5, 14, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42.

### 5.2.2. Mapa de microzonificación en función de los periodos dominantes.

Mapa de microzonificación mediante las curvas de la relación H/V, agrupados en dos zonas.

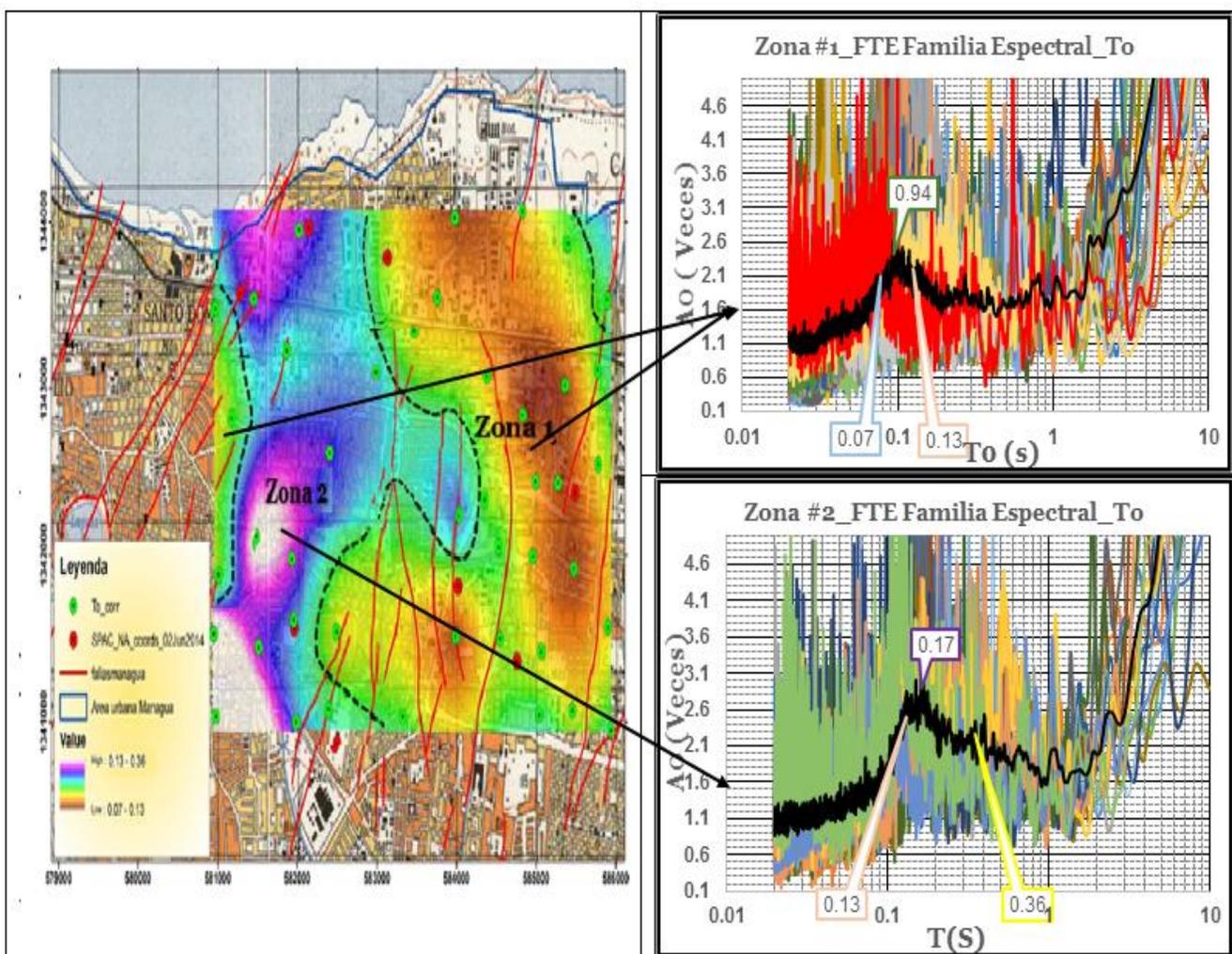


Fig.5.4 Mapa de zonificación en base a sus periodos fundamentales.



### 5.2.3. Clasificación de las familias espectrales para cada zona

Luego de a ver evaluado el conjunto de las gráficas de FTE en 43 sitios estudiados del área urbana de Managua con la Técnica REHV, se propone una zonificación basada en los periodos fundamentales que varían en dos categorías que van de 0.07 a 0.13s y de 0.13 hasta 0.36s (Figura5.2). Debido a esto se pudo agrupar perfectamente en dos zonas de acuerdo con su forma espectral:

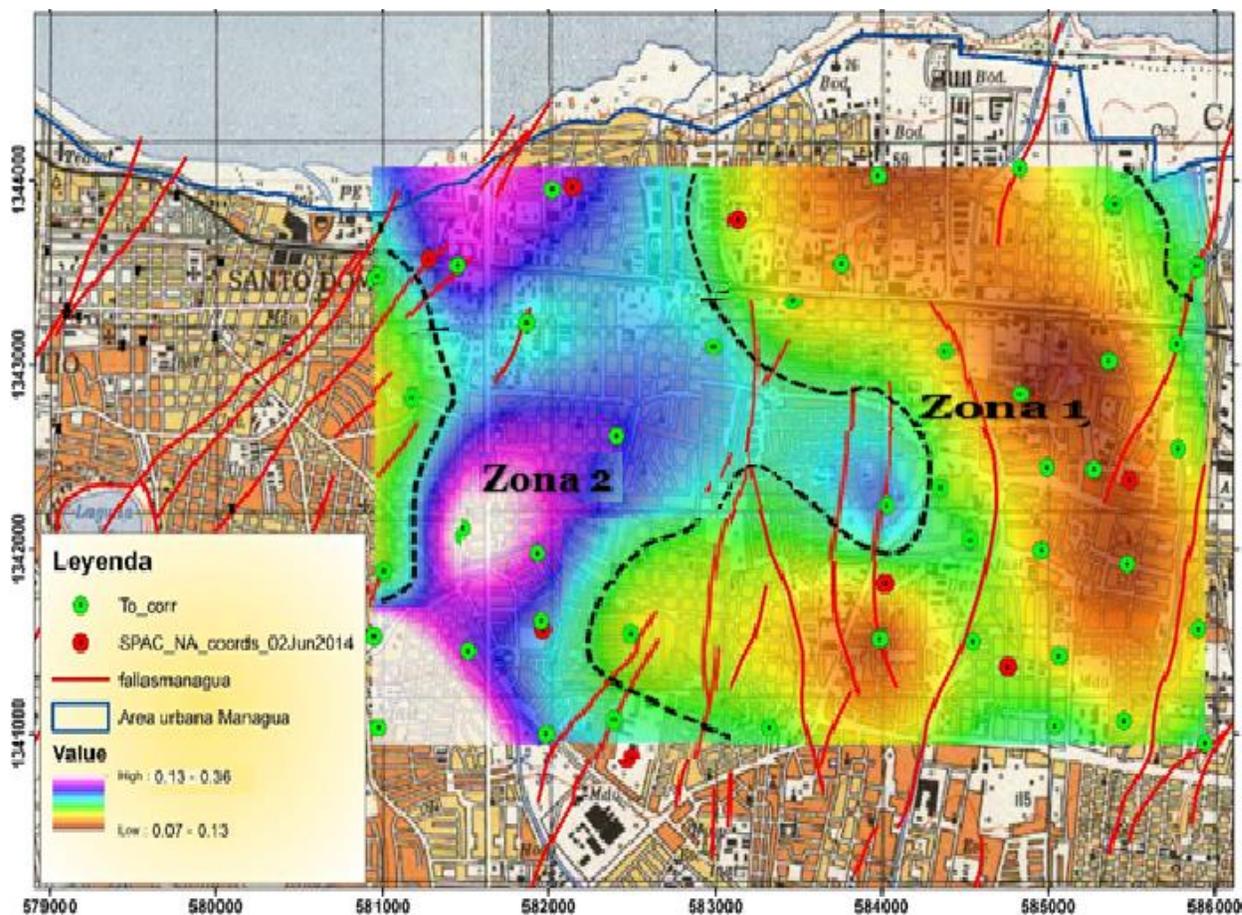


Fig. 5.5 Mapa de zonificación basada en los periodos fundamentales en el sitio de estudio.

### 5.3. Obtención de curva de dispersión e inversión de modelos de velocidades.

En esta etapa del trabajo se desarrolló un modelo unidimensional representativo para cada uno de los tipos de suelos del área de estudio.

Los valores de velocidad de ondas de corte y espesores para cada estrato fueron tomados de los resultados de estudios geofísicos de prospección sísmica, utilizando el método MASW; se realizó este tipo de estudio en nueve sitios representativos tal como se muestra en la tabla 5.5. Para obtener los modelos de velocidad a partir de registros MASW es



necesario obtener la curva de dispersión empírica de cada sitio, con el objetivo de conocer los espesores de estos estratos y un valor promedio de su velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ). Con la información obtenida de este ensayo es posible realizar una estimación indirecta de las características estratigráficas de los suelos que se encuentran a diferentes profundidades y así determinar sus propiedades dinámicas.

**Tabla. 5.3** Registros MASW en el sitio de estudio.

Perfil	Fecha	Coordenadas		Ubicación
		N	W	
1	29/04/2014	12°09'10.06''	86°15'11.30''	Chico Pelón
2	30/04/2014	12°09'22.75''	86°14'42.26''	Bo. Las Torres
3	05/05/2014	12°77'42.52''	86°14'30.50''	Don Bosco
4	14/05/2014	12°08'5.02''	86°14'47.58''	Dorado
5	12/05/2014	12°09'17.22''	86°14'9.11''	Bo. Santa Clara
6	19/05/2014	12°08'12.92''	86°13'39.11''	Georgino Andrade
7	20/05/2014	12°08'31.06''	86°12'51.36''	Villa Miguel Gutiérrez
8	21/05/2014	12°07'59.09''	86°13'15.54''	Américas 1
9	22/05/2014	12°07'26.52''	86°12'54.05''	Villa Venezuela

### 5.3.1. Curva de dispersión

La generación de una curva de dispersión es uno de los pasos más críticos para generar un perfil de velocidad de onda de cizalla preciso, en nuestro caso fue modelado mediante el software Surfseis del Kansas Geological (KGS). La curva de dispersión muestra la relación entre la velocidad de fase versus la frecuencia, en la figura 5.6 se muestra la curva de dispersión ajustada para el sitio del Dorado (perfil 4). En la figura el color rojo representa las amplitudes mayores de los registros de ondas medidos en el sitio; cuyas velocidades promedio varía entre 200-300 m/s, y con frecuencia de resonancia entre 18-27 Hz (Ver anexo III).

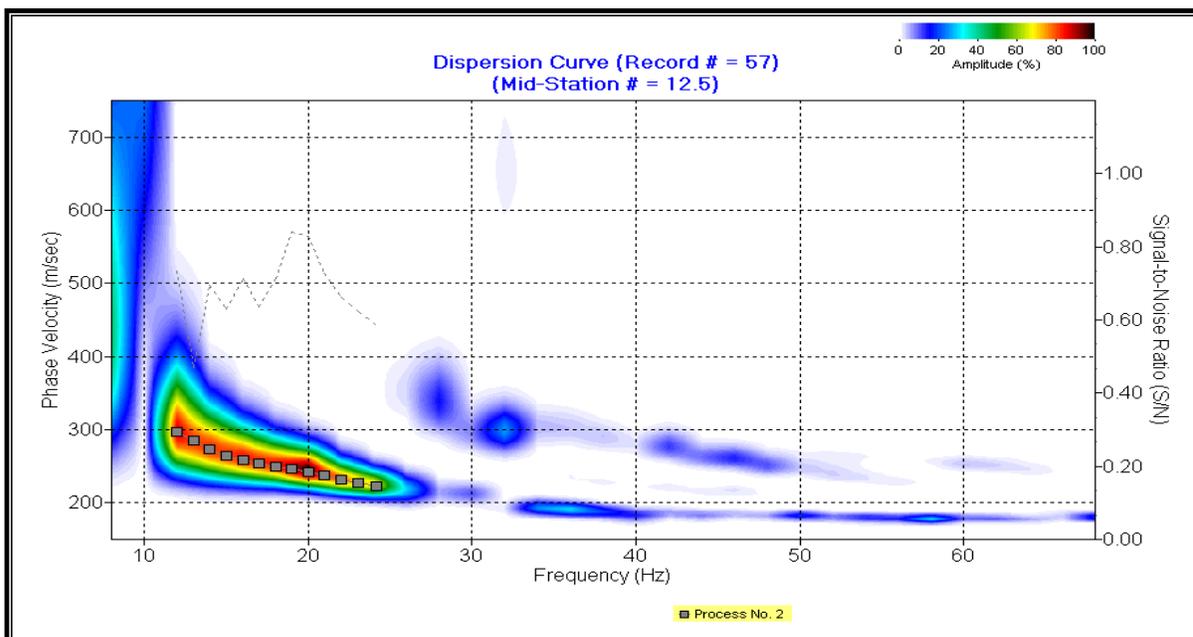


Fig. 5.6 Curva de dispersión ajustada para el 4to perfil del Dorado.

### 5.3.2. Inversión de la curva de dispersión

Una vez definida la curva de dispersión, se procede a la interpretación de la inversión de la curva de dispersión, ajustando una recta al primer modo de las ondas superficiales que en esa zona se encuentran propagándose. El programa Surfseis obtiene un modelo cortical estimado para ese modo fundamental, este modelo se presenta en la siguiente figura 5.7 donde se muestra los resultados de velocidad unidimensional correspondiente al perfil 4 obtenido en el Dorado en el cual podemos apreciar que la velocidad de ondas de corte para esta zona varía entre **240 a 400m/s** hasta una profundidad de **8.67 m**. La rutina selecciono como mejor modelo aquel cuyo RMSE (root mean square error) fuera menor al 5%.

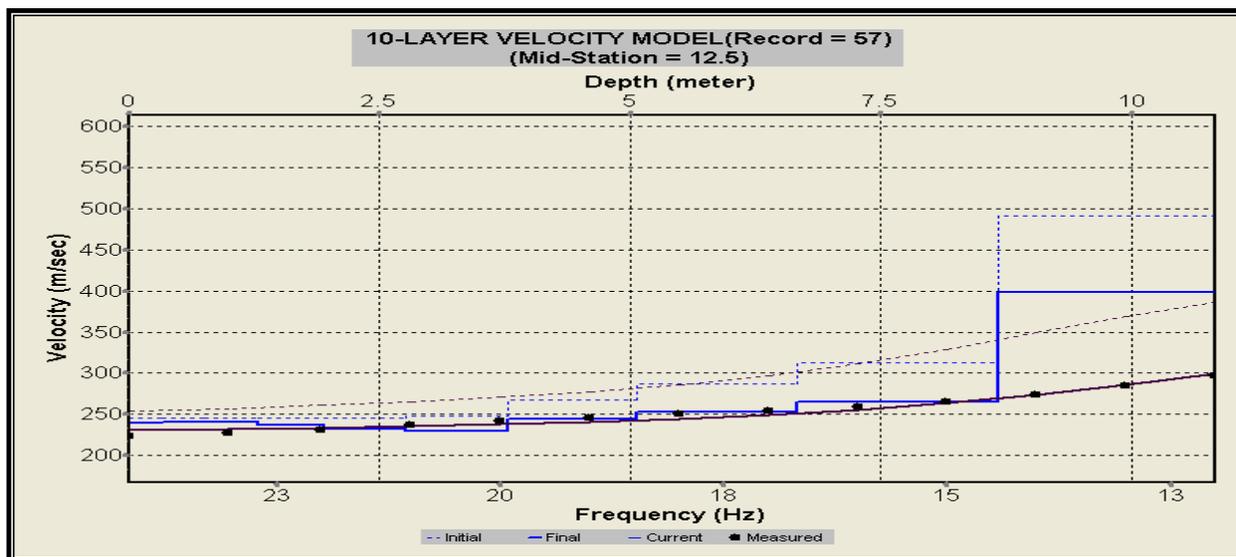


Fig. 5.7 Curva de inversión del 4to perfil ubicado en el Dorado.



### 5.3.3. Clasificación de zona de acuerdo al $V_{30}$ superficial.

Posteriormente de la estimación de velocidad de corte ( $V_s$ ), el periodo fundamental (s), así como la profundidad (m) en los 9 sitios estudiados, se propone una zonificación basada en las propiedades dinámicas de los suelos superficiales. De acuerdo a las propiedades dinámica de dichos suelos, se clasifica el área en dos zonas; en la tabla 5.4 y figura 5.8 se muestran los perfiles correspondientes de la zona 1, cuyas profundidades varían de 4.165 m a 4.228 m.

Tabla 5.4 Zona 1 de acuerdo a su profundidad.

Perfil	Sitio	Profundidad (m)
8	Américas 1	4.165
9	Villa Venezuela	4.228

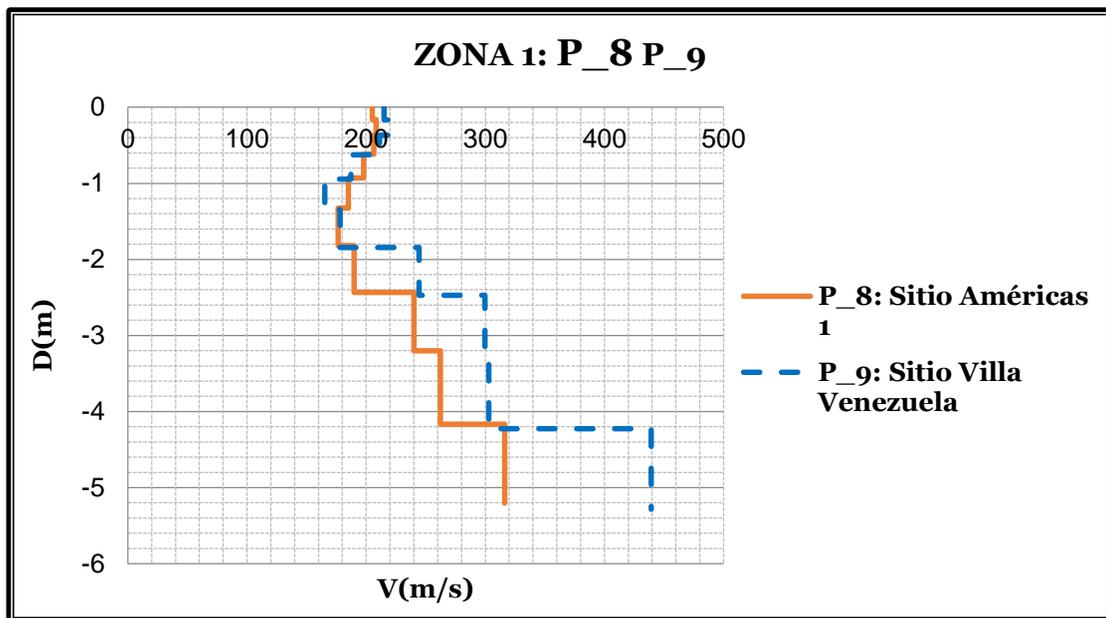


Fig. 5.8 Gráfica correspondiente a la zona 1.

Los resultados obtenidos para zona 1 (Fig. 5.8) muestra con el perfil ocho y nueve la existencia de un primer contraste alrededor de los 2 m de profundidad, con una velocidad aproximadamente de 240 m/s; también se observa otro a aproximadamente a 4.2 m de profundidad, lo que es consecuente con los resultados de H/V obtenidos previamente.

La siguiente tabla 5.5 muestra la selección de perfiles con similares características lo que indica la existencia de una zona un poco diferente a la anterior y siendo denominada como



zona 2, también se presenta el modelo unidimensional de velocidades de ondas en la figura 5.9.

Tabla 5.5 Zona 2 de acuerdo a su profundidad.

Perfil	Sitio	Profundidad (m)
1	Chico Pelón	4.938
3	Don Bosco	5.451
4	Dorado	8.669

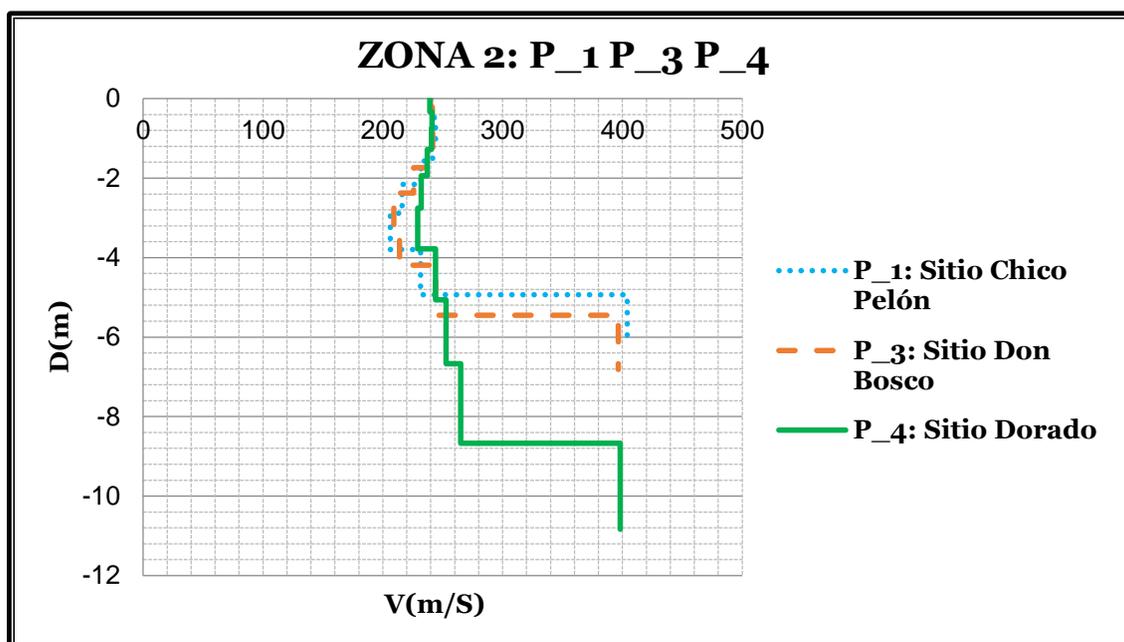


Fig. 5.9 Grafica correspondiente a la zona 2.

