

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está 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 o titular de los Derechos Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra
con orientación en Sismología**

**Estudio de las variaciones de la velocidad y los periodos de
vibración en el Valle de México, mediante el procesado de
ruido sísmico**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Haidee Maria Assi Hagmaier

Ensenada, Baja California, México
2022

Tesis defendida por
Haidee Maria Assi Hagmaier

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Roberto Ortega Ruiz
Director de tesis

Dra. Dana Dierna Carciumaru

M. en C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo

Dr. Humberto Pérez Espinoza

Dr. Luis Quintanar Robles



Dr. Javier Alejandro González Ortega
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Haidee Maria Assi Hagmaier** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra [con orientación en Sismología](#).

**Estudio de las variaciones de la velocidad y los periodos de vibración en el Valle de México
mediante el procesado de ruido sísmico**

Resumen aprobado por:

Dr. Roberto Ortega Ruiz
Director de tesis

En este trabajo se analiza el ruido sísmico registrado en 30 estaciones de la Red Sísmica del Valle de México de manera continua durante 3 años. Se pretende demostrar que existe una variación en la velocidad de las ondas sísmicas. Nuestro enfoque, consiste en medir los cambios de los tiempos de retardo en cada par de estaciones usando correlación cruzada de ruido sísmico. Se utilizaron los algoritmos de MSNoise para calcular las funciones de correlación cruzada de la componente vertical en ventanas de 30 minutos a lo largo de un día. El resultado se apila en 18 días para cada par de estaciones durante un año. Los mismos registros de ruido se usaron para obtener los periodos fundamentales mediante la técnica de HVSR (o H/V), separando las componentes horizontales y verticales en cada estación, obteniendo un archivo por día. Se elaboró una rutina de cómputo que separa cada día en 24 horas, el programa selecciona aquellos días que tienen información continua y calcula su razón espectral H/V, basado en un procesamiento digital de señales conforme a recomendaciones internacionales. Finalmente se presenta este conjunto de datos como un punto de partida para posteriores análisis de fluctuaciones de periodos de vibración. Los resultados muestran que los periodos dominantes no cambian a lo largo del año, pero las amplitudes relativas dependen de la época del año. Un estudio detallado de los cambios de velocidad muestra que las variaciones ocurren en época de lluvia y están relacionadas con fenómenos hidrológicos y poroelásticos. Cabe destacar la presencia de periodos dominantes estacionales en Zona de Lomas del Valle de México, los cuales llegan a ser evidentes en temporada de lluvia, y desaparecen en épocas de sequía. Es importante revisar cada caso en particular porque existen condiciones locales que afectan los periodos de vibración. Los resultados muestran que existe una necesidad de tener estaciones sísmicas permanentes para estudios de sitio a diferencia de los estudios clásicos donde solo se realizan mediciones puntuales en un par de horas. Así como estudiar los cambios hidrológicos para conocer los efectos que puedan ocasionar en las amplificaciones y periodos de sitio.

Palabras clave: periodos de vibración, fluctuaciones estacionales, H/V, velocidad de onda, Valle de México

Abstract of the thesis presented by **Haidee María Assi Hagmaier** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth science [with orientation in Seismology](#).

Seasonal variations of seismic velocities and vibration periods in the Valley of Mexico observed with seismic noise processing

Abstract approved by:

Roberto Ortega Ruiz, PhD
Thesis Director

In this thesis we analyze seismic noise recorded in 30 stations of the Seismic Network of the Valley of Mexico on a continuous basis for 3 years. We believe that there is a variation in the velocity of seismic waves during a year. Our approach is to measure the changes in delay times at each pair of stations using cross-correlation of seismic noise. MSNoise algorithms were used to compute the cross-correlation functions of the vertical component in 30-minute windows over one day. The output is stacked on 18 days for each pair of stations in a year. The same noise records were used to determine the fundamental periods using HVSR (or H/V) technique, separating the horizontal and vertical components at each station, creating one file per day. A computation routine was designed to separate each day into 24 hours, the program selects those days that have contiguous information and calculates their H/V spectral ratio, based on digital signal processing according to international recommendations. Then the data set is presented as the starting point for further analysis of vibration periods fluctuations. The results revealed no changes of dominant periods throughout the year, but the relative amplitudes depend on the season of the year. A detailed study of the velocity changes suggests that variations during rainy season are related to hydrological and poroelastic events. It is to be noted the presence of seasonal dominant periods in Lomas Zone of the Valley of Mexico, which become evident in rainy season, and disappear in dry season. It is necessary to analyze each case to determine if there are local conditions that affect the vibration periods. Results confirm that there is a need to have permanent seismic stations for site studies contrary to the classic studies where measurements are made in a few hours, as well as studying hydrological variations to understand the effects they may have on the amplifications and site periods.

Keywords: vibration periods, seasonal variations, H/V, wave velocity, Valley of Mexico

Dedicatoria

A mi tatito Ricardo Hagmaier Loeza

A mi tío Francisco Sinta Loeza

Fueron hombres buenos, bondadosos, fuertes, trabajadores, pero sobre todo pacientes,

porque sé que no fui la mejor nieta/sobrina y que criarme no fue fácil.

