

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANÁLISIS DE LOS MICROTREMORES Y SU APLICACIÓN EN LA  
GEOTECNIA**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTOR EN CIENCIAS  
PRESENTA**

**GEMA KARINA IBARRA TORÚA**

**DR. LEOBARDO LÓPEZ PINEDA  
DIRECTOR**

**DRA. CONCEPCIÓN CARREÓN DIAZCONTI  
CO-DIRECTOR**

**Mexicali, Baja California.**

**Abril de 2017**

## RESUMEN

La técnica de cocientes espectrales es empleada para la obtención de valores de frecuencias o periodos dominantes del suelo, se fundamenta en que las ondas que causan las vibraciones ambientales registradas en la superficie del suelo son de dos tipos: ondas superficiales (específicamente, ondas Rayleigh) y ondas de cuerpo (P y S), según Nakamura (1989) fundador de esta técnica, la cual, en la actualidad se ha implementado en numerosas ciudades con peligro sísmico, demostrando que su uso es significativo para el diseño antisísmico de las estructuras civiles, o bien, para el reforzamiento estructural de edificios ya existentes.

En este trabajo se construye un modelo de ruido sísmico ambiental apoyado en la teoría de vibración y ondas, considerando a los microtremores como una combinación de movimientos armónicos simples (MAS). Este modelo es validado con resultados de periodos dominantes obtenidos a partir de mediciones de microtremores, dividiéndolo en dos tipos suelos: blandos y duros, de acuerdo al valor de la frecuencia natural obtenida al aplicarles la Técnica de Nakamura.

De manera simultánea, se realiza una comparación de periodos vibratorios del suelo obtenidos a partir de microtremores de un lugar, contra los adquiridos cuando el suelo del mismo sitio se ve afectado por movimientos sísmicos. Esto podría ser de interés ya que las estructuras civiles son mayormente dañadas cuando el periodo fundamental de la estructura es similar al periodo dominante del

movimiento del suelo donde se encuentra cimentada, siendo significativo conocer si éste último cambia en escenarios distintos.

**Palabras clave:** ruido sísmico, periodo dominante, frecuencia natural, cocientes espectrales, movimiento armónico simple, microtremores.

## ABSTRACT

The technique of spectral ratios is used to obtain values of frequencies or dominant periods of the soil, and with this, to isolate the site effect. It is based on the fact that the waves that cause the environmental vibrations recorded on the ground surface are of two types: surface waves (specifically Rayleigh waves) and body waves (P and S), according to Nakamura (1989) founder of this technique. Nowadays this technique has been implemented in many cities with seismic hazard, demonstrating that its use is significant for the anti-seismic design of civil structures, or for the structural reinforcement of existing buildings.

In this work, an environmental seismic noise model based on vibration and wave theory is constructed, considering microtremors as a combination of simple harmonic motions (SHM). This model is validated with results of dominant periods obtained from measurements of microtremores, separating it into two types of soils: soft and hard, according to the value of the dominant period of the soil obtained when the Nakamura's technique it is applied.

Simultaneously, a comparison of vibratory soil periods obtained from microtremores of a site is carried out against those acquired when the soil of the same site is affected by seismic movements. This is of interest because the civil structures are mostly damaged when the fundamental period of the structure is similar to the dominant period of the movement of the ground surface where it is basemented, being significant to know if that changes in different scenarios.

**Keywords:** seismic noise, dominant period, natural frequency, spectral ratios, simple harmonic motion, microtremors.

## DEDICATORIAS

A Miguel y Diego por ser mi fuente de energía para levantarme y seguir avanzando en cada una de mis caídas. Su amor y alegría han sido mi más grande bendición, espero que este trabajo logre ser un ejemplo de esfuerzo y trabajo en equipo.

A mis padres por estar siempre a mi lado, todo lo que soy se los debo a ustedes. Mamá este trabajo es gracias a tu apoyo incondicional y por la fortaleza que has tenido siempre. Papá, me hubiera encantado que finalizaras este camino a mi lado, estoy segura que desde el cielo te sientes orgullosa de mí.

A mis hermanos por todo el amor, pleitos y alegrías que, día a día me alientan para seguir adelante. Así como me ayudaron a finalizar este proyecto, me ayudan con su amor para mis hijos y hacia mi persona.

Este trabajo es también para mis familias Ibarra y Torúa, porque mi esencia viene de su sangre, de su amor y de todo lo que me brindan diariamente, para los que están y los que se nos adelantaron.

## AGRADECIMIENTOS

Principalmente a **DIOS** porque todo lo que soy y tengo es por Él. Las pruebas que me has puesto a lo largo de esta etapa, han sido muestras de tu amor infinito.

A mis directores de tesis por el tiempo, asesoría y consejos para que este trabajo haya salido adelante.

Dr. Leobardo López, cada palabra, enseñanza y confianza fueron siempre un aliciente que queda grabado en mi memoria y en mi alma.

Dra. Concepción Carreón, las palabras quedan cortas para agradecerle todo su apoyo en este trabajo y en todo lo demás que no se logra ver en un manuscrito. Le agradezco profundamente su ayuda integral en este trabajo y en mi persona.

A mis sinodales, Dr. Gabriel López, Dr. Jaime Reyes, Dr. Armando Ayala y Dr. Jorge Ramírez por sus comentarios y correcciones a lo largo de mi trabajo, para que tuviera mejor sentido y calidad.

A mis amigos que han estado a lo largo de este camino, que me han visto sufrir, reír, llorar, a punto de “tirar la toalla”, pero no dejaron de creer en mí y apoyarme en cada paso.

A la Universidad Autónoma de Baja California de manera muy especial, por abrirme las puertas para la realización de un posgrado de gran calidad académica y humana.

A mi segundo hogar, la Universidad de Sonora, por el gran apoyo de seguir preparándome y creciendo de manera profesional y personal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por haber otorgado los recursos necesarios para realizar estudios de posgrado de gran calidad.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>vi</b>
<b>CONTENIDO</b>	<b>vii</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b>	<b>ix</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	<b>x</b>
<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>5</b>
2.1 Preguntas de investigación	4
2.2 Objetivo estratégico	5
2.3 Objetivos específicos	5
2.4 Justificación del proyecto	5
2.5 Alcances y resultados esperados	6
<b>3. ANTECEDENTES</b>	<b>8</b>
3.1 Evolución de la teoría de vibración de ondas	20
<b>4. METODOLOGÍA</b>	<b>23</b>
4.1 Emisiones acústicas / Microsísmica (AE/MS)	24
4.2 Método para la estimación del efecto de sitio	25
4.2.1 Instrumentación Utilizada	34

4.3 Movimientos Armónicos Simples	36
<b>5. MODELOS DE MICROTREMORES CON MAS</b>	<b>42</b>
4.1 Clasificación de suelos en geotecnia	42
4.2 Construcción de un modelo matemático a partir de señales armónicas	44
4.3 Construcción de un modelo matemático a partir de Microtremores	50
<b>6. COMPARACIÓN DEL PERIODO VIBRATORIO DEL SUELO EN ESTADO ESTÁTICO Y DINÁMICO</b>	<b>60</b>
<b>7. RESULTADOS</b>	<b>73</b>
6.1 Modelos de microtremores con MAS	73
6.2 Modelos de comparación del periodo vibratorio del suelo en estado estático y dinámico	74
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>76</b>
<b>9. LITERATURA CITADA</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO A. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICION DE VIBRACION AMBIENTAL EN CAMPO</b>	
<b>ANEXO B. EQUIPO UTILIZADO PARA LA MEDICION DE VIBRACION AMBIENTAL EN CAMPO</b>	
<b>ANEXO C. MEDICIONES DE PERIODOS DOMINANTES EN LA CIUDAD DE HERMOSILLO, MÉXICO.</b>	
<b>ANEXO D. RESUMEN DEL PROGRAMA CoETNA V 1.0</b>	

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades físicas de los 4 tipos de suelos utilizados por la Japan Road Association. modificada de Zaho (2006).

Tabla 4.1. Tipo de suelo y velocidad de ondas de corte a partir del número de golpes de la prueba de penetración estándar (SPT).

Tabla 4.2. Valores de periodos dominantes del movimiento del suelo que se obtuvieron en esta tesis, así como datos recolectados de trabajos previos tomados de la literatura, para suelos en roca y sedimentarios.

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. División de las placas tectónicas en el mundo. Modificado de USGS.

Figura 2.2. Mapa de distribución de sitios de medición y tipo de suelo en la Bahía de Oakland, California, modificada de Field y Jacob (1995).

Figura 2.3. Frecuencias dominantes en los sitios S1 y S3, en la Bahía de Oakland, California, modificada de Field y Jacob (1995).

Figura 2.4. Cocientes espectrales mostrando periodo fundamental y nivel de amplificación para la componente este-oeste de los cuatro sitios analizados de la Ciudad de México. Modificada de Lermo y Chávez-García (1994).

Figura 2.5. Cocientes espectrales mostrando periodo fundamental y nivel de amplificación para la componente norte-sur de los cuatro sitios analizados de la Ciudad de México. Modificada de Lermo y Chávez-García (1994).

Figura 2.6. Extraída de Sylvette *et al.* (2009), topografía, tipos de suelos, frecuencias dominantes y amplitud.

Figura 2.7. Tipos de suelos en Bogotá, modificada de FOPAE, 2010.

Figura 2.8. Mapa de isovalores de periodo dominante en Bogotá, modificada de FOPAE, 2010.

Figura 2.9. Mapa de la ciudad de Mashhad, Irán con su geología superficial, modificada de Akbari *et al.*, 2011.

Figura 2.10. Mapa de la ciudad de Mashhad, Irán con áreas de frecuencias dominantes, modificada de Akbari *et al.*, 2011.

Figura 3.1. Estructura geológica típica de una cuenca sedimentaria (Nakamura, 2000).

Figura 3.2. Orientación del acelerómetro para iniciar la recolección de datos.

Figura 3.3. Diagrama de conexión del equipo utilizado en la medición de ruido sísmico ambiental y visto en campo.

Figura 3.4. Representación del MAS.

Figura 4.1 Función armónica con amplitud 10 y frecuencia de 100 Hz.

Figura 4.2 Función armónica con amplitud 10 y frecuencia de 200 Hz.

Figura 4.3 Función armónica con amplitud 10 y frecuencia de 200 Hz afectada por una señal gaussiana.

Figura 4.4 Señal de ruido sísmico ambiental, sitio CX007, con ventana de 210 segundos.

Figura 4.5 Ventana de 90 segundos de la misma señal de ruido sísmico ambiental del sitio CX007.

Figura 4.6 Cocientes NS/V y EO/V para la medición de ruido sísmico ambiental en ventana de 90 del sitio CX007.

Figura 4.7 Modelo de ruido sísmico ambiental en ventana de 90 del sitio CX007.

Figura 4.8 Cocientes NS/V y EO/V para sitio CX007 representado con el modelo matemático.

Figura 4.9 Señal de ruido sísmico ambiental, sitio CO004, con ventana de 180 segundos.

Figura 4.10 Cocientes NS/V y EO/V para la medición de ruido sísmico ambiental en el sitio CO004.

Figura 4.11 Modelo de ruido sísmico ambiental en ventana de 90 del sitio CO004.

Figura 4.12 Cocientes NS/V y EO/V para sitio CO004 representado con el modelo matemático.

Figura 5.1 Modificada de la USGS, se muestran los datos del sismo del 19 de Octubre, 2013.

Figura 5.2 Modificada de Google Earth, ubicando estación HSIG y sismo del 19/10/2013.

Figura 5.3 Registro de tiempo en la estación HSIG del sismo ocurrido el 19/10/2013.

Figura 5.4 Registro de la serie de tiempo en el sitio de la estación HSIG utilizando ruido sísmico ambiental (microtremores).

Figura 5.5 Cocientes espectrales (a) Norte-Sur/Vertical y (b) Este-Oeste/Vertical, obtenidos en el sitio HSIG a partir del sismo 19/10/2013.

Figura 5.6 Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales entre la vertical, obtenidos en el sitio HSIG a partir del sismo 19/10/2013.

Figura 5.7 Cocientes espectrales (a) Norte-Sur/Vertical y (b) Este-Oeste/Vertical, obtenidos en el sitio HSIG a partir del microtremores.

Figura 5.8 Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales entre la vertical, obtenidos en el sitio HSIG a partir del microtremores.

Figura 5.9 Modificada de Google Earth, ubicando estación BAHB y sismo del 12/11/2013.

Figura 5.10 Registro de tiempo en la estación BAHB del sismo ocurrido el 12/11/2013.

Figura 5.11 Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales, arriba Norte-Sur y abajo Este-Oeste, entre la vertical, obtenidos en el sitio BAHB a partir de microtremores.

Figura 5.12 Gráficas simultaneas de Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales, arriba Norte-Sur y abajo Este-Oeste, entre la vertical, así como el promedio, obtenidos en el sitio BAHB a partir de microtemores.

Figura 5.13 Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales, (a) Norte-Sur y (b) Este-Oeste, entre la vertical, obtenidos en el sitio BAHB a partir del sismo del 12/11/2003.

Figura 5.14 Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales, Norte-Sur y Este-Oeste, entre la vertical, obtenidos en el sitio BAHB para los dos sismos del 12/11/2003.

# 1. INTRODUCCIÓN

---

A través de la historia, los daños que han sido más representativos ante sollicitaciones sísmicas son, sin duda, los que afectan mayormente al movimiento del suelo como resultado directo de las condiciones geológicas locales produciendo consecuencias sociales y económicas. En las últimas décadas, terremotos como los de México 1985, Japón 1995, Indonesia 2004, Haití y Chile 2010, han quedado grabados en la historia por el gran número de muertos y estructuras colapsadas, esto debido a que el efecto de sitio es primordial en suelos blandos e intemperizados, a diferencia de los cercanos al basamento.

Como efecto de sitio Aki (1988) describe al resultado de los procesos de depositación, intemperismo, erosiones y otros procesos geológicos, los cuales generan fuertes diferencias en las propiedades físicas de las estructuras relativamente pequeñas y superficiales, por consiguiente, el movimiento del terreno adquiere una gran importancia, desde el punto de vista de la ingeniería civil, metros antes de arribar a la superficie terrestre.

El mayor conocimiento que se puede obtener del efecto de sitio en eventos sísmicos es mediante la observación directa del movimiento de la tierra, sin embargo, este tipo de investigación puede verse limitada por el bajo número de eventos en zonas de baja incidencia, por lo que se debe recurrir a estudios de respuesta de sitio con apoyo de microtemores.

Kanai (1957) plantea recurrir a medir la vibración ambiental de un sitio, la cual es una combinación de microsismos y microtemblores. Los microsismos son vibraciones inducidas por las actividades oceánicas y atmosféricas a nivel global, con periodos mayores a 4 segundos; mientras que los microtemblores es un término que se utiliza para cubrir todo tipo de ruido sísmico ambiental o también llamado vibración ambiental, esto es tanto el ruido producido por el hombre, generalmente de alta frecuencia, el que puede ser generado por fuentes superficiales locales como las industrias y el tráfico, tanto como el ruido natural de baja frecuencia generado por mareas, vientos, telesismos, etc.

Kanai y Tanaka (1961) definieron los microtemblores como vibraciones del suelo con periodos entre 0.05 y 2.0 segundos. Ellos plantean utilizar esta opción, aludiendo a que los suelos se manifiestan de manera similar si la fuente es originada por ruido o por terremotos.

Nakamura (1989) desarrolló una técnica la cual se basa en aislar el efecto de sitio, especialmente del periodo dominante (PD), mediante el cálculo de cocientes espectrales de mediciones de ruido sísmico ambiental o microtemblores, siendo económica y muy sencilla de desarrollar, además de ser una prueba no invasiva, conservando la naturaleza del suelo sujeto a mediciones, sin dañar su estructura ni contaminándolo.

Una característica de esta técnica, es que asume que los efectos de sitio son debidos a una sola capa de suelo sobre un semiespacio elástico. Así, el efecto de sitio está definido por un periodo resonante y un nivel de amplificación dados por la

razón de impedancia entre la capa y el semiespacio, por lo que los efectos de sitio en dos o tres dimensiones son despreciados, Acosta *et al.* (1994); sin embargo, para propósitos del cálculo de los periodos de vibración del suelo, no es imprescindible tener un control preciso del nivel de amplificación absoluto.

El periodo dominante del movimiento del suelo es uno de los componentes del efecto de sitio, normalmente definido como el periodo (segundos) de la armónica de mayor amplitud del movimiento del suelo, siendo un parámetro derivado del contenido espectral de los registros de ruido sísmico. Este valor se encuentra ligado con las características geométricas y físicas de la estratigrafía superficial.

Ciudades que cuentan con una zonificación sísmica, es decir, con áreas de suelo establecidas con un comportamiento similar durante un sismo, ayudan a crear recomendaciones precisas para el diseño y construcción de edificaciones sismo resistentes.

Estudios de microzonación sísmica del PD, o de cualquier otro parámetro físico del suelo, ofrecen herramientas a los ingenieros civiles para planeación de futuras áreas de crecimiento urbano, así como para determinar posibles escenarios de daños durante sismos futuros esperados en edificaciones. Contar con mapas de zonación sísmica de PD, podría generar una disminución de pérdidas humanas, daños a estructuras civiles, afectación al ambiente debido a las demoliciones de grandes masas de concreto, acero y otros materiales, por ende, beneficio a la economía de determinada ciudad.

Una de las limitaciones de zonificar con mapas de PD del suelo, es que los valores obtenidos en campo a partir de microtremores pueden ser distintos en áreas relativamente pequeñas, esto debido a que existen láminas o estratos de otros materiales con distintas propiedades físicas en el mismo sitio.

En los últimos años se han ido desarrollando técnicas en las que se utilizan emisiones acústicas como una alternativa para suplir una serie de aplicaciones geotécnicas. Este tipo de herramientas, cada vez más novedosas, son pruebas no destructivas y con un grado de certidumbre satisfactorio, lo que las hace dóciles para el cuidado del ambiente, sin tener que destruir o modificar el entorno del área de estudio.

El método de Nakamura, sigue siendo una técnica competitiva en los estudios del suelo para la generación de cálculos de estructuras de obras civiles, por sus características de economía y en el cuidado del medio ambiente.

En este trabajo se utilizó la técnica de Nakamura para recopilar valores de periodo dominante de vibración de diversos materiales realizados en estudios de suelo. Partiendo de ello se generaron dos modelos analíticos de microtremores basado en la teoría de ondas y vibraciones conceptualizando al ruido sísmico como un conjunto de movimientos armónicos simples (MAS).

Al tener un modelo matemático que logra representar el PD de determinado suelo, se tienen conocimientos adicionales sobre los diferentes resultados que se obtienen en las mediciones de campo en un mismo sitio.

Adicionalmente, se analizan los periodos de vibración para distintos sitios en estado de reposo y después de ser afectados por un sismo, en registros obtenidos en un lapso de tiempo posterior al evento en donde el suelo sigue sufriendo réplicas.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

---

### **2.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

¿Cómo se puede representar matemáticamente mediante MAS las mediciones de un estudio de vibración sísmica del suelo?

¿Es posible que exista un corrimiento en el periodo de vibración obtenido a partir de mediciones en diferentes suelos, si se miden en reposo a si están afectados por un movimiento sísmico?

### **2.2 OBJETIVO ESTRATEGICO**

Proponer un modelo de ruido sísmico con base a la teoría de ondas y vibraciones relacionados a los movimientos armónicos simples (MAS), para dos tipos de suelo utilizados en la construcción de obras civiles, que puedan ser reemplazados por datos obtenidos *in situ*.

### **2.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Analizar el cociente espectral H/V de mediciones de microtremores, obtenidos *in situ*.

- Crear dos modelos de ruido sísmico uno para suelo blando y otro para suelo duro.
- Comparar los cocientes espectrales de los modelos creados contra los cocientes obtenidos en campo.
- Comparar la frecuencia natural de vibración en un sitio prácticamente en reposo contra el mismo sitio, pero sometido a condiciones dinámicas.

## 2.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En los últimos años diversos autores (Chávez García, *et al.*, 1988; Lermo, *et al.*, 1994; Galliopoli, 2004; Panou *et al.*, 2005), han demostrado que la técnica de cocientes espectrales es útil para el desarrollo de la ingeniería sísmica. Dichos estudios han generado mapas de frecuencias dominantes de distintas ciudades alrededor del mundo que incluso, algunos de estos mapas forman parte de reglamentos constructivos y códigos sísmicos de distintas localidades, como es el caso de la Ciudad de México, donde la Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo los incluyen.

La microzonación sísmica de una ciudad es un producto completo y directamente utilizable por especialistas en el área de la ingeniería estructural, que puede ser utilizado para el cálculo y diseño de obras civiles. Posiblemente también,

puedan ser utilizados para determinar nuevos criterios de diseño por sismo en los reglamentos de construcción de cada localidad.

Al obtener un modelo de ruido sísmico sustentado en teorías matemáticas y físicas, será posible aclarar las incertidumbres que se han generado en la aplicación de la técnica de Nakamura, obteniéndolo y analizándolo, se podrán aumentar sus interpretaciones, así como nuevas aplicaciones con los resultados que se obtengan.

## **2.5 ALCANCES Y RESULTADOS ESPERADOS**

Establecer dos modelos del ruido sísmico basados en la teoría de ondas y vibraciones, uno en suelo blando y otro en roca, para poder ejemplificar los distintos periodos que aparecen en el cociente espectral al aplicar la técnica de Nakamura y correlacionarlas a la litología.

Presentar gráficas con los valores de periodos naturales en un sitio obtenidos a partir de microtemores y compararlas con gráficas de obtenidas en el mismo sitio, cuando el suelo se ve afectado por los movimientos que le ocasiona un sismo. Se espera que el valor de periodo dominante (PD), sea el mismo en ambos casos.

### 3. ANTECEDENTES

---

En estudios de sismología aplicada a la ingeniería es común observar la aplicación de la técnica de cocientes espectrales en registros de movimientos sísmicos o en mediciones de ruido sísmico ambiental.

Cada una de las investigaciones de zonación sísmica que se han realizado en varias partes del mundo, (California, Kobe, Chile, Ciudad de México, Italia) tienen la importancia apropiada de la región en particular, así como de sus autores.

En este trabajo se establece un orden basado en regiones altamente sísmicas, las cuales, generalmente, se caracterizan por ser límites de placas, ya sea que exista una colisión entre dos o tres de ellas, o bien, se estén separando.

La revisión de la literatura que se presenta, se dividió por regiones sísmicas de gran importancia en cada placa tectónica a nivel mundial (Figura 3.1).



Figura 3.1. División de las placas tectónicas en el mundo. Modificado de USGS

## Placa Pacífico

En esta placa se generan varios de los sismos más importantes en la historia de la tierra por lo que se han hecho varios estudios de sismicidad en ciudades de esta zona. Japón es sin duda uno de los países más perjudicado por los movimientos o desplazamientos de las placas tectónicas, sin embargo, las estructuras civiles que recorren su territorio son sin duda muestra majestuosa y fiel de la importancia y el crecimiento que ha tenido la alianza entre los estudios de ingeniería y las ciencias de la tierra.

Zaho (2006), realiza un estudio de clasificación de suelos en Japón mediante la técnica de relaciones espectrales horizontales sobre verticales, H/V. Se apoya con estudios de velocidad de onda. En su trabajo expresa que los resultados en el tipo de suelo II, no son muy fiables. Sin embargo, logra presentar una tabla (Tabla 3.1) de la Japan Road Association, donde clasifica los tipos de suelo para que puedan ser utilizados en el diseño de estructuras antisísmicas.

Tabla 3.1. Propiedades físicas de los 4 tipos de suelos utilizados por la Japan Road Association. modificada de Zaho (2006).

TIPO DE SUELOS	PERIODO NATURAL (S)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ONDAS DE CORTE	TIPO DE SUELO SEGÚN NEHRP
Tipo I: Roca/Suelo Rígido	$TG < 0.2 \text{ s}$	$V30 > 600 \text{ m/s}$	A + B
Tipo II: Suelo Duro	$0.2 \text{ s} = TG < 0.4 \text{ s}$	$300 \text{ m/s} < V30 = 600 \text{ m/s}$	C
Tipo III: Suelo Medio	$0.4 \text{ s} = TG < 0.6 \text{ s}$	$200 \text{ m/s} < V30 = 300 \text{ m/s}$	D
Suelo IV: Suelo Blando	$TG = 0.6 \text{ s}$	$V30 = 200 \text{ m/s}$	E

Kitagawa *et al.* (1992) presentan valores de periodos dominantes calculados a partir de mediciones de microtemores, y mapas de microzonación de distintos parámetros físicos que representan el movimiento del suelo a fin de apoyar a los profesionales de diseño antisísmico de estructuras civiles en el distrito de Sendai, Japón. En resumen, ellos obtienen valores de periodos dominantes de la vibración del terreno de 0.20 a 0.30 segundos, para terrenos rocosos, y valores de 0.30 a 0.80 segundos para suelos aluviales.