Los resultados obtenidos en la zona 2 (Fig. 5.8) muestra con el perfil uno, tres y cuatro la existencia de un contraste alrededor de los 2m de profundidad, con una velocidad aproximadamente de 238 m/s; así mismo se observa un segundo en aproximadamente 5.1 m de profundidad, con una velocidad de 253 m/s.

Por tanto se pudo observar que los resultados obtenidos son correspondientes con la técnica H/V obtenida anteriormente, dado que los picos máximos de los periodos fundamentales para la zona 1 y 2 oscilan entre 0.94s y 0.17s; lo cual coinciden con el método MASW según sus zonas.



### 5.4. Análisis de resultado con el método de Autocorrelación Espacial (SPAC).

La rutina desarrollada por Yokoi (2012), para el análisis de registros de Autocorrelación Espacial, permitió el procesamiento de las cinco mediciones para la implementación del estudio, cabe mencionar que el resto de las mediciones presentaron interferencias significativas por lo que no fueron usadas. Un punto muy importante de las mediciones de SPAC es, de ser posible adquirir con MASW registros complementarios para garantizar la continuidad del modelo estratigráfico. En este estudio se logró cumplir con la observación anterior puesto que los resultados del modelo unidimensional obtenido con MASW fueron incorporado a el análisis de SPAC antes de proceso de inversión de dichos datos.

La tabla 5.6 muestra los sitios donde se registró datos de SPAC que están siendo utilizados en esta investigación.

**Tabla. 5.6** Ubicación de registros SPAC.

Perfil	Fecha	Coordenadas		Ubicación
		N	W	
1	29/04/2014	12°9'9.80''	86°15'10.90''	Chico Pelón
2	30/04/2014	12°9'23.06''	86°14'41.98''	Bo. Las Torres
3	05/05/2014	12°8'59.36''	86°14'51.72''	INETER
4	14/05/2014	12°08'5.02''	86°14'47.58''	Dorado
5	21/05/2014	12°07'58.28''	86°13'15.54''	Américas 1

#### 5.4.1. Estratigrafía de los perfiles estudiados.

Los modelos estratigráficos se presentan en la tabla 5.7 y en la figura 5.10 los respectivos perfiles de la velocidad de ondas de cortante obtenidos en los arreglos para los distintos puntos estudiados. Para procesamiento y obtención de la inversión se utilizó el método *Very Fast Simulated Annealing Method*, que consta de un paquete de rutina desarrollada por Yokoi, (2012), la cual ofrece la ventaja de estimar el espesor y la Vs, determinando de esta manera la estructura del subsuelo.

**Tabla 5.7** Modelos estratigráficos calculados con SPAC para los arreglos de 45m.

Estructura de Velocidad estimadas a partir de las Velocidades fase y de las perforaciones				
	Prof (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (kg/m3)
<b>Chico Pelón</b>	1.49	190.06	1500.97	1787.81
	5.89	271.93	1591.84	1816.76
	7.46	363.60	1693.59	1848.67
	9.14	384.98	1717.33	1856.03



14.38	416.16	1751.94	1866.72	
18.95	502.07	1847.30	1895.85	
23.41	543.65	1706.97	1909.78	
27.98	577.24	1930.73	1920.94	
34.97	998.53	2398.36	2054.98	
	H (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Las Torres</b>	3.06	185.65	1496.07	1786.24
	4.96	253.95	1571.89	1810.44
	8.14	375.45	1706.75	1852.75
	10.48	278.27	1598.88	1818.99
	13.79	439.97	1778.36	1874.84
	18.87	664.16	2027.21	1949.51
	25.72	524.15	1871.80	1903.26
	31.81	606.93	1963.69	1930.75
	39.76	865.00	2250.15	2013.67
	H (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
<b>INETER</b>	4.08	203.49	1515.87	1792.59
	6.80	253.42	1571.29	1810.25
	9.34	388.12	1720.82	1857.11
	12.36	359.90	1689.49	1847.39
	17.02	465.57	1806.79	1883.53
	21.14	623.26	1981.82	1936.13
	27.62	524.13	1871.78	1903.25
	32.59	570.92	1923.72	1918.85
	41.61	650.55	2012.11	1945.07
	49.61	664.11	2027.16	1949.49
	61.25	805.83	2184.47	1995.04
	H (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Dorado</b>	2.01	119.58	1422.73	1762.54
	4.71	256.73	1574.97	1811.42
	7.83	327.09	1653.07	1852.75
	9.08	281.53	1602.50	1820.13
	15.06	384.59	1716.90	1855.90
	20.49	617.08	1974.95	1934.10
	27.85	375.65	1706.97	1852.82
	33.99	611.57	1968.84	1932.28
	41.72	827.36	2208.36	2001.84
	49.05	858.22	2242.63	2011.54
	61.31	973.30	2370.36	2047.19
	H (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Américas 1</b>	4.36	177.69	1487.24	1783.40
	6.64	238.2	1554.40	1804.89
	9.83	384.87	1717.21	1856.00
	12.21	402.71	1737.01	1862.12
	16.60	457.80	1798.16	1880.90



21.40	596.15	1951.73	1927.20
27.69	537.05	1886.13	1907.57
33.91	727.71	2097.75	1970.09
42.91	750.24	2122.77	1977.32
51.51	838.40	2220.62	2005.32
64.39	859.58	2244.13	2011.97

Según los perfiles estratigráficos mostrados en la tabla 5.7 se obtuvo para el arreglo uno de Chico Pelón información del subsuelo hasta una profundidad de 34.97m, en este se observa un incremento de las velocidades de onda de cortante hasta en el octavo estrato. En el arreglo de las Torres e INETER se pudo definir un modelo estratigráfico hasta una profundidad de 39.76m y 61.25m respectivamente, presentando un comportamiento de incremento de velocidades a partir del quinto estrato, mientras que los últimos estratos presentaron un cambio significativo por lo que podemos decir que hay presencia de suelos densos; una tendencia similar se da en el arreglo registrado El Dorado y las Américas 1, según los resultados obtenidos podemos decir que en dicha área de estudio tenemos una sola zona de clasificación; alcanzando velocidades de ondas corte mayor a 760 m/s observando presencia de roca elástica.

En base a los resultados de la tabla 5.7 y la figura 5.10 se hace una comparación con el modelo estratigráfico según la clasificación de Faccioli (1973), en cuanto al arreglo en INETER indica que los materiales aluviales alcanzan una profundidad de 9.34m con una velocidad promedio de 388.12 m/s; de los 10m en adelante nos encontramos con suelos medianamente densos los cuales están compuestos por arenas de densidad media, pómez, gravas y canteras, alcanzando una profundidad máxima de 61.25m con una velocidad promedio de 805.83 m/s. La conformación del modelo estratigráfico para los arreglos de Chico Pelón, las Torres, el Dorado y las Américas 1, presentan un perfil muy similar al de INETER. Estos resultados concuerdan en gran medida con el perfil estratigráfico abordado en los estudios de Faccioli (1973).

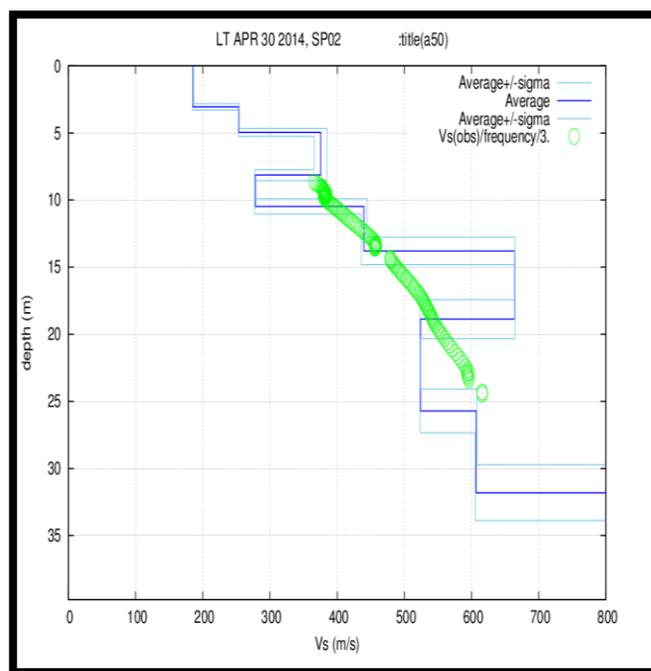
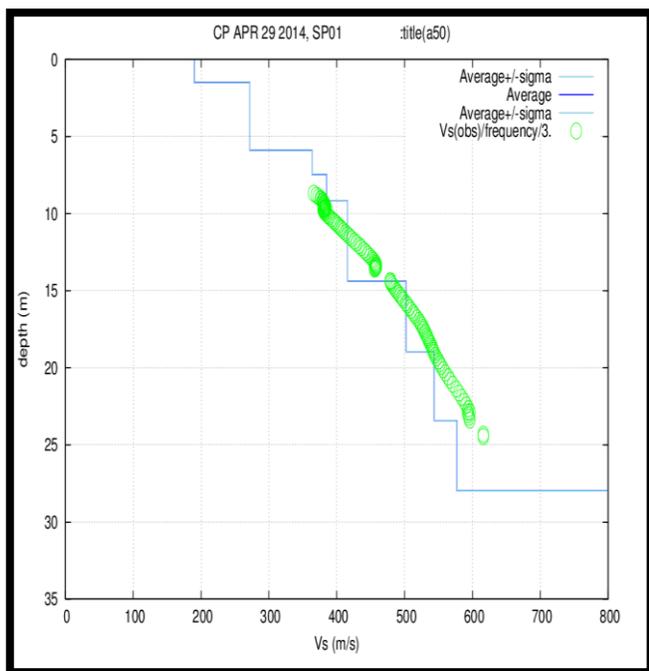
En el procesamiento utilizado por la rutina de inversión se determinaron los errores de la velocidades calculadas con respecto a las observadas basándonos en el parámetro estadístico de desviación estándar; especificando que la mejor inversión es la que tenía una desviación  $\pm 5\%$ .

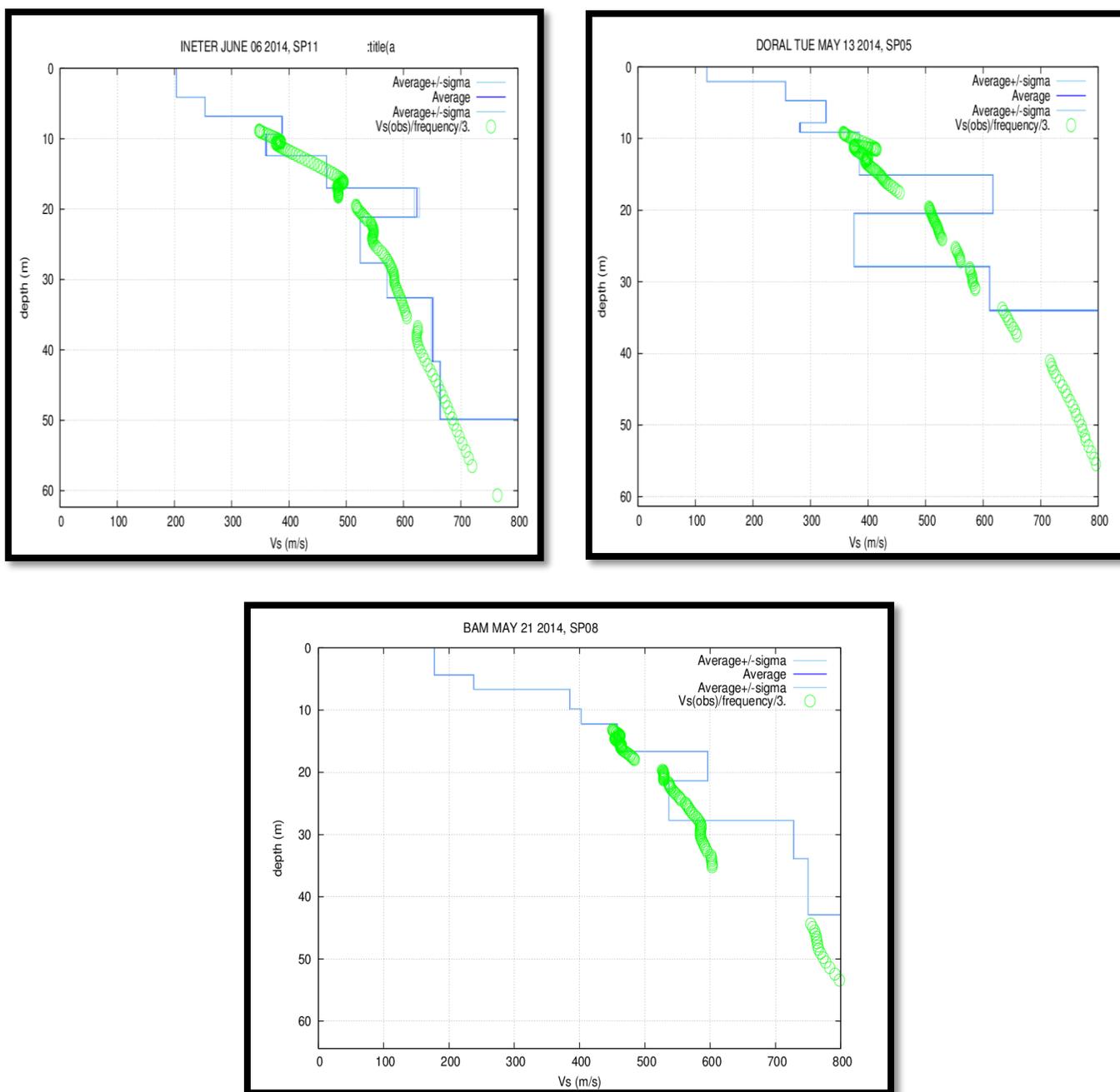


**Tabla 5.8** Ejemplo de perfil invertido en INETER con los valores de error estimados para cada parámetro.

Espesor (m)	SD	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	SD	V <sub>p</sub> (m/s)	SD	V <sub>s</sub> (m/s)	SD
4.08	0.00%	1792.59	0.01%	1515.87	0.03%	203.49	0.03%
2.72	0.00%	1810.25	0.01%	1571.29	0.03%	253.42	0.03%
2.54	0.00%	1857.11	0.03%	1720.82	0.11%	388.12	0.10%
3.02	0.00%	1847.39	0.06%	1689.49	0.20%	359.9	0.18%
4.66	0.00%	1883.53	0.00%	1806.79	0.01%	465.57	0.01%
4.12	0.00%	1936.13	0.15%	1981.82	0.50%	623.26	0.45%
6.48	0.00%	1903.25	0.00%	1871.78	0.00%	524.13	0.00%
4.97	0.00%	1918.85	0.00%	1923.72	0.01%	570.92	0.00%
9.02	0.00%	1945.07	0.08%	2012.11	0.25%	650.55	0.23%
8.25	0.00%	1949.49	0.02%	2027.16	0.08%	664.11	0.07%

Una observación interesante al aplicar el método SPAC, es que los parámetros dinámicos obtenidos corresponden a la profundidad del modelo estratigráfico el cual es promedio del lado más largo de suelo encerrado en cada triángulo equilátero, y la estratigrafía obtenida es totalmente horizontal con fronteras laterales infinitas.





**Fig. 5.10** Modelo unidimensional de ondas de cortante en los arreglos de Chico Pelón, las Torres, INETER, el Dorado y las Américas uno, estimados con el método SPAC.

Basado en los resultados de todos los perfiles de velocidades de ondas S se encontró que el área de estudio se puede definir según las propiedades dinámicas de los suelos en una sola zona dado que su promedio de velocidades esta en 470.7 m/s, tal como se muestra en la figura 5.11.

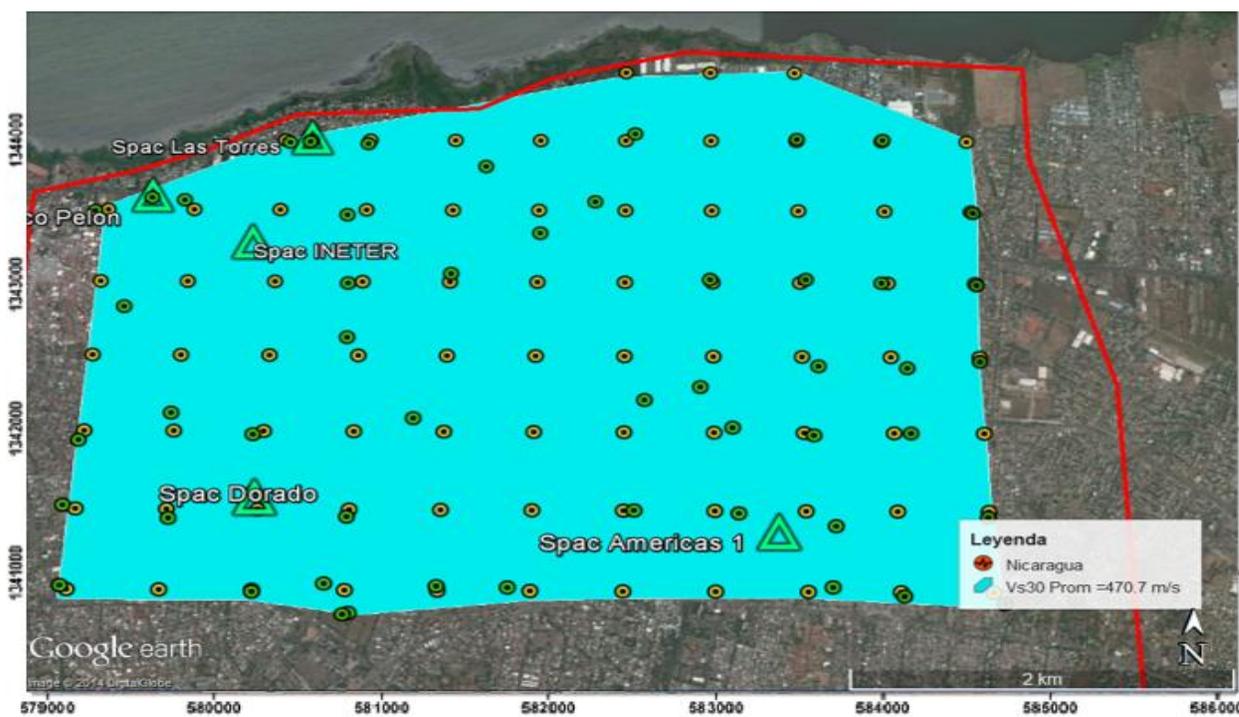


Fig. 5.11 Mapa de zonificación del área de estudio basado en Vs 30.

## 5.5. Propuesta de Clasificación de Tipos de Suelos para el Área de Estudio.

### 5.5.1. Cálculo de Vs30 Utilizando Los Criterios del NEHRP.

Utilizando los modelos de velocidades de corte calculados mediante la técnica de Autocorrelación Espacial (SPAC), se consideró hacer una clasificación por tipo de suelo para el área de estudio tomando en cuenta la propuesta de clasificación del National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP), tal como se especifica en la tabla 3.4. Para este caso, se tomó  $V_s$  a 30 metros de profundidad ( $V_{s30}$ ), tal a como lo especifican el NEHRP (2003). En la tabla 5.8 se observan los resultados de la clasificación de sitio.

Tabla 5.9 Clasificación de sitio calculada según NEHRP.

Sitio	Velocidad de Corte ( $V_{s30}$ )	Clasificación de Sitio
	NEHRP	NEHRP
Chico Pelón	466.64	Suelo muy denso y roca blanda
Las Torres	473.83	Suelo muy denso y roca blanda
INETER	477.86	Suelo muy denso y roca blanda
Dorado	430.23	Suelo muy denso y roca blanda
Américas 1	504.94	Suelo muy denso y roca blanda



De acuerdo al análisis de la tabla 5.9, se aplicó la ecuación 3.11 para obtención de los valores promedio de velocidades de ondas de corte ( $V_{s30}$ ) tal como se muestra en la segunda columna obtenida para cada perfil estudiado, la tercer columna muestran que la clasificación del sitio el cual es clase **C** que según la norma NEHRP es suelo muy denso y roca blanda, con un rango de  $360 < V_s \leq 760$  m/s.

### 5.6. Espectro de Respuesta Sísmica de la Zona.

Para evaluar la respuesta sísmica de sitio, se tomó en consideración el modelo de velocidad de ondas de corte mostrados en la tabla 5.7 para el perfil de INETER de tal forma que se logró obtener el espectro elásticos de respuesta del sitio.

Para realizar el análisis se utilizó como sismo de entrada el acelerograma de la componente E-O (por ser la más intensa) del registro correspondiente al terremoto de 1972 obtenida en la refinería ESSO (figura 5.11).