Gracias por ser mis principales motivadores y formadores de lo que ahora soy como persona,

sin ustedes, su amor y su cariño no habría llegado hasta donde estoy.

Los amo y extraño con todo mi ser.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California por darme la oportunidad de formar parte de esta institución, y así poder fortalecer mi desarrollo profesional a través del personal académico, técnico y administrativo.

Al CONACYT por brindarme el apoyo económico para poder realizar mis estudios de maestría.

Al Proyecto CONACYT Paradigmas y Controversias 2022 número 319664 titulado Fluctuaciones estacionales y cíclicas de los periodos dominantes del suelo del Valle de México: un postulado de cambio.

Al Dr. Roberto Ortega Ruiz y a la Dra. Dana Dierna Carciumaru, por guiarme en este camino, sin ustedes, sus virtudes como sus conocimientos rigurosos y precisos, su apoyo y paciencia nada de esto hubiese sido posible. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento, siempre fueron sabias.

A los miembros del comité por sus observaciones y sugerencias a lo largo de los avances.

A todo el personal que labora en la Red Sísmica del Valle de México, especialmente a Jesús Pérez Santana por su apoyo en la preparación y curado de los datos utilizados en la presente tesis.

A Martha Rosas por todo su apoyo en la elaboración de figuras, mapas y videos.

A mi hermano por contribuir en la revisión de la tesis, gracias por todo tu apoyo.

A mi mamá por ser la promotora de mis sueños, gracias por confiar y creer en mis expectativas.

A mi novio Luis Moreno Orozco por tu amor, tu infinita paciencia y tu apoyo incondicional.

A mis amigos Rodrigo, Rubi, Elsy y Daniel porque aunque no nos vimos mucho se volvieron parte de mi corazón, gracias por todo su apoyo.

A mi familia y amigos que de una forma u otra me han llenado de sabiduría, amor y apoyo.

A mis compañeros de Ciencias de la tierra por todos los buenos momentos que pasamos juntos.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas	xii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Justificación	5
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
Capítulo 2. Metodología.....	8
2.1 Método sísmico HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio).....	8
2.2 Método de cross-correlación	9
Capítulo 3. Resultados	10
3.1 Resultados de HVSR	10
3.2 Resultados de Cross-correlación	11
Capítulo 4. Análisis temporal.....	12
4.1 Parte hidrológica	12
Capítulo 5. Cambios terrestres en el agua	15
5.1 Modelado de masas de agua mediante GRACE	15
Capítulo 6. Interpretación geológica	17
6.1 Rocas de Basamento	17
Capítulo 7. Discusión.....	19

Capítulo 8. Conclusiones	21
Literatura citada	22
Anexos	26

Lista de figuras

Figura	Página
1. Mapa de la RSVM. Se muestra la ubicación de las 30 estaciones que comprenden la Red Sísmica del Valle de México.	1
2. Diagrama esquemático del subsuelo del valle de México. a) Valle de México en estado estacionario, b) representación del Valle de México en época de lluvias y sus cambios en el subsuelo, c) y d) diferentes efectos en las edificaciones dependiendo de la profundidad de los estratos blandos.	5
3. Mapa de periodos dominantes. La Zona I. Se localiza lejos de lo que fue el Lago de Tenochtitlán, corresponde a las alcaldías con áreas de cerros, lomas y pedregales con relieves resistentes. Zona II. Son lugares con depósitos arenosos que tienen cerca de 20 metros de profundidad, que son mucho menos estables. Zona III. Esta zona es la que supone más riesgo, puesto que aquí las ondas se maximizan, con suelo de arcillas. También se representan los periodos dominantes reportados por Martínez et al. (2015), quienes describen las características litológicas de cada una de las zonas.	9
4. Series de tiempo de dv/v para la cuenca del Valle de México y valores de precipitación de la estación en la Ciudad Universitaria (2018).	13
5. Series de tiempo de dv/v para la cuenca del Valle de México y valores de precipitación de la estación en la Ciudad Universitaria (2019).	13
6. Series de tiempo de dv/v para la cuenca del Valle de México y valores de precipitación de la estación en la Ciudad Universitaria (2020).	14
7. Relación de las amplitudes del método H/V de los modos superiores de amplitud y su comparación con el cambio de masa medido con el satélite GRACE para los años de 2018 a 2021 en un acuífero del centro de México.	15
8. Resultado de HVSr de la estación BJVM (Benito Juárez). La rutina cuenta con un algoritmo de rechazo de ventanas en el dominio de la frecuencia totalmente automatizado, por eso podemos observar un gráfico antes del rechazo (Before Rejection) y uno después del rechazo (After Rejection).	30
9. Resultado del proceso automatizado para la estación AZVM. Se pueden apreciar los valores de los picos máximos a lo largo de un año para la estación Atizapán.	31
10. Resultados del proceso automatizado para la estación Álvaro Obregón.	32
11. Espectros de amplitud que corresponde a la estación Miguel Hidalgo en donde se aprecian las fluctuaciones de periodo que sufre el modo cuarto. En tonalidades grises se observan las amplitudes que aparecen en ciertos periodos del año, pero no están presentes todo el tiempo. Las líneas punteadas representan $\pm$ una desviación estándar. Esta estación está en Zona I, por lo tanto, debe tener periodos dominantes menores a un segundo y eso demuestra la variación estacional en la región de los periodos dominantes.	33

