



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**CASO DE APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE MICROZONIFICACIÓN
SÍSMICA**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. YOALI MARGARITA CANO VELARDE

DIRECTOR DE TESINA: **DR. HECTOR RAÚL AGUILAR BECERRIL**

CIUDAD DE MÉXICO

NOVIEMBRE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

1. Introducción	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Efecto de sitio.....	5
2.2. Registro de microtemores	7
2.3. Función de transferencia.....	7
2.3.1. Cocientes Espectrales H/V.....	8
2.3.2. Método de Nakamura	9
3. Caso de aplicación.....	14
3.1. Antecedentes	14
3.2. Perfiles estratigráficos.....	15
3.3. Monitoreo de Vibración Ambiental	18
3.4. Procesamiento de las señales	20
3.5. Mapa de isoperiodos.....	27
4. Resultados	28
Conclusiones	36

Dedicatoria

Al Programa Único de Especializaciones de Ingeniería (PUEI) y al Departamento de Geotecnia de la División de Ingeniería Civil y Geomática.

Al Dr. Raúl Aguilar por su gentileza y apoyo en la realización de este trabajo. A mis sinodales por su asesoría en este trabajo.

A mi madre que siempre ha vivido mis procesos, todo el tiempo me ha escuchado y sobretodo me ha dado su amor y su fuerza. A mis abuelos que siempre me han brindado su cariño y siempre me han cuidado.

A mis compañeros Heriberto, Nidia y Mario por su apoyo y por haberme alegrado los días durante la especialidad.

1. Introducción

México es un país que se caracteriza por su tectónica activa, que se genera principalmente por el proceso de subducción entre las placas de Cocos y Rivera bajo la Norteamericana.

Planificar el diseño de la infraestructura, de acuerdo a las condiciones del suelo en el que se asentará, es conveniente para prevenir que las construcciones colapsen al ocurrir un terremoto. Los peligros asociados con los sismos se conocen como riesgos sísmicos, por lo que es importante identificarlos.

La microzonificación sísmica es una herramienta que ayuda a evaluar los riesgos sísmicos y se define como la subdivisión de una región en áreas individuales, con un rango determinado de periodos que caracterizan dichas zonas. El impacto en la superficie y el comportamiento de las ondas sísmicas en un sitio, dependen de la fuente y las condiciones del medio en el que se propagan, es decir, en los materiales compuestos de suelo y roca.

En este trabajo se hace la microzonificación sísmica de un sitio, a partir de mediciones de vibración ambiental (microtremores) a las que se les aplicó la técnica de cocientes espectrales H/V desarrollada originalmente por Nakamura, para la estimación del periodo fundamental de vibración del suelo. El procesamiento de los datos se realizó con el software Geopsy (Wathelet *et al.*, 2008) y la distribución espacial del resultado de cocientes espectrales H/V se plasma en un mapa de curvas de isoperiodos, en el que se considera la información de sondeos geotécnicos. La aplicación de esta técnica para la estimación del periodo fundamental de vibración del suelo en varias zonas de México, ha dado buenos resultados. Un ejemplo lo presentan Jaramillo *et al.*, 2012 en el trabajo: “Aplicación del método de cocientes espectrales para la reconfiguración detallada del mapa de isoperiodos en la cuenca del valle de México”. Algunos otros ejemplos han sido, la microzonificación de los estados de Tlaxcala (Bernal, 2006) y Chiapas (Ordoñez, 2013).

- **Objetivo:** Realizar la microzonificación sísmica de un sitio utilizando la técnica de cocientes espectrales H/V, para estimar su respuesta sísmica verificando los resultados con perfiles estratigráficos elaborados a partir de sondeos geotécnicos.
- **Alcance:** Elaboración de mapa de curvas de isoperiodos.

2. Marco Teórico

Para obtener el periodo fundamental de la zona de estudio, se utilizó el método de cocientes espectrales H/V, también conocida como HVNR (*Horizontal to Vertical Noise Ratio*). Ésta es una técnica no destructiva que emplea como fuente el ruido ambiental.

En este capítulo se explicarán de forma breve los conceptos necesarios para la comprensión del método utilizado.

2.1. Efecto de sitio

Las ondas sísmicas se propagan por diferentes medios como depósitos de suelo y macizos rocosos, generando una combinación de movimientos en la superficie, conformado por ondas P, ondas S, refracciones de las ondas anteriores y ondas superficiales. Estas ondas se amplifican o de-amplifican, al pasar de un medio a otro, dependiendo principalmente del periodo natural de vibración, el contraste de densidad y velocidad de propagación de las ondas sísmicas de cada medio.

El efecto de sitio es fundamental para la determinación de la intensidad del movimiento sísmico en un punto dado, dicho movimiento depende de los parámetros asociados a la fuente sísmica y a la atenuación de la energía sísmica conforme se propaga desde la fuente hasta el sitio analizado (Chávez-García, 2014). Por lo tanto, cuando el comportamiento de las ondas sísmicas se ve afectado al pasar del basamento al suelo blando, se le conoce como efecto de sitio, ya que para conservar el flujo de energía, una onda sísmica que viaja de un

medio con velocidad de propagación alta a otro con velocidad más baja, tendrá que aumentar su amplitud (Chávez-García, 2014), además, las ondas sísmicas quedan atrapadas dentro del depósito de suelo provocando la amplificación del movimiento en el periodo natural del mismo.

El subsuelo de un sitio se representa, para efectos de este trabajo, mediante un modelo idealizado (figura 1) caracterizado por una capa de suelo blando que descansa sobre un basamento o suelo firme, y que se define con los parámetros: velocidades de propagación de ondas S (β_s), densidad (ρ_s), amortiguamiento (ζ_s) y el espesor del material (h_s). El basamento queda definido por los parámetros: β_B , ρ_B y ζ_B . Cabe señalar que la velocidad de onda de corte de la capa de suelo blando es menor que la del semiespacio (basamento o suelo firme).

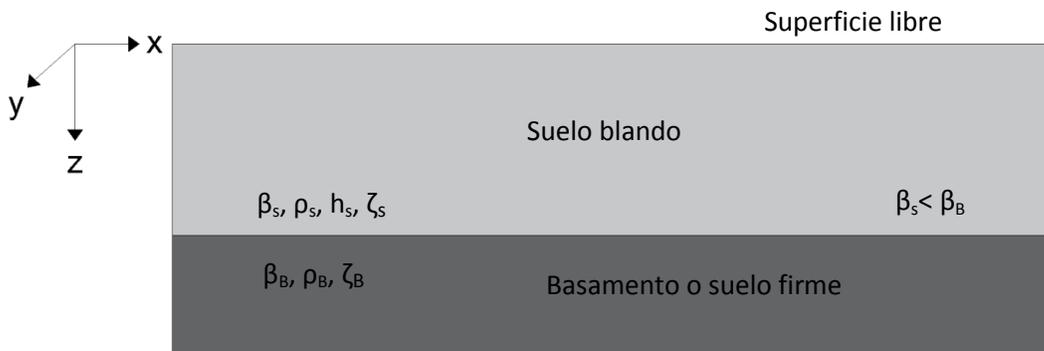


Figura 1. Modelo que representa una capa de suelo sobre un basamento o suelo firme.

Una de las teorías más aceptadas es la de Haskell (1962), quien fundamenta en la teoría unidimensional de propagación de ondas en medios estratificados, las siguientes suposiciones:

- El comportamiento del suelo es lineal para cualquier nivel de excitación.
- Los estratos del suelo son horizontales y se extienden lateralmente hasta el infinito, por lo que no se incluyen efectos de irregularidad lateral. Los estratos descansan sobre un semiespacio homogéneo.

Uno de los parámetros más importantes para la determinación de la respuesta sísmica característica del sitio es el periodo fundamental de vibración del suelo, pues dependiendo de éste, la vibración puede atenuarse o amplificarse (Zeng, 1996). Cabe señalar, que el periodo fundamental del suelo preferentemente no debe coincidir con el periodo de vibración de las edificaciones, para que no ocurra el fenómeno de resonancia y los edificios lleguen a colapsar.

2.2. Registro de microtemores

El análisis de microtemores comenzó en Japón a finales de los años cincuenta, Kanai y Tanaka (1961) observaron que se obtienen periodos dominantes similares utilizando métodos que analizan movimientos fuertes que con los microtemores, éstos últimos también son conocidos como ruido sísmico o ruido ambiental.

Los microtemores son vibraciones producidas por una multitud de fuentes sísmicas relacionadas con actividades antropogénicas como: tráfico y maquinaria industrial de larga duración, en los que la estabilidad es la ventaja sobre los microsismos (Chávez-García, 2014; Moreno y Alfaro, 2000). Éstos están compuestos principalmente por ondas superficiales Rayleigh y ondas de cuerpo S (Aki, 1957; Akamatsu y Nogoshi, 1961; Igarashi, 1971). El rango de periodos para medición de microtemores originados por actividad humana, es menor a 1 ó 2 segundos. Sin embargo, en la Ciudad de México se han registrado periodos mayores a 5 segundos.

Existe ruido sísmico producido por fuentes naturales (microsismos) como: el oleaje del océano, la acción del viento y variaciones de temperatura, que están relacionadas con periodos relativamente largos (>1 s).