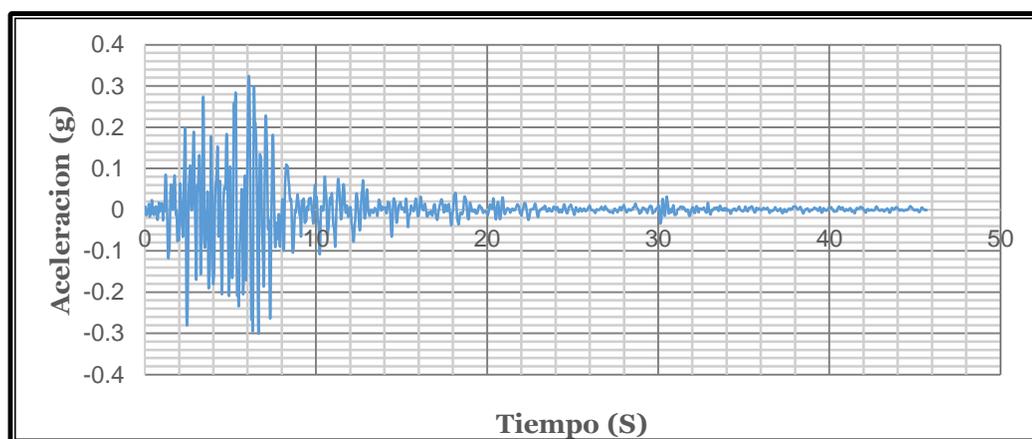
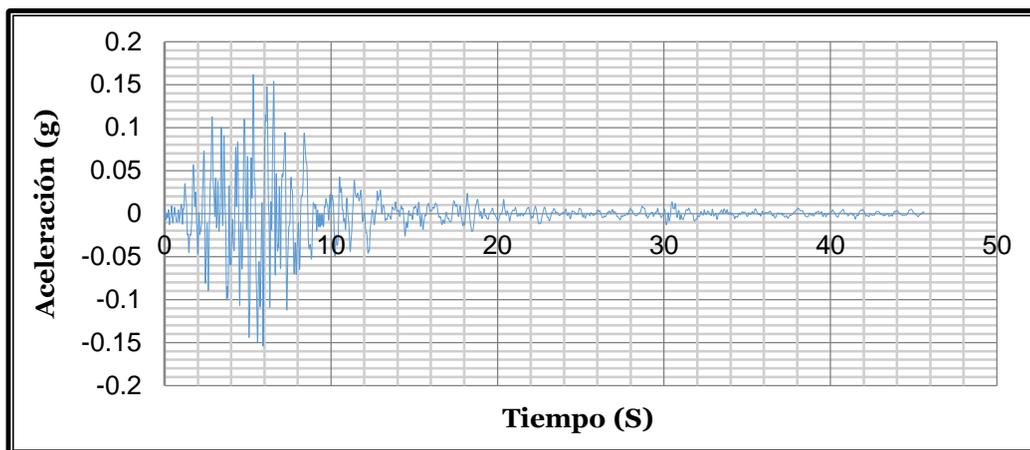


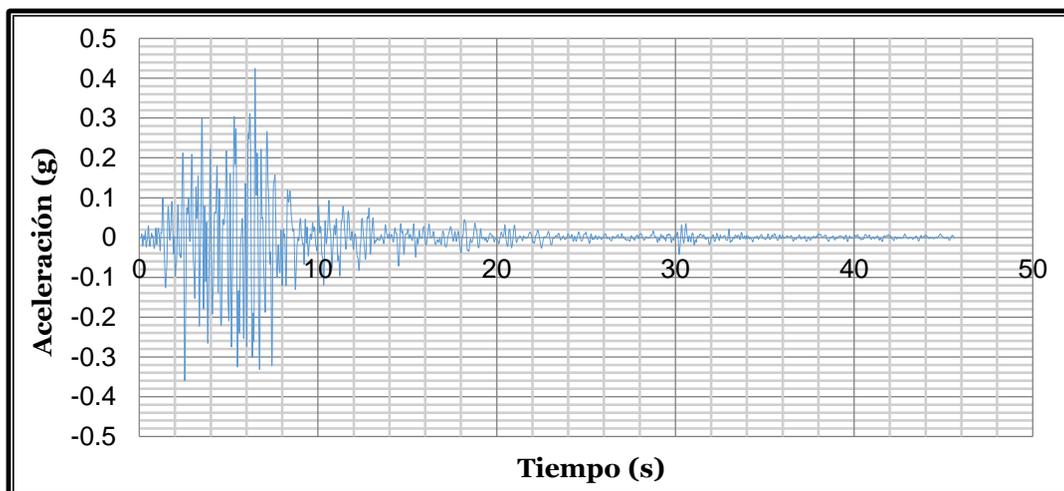
Fig. 5.12 Registro de acelerograma terremoto 1972, componente E-O.

Para el análisis deconvolucionado se utilizó el registro de 1972 y la información estratigráfica del perfil de INETER mediante el método SPAC+MASW, además se tomó como base el trabajo realizado por Faccioli et al (1973), donde obtuvo un modelo de velocidad en un sitio localizado a 200m donde se registró el sismograma de 1972; utilizando el software Degtra A4 se logró adquirir el acelerograma que se hubiera registrado en un afloramiento de roca (Figura 5.12). Cuya aceleración máxima es de 0.16g.



**Fig.5.13** Acelerograma deconvolucionado del terremoto de Managua de 1972, componente E-O.

Por medio del software DEEPSOIL v5.1 y asumiendo el método de análisis en dominio de la frecuencia (lineal equivalente), se obtuvo el acelerograma sintético de superficie para el perfil INETER, con una aceleración máxima de 0.42g.



**Fig.5.14** Acelerograma de superficie para el perfil INETER.

De acuerdo al acelerograma obtenido para la estratigrafía del sitio, mediante el software DEEPSOIL v5.1 se procedió a calcular el espectro de respuesta para un 5% de amortiguamiento, como se muestra en la figura 5.14; se logra apreciar que para el espectro de respuesta obtenido la máxima ordenada espectral tiene un valor máximo de 1.56g con periodos fundamentales de 0.36s, lo que es consecuente con los resultados obtenidos con razón espectral H/V.

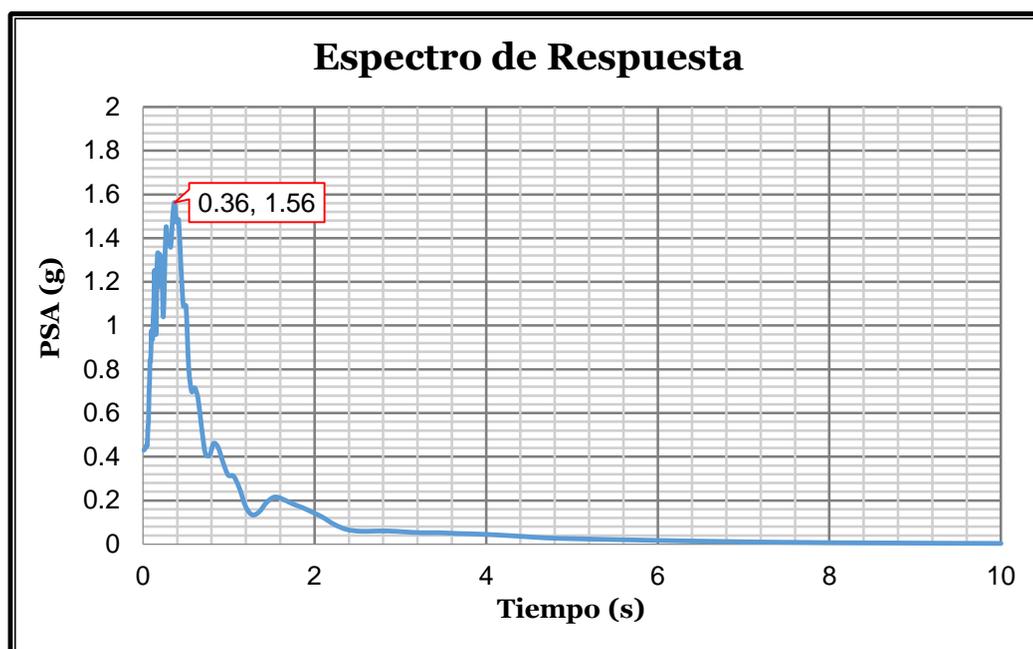


Fig.5.15 Espectro de respuesta obtenido para el perfil INETER.

### 5.6.1 Comparación Entre el Espectro de Respuesta de Sitio y el Espectro de Diseño RNC\_07.

Una vez analizada el espectro de respuesta de sitio, se realizó la comparación con respecto al espectro de diseño del RNC\_07 (figura 5.15), donde se pudo observar diferencias notorias, dado que el RNC\_07 presenta mayor aceleración espectral de 1.67g, mientras que el espectro de sitio contiene menores aceleraciones espectrales de 1.56g, este comportamiento posiblemente se debe a que en esta zona el estrato es de gran profundidad (61.25m) por lo que existe mayor disipación de energía.

Por otro lado, el espectro en el sitio de estudio muestra que dependiendo de las condiciones locales las aceleraciones espectrales máxima tienden a variar tanto para periodos largos como cortos, en este caso (figura 5.15). Efectivamente se observa que, los resultados del espectro para el sitio coinciden con los periodos bajos obtenidos mediante las mediciones con la técnica de H/V. En la siguiente tabla se muestran los límites (periodos fundamentales  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$ , aceleraciones espectrales  $a/g$  y factor de amplificación  $s$ ) obtenido para determinar el espectro de diseño del RNC-07.

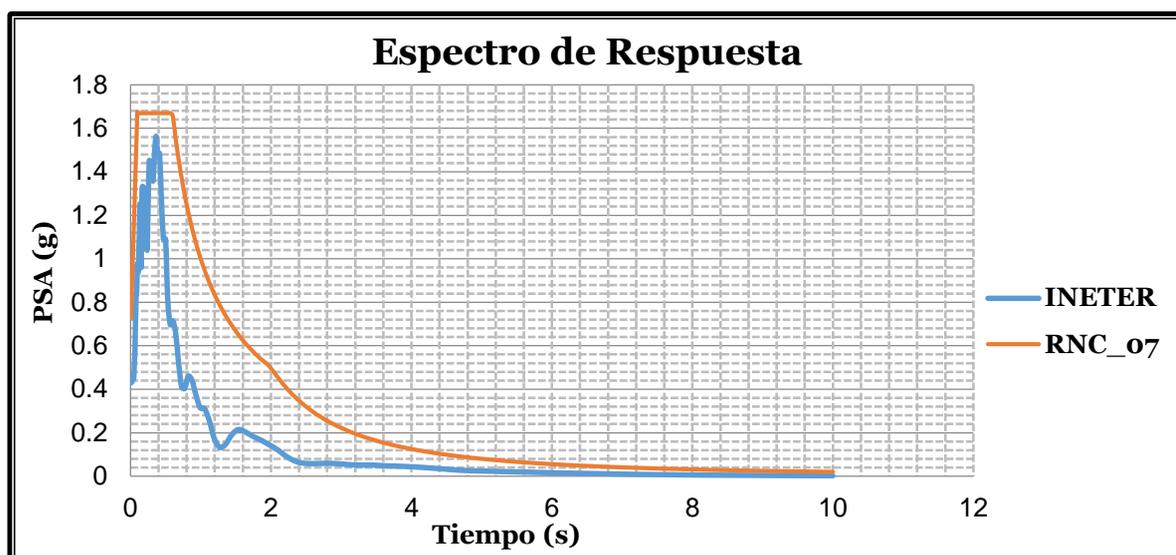


Fig.5.16 Comparación del espectro de respuesta del sitio y RNC\_07.

Tabla 5.10 Límites y parámetros del espectro de diseño del RNC-07.

Análisis	a/g	Ta(s)	Tb(s)	Tc(s)	s
RNC-07	1.67	0.10	0.60	2.0	2.0

### 5.6.2 Comparación Entre la Función de Transferencia de Sitio y las Obtenidas por H/V.

En las siguientes figuras se muestra la comparación entre la función de transferencia teórica de los sitios estudiados y la función de transferencia empírica promedio de cada una de las zonas obtenidas de acuerdo a las familias espectrales por H/V, en la figura 5.16 a la 5.20 se puede notar una similitud en cuanto al comportamiento de sus modos de vibrar para la zona 2 y el de sitio de INETER, con periodos de alrededor de 0.17s; a diferencias de la zona 1 donde su modo de vibra es menor, así mismo se muestra para los perfiles de Chico Pelón, las Torres, el Dorado y las Américas 1.

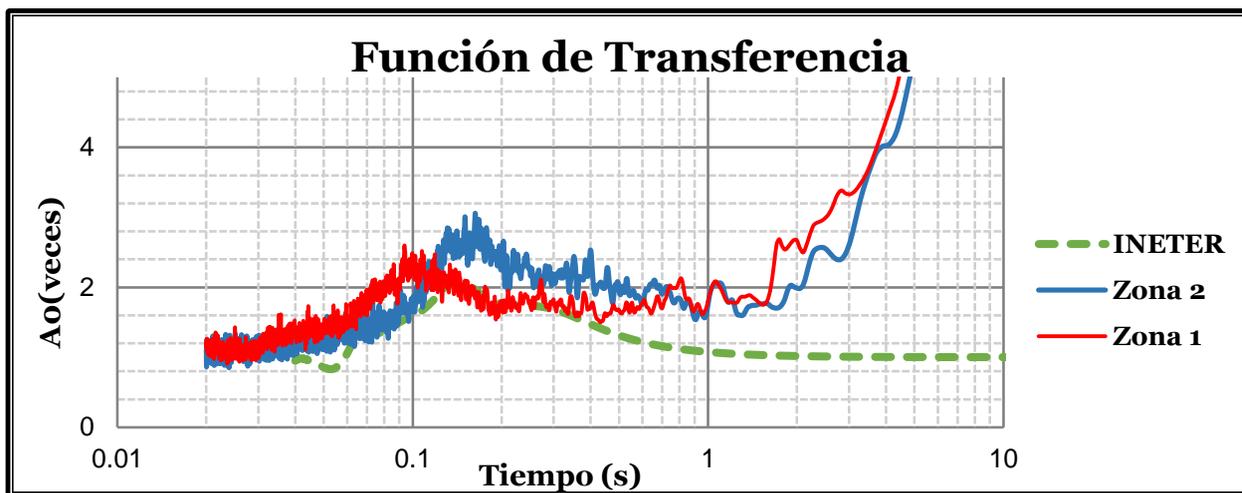


Fig.5.17 Comparación entre la función de transferencia de sitio de INETER y los promedios obtenidas por H/V.

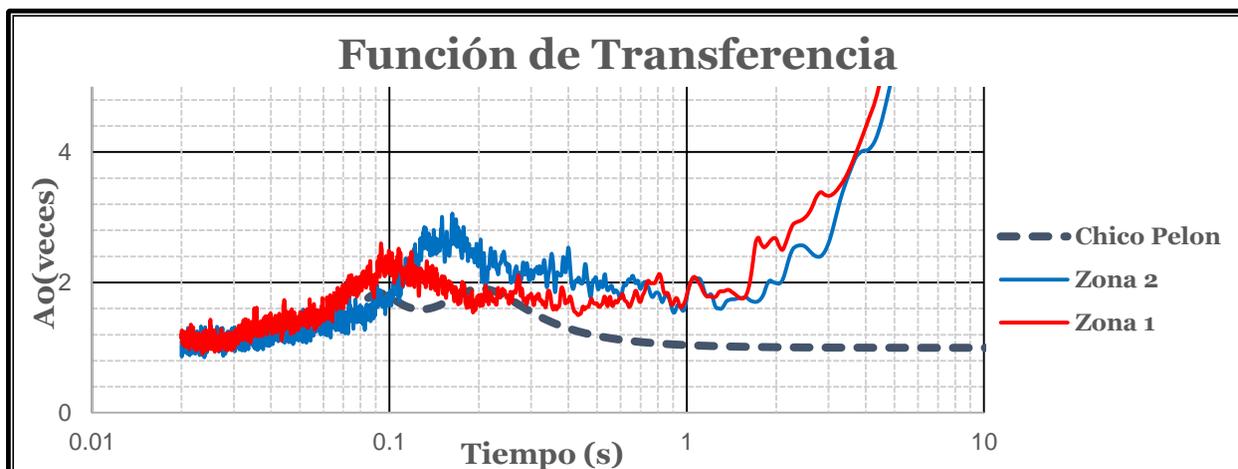


Fig.5.18 Comparación entre la función de transferencia de sitio de Chico Pelón y los promedios obtenidas por H/V.

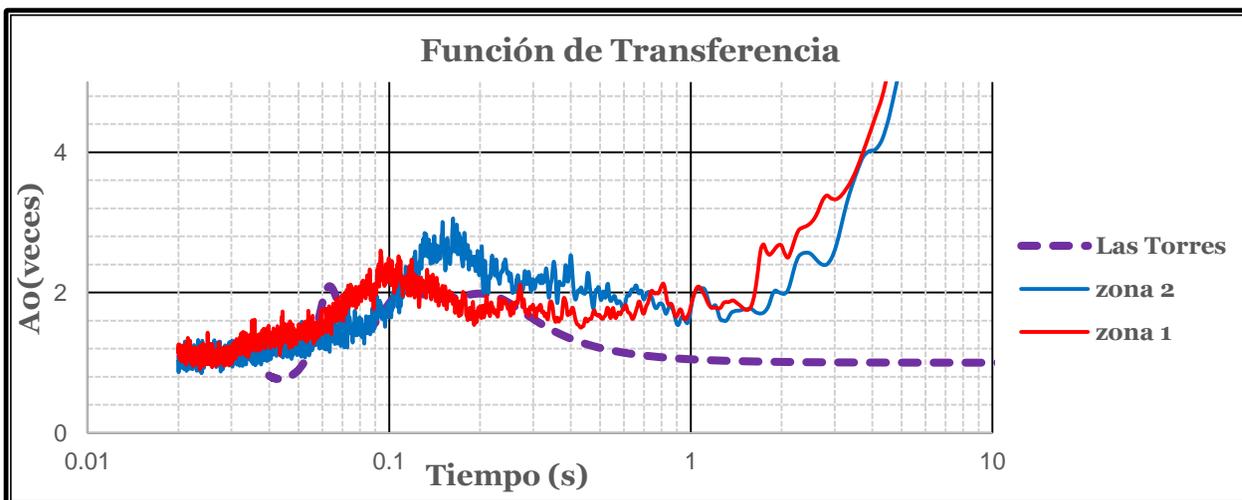


Fig.5.19 Comparación entre la función de transferencia de sitio de las Torres y los promedios obtenidas por H/V.

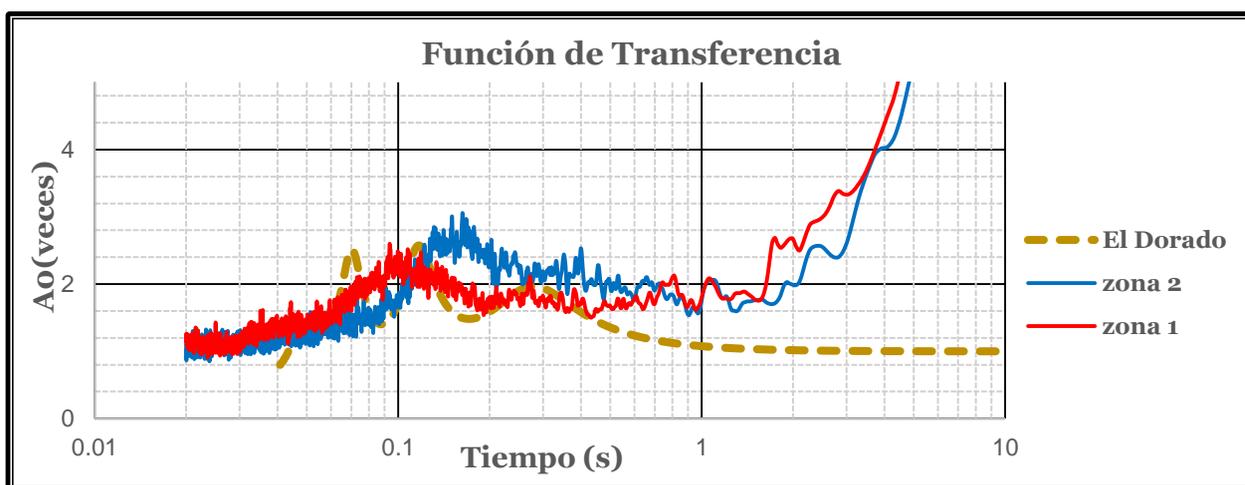


Fig.5.20 Comparación entre la función de transferencia de sitio de el Dorado y los promedios obtenidas por H/V.

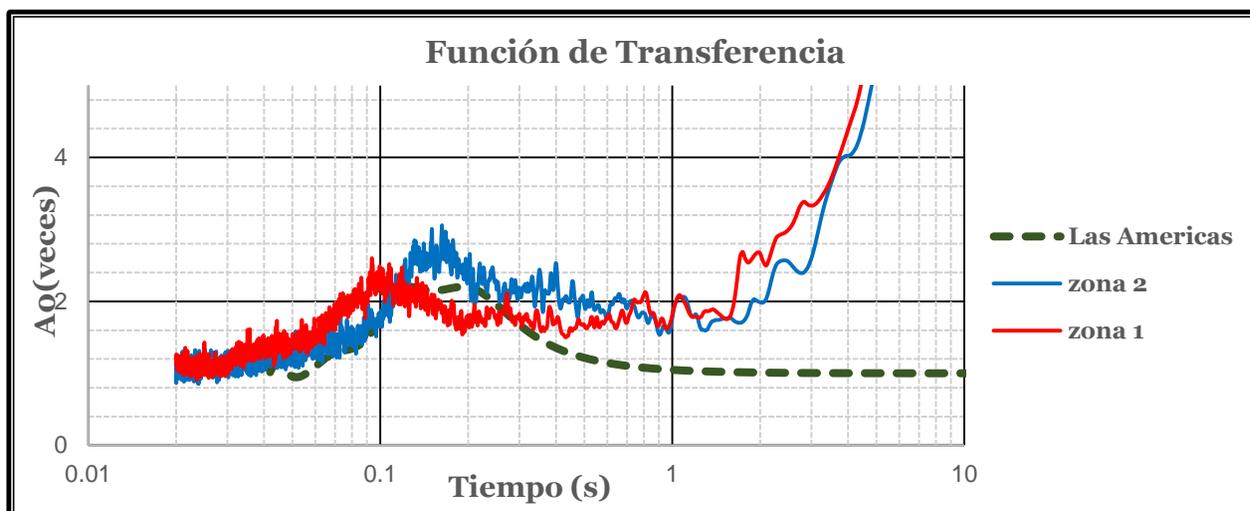


Fig.5.21 Comparación entre la función de transferencia de sitio de la Américas 1 y los promedios obtenidas por H/V.