12. Relación de modos con escalamiento del espectro.....	35
13. Relación de amplitudes. Cuarto modo entre primer modo.....	35
14. CCF's spectrum vs Time. Este gráfico muestra el espectro de las funciones de correlación cruzada en diferentes ventanas de tiempo.....	37
15. Resultados del proceso automático de HVSR donde se demuestra que este tipo de análisis no siempre representa un cambio estacional cíclico relacionado a algún proceso físico.	41
16. CTVM_2018-07-12/00.....	44
17. Estación CTVM. La estación se encuentra cerca de una capilla británica donde se aprecian letreros de alta tensión, en la calzada podemos observar un puente y a pocos metros la estación del metrobús Revolución.....	44
18. ICVM_2018-07-10/00.....	45
19. Estación ICVM. La estación se encuentra adentro de una escuela, muy cerca de los edificios.	46
20. VRVM_2018-07-07/00.....	46
21. Estación VRVM. La estación se encuentra en un asilo cerca de un IMSS y entre estructuras de un nivel.....	47
22. APVM_2018-07-10/00.....	48
23. BJVM_2018-07-07/00.....	49
24. Estación BJVM. La estación se encuentra adentro de una casa de cultura entre dos edificios.	49
25. THVM_2018-07-07/00.....	50
26. TXVM_2018-07-08/00.....	51
27. Estación XCVm. La estación se encuentra cerca de un árbol grueso y alto, atrás hay un salón de clases y a un lado se encuentra un complejo departamental.....	51
28. XCVm_2018-07-08/00.....	52
29. AMVM_2019-05-15/01.....	53
30. AOVM_2018-07-07/00.....	54
31. ATVM_2019-05-11/00.....	54
32. AZVM_2020-01-01/00.....	55
33. CJVM_2018-07-07/00.....	56

34. Estación CJVM. La estación se encuentra en una escuela, al lado de estructuras altas y cerca de un río.	56
35. INVM_2018-07-11/02.	57
36. MAVM_2018-07-21/00.	57
37. MCVM_2020-01-08/19.	58
38. MHVM_2018-08-03/00.	59
39. Estación MHVM. La estación se encuentra adentro de un panteón, en una zona despejada, al lado tiene un edificio de un nivel.	59
40. MPVM_2020-01-01/00.	60
41. MZVM_2018-07-09/00.	60
42. PBVM_2018-07-07/00.	61
43. Estación PBVM. La estación se encuentra cerca de una torre de radar.	61
44. PTVM_2020-01-06/21.	62
45. TLVM_2018-07-07/00.	63
46. TOVM_2018-07-07/00.	63
47. VTVM_2018-07-07/00.	64
48. Estación VTVM. La estación se encuentra en un espacio despejado cerca de un árbol y a pocos metros de una sala de ordeño.	64
49. ZUVM_2019-05-11/00.	65
50. Estación BJVM (Benito Juárez). Ubicada en Zona II (Zona de Transición).	66
51. Estación COVM (Coyoacán). Ubicada en Zona II (Zona de Transición). No registró datos.	66
52. Estación CTVM (Cuauhtémoc). Ubicada en Zona III (Zona del Lago).	67
53. Estación ICVM (Iztacalco). Ubicada en Zona III (Zona del Lago).	67
54. Estación IPVM (Iztapalapa). Ubicada en Zona I (Zona de Lomas). No registró datos.	67
55. Estación MHVM (Miguel Hidalgo). Ubicada en Zona I (Zona de Lomas).	68
56. Estación PBVM (Peñón de los Baños). Ubicada en Zona III (Zona del Lago).	68
57. Estación XCVN (Xochimilco). Ubicada en Zona II (Zona de transición).	68
58. Estación CJVM (Cuajimalpa). Ubicada en Zona I (Zona de Lomas).	69