2.3. Función de transferencia

La función de transferencia del subsuelo es el resultado de la respuesta de un sistema frente a una excitación exterior, donde la entrada, corresponde al movimiento de las ondas en la base rígida (basamento o suelo firme) y el depósito de suelo blando corresponde a un medio

entre las ondas que arriban a través de la interface entre suelo y basamento y las ondas que llegan a la superficie.

La función de transferencia permite determinar las características dinámicas de la superficie del suelo, en función de las características dinámicas del basamento, que al calcularla se obtiene el periodo fundamental y el factor de amplificación del suelo.

2.3.1. Cocientes Espectrales H/V

La técnica de cocientes espectrales H/V la estudiaron por primera vez Nogoshi e Igarashi (1971) en una estación, donde demostraron que el microtremor estaba compuesto principalmente por la elipticidad de la onda Rayleigh, dando como resultado, que el máximo del espectro de los cocientes H/V puede explicarse como el modo fundamental de las ondas Rayleigh. Dadas estas hipótesis, varios autores argumentan:

- El cociente espectral H/V está relacionado con la elipticidad de las ondas Rayleigh, debido a que predomina en la componente vertical.
- Esta elipticidad depende de la frecuencia y presenta un pico alrededor de la frecuencia fundamental de los sitios que exhiben un alto contraste de impedancia entre los materiales superficiales de suelo y el basamento de éste.

En 1989, Nakamura publicó el desarrollo de la técnica de cocientes espectrales H/V, que también nombró QTS (por sus siglas en inglés *Espectros de cuasi transferencia*). En dicho artículo muestra que el cociente espectral H/V está relacionado con las ondas SH y de cuerpo (Nakamura, 2000). El desarrollo de su teoría fue a partir de los resultados de los experimentos que realizó en diferentes sitios de Japón.

Otra interpretación desarrollada por Sánchez-Sesma *et al.* (2011), asume que el campo de ondas de ruido sísmico ambiental contiene todo tipo de ondas de cuerpo (P y S) y superficiales (Rayleigh y Love); esta teoría parte del análisis de campos difusos, pues su energía es equiparticionada con respecto a la posición del receptor, es decir, que las

múltiples difracciones generan que el ruido tenga una misma contribución independientemente de su fuente.

A continuación, se dará una breve explicación sobre la técnica de Nakamura debido a que es una de las técnicas más utilizadas para el análisis de ruido sísmico ambiental.

2.3.2. Método de Nakamura

Nakamura (1989) propuso una técnica en donde afirmaba que el cociente H/V es una estimación de la función de transferencia del sitio. Es popularmente empleada para el análisis de microtremores por su bajo costo y simplicidad en la adquisición de datos. El método de cocientes espectrales H/V es pasivo y no invasivo, que usa como fuente el ruido sísmico para obtener la frecuencia fundamental de resonancia del sitio, a partir de la relación de los espectros de Fourier de las componentes horizontales (N-S y E-W) y vertical del registro de microtremores medido en la superficie. Esta técnica asume que la velocidad de onda de corte de la capa superficial es menor que la del basamento.

Nakamura (2000) afirma que el efecto de las ondas superficiales puede ser eliminado y que el cociente H/V está en relación directa con las funciones de transferencia de las ondas de corte. También, explica que la componente horizontal es amplificada por la multi-reflexión de las ondas de corte (ondas S) y la componente vertical lo es mediante la multi-reflexión de las ondas longitudinales (ondas P).

La técnica separa los microtremores en las ondas de cuerpo y las ondas superficiales, dentro de la cual se asume que:

-Los microtremores consisten en ondas Rayleigh y SH, propagándose en la cima de un semiespacio. El efecto de las ondas Rayleigh aparece en la componente vertical, así el grado de su efecto puede ser conocido determinando el cociente de la componente vertical entre la superficie y el estrato que la subyace. Las ondas SH ocurren en la componente horizontal y debido a la interacción entre sí mismas, generan la onda Love.

-El movimiento es totalmente debido a fuentes locales y todas las fuentes profundas son despreciadas.

A diferencia de Nogoshi e Igarashi (1971), Bard (1999) y otros; Nakamura (2008) explica que el pico máximo de H/V puede explicarse con las ondas SH, pues asevera que el pico de la componente horizontal no es causado por las ondas de Rayleigh.

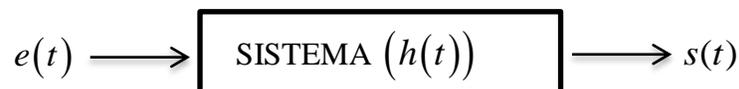
El contraste de impedancias (IC) de los materiales en la zona de estudio se representa mediante la siguiente expresión:

$$IC = \frac{\rho_B \beta_B}{\rho_S \beta_S} \quad (1)$$

Donde ρ_s representa la densidad del material en el suelo y ρ_B la del basamento, por otra parte, β_s y β_B representan las velocidades de onda de corte en el suelo y en el basamento, respectivamente.

El método de Nakamura muestra las características de amplificación del suelo en función de la frecuencia tomando información de las mediciones de ruido sísmico. El ruido sísmico es una señal continua, producida por varias fuentes diferentes, las cuales no se relacionan entre sí. Dependiendo de la geología local, se dará una amplificación por efecto de sitio y las frecuencias a las cuales esta amplificación existe, se denomina frecuencias naturales. La frecuencia que genera la máxima amplificación es conocida como frecuencia fundamental.

Como ya se ha mencionado, el método se explica mediante una *función de transferencia*, que representa la relación de la entrada $e(t)$ y la salida $s(t)$ de la respuesta de un sistema, es decir:



Por lo tanto:

$$s(t) = h(t) \times e(t) \quad (2)$$

así, la función de transferencia será:

$$h(t) = \frac{s(t)}{e(t)} \quad (3)$$

La función de transferencia para un sitio está dada por S_T :

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (4)$$

S_{HS} es el Espectro de Fourier horizontal de una estación superficial y S_{HB} es el Espectro de Fourier horizontal del basamento. Dicha relación elimina el efecto de las fuentes horizontales lejanas.

El efecto de las ondas Rayleigh (E_S), se incluye en el espectro de las ondas verticales superficiales (S_{VS}) y no en la base del movimiento (S_{VB}). Asumiendo que la componente vertical no es amplificada por las capas superficiales, la cantidad E_S representa el efecto de la onda superficial en esta componente y se define como:

$$E_S(w) = \frac{S_{VS}(w)}{S_{VB}(w)} \quad (5)$$

Al no haber ondas Rayleigh, el valor que toma $E_S = 1$. Al incrementarse el valor de dichas ondas el valor será mayor que 1.

Removiendo el efecto de la onda Rayleigh, la relación S_T / E_S es la función de transferencia que se muestra en la siguiente expresión:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} = \frac{R_S}{R_B} \quad (6)$$

donde:

$$R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \text{ y } R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}} \quad (7)$$

R_S y R_B se calculan al dividir el espectro horizontal por el espectro vertical de la superficie y del basamento, respectivamente. Nakamura demostró experimentalmente, al analizar registros directos de sísmica y de microtemores en roca o en la base del sustrato de suelo, que:

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}} \approx 1 \quad (8)$$

Por lo tanto, al sustituir la ecuación (8) en la (6) queda que:

$$S_{TT}(w) = \frac{S_{HS}(w)}{S_{VS}(w)} \quad (9)$$

Nakamura determinó que el cociente espectral entre la componente horizontal y vertical (H/V) del movimiento de las capas superficiales en un sitio se puede utilizar para estimar los efectos de sitio, siendo una técnica efectiva para identificar la frecuencia fundamental de una capa de suelo en un sitio dado y el factor de amplificación de sedimentos. Sin embargo, esta explicación fue criticada porque las justificaciones teóricas no fueron tan convincentes, por esta razón el autor expuso una segunda explicación (Nakamura, 1996) con algunas modificaciones en las que separa ondas de cuerpo (P y S) y ondas superficiales en la relación H/V.

La técnica también permite estimar el espesor (h) de la capa superficial de suelo blando debido a que se relaciona con la frecuencia fundamental de resonancia como lo describe Nakamura (2000) con la expresión:

$$h = \frac{\beta_s}{4F_0} = \frac{\beta_s T_s}{4} \quad (10)$$

Donde β_s es la velocidad de la onda de corte (onda S) en la capa analizada, F_0 es la frecuencia fundamental y T_s es el periodo fundamental del suelo.

En la tabla 1, se muestran las pruebas recomendadas para obtener los parámetros que componen la ecuación (10).

Parámetro	Prueba
h	<ul style="list-style-type: none"> • Cota de profundidad a la que se encuentra un basamento rocoso o de suelo firme detectado en los estudios geotécnicos para el diseño de la cimentación. • Prueba de penetración estándar. • Sondeo Eléctrico Vertical • Sondeo Electromagnético por transitorios • Prueba de dispersión de ondas (MASW, SPAC)
T_s	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba de vibración ambiental • Registros sísmicos de sitio
β_s	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba de dispersión de ondas (MASW, SPAC) • Tendido de refracción sísmica • Cross-Hole • Down-Hole • Sonda suspendida • Cono sísmico • Dilatómetro sísmico

Tabla 1. Pruebas recomendadas para obtener los parámetros del depósito de suelo. Tomada del Manual de diseño de obras civiles: Diseño por sismo, CFE, 2015.