## 6. CONCLUSIONES

Basado en los resultados e interpretación de los mismos en este estudio y según los objetivos trazados podemos resumir los hallazgos más importantes en las siguientes conclusiones:

Al evaluar los 43 sitios del sector noreste de la Ciudad de Managua, se obtuvo una robusta correspondencia entre las funciones de transferencia empíricas (FTE) y cada uno de los puntos evaluados lo cual se pudo ver empleando la técnica de Nakamura con microtemores de periodos largos, esto nos lleva a concluir que es una técnica muy práctica para caracterizar las propiedades dinámicas de los suelos, principalmente las frecuencias dominantes. Esto permitiría caracterizar de manera confiable y eficiente los suelos de Managua y del resto del territorio, por lo tanto es factible para realizar una microzonificación sísmica.

Para los sitios estudiados se propone una zonificación, basada en los periodos fundamentales de REHV. La primera zona vibra de 0.07 a 0.13 s y la segunda se encuentra entre 0.13 hasta 0.36 s. Los suelos de Managua muestran en las primeras capas suelo moderadamente blando (<10 m) y luego la rigidez aumenta de tal manera que se puede considerar como el suelo rígido según el RNC-07. La diferencia de los períodos fundamentales observados en la ciudad puede ser interpretada como una consecuencia del espesor del material superficial en lugar de interpretarlo como un cambio en el material.

Con la aplicación y el análisis del método MASW fue posible determinar curvas de dispersión apropiadas para las capas de suelos más superficiales, cuyas longitudes de onda permitieron resolver modelos de velocidades representativos para cada sitio de estudio hasta una profundidad máxima de 9 m, obteniendo dos zonas definidas por su perfil estratigráfico y sus periodos de vibración lo cual fue confirmado con los registros H/V obtenidos en cada sitio. Dado que la utilización de la técnica MASW no permitió alcanzar profundidades mayores de 10m, se utilizó la técnica de Autocorrelación Espacial (SPAC), determinando con esta las curvas de dispersión de velocidades de fase de las ondas Rayleigh en cinco sitios del área de estudio.

De acuerdo a los cinco modelos estratigráficos estimados en este trabajo, se obtuvieron profundidades que varían entre 34.97m a 64.39m según los perfiles de Chico Pelón, las Torres, INETER, el Dorado y las Américas 1; cuyas velocidades promedio en estos estratos



van desde 119.58 m/s en los estratos más superficiales hasta 998.53 m/s en la interface con suelo denso o roca blanda. Estos resultados contribuyen en gran medida al conocimiento de la estructura estratigráfica de los suelos profundos en el área de estudio, y en un futuro permitirán realizar modelos más complejos y poder entender mejor el fenómeno de las amplificaciones sísmicas observadas.

Del análisis del método SPAC, se logró determinar el Vs30 para cada perfil estratigráfico, tomando en consideración el código NEHRP el cual establece como requisito modelos de velocidad a profundidades de 30m, obteniendo así para nuestro sitio de estudio suelos tipo C que según su clasificación son suelos muy denso y roca blanda, observando con la técnica de Autocorrelación Espacial una sola zona, de acuerdo al Vs30 determinado con SPAC. Es decir que la zona Noreste del Sector de Managua se puede considerar como una sola zona de acuerdo a las propiedades dinámicas de los suelos, pues presentan velocidades de ondas S con valores similares.

Al comparar los resultados de los periodos de vibración con los modelos unidimensionales de propagación de ondas definidos con el método de SPAC, se encontró una buena correlación en los periodos de vibración que estas presentan; siendo que con la técnica H/V se obtuvieron dos zonas y en con SPAC una sola zona dado que su velocidades de ondas S andan en 470.70 m/s en promedio, a pesar de esas diferencias, con ambos métodos se encuentran que los resultados obtenidos parecen estar de acuerdo con la geología y la información geotécnica de la zona de estudio.

Al calcular los coeficientes H/V, se observó que la metodología empleada no es exacta con respecto a los niveles de amplificación; dado que las medidas de las mismas son relativas respecto al mismo sitio de medición, sin embargo la técnica proporciona información confiable sobre el periodo de los estratos del subsuelo, lo cual fue corroborado con la técnica de SPAC. Con el propósito de obtener una respuesta sísmica de sitio en el área de estudio, se realizó un análisis comparativo utilizando el registro del sismo ocurrido en 1972, con el obtenido en INETER, respecto al espectro de diseño del RNC-07; dicho análisis demostró que los modos de vibrar del sitio de estudio.

Con el propósito de obtener una respuesta sísmica de sitio y corroborar como se encuentra el área de estudio con respecto al espectro de diseño del RNC-07; se realizó un análisis comparativo utilizando el registro del sismo ocurrido en 1972 y el obtenido en INETER, dicho análisis evidencio que los modos de vibrar del sitio de estudio corresponden muy bien a los



periodos de vibración calculados en la técnica H/V, así mismo se obtuvo una comparación con RNC-07, cuyas aceleraciones espectrales presentan una sobre estimación, pues el reglamento da valores de aceleración para el sitio de 1.67g, mientras que la aceleración según el espectro de respuesta del sitio es de 1.56g respectivamente.

Finalmente los resultados obtenidos en este trabajo ponen en evidencia la importancia de caracterizar las propiedades dinámicas de los suelos en Managua mediante estudios de ingeniería sísmológica o ingeniería sísmica. Esto ayudaría a tener factores de amplificación por tipos de suelos de menor magnitud lo que reduciría los diseños al ser más realistas al contexto sísmico en que se ubicaran las edificaciones; con este estudio se puede indicar el proceso a seguir en otros sitios con condiciones similares al Sector Noreste de Managua.



## **7. RECOMENDACIONES**

Existen muchas limitaciones en la realización de trabajos como este, lo que impide dar respuestas a todas las preguntas e inquietudes que van apareciendo durante el desarrollo del mismo. Es por eso que se recomienda seguir profundizando en las siguientes líneas de investigación:

- Dado que con las técnicas geofísicas es posible alcanzar basamentos rocoso a profundidades mayores de 30m en los suelos de Managua, se recomienda utilizar dichas técnicas para obtener modelos de velocidades de ondas de corte representativos del sitio con el fin de obtener información a mayores profundidades en toda la ciudad, lo cual es recomendado por gran variedad de códigos internacionales (NEHRP-03).
- Se requiere una reevaluación de las formulas existentes para calcular  $V_s$  con el fin de estimar profundidades de 30m tal como se establece en algunos códigos internacionales, dado que el RNC-07 limita la obtención de modelos de velocidad de corte a grandes profundidades, para esto es necesario la actualización de datos en toda la ciudad y el resto del país y complementarlos con las características geotécnicas y geológicas propias de cada sitio.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en esta tesis investigativa, es deseable que se impulse la utilización de microzonificación sísmica usando nuevas metodologías desarrolladas in situ para estudios de carácter dinámico de los suelos de Managua; de tal forma, que con la realización de ensayo se puede contribuir a las labores de prevención de desastre ante terremotos en la capital de Managua.
- Es recomendable evitar avenidas o carreteras en la toma de registros de campo ya que pueden tener interferencia y por ende los resultados pueden no ser satisfactorios. También se recomienda realizar las mediciones durante horas con mínima interrupción y así evitar incertidumbre en el procesamiento de datos.



## 8. REFERENCIAS

- A. Alfaro, N. M. (2010). Microzonificación Sísmica de Barcelona Utilizando el Método de Nakamura ventajas y limitaciones. En N. M. A. Alfaro, *Microzonificación Sísmica de Barcelona Utilizando el Método de Nakamura ventajas y limitaciones*.
- Aki K. (1957). *Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors*, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-457.
- Aki K. (1965). *A note on the use of microseisms in determining the shallow structure of the Earth's Crust*. *Geophysics* 30: 665-666.
- Alfaro, A. (2005a). *Estimation of the Shear Wave Velocity Structures Using Arrays of Long Period Microtremors. Individual Studies by Participants at the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Building Research Institute. Tsukuba Japan, Vol. 41*.
- Alfaro, A. (2005b). *Aplicación de los Microtemblores en la Ingeniería Sísmica. XVI Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá*.
- Arai H & Tokimatsu K. (2000). *Effects of Rayleigh and Love waves on microtremor H/V spectra*.
- Arai H y Tokimatsu K. (2004). *S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum*.
- Biot, M. 1. (1962). *“Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media” Journal of Applied Physics; <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=7>*.
- Borcherdt, R. D. (1970). *Effects of local geology on ground motions near San Francisco Bay*. *Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 60*.
- Brown, R. W. (1973). *Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua earthquake of December 23, 1972*.
- Capon J. (1969). *High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis*. *Procc. IEEE*, 57, 1408-1418.
- Castillo Vega, W. A., & Zepeda Reyes, E. G. (2013). *Análisis Comparativo de la Respuesta Sísmica de Sitio No-lineal y Lineal equivalente en el Área Urbana de la Ciudad de Managua, Nicaragua*.
- Castrillo E. N., Kiminobu E., Yokoi T., Ulriksen P., (2014). *Local site effect characterization in the old downtown area of Managua city, Nicaragua based on long period microtremors*. 5th Asia Conference on Earthquake Engineering. Taiwan.
- Chavez et al. (1987). *Estudio del Efecto de Sitio en el área urbana de las ciudades de Masaya y Catarina. Tesis de Maestría, CIGEO, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua*.
- Cornell, C. A. (1968). *Engineering seismic risk analysis*. *BSSA*, Vol 58.



- Del valle, E. (. (1973). *Daños causados por los temblores del 23 de Diciembre de 1972 en las construcciones de Managua*. UNAM, Mexico. Mexico.
- Diana O, F. A., & . (2006). *Carta Geotecnica de la ciudad de Managua*.
- Earthquake Engineering Research Institute., 1. (1973). *Reconnaissance report, Managua, Nivaragua Earthquake of Managua 23, 1972, Oakland, California*.
- Escobar, E. & . (1998). *Microzonificación Sísmica de la ciudad de Managua*. . (Tesis para optar al título de Ingeniero Civil), Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua.
- Estrada Uribe, G. 1. (1973). *Managua antisismica ( su ruina y reconstruccion )* . Fondo Colombiano de Investigaciones Cientificas y Proyectos Especiales.
- Faccioli, E. S. (1973). Microzonation criteria and seismic response studies for the city of Managua. Proceedings of the conference on the Managua, Nicaragua Earthquake of December 23, 1972. Nicaragua.
- Flores-Estrella H., L. C. (2004). "Estimación de Velocidades de Fase partir del análisis de Microtremores con el método SPAC". *Geos*. Vol 24. N°3, p: 438-445.
- Frischbutter, A. (. (2002). *Structure of the Managua graben, Nicaragua, from remote sensing images*. *Geofísica Internacional*, Vol. 41, No 2, 87-102.
- Hansen, F. & . (1973). *Isoseismal maps of the Managua December 23, 1972 earthquake*. *Earthquake Engineering Research Institute, Conference Proceedings, California*.
- Harkrider, D. G. (1964). *Surface waves in multilayered elastic media, part , Bull. Seism. Soc. Am.* 54, no. 2, 627-679.
- Haskell, N. A. (1953). *The dispersion of surface waves on multi-layered media, Bull. Seism. Soc. Am.* 43, no. 17-34.
- Hernandez, O. 2. (2009). *Reevaluacion del efecto de sitio y propuesta de clasificacion de terrenos con fines de diseño sismico para Managua, Nicaragua*.
- Hradecky P., H. P. (2000). *Estudio para el reconocimiento de la amenaza geologica en el area de Managua, Nicaragua*.
- INEC, 2. (2004). *Instituto Nacional de Estadistica y Censo*.
- INETER, J. 2. (Junio, 2000). *Microzonificacion Sismica Managua*.
- INIDE. (2012). *Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE 2012); Censo poblacional*.
- Johansson, L. O. (1988). *Seismic hazard analysis of Managua-Nicaragua*. Division of soil and Rock Mechanics, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- K. Chopra, A. (. (1995). *DYNAMICS OF STRUCTURES Theory and Applications to Earthquake Engineering; New Jersey Prentice- Hall*.
- Kanai K y Tanaka T., 1. (1961). *On Microtremors. VIII Bull. Earthq. Res. Inst.*



- Kramer, S. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. (Ed.).
- La Femina P. C., D. T. (2002). *Accommodation of Trench-Parallel Block Motion Due to Oblique Subduction in Nicaragua by Bookshelf if Faulting*. *J. Geology*.
- Leeds D., 1. (1973). *Destructive earthquake of Nicaragua*. *Earthquake Engineering research Institute, conference Proceedings, California*.
- Lermo J & Chavez Garcia. (1993). *Site effect evaluation using spectral ratio with only one station*. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Lermo J & Chavez Garcia, F. J. (1994a). *Site Effect Evaluation at Mexico City: Dominant Period and Relative Amplification from Strong motion and Microtremor Record, Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Lermo J & Chavez Garcia. (1994b). *Are Microtremors useful in site response evaluation?* *Bulletin of the seismological Society of America*.
- Martinez, W. 1. (1993). *The interrelationship between volcanic and seismic activity to subduction-related tectonic in Western Nic*, *Jour Geol. Soc. . Japan 99*.
- McBirney, A. R. (1965). *Volcanic history of Nicaragua: University of California Publications in the Geological Sciences, v.55*.
- McGuire, R. K. (1976). *EQRISK. Evaluacion of earthquake risk to site*.
- Moore, F. 1. (1990). *Comportamiento dinamico de los suelos durante sismos en el area de Managua, Nicaragua*. Universidad de Costa Rica, Turrialba.
- Morikawa, H. S. (2004). *A method to Estimate Phase Velocities of Rayleigh Waves Using Microseisms Simultaneously Observed at Two Sites*, *Bull. Seism. Soc. Am., 94, 3, 961-976*.
- Nakamura, Y. 1. (1989). *A. Method for Dynamic Characteristics Stimulation of sub Subsurface using microtremor on the ground surface*. . Quarterly Report of Railway Technical Research Institute.
- NEHRP, 2. (2003). *Recommended Provisions For Seismic Regulations For New Buildings and Other Structures*. . (FEMA 450), Part 1: Provisions.
- Ohtsuki A y Yamahara, H. (1984). *Effect of topographical and subsurface in homogeneity on seismics SV waves and Rayleigh waves*. *VII World Conference on Earthquake Engineering Volumen II Cap4. Ground Motion and Seismicity- Sub Cap. 4.5 Seismological Aspects of Strong Ground Motion*. . San Francisco.
- Okada H. (2003). *The microtremor survey method*. *Society of Exploration Geophysicists. Geophysical Monograph Series No. 12. Tulsa. USA. 127 pp*.
- Park C Miller., R. y. (2001). *"Multichannel Analysis of Surface Waves"*. *Geophysics*.
- RNC-07. (s.f.). *Reglamento Nacional de la Construcción*.



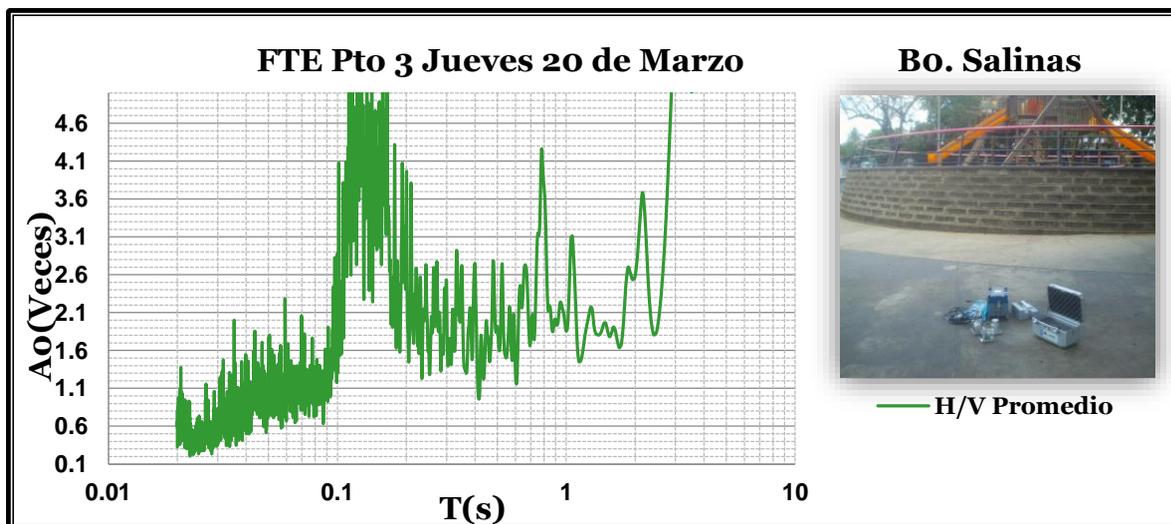
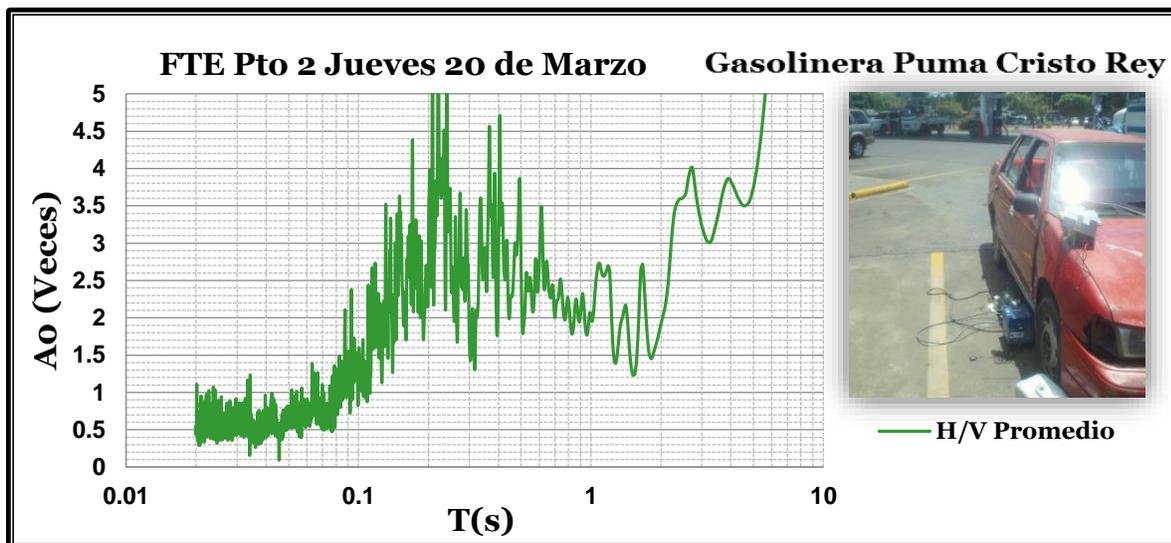
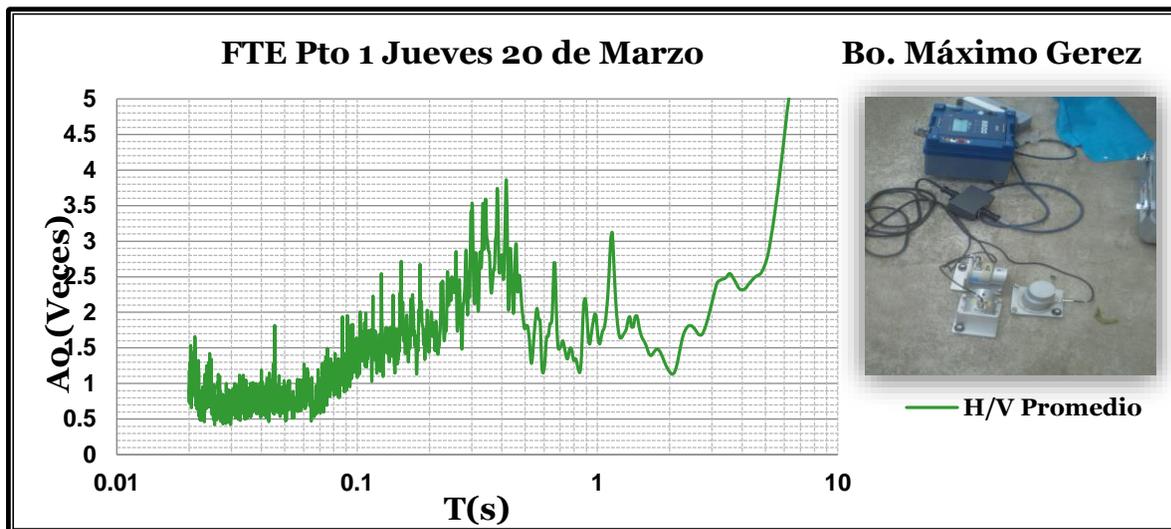
- Roberts, J. y. (2004). "Resolving a velocity inversion at the geotechnical scale using the microtremor (passive seismic) survey method". *Journal of Exploration Geophysics*. Volumen 35. p: 14-18.
- Romero, C. (. (2004). *Estudios del efecto de sitio en el area urbana de las ciudades de Masaya y Catarina*. Tesis de Maestria, Centro de Investigaciones Geocientificas, UNAN-Managua.
- Rubio, Orlando Hernandez. (2009). → *Reevaluación del efecto de sitio y propuesta de clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico para Managua, Nicaragua*.
- Sanchez, E. (2007). *La tragedia de Managua en 1931* , *El Nuevo Diario*. Recuperado de: <http://impreso.elnuevodiario.com.ni/2007/03/31/especiales/45161>.
- Stal and Westberg, 1. (1996). *Microzonation study in Managua, Nicaragua*.
- Steinbrugge, Karl V. 1972. (1972). *Steinbrugge Coleccion*. University of California, Berkeley.
- Strauch W., 1. (1999). *Bibliografía sobre el terremoto de Managua de 1972*, <http://www.ineter.gob.ni/geofisica/sis>.
- Weinberg, R. (. (1992). *Neotectonic development of western Nicaragua*. *Tectonics*.
- Woodward Clyde Consultants, 1. (1975). *Estudio de Managua, con el informe Geologico de las Fallas Activas de Managua y sus Alrededores*. California, Estados Unidos.