59. Estación VTVM (Valle de Teotihuacán). Ubicada en Zona I (Zona de Lomas).....	69
60. Disponibilidad de datos. Los tres gráficos que observamos representan la disponibilidad de datos (en color rojo) en cada estación (indicada en el eje Y) y la fecha en que fue registrado (indicado en el eje X), los espacios en blanco representan los días en los que no hubo registro.	70
61. Interferograma. Este gráfico muestra las funciones de correlación cruzada (CCF) entre un par de estaciones frente al tiempo. Incluye el CCF diario o movimiento apilado por medio de una imagen.....	71
62. CCF vs Tiempo. Este gráfico muestra las funciones de correlación cruzada (CCF) frente al tiempo. Incluye el CCF diario o movimiento apilado por medio de ondulaciones.	71
63. MWCS. Este gráfico muestra el resultado de los cálculos de MWCS en dos imágenes superpuestas. Uno es el dt calculado frente al desfase de tiempo y el otro es la coherencia. La imagen se construye apilando horizontalmente los MWCS de diferentes días. Los dos paneles de la derecha muestran la desviación media y estándar por desfase de tiempo. Los desfases de tiempo seleccionados por el cálculo de dt/t se presentan con líneas horizontales verdes, y la coherencia mínima o la dt máxima están en rojo.....	72
64. Distancia. Entre estaciones tomando un stack de referencia.....	72
65. DV/V. En la siguiente figura podemos observar tres diagramas de la variación anual en dv/v (%) para cada año analizado (2018, 2019 y 2020), en seis pilas de ventanas móviles diferentes (18 días).	73
66. Diagrama de bloques donde se representa los elementos del procesado de la técnica de obtención de parámetros del acuífero mediante datos de vibración ambiental. Primero se obtienen los datos de las estaciones sísmicas y se calculan los coeficientes de cross-correlación para obtener las funciones dv/v como función del tiempo. El código libre MSNOISE permite hacer este análisis de forma eficiente. El grupo de trabajo tiene amplia experiencia en este procesado. Después, se realiza un análisis de inferencia Bayesiana con las ecuaciones (27) y (28). De esta forma se encuentran dos parámetros hidráulicos que se integran para los modelos geológicos. Finalmente se integran en ecuaciones de balance mediante códigos de elemento finito para estimar escenarios de sistemas de flujo subterránea.....	3

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Resumen de la visita de campo y el análisis de las estaciones de la RSVM.	10
2. Configuración general de MSNoise.	39

Capítulo 1. Introducción

El Valle de México (VM), ubicado en la parte oriental del cinturón volcánico Trans-Mexicano (TMVB), es el centro político y económico de México, así como la zona más poblada del país. El 20% de la población total vive en el área metropolitana del VM, (INEGI, 2022). La Ciudad de México (y sus alrededores) está construida sobre un antiguo suelo lacustre, la cual es una zona de alto contraste desde un punto de vista geológico y económico.

El Valle de México tiene una red digital regional desplegada por el Instituto de Geofísica de la UNAM. La Red Sísmica del Valle de México (RSVM) cuenta con 30 estaciones, de las cuales 14 tienen sismómetros de banda ancha con respuesta de 30 segundos, digitalizador integrado y antena GPS de 24 bits; las 16 restantes tienen sismómetros con respuesta a 60 segundos y un digitalizador de 6 canales, con antena GPS y transmisión a Ethernet. En 2015 se incorporó a cada estación un sensor de aceleración con respuesta desde DC a 200Hz, 0.5G (Servicio Sismológico Nacional, 2022). Gracias a esta red, ahora sabemos con precisión cuales son las principales áreas sísmicas del VM.

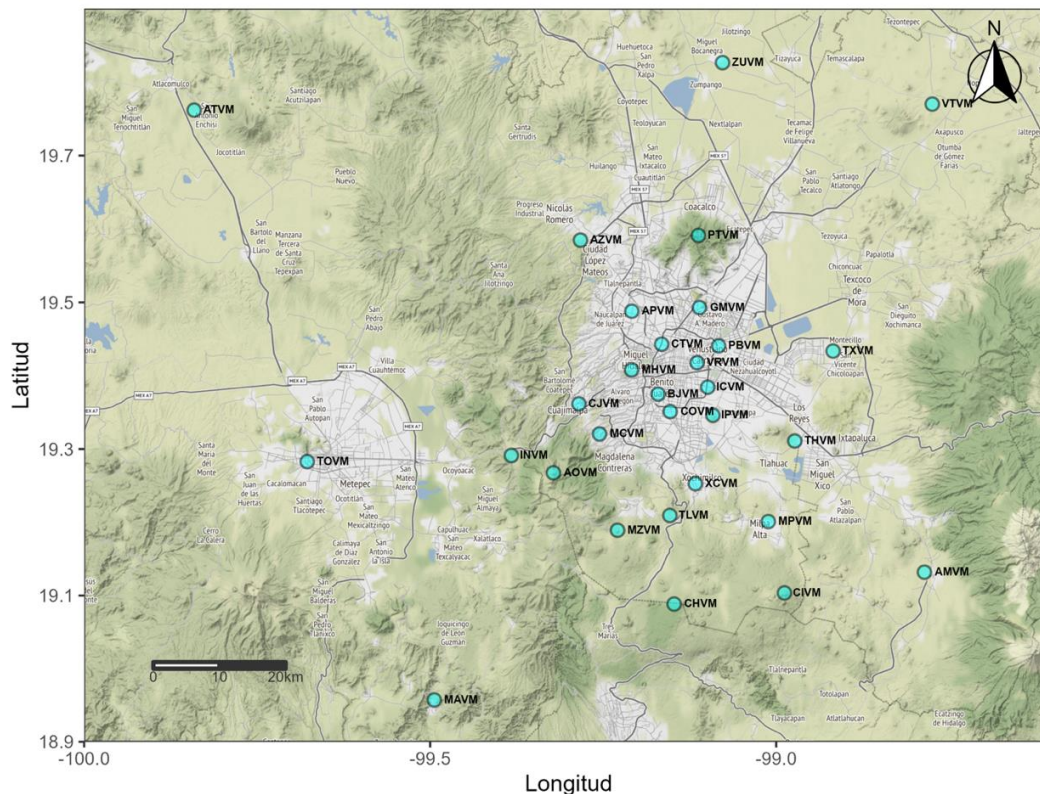


Figura 1. Mapa de la RSVM. Se muestra la ubicación de las 30 estaciones que comprenden la Red Sísmica del Valle de México.