Otra de las regiones sísmicas de gran importancia en nuestro continente es sin duda la Falla de San Andrés que, si bien no ha tenido los sismos de magnitudes más grandes a nivel mundial, si ha dado origen a catástrofes humanas y cuantiosas pérdidas materiales. Seekins *et al.* (1996) realizaron una comparación de resultados obtenidos con la técnica de Nakamura sobre registros de microtemores en la Bahía de San Francisco, contra resultados a partir de cocientes espectrales de pares de estaciones. Concluyeron que existe una acertada similitud en la estimación del valor de periodo dominante de la vibración del sitio.

Field y Jacob (1995) muestran valores de periodos dominantes para la bahía de Oakland, California aun cuando la finalidad de su investigación era obtener comparaciones entre movimientos fuertes y débiles en amplificación. En la Figura 3.2, se muestra la distribución de tipos de suelo que presentan en su investigación, mientras que en la Figura 3.3 se presenta como ejemplo, sólo dos de las estimaciones de Nakamura (H/V), de las varias que exponen en su trabajo.

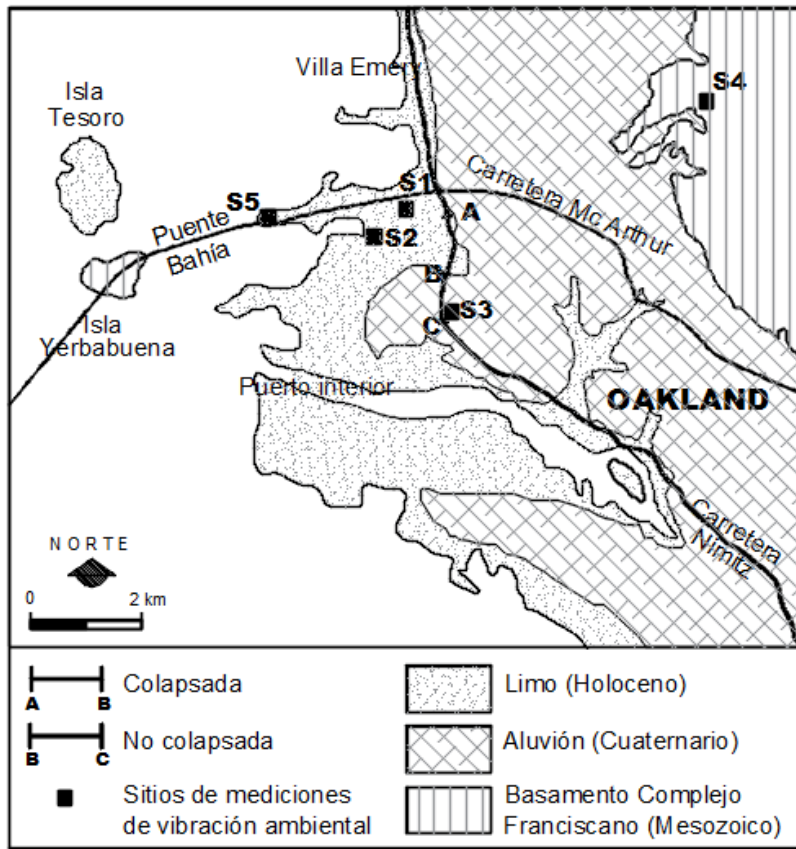


Figura 3.2. Mapa de distribución de sitios de medición y tipo de suelo en la Bahía de Oakland, California, modificada de Field y Jacob (1995).

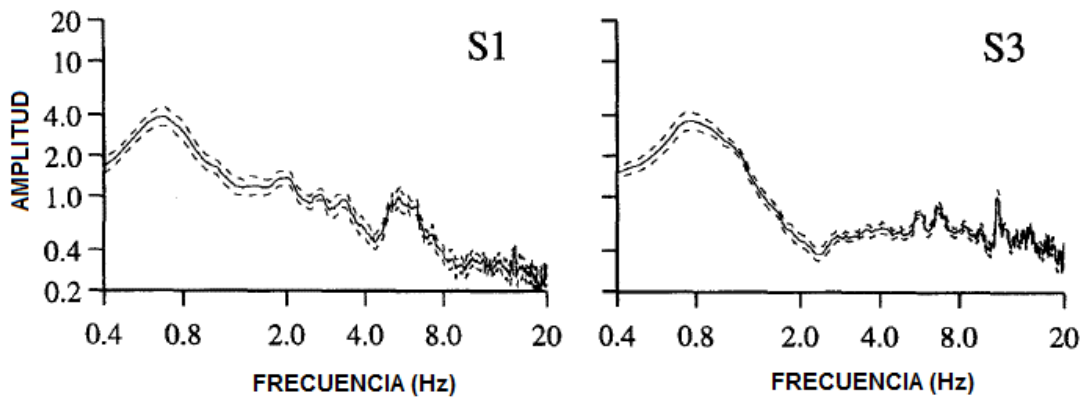


Figura 3.3. Gráfica de frecuencias dominantes en los sitios S1 y S3 ubicados en la Bahía de Oakland, California. Modificada de Field y Jacob (1995).

## **Placa de Cocos**

Uno de los principales sismos que han sido originados por el movimiento de esta placa es sin duda, el devastador terremoto de México, en 1985, cuando la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa Norteamericana ocasionó una ruptura en las costas de Michoacán, afectando gravemente la capital del país. El mismo movimiento de subducción ha ocasionado una serie de terremotos altamente destructivos, como el de El Salvador de 2001 y el terremoto de Guatemala de 2012.

Lermo y Chávez-García (1994) estudiaron la aplicabilidad de las mediciones de microtemores para evaluar la respuesta de sitio de suelos blandos en tres ciudades de México: Ciudad de México, Oaxaca, y Acapulco. Para ello, utilizaron tres técnicas diferentes usadas de manera habitual para estimar efectos de sitio (periodo fundamental y factor de amplificación): interpretación del espectro de amplitudes de Fourier, cocientes espectrales respecto a una estación de referencia y, finalmente, cocientes espectrales H/V (la técnica de Nakamura). Con la finalidad de deducir la habilidad de cada una de las técnicas para pronosticar el periodo fundamental y el nivel de amplificación, manejaron una estimación independiente de los efectos de sitio, la cual consistió en realizar cocientes espectrales, utilizando únicamente la parte correspondiente a la onda S de registros de movimientos débiles o fuertes obtenidos en el mismo sitio. La Figura 3.4 muestra en gráfica los resultados obtenidos para la componente este-oeste de los cuatro sitios analizados de la Ciudad de México.

En las gráficas, la línea fina continua representa el cociente espectral promedio de cada sitio respecto a la estación de referencia CU (Estación en Ciudad Universitaria), utilizando registros de movimiento fuerte, en las líneas punteadas finas se representa el cociente espectral promedio más-menos una desviación estándar. La línea gruesa continua constituye el cociente espectral H/V de registros de microtremores. Cada cociente espectral graficado representa el promedio de ocho mediciones. La línea gruesa punteada representa el cociente espectral promedio de las componentes horizontales de los registros de microtremores respecto a la componente horizontal correspondiente, registrada en la estación de referencia CU.

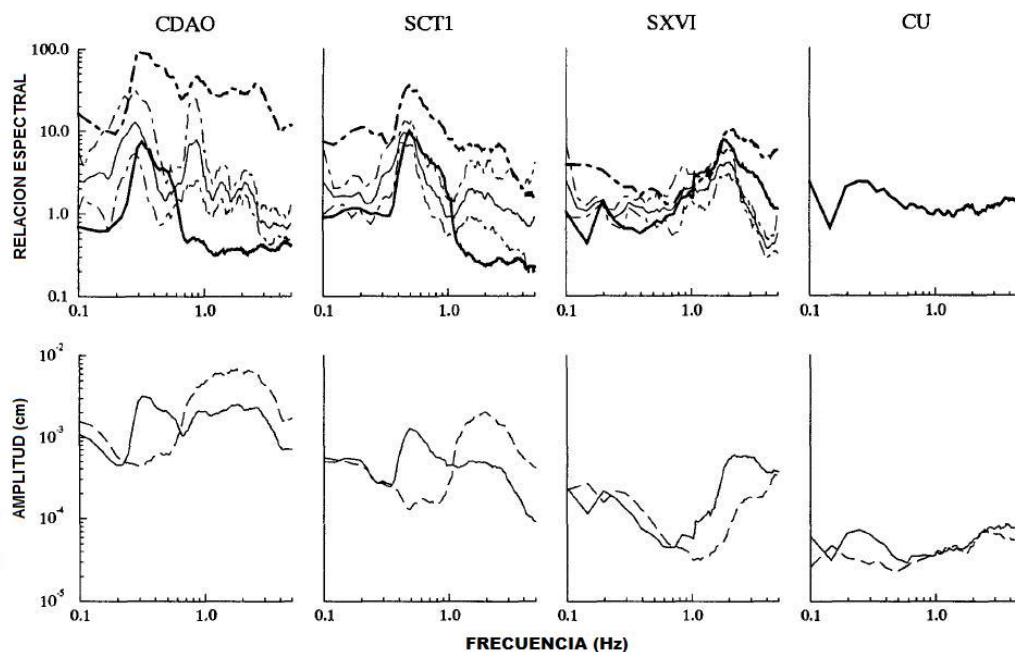


Figura 3.4. Gráficas de cocientes espectrales con su periodo fundamental y nivel de amplificación para la componente este-oeste de los cuatro sitios analizados de la Ciudad de México. En el suelo zona del lago: **CDAO**, estación en la Central de Abastos y **SCT1**, estación en el edificio de la Secretaría de Comunicaciones y transportes; En suelo de transición, la estación **SXVI**, en el vivero Coyoacán y en suelo rocoso, la estación **CU**, en Ciudad Universitaria. Modificada de Lermo y Chávez-García (1994).

En la Figura 3.5, se muestran las gráficas de los resultados obtenidos para la componente norte-sur de los mismos sitios.

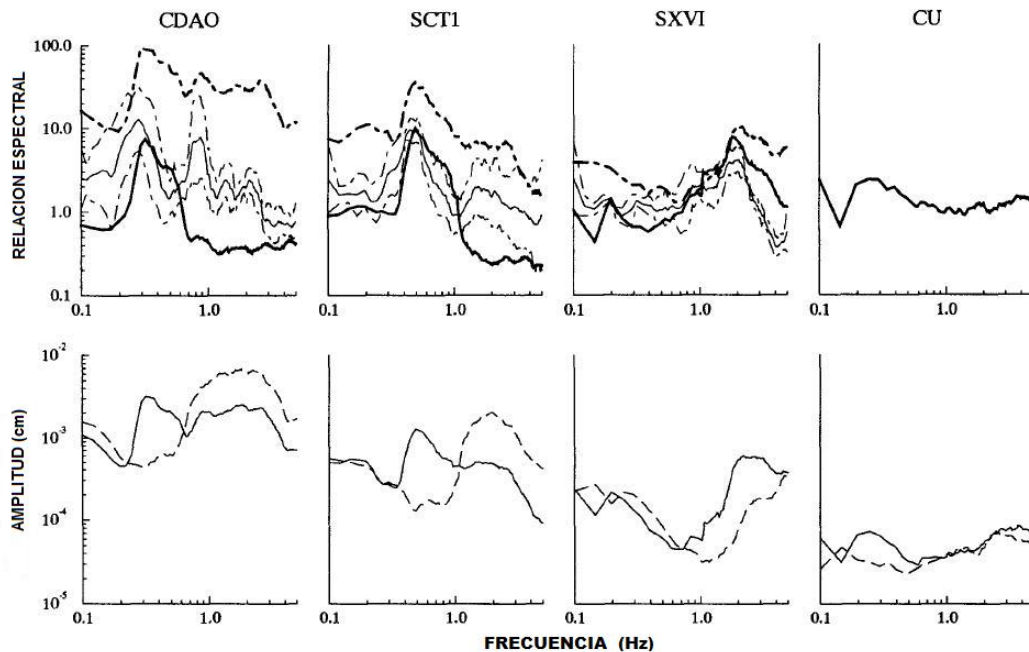


Figura 3.5. Gráficas de cocientes espectrales con su periodo fundamental y nivel de amplificación para la componente norte-sur contra vertical de los cuatro sitios analizados de la Ciudad de México. En el suelo zona del lago: **CDAO**, estación en la Central de Abastos y **SCT1**, estación en el edificio de la Secretaría de Comunicaciones y transportes; En suelo de transición, la estación **SXVI**, en el vivero Coyoacán y en suelo rocoso, la estación **CU**, en Ciudad Universitaria. Modificada de Lermo y Chávez-García (1994).

Los autores concluyen diciendo que las mediciones de microtremores pueden ser utilizadas para estimar el periodo predominante de un sitio con una aceptable confiabilidad en el rango de frecuencias de 0.3 a 5 Hz. Los mejores resultados fueron obtenidos con la técnica de Nakamura, la cual también da una estimación aproximada de la amplificación de las ondas sísmicas cuando la geología local es relativamente simple.

## Placa Nazca

Sylvette *et al.*, en el año de 2009, realizaron estudios en Santiago de Chile para crear mapas de riesgo mostrando intensidades de Mercalli Modificadas (MSK) y frecuencias dominantes con detalles de geología superficial y de la topografía del sitio. En la Figura 3.6 se muestra la geología y la distribución de picos topológicos H/V. En la Figura 3.7 se observan los sitios de medición junto con las curvas topográficas y los tipos de suelo de la región; se incluye una tabla de rangos de frecuencias dominantes y amplitud.

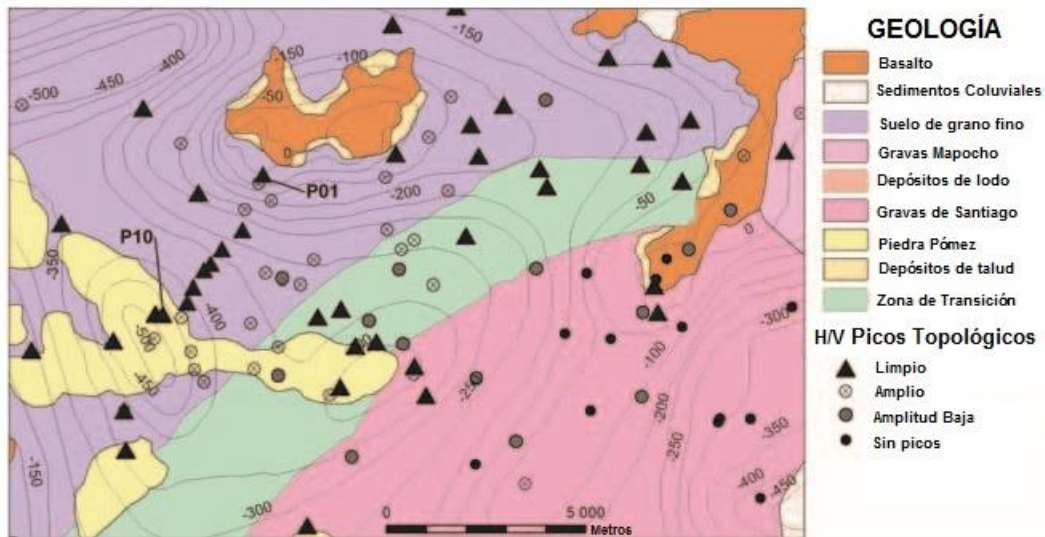


Figura 3.6 Mapa de la geología y la distribución de picos topológicos H/V en Santiago de Chile. Modificada de de Sylvette *et al.* (2009).

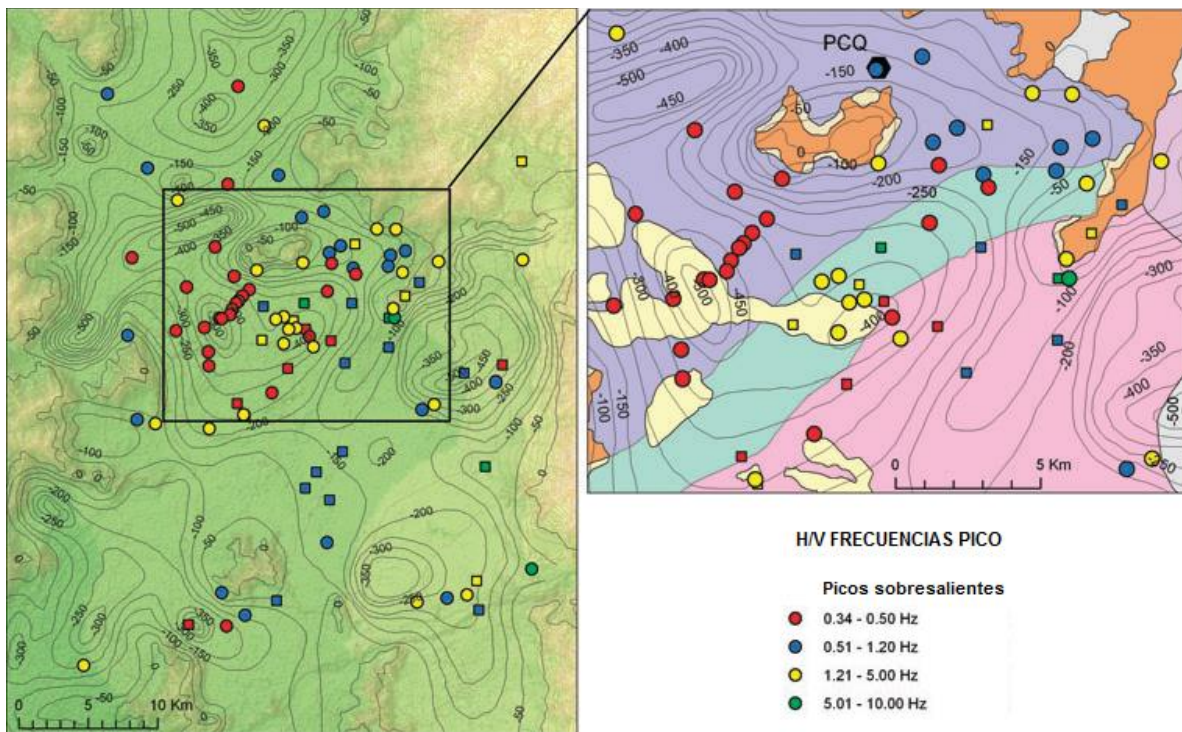


Figura 3.7 se observan los sitios de medición junto con las curvas topográficas y los tipos de suelo de la región de Santiago de Chile; se incluye una tabla de rangos de frecuencias dominantes y amplitud. Modificada de de Sylvette *et al.* (2009)

Colombia se ubica en un lugar geográfico muy vulnerable, el Cinturón de Fuego, lugar con la mayor incidencia sísmica en el mundo, y sobre la intersección de tres placas tectónicas, Nazca, Suramericana y Del Caribe.

El Fondo de Atención y Prevención de Emergencias de la Alcaldía de Bogotá Colombia, presenta el estudio Zonificación de la Respuesta Sísmica de Bogotá para el Diseño Sismo Resistente de Edificaciones (FOPAE, 2010)].

En este estudio se presenta un mapa de clasificación de suelos para la ciudad de Bogotá, Colombia, donde se observan suelos arcillosos, depósitos de basura hasta llegar a la roca (Figura 3.8)

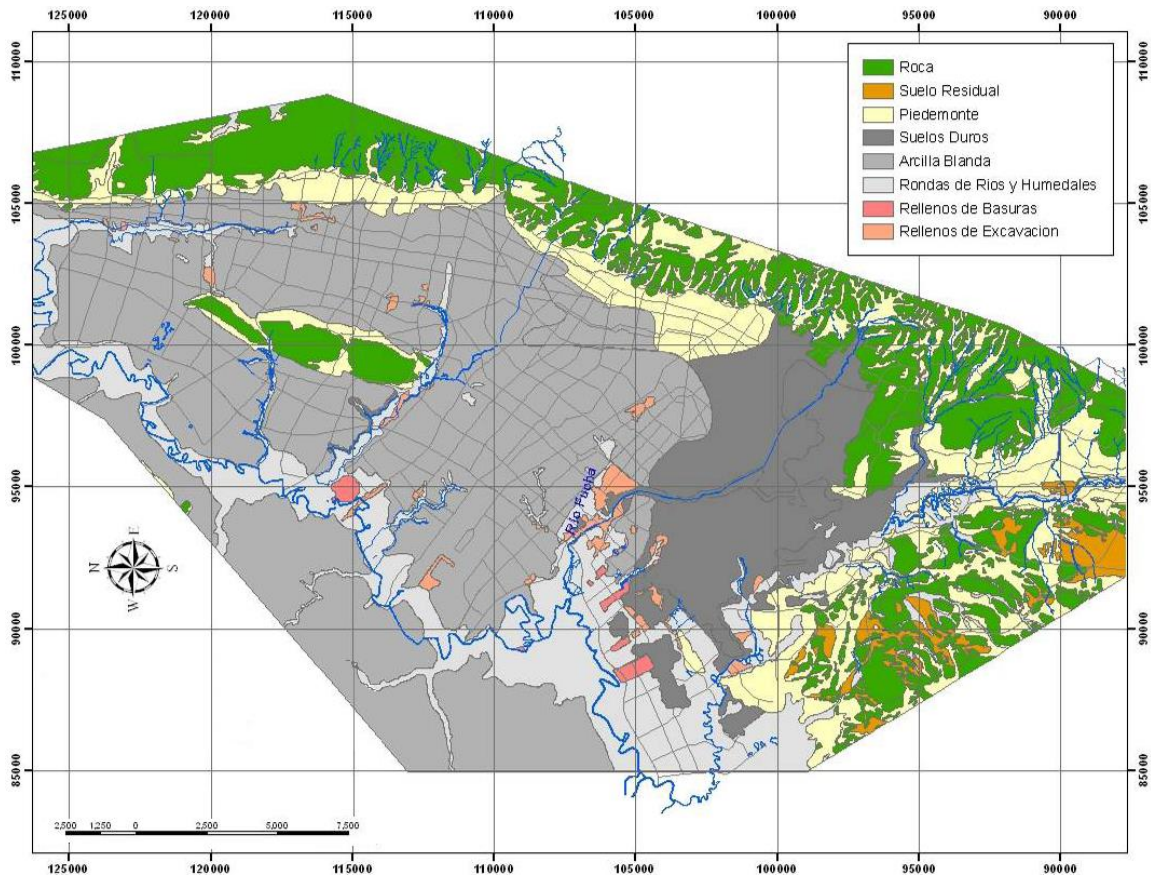


Figura 3.8. Mapa de la ciudad de Bogotá, Colombia, mostrando sus tipos de suelos. Modificada de FOPAE, (2010).

En la Figura 3.9, se muestra un mapa de la ciudad de Bogotá, con isovalores de períodos dominantes. Estos valores oscilan entre 0.2 y 0.6 segundos en depósitos duros o rocosos. En la zona lacustre se obtuvieron períodos entre 0.4 y 0.6 s. Finalmente, en la zona aluvial y piedemonte, los períodos obtenidos variaron entre los 0.2 a 0.3 s.

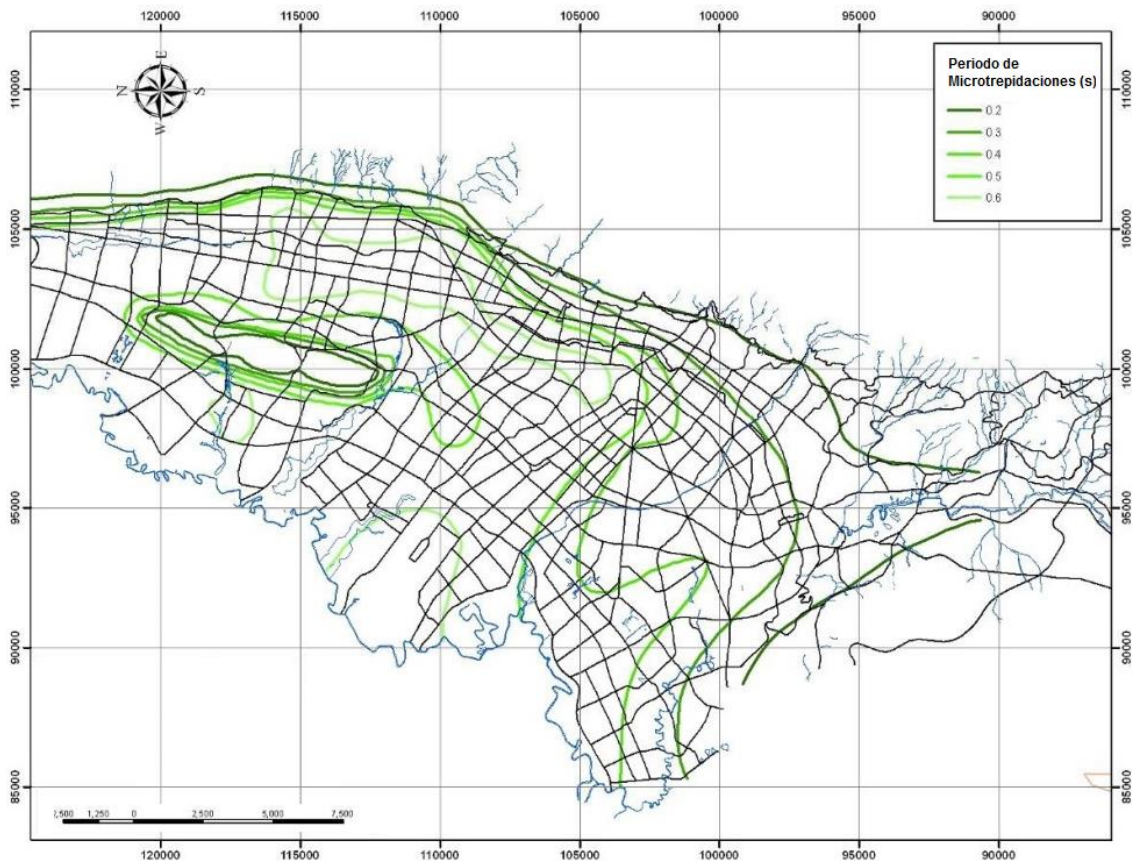


Figura 3.9. Mapa de isovalores de periodo dominante del suelo para la ciudad de Bogotá, Colombia. Modificada de FOPAE, (2010).