La técnica de cocientes espectrales H/V (HVNR) ha tenido éxito para estimar el periodo dominante del terreno, de manera preliminar, usando los microtemores monitoreados en superficie y se han comparado los resultados de esta técnica con la Estándar (*Standard Spectral Ratio, SSR*) y la de Nakamura para sismos (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio,*

HVSR), mostrando similitud en la frecuencia fundamental del suelo y poca variabilidad del factor de amplificación (Martínez, 2015).

3. Caso de aplicación

3.1. Antecedentes

El área de estudio se encuentra en el Estado de México sobre una planicie extensa. La geología general de la zona se compone de roca volcánica extrusiva de tipo basalto y roca sedimentaria de tipo arenisca. El suelo superficial se constituye de sedimentos lacustres (Qla) y aluvión del cuaternario integrado por grava, arena, arcilla y limo (Qal), con interstratificaciones de ceniza volcánica, resultado de la actividad volcánica.

La dimensión del área de trabajo a estudiar, las características del terreno y la ubicación del sitio en zona sísmica, permite el uso de técnicas de microzonificación para analizar el comportamiento dinámico del terreno y hace necesario la ejecución de sondeos geotécnicos para conocer la estratigrafía y el espesor de la capa superficial de suelo.

3.2. Perfiles estratigráficos

Con base en la información de estudios geotécnicos de campo integrados por pruebas sondeos de penetración estándar (SPT), se elaboraron dos perfiles estratigráficos: A y B, característicos del sitio a estudiar.

El perfil A (figura 2), presenta la estratigrafía que se compone de una capa de arcilla de baja plasticidad arenosa de consistencia muy blanda a dura con un espesor de 3.6 m aproximadamente, seguido de una capa de limo de baja plasticidad arenoso de consistencia dura; debajo de esta capa, se encuentra una capa de limo de baja plasticidad con arena intercalada con un lente de arena fina densa, a una profundidad aproximada de 10.8 m. Finalmente se halla una capa de limo de baja plasticidad de consistencia dura. La exploración máxima alcanzada en los sondeos es de hasta 18.6 m y no se identifica el nivel freático.

En el perfil B (figura 3), se reporta que la estratigrafía se conforma por una capa de limo de alta plasticidad de consistencia muy blanda a media con un espesor de 4.2 m aproximadamente; seguido de arena arcillosa de compacidad densa, debajo de estas capas, se encuentra arcilla de consistencia media a muy firme que se intercala con un lente de arena fina densa a 10.8 m de profundidad aprox. Finalmente se reporta limo de alta plasticidad con arena de consistencia dura. El espesor de la capa superficial de material blando es de 4.2 m. La exploración máxima alcanzada en los sondeos es de hasta 17.4 m y no se identifica el nivel freático.

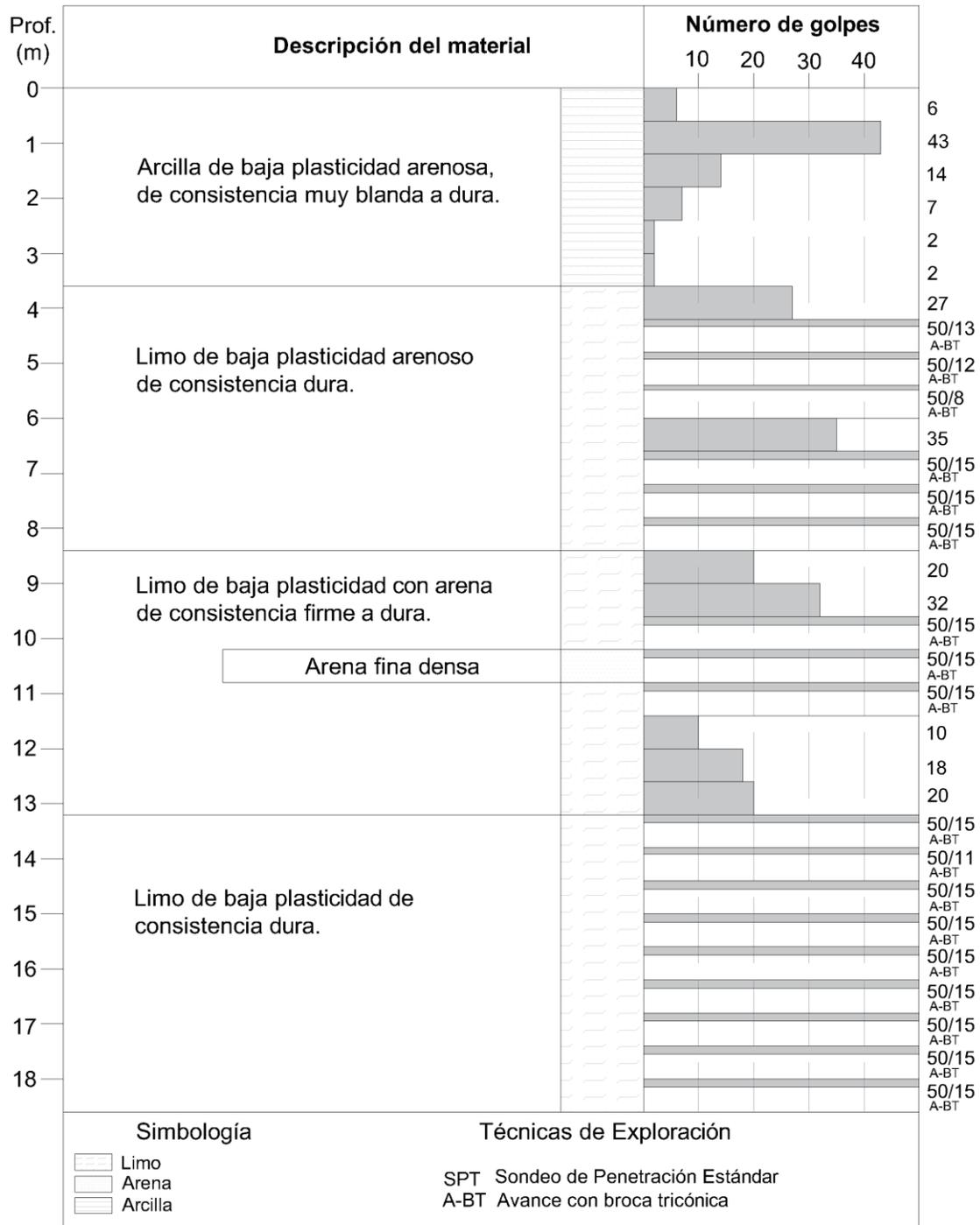


Figura 2. Perfil estratigráfico A.

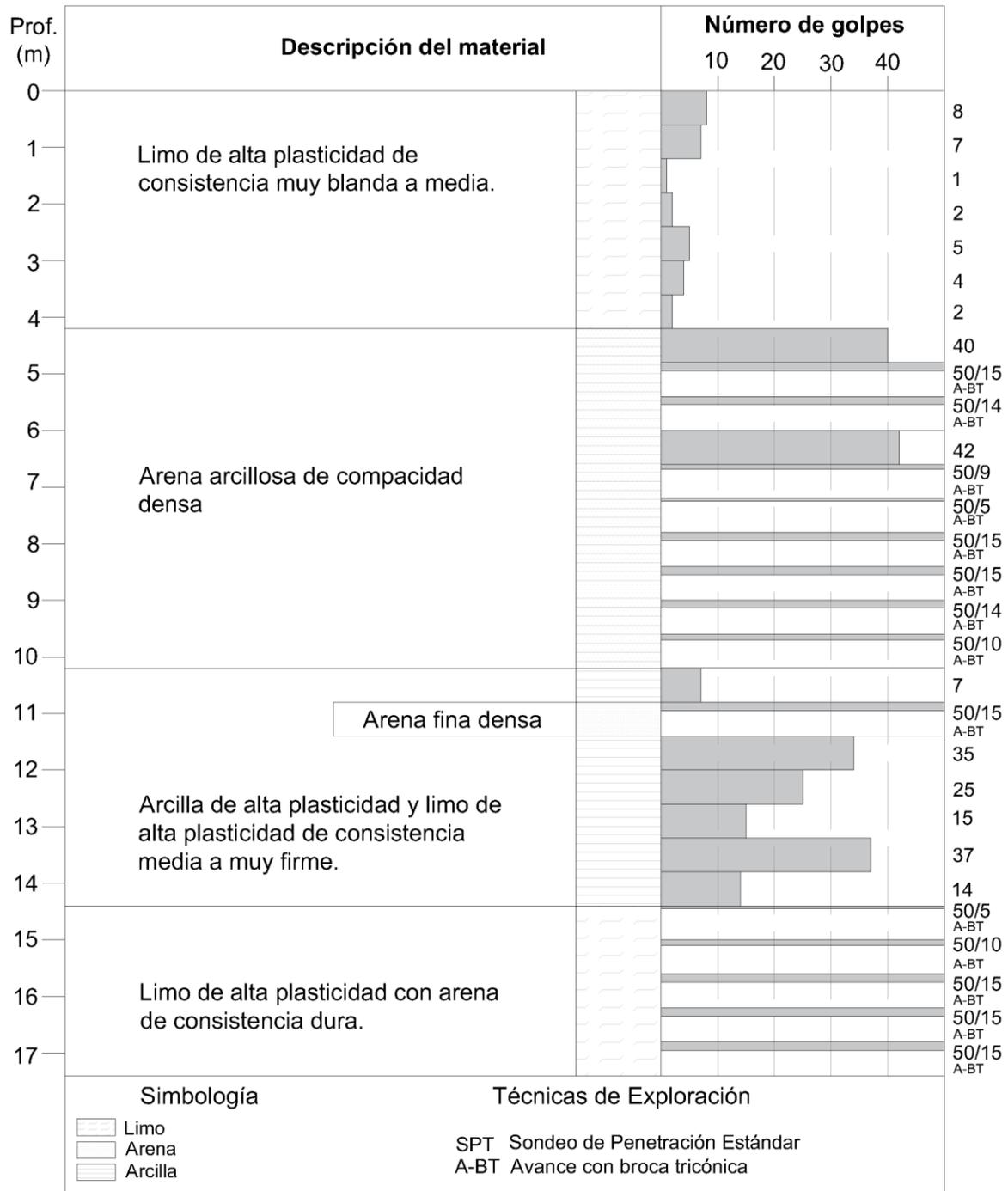


Figura 3. Perfil estratigráfico B.