Otras instituciones, como el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el CIRES (Centro de Instrumentación y Registro Sísmico) operan redes acelerométricas. Recientemente dichas instituciones actualizaron de 16 a 31 estaciones de movimientos fuertes, las cuales, han proporcionado datos en tiempo real de registros acelerométricos del suelo de la Ciudad de México, como los generados por los grandes terremotos ($M > 7$), por ejemplo el sismo de Tehuantepec del 08 de septiembre de 2017 ($M_w = 8.2$) o el sismo del 19 de septiembre de 2017 ($M_w = 7.1$) que tuvieron su hipocentro fuera del Valle de México, teniendo importantes implicaciones para los propósitos de protección civil. Por otro lado, en los últimos 10 años se han realizado importantes esfuerzos para dotar al VM de una red sísmica con sensores de velocidad, capaz de detectar tanto la sismicidad de baja magnitud originada en esta zona ($M < 4$), como los eventos de gran magnitud ($M > 6$) que ocurren principalmente a lo largo del margen de la zona de subducción. Incluso esta red es capaz de registrar de forma continua la vibración ambiental (Quintanar et al., 2018)

Es evidente el beneficio que esta red ha brindado al conocimiento de la sismicidad en el VM y sus características. Sin embargo, aún quedan muchos desafíos por enfrentar debido a las condiciones únicas del subsuelo que prevalecen en la cuenca del Valle de México, como la determinación de un modelo de velocidad apropiado, ya que los sitios de muy baja velocidad son aquellos donde ocurren las mayores amplificaciones y esto se ha correlacionado fuertemente con los efectos de sitio y el riesgo sísmico.

Cuando ocurre un evento sísmico lejano, el frente de onda es casi plano y las ondas inciden de forma oblicua, al transmitirse hacia los sedimentos blandos de muy baja velocidad, dichas ondas tienden a propagarse casi verticalmente a través de los depósitos de suelo hasta llegar a la superficie. El camino ascendente de las ondas elásticas en los suelos está gobernado, en forma importante, por la distribución horizontal de la velocidad de propagación de la onda de corte, y finalmente la amplificación del movimiento del terreno depende de varios factores, especialmente del contraste de impedancias de las capas superficiales, ahí radica la importancia de conocer la variación de velocidad de las ondas de corte contra profundidad en depósitos blandos.

La Ciudad de México y sus alrededores se ubican dentro de una cuenca que comprende el antiguo lago Texcoco y los lagos Xochimilco-Chalco. Estos lagos han desaparecido, en gran parte, debido a la extracción de agua subterránea como a la recuperación de tierras para el desarrollo urbano. Así, mientras que la parte periférica de la ciudad está sustentada por rocas y depósitos de suelo duro (capa de roca volcánica sobre roca blanda con una velocidad de onda de corte de 450 m/s a 600 m/s), la parte central de la ciudad está ubicada sobre depósitos de arcilla lacustre blanda de espesor variable (Seed et al., 1987).

Desde el punto de vista geológico y geotécnico, se distinguen claramente tres tipos principales de suelo: la zona del lago, que consta entre 20 y 60 m de depósitos de arcilla altamente compresible y con alto contenido de agua, sustentada por los llamados depósitos profundos, formados por capas rígidas de arenas limosas cementadas; la zona de lomas, formada por flujos volcánicos y la zona de transición compuesta por estratificaciones heterogéneas de capas aluviales arenosas y limosas intercaladas con capas arcillosas. Esto conduce a la variación de los periodos dominantes alrededor de la ciudad, que están estrictamente relacionados con la velocidad de onda de corte del suelo.

Para efectos de este trabajo, es importante destacar la diferencia entre las definiciones de periodo dominante, periodo fundamental y periodo característico, lo cual también se transmite a frecuencia dominante, fundamental y característica. Comúnmente esta nomenclatura puede variar debido a que no ha habido un consenso entre los investigadores. En primera definimos al periodo dominante como el periodo de vibración que depende del espesor sedimentario de la cuenca del antiguo Lago de Texcoco (Lunedei y Malischewsky, 2015). El periodo fundamental es aquel que está relacionado a la amplitud máxima del espectro (Bard et al., 2008; Pinzón et al., 2021). Por último, el periodo característico es el que depende de la profundidad de una capa rígida, la cual puede ser diferente al espesor sedimentario de la cuenca del antiguo Lago de Texcoco, por ejemplo, podría ser un periodo de vibración de estratos muy profundos o de estratos muy someros (Kramer, 1996).