### Placa Iránica

Akbari *et al.* en el 2011 presentan un estudio en la ciudad de Mashhad, Irán comparando valores de periodos dominantes del suelo contra pruebas de penetración estándar, normalmente utilizadas en la geotecnia. Los resultados se ven reflejados en la Figura 3.10, la cual muestra el área de estudio con la litología y los puntos de medición, llamados pozos.

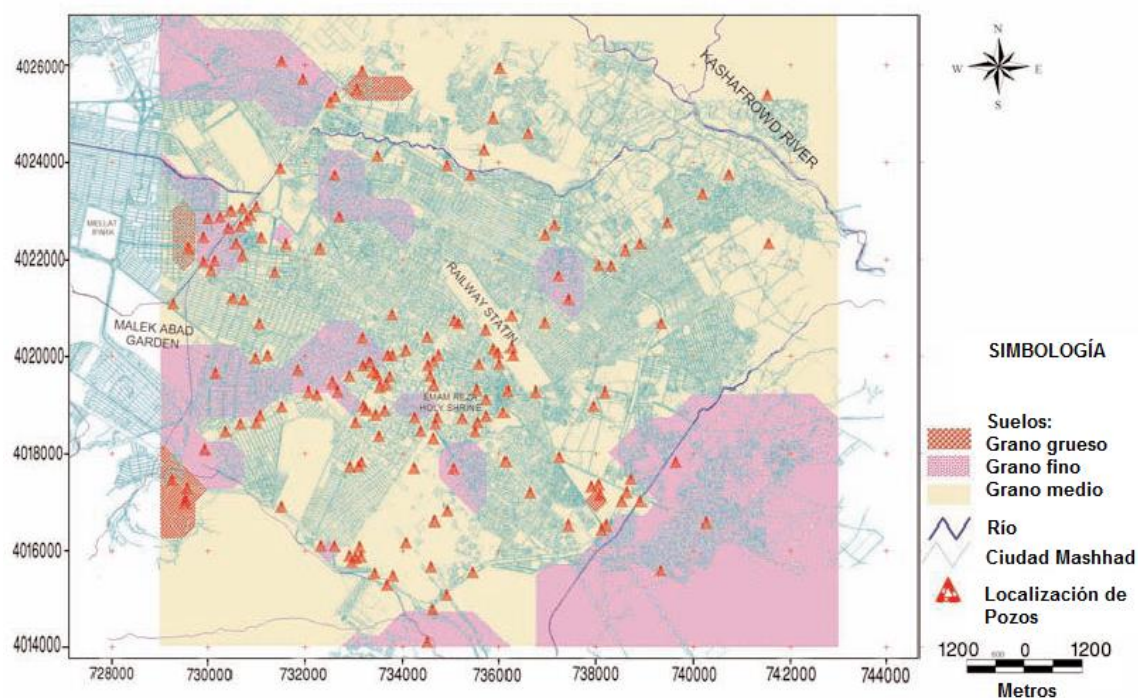


Figura 3.10. Mapa de la ciudad de Mashhad, Irán con su geología superficial y puntos de medición, modificada de Akbari *et al.*, (2011).

En este mismo trabajo quedan plasmados los rangos obtenidos de frecuencias dominantes zonificados por áreas, así como el trazo de los perfiles donde se realizaron las mediciones de penetración estándar. Los rangos de frecuencias dominantes de vibración del suelo, que son los de interés en este trabajo, oscilan entre los 0.5 a 2.5 Hz. Es decir, periodos de 0.4 a 2.0 s. (Figura 3.11)

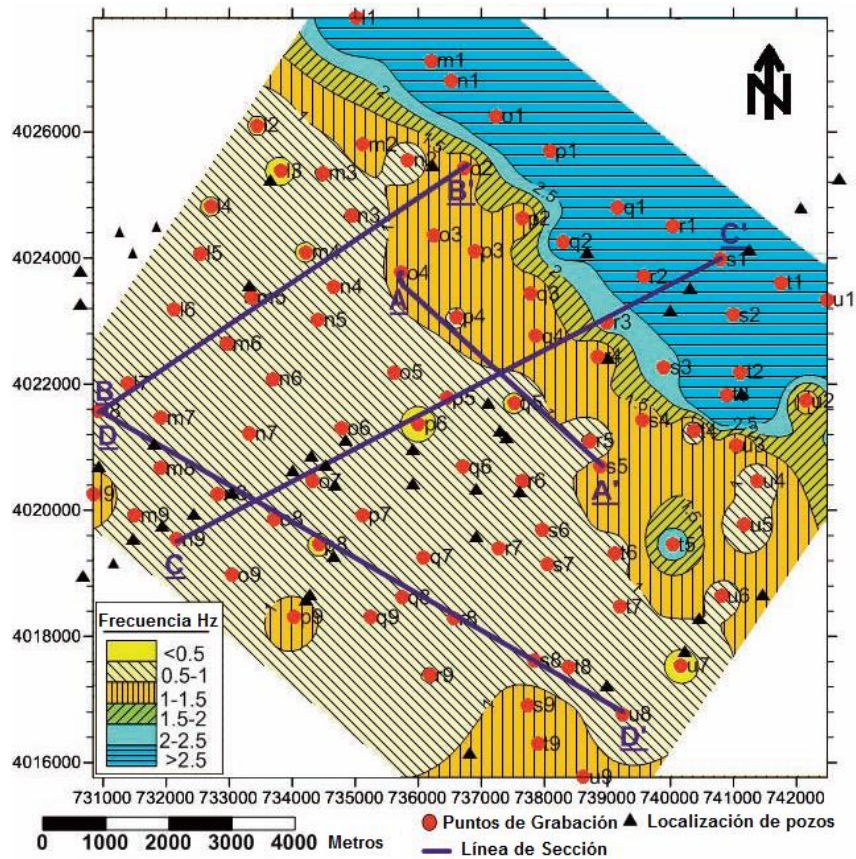


Figura 3.11. Mapa de la ciudad de Mashhad, Irán con valores de frecuencias dominantes delimitadas por áreas, modificada de Akbari *et al.*, (2011).

### Placa Euroasiática

La ciudad de Tesalónica localizada al norte de Grecia, ha sido fuertemente afectada por terremotos de magnitudes importantes. En el año de 1978, un sismo magnitud 6.5, realizó estragos importantes en la población. Con el propósito de conocer las condiciones y respuesta del efecto sísmico del suelo, Panou *et al.* (2005), realizaron una toma de 250 mediciones de ruido sísmico ambiental, en una retícula densa de puntos que cubría el centro de la ciudad. Calcularon el cociente

espectral H/V para cada sitio y se estimaron la frecuencia fundamental de vibración del suelo y el nivel de amplificación (A).

Como resultado a su investigación, construyeron mapas de contorno para la frecuencia dominante del suelo y su nivel de amplificación, comparando los resultados obtenidos de estudios geológicos, geotécnicos y datos de movimientos fuertes y obteniendo una aceptable correlación entre ambos resultados.

Como conclusión en su estudio, indicaron que las comparaciones realizadas era una buena evidencia de que las mediciones de ruido ambiental apropiadamente procesadas junto con la técnica de los cocientes espectrales H/V pueden ser utilizadas como una herramienta rápida y económica para estudios de microzonificación en ambientes urbanos.

Las instalaciones nucleares que se encuentran en el Sureste de Francia están ubicadas a pocos kilómetros de una importante falla activa llamada South Eastern Durance Fault, la cual está compuesta por dos subfallas paralelas con una longitud total de aproximadamente 70km. Volant *et al.* (2002) realizaron una evaluación sísmica de las instalaciones nucleares existentes en la región, usando mediciones de vibración ambiental para caracterizar el comportamiento dinámico de la estructura y del suelo. Los resultados del estudio del comportamiento del suelo con el método de Nakamura fueron muy complejos de interpretar porque no fueron estables en tiempo y espacio. También emplearon el método de los cocientes espectrales con registros de sismos regionales. Los resultados de la aplicación de

este método les permitieron concluir que la instalación estaba libre de efectos de sitio.

### **3.1 EVOLUCION DE LA TEORÍA DE VIBRACIÓN DE ONDAS**

Actualmente es reconocido que la mayoría de los cuerpos emiten señales sísmicas de bajo nivel cuando éstos son sometidos a esfuerzos o deformaciones, Hardy (2003).

La técnica de ultrasonido fue empleada por Obert y Duvall (1942) durante los primeros estudios de mecánica de rocas en una mina propensa al estallido de rocas. Aquí un par transmisor-receptor se unió a una columna bajo esfuerzo en un intento de medir los cambios en la velocidad de sónica que indica cambios en la columna en esfuerzo. Cuando, durante el curso de sus experimentos, quitaron el transmisor y las señales todavía se detectaban en el receptor, nació la técnica de Emisión Acústica/Micro Sismisidad, Obert (1977).

En los años recientes la aplicación de las técnicas de Emisión Acústica/Micro Sismisidad (AE/MS) en el área general de la ingeniería geotécnica se ha incrementado rápidamente. En la actualidad, estas técnicas están en uso o en estudio, para el seguimiento de la estabilidad de estructuras subterráneas, tales como minas, túneles, cavernas naturales para el almacenamiento de gas y petróleo, depósitos de residuos radiactivos y yacimientos geotérmicos, así como estructuras de la superficie como cimentaciones, pendientes de roca y tierra, columnas y

empalmes de puentes y presas. Dichas técnicas, desarrolladas originalmente en un intento de predecir y reducir la incidencia de los estallidos de roca en roca firme, y más tarde en las minas de carbón, ahora han encontrado una amplia aplicación en los suelos y rocas blandas como la sal. Por otra parte, además de su aplicación en grandes estudios a escala de campo, las técnicas AE/MS están siendo utilizados con éxito en un número creciente de estudios a escala de laboratorio y de carácter aplicado.

En esencia, la medición de la actividad AE/MS en una estructura de campo o de muestra de laboratorio es relativamente simple. Un transductor adecuado se une a la estructura o muestra, la salida del transductor es conectado a un sistema de monitoreo apropiado y las señales acústicas que ocurren en la estructura o la muestra, debido al esfuerzo o deformación interna o externa, son apropiadamente procesadas y registradas. Se supone que la liberación repentina de la energía de tensión elástica almacenada que acompaña a estos procesos genera una onda de esfuerzo elástica que viaja desde el punto de origen dentro del material hasta un límite, donde, mediante un transductor adecuado, se observa como una señal AE/MS o un evento individual AE/MS.

Debe tenerse en cuenta desde el principio que la técnica es indirecta. La técnica de AE/MS no determina directamente los parámetros básicos de la mecánica como son el esfuerzo o la tensión, sino que determina la estabilidad mecánica de una estructura cuando se somete a esfuerzo o a deformación. Esto la hace una técnica novedosa y de gran utilidad para estudios de suelo, logrando cuidar el medio que

será sujeto de estudio, sin necesidad de utilizar explosivos o sustancias que contaminen el suelo, ni de realizar movimiento de suelo o remoción de la vegetación en la zona.

### **3.2 EMISIONES ACÚSTICAS / MICROSÍSMICA (AE/MS)**

Existen una gran diversidad de términos para referirse a esta teoría de emisiones acústicas, incluyendo actividad micro-sísmica, actividad sismo-acústica, ruido sub-audible, técnica de análisis de onda de esfuerzo (SWAT siglas en inglés), y análisis de microtemores.

Las aplicaciones de técnicas de ultrasonido se han incrementado en estudios de geotecnia. Por ejemplo, son muy útiles para detectar fallas en concretos, pavimentos y suelos. También para el seguimiento de la estabilidad de estructuras subterráneas: minas, túneles, cavernas naturales para el almacenamiento de gas y petróleo, depósitos de residuos radiactivos y yacimientos geotérmicos, así como estructuras de la superficie como cimentaciones, pendientes de roca y tierra, columnas y empalmes de puentes y presas.

Las técnicas, desarrolladas originalmente en un intento de predecir y reducir la incidencia de los estallidos de roca en roca firme, y más tarde en las minas de carbón, ahora han encontrado una amplia aplicación en los suelos y rocas blandas como la sal. Por otra parte, además de su aplicación en grandes estudios a escala de campo, las técnicas AE/MS están siendo utilizados con éxito en un número

creciente de estudios a escala de laboratorio, tanto de una base y un carácter aplicado.

## 4. METODOLOGÍA

---

Basados en la técnica de cocientes espectrales y con el apoyo de la teoría de vibración y ondas, se establecerán modelos del ruido sísmico ambiental, sustentados con trabajos experimentales de campo con sismógrafos de velocidad y aceleración. Para ello, se realizan las siguientes actividades que sirven de apoyo al objetivo principal:

- Diseño de software para el procesado de datos.
- Construir modelos de ruido sísmico ambiental basado en funciones determinadas, para generar las ondas y vibraciones de manera analítica.
- Seleccionar la ubicación de sitios en la ciudad de Hermosillo, México en los que se tomarán las mediciones de ruido sísmico, abarcando diferentes tipos de litología.
- Adquirir series de tiempo de las mediciones de ruido sísmico ambiental en los sitios definidos anteriormente.
- Procesar, analizar e interpretar los espectros de los cocientes espectrales obtenidos en cada sitio.
- Presentar un rango de periodos dominantes para la ciudad de Hermosillo, México.
- Correlacionar los datos obtenidos con ruido sísmico ambiental y con el modelo de ruido creado de manera teórica.

- Hacer una comparación de los resultados del periodo dominante de vibración del suelo en un sitio en estado estático y dinámico *in situ*.

#### **4.1 MÉTODO PARA LA ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE SITIO.**

La estimación del efecto de sitio desde el análisis de datos experimentales adquiridos sobre la superficie del terreno, se sustenta en la eliminación de los efectos de la fuente y la trayectoria y el aislamiento de los efectos producidos por la geología superficial en el sitio de registro.

Existen diversas metodologías para producir una variedad de métodos numéricos que enfatizan diversos aspectos del efecto de sitio. Para los objetivos del presente trabajo, se empleará el método de Nakamura, en el que utiliza datos experimentales de fácil adquisición para obtener el valor del periodo dominante del movimiento del suelo, en una gran cantidad de sitios dentro de zonas urbanas.

Existe en la literatura diversas investigaciones (Field y Jacob (1995); Acosta *et al.*, 1994, Lermo y Chavez-García, 1994) donde se muestra que se puede emplear el movimiento del suelo inducido por microsismicidad (ruido sísmico ambiental) para estimar de manera cercana el valor del periodo dominante de un sitio sobre cualquier superficie, siempre y cuando, se descarten los efectos proporcionados por la fuente o fuentes y sus trayectorias.

Las técnicas más comunes para estimar el efecto de sitio a partir de mediciones de microtemores son: a) interpretación directa de las amplitudes de los espectros de Fourier, Mendoza *et al.* (1991), la cual en ocasiones es difícilmente realizable por

lo poco representativo del pico dominante en el espectro de Fourier; b) cálculo de cocientes espectrales relativas a un sitio de referencia, Coutel y Mora (1998), esta técnica se puede utilizar de manera sencilla en sitios donde se presentan continuamente sismos de magnitud importante y se puede mantener una estación fija colocada en un punto de suelo duro de manera permanente durante un periodo de varios meses, para tener una cantidad de datos comparables y finalmente c) cálculo de cocientes espectrales de las componentes horizontal y vertical del movimiento del suelo; Nakamura, 1989; Lermo y Chávez-García, 1994; una de las técnicas más sencillas, económicas y rápidas de realizar, la cual será la que se aplica en este proyecto.

Si cualquier fuente superficial crea ondas de cuerpo en un medio formado por una capa elástica sobre una roca con una gran diferencia de impedancia, dichas ondas se propagan siguiendo un patrón complejo, que depende de cuál es la fuente específica que les dio origen y también de su localización. De igual forma, debido a las reflexiones que resultan en la interface suelo-roca, parte de las ondas P y S se mueven desde el basamento hacia la superficie libre donde pueden ser registradas por un sensor. Esta hipótesis de que las vibraciones ambientales se deben a dos tipos de ondas permitiría explicar por qué el método de la razón H/V puede ser utilizado cuando las causas de las vibraciones son sismos.

A partir de esta hipótesis Nakamura expresa que el movimiento del suelo en la superficie es la suma de todos los movimientos causados por las ondas de cuerpo que transitan desde el basamento y se acrecientan con la contribución de las ondas superficiales, esto en el dominio de la frecuencia, Nakamura (2001).

La suma de las ondas que se propagan desde la roca, en el dominio de la frecuencia, hasta la superficie puede ser expresada como el producto de la Función de Transferencia entre roca y suelo, por la Transformada de Fourier (T.F.) del movimiento en el basamento. Si a este producto se le añade la Transformada de Fourier de las ondas de Rayleigh, se puede expresar de manera matemática de la siguiente manera, para su componente horizontal:

$$H_f(\omega) = A_h(\omega)H_b(\omega) + H_s(\omega) \quad (4.1)$$

donde:

$H_f(\omega)$  es la T.F. del movimiento en la superficie considerando la contribución de ambos tipos de ondas (de cuerpo y superficiales).

$A_h(\omega)$  es la Función de Transferencia entre el basamento y la superficie del suelo para el movimiento horizontal.

$H_b(\omega)$  es la T.F. de la componente horizontal del movimiento en el basamento.

$H_s(\omega)$  es la T.F. de la componente horizontal del movimiento del suelo en la superficie formado por las ondas de Rayleigh.

Para la componente vertical la ecuación matemática es representada de forma muy similar a la anterior:

$$V_f(\omega) = A_v(\omega)V_b(\omega) + V_s(\omega) \quad (4.2)$$

donde:

$V_f(\omega)$  es la T.F. del movimiento en la superficie considerando la contribución de ambos tipos de ondas (de cuerpo y superficiales).

$A_v(\omega)$  es la Función de Transferencia entre la roca y la superficie del suelo para el movimiento vertical.

$V_b(\omega)$  es la T.F. de la componente vertical del movimiento en el basamento.

$V_s(\omega)$  es la T.F. de la componente vertical del movimiento en la superficie debido a las ondas de Rayleigh.

Las ecuaciones 4.1 y 4.2 son válidas en los parámetros físicos del movimiento del suelo como son: el desplazamiento, la velocidad y a la aceleración si se utilizan las Transformadas de Fourier de cada una. Las Funciones de Transferencia  $A_h(\omega)$  y  $A_v(\omega)$  no cambian, aun cuando se utilice cualquier característica del movimiento.

Los espectros de Fourier de  $H_f(\omega)$  y  $V_f(\omega)$  en las ecuaciones 4.1 y 4.2 no sirven para obtener las frecuencias fundamentales del sitio, porque cuentan con las frecuencias de las fuentes que formaron las vibraciones. Observar e identificar de una manera clara las frecuencias naturales del sitio es algo complicado por lo que se utiliza la relación entre los espectros del movimiento en dos puntos del depósito, definiendo así la Función de Transferencia entre los dos puntos. Nakamura en el 2000 maneja dos relaciones espectrales denotadas como:

$$T_h(\omega) = \frac{H_f(\omega)}{H_b(\omega)} \quad (4.3)$$

donde:  $T_h(\omega)$  es la Función de Transferencia entre el movimiento horizontal en la superficie y el respectivo movimiento en el basamento rocoso (Figura 4.1).

$$T_v(\omega) = \frac{H_f(\omega)}{H_b(\omega)} \quad (4.4)$$

de igual forma, la función  $T_v(\omega)$  es la Función de Transferencia entre los movimientos verticales en la superficie y en la roca del basamento rocoso.

El autor supone que ambos espectros (4.1 y 4.2) son similares en roca nombrándolos  $H_r(\omega)$  y  $V_r(\omega)$  (Figura 4.1). Si bien es cierto que es un gran acercamiento, no es totalmente correcto, aunque las crestas en los espectros en el dominio de la frecuencia sí concuerdan, las magnitudes de  $H_r(\omega)$  y  $V_r(\omega)$  son relativamente menores que las de  $H_b(\omega)$  y  $V_b(\omega)$ .

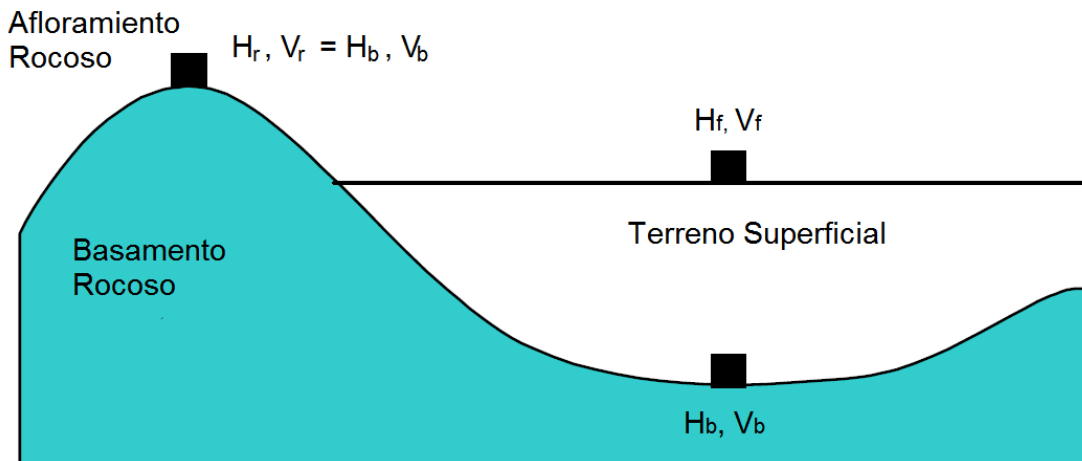


Figura 4.1. Estructura geológica típica de una cuenca sedimentaria, mostrando los sitios para el cálculo de espectros H y V (horizontal y vertical). Modificada de Nakamura, 2001.

Es difícil disponer de la función  $T_h(\omega)$  por la inconveniencia en obtener  $H_b(\omega)$ , sin embargo, Nakamura plantea utilizar una función de la frecuencia que se define como el cociente entre las funciones de transferencias  $T_h(\omega)$  y  $T_v(\omega)$ .

$$T_h^*(\omega) = \frac{T_h(\omega)}{T_v(\omega)} = \frac{H_f(\omega)/H_b(\omega)}{V_f(\omega)/V_b(\omega)} = \frac{H_f(\omega)1}{V_f(\omega)H_b(\omega)/V_b(\omega)} \quad 4.6$$

Nakamura supone con base a sus resultados experimentales que el cociente  $H_b(\omega)$  entre  $V_b(\omega)$  es aproximadamente igual a 1, solo en el rango donde se encuentra la frecuencia fundamental del sitio  $\omega_0$ .

Para este caso en particular el cociente  $T_h(\omega)/T_v(\omega)$  queda de la siguiente manera:

$$T_h^*(\omega) = \frac{T_h(\omega)}{T_v(\omega)} = \frac{H_f(\omega)}{V_f(\omega)} \quad 4.7$$

Si se reemplaza  $H_f(\omega)$  y  $V_f(\omega)$  en las ecuaciones 3.1 y 3.2, se obtiene que:

$$T_h^*(\omega) \cong \frac{H_f(\omega)}{V_f(\omega)} = \frac{A_h(\omega)H_b(\omega)+H_s(\omega)}{A_v(\omega)V_b(\omega)+V_s(\omega)} \quad 4.8$$

Nakamura llama QTS al cociente  $H_f(\omega)/V_f(\omega)$ , es decir cuasi-espectro de transferencia (**Q**uasi **T**ransfer **S**pectrum), sin embargo es comúnmente denotado como cociente  $H/V$ , sobre todo en el campo de la ingeniería.