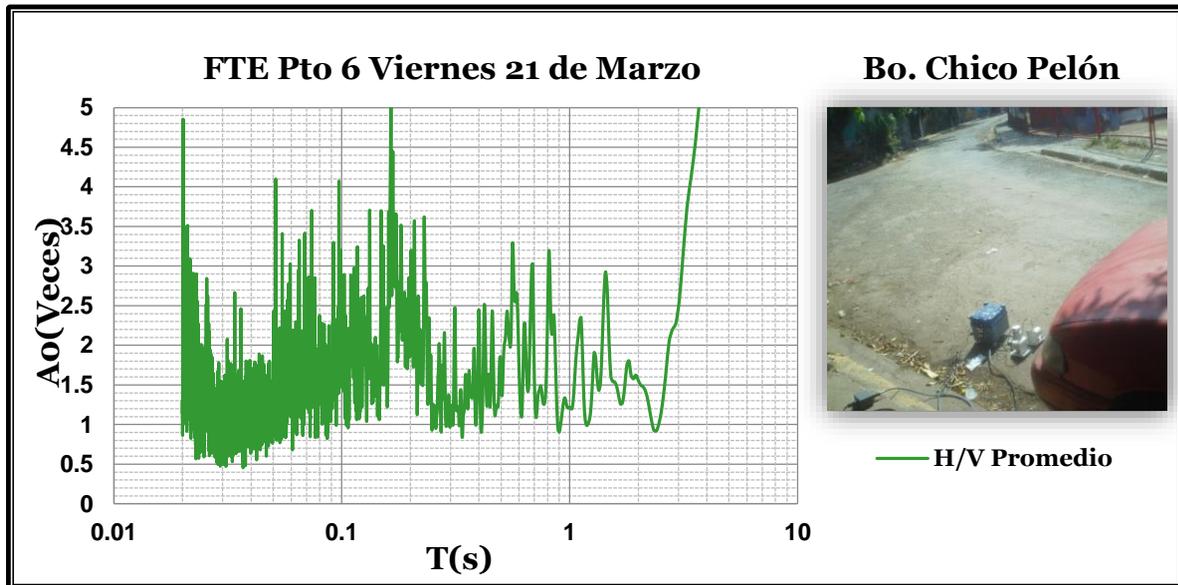
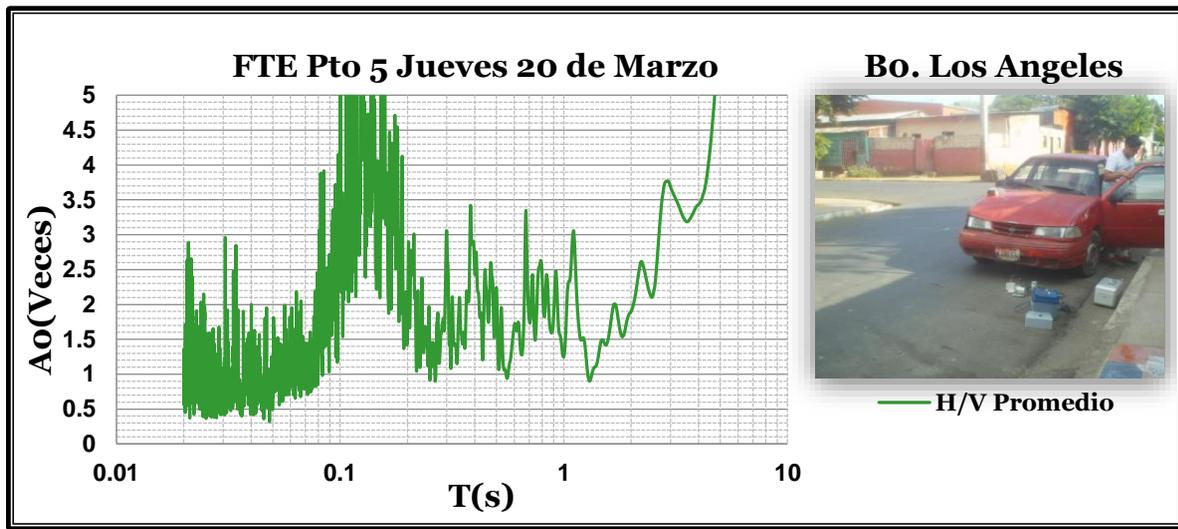
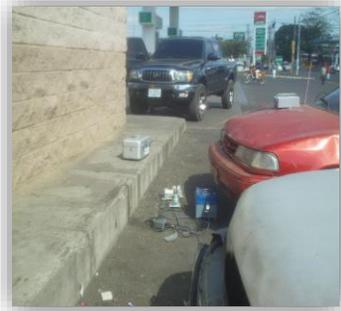
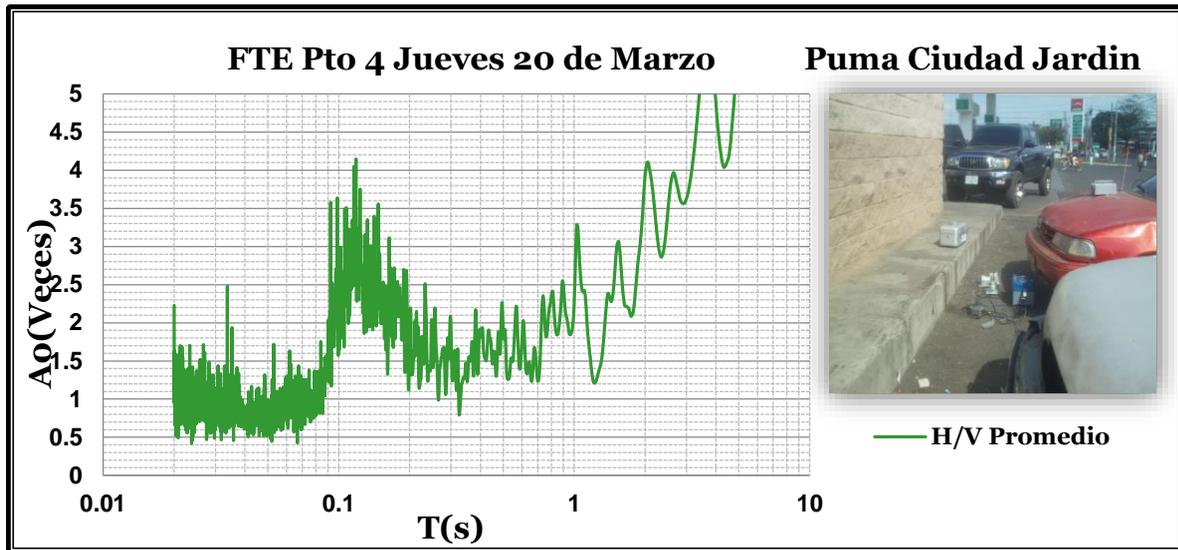


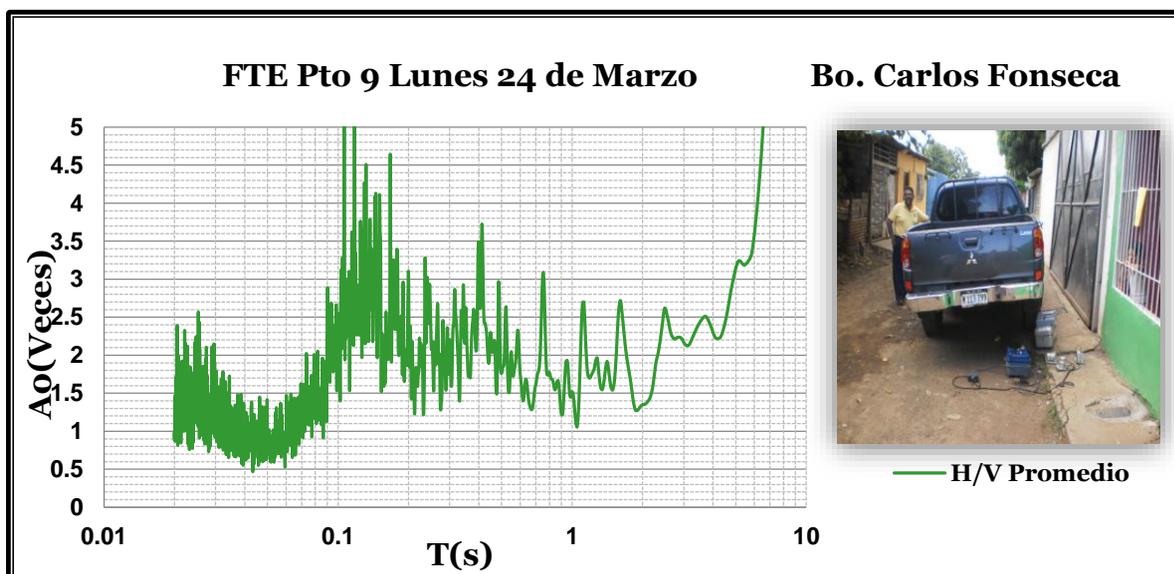
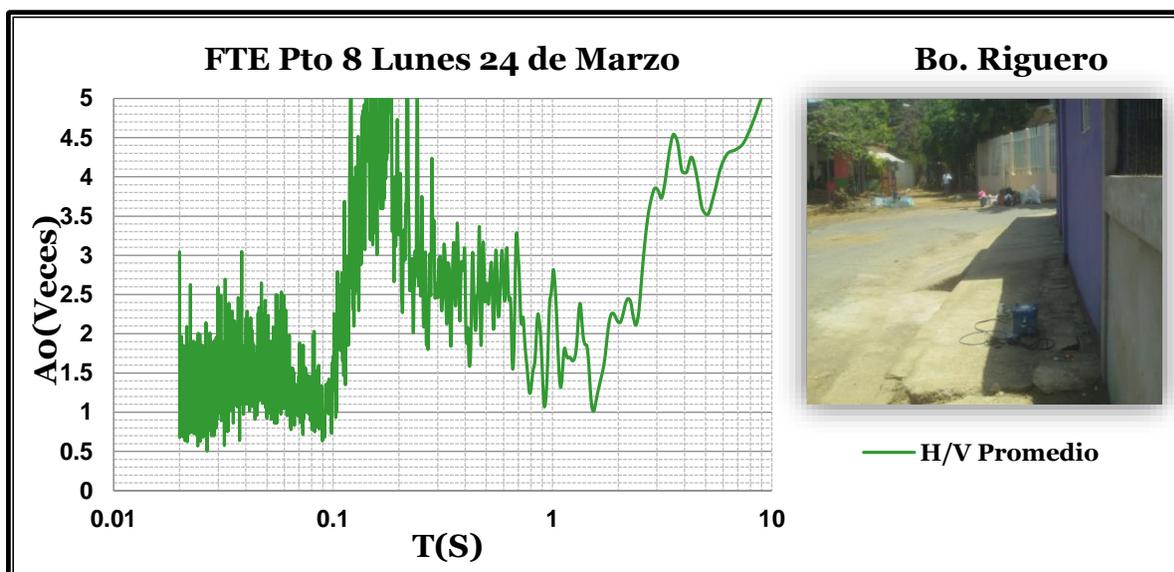
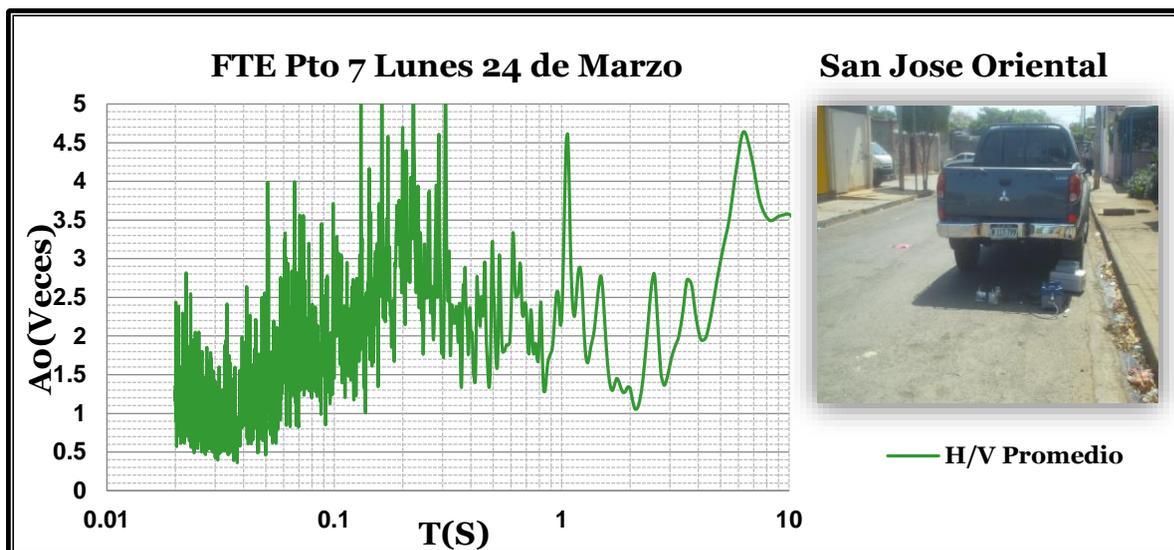
# ANEXOS

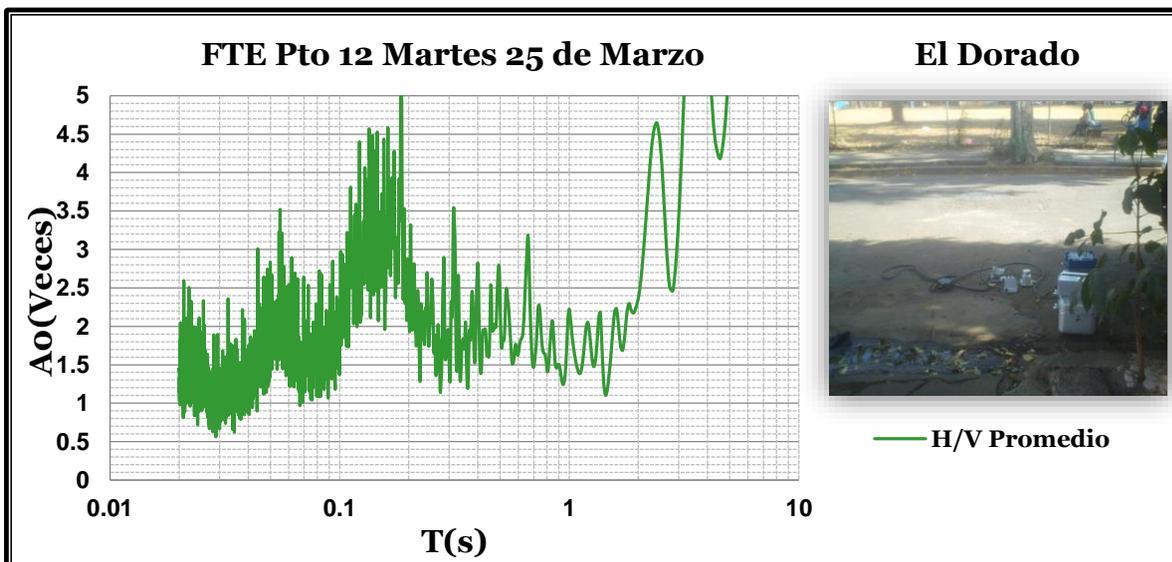
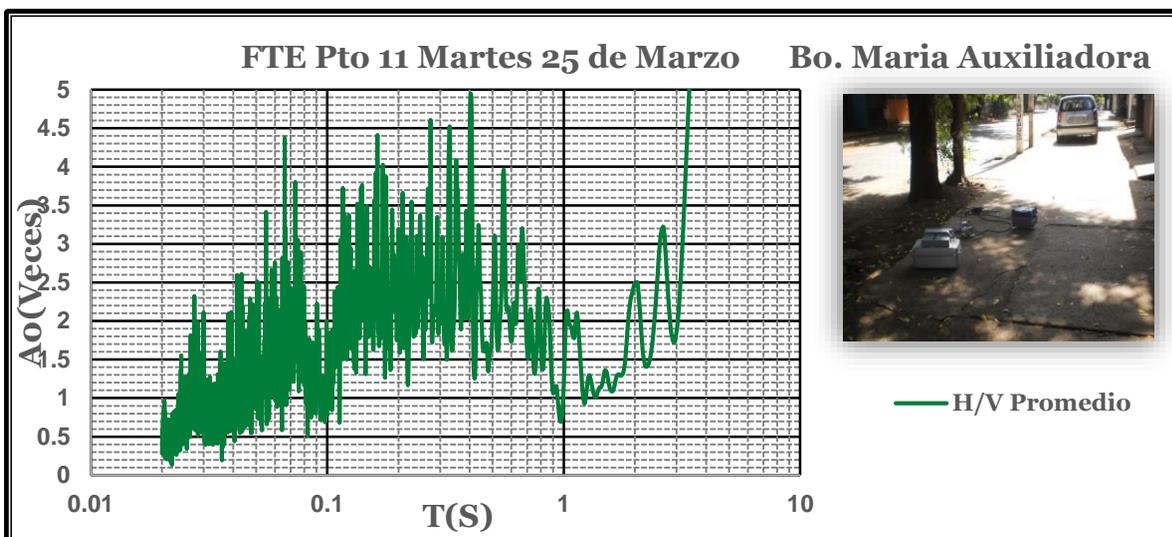
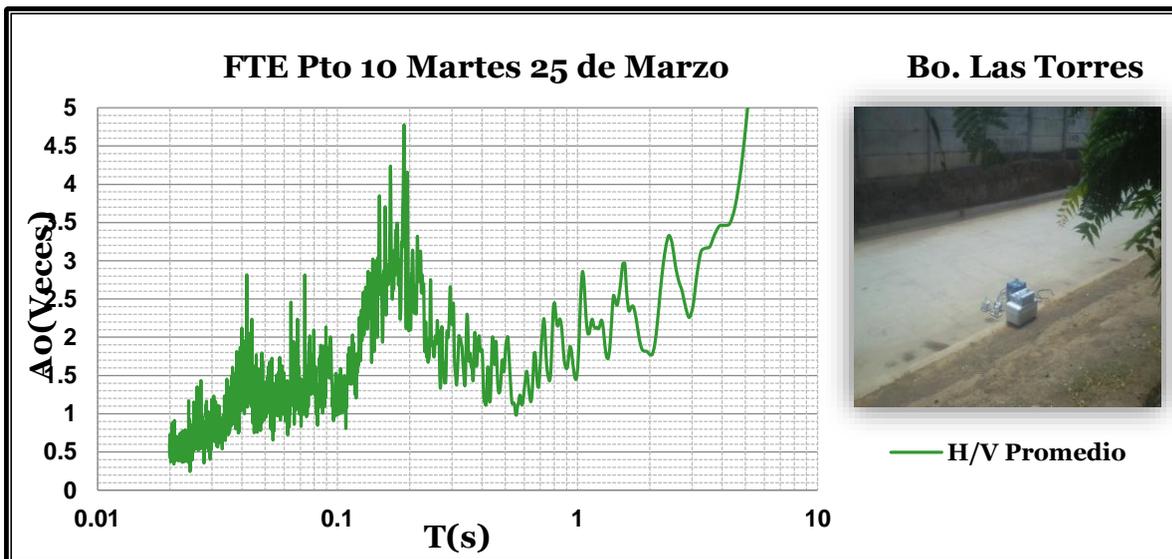


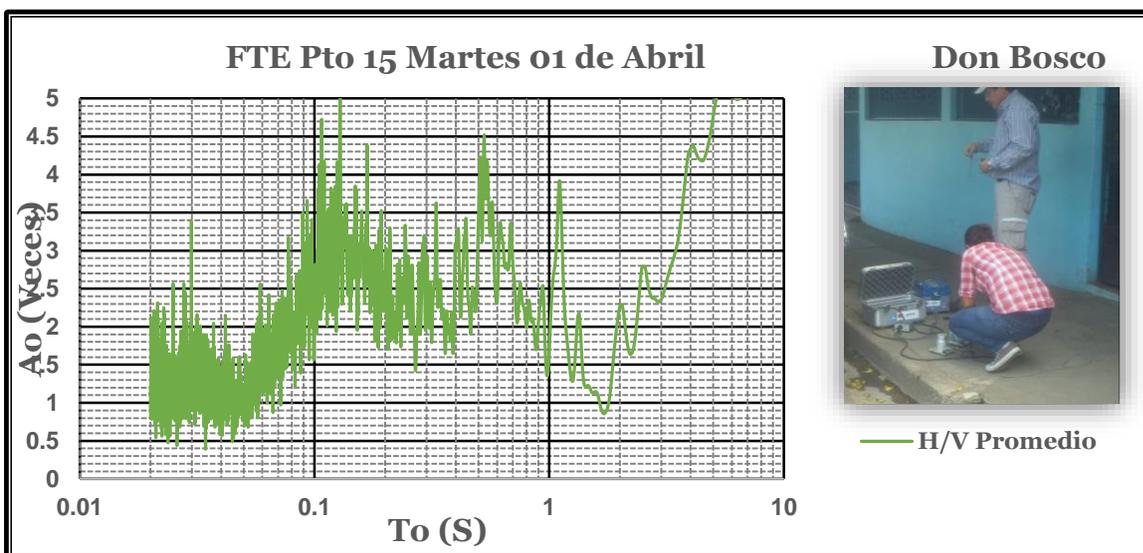
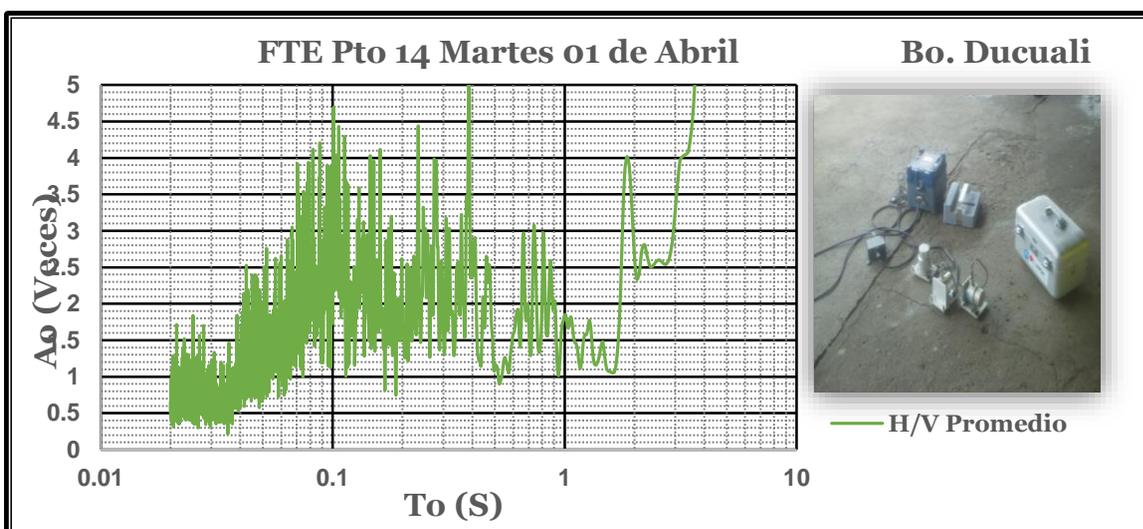
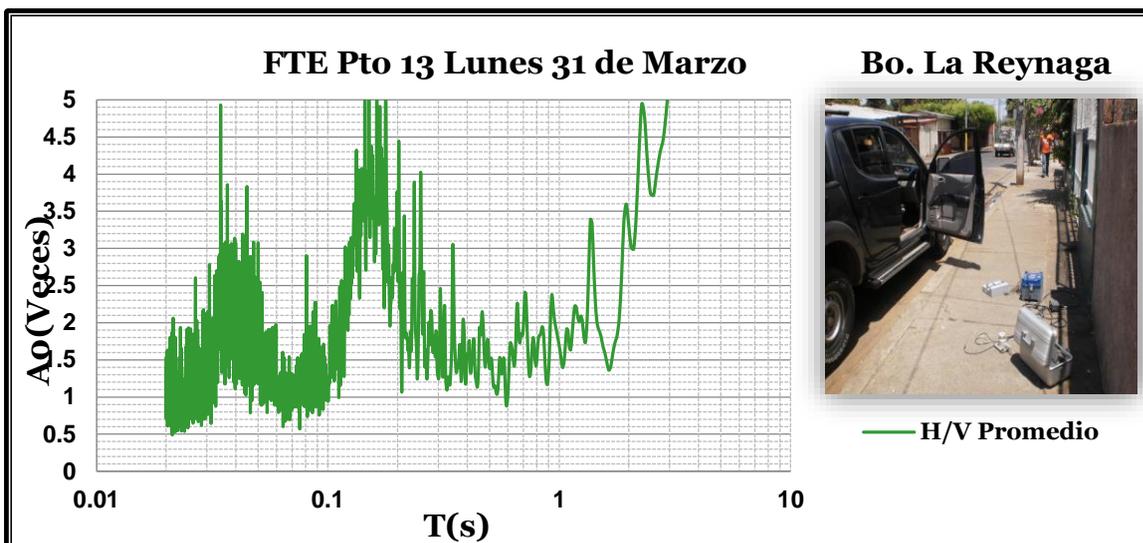
Anexo I: Graficas de FTE en los Puntos de Estudio.