1.1 Antecedentes

El ruido sísmico, vibración ambiental o microtemores es una señal continua, producida por fuentes diferentes como ruido antropogénico, mareas, viento, entre otras, las cuales no están relacionadas entre sí, a diferencia de las señales sísmicas producidas por fuentes puntuales bien localizadas, las cuales tienen duración finita, son coherentes y la relación de sus retardos está definida por su espectro de fase (Chávez-García y Montalva, 2014).

Kanai y Tanaka (1954), fueron los primeros en proponer la utilización de los registros de microtemores para determinar los efectos de sitio, ellos concluyeron que estos registros arrojaron periodos dominantes similares a los obtenidos con señales de movimiento fuerte. Estos microtemores, están compuestos principalmente por ondas Rayleigh y ondas de cuerpo. Posteriormente diversos investigadores como Aki (1957), hicieron estudios sobre el uso de microtemores para determinar las características dinámicas del

suelo. Actualmente el método de Nakamura (1989), es uno de los más utilizados debido a su fácil implementación, tanto para el trabajo de campo como para el procesamiento de datos.

No existen estudios previos de variación de velocidad realizados en el Valle de México, sin embargo, el trabajo del Dr. A. Ojo (comunicación personal, 20 de abril de 2021) y Lecocq et al. (2014) han servido como punto de partida para el presente proyecto, ya que consisten en estimar los cambios temporales de velocidad (dv/v) a partir del ruido sísmico.

Se tomó como referencia el trabajo de Hillers et al. (2015), ellos investigaron posibles mecanismos que originan cambios en la velocidad de las ondas sísmicas (dv/v) a partir del análisis de ruido sísmico en el área de la falla de San Jacinto que se encuentra en el sur de California al oeste de los Estados Unidos. Analizaron 6 años de datos de ruido sísmico registrado por 10 estaciones y estudiaron la interrelación entre éstos, las propiedades del ruido sísmico y los datos ambientales como velocidad del viento, lluvia, nivel del agua, presión y temperatura.

Encontraron variaciones de velocidad estacionales de pico a pico de $\pm 0.2\%$ en el rango de periodos de 0.5 a 2 segundos, asociados con cambios en las propiedades de la roca. En su trabajo Hillers et al. (2015) no presentan un análisis de sensibilidad para el rango de variación de la velocidad estacional, sin embargo, analizaron los cambios de velocidad con tres técnicas diferentes y en todos los casos sus resultados eran consistentes.

Recientemente Clements y Denolle (2018) midieron dv/v en el Valle de San Gabriel, California, a partir de una correlación cruzada de los componentes horizontal y vertical, en su estudio indican que dv/v reproduce los cambios en el nivel del agua subterránea. Debido a la relación espacial que tiene dv/v con los desplazamientos de la superficie vertical y la deformación medidos con GPS, sus resultados predijeron con éxito el volumen de agua perdida en el Valle y nos aportan un nuevo enfoque para monitorear el almacenamiento de agua subterránea.

El trabajo de Clements y Denolle (2018) abre una nueva avenida de investigación en la sismología, ya que es posible modelar las cuencas hidrológicas mediante registros sísmicos. Para nosotros, la importancia de este estudio radica en la demostración de que la velocidad de las ondas sísmicas es sensible a la cantidad de agua en el suelo.

1.2 Justificación

Las amplitudes de los periodos fundamentales pueden servir para conocer fenómenos asociados a los cambios estacionales, como por ejemplo fenómenos hidrológicos, termoelásticos o fenómenos de cambios de esfuerzos estáticos en periodos de sismos grandes.

En la Figura 2 mostramos los efectos asociados a las variaciones en los periodos de vibración debido a fenómenos meteorológicos, así como su relación con el subsuelo de la Ciudad de México. También destacamos que existe una relación directa con el tamaño de las estructuras y el espesor de los sedimentos blandos.