Si se toma en cuenta que el cociente  $H_f(\omega)/V_f(\omega) \approx 1$ ,  $T_h^*$ , entonces:

$$QTS \cong \frac{\left[ A_h(\omega) + \frac{H_s(\omega)}{H_b(\omega)} \right]}{\left[ A_v(\omega) + \frac{V_s(\omega)}{V_b(\omega)} \right]} \quad 4.9$$

Despreciando las ondas de Rayleigh,  $H_s(\omega)$  y  $V_s(\omega) \cong 0$ , el cociente  $QTS = H/V$  se reduce de la siguiente forma:

$$QTS \cong \frac{A_h(\omega)}{A_v(\omega)} \quad 4.10$$

Sin embargo si se consideran significativas las ondas de Rayleigh entonces las ecuaciones quedarían de la siguiente forma:

$$\frac{H_s(\omega)}{H_b(\omega)} \gg A_h(\omega) \quad 4.11$$

$$\frac{V_s(\omega)}{V(\omega)} \gg A_V(\omega) \quad 3.12$$

De nuevo se asume que el término  $\frac{H_b(\omega)}{V_b(\omega)} \approx 1$ , por lo tanto el QTS se reduce a:

$$QTS \cong \frac{H_s(\omega)V_b(\omega)}{H_b(\omega)V_s(\omega)} \cong \frac{H_s(\omega)}{V_s(\omega)} \frac{1}{\frac{H_b(\omega)}{V_b(\omega)}} \cong \frac{H_s(\omega)}{V_s(\omega)}$$

$$QTS \cong \frac{H_s(\omega)}{V_s(\omega)} \cong H/V \quad 4.13$$

Nakamura afirma que cuando las ondas de Rayleigh son dominantes,  $V_s(\omega)$  es cercana a la frecuencia  $\omega_0$  es demasiado pequeño en comparación a  $H_s(\omega)$ , lo cual genera un pico resaltante en el cociente QTS, donde dicha cresta coincide con la frecuencia natural de las vibraciones horizontales  $\omega_0$ . Por lo tanto, el tipo de ondas es independiente de la importancia en los registros de los movimientos superficiales  $H_f(\omega)$  y  $V_f(\omega)$ , el cociente entre éstos presenta un pico en correlación con la frecuencia fundamental del depósito de suelo  $\omega_0$  relacionada a las vibraciones horizontales [24].

Lermo y Chávez-García (1994) han demostrado que la suposición realizada por Nakamura es correcta, sin embargo, sólo se ha comprobado de manera empírica y su simplicidad ha logrado que sea ampliamente utilizada. ellos mismos presentan ensayos numéricos en los que concluyen que el cociente de Nakamura es apto para dejar ver claramente la frecuencia fundamental de resonancia de un sitio.

Field y Jacob (1995) trabajaron con varias técnicas entre ellas la de Nakamura, utilizando ruido sísmico ambiental y réplicas del sismo de Loma Prieta en 1989, llegando a resultados de valores de PD del suelo muy similares entre ellos.

. Recientemente Gallipoli *et al.* (2004) utilizaron la relación H/V para evaluar la respuesta del suelo y los daños efectuados a determinada estructura utilizando microtremores, obteniendo valores semejantes a los obtenidos con sismos. Gutiérrez y Singh (1992), ponen en duda que la relación espectral H/V utilizando ruido ambiental genere los mismos resultados de periodo dominante cuando se utilicen movimientos fuertes en suelos blandos y profundos, sin embargo, los resultados de PD son semejantes. Konno y Ohmachi (1988) hacen estudios aplicando la técnica de Nakamura concluyendo que los valores de periodos dominantes de los suelos construidos con el cociente H/V, se encuentran directamente dependientes de los periodos de resonancia de las ondas Rayleigh. Por su parte, Dravinski *et al.* (1996) utilizan la técnica de Nakamura en valles semiesféricos y semicirculares, aplicados sobre registros sintéticos, concluyendo que dicho procedimiento sirve para identificar correctamente la frecuencia dominante de resonancia en las cuencas.

La técnica de Nakamura ha sido aplicada en diferentes regiones de mundo con resultados satisfactorios. Chávez García y Cuenca (1998) realizan un estudio para identificar el efecto de sitio en la ciudad de Acapulco, Guerrero; aplicando la técnica de Nakamura y la de cocientes espectrales estándar cubriendo registros de movimientos fuertes, finalmente obtienen periodos dominantes equivalentes y congruentes con las ambas técnicas.

#### **4.2.1 INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA**

Los registros de vibración ambiental en este trabajo fueron obtenidos con un acelerógrafo tipo Etna de la compañía Kinometrics. Estos equipos son acelerógrafos de movimientos fuertes, sin embargo su configuración puede ser modificada para poder registrar vibraciones menores. El equipo Etna incluye internamente un acelerómetro triaxial llamado EpiSensor ES-T y con Sistema de Posicionamiento Global (GPS). En esta campaña el ETNA, se configuró en un rango dinámico de medición de  $\pm 1.0g$ .

Es importante mencionar que se diseñó una plantilla con un procedimiento detallado (Anexo A) para las mediciones, para que todas ellas fueran lo más semejantes posibles. Independientemente del usuario y del tipo de suelo, la configuración no debe dañar los resultados por influencia del usuario y que contribuya a obtener datos erróneos o sesgados hacia un valor.

En la plantilla diseñada para tomar las mediciones, se indicó de manera clara y precisa como se debe seleccionar correctamente el sitio y prepararlo antes de colocar el aparato, así como de ubicarlo en orientación norte-sur apoyados con

brújula (Figura 4.2), y alejar el aparato lo más posible de perturbaciones que puedan dañar la toma como son tráfico excesivo, antenas, viento, cercanía de edificios o cimentaciones, entre otras (Figura 4.3)

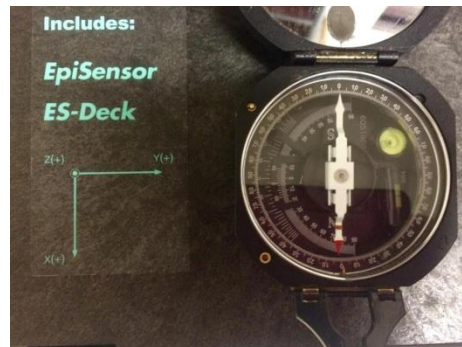


Figura 4.2. Orientación con brújula del acelerómetro para iniciar la recolección de datos.



Figura 4.3. Imágenes que muestran el equipo utilizado en la medición de ruido sísmico ambiental realizado en campo.

En algunos puntos fue imposible seleccionar una ubicación sin que existieran algunas de las características negativas antes mencionadas, sin embargo, se efectuaron las mediciones y se anotaron las observaciones para que al momento de realizar el procesamiento de datos, se contara con cualquier información que pudiera explicar anomalías en los resultados.

### **4.3 MOVIMIENTOS ARMÓNICOS SIMPLES**

En la sismología aplicada a la ingeniería, es común observar la aplicación de la técnica de cocientes espectrales de las componentes horizontal y vertical en registros de movimientos sísmicos. El ruido sísmico ambiental puede ser manejado como un conjunto de vibraciones armónicas, es decir, como el movimiento oscilante que hace una partícula alrededor de un punto fijo, en el que cada cuerpo o sistema tiende a vibrar de distintas formas French (2006) y se puede representar de forma matemática, con distintos periodos y amplitudes.

Los movimientos armónicos simples (MAS), son de todo los movimientos armónicos los más simples de representar matemáticamente ya que su característica principal es la de oscilar con una amplitud máxima que permanece constante en el tiempo, sin embargo es importante señalar que en la práctica no existe una oscilación armónica simple, porque siempre está presente un factor que disipa la energía.

En los MAS, el movimiento es periódico, oscilatorio y vibratorio; suponiendo que no exista rozamiento, se puede representar en función del tiempo con funciones

armónicas senoidales, tales como seno o coseno. El MAS (Figura 4.4) es aquel en el que la posición del cuerpo viene dada por una función del tipo:

$$x = A \cos \omega t + \varphi_0 \quad 4.14$$

las magnitudes de esta ecuación son representadas de la siguiente forma:

$x$  (*Elongación*): es el cambio del valor de magnitud física, con respecto al punto inicial de equilibrio.

$A$  (*Amplitud*): es el máximo valor de magnitud, es decir, el desplazamiento máximo a partir de la posición de equilibrio.

$\omega$  (*Frecuencia angular*): es la frecuencia angular, medida en radianes/segundos .

$t$  (*periodo*): es el tiempo requerido para realizar una oscilación o vibración completa.

$\varphi$  (*fase*) = es la fase inicial e indica el estado de oscilación en el instante  $t = 0$  de la partícula que oscila.

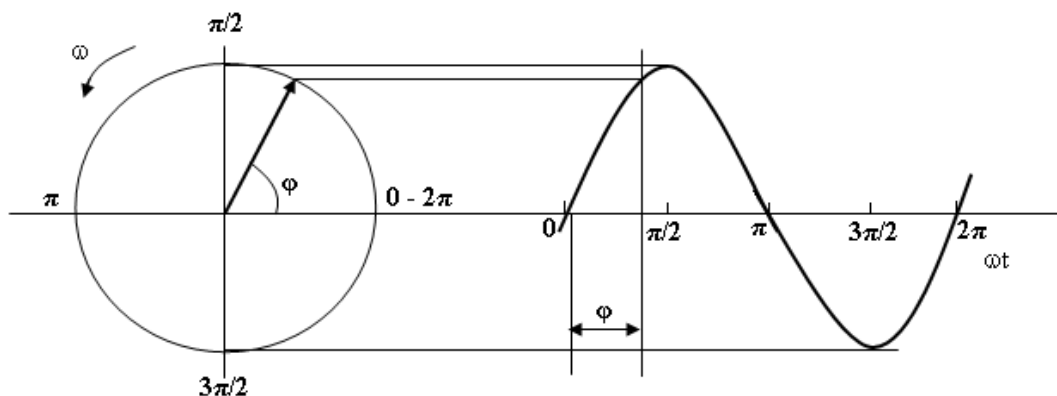


Figura 4.4. Representación del MAS, obtenida de Vector Frensel.

La fase inicial  $\varphi$  representa el adelanto o retraso de la onda con respecto al origen de los tiempos, sin embargo, si se hace coincidir el comienzo de una onda senoidal con el origen de los tiempos ( $t = 0$ ), la expresión matemática queda representada de una forma más sencilla.

La frecuencia angular  $\omega$  se expresa como:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad 4.15$$

De esta manera, la ecuación general de un MAS en forma simplificada queda representada de la siguiente manera:

$$x = A \cos \omega t \quad 4.16$$

En muchos de los fenómenos físicos interviene la suma de dos o más ecuaciones de vibraciones, que si bien, las aplicamos de manera simultánea, son la resultante de una suma algebraica de muchas vibraciones armónicas aisladas. Entonces, si se tienen dos o más Movimientos Armónicos Simples que oscilan en la misma dirección y con frecuencia equivalente, la composición de dichos movimientos, es decir, el movimiento resultante, será la suma de estos dos o más movimientos. Así, el resultado será otro MAS, de igual frecuencia.

Si suponemos dos movimientos armónicos simples de ecuaciones:

$$x_1 = A_1 \sin (\omega t + \varphi_1) \quad 4.17$$

$$x_2 = A_2 \sin (\omega t + \varphi_2) \quad 4.18$$

La ecuación del movimiento resultante será:

$$x_{tot} = x_1 + x_2 = A_1 \sin (\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin (\omega t + \varphi_2) = A_{tot} \sin (\omega t + \varphi) \quad 4.19$$

donde:

$$A_{tot}^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad 4.20$$

$$\tan \alpha = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} \quad 3.21$$

Representar la vibración del suelo como un MAS es sencillo ya que se parte de una combinación de vibraciones aisladas con la misma frecuencia, ya que se encuentran en el mismo sitio.

En el caso de representar el movimiento del suelo con una función armónica de señales senoidales, el coeficiente  $A$  dependerá totalmente de la frecuencia dominante que resulte de la medición en campo del suelo que se quiera personificar, es decir, al aplicarle la FFT el pico dominante en frecuencia es el valor que se le asignará a la ecuación senoidal en el parámetro de amplitud  $A$ .

La parte de la ecuación que queda dentro de los valores del seno o coseno,  $\omega t$  estará en función del número de veces que la señal se repetirá ( $\omega$ ) en el lapso de tiempo ( $t$ ).

Finalmente la fase  $\varphi$ , en el caso de tomas de muestras de vibración ambiental siempre será despreciado, puesto que se controla el inicio de la medición, sin embargo para representación de un movimiento fuerte del suelo, éste dependerá de la señal de arribo del movimiento en el equipo de grabación.

En general, cualquier serie de tiempo, como lo es la vibración sísmica del suelo, puede ser considerada como la superposición (llamada, suma algebraica) de una serie de señales sinusoidales de frecuencia y amplitud específica. Es posible, por tanto, representar una señal, ya sea en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. Matemáticamente, la conversión entre estos dos campos puede llevarse a cabo utilizando la integral de Fourier.

El espectro de Amplitud de Fourier es la manera de representar la magnitud  $E(\omega)$  de las amplitudes de la Transformada de Fourier  $F(\omega)$ , en función de la frecuencia, y se observa de la siguiente forma:

$$E(\omega) = |F(\omega)| = \left[ [Re(F(\omega))]^2 + [Im(F(\omega))]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad 4.21$$

$$F(\omega) = \int_0^T \alpha(t) e^{-i\omega t} dt \quad 4.22$$

donde :

$F(\omega)$  es la Transformada de Fourier

$\alpha(t)$  es el sismograma del suelo

$T$  es el periodo

$\omega$  es la frecuencia

$\pi$  es la función de muestreo

Sin embargo es más común utilizar la Transformada Discreta de Fourier, en aplicaciones directas. Para ello se dispone de una función discreta  $\alpha(t)\pi(t - \tau)$ , de tal manera que la ecuación resulta como:

$$E(nf_0) = \Delta t \sum_{k=0}^{n-1} S(k\Delta t) e^{-i2\pi kn/N}, \quad n=0,1,2,\dots,N/2 \quad 4.23$$

donde:  $f_0 = 1/N\Delta t$ ,

$\Delta t$  = Intervalo de muestreo (en segundos)

$N$  = Potencia de 2 inmediata superior al número de puntos de la serie a transformar

$S(k\Delta t)$  = k-ésima muestra de la serie de tiempo

$E(nf_0)$  = n-ésima armónica de la Transformada de Fourier

Para acelerar el procedimiento y pasar del dominio del tiempo al de la frecuencia, se le aplica un algoritmo que genera sumatorias eficientemente efectuadas tomando en cuenta la simetría de la ecuación, este método es conocido popularmente como Transformada Rápida de Fourier (TRF), Cooley. y Tukey (1965).

## **5. MODELOS DE MICROTREMORES CON MAS**

---

El objetivo de este capítulo es realizar un análisis detallado y comparar la forma y contenido de una serie de tiempo elaborada matemáticamente con apoyo de la teoría de los Movimientos Armónicos Simples (MAS) y con las señales obtenidas a partir de las mediciones de vibración ambiental, o bien, microtremores, en los tres tipos de suelos más representativos utilizados para la construcción de obras civiles. Esto con el fin de poder realizar estudios detallados del suelo con modelos matemáticos, que puedan reemplazar a datos obtenidos *in situ*.

Después de crear cualquier modelo matemático, en este caso de la serie de tiempo de un microtremor, es importante compararlo con mediciones reales de microtremores en distintos tipos de suelos para su calibración, es por eso que en este capítulo también se presentaran algunas de las mediciones elaboradas en campo, así como la técnica y el equipo utilizado para su adecuada recolección.

### **5.1 CLASIFICACIÓN DE SUELOS EN GEOTECNIA**

En el campo de la ingeniería civil es de vital importancia realizar una adecuada y rigurosa clasificación de suelos en cualquier estudio de mecánica de suelos que se utilizará como herramienta para un futuro cálculo estructural, o bien, reforzar o dictaminar alguna estructura civil. En los reglamentos de diseño por sismo para la República Mexicana, sobresale el de la Comisión Federal de Electricidad, CFE, ya

que es el más rígido debido a la importancia de las estructuras que esta dependencia construye. La clasificación del tipo de suelo está dada por dos parámetros físicos; el periodo dominante y la velocidad de propagación de ondas de corte en el sitio, Instituto de Investigaciones Eléctricas (2008).

La caracterización del sitio se genera en base a la prueba de penetración estándar, SPT, utilizada en la geotecnia, en donde se efectúa una exploración a diferentes profundidades, al menos 10 m, mediante contabilizar el número de golpes necesarios para que un cilindro metálico hueco se introduzca en un material sano e inalterado, dejando caer una masa con un peso y altura normalizadas, mediante caída libre.

La clasificación de tipo de suelo utilizado en el Manual de Diseño por Sismo de CFE, establece una relación entre el número de golpes obtenido en la SPT, y las velocidades de ondas de corte del suelo, mostrada en la Tabla 5. 1.

**Tabla 5.1. Tipo de suelo y velocidad de ondas de corte a partir del número de golpes de la prueba de penetración estándar (SPT).**

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Número de golpes (SPT)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b><math>\gamma_s</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>
Roca	---	> 720	2.0
Suelo firme y denso	> 50	360	1.8
Suelo medio	15 - 50	180	1.5
Suelo blando	< 15	90	1.3

Con estos datos se puede estimar el valor del periodo dominante del sitio, PD, mediante la siguiente ecuación:

$$T_s = \frac{4}{\sqrt{g}} \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N \frac{h_n}{G_n}\right) \left(\sum_{n=1}^N \gamma_n h_n (w_n^2 + w_n w_{n-1} + w_{n-1}^2)\right)} \quad 5.1$$

donde:

$\gamma_n$ = es el peso volumétrico del n-ésimo estrato

$G_n$ = es el módulo de rigidez en cortante del n-ésimo estrato

$h_n$ = es el espesor del n-ésimo estrato

$N$ = es el número de estratos

Con  $w_0 = 0$  en la roca basal

$w_N = 1$  en el estrato superficial

y

$$W_n = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\gamma_i V_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{\gamma_i V_i^2}} \quad \text{en los estratos intermedios} \quad 5.2$$

$V_i$  es la velocidad de propagación de ondas de corte del i-ésimo estrato

La velocidad efectiva del depósito se determinará con:

$$V_s = \frac{4H_s}{T_s} \quad 5.3$$

## 5.2 CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO A PARTIR DE SEÑALES ARMONICAS

Como se explicó anteriormente, la expresión de un Movimiento Armónico Simple, *MAS*, puede ser aplicada en fenómenos físicos como lo es el movimiento de vibración del suelo. Para ello, se revisan las constantes y variables que intervienen en la fórmula general del *MAS*, y las relacionamos a las de la expresión del movimiento del suelo.

Una serie de tiempo de un microtremor es la descripción de una señal con una amplia variedad de información contenida a lo largo de un periodo de tiempo, en la cual estarán capturados los parámetros de fuente, trayectoria y sitio. Sin embargo, como se explicó en el capítulo tres, los efectos de fuente y trayectoria no son de importancia en la técnica de cocientes espectrales aplicada en este documento, por lo que la señal de ruido con la que se trabajará, será únicamente la que contenga el efecto de sitio.

Una señal tomada de vibración ambiental tiene una amplitud baja, del orden de micrómetros,  $\mu\text{m}$ , causada por perturbaciones de origen humano o atmosféricos, las cuales son señales continuas y armónicas, que bien se pueden representar con señales senoidales. Es importante señalar que los modelos creados, siempre serán únicamente aproximaciones, ya que en la realidad los fenómenos físicos son mucho más complejos, sin limitar que cada vez los modelos se acercan al escenario real.

Un modelo matemático entonces, nos permite crear la construcción de un sistema, a partir de uno o varios parámetros, de algún caso en particular, como lo es, el de la naturaleza, de esta manera se puede reemplazar la parte compleja del sistema en una manera más sencilla para poder ser controlada con mayor precisión.

Retomando las ecuaciones del capítulo 4.3 y representando la función armónica de manera similar, obtenemos:

$$x = A \cos(2\pi f * t + \varphi) \quad 5.4$$

Primero se muestra una sola señal, (Figura 4.1) considerando un desfase nulo ( $\varphi = 0$ ):

$$x = 10 \cos(2\pi 100 * t + 0),$$

Donde:      10 es la amplitud de la función  
              100 es la frecuencia  
              t es un vector de tiempo de 100 muestras (Vector de 0 a 10 con espaciamientos de 0.10 )  
              0 es el desfase, que en este caso se tomará con valor descartado.

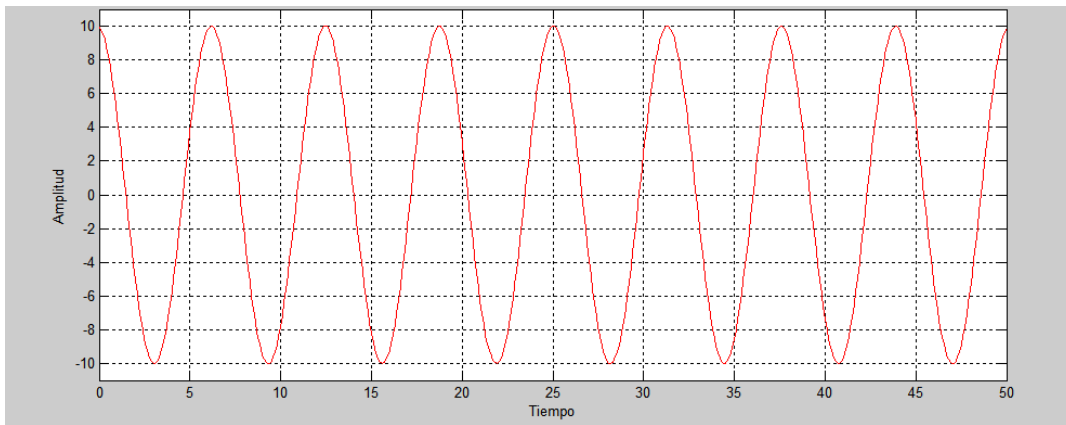


Figura 5.1 Función armónica con amplitud 10 y frecuencia de 100 Hz.

Si a la misma función se le cambia la frecuencia a 200 Hz, la gráfica queda de la siguiente forma, la cual se muestra en la figura 4.2.

$$x = 10 * \cos(2\pi 200 * t + 0),$$

- Donde:
- 10 es la amplitud de la función
  - 200 es la frecuencia
  - t es un vector de tiempo de 100 muestras (Vector de 0 a 10 con espaciamentos de 0.10 )
  - 0 es el desfaseamiento, que en este caso es nulo

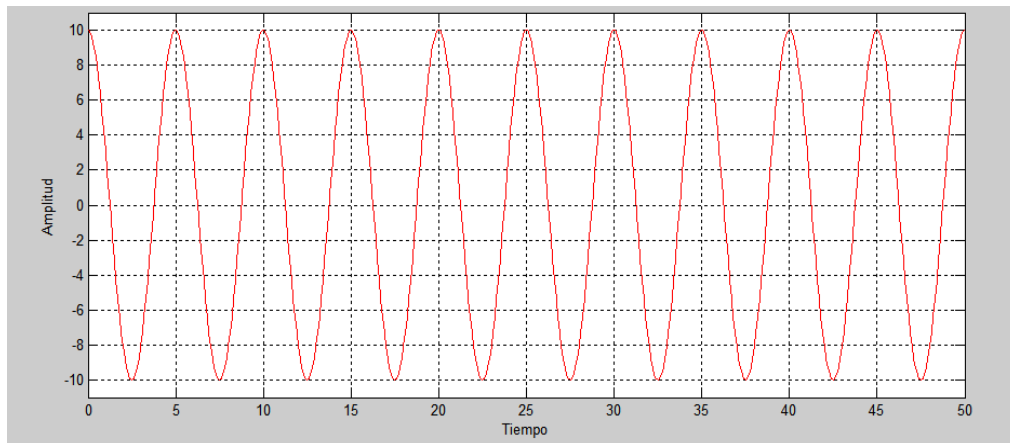


Figura 5.2 Función armónica con amplitud 10 y frecuencia de 200 Hz.

De igual forma, los MAS, pueden ser fabricados con un conjunto de funciones añadidas simultáneamente, superposición de señales, donde se varíen amplitudes y frecuencias. Si a una función cualquiera con frecuencia 4 y amplitud 10, se le agregan otras dos funciones cosenoidales de distintas frecuencias y amplitudes (una de frecuencia 8 y amplitud 5 y otra de frecuencia 3 y amplitud 8), la ecuación resultaría de la siguiente manera, y su gráfica se puede apreciar en la figura 5.3.

$$x = (10 * \cos(2\pi * 4 * t) + 5 * \cos(2\pi * 8 * t) + 8 * \cos(2\pi * 3 * t)),$$

Donde:        la amplitud cambia a lo largo de la función  
                   La frecuencia es variable en toda la función  
                   t es un vector de tiempo de 100 muestras (Vector de 0 a 10 con  
                   espaciamientos de 0.10 )

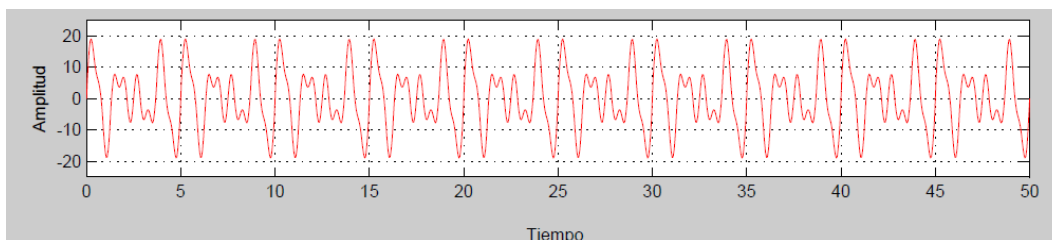


Figura 5.3 Función armónica con amplitud 10 y frecuencia de 200 Hz.