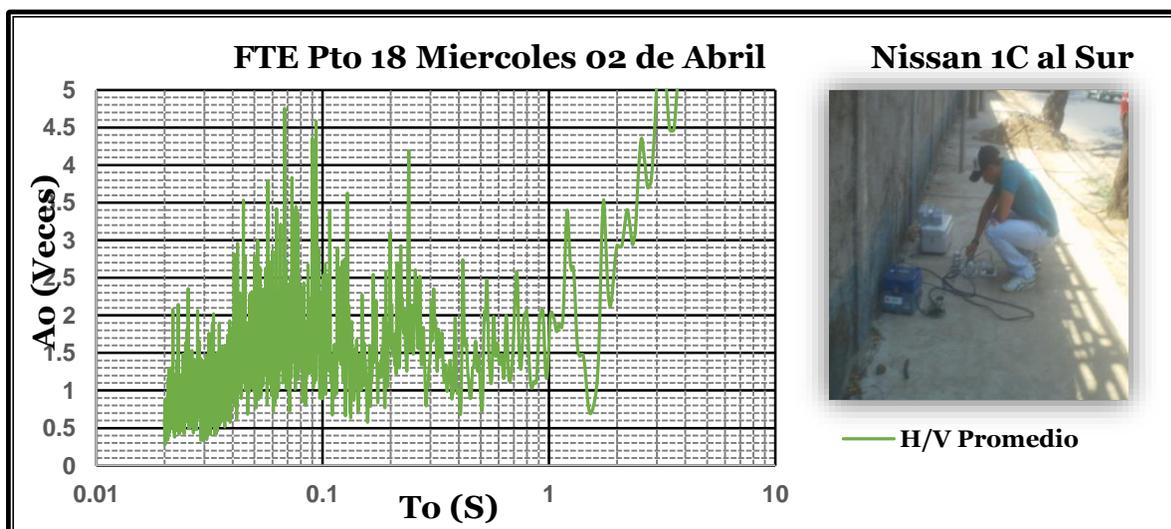
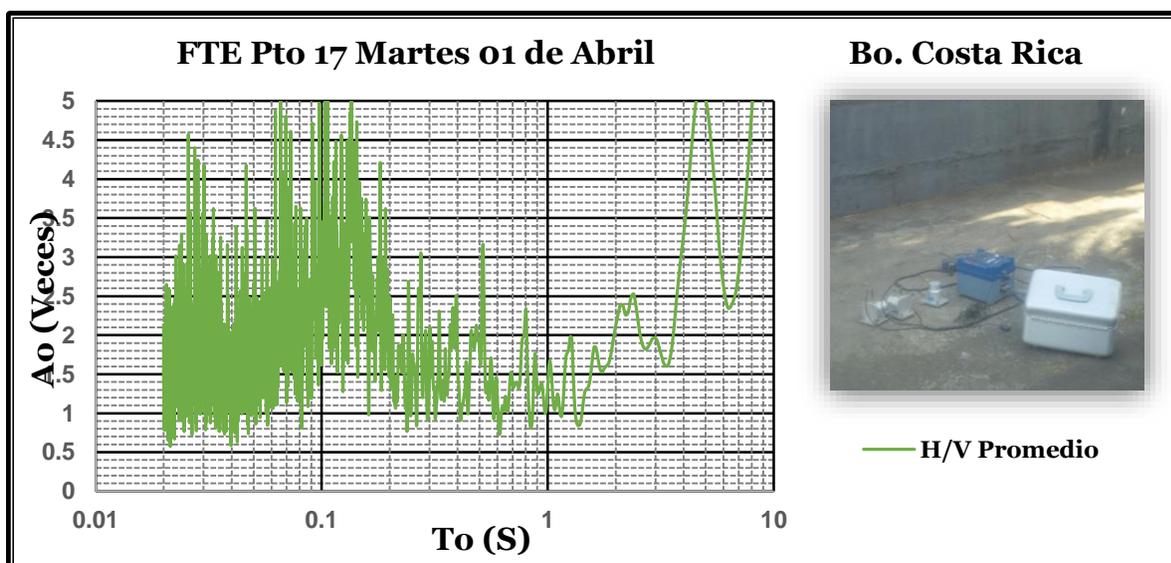
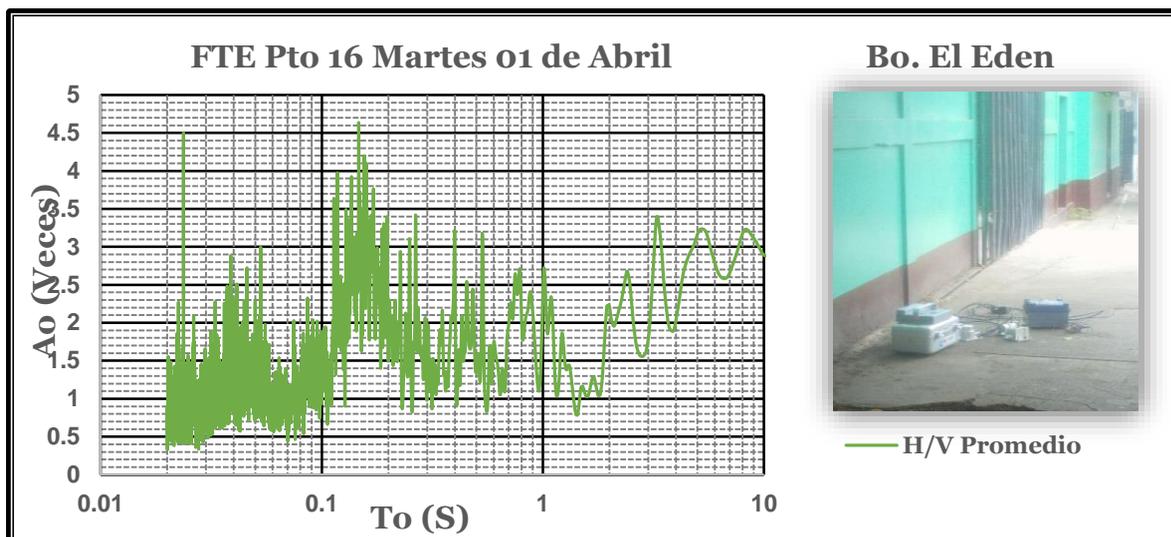


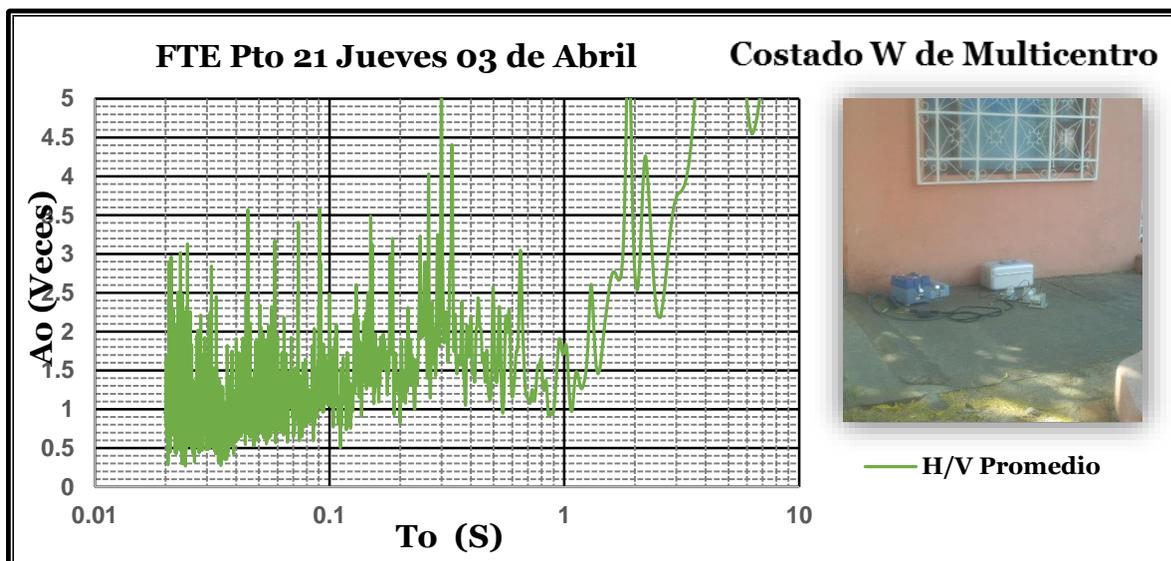
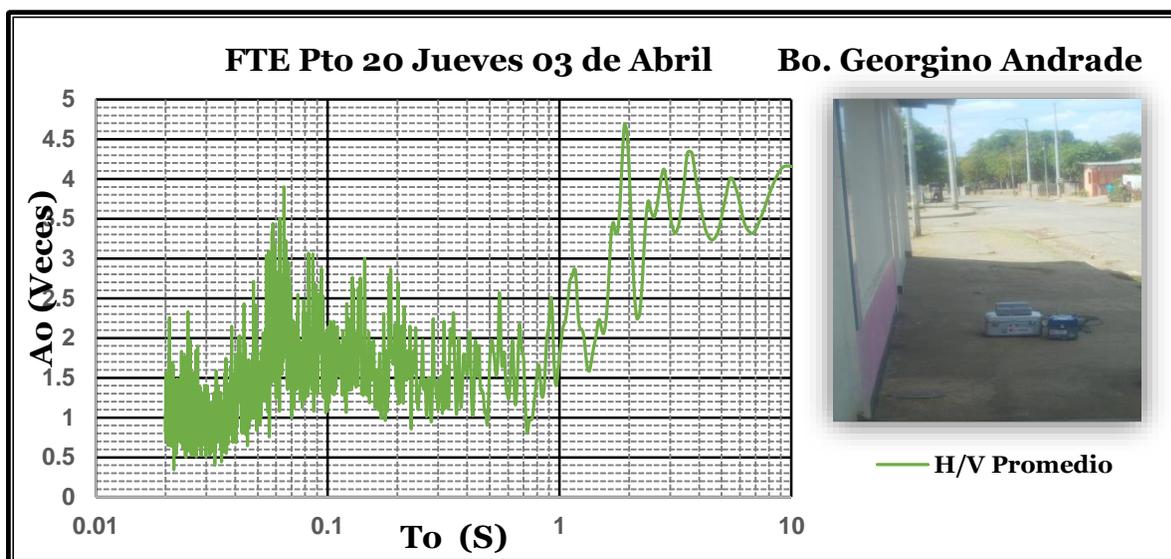
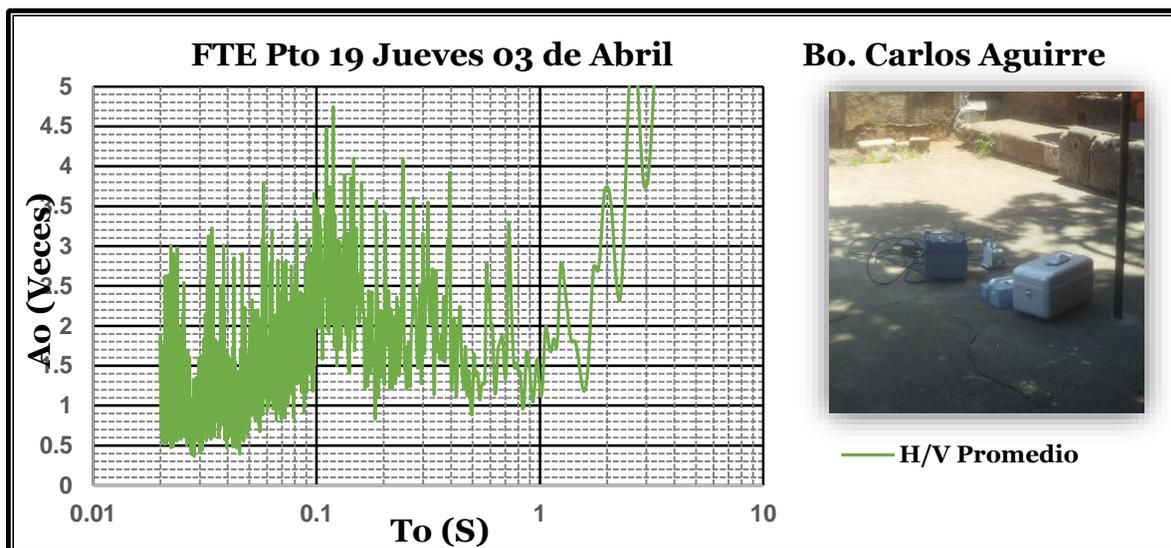


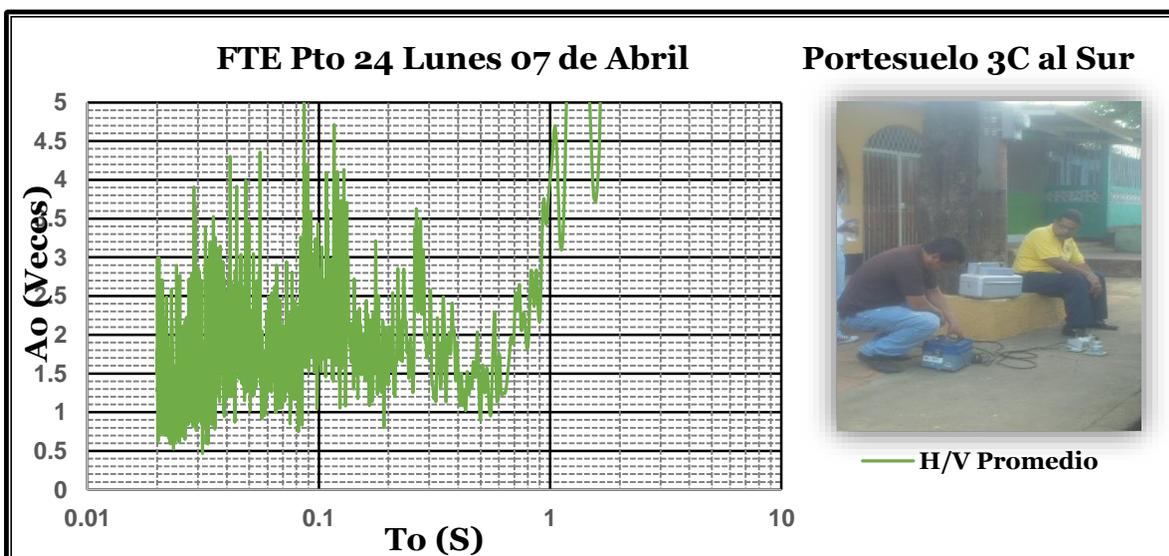
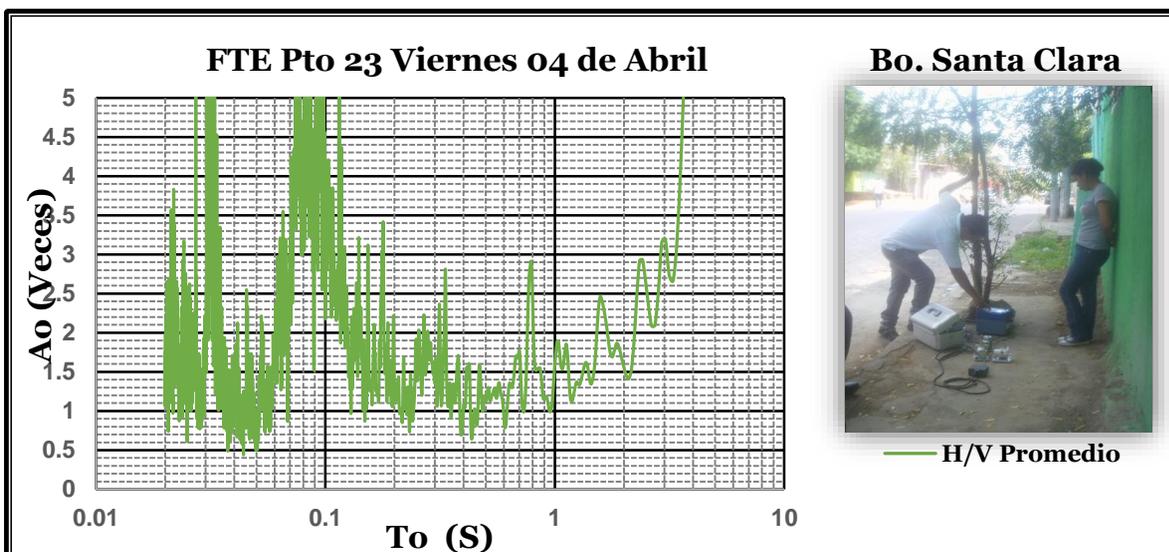
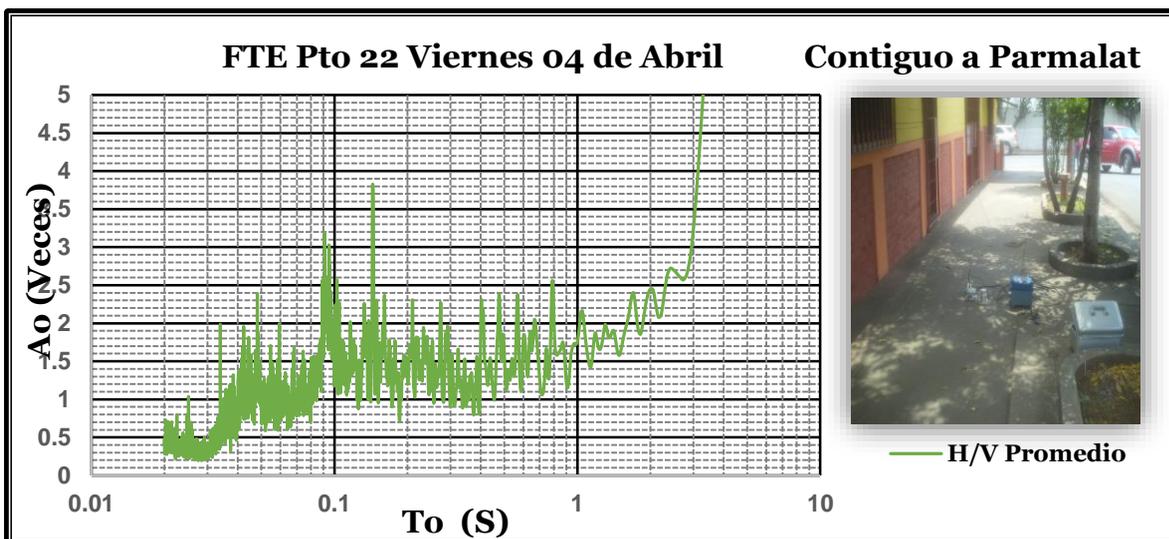