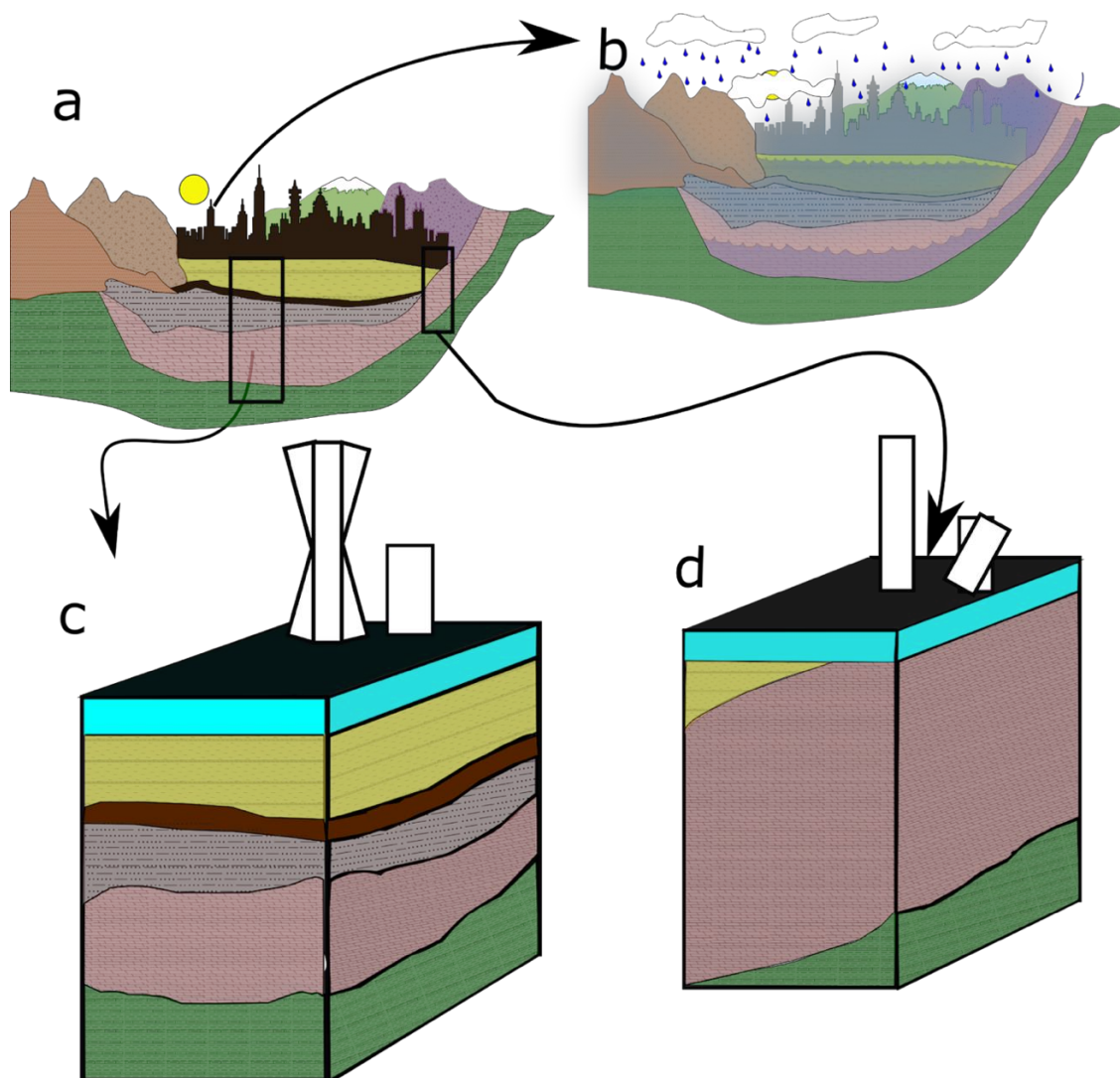


Figura 2. Diagrama esquemático del subsuelo del valle de México. a) Valle de México en estado estacionario, b) representación del Valle de México en época de lluvias y sus cambios en el subsuelo, c) y d) diferentes efectos en las edificaciones dependiendo de la profundidad de los estratos blandos.

Se utiliza la técnica de ruido sísmico porque a diferencia del uso de fuentes activas, ésta aprovecha el muestreo continuo de la vibración ambiental, utilizando registros de las estaciones sísmicas, mediante un apilamiento en ventanas de un tiempo fijo, por ejemplo 30 minutos. El método ha demostrado su capacidad para evidenciar cambios físicos temporales en zonas de falla ((Wegler y Sens-Schönfelder, 2007; Brenguier et al., 2008), el entorno lunar (Sens-Schönfelder y Wegler, 2011), o para detectar errores instrumentales (Stehly et al., 2007; Sens-Schönfelder, 2008). Además, es posible obtener las velocidades de onda de corte mediante un análisis de dispersión de ondas superficiales. La velocidad de las ondas de corte (V_s) tiene múltiples aplicaciones como la determinación del módulo de rigidez al cortante ante pequeñas deformaciones ($\mu = V_s^2 \rho$), la evaluación del potencial de licuación de suelos y el análisis de asentamientos e interacción suelo-estructura (Andrus et al., 2004). Desde otro ángulo y debido a la historia que ha enfrentado la Ciudad de México se necesita un mejor conocimiento del peligro sísmico para propósitos de Protección Civil.

1.3 Hipótesis

Las propiedades físicas del suelo como la velocidad de onda de corte y los periodos de vibración fluctúan a lo largo del tiempo y estas variaciones pueden influir en la respuesta dinámica del suelo en caso de ocurrencia de sismos fuertes.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar mediante el procesamiento de tres años de datos proporcionados por la Red Sísmica del Valle de México (RSVM) la existencia de variaciones temporales en los parámetros físicos del suelo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar por medio de técnicas de HVSR si hay variaciones en los periodos de vibración.
- Analizar por medio de técnicas de Cross-correlación si hay variaciones de velocidad.