Debido a la complejidad de las señales de vibración ambiental reales, es recomendable añadirle al MAS una señal gaussiana, ya que su aleatoriedad la hace primordial en la modelación de señales generadas por la naturaleza. Las distribuciones normales o gaussianas ocurren en muchas situaciones como

consecuencia del teorema del límite central, el cual puede emplearse en datos experimentales cuando existen motivos para pensar que tales datos son resultado de un conjunto grande de pequeños efectos que actúan aditivamente e independientemente. En la Figura 5.4, se observa la gráfica anterior, alterada por una señal de ruido blanco (gaussiana), la cual no afecta su propiedad original.

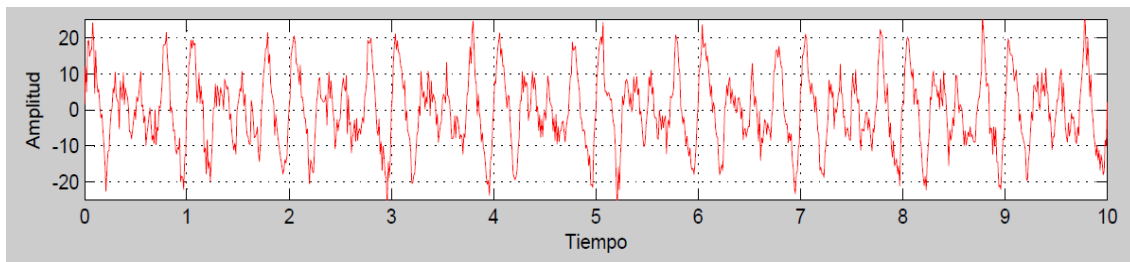


Figura 5.4 Función armónica con amplitud 10 y frecuencia de 200 Hz afectada por una señal gaussiana.

Semejante a los ejemplos anteriores, se puede cambiar la señal, modificando también las fases de inicio e incluir la variable de desfaseamiento, sin embargo, como se describió anteriormente, al procesar las mediciones de vibración ambiental se seleccionan ventanas simultáneas en cada uno de los tres canales, lo cual restringe a que el inicio de cada medición sea el mismo.

Así, con este conjunto de variables, y utilizando la superposición de funciones, se puede simular las distintas vibraciones del suelo dependiendo de las fuentes sísmicas de arriba, los diferentes tipos de suelos y sus espesores, en las que, si se les agrega una señal gaussiana aunado a los trabajos en campo, se ajustan mejor los modelos a la señal real.

En este caso, el modelo creado, será ajustado con la frecuencia de vibración de suelos que se tiene de una base de datos que se generó en este proyecto, así como de trabajos previos, ya que éste parámetro es el de importancia para el tipo de estudios de geotecnia al cual nos enfocamos.

### 5.3 CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO A PARTIR DE MICROTREMORES

A continuación se muestra una señal de ruido (Figura 5.5) obtenida en campo, con los tres canales Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical. La gráfica de esta serie de tiempo es presentada con el tiempo total de grabación, aproximado a 210 segundos. Es denotada como sitio CX007, el cual se encuentra al poniente de la ciudad de Hermosillo, sobre el cauce del Río Sonora, en afloramientos de toba riolítica, con coordenadas 29°04'17.87" N y 11°02'06.11" O.

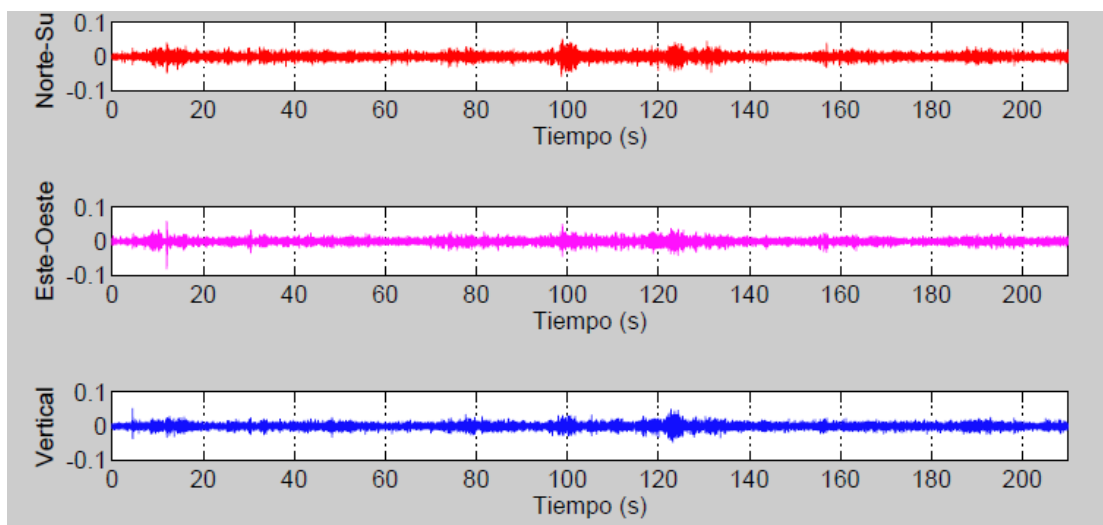


Figura 5.5 Señal de ruido sísmico ambiental, sitio CX007, con ventana de 210 segundos.

Para la modelación de la señal de ruido, se extraerán ventanas donde la señal de ruido permanezca lo más estable posible, eliminando las alteraciones fuertes de la señal, considerando que en el procesado para el cálculo del periodo dominante del suelo serán despreciados de manera semejante, por los tanto no obstaculiza el resultado esperado. Esta selección de ventana se muestra en la Figura 5.6.

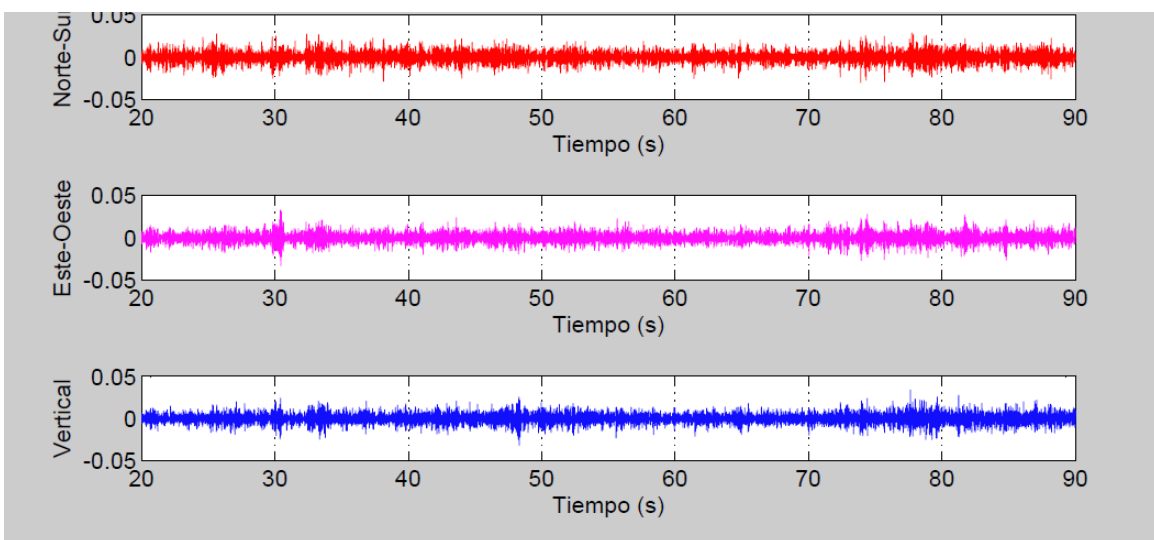


Figura 5.6 Ventana de 90 segundos de la misma señal de ruido sísmico ambiental del sitio CX007.

El procesado de datos de las señales manipuladas en este trabajo (tanto las señales reales de mediciones in situ, como las señales fabricadas con MAS), se elaboraron con el programa CoETNA, creado en Matlab®, y desarrollado para este trabajo de tesis, el cual lee los datos recolectados por el sismómetro ETNA, (Anexo B) y fueron comparados con el Paquete Estándar de Procesado de Acelerogramas, realizado por Acosta (1990)

En terminos generales, lo que se realiza a partir de los registros electrónicos del aparato, es convertirlos en series de tiempo, a las cuales se les aplica tratamientos matemáticos para obtener los espectros de Fourier de cada uno de los canales de medición. Al tener los espectros de Fourier de los tres canales, Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical, se aplica la Técnica de Nakamura, que consiste en realizar los cociente de los espectros de los canales horizontales entre el vertical, para eliminar los efectos producidos por las fuentes y trayectorias de las ondas que generan las vibraciones, preponderando unicamente el efecto de sitio.

Cabe señalar que en algunas mediciones es conveniente aplicar una serie de procesos adicionales para mejorar la lectura de los datos, como pueden ser filtros, suavizamientos, promediados de varias mediciones o de ventanas, entre otras, lo cual puede dar una resolución más clara del pico dominante en el cociente de Nakamura, sin embargo no se debe olvidar que también en esos procesos se puede perder información importante de la señal con la que estamos trabajando.

Finalmente obtenemos las gráficas de los cocientes espectrales, en los cuales se identifica de manera visual el punto dominante en el tiempo, que aunque parece una tarea compleja, es relativamente fácil, ya que solamente el periodo dominante se encontrara en ambos cocientes de las gráficas. Pueden aparecer picos mayores en los cocientes, pero solamente el valor real se mostrara en las dos gráficas.

Al aplicarle la técnica de Nakamura a la señal de vibración de ruido ambiental, (Figura 5.7) obtenida en campo, se observan picos dominantes en las frecuencias cercanas a 9Hz.

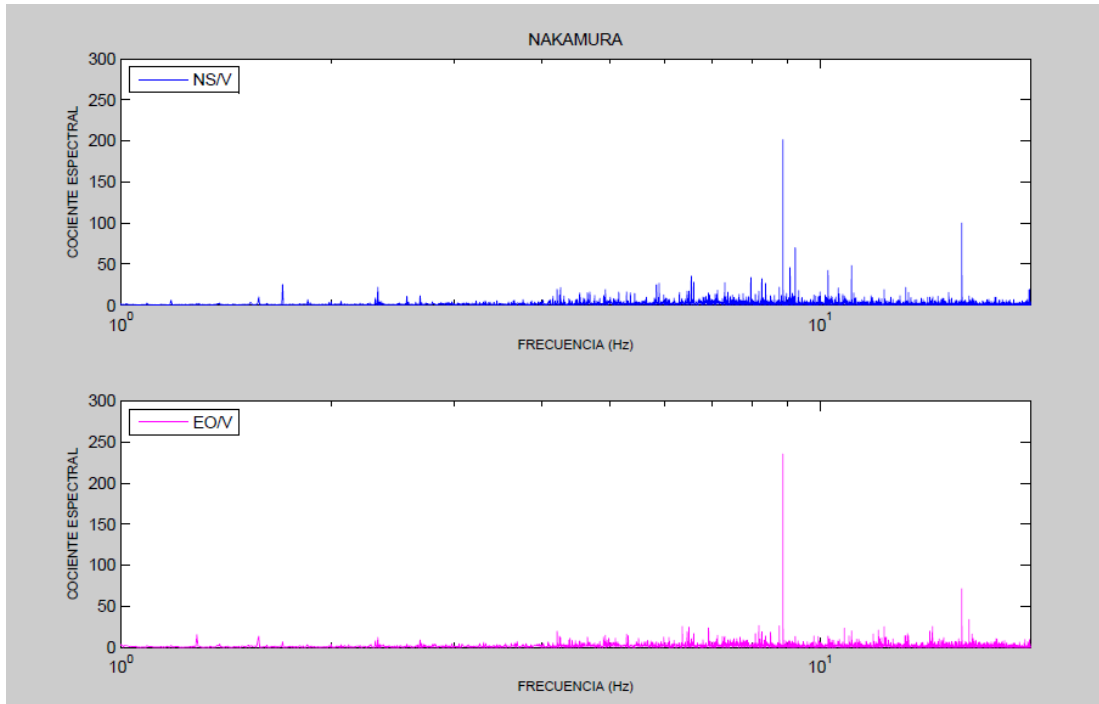


Figura 5.7 Cocientes NS/V y EO/V para la medición de ruido sísmico ambiental en ventana de 90 del sitio CX007.

Aplicando los elementos matemáticos de los Movimientos Armónicos Simples y con apoyo de ecuaciones de Gauss, se obtiene el primer modelo, el cual trata de representar la señal de ruido de un determinado tipo de suelo, con los inconvenientes estocásticos que determinan una señal sísmica, pero con la parte necesaria para declararla estacionaria y sea de ayuda para la aplicación de la técnica de Nakamura y poder obtener el periodo dominante.

En la siguiente imagen se observa uno de los modelos matemáticos generados en este trabajo, para el tipo de suelo del sitio CX007 situado sobre roca caliza (Figura 5.7). Antes de generar el MAS, es necesario calcular los cocientes espectrales de la medición de ruido real, ya que los valores de frecuencias que de ahí se originen, son las que se introducirán a la ecuación senoidal para generar la señal de ruido. En la figura 4.7 se puede observar el resultado de la serie de tiempo, en donde se observa muy poca similitud con el real, sin embargo, la semejanza deber ser en el contenido de frecuencias dentro de la señal capturada, no en las amplitudes espectrales ni en su forma. Por lo que se procederá a aplicarle la técnica de Nakamura al modelo matemático para poder revisar sus contenidos.

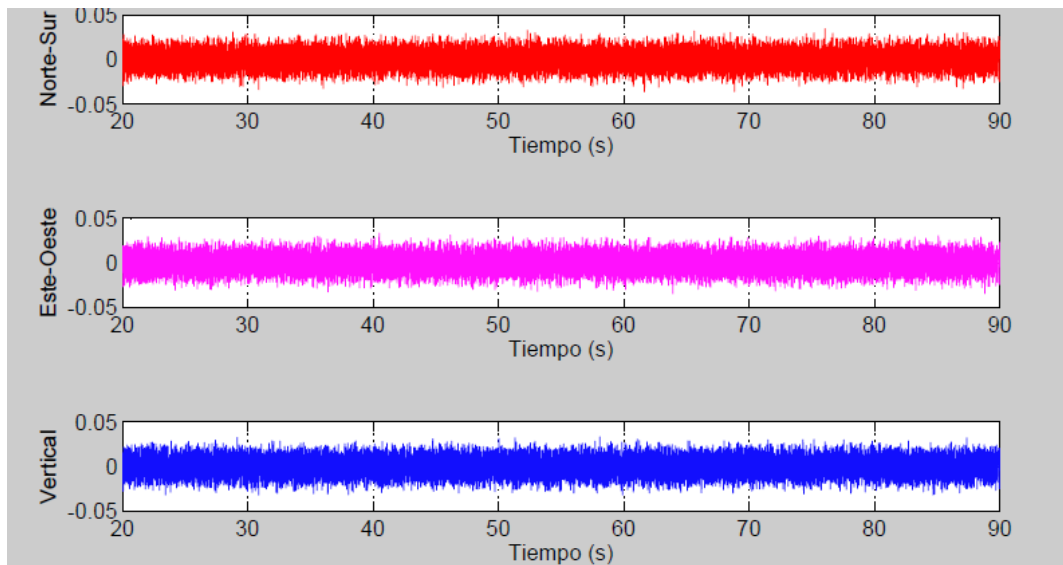


Figura 5.7 Modelo de ruido sísmico ambiental en ventana de 90 del sitio CX007.

Al realizar los cocientes espectrales de Nakamura al modelo matemático generado a partir de MAS con las frecuencias obtenidas en el procesado de los

puntos de medición sobre toba riolítica (Figura 5.8), se observan picos dominantes en las frecuencias cercano al 9 Hz.

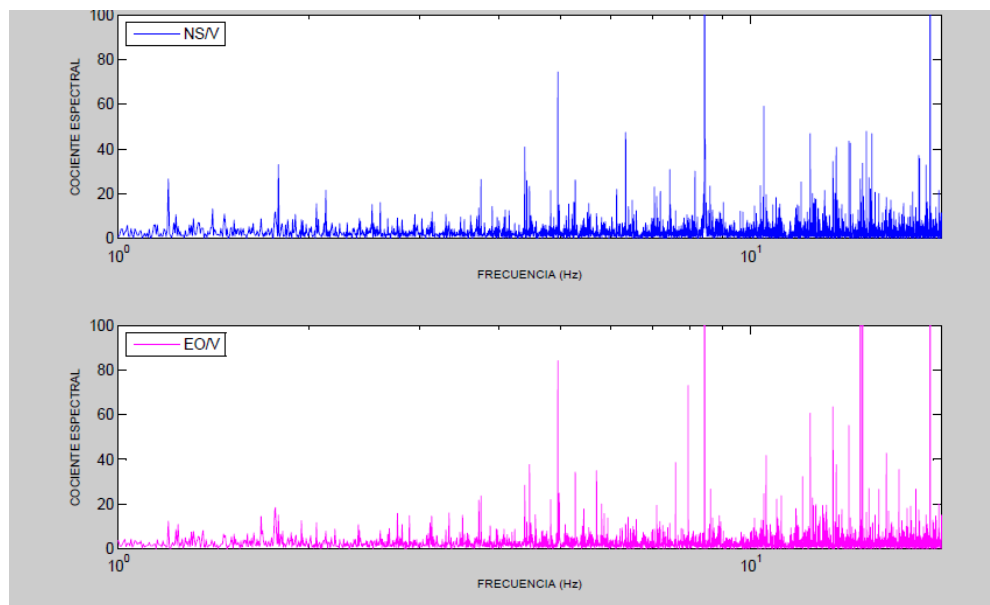


Figura 5.8 Cocientes NS/V y EO/V para sitio CX007 ubicado en roca representado con el modelo matemático.

En datos recolectados anteriormente con apoyo del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., CICESE, (Ibarra, 2004) se encontraron valores de periodos dominantes relacionados con la geología superficial en cuatro de los principales centros urbanos del estado de Baja California, México, los cuales se presentan en la Tabla 5.2 junto con otros valores de periodos dominantes obtenidos en diversos estudios presentados anteriormente por diferentes autores y los colectados en esta tesis. Éste pequeño compendio es solamente para poder manejar rangos más certeros al momento de generar los modelos de microtremores y ajustarlos.

**Tabla 5.2. Valores de periodos dominantes del movimiento del suelo que se obtuvieron en esta tesis, así como datos recolectados de trabajos previos tomados de la literatura, para suelos en roca y sedimentarios.**

Área o autor del estudio	Periodos dominantes (s)	
	Suelos en roca	Suelos sedimentarios
Hermosillo, México (esta tesis, Anexo C)	0.30 – 0.60	1.00 - 1.40
Tijuana, México(Ibarra, 2004)	0.30 - 0.46	0.52 - 3.43
Ensenada, (Ibarra, 2004)	0.14 - 0.55	0.15 - 1.40
Tecate, México (Ibarra, 2004)	0.14 - 0.32	0.18 - 0.80
Mexicali, México (Ibarra, 2004)	---	1.00 - 1.50
Ciudad de México, México (Lermo <i>et al.</i> , 1988)	0.50 - 0.80	0.30 - 5.00
Acapulco, México. (Chávez-García y Cuenca, 1998)	0.10 - 0.40	0.20 - 3.00
México D. F., México (Lermo y Becerra, 1991)	< 0.50	0.50 - 5.00
Bogotá, Colombia (Ojeda <i>et al.</i> , 2002)	0.27 - 0.80	0.42 - 1.22
Sendai, Japón (Kitagawa <i>et al.</i> , 1992)	0.20 - 0.30	0.30 - 0.80

Se observa que los valores de PD presentados en este trabajo, se comportan dentro de los rangos presentados en la literatura, lo que puede dar lugar a una

clasificación general entre roca y suelo en términos del PD, que al mismo tiempo servirán de apoyo para el ajuste del modelo matemático.

Es importante resaltar que los valores de periodos dominantes obtenidos del movimiento del suelo muestran valores bajos cuando se localizan en las zonas rocosas, en contraste con los suelos sedimentarios que presentan periodos mayores.

El siguiente punto que se eligió fue en una zona cercana al cauce del Río Sonora, con una capa pobre de sedimentos en la ciudad de Hermosillo, Sonora, en el cual se tomaron varias mediciones de ruido, obteniendo una señal con alguna interferencia de antena, tal como se puede ver en la figura 5.9, donde se muestran las series de tiempo de los tres canales con duración de 180 segundos.

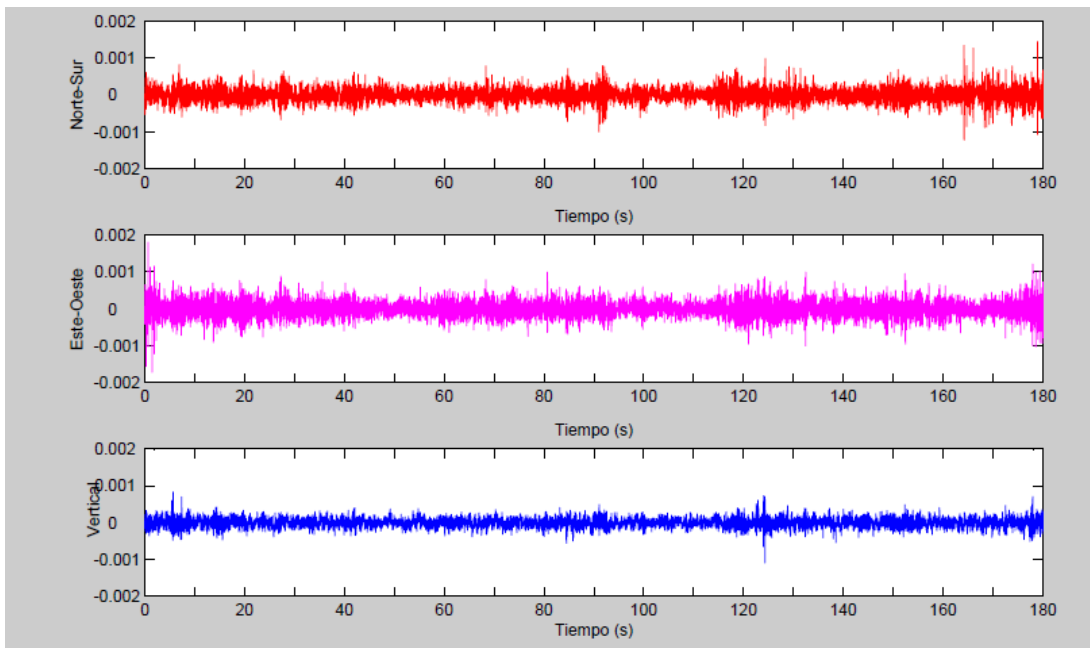


Figura 5.9 Señal de ruido sísmico ambiental, sitio CB002, con ventana de 180 segundos.

Al aplicarle la técnica de Nakamura a la señal de vibración de ruido ambiental, (Figura 5.10) obtenida en campo, se observa un pico dominante cercano a la frecuencia de 2.1 Hz.

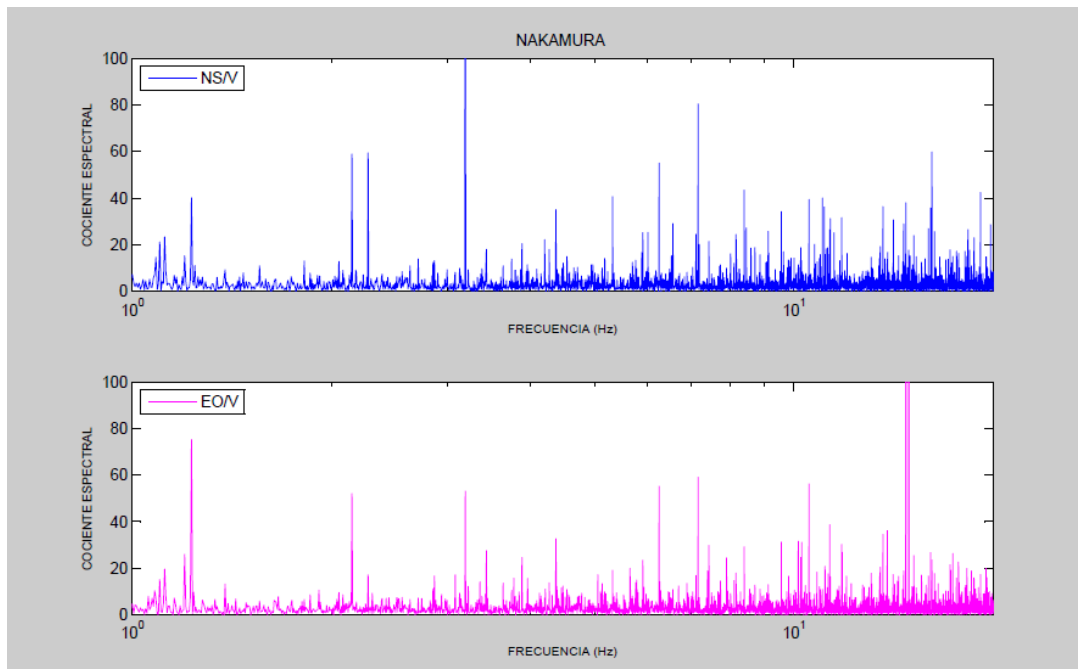


Figura 5.10 Cocientes NS/V y EO/V para la medición de ruido sísmico ambiental en el sitio CB002.