La prueba de penetración estándar (SPT) consiste en hincar un penetrómetro de 60 cm, con golpes de un martinete de peso normalizado, en tramos de 15 cm a la profundidad a la que se desea muestrear y contando el número de golpes correspondiente a cada etapa, en caso de que se alcancen 50 golpes sin que se supere alguna etapa de 15 cm se debe suspender la prueba, continuar la perforación con broca tricónica hasta la profundidad del siguiente tramo e iniciar el siguiente ensayo.

El penetrómetro se compone de un tubo de acero en cuyo extremo se acopla una zapata con bordes afilados del mismo material, el tubo está cortado longitudinalmente para facilitar la recuperación y descripción de la muestra con lo que permite caracterizar la composición del suelo y definir la estratigrafía del sondeo.

3.3. Monitoreo de Vibración Ambiental

La adquisición de datos se realizó con un sismógrafo de tres canales de la marca SARA Electronic Instruments, modelo SL06 (Figura 4), con tres componentes ortogonales. El uso de sismógrafo es útil para el registro de frecuencias bajas, incluyendo menores a 1.5 Hz.

El sismómetro es un sensor que traduce la velocidad del suelo a una señal eléctrica (expresada en Volt) y es directamente proporcional a la velocidad relativa entre la masa oscilante y la carcasa del sensor que se mueve junto con el suelo en el que se encuentra sujeto. Desde el elemento básico de medición del movimiento del suelo (sismómetro), hasta los filtros de salida, que son elementos finales dentro del procesado analógico-electrónico de los datos, cuentan con funciones de transferencia que relacionan matemáticamente la señal de entrada y la de salida. Conocidas estas funciones, se pueden corregir de la influencia instrumental los datos numéricos registrados, al deconvolucionar el registro con la respuesta del instrumento en la banda de frecuencias de interés, para obtener el movimiento del suelo más acercado al real y para poder comparar el registro con otros

procedentes de diferentes instrumentos. En este trabajo no se eliminó la respuesta del instrumento debido a que las señales no se van a comparar con otros sismógrafos.

El procesamiento de señales analógicas consiste hipotéticamente en un sistema considerado aislado, lineal e invariante en el tiempo. Suponiendo esa condición, se dice que el estímulo utilizado es el que se aplica a la entrada del sistema y por lo tanto, la respuesta es debida a la entrada aplicada. No obstante, los sistemas electrónicos contienen componentes de frecuencia adjuntos que no están presentes en la señal de entrada. Dichos componentes generan un error en el cálculo de la función de transferencia; por ejemplo: ruido interno en el sistema, ruido externo y sistemas no lineales.

Cabe señalar la importancia que tiene verificar que los sistemas electrónicos utilizados para el registro se supervisen durante el monitoreo.



Figura 4. Equipo y ejecución de la prueba de vibración ambiental.

La logística de campo para el monitoreo de las vibraciones ambientales, consistió en colocar y nivelar, en una superficie lo más plana y horizontal posible, el sismógrafo orientado de tal manera que se registraran las componentes: Norte-Sur, Este-Oeste y vertical. Las tres componentes capturan la velocidad y aceleración para realizar el

procesamiento de los cocientes espectrales H/V. Los registros capturados tienen una duración de 20 min, con una frecuencia de muestreo de 100 mps.

En la figura 5, se observa la localización espacial de los registros en coordenadas relativas, por confidencialidad de los datos.

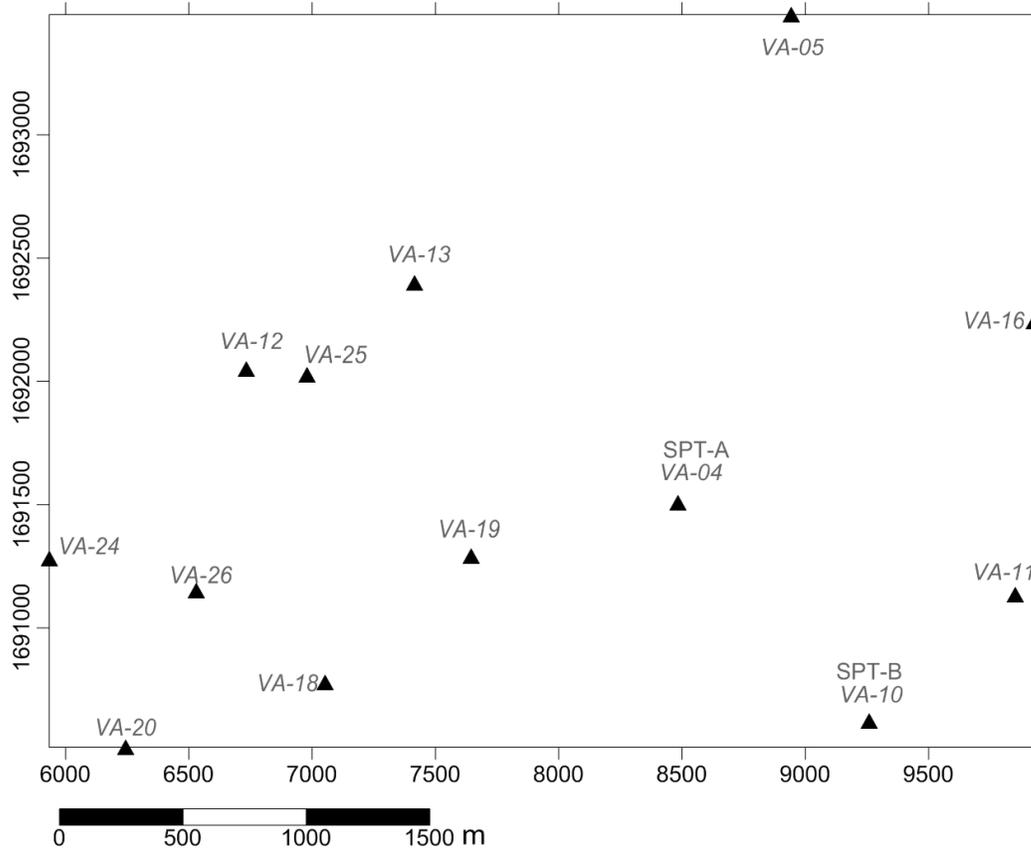
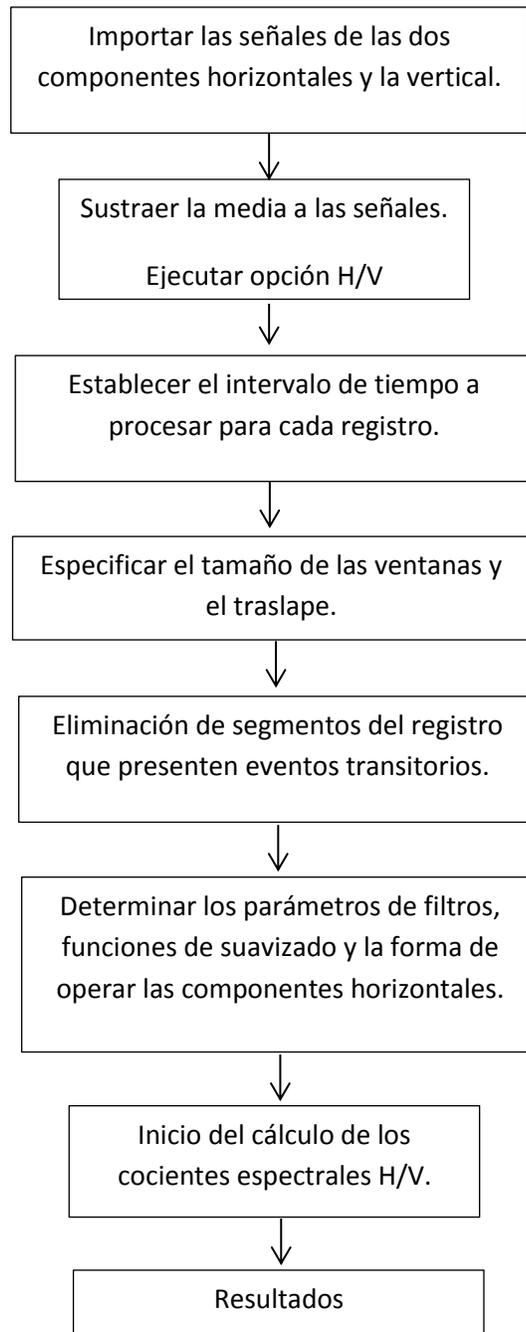


Figura 5. Localización espacial de los registros de vibración ambiental y los sondeos SPT.