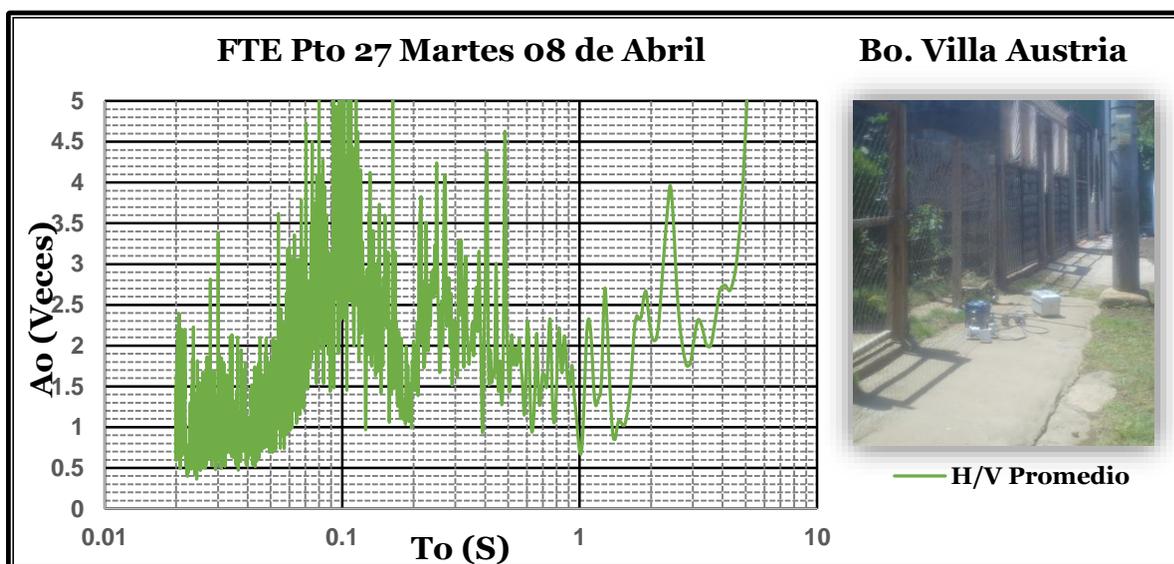
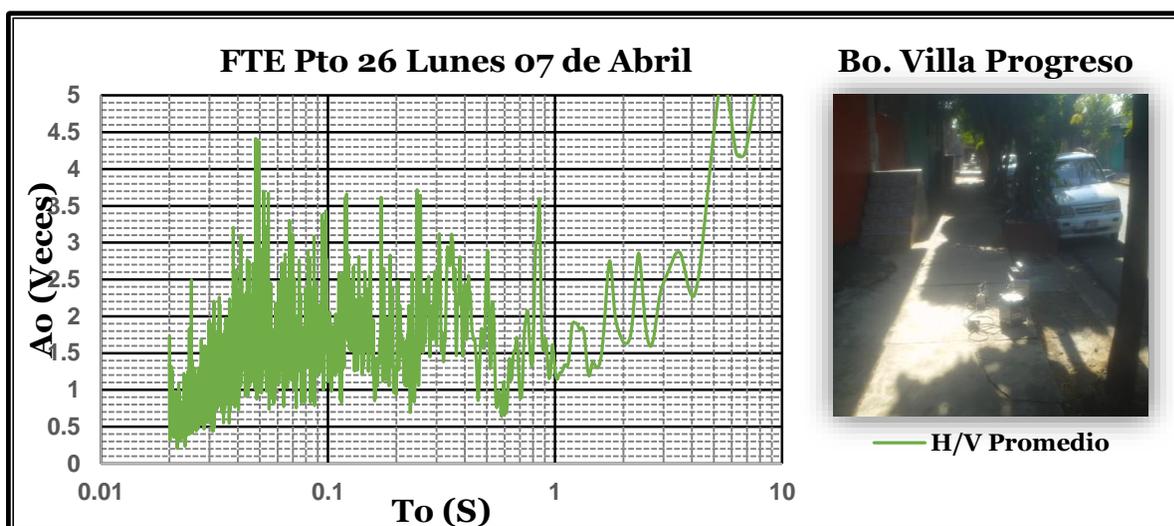
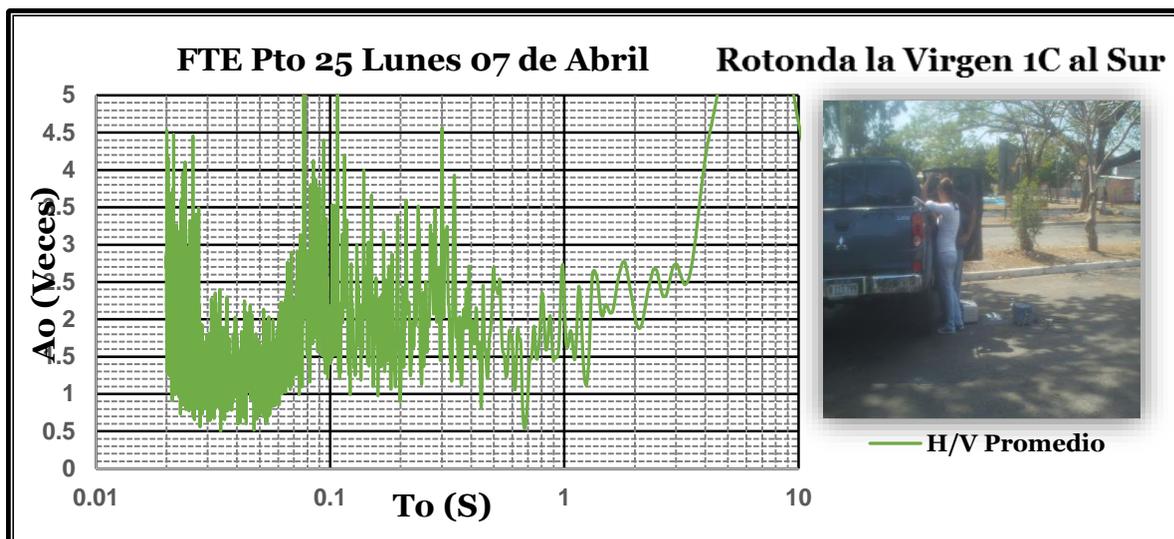


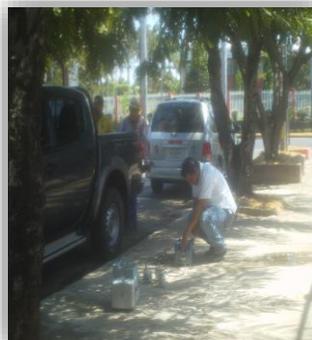
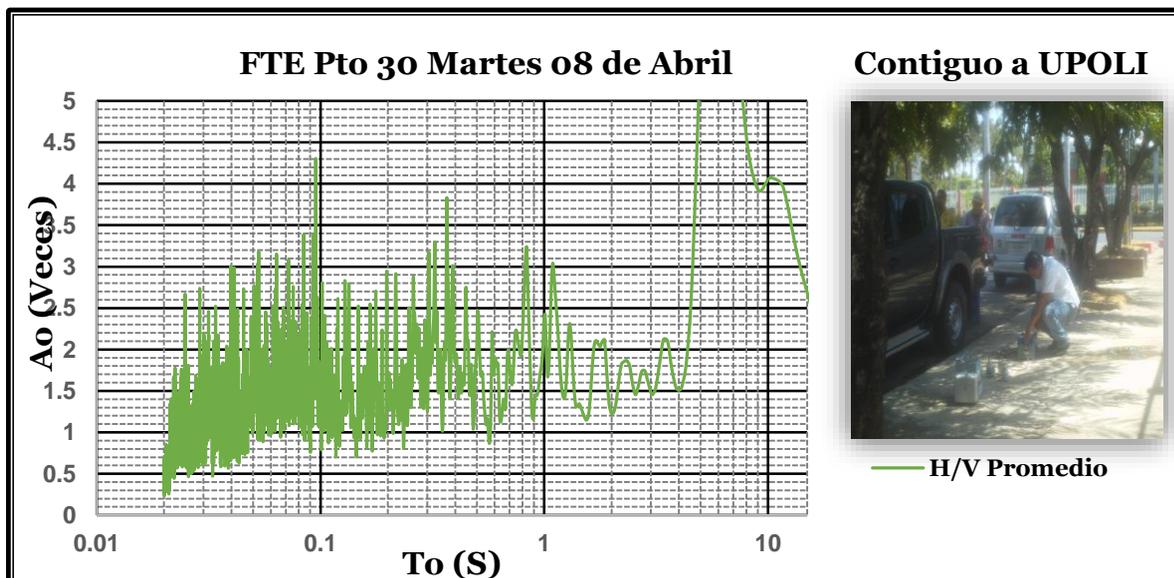
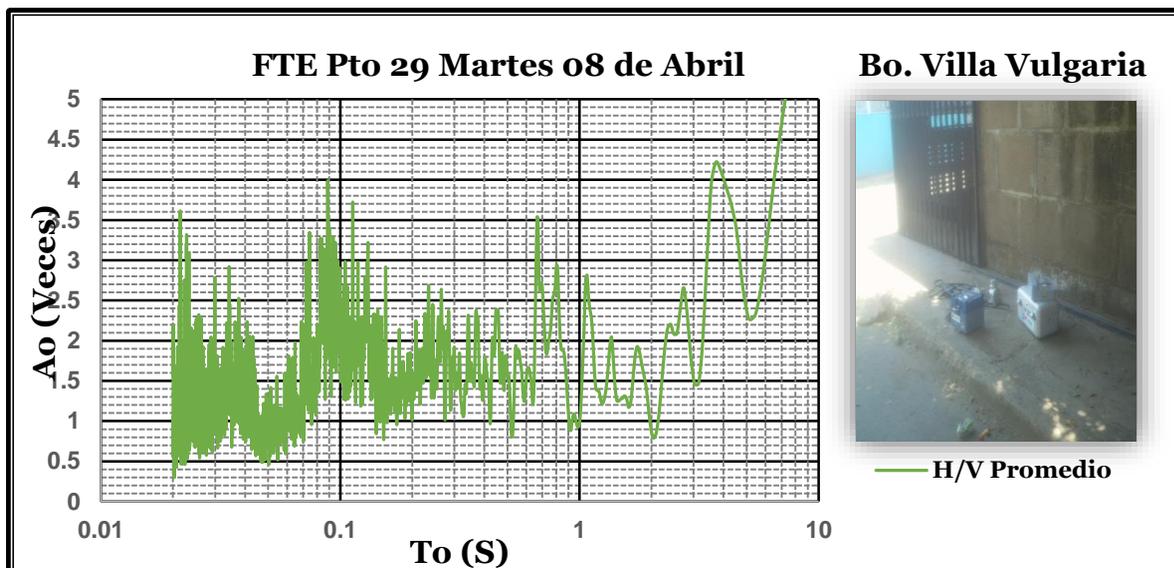
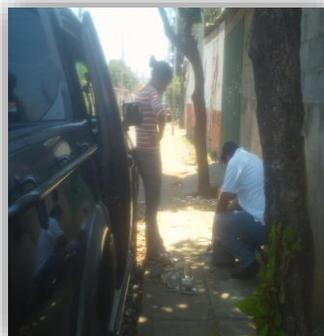
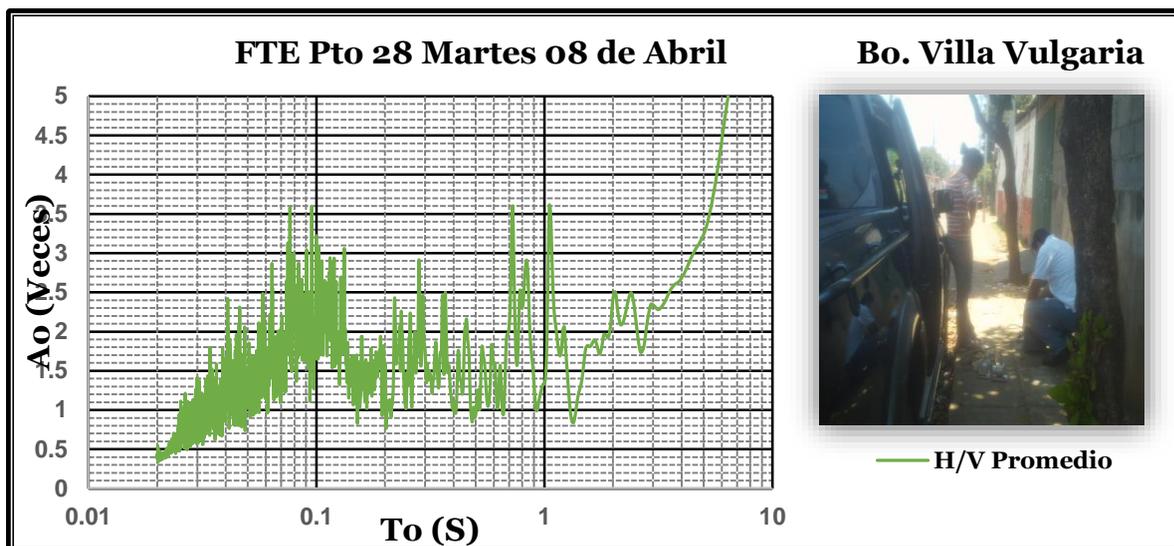


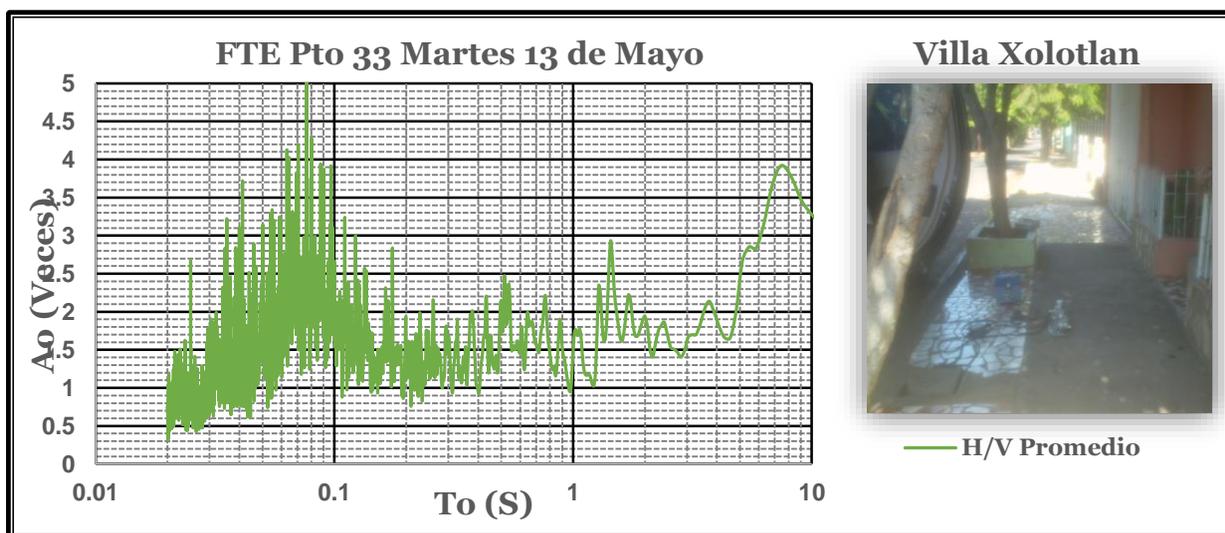
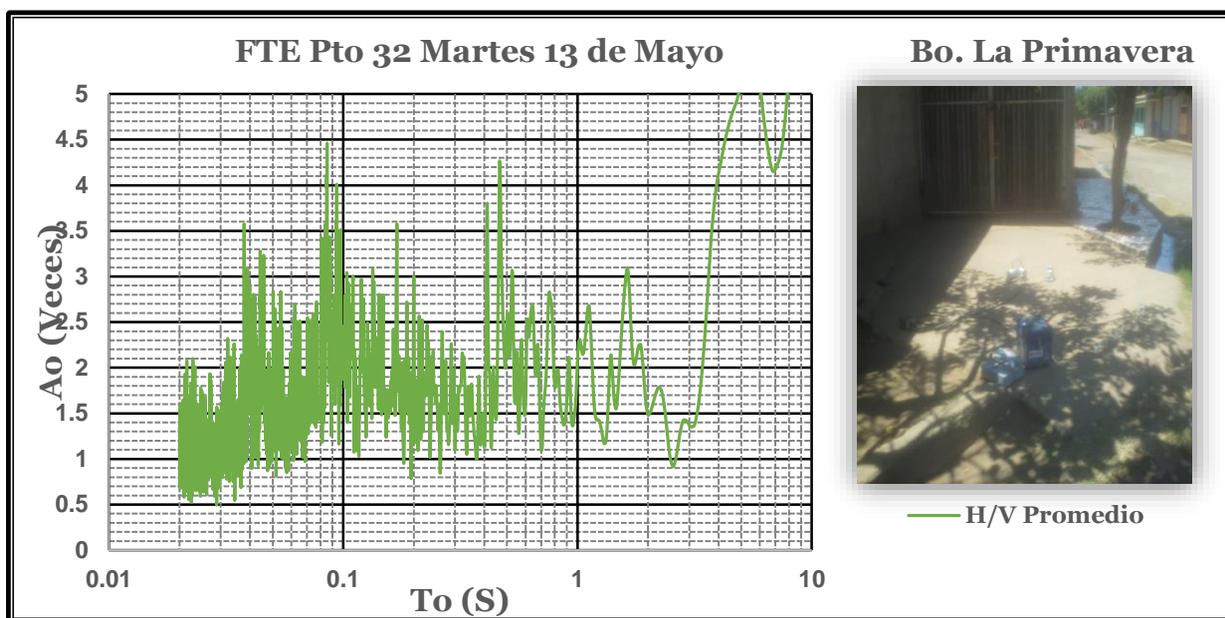
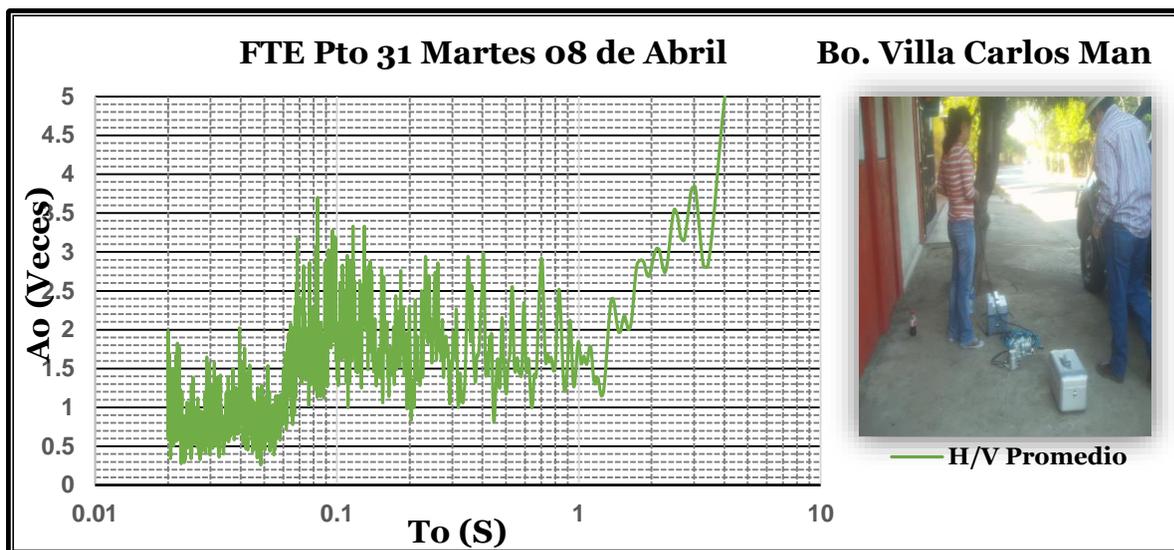