De igual forma se realiza el mismo procedimiento para generar ahora un modelo matemáticos para el tipo de suelo sobre afloramiento granítico. En la figura 5.11 se puede observar el resultado de la serie de tiempo, en donde no hay semejanza con el real, sin embargo contiene la frecuencia espectral necesaria para obtener los cocientes espectrales similares al ejemplo real.

Al realizar los cocientes de Nakamura al modelo matemático generado a partir de MAS sobre granito (Figura 5.12), se observa un pico dominante cercano a los 2.1 Hz.

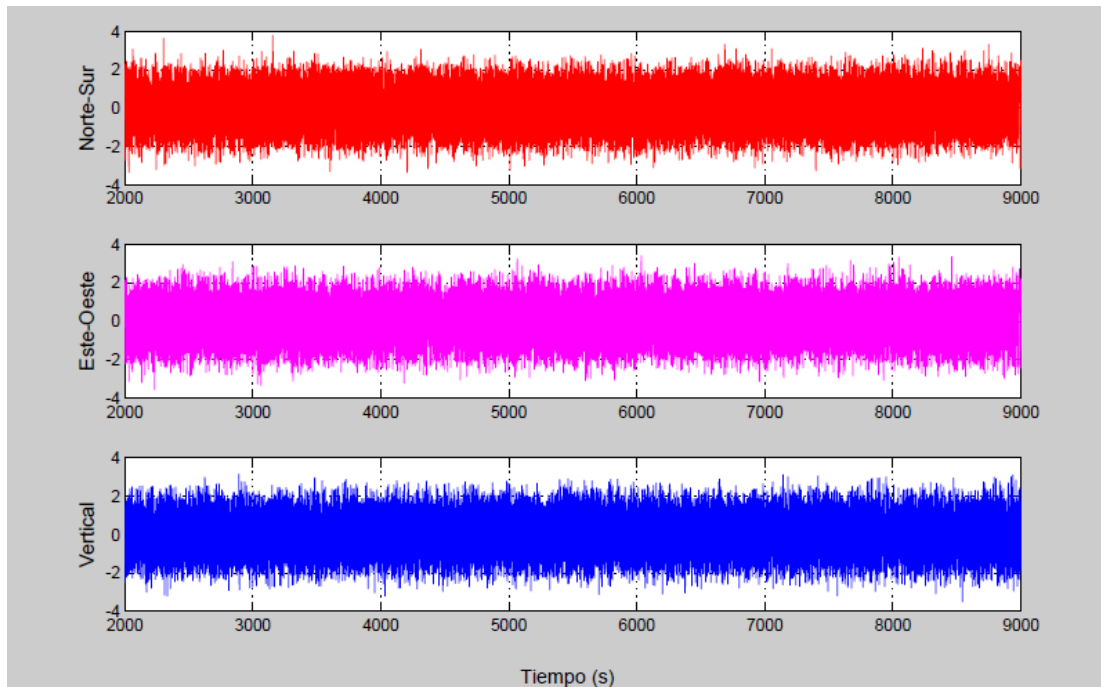


Figura 5.11 Modelo de ruido sísmico ambiental en ventana de 90 del sitio CO004.

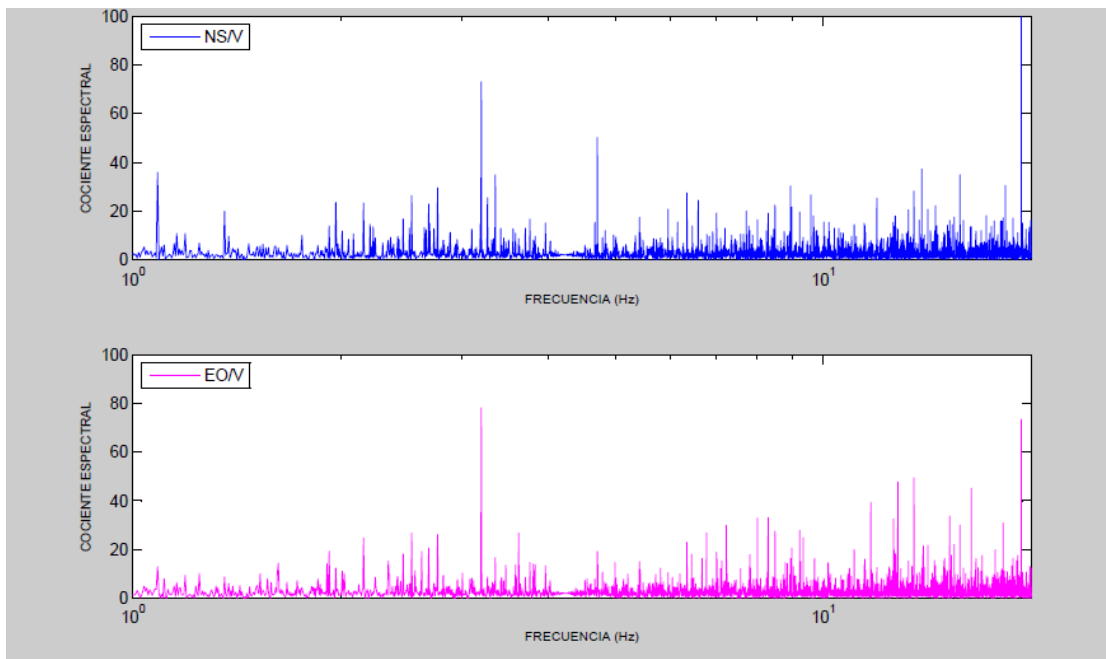


Figura 5.12 Cocientes NS/V y EO/V para sitio CO004, suelo sedimentario, representado con el modelo matemático.

## **6. COMPARACIÓN DEL PERIODO VIBRATORIO DEL SUELO EN ESTADO ESTÁTICO Y DINÁMICO**

---

Como se mencionó en capítulos anteriores, la técnica de Nakamura ha tenido gran importancia en el área de la ingeniería sísmica en muchas ciudades del mundo, aunque diversos autores han puesto en duda su principio, ya que solo se ha podido comprobar claramente de manera empírica. En este trabajo nos sumamos a la tarea de investigar si en la ciudad de Hermosillo, México se obtienen los mismos resultados de valores de periodos dominantes del movimiento del suelo, en un mismo sitio, con vibración ambiental o si el origen de la fuente es debido a un terremoto, ya que en esta región, a pesar de que existen numerosos movimientos sísmicos cercanos, ocurridos en el Golfo de California, han sido casi imperceptibles para las estructuras civiles y para la población misma.

Se recolectó información de datos sobre sismos de magnitudes importantes en la región, en los que se contaran con los registros y que al mismo tiempo tuvieran buena calidad en los tres canales. Se seleccionó para presentar en este trabajo el sismo del 19 de Octubre de 2013, por las cualidades mencionadas anteriormente, con epicentro en las coordenadas geográficas  $26.0913^{\circ}\text{N}$ ,  $110.3209^{\circ}\text{O}$ , (Figura 6.1).

Dicho sismo fue registrado por la estación HSIg, ubicada en el Centro Ecológico de Hermosillo, Sonora, con coordenadas geográficas  $29^{\circ} 1' 45.00'' \text{N}$  y  $110^{\circ} 56' 56.40'' \text{O}$ , en un equipo Guralp T40 de Banda ancha, (Figura 6.2). Esta estación es permanentemente monitoreada por el Instituto de Geología de la UNAM, en

colaboración con la Universidad Estatal de Sonora, UES, la cual tiene recopilados varios sismos de magnitudes mayores a 4 con epicentros situados principalmente en el Golfo de California, cabe señalar que de esa base de datos se tomaron varios sismos para procesar su información y obtener el periodo dominante del movimiento del suelo en ese punto bajo condiciones dinámicas, sin embargo en este trabajo se presenta el del 19/10/2013.



Figura 6.1 Modificada de la USGS, se muestran los datos del sismo del 19 de Octubre, 2013.



Figura 6.2 Modificada de Google Earth, ubicando estación HSIG y sismo del 19/10/2013.

Se muestra la serie de tiempo del registro del sismo 19/10/2013, en sus tres canales Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical, así como la duración del registro, obtenida en la estación HSIG.

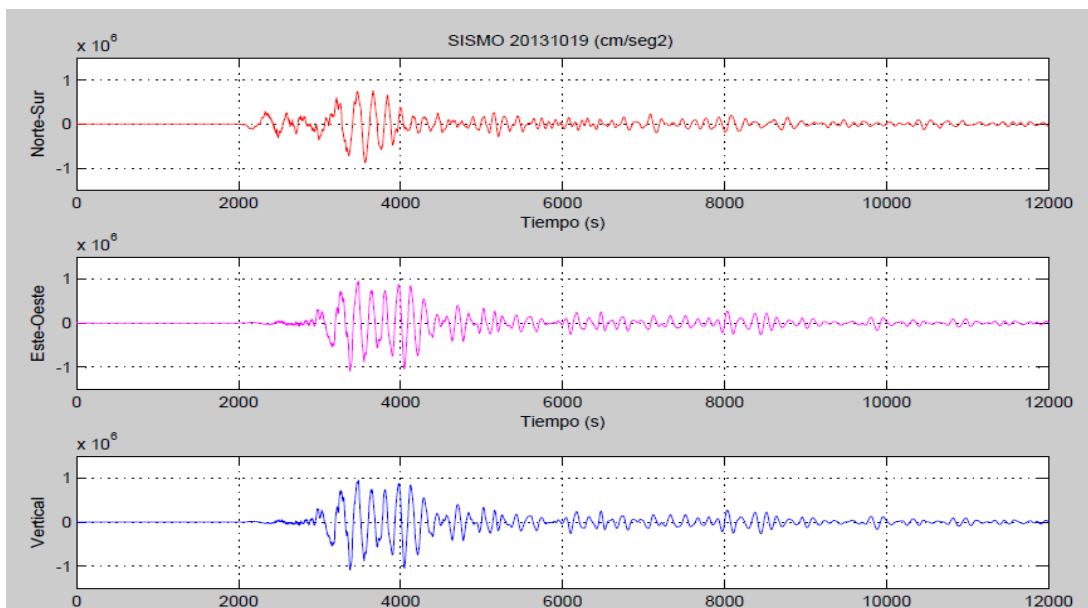


Figura 6.3 Registro tiempo de la estación HSIG del sismo ocurrido el 19/10/2013.

Al obtener el registro del sismo, se le aplica el procesado de datos apoyados en la Técnica de Cocientes espectrales, extrayendo ventanas en las que la fuerza del sismo se encuentra presente, sin embargo la forma de la señal de tiempo se mantiene lo más estable posible.

Las mediciones de vibración ambiental en el mismo sitio, se realizaron con un equipo ETNA de la marca Kinometrics, realizando de 1 a 5 mediciones de aproximadamente 180 segundos, acumulando al menos tres registros de buena calidad.

Enseguida se muestra la serie de tiempo de una de las tomas de ruido sísmico ambiental (Microtremor) en sus tres canales (Figura 6.4).

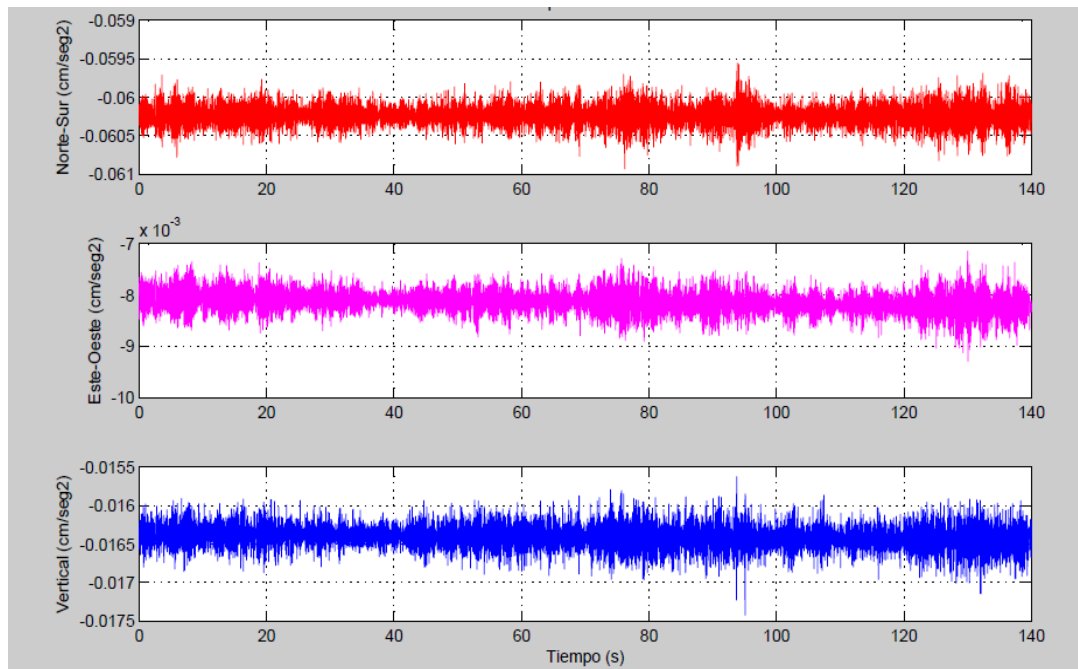


Figura 5.4 Registro de la serie de tiempo en el sitio de la estación HSIg utilizando ruido sísmico ambiental (microtremores).

Se utilizaron varios paquetes de procesamiento de datos, entre ellos el CoETNA, descrito en el capítulo anterior, así como el Paquete Estándar de Procesado de Acelerogramas, realizado por Acosta (1990).

La gráfica superior de la figura 6.5 muestra el cociente de Nakamura Norte-Sur contra vertical (a), así como el cociente Este-Oeste contra el vertical (b), en las dos gráficas se señala con una flecha el valor del Periodo Dominante, PD.

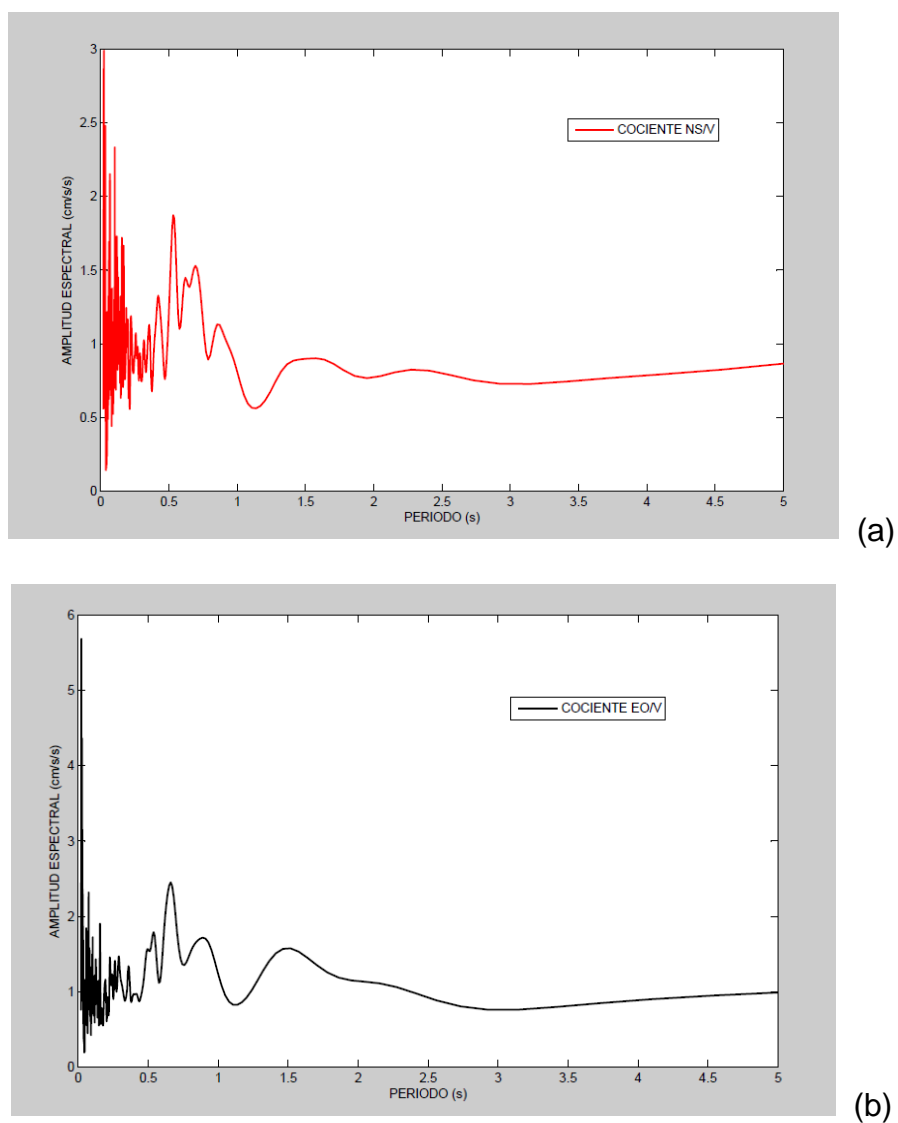


Figura 6.5 Cocientes espectrales (a) Norte-Sur/Vertical y (b) Este-Oeste/Vertical, obtenidos en el sitio HSIG a partir del sismo 19/10/2013.

En la Figura 6.6, se muestran de manera simultánea las dos gráficas donde se marca el PD a los 0.6 segundos.

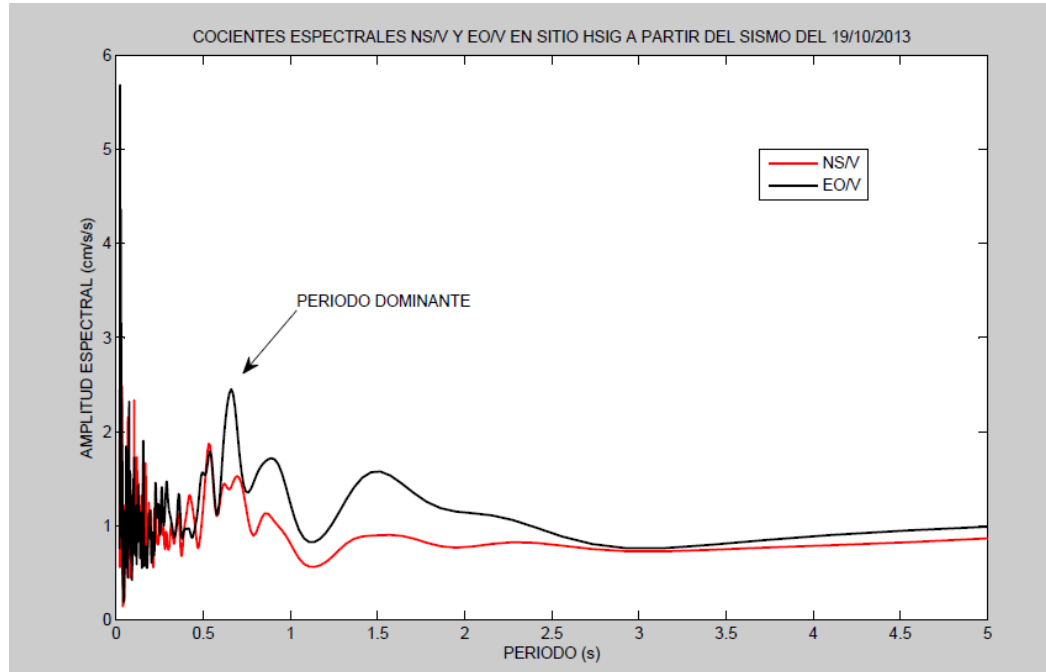


Figura 6.6 Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales entre la vertical, obtenidos en el sitio HSIG a partir del sismo 19/10/2013.

Con la misma metodología, se realizan los cocientes espectrales de las componentes horizontales entre la vertical en el mismo sitio, pero ahora con mediciones de ruido sísmico ambiental, microtremores, de los cuales se obtienen las siguientes gráficas.

Las primeras gráficas que se presentan son con ventanas de ruido tomadas aleatoriamente, de manera individual. La gráfica superior de la figura 6.7 muestra el cociente de Nakamura Norte-Sur contra vertical (a), así como el cociente Este-Oeste

contra el vertical (b), tomadas con microtremores, en las dos gráficas se señala con una flecha el valor del Periodo Dominante, PD.

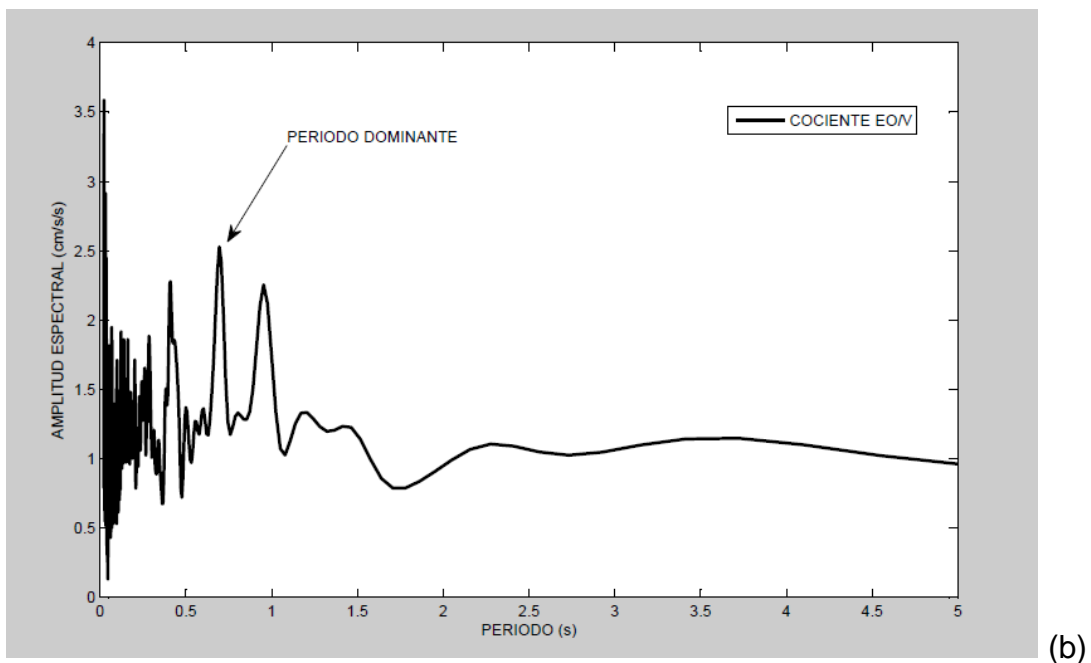
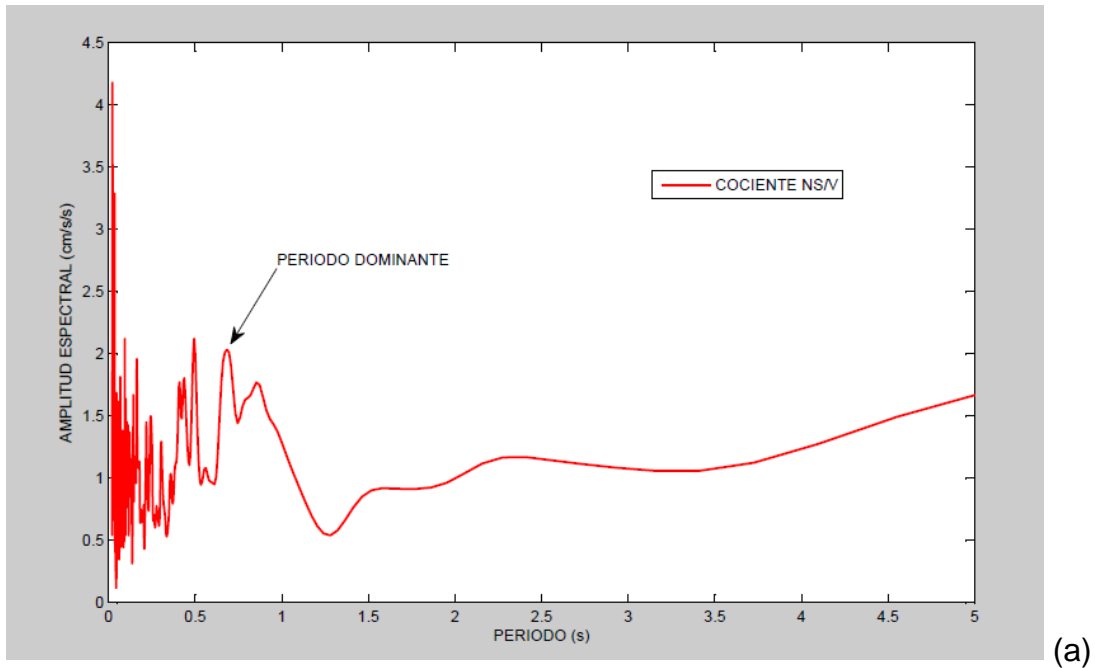


Figura 6.7 Cocientes espectrales (a) Norte-Sur/Vertical y (b) Este-Oeste/Vertical, obtenidos en el sitio HSIG a partir del microtremores.