3.4. Procesamiento de las señales

Para el procesamiento de los registros de cada estación, se utilizó el software Geopsy (Wathelet *et al.*, 2008). Éste es un software libre y de código abierto, desarrollado por el proyecto SESAME, es una herramienta útil para el procesamiento de diversos métodos de ondas superficiales.

La secuencia del procesamiento se muestra a continuación:



Esquema 1. Metodología utilizada para el procesamiento de los datos.

Las condiciones experimentales que se deben de tener en cuenta al momento de realizar mediciones en el terreno, se muestran en la tabla 2.

Tipo de Parámetro	Principales recomendaciones	
Duración de grabación	Espera mínima f_0 [Hz]	Duración de grabación mínima recomendada [min]
	0.2	30
	0.15	20
	1	10
	2	5
	5	3
	10	2
Distancia de grabación	<p>Microzonificación: comenzar con una gran separación (por ejemplo, una cuadrícula de 500 m), en caso de variación lateral de los resultados, densificar los puntos de la cuadrícula, por ejemplo a 250 m.</p> <p>Respuesta única de sitio: nunca use un solo punto de medición para obtener un valor de f_0, hacer por lo menos tres puntos de medición.</p>	
Parámetros de grabación	<p>Nivelar el sensor según lo recomendado por el fabricante.</p> <p>Fijar el nivel de obtención en el máximo posible sin saturación de la señal.</p>	
Acoplamiento Sensor-Suelo	<p>Colocar el sensor directamente en el suelo, siempre que sea posible.</p> <p>Evitar la colocación del sensor en suelos "muy blandos" (barro, tierra labrada, hierba alta, etc.) o en suelo saturado después de la lluvia.</p>	
Acoplamiento artificial Sensor-Suelo	<p>Evitar las placas de materiales blandos como gomaespuma, cartón, etc.</p> <p>En pendientes pronunciadas que no permitan la correcta nivelación del sensor, instalarlo en una pila de arena o en un recipiente lleno de arena.</p> <p>En la nieve o hielo, instale una placa metálica, de madera o un recipiente lleno de arena para evitar la inclinación del sensor debido a la fusión local.</p>	
Estructuras Cercanas	<p>Evitar la grabación cerca de estructuras tales como árboles, etc. En caso de viento (mayor a 5m/s aprox.). Puede influir fuertemente en los resultados de H/V mediante la introducción de algunas frecuencias bajas en las curvas.</p> <p>Evite medir por encima de estructuras subterráneas tales como estacionamientos, tubos, tapas de alcantarillado.</p>	
Condiciones Climáticas	<p>Viento: Proteja el sensor del viento (superior a 5 m/s). Esto ayuda sólo si no hay estructuras cercanas.</p> <p>Lluvia: evitar mediciones bajo una intensa lluvia. No tiene ninguna influencia notable con una lluvia débil.</p> <p>Temperatura: revise el sensor y las instrucciones de grabación.</p> <p>Perturbaciones meteorológicas: indicar en la hoja de terreno si las mediciones se llevan a cabo durante un evento meteorológico de baja presión.</p>	
Alteraciones	<p>Evitar mediciones cerca de máquinas de construcción, máquinas industriales, bombas, generadores, etc. Es decir, todo tipo de fuentes locales de corta duración que pueden alterar los resultados.</p> <p>En el caso de fuentes pasajeras (Peatones, automóviles, etc.), aumentar la duración de la grabación, así tener ventanas suficientes para el análisis, después de la eliminación de estas fuentes.</p>	

Tabla 2. Parámetros recomendados para el monitoreo de vibración ambiental. Tomado de SESAME, 2004.

De acuerdo con el Manual de Usuario SESAME H/V, el valor de f_0 no es confiable cuando:

- La señal presente picos altos en todas las componentes de movimiento.
- El sensor se colocó sobre roca.
- $f_0 > 10/l_w$

Donde l_w es la longitud de la ventana. Esta condición se propone para que haya al menos 10 ciclos significativos en cada ventana.

Los valores mínimos de duración del registro según SESAME, se presentan en la tabla 3.

F_0 [Hz]	Valor mínimo para longitud de la ventana l_w [s]	Número mínimo de ciclos significativos	Número mínimo de ventanas	Duración mínima señal útil [s]	El tiempo de grabación mínimo recomendado [min]
0.2	50	200	10	1000	30
0.5	20	200	10	400	20
1	10	200	10	200	10
2	5	200	10	100	5
5	5	200	10	40	3
10	5	200	10	20	2

Tabla 3. Valores mínimos de duración del registro. Tomado de SESAME, 2004

En el trabajo de Martínez (2015), se comprobó que la duración del registro depende del tiempo de estabilización de los sensores y recomienda medir de 2-3 horas para altas frecuencias y de 3 – 6 horas para bajas frecuencias.

La duración de los registros en este trabajo, varía entre 15m17s y 1h47m46.09s, debido a esto se empleó el total de la información para realizar el procesamiento.

A veces los cambios de temperatura afecta a los sensores, provocando que la media del registro no esté posicionada en cero, para corregir esto, se sustrajo la media a las señales mediante la opción “Subtract value” ubicada en la pestaña “Waveform” del programa Geopsy.

Al ejecutar la opción H/V se abre la ventana de parámetros, la cual consta de tres pestañas: “Time”, “Processing” y “Output”.

La sección “Time Windows” (Ventanas de Tiempo) se compone de tres subpestañas, las cuales tienen directa relación con la duración total de grabación.

En la subpestaña “General” se muestran las siguientes opciones:

- Length (Longitud): duración de cada ventana en la señal.
- Overlap: superposición o traslapo máximo que puede existir entre ventanas seleccionadas.
- Bad Sample Tolerance: Tolerancia de error de la muestra, en segundos.
- Bad Sample threshold: Umbral de error de la muestra, en porcentaje.
- Anti-triggering on raw signal: opción que evita alteraciones transitorias en la señal original.
- Anti-triggering on filtered signal: opción que evita alteraciones transitorias en la señal suavizada.

Para más detalle consultar la Guía de Usuario SESAME H/V, que se puede descargar en el link del apartado de referencias de este documento.

El primer paso del procesamiento consistió en la visualización de las trazas y la determinación de la longitud de la ventana (l_w) para calcular los espectros de amplitud de Fourier. La longitud de las ventanas utilizadas fue de 60, 40 o 30 s, siguiendo el criterio SESAME, para analizar un mínimo de 10 ventanas. Después, se eliminaron manualmente en el software las ventanas del registro que presentaran eventos transitorios, es decir, movimientos de corta duración y que presenten amplitudes altas en las tres componentes.

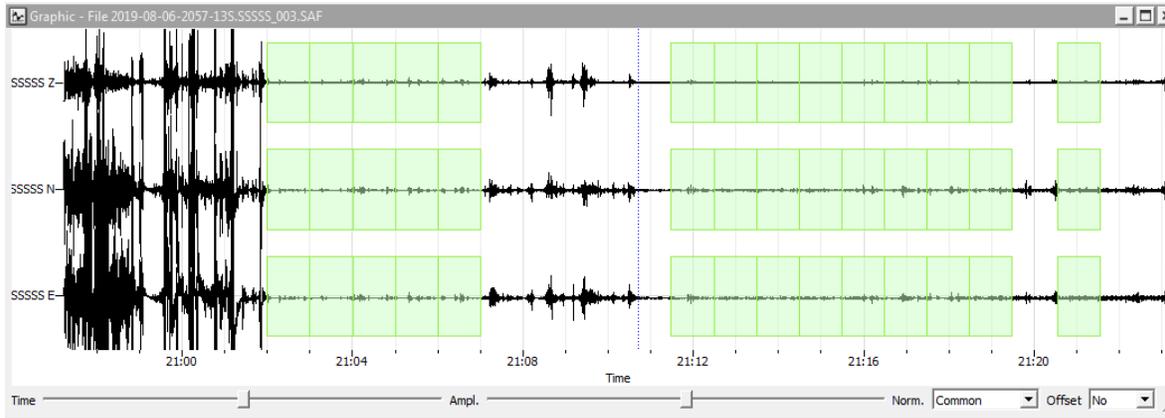


Figura 6. Ejemplo de selección de ventanas para las tres componentes del registro.

En el software ya mencionado, se aplicó un filtro pasabajos cuya frecuencia de corte es de 10 [Hz], debido a que son las frecuencias de interés en el monitoreo de microtemores.

Para mejorar las curvas de los coeficientes H/V, el software Geopsy da la opción de elegir las siguientes funciones de suavizado:

- Konno&Ohmachi: Debido a que los cocientes espectrales H/V suelen tener valores infinitos en algunos periodos pico, Konno&Ohmachi (1998) propusieron una función trigonométrica-logarítmica de suavizado para estimar los periodos fundamentales, tomando en cuenta la frecuencia central de máxima amplitud y aplicando un coeficiente exponencial. Esta función es recomendada porque preserva el número diferente de puntos de baja y alta frecuencia. El coeficiente exponencial varía entre 0 y 100, entre menor sea el coeficiente, las curvas del espectro serán más suaves. La función de Konno&Ohmachi es la siguiente:

$$F_{K-H} = \frac{\sin \left(\left(\log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right) \right)^b \right)}{\left(\left(\log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right) \right)^b \right)^4} \quad (11)$$

Donde:

f = frecuencia

f_c = frecuencia central

b = coeficiente de ancho de banda.