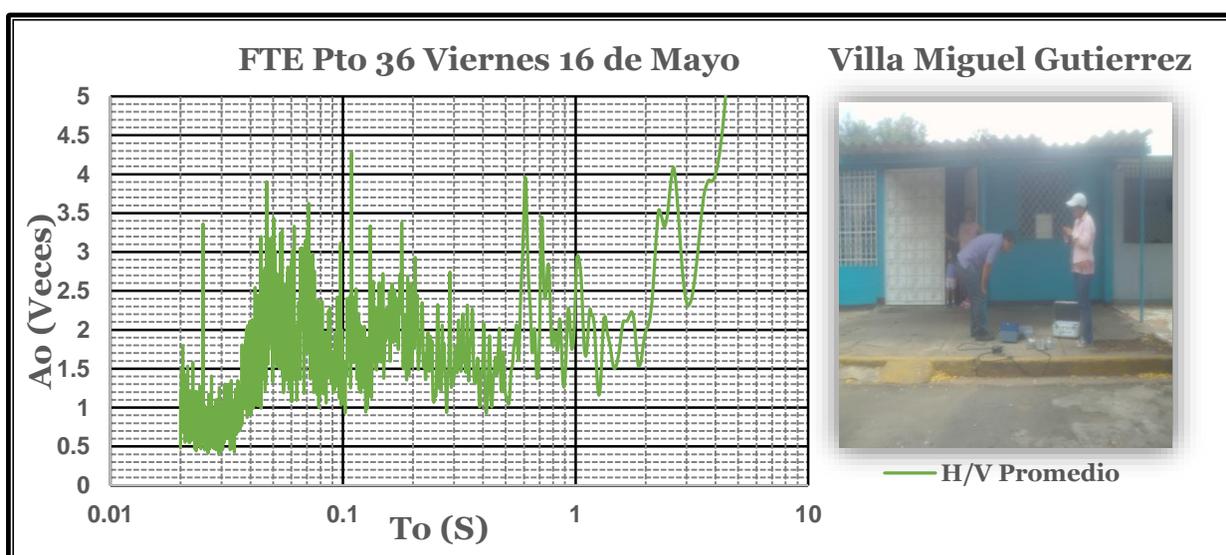
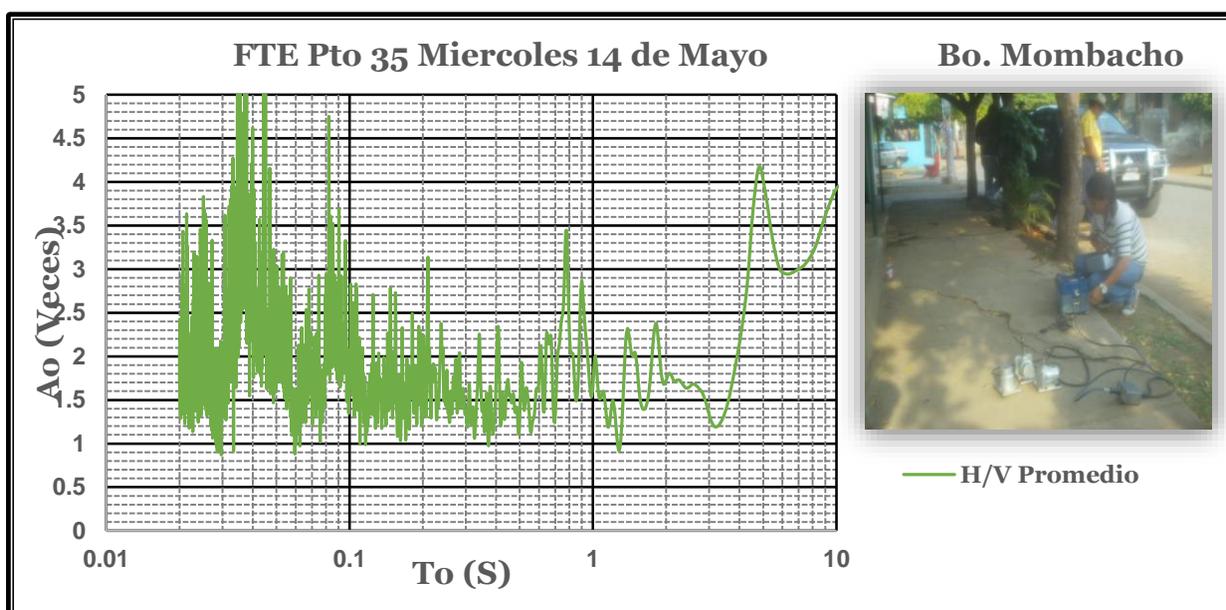
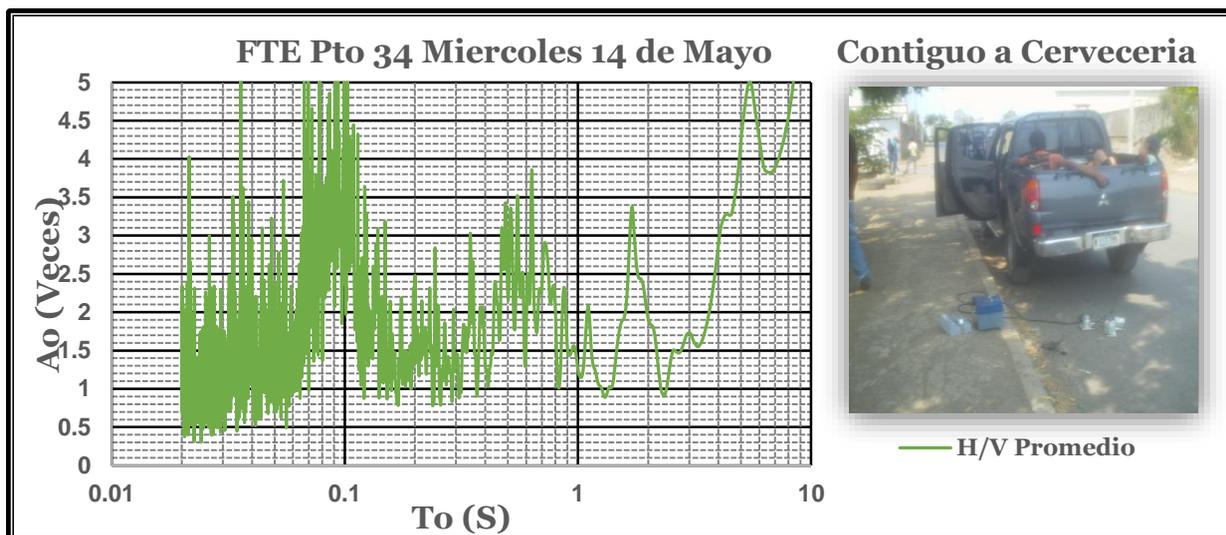


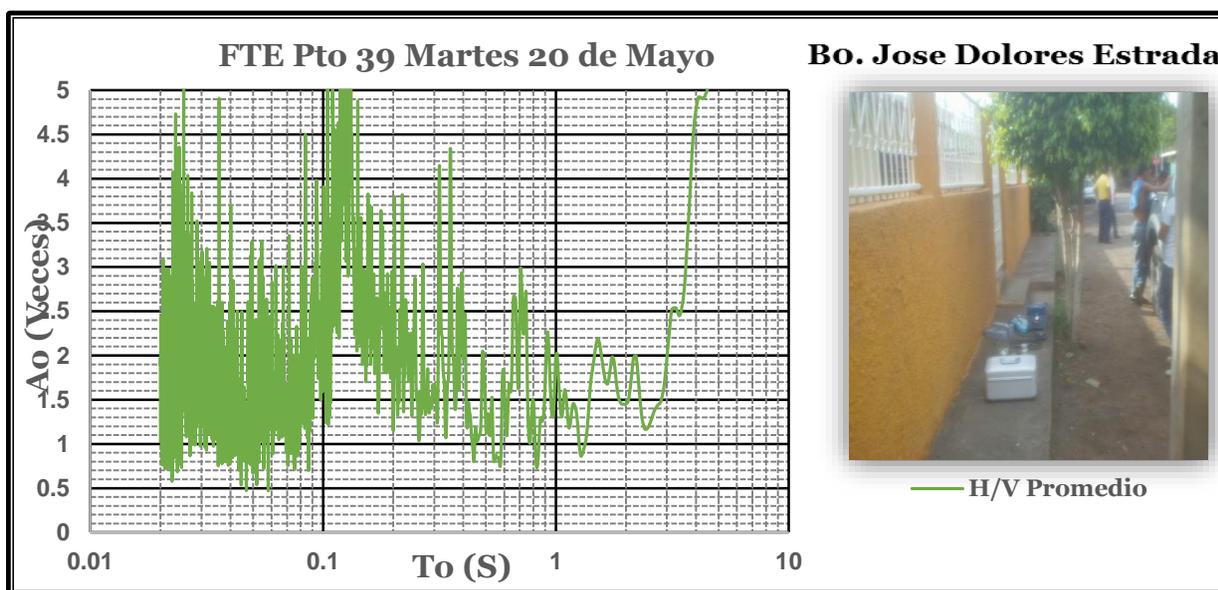
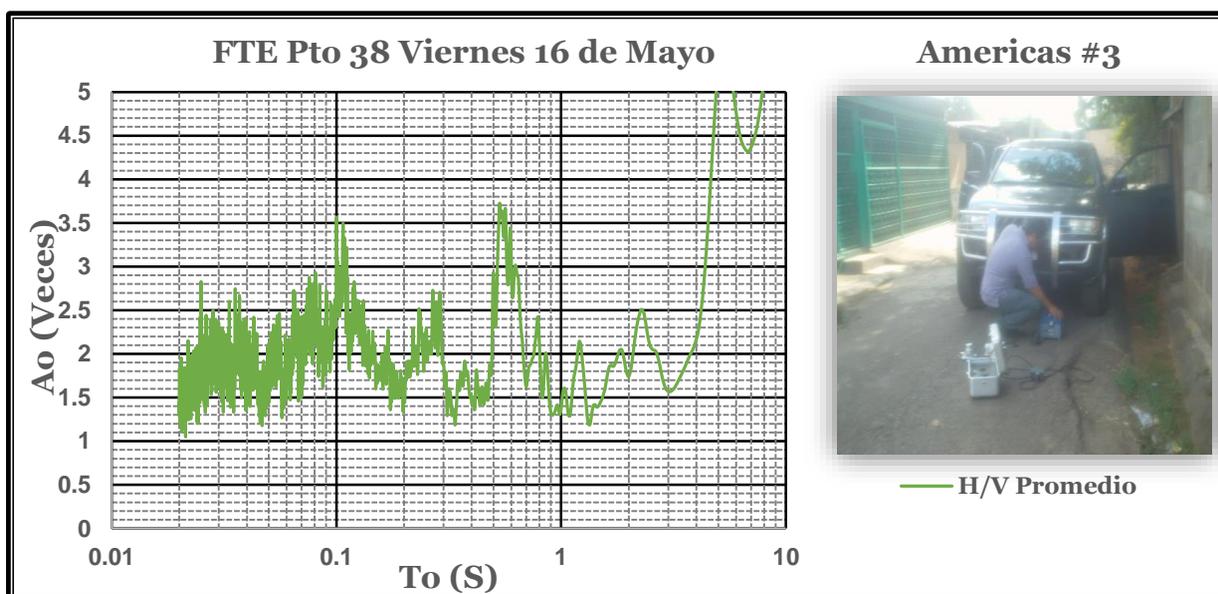
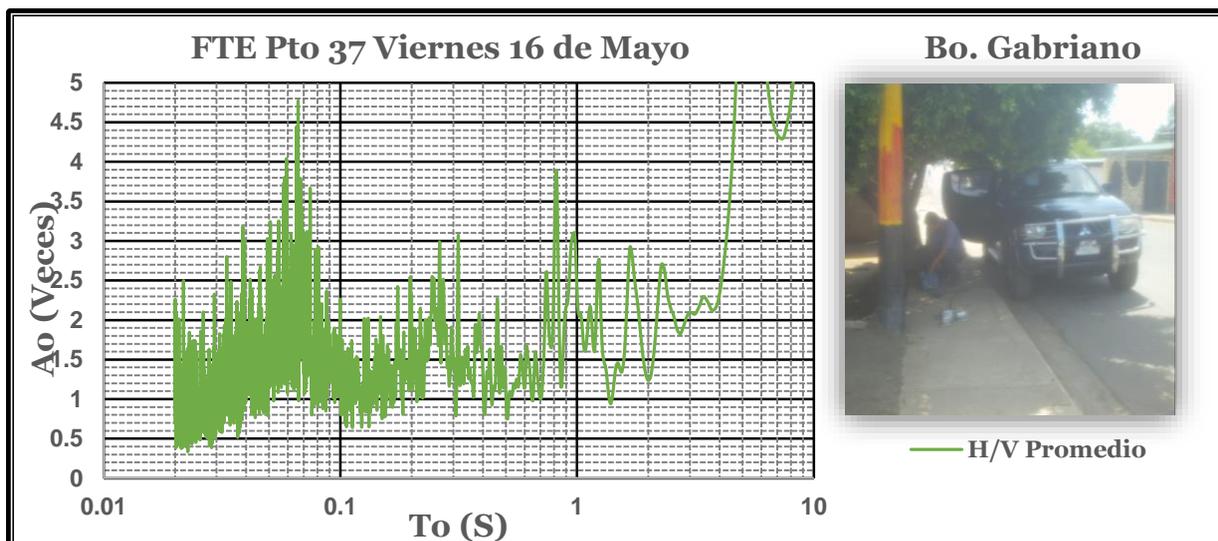


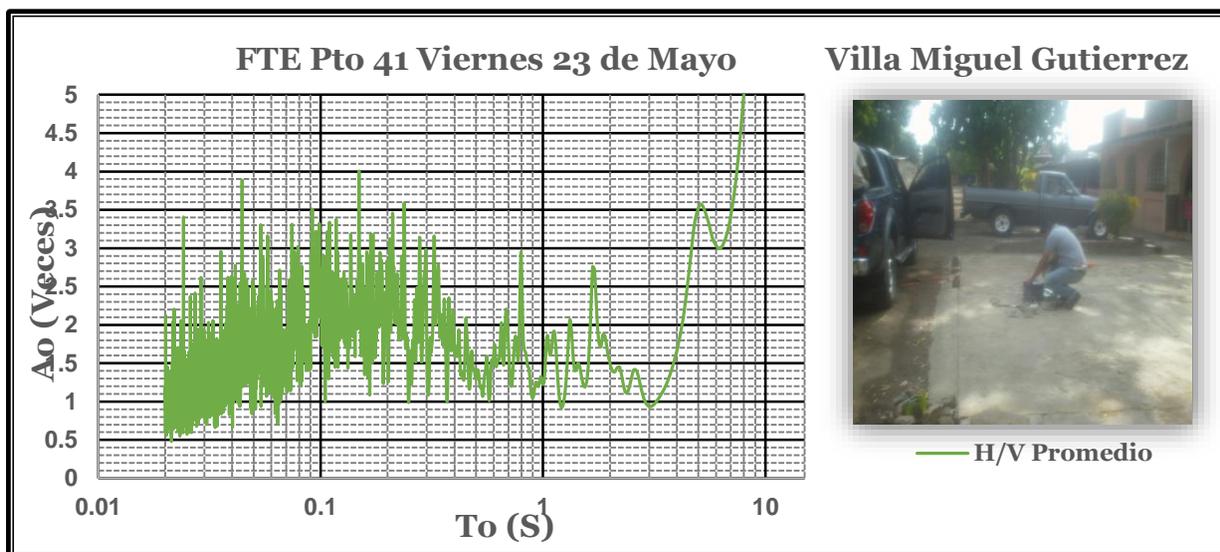
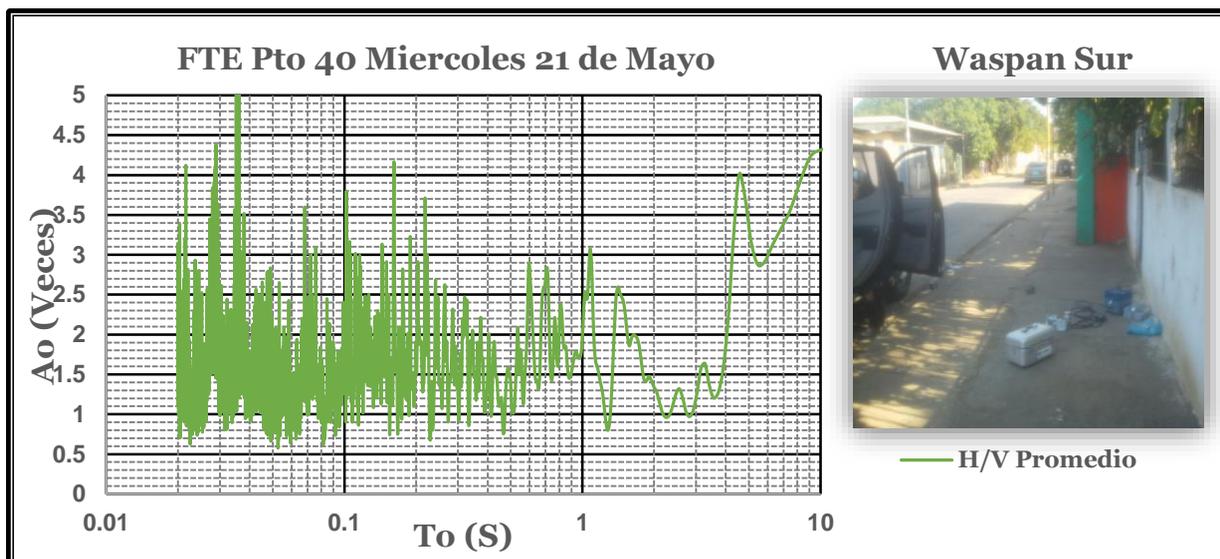


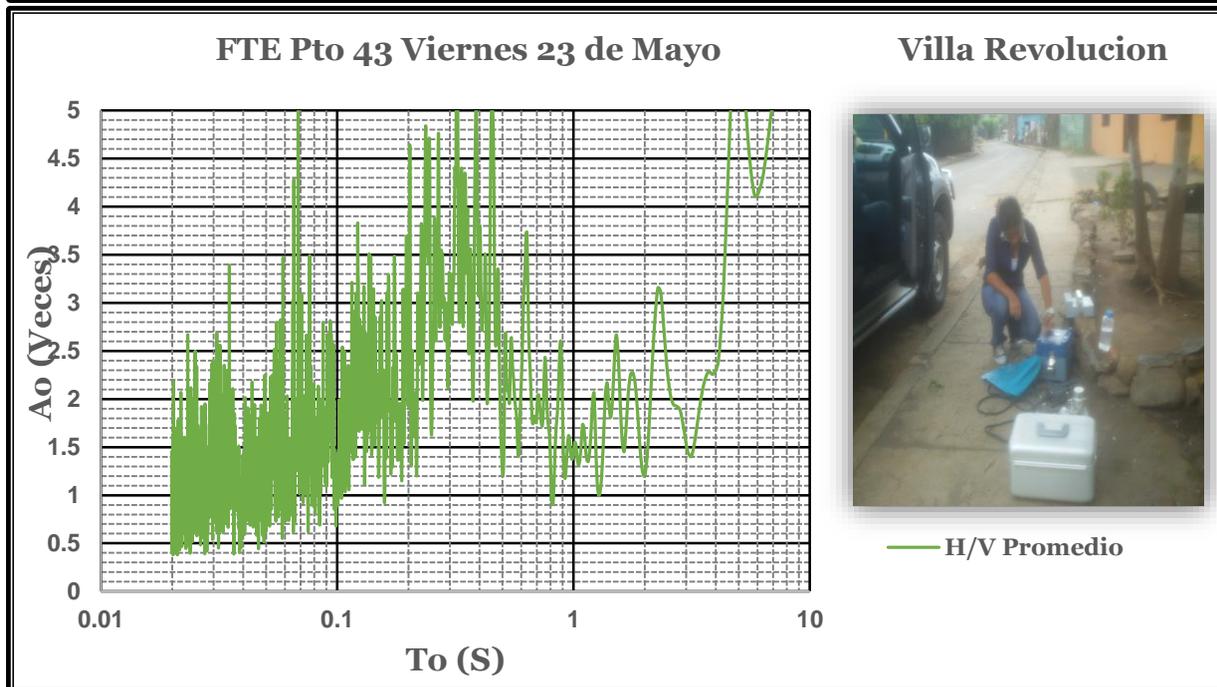
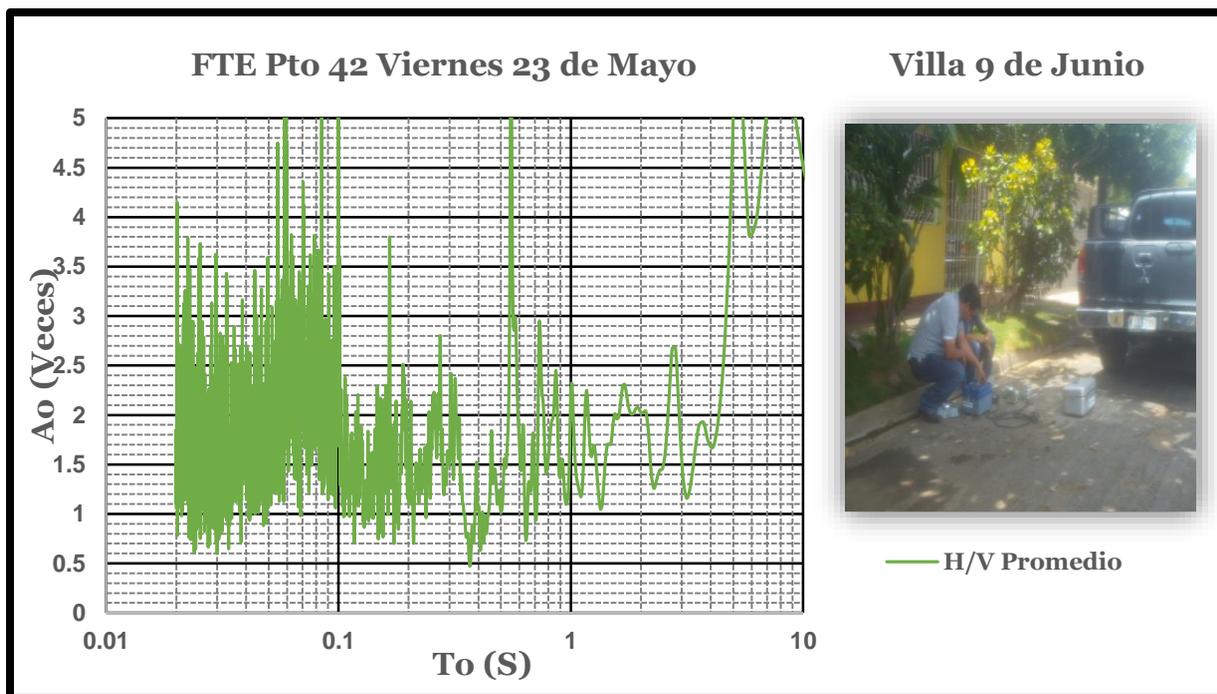














**Anexo II: Sitios donde fueron tomados los registros de perfiles MASW y SPAC.**



Perfil 1. Sitio de estudio de MASW en Chico Pelón.



Perfil 2. Sitio de estudio de MASW en Bo. Las Torres



Perfil 3. Sitio de estudio de MASW en Don Bosco.



Perfil 4. Sitio de estudio de MASW en El Dorado.

Perfil 5. Sitio de estudio de MASW en Bo. Santa Clara.



Perfil 7. Sitio de estudio de MASW en Villa Miguel Gutiérrez.



Perfil 8. Sitio de estudio de MASW en Américas 1.

Perfil 9. Sitio de estudio de MASW en Villa Venezuela.





Perfil 1. Sitio de estudio de SPAC en Chico Pelón.

Perfil 2. Sitio de estudio de SPAC en Bo. Las Torres



Perfil 3. Sitio de estudio de SPAC en INETER.



Perfil 4. Sitio de estudio de SPAC en el Dorado

Perfil 3. Sitio de estudio de SPAC en Américas Uno





### Anexo III: Curvas de Dispersión e Inversión para cada Perfil Utilizando MASW.