En la Figura 6.8, se muestran de manera simultánea las dos gráficas donde se marca el PD a los 0.7 segundos.

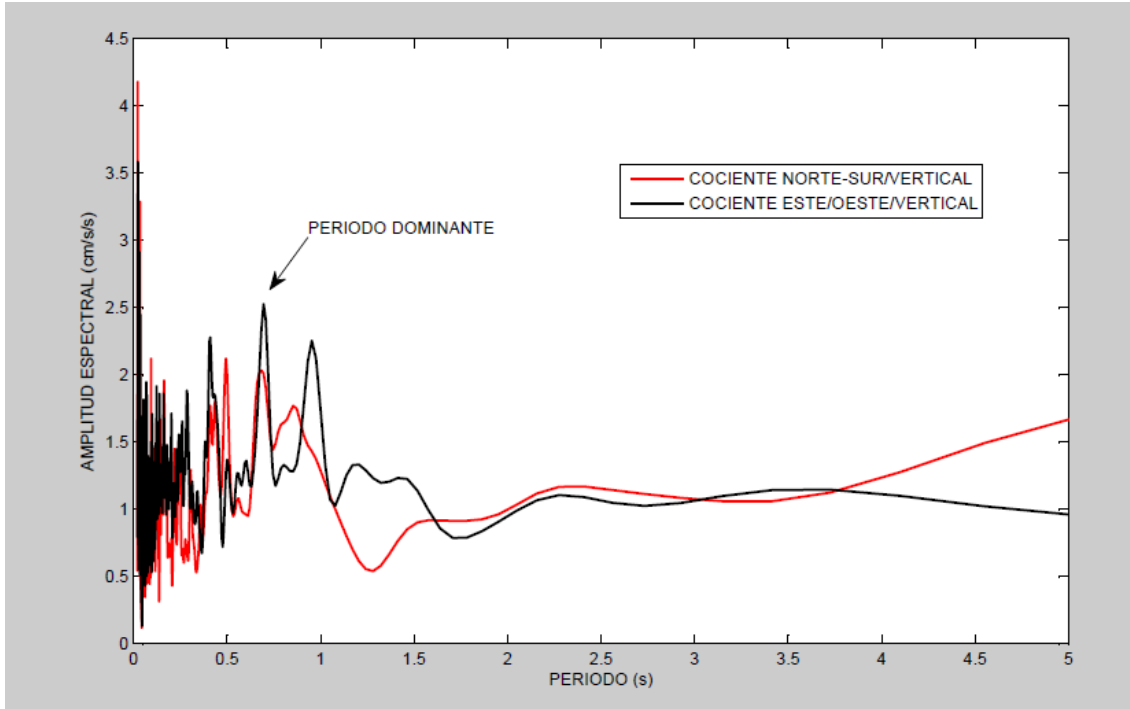


Figura 5.8 Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales entre la vertical, obtenidos en el sitio HSIg a partir de microtemores.

Continuando con el estudio comparativo del análisis de Periodos Dominantes, PD, en estado dinámico y estático, se realiza un desglose de la actividad de vibración del suelo, antes y después de un sismo, y sus réplicas, ocurrido el día 12 de Noviembre de 2003, el cual fue registrado por la estación BAHB, ubicada en la Costa del Golfo de California en la ciudad de Ensenada, Baja California, con coordenadas geográficas  $29.16^{\circ}$  N y  $113.37^{\circ}$  O, en un equipo Guralp CMG-40T de Banda ancha, (Figura 6.9).



Figura 6.9 Modificada de Google Earth, ubicando estación BAHB y sismo del 12/11/2003.

En la figura 6.10 Se muestra la serie de tiempo del registro del sismo 12 de Noviembre de 2003, en sus tres canales Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical, así como la duración del registro, obtenida en la estación BAHB.

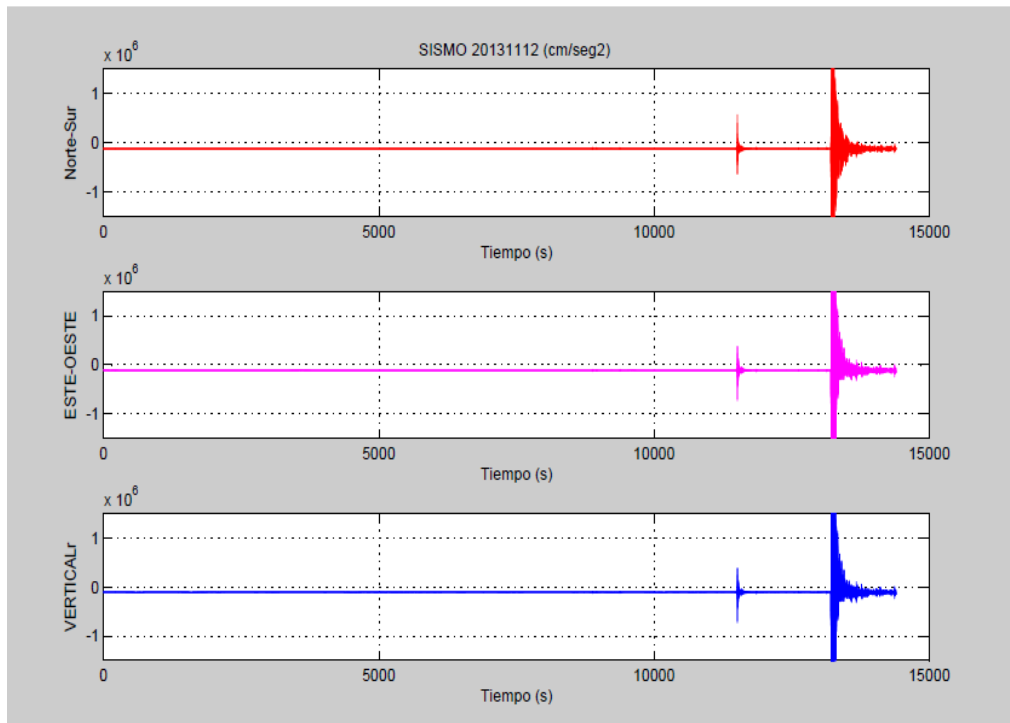


Figura 6.10 Registro de tiempo en la estación BAHB del sismo ocurrido el 12/11/2003.

A continuación, en la Figura 6.11 se muestran los cocientes de Nakamura para el sitio BAHB, midiendo ruido sísmico ambiental, siguiendo el mismo procedimiento, canales Norte-Sur y Este-Oeste contra el canal Vertical.

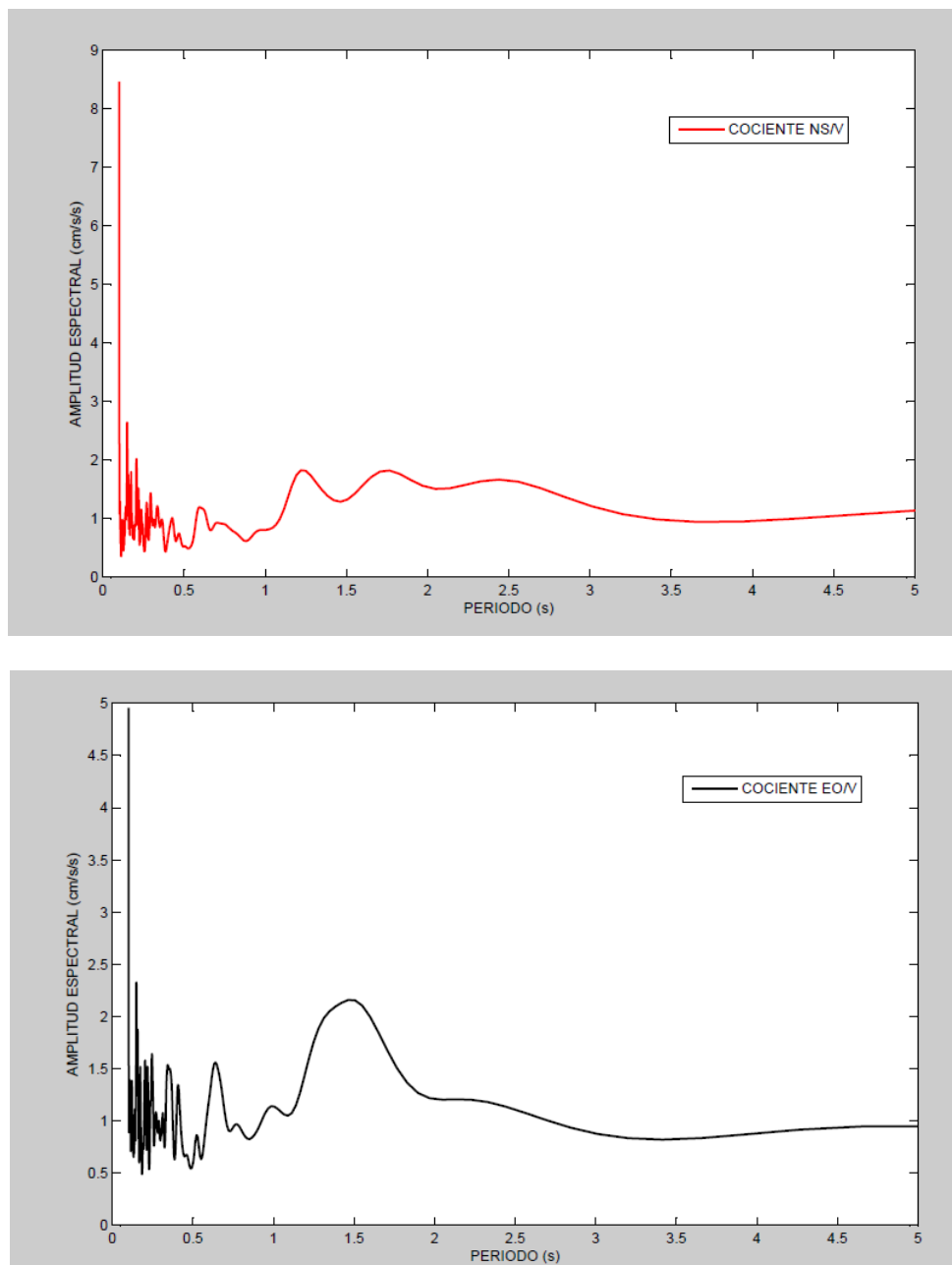


Figura 6.11 Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales, arriba Norte-Sur y abajo Este-Oeste, entre la vertical, obtenidos en el sitio BAHB a partir de microtremores.

En la siguiente figura, 6.12, se muestran simultáneamente los cocientes espectrales de varias mediciones de microtremores, así como resaltada con línea negra el promedio de las mismas. Se puede observar un PD aproximado a 1.5 segundos.

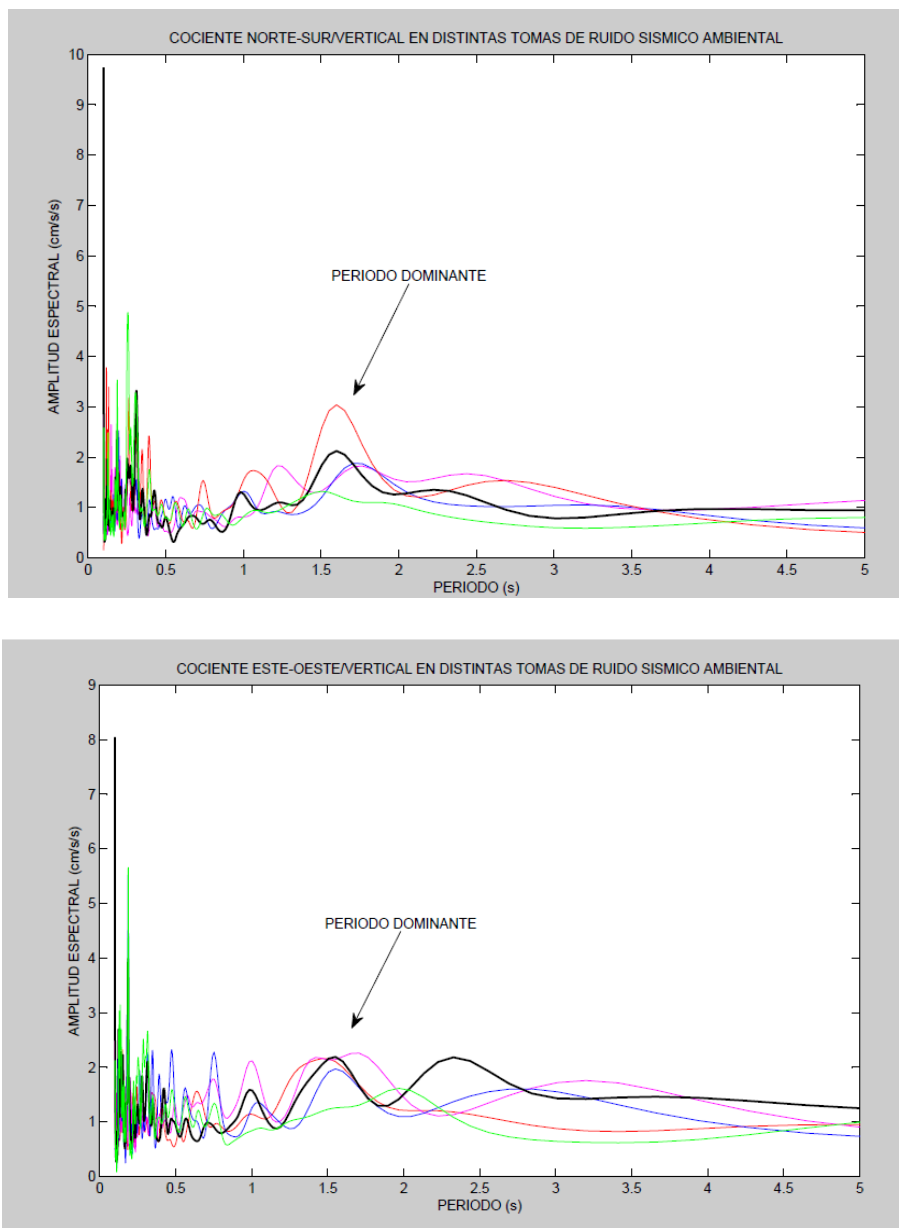
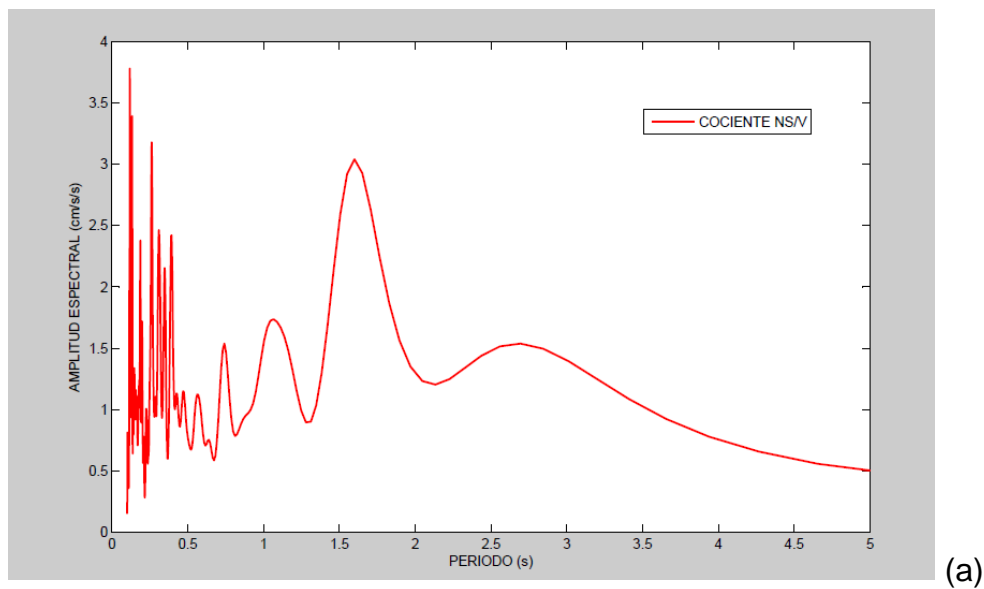


Figura 6.12 Gráficas simultaneas de Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales, arriba Norte-Sur y abajo Este-Oeste, entre la vertical, así como el promedio, obtenidos en el sitio BAHB a partir de microtremores.

Finalmente, se aplica nuevamente la técnica de Nakamura, realizando los cocientes en los espectros de las componentes horizontales entre el espectro de la componente vertical, pero ahora en las ventanas seleccionadas al momento de que ocurrieron sismos, tanto el precursor, como el sismo de magnitud más grande y algunas de sus réplicas.

Las gráficas obtenidas se muestran en la Figura 6.13, en donde se muestra notoriamente el pico dominante en el periodo, aproximado a los 1.5 segundos en ambos cocientes.

En la última grafica mostrada (Figura 6.14), se muestran simultáneamente los dos cocientes espectrales, horizontales contra vertical, de los dos sismos mostrados en la Figura 6.10, se puede observar un Periodo Dominante aproximado a los 1.7 segundos.



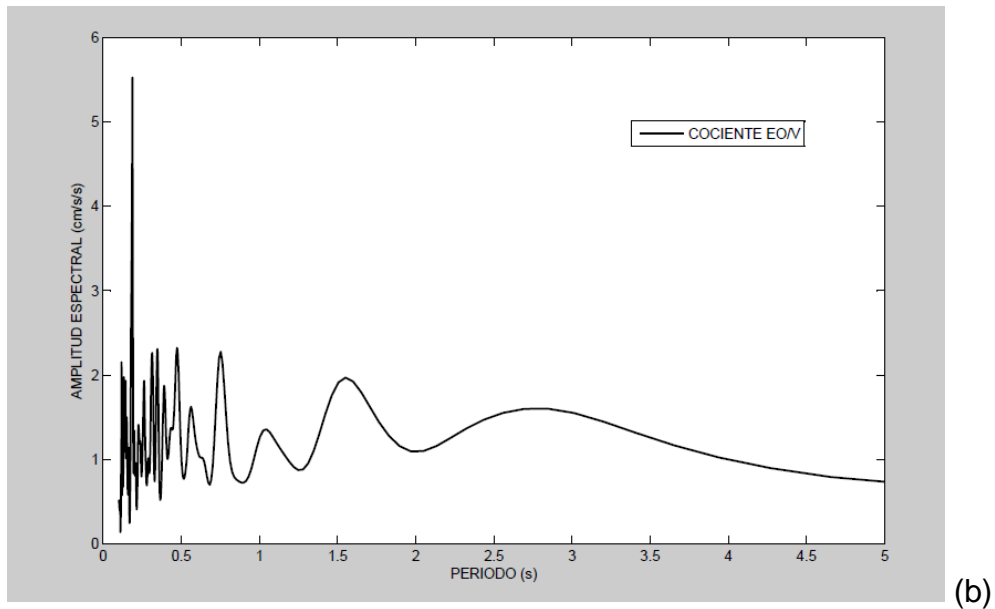


Figura 6.13 Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales, (a) Norte-Sur y (b) Este-Oeste, entre la vertical, obtenidos en el sitio BAHB a partir del sismo del 12/11/2003.

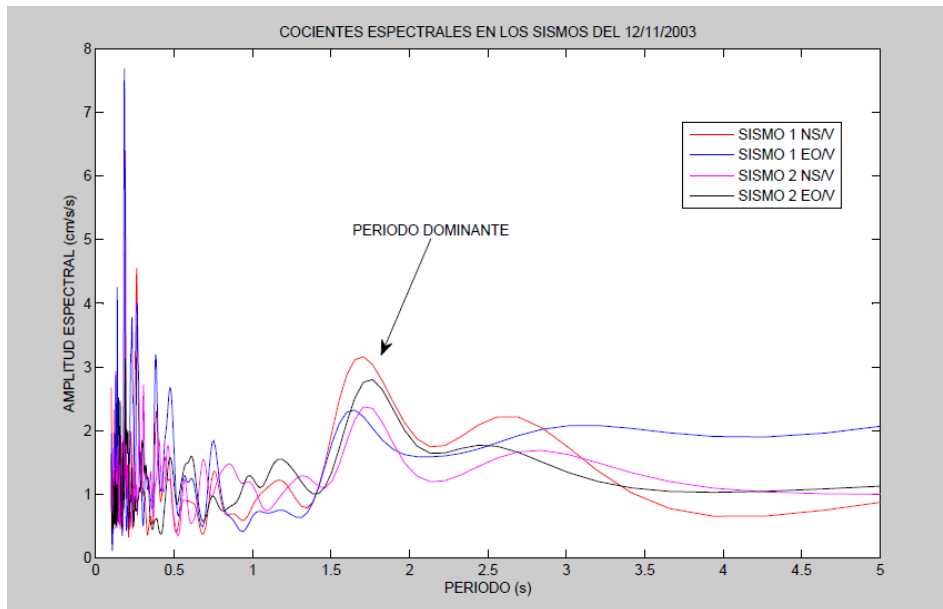


Figura 6.14 Cocientes espectrales de las dos componentes horizontales, Norte-Sur y Este-Oeste, entre la vertical, obtenidos en el sitio BAHB para los dos sismos del 12/11/2003.

## 7. RESULTADOS

---

### 7.1 MODELOS DE MICROTREMORES CON MAS

Como se esperaba, los cocientes espectrales obtenidos en el modelo matemático, muestran niveles de concordancia aproximados a los obtenidos con el levantamiento de ruido sísmico ambiental. Para poder ser más claros al momento de comparar los valores de Periodos Dominantes, los resultados de frecuencia se convertirán a periodos.

Se observó que se acercan más los valores de frecuencia en los suelos más duros, posiblemente por el amortiguamiento que existe en las vibraciones en ese tipo de suelo.

En el sitio de la toba riolítica, CX007, se presenta un pico de frecuencia dominante cercana a los 9 Hz, es decir 0.11 segundos, la cual queda dentro de los rangos que se señalan en la bibliografía de la tabla 5.1.

En el sitio de medición ubicado en el cauce del río con materiales sedimentarios, las series de tiempo registradas en ese punto tuvieron una afectación en la lectura, posiblemente a alguna fuente cercana no apreciada, sin embargo el sitio seleccionado, CB002, fue de todos los colectados el más limpio y seguro de trabajar.

Al momento de realizar la técnica de Nakamura de dicho sitio, se seleccionó el pico de frecuencia alrededor de los 2 Hz, o bien, 0.5 segundos, el cual se refleja claramente en el cociente realizado también, en modelo matemático, el cual muestra la misma frecuencia. El valor de 0.5 segundos puede indicar, que espesor

de la capa sedimentaria es pequeña, pues un valor de periodo pequeño, sin embargo mayor al obtenido en roca.

Es importante señalar que el valor de la frecuencia encontrada en este punto, también se encuentra dentro de los límites de valores de periodos presentados en la bibliografía de la tabla 5.2.

## **7.2 MODELOS DE COMPARACIÓN DEL PERIODO VIBRATORIO DEL SUELO EN ESTADO ESTÁTICO Y DINÁMICO**

Los sismos registrados en la ciudad de Hermosillo, Sonora se encuentran en una estación permanente sobre un afloramiento granítico sano, sitio HSIG. Esta estación únicamente registra eventos de movimientos fuertes, es decir, sismo, por lo que para obtener la información de ruido sísmico ambiental o microtemores, fue necesario tomar mediciones en ese mismo punto, en estado estático o quieto del suelo.

En los cocientes espectrales de Nakamura de los registros obtenidos con sismo, se presentan periodos de alrededor de los 0.6 segundos, siendo este valor adecuado para el tipo de suelo que se tiene en ese sitio, ya que como se mencionó anteriormente, los periodos bajos corresponden a materiales rocosos, bien consolidados. Sin embargo, se pueden observar otros picos en la gráfica, los cuales pueden ser descartados por el tipo de suelo. Dichas crestas pueden deberse a que no siempre las distintas fuentes de arriba, pueden eliminarse realizando el cociente de Nakamura (1989).

En las gráficas de los cocientes de Nakamura, obtenidas por microtemores, se observa más limpio el cociente EO/V presentando un PD aproximado a los 0.7 segundos, presentando también un pico marcado cercano a los 1.5 segundos, el cual se puede descartar debido al tipo de suelo en el que se realizó en este trabajo.

La gráfica NS/V presentó tres crestas, dos de ellas descartables, ya que son periodos cercanos a los 2 segundos, el cual es predominante de los suelos blandos, tales como arcillas. Por lo que se puede asumir que el valor dominante en dicha gráfica es el cercano a los 0.7 segundos.

De igual forma el estudio realizado en la estación BAHB en Baja California, la cual se encuentra asentada cerca de la costa, sobre material más blando, con presencia de arenas. En este sitio las mediciones de ruido sísmico ambiental se obtuvieron de la base de datos de la estación, ya que en el año 2003 se estuvo monitoreando de manera continua. Por lo cual, se tiene una gran base de datos, en estado de quietud, como en ocurrencia sísmica.

En las gráficas de los cocientes de Nakamura, obtenidas por microtemores, se observa un PD aproximado a los 1.5 segundos, el cual, es un valor razonable por la capa sedimentaria en la que se encuentra desplantada la estación.