- Función constante de suavizado: tiene forma triangular centrada en la frecuencia analizada y su anchura es igual al ancho de banda dado por el usuario, entre mayor sea éste, el suavizado será más fuerte.
- Función proporcional de suavizado: tiene una forma triangular y su anchura depende de la frecuencia analizada, su anchura media es definida en porcentaje y éste no puede ser mayor o igual a 100%.

La función de suavizado que se utilizó en este trabajo es la de Konno & Ohmachi y la constante de suavizado fue de 40% para reducir la elongación del periodo pico (Konno& Ohmachi, 1998), es decir, que la cresta de la curva del periodo pico no sea muy ancha.

Las componentes horizontales (N-S y E-W) del registro pueden ser evaluadas por el software Geopsy de tres formas distintas:

- Media cuadrática (Squared average): en cada ventana, el espectro horizontal se calcula mediante una combinación de las componentes N-S y E-W utilizando la expresión:

$$H(f) = \sqrt{\frac{N^2(f) + E^2(f)}{2}} \quad (12)$$

- Energía total horizontal (Total horizontal energy): en cada ventana, el espectro horizontal se calcula mediante una combinación de las componentes N-S y E-W utilizando la expresión:

$$H(f) = \sqrt{N^2(f) + E^2(f)} \quad (13)$$

- Energía direccional (Directional energy): los coeficientes H / V se calculan a lo largo de una dirección dada (0° es la dirección norte y 90° la dirección este). Las señales N-S y E-W se proyectan en la dirección elegida.

En este análisis la forma de operar de las componentes horizontales fue “squared average”. Finalmente, después de ajustar los parámetros para el procesamiento de los datos, el programa calcula los cocientes espectrales de las componentes horizontales (E-W y N-S) entre la vertical, dando como resultado el cociente espectral H/V.

3.5. Mapa de isoperiodos

Al analizar las razones espectrales y obteniendo los valores del periodo dominante del suelo T_0 en el sitio, se realizó un mapa de isoperiodos mediante una distribución espacial generada con el método de Kriging. Dicho método se basa en la geostatística para producir una superficie de predicción, asumiendo que la distancia y la dirección entre puntos de la muestra, reflejan una correlación espacial que puede ser usada para explicar la variación de la superficie.

El método de kriging propone que el valor de la variable desconocida puede predecirse de una combinación lineal de las variables conocidas multiplicadas por pesos ponderados que se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto donde se va a hacer la correspondiente predicción. El estimador Kriging se considera óptimo debido a que es insesgado, es decir, el valor esperado del error es cero y garantiza la mínima varianza de la estimación. Existen otros métodos como el de distancias inversas o el poligonal, pero no garantizan la varianza mínima de predicción (Giraldo, 2002).

4. Resultados

Al aplicar la técnica de cocientes espectrales, se consideraron las componentes vertical (Z) y horizontales (NS y EW). En la tabla 4, se muestran los resultados de los 13 puntos de monitoreo. Se observan los valores de la frecuencia fundamental o de resonancia de la capa de suelo, y la amplitud espectral. La gráfica del espectro de los cocientes H/V, que genera Geopsy, consta en el eje horizontal, el rango de frecuencias (Hz) en escala logarítmica; mientras que en el eje vertical, se visualiza la relación adimensional H/V. Las líneas punteadas representan los valores mínimo y máximo de la amplitud, la línea continua es el promedio de dichos valores. Las dos bandas grises indican que en su intersección, se encuentra la frecuencia fundamental (f_0), sumada y restada por la desviación estándar de las frecuencias (extremos de las bandas en gris). Al realizar esta técnica, se asume que los efectos de sitio son debidos a una sola capa de suelo sobre un semiespacio elástico y el efecto de sitio está definido por un periodo característico y un factor de amplificación, dados por la razón de impedancia entre la capa y el semiespacio (Gutiérrez, 2016). El periodo fundamental o característico del suelo, definido como el periodo del primer armónico con mayor amplitud del movimiento, depende de las características físicas y geométricas de la estratigrafía somera.

En la figura 7, se muestra la gráfica de cocientes espectrales H/V que generó Geopsy, correspondiente al registro de una de las estaciones de monitoreo.

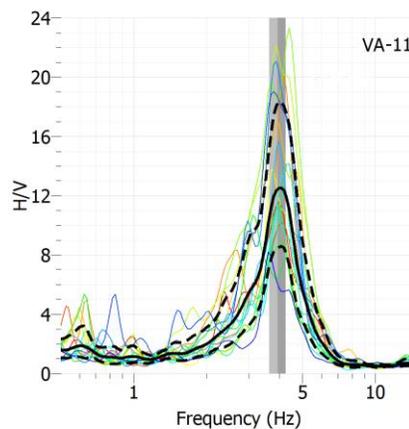


Figura 7. Cocientes espectrales correspondientes a la estación de monitoreo VA-11 calculados con Geopsy.

Estación	Frecuencia característica del suelo [Hz]	Factor de amplificación	T _s [s]
VA-04	5.48	8.3	0.182
VA-05	6.69	3.85	0.150
VA-10	3.63	6.53	0.275
VA-11	4.25	12.41	0.235
VA-12	2.52	8.65	0.397
VA-13	6.12	5.3	0.163
VA-16	5.28	3.24	0.189
VA-18	4.55	11.2	0.220
VA-19	2.71	6.26	0.369
VA-20	6.39	6.71	0.157
VA-24	5.07	15.52	0.197
VA-25	5.89	7.75	0.170
VA-26	4.58	11.51	0.218

Tabla 4. Frecuencias y periodos característicos del suelo en la zona de estudio.

Se agruparon las curvas promedio de los cocientes espectrales H/V de las estaciones de monitoreo en dos gráficas. En la figura 8, se muestran las curvas en las que se observan los más altos valores de frecuencia característica y en la figura 9, se presentan las curvas en las que se generan las frecuencias características más bajas.

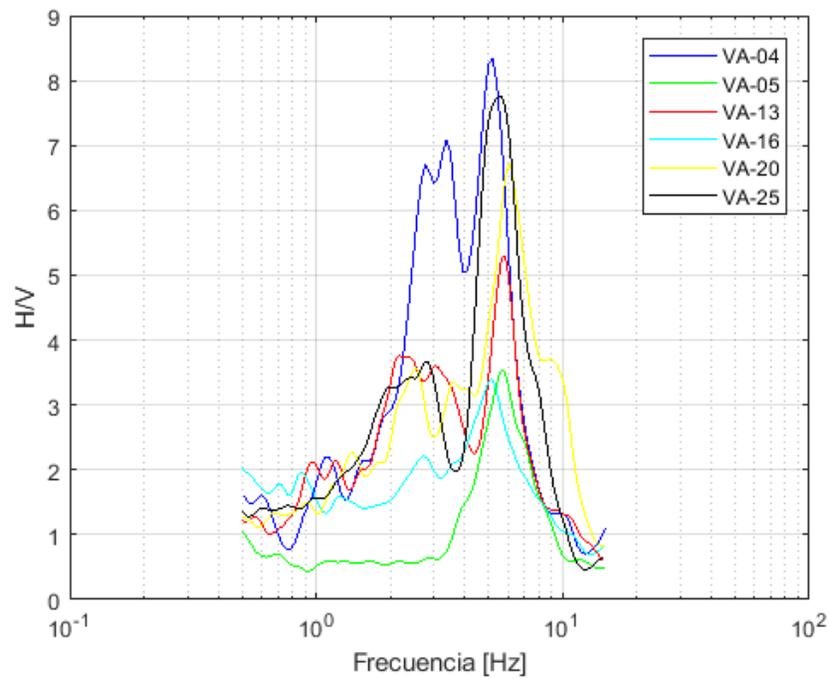


Figura 8. Cocientes espectrales H/V que muestran las frecuencias fundamentales más altas del sitio.

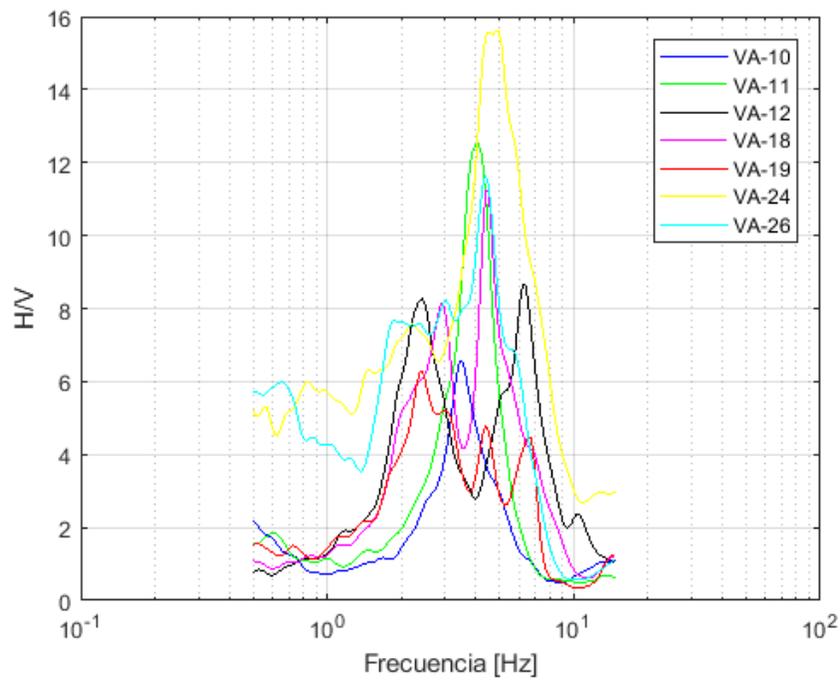


Figura 9. Cocientes espectrales H/V que muestran las frecuencias fundamentales más bajas del sitio.

Las variaciones en las frecuencias se pueden atribuir al cambio de espesor del terreno en la zona de medición, mientras que las variaciones en el factor de amplificación se pueden relacionar con la forma de las estructuras del subsuelo (Guíllier, 2006) y el contraste de impedancia entre las capas deformables con respecto al basamento o suelo firme.

- Las estaciones: VA-04, VA-13, VA-20 y VA-25, muestran formas similares en las curvas de los cocientes H/V, con una frecuencia característica promedio de 5.78 Hz, lo que indica que las propiedades elásticas y la estructura del subsuelo son similares. También, se presenta una segunda frecuencia característica del suelo en forma de meseta con baja amplitud y en frecuencias bajas, lo que indica un contraste de impedancia más profundo y la presencia de una fuerte variación lateral del espesor (Guíllier, 2006). Estos resultados se comparan con la información que muestra el perfil estratigráfico A, en el que reporta una capa superficial de arcilla de baja plasticidad de consistencia muy blanda a dura con un espesor aproximado de 3.6 m, seguido de limo de baja plasticidad arenoso de consistencia dura.
- En las estaciones: VA-12, VA-10 y VA-19, el valor de la frecuencia característica tiene un valor de 3.97, 3.63 y 2.7 Hz, respectivamente, y tienen un factor de amplificación promedio de 7.14. En el perfil estratigráfico B, se corrobora la existencia de éste contraste entre la capa superficial y las capas más profundas, pues la profundidad de la primer capa de limo de alta plasticidad de consistencia muy blanda a media es de aproximadamente 4.2 m, seguido de arena arcillosa de compacidad densa.
- Las estaciones: VA-11, VA-18 y VA-26, presentan una frecuencia característica promedio de 4.46 Hz y un factor de amplificación promedio de 11.7, lo que sugiere un fuerte contraste de impedancia entre la capa superficial blanda y el material duro.
- Las estaciones: VA-05 y VA-16, muestran los factores de amplificación más bajos en comparación con las demás estaciones, lo que indica un menor contraste de

impedancia, además de que la frecuencia característica de la estación VA-05 es 6.68 Hz, la más alta de todas las demás estaciones.

- La estación VA-24, presenta una frecuencia característica del suelo en forma de meseta, lo que representa variaciones laterales de la estratigrafía.

Estimación del periodo fundamental de vibración estructural

La finalidad de conocer el periodo fundamental del suelo (T_s) en un sitio, es evitar que ocurra el fenómeno de resonancia en las edificaciones, es decir, que el periodo estructural (T_E) y el T_s coincidan. Para ello, mediante una estimación preliminar, en este trabajo se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Mosquera *et al.* (2012) que resultaron de una investigación sobre la estimación del periodo de vibración de estructuras de concreto en la Ciudad de México, a partir de la altura del edificio y del número de pisos. Estos análisis se llevaron a cabo con los registros acelerográficos obtenidos de 5 edificios instrumentados, cuya altura varía entre 9.10 m y 58 m; y un número de pisos entre 3 y 17 niveles. Además se compararon con ecuaciones aproximadas obtenidas de estudios semejantes de estructuras instrumentadas en el estado de California en los Estados Unidos.

Las ecuaciones lineales a las que llegaron con base en los estudios son:

$$T_E = 0.042H_E \quad (14)$$

$$T_E = 0.15N \quad (15)$$

Donde T_E es el periodo estructural del edificio, H_E la altura del edificio, N el número de pisos del edificio.

La resonancia sucede cuando $T_E \approx T_S$, por lo tanto, para obtener la altura y el número de pisos de una estructura de concreto en la que puede generarse resonancia, se despejan las ecuaciones (14) y (15):

$$H_E = \frac{T_S}{0.042} \quad (14-b)$$

$$N = \frac{T_S}{0.15} \quad (15-b)$$

Al sustituir los valores de periodo fundamental (T_S), obtenidos de la zona de estudio en las ecuaciones anteriores, se generan los resultados de la tabla 5:

<i>Estación</i>	<i>T_s [s]</i>	<i>Altura [m]</i>	<i>N° Pisos</i>
VA-04	0.182	4.3	1.2
VA-05	0.150	3.6	1.0
VA-10	0.275	6.6	1.8
VA-11	0.235	5.6	1.6
VA-12	0.397	9.5	2.6
VA-13	0.163	3.9	1.1
VA-16	0.189	4.5	1.3
VA-18	0.220	5.2	1.5
VA-19	0.369	8.8	2.5
VA-20	0.157	3.7	1.0
VA-24	0.197	4.7	1.3
VA-25	0.170	4.0	1.1
VA-26	0.218	5.2	1.5

Tabla 5. Periodo característico del suelo, altura y N° de pisos de los edificios que entrarían en resonancia, calculado a partir de las ecuaciones empíricas de Mosquera et al., 2012.

Mapa de Microzonificación Sísmica

Analizando las curvas de isoperiodo derivadas de las estimaciones de periodos dominantes y la información geotécnica, se propone un mapa de microzonificación que se presenta en la figura 10, en el que se identifican dos microzonas.

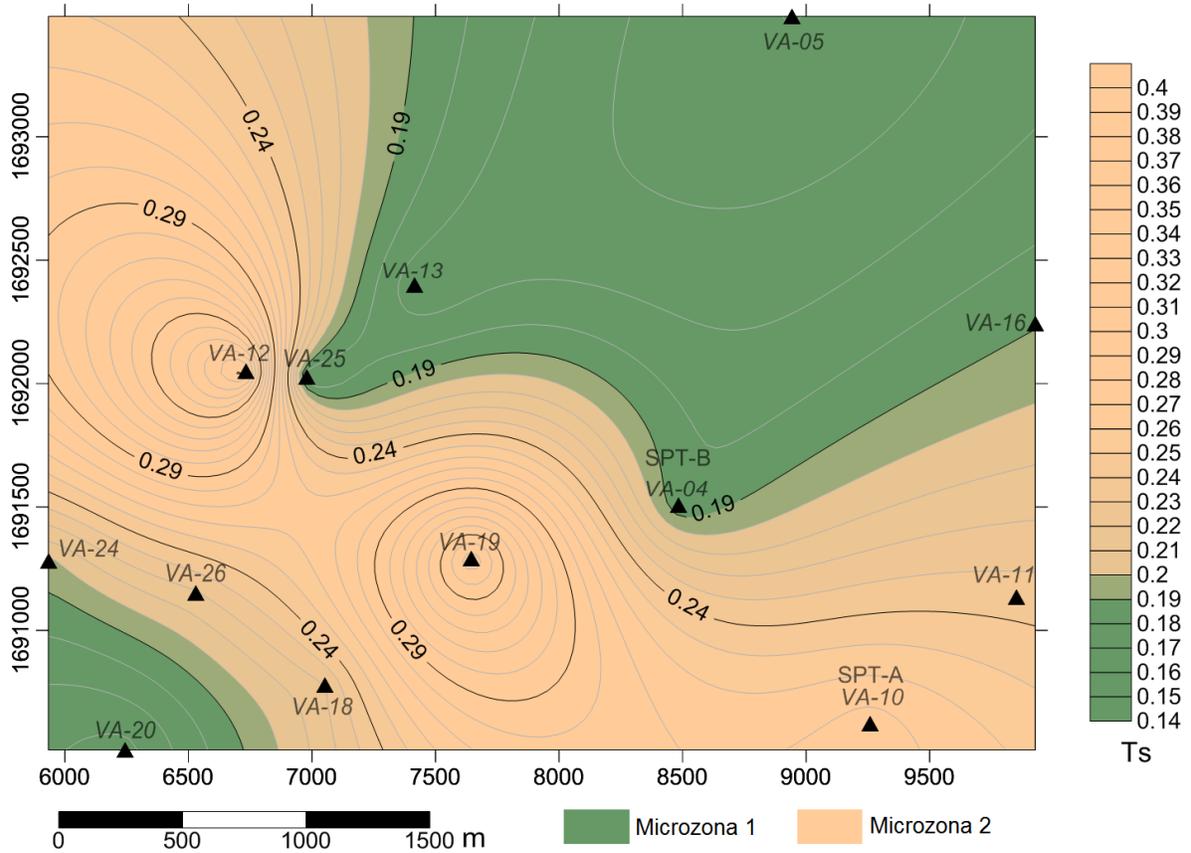


Figura 10. Mapa de microzonificación.

MICROZONA 1: Los periodos dominantes en esta zona varían de 0.14 a 0.197 s; y presentan un factor de amplificación promedio de 6.26. La zona se caracteriza por suelos compuestos de limo de alta plasticidad de consistencia muy suave a media, seguido de limo de baja plasticidad de consistencia dura. El espesor de la capa superficial de consistencia muy suave a media es de aproximadamente 3.6 m.