De igual forma, al obtener los valores de Periodo Dominante a partir de los sismos registrados en la estación BABH, se encuentra cercano al 1.5 segundos de las mediciones con ruido ambiental, con un pequeño corrimiento hacia los 1.6-1.7

segundos, esto puede ser debido a que este tipo de suelo, sufre esta variación al momento de un movimiento fuerte.

## **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

El crear modelos matemáticos como representación del ruido sísmico ambiental es complejo y depende de muchas variables que intervienen, más aun cuando el resultado final es un cociente de la Transformada de Fourier, sin embargo al seguir mejorando este modelo, brindará cada vez resultados más cercanos a la realidad siendo de gran apoyo en la clasificación de suelos de manera teórica, la cual podría ser introducida en programas computacionales de cálculo de estructuras civiles, dejando a un lado las pruebas destructivas de la ingeniería geotécnica tradicional.

En la actualidad existen zonas en diversas partes del mundo que no cuentan con estudios de microzonación sísmica porque no sufren de sismicidad importante frecuente, sin embargo, esto no los exime probables riesgo en las edificaciones construidas en ellas, como pueden ser edificios, carreteras, presas, aeropuertos, centrales de abasto de energía eléctrica, agua potable, entre otros. En dichas zonas invertir costos en equipos de medición puede representar un gasto innecesario, pero no así para la obtención de parámetros físicos del suelo que son de gran utilidad para la ingeniería civil. Es por ello que resulta de interés la creación de modelos matemáticos que puedan ser utilizados para estos propósitos, que si en este trabajo la semejanza con los obtenidos de manera natural puede ser perfectible, pueden ser un gran inicio para la creación de mapas de microzonación en estas áreas dónde no se cuenta con recursos ni información.

De manera simultánea, en este trabajo se presenta una pequeña muestra, pero significativa de los rangos de valores de periodos dominantes en suelos blandos y rocosos o duros, que si bien, se pueden encontrar algunos datos en diferentes investigaciones alrededor del mundo, no se ha empezado a recopilar de manera global e iniciar una tabla de éste y otros parámetros físicos del suelo que sean de apoyo en los reglamentos de construcción en las ciudades y de aplicación directa para los profesionales de la ingeniería civil.

Los valores de periodos dominantes obtenidos mediante la comparación utilizando ruido sísmico ambiental y de algunos sismo en la región del Golfo de California, mostró que no existe un corrimiento significativo en el Periodo Dominante, (de 1.5 a 1.7 segundos) por lo que permite determinar que la realización de mapas de microzonación de periodos dominantes obtenidos con la Técnica de Cocientes Espectrales a partir de microtemores es de gran beneficio para ciudades en la región, ya que la presencia de sismos intensos es de baja probabilidad. Por lo que al comparar los resultados obtenidos de PD a partir de ruido ambiental y los obtenidos con un sismo sean prácticamente similares, nos genera una gran certidumbre de que tomar el valor de PD obtenido a partir de microtemores, será de gran ayuda al diseñar nuevas estructuras civiles, o bien, se trataría de alejar la frecuencia de vibración de la misma, de la obtenida en el suelo, para evitar amplificaciones considerables ante la presencia de un sismo de gran magnitud.

Así mismo, esta información del suelo, permite reestructurar las edificaciones ya existentes, incluso las que ya han sido dañadas por este tipo de fenómenos, sin

necesidad de llegar a su demolición, mejorando así, la optimización de los materiales de construcción que directamente repercute en el cuidado de nuestro planeta.

Otra aportación relevante pudiese ser el examinar de manera más detallada la variación del valor del PD a lo largo de una serie de tiempo de vibración ambiental en una estación, la cual se obtengan datos de sismos y sus réplicas, dichas observaciones podrían ser significativas para los estudios de predicción de sismos si es que se obtiene alguna diferencia en las vibraciones del suelo.

## 9. LITERATURA CITADA

---

Acosta, J., Álvarez S., Mendoza L. y Arellano G. (1994) "Microzonación del área de Tijuana, B. C., con base en la distribución de periodos dominantes del movimiento del suelo." CICESE. CTSIT9402.

Acosta, J.G. (1990) "Manual del paquete de Procesamiento Estándar de Acelerogramas." CICESE. Ensenada, México.

Akbari M., Ghafoori M., Moghaddas N. H., Lashkaripour G. R. (2011) "Seismic microzonation of Mashhad city, northeast Iran." *Annals of Geophysics*. 54(4), 424-434.

Aki, K. (1998) "Local site effects on strong ground motion. Earthquake engineering and soil dynamics II." *Recent advances in ground-motion evaluation*. Von Thun Ed. ASCE Geotechnical Special Publication. 20, 103-155.

Bonnefoy-Claudet, S., Baize S., Bonilla L.F., Berge C., Pasten, C., Campos, J., Volant, P., Verdugo, R. (2009) "Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements." *Geophysical Journal International*. 176, 925-937

Chávez-García, F. J. y Cuenca J. (1998) "Site effects and microzonation in Acapulco." *Earthquake Spectra*. 14(1): 75-93.

Cooley, J. W. y Tukey J. W. (1965) "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier Series." *Mathematics of computation*. 19 (90): 297.

Coutel, F. y Mora P (1998) "Simulation-based comparison of four site-response estimation techniques." *Bulletin of the Seismological Society of America*. 88(1), 30-42.

Dravinski, M., Ding G., y Wen K.-L. (1996) "Analysis of spectral ratios for estimating ground motion in deep basins." *Bulletin of the Seismological Society of America*. 86(3): 646-654.

Escobar G., González, L., Puerto G., Losada L. y Díaz F.J. (2010) "Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño Sismo resistente de Edificaciones." *Informe Final Fondo De Prevención Y Atención De Emergencia*. 1, 1-168.

Field, E.H. and Jacob, K.H. (1995) "A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent." *Bulletin of the Seismological Society of America*. 85(4), 1127-1143.

French, A.P. (2006) "Vibraciones y Ondas." Editorial Reverté, S.A.

Gallipoli, M.R., Mucciarelli, M., Castro, R. R., Monachesi, G., Contri, P. (2004) "Structure, soil-structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors." *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*. 24, 487-495.

Gutiérrez, C., S. K. Singh (1992) "A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: comparison of results from strong motion and microtremor data." Bulletin of the Seismological Society of America 82, 642-659.

Hardy H.R. (2003) "Acoustic Emission/Microseismic Activity: Volumen 1. Principles, Techniques, and Geotechnical Applications." Pennsylvania, USA. A.A. Balkema Publishers.

Ibarra, G. (2004) "Periodos Dominantes del Suelo en los Principales Centros Urbanos de Baja California." Tesis de Maestría CICESE. México.

Kanai, K. (1957) "The requisite conditions for predominant vibration of ground." Earthquake Research Institute Tokio University. 31, 457.

Kanai, K. and Tanaka, T. (1961) "On microtremors." Bulletin of the Earthquake Research Institute.

Kitagawa, Y. Okawa I. y Kashima T. (1992) "Observation and analyses of dense strong ground motions at sites with different geological conditions in Sendai. Proc. of the Int. Symp. on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion." Association of Earthquake Disaster Prevention. 1, 311-316.

Kitagawa, Y. Okawa I. y Kashima T. (1992) "Observation and analyses of dense strong ground motions at sites with different geological conditions in Sendai." Association of Earthquake Disaster Prevention. Odawara, Japan. 1: 311-316.

Konno, K. y Ohmachi T. (1998) "Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremors." Bulletin of the Seismological Society of America. 88(1): 228-241.

Larose, E., Campillo, M., Khan, A., Nakamura Y. (2005) "Lunar Subsurface Investigated from Correlation of Seismic Noise." Geophysical Research Letters. 32:16, 1-5.

Lermo, J. and Chávez-García, F. J. (1994) "Are microtremors useful in site response valuation?." Bulletin of the Seismological Society of America. 84(5), 1350-1364.

Lermo, J. y Becerra A. (1991) "Actualización del mapa de isoperiodos para la ciudad de México desde mediciones de microtremores y datos de movimientos fuertes." Boletín 1, CIS. CIS 48-50.

Lermo, J., Rodríguez M. y Singh S. K. (1988) "The Mexico Earthquake of September 19, 1985 Natural Periodo of sites in the Valley of Mexico from Microtremor measurements and Strong motion data." Earthquake Spectra. 4 (4): 805-814.

Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo (2008) "Instituto de Investigaciones Eléctricas." CFE

Mendoza, L., Acosta J., Huerta C., Reyes A. Y Otero J. (1991) "Mapa de Períodos Dominantes de la Vibración Ambiental de los Suelos Blandos del Valle de México." Geofísica Internacional. 32, 1.

Nakamura, Y. (2000) "Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications." Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand. Paper 2656.

Nakamura, Y. (1989) "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface." Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. 1, 25-33.

Obert, L. and Duvall, W.I. () "Use of Sub audible Noises for the Prediction of Rock Bursts, Part II." RI 3654, USBM.

Ojeda A., Martínez S., Bermúdez M. L. y Pachón S. (2002) "Implicaciones de la Red de Acelerógrafos de Bogotá en el estudio de Microzonificación sísmica." Instituto Geofísico Universidad Javeriana. Memorias del Primer Congreso Colombiano de Sismología. 1, 25-33.

Panou, A. A., Theodulidis, N. P., Hatzidimitriou, P. M., Savvaidis, A. S., and Papazachos, C. B. (2005) "Reliability of ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in urban environments: the case of Thessaloniki City (Northern Greece)." Pure and Applied Geophysics. 162(5), 891-912.

Seekins, L. C., Wennerberg L., Margheritti L., y Liu H. P (1996) "Site amplification at five locations in San Francisco, California: A comparison of S waves, codas and microtremors." Bulletin of the Seismological Society of America. 86(3). 627-635.

Steidl, J. H., Tumarkin A. G., y Archuleta R. J. (1996) "What is a reference site?." Bulletin of the Seismological Society of America. 86(6), 1733-1748.

Volant, Ph., Orbovic, N., and Dunand, F. (2002) "Seismic evaluation of existing nuclear facility using ambient vibration test to characterize dynamic behavior of the structure and microtremor measurements to characterize the soil: a case study." Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 22(9), 1159-1167.

Zhao J.X., Irikura K., Zhang J., Fukushima y., Somerville P.G., Asano A., Ohno Y., Oouchi T., Takahashi T., and Ogawa H (2006) "An Empirical Site-Classification Method for Strong-Motion Stations in Japan Using H/V Response Spectral Ratio." Bulletin of the Seismological Society of America. 96 (3), 914-925.

## **ANEXO A**

---

### **PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICION DE VIBRACION AMBIENTAL EN CAMPO.**

La recolección de datos de ruido sísmico ambiental debe tener ciertos cuidados y estandarización, para que los distintos sitios medidos sean confiables y no presenten variables significativas, unos con respecto a otros, que no sean dados por las características del tipo de suelo.

Se estableció un procedimiento, el cual se aplicó en cada uno de los puntos de medición, tal como se detalla a continuación:

1. Ubicar el sitio de medición, que se encuentre limpio, libre de basura, grava suelta, pasto, concreto y pavimento. En caso de tener basura y ser el único lugar probable para la realización de la medición, utilizar la pala y la escoba para limpiar y nivelar el área.
2. Ubicar con el GPS las coordenadas del sitio.
3. Colocar el aparato en orientación hacia el norte magnético apoyado con la brújula.
4. Nivelar con ayuda de un nivel de gota el sismómetro, para ello es necesario manipular los tornillos autonivelantes que tiene el aparato en su parte inferior.
5. Conectar la computadora al ETNA, utilizando para el cable R232.

6. Abrir el programa QuickTalk de Kinematics para establecer comunicación con el ETNA y poder darle los parámetros adecuados para su utilización.
7. Tomar alrededor de 5 mediciones de 3 minutos aproximadamente, esto nos permitirá tener mayor oportunidad de ventanas limpias con las que se pueda trabajar en el procesado, así como tener un mayor número de ellas para su promediado, minimizando posibles errores.
8. En la libreta apuntar todo lo que parezca extraño o inusual, como el paso de algún vehículo, personas transitando cerca del área, lluvia, el encendido de alguna maquinaria cerca, etc.
9. Desconectar el equipo, retirar todo lo que se haya puesto en el lugar y continuar con el siguiente lugar de medición.

## **ANEXO B**

---

### **EQUIPO UTILIZADO PARA LA MEDICION DE VIBRACION AMBIENTAL EN CAMPO.**

El equipo utilizado para la realización de las mediciones elaboradas en este trabajo fue:

1. Acelerómetro ETNA marca Kinematics
2. Una computadora portátil previamente cargada con los programas QuikTalk, QuikLook de Kinematics.
3. Brújula de mano.
4. GPS E-trex portátil.
5. Nivel de gota de mano.
6. Conexión de comunicación entre la computadora y el instrumento (Cable R232)
7. Libreta de apuntes y lápiz.
8. Cámara fotográfica para documentar los registros.
9. Escoba, pala y herramienta necesaria por si se necesita nivelar y limpiar sitio de medición.
10. Batería de auto o inversor de corriente, solo en caso de presentar problemas con la carga del acelerómetro.

## ANEXO C

---

### MEDICIONES DE PERIODOS DOMINANTES EN LA CIUDAD DE HERMOSILLO, MÉXICO.

PUNTO	COORDENADAS X Norte	COORDENADAS Y Este	PERIODO (S)
CN	3216555	505175	0.6
CO	3217370	506302	0.7
CP	3227357	498455	0.3
DA	3225014	504575	0.6
DB	3224261	504668	0.6
DC	3224552	503444	0.3
DD	3223949	504357	0.8
DE	3225190	497071	1.7
DF	3224358	497025	0.3
DG	3225002	502253	1.3
DH	3244557	501807	0.6
DI	3221289	503864	0.5
DJ	3221689	504756	0.5
DK	3221012	502648	0.5
DL	3224459	500824	0.8
DM	3221376	494985	1.4
DN	3224305	502755	0.4
DO	3221658	504107	0.68
DP	3222766	501729	0.63
DR	3220037	500348	1.4
DS	3223966	501350	0.5
DT	3224335	500405	0.5
DU	3217621	497714	1.5
DV	3219992	497415	1
EA	3223658	498703	0.4
EB	3222212	497784	0.5
EC	3220673	497783	1
ED	3221581	499015	1
EE	3219534	498621	1.25
EF	3220213	500499	1.1
EG	3223359	501488	1.1

EH	3220036	501190	1
<b>PUNTO</b>	<b>COORDENADAS X Norte</b>	<b>COORDENADAS Y Este</b>	<b>PERIODO (S)</b>
EI	3222920	504614	0.3
EJ	3220127	505384	0.6
EK	3218768	499878	0.7
EL	3219754	498470	1.2
EM	3216728	499265	1.7
EN	3219196	503000	1
EO	3219850	501865	1.6
EP	3216977	503334	1
EQ	3218041	500914	1.3
ER	3218212	496053	0.43
ES	3219106	508406	0.5
ET	3215722	500702	1.1
EU	3214149	497733	1.2
EV	3219227	478459	1
EX	3215667	503489	1.4
FA	3214203	506198	0.7
FB	3216765	502784	1
FC	3215225	504464	0.8
FD	3211472	503705	0.48
FE	3211583	503146	1
FF	3209239	502156	0.9
FG	3209596	502961	0.9
FH	3208302	503706	0.5
FI	3211406	506157	1.2
FJ	3208860	506172	1.3
FK	3207790	507643	0.6
FO	3209159	507458	1.3
FP	3215562	507515	0.7
FR	3218444	507781	0.8
FT	3219077	507327	0.4
FV	3218524	506109	0.5
FW	3215764	502381	0.7
FX	3217283	501736	0.9
GA	3215360	505385	0.4
GB	3215376	505182	0.7
GC	3215477	504778	0.7

<b>GD</b>	3222565	502230	1.3
<b>GF</b>	3219062	504129	1
<b>PUNTO</b>	<b>COORDENADAS X Norte</b>	<b>COORDENADAS Y Este</b>	<b>PERIODO (S)</b>
<b>GQ</b>	3208397	402597	0.5

## **ANEXO D**

---

### **PROGRAMA CoETNA V 1.0**

Número de Registro: 03-201-071612190100-01

Registro Público del Derecho de Autor

Autor: Gema Karina Ibarra Torúa

El programa CoETNA V 1.0, es una rutina desarrollada en MATLAB para el apoyo del procesado de datos sísmicos para datos recolectados con acelerógrafo ETNA de Kinematics, aportando datos directos de efecto de sitio en mediciones de suelo con ruido sísmico ambiental.

El programa lee los archivos elaborados en las mediciones del equipo ETNA separados en tres canales, para inicialmente convertir de unidades digitales (cuentas) a unidades físicas (cm/s, cm/s<sup>2</sup>) del movimiento del terreno, el programa está diseñado para mediciones de ruido sísmico ambiental, por lo que su configuración es para 1g (g aceleración de la gravedad), graficando las tres señales del sensor en sus componentes Norte-Sur, Este-Oeste y vertical (Figura B.1).

En esta etapa el programa trabaja a una razón de 100 muestras por minuto en la medición, para calcular la Frecuencia de Nyquist y que la señal no genere errores, internamente el programa, puede ser modificado en caso de que la razón de muestreo sea diferente.

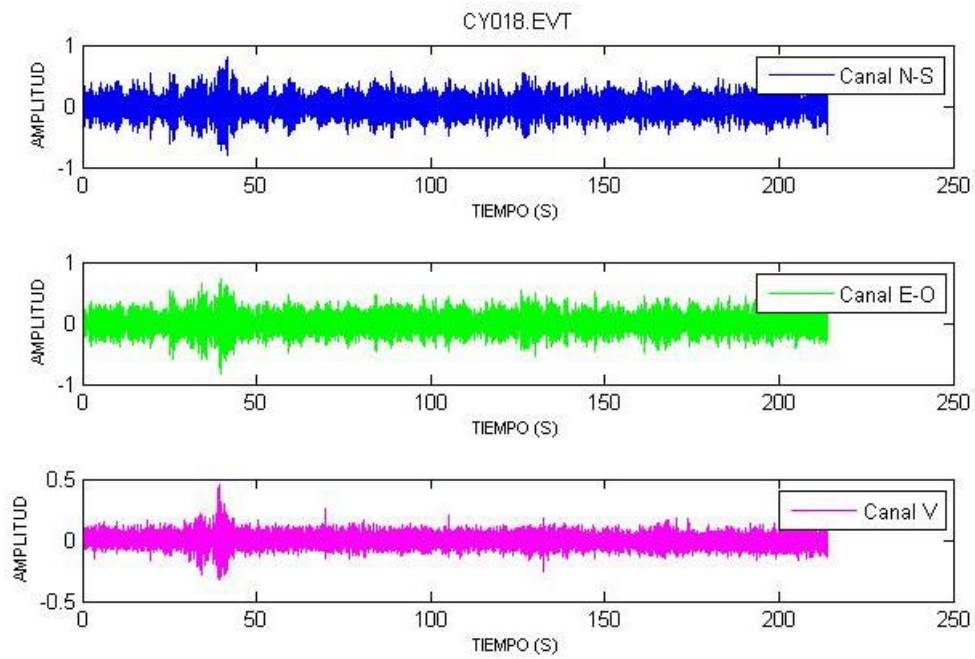


Figura B.1. Señales de tiempo graficadas en el programa CoETNA

Seguidamente el programa CoETNA realiza la Transformada Rápida de Fourier a las tres señales de tiempo, para traspasarlas al dominio de la frecuencia generando las gráficas (Figura B.2).

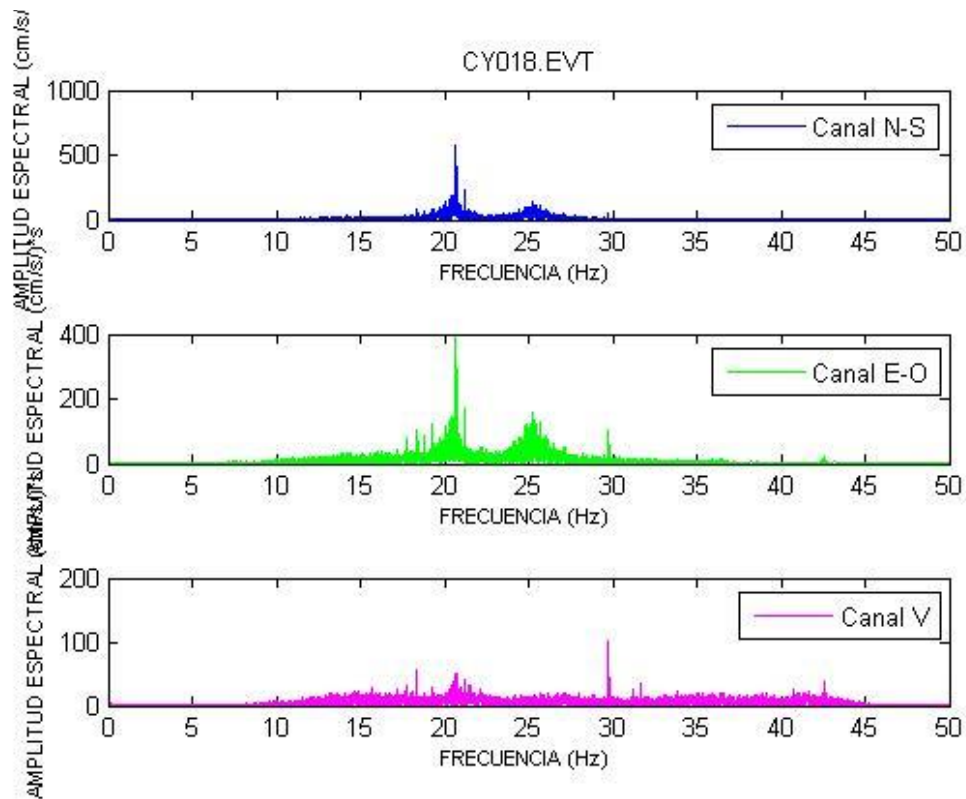


Figura B.2. Espectros de Fourier de las señales de tiempo.

Finalmente se efectúa el cálculo para aislar el efecto de sitio, efectuando el cociente de los Espectro de Fourier de las componentes horizontales entre la vertical, basado en la Técnica de Cocientes Espectrales, para finalmente obtener la gráfica (Figura B.3) de esta relación y con los resultados de esta gráfica se podrán observar por expertos en el área, diferentes datos de frecuencia de vibración del suelo, para estudios especializados en efecto de sitio de suelos.

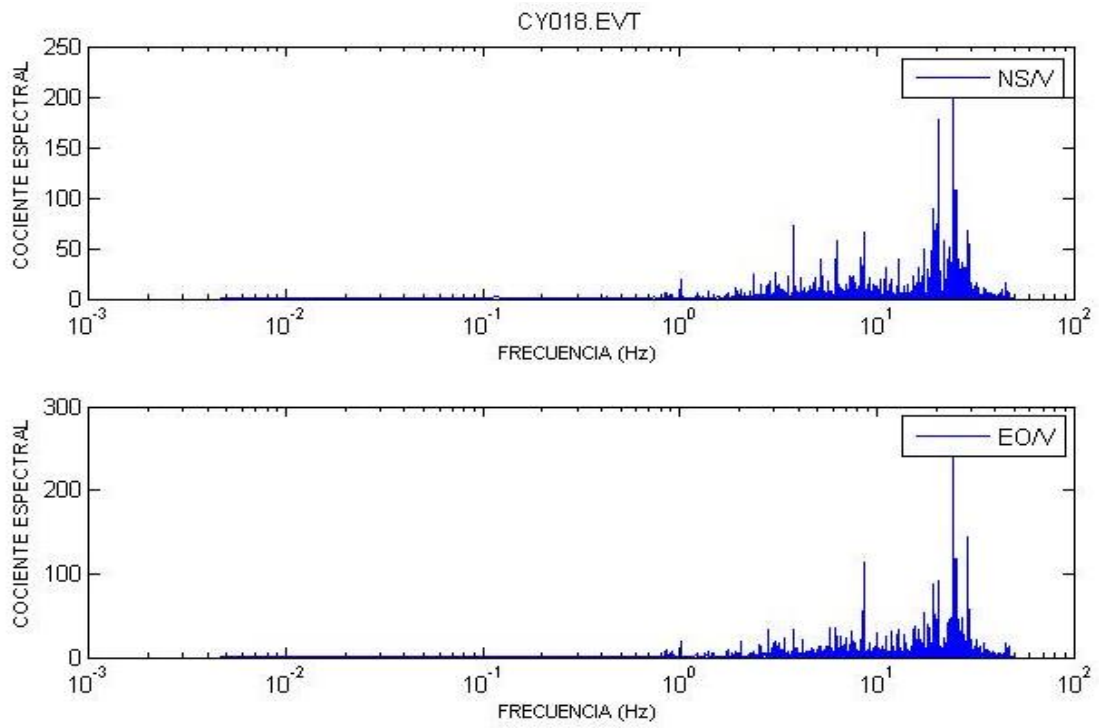


Figura B.3. Gráficas del efecto de sitio, cocientes de Fourier.