De acuerdo con las ecuaciones empíricas de Mosquera *et al.* (2012), en esta zona, los edificios de estructuras de concreto con una altura entre 3.6 m y 4.5 m aproximadamente; y un número de pisos entre 1.0 y 1.3 niveles, podrían entrar en resonancia a la llegada de un sismo.

MICROZONA 2: En esta zona los periodos dominantes varían de 0.198 a 0.4 s; y muestran un factor de amplificación promedio de 9.6. La estratigrafía superficial está constituida por sedimentos de limo de alta plasticidad de consistencia muy blanda a media de 4.2 m de espesor, seguido de arena arcillosa de compacidad densa.

Los edificios de estructuras de concreto en las que se podría generar resonancia, siguiendo las ecuaciones empíricas de Mosquera *et al.*, 2012, son las que cuentan con una altura entre 4.7 m y 9.5 m aproximadamente; y un número de pisos entre 1.3 y 2.6 niveles.

Conclusiones

En este trabajo se realizaron estudios de vibración ambiental en trece puntos del sitio, con el fin de obtener el periodo fundamental de cada uno y comparar los resultados con sondeos geotécnicos.

La información generada por el monitoreo de Vibración Ambiental, se procesó por medio del software Geopsy, en el que se calcularon los cocientes espectrales H/V, indicando la frecuencia característica del suelo. Los resultados expresados en periodo son los siguientes:

<i>Nombre</i>	<i>Ts[s]</i>
VA-04	0.182
VA-05	0.150
VA-10	0.275
VA-11	0.235
VA-12	0.397
VA-13	0.163
VA-16	0.189
VA-18	0.220
VA-19	0.369
VA-20	0.157
VA-24	0.197
VA-25	0.170
VA-26	0.218

Tabla 6. Periodos característicos del suelo en la zona de estudio.

La microzonificación se hizo a partir de las curvas de isoperiodo generadas con el método de Kriging y el análisis de los materiales reportados en los perfiles estratigráficos.

El mapa de microzonificación sísmica propuesto, divide al sitio en dos microzonas:

- Microzona 1: Periodos dominantes que varían de 0.14 a 0.197 s. Las edificaciones de concreto con alturas entre 3.6 m y 4.5 m, podrían entrar en resonancia al suceder un sismo.

- Microzona 2: Periodos dominantes que varían de 0.198 a 0.4 s. Las construcciones de marcos de concreto con alturas entre 4.7 m y 9.5 m, podrían entrar en resonancia a la llegada de un sismo.

En general, las conclusiones a las que se llegó a partir de los resultados son:

- El periodo fundamental del suelo tiene relación con la consistencia o compacidad del estrato de terreno superficial. Por lo tanto, entre más blando es el terreno, su periodo fundamental aumenta.
- El espesor de la capa de suelo superficial influye en el periodo fundamental del suelo, de modo que, entre mayor sea el espesor, el periodo fundamental aumentará.
- Las estaciones de Vibración Ambiental, cuya frecuencia característica presentó alto factor de amplificación, sugiere un fuerte contraste de impedancia entre la capa de suelo superficial y la capa de suelo firme que la subyace.
- Las variaciones en la estratigrafía se refleja en la forma de la curva de los cocientes espectrales H/V.
- Los cocientes espectrales H/V que propuso Nakamura proporciona las primeras aproximaciones del factor de amplificación y el periodo fundamental. En función del objetivo del estudio y las características del sitio a analizar, son aconsejables modelos 2D o 3D y estudios empíricos más sofisticados.

Referencias

Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 35, 415-457.

Auvinet, G., Méndez, E., Juárez, M. (2015). New information on regional subsidence and soil fracturing in México City Valley. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. Vol.372. Pp.372.

Auvinet, G., Méndez, E., Juárez, M., Rebolledo, F. (2015). Riesgos geotécnicos para la construcción de vivienda en el Valle de México. Instituto de Ingeniería. Pp. 16.

Bard P. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation. *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Edited by Irikura, Kudo, Okada & Sasatani, 1999 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 030 2, Pag1252-1279.

CFE (2015). Manual de diseño de obras civiles: Diseño por sismo.

Chávez-García, F. & Montalva, G. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y Proyectos* 16, 6-30.

Esquivel, L.I. (2017) Estudio del campo de velocidades de propagación en el volcán Popocatepetl utilizando interferometría sísmica. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM.

Fonseca, J. & Schmidt, V. (2017). Correlación entre la forma de la razón espectral H/V con la estratigrafía del subsuelo en 10 sitios de estudio.

GEOPSY (2012), Wathelet, M (IS Terre, Grenoble, France). Geopsy.org geophysical research and applications packages, release 2.4.4, Modified 2011-01-05, win32.

Giraldo, R. (2002). Introducción a la Geoestadística: Teoría y aplicación. Universidad Nacional de Colombia.

Guillier, B. (2006). Simulation of seismic ambient vibrations: does the H/V provide quantitative information in 2D-3D structures? *Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Francia.

Gutiérrez, R. (2016). Estructura de velocidades de onda de corte y respuesta sísmica en la puerta de Los Leones, 1ª sección del Bosque de Chapultepec. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM.

Haskell, N.A (1962). "Crustal reflection of plane P and SV waves", *J. Geophysics Res*, 67, 4751-67.

Jaramillo, A., Piña, J. y Aguilar, R. (2012). Aplicación del método de cocientes espectrales para la reconfiguración detallada del mapa de Isoperiodos en la cuenca del valle de México. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A. C.*

Kanai, K. & T. Tanaka, (1961). On microtremors. VIII, Bull. *Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 39,97- 114.

Konno, K. & Ohmachi (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 1, pp. 228-241.

Martínez, J. (2015). Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtremores, para fines de mapas sísmicos de intensidad. Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería UNAM.

Moreno, L. & Alfaro, A. (2002). De Los Microsismos A Los Microtemblores. Investigaciones en el Instituto Geofísico. VIII CCG - Sociedad Colombiana de Geotecnia.

Mosquera, J., Miranda, E., Reinoso, E. (2006). Estimación y variación del periodo fundamental de vibración de edificios de concreto reforzado inferidas a partir de edificios instrumentados ubicados en la ciudad de México y California. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR of RTRI* 30, no. 1, February, 25-33pp.

Nakamura, Y. (1996), "Real Time Information Systems for Seismic Hazards Mitigation UrEDAS, HERAS andPIC", *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 37, No. 3, 112-127.

Nakamura, Y. (2000). Clear Identification Of Fundamental Idea Of Nakamura's Technique And Its Applications. *Procc. 12WCEE. New Zeland*.

Nakamura, Y. (2008). On the H/V Spectrum. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. China.

Nogoshi, M. and T. Igarashi, (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2), *Jour. Seism. Soc. Japan*, 24, 26-40. (in Japanese with English abstract).

Piña, J. (2015). Cálculo e inversión del cociente H/V a partir de ruido ambiental. Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería UNAM.

Sánchez-Sesma, F.J., Rodríguez, M., Iturraran-Viveros, U. y Luzon, F. (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium, *Geophys. J. Int.*, 186(1), 221–225.

Wathelet, M., Jongmans, D., Ohrnberger, M. & Bonnefoy-Claudet. (2008). Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over VS inversion.

Zeng, X. (1996) A simple procedure to calculate the fundamental frequency of horizontal soil layers. *Géotechnique* 46, No. 4, 757-760.

Referencias de internet:

- Guía de Usuario SESAME H/V:
ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SESAME/USER-GUIDELINES/
- http://www.sara.pg.it/d_know_how/GEOPSY_GUIDA_PRATICA.PDF

ANEXO I

Tabla comparativa de resultados de los valores de frecuencia fundamental (F_0) y factor de amplificación (A_0) con las opciones de cálculo de la componente horizontal con Geopsy.

Nombre	<i>Squared Average</i>		<i>Total Horizontal Energy</i>		<i>Directional Energy (0° Y 90°)</i>			
	A_0	F_0	A_0	F_0	$A_0(0^\circ)$	$A_0(90^\circ)$	$F_0(0^\circ)$	$F_0(90^\circ)$
VA-04	8.29	5.48	11.73	5.48	7.37	8.78	5.54	5.41
VA-05	1.58	6.69	2.23	6.69	1.47	1.48	6.57	6.63
VA-10	6.53	3.63	9.2	3.64	5.75	6.43	3.69	3.6
VA-11	12.41	4.25	17.05	4.25	12.15	11.12	4.23	4.17
VA-12	8.65	2.52	11.77	2.52	9.89	6.36	2.5	2.54
VA-13	5.3	6.12	7.41	6.12	4.83	5.01	5.99	6.06
VA-16	3.24	5.28	4.74	4.86	2.79	3.38	6.25	5.52
VA-18	11.2	4.55	15.63	4.55	10.46	10.64	4.54	4.59
VA-19	6.26	2.71	8.83	2.38	5.36	5.46	2.94	2.5
VA-20	6.71	6.39	9.47	6.39	5.83	6.57	6.56	6.85
VA-24	15.52	5.07	21.82	4.73	15.86	13.61	5.05	5.43
VA-25	7.75	5.89	10.95	5.53	8.56	7.26	5.75	5.48
VA-26	11.51	4.58	16.21	4.58	9.83	11.73	4.55	4.58

Se observa que no existe alta variabilidad en los valores de frecuencia fundamental, sin embargo, el factor de amplificación cambia entre las distintas formas de calcular la componente horizontal del cociente espectral.