- Comparar los resultados obtenidos del procesado con un marco de referencia para verificar la presencia de variaciones.
- Detallar características puntuales del lugar donde se encuentran las estaciones a partir de una visita de campo.
- Relacionar los resultados a los posibles fenómenos que llegasen a influir en las fluctuaciones.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Método sísmico HVSr (Horizontal to vertical Spectral Ratio)

El método HVSr o método de Nakamura consiste en la utilización de microtemores para la posterior estimación de la amplificación del movimiento horizontal de las capas superficiales durante la ocurrencia de terremotos. Su principal ventaja es el uso de una sola estación de registro con tres componentes, sin necesidad de esperar la ocurrencia de un terremoto, ya que, el ruido sísmico ambiental es el que provee la información. HVSr relaciona las componentes horizontales y verticales de las microvibraciones ambientales en la superficie del terreno, la señal es procesada y analizada con el fin de obtener el periodo fundamental del sitio. Incluso, algunos autores (Rigo et al., 2021), proponen métodos para corregir HVSr y estimar la amplificación relativa del sitio.

Los registros de ruido se separan en sus componentes horizontales y verticales; éstas se escriben en un archivo demultiplexado en formato MINISEED por día, para un análisis más detallado se elaboró una rutina de cómputo que separara cada día en 24 horas. Una vez discriminados los archivos incompletos, procedemos a calcular la razón espectral (H/V) en cada hora, siguiendo las recomendaciones de la guía SESAME (Bard et al., 2008). Para una descripción completa de la metodología ver Anexo A.

Del procesamiento se obtienen un aproximado de 150,000 figuras, por lo que se utilizaron diferentes técnicas para el análisis de los datos, esto para facilitar y eficientar el análisis de éstas. Por ejemplo, se realizó un proceso automático que graficaba en una sola figura el pico máximo registrado. La descripción de esta técnica se encuentra en el Anexo B. En cambio, para un análisis cuidadoso de los datos, como la visualización de los periodos más cortos, por medio de un programa de cómputo las figuras fueron convertidas a un video por estación. Los videos se encuentran en el siguiente enlace <http://repositoriobiblioteca.cicese.mx/jspui/handle/123456789/35>.

El mapa de la Figura 3 muestra la localización de algunas estaciones de la RSVM que se encuentran en la parte central de la cuenca del Valle de México, donde se resalta la zonificación del sitio. Es importante aclarar que el Valle de México también denominado la cuenca del Valle de México es una región más grande que comprende todo el sistema hidrológico de una cuenca endorreica limitada por las sierras que

definen los parteaguas de los escurrimientos. Por lo tanto, la Zona I, II y III de la Figura 3 son solamente una descripción geotécnica de un sistema mayor.

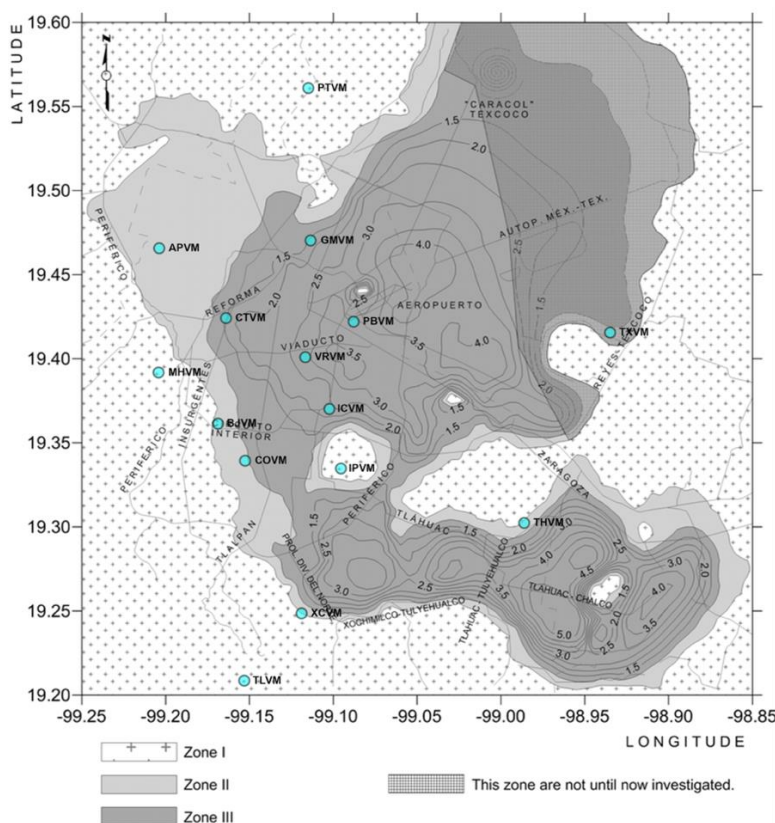


Figura 3. Mapa de periodos dominantes. La Zona I. Se localiza lejos de lo que fue el Lago de Tenochtitlán, corresponde a las alcaldías con áreas de cerros, lomas y pedregales con relieves resistentes. Zona II. Son lugares con depósitos arenosos que tienen cerca de 20 metros de profundidad, que son mucho menos estables. Zona III. Esta zona es la que supone más riesgo, puesto que aquí las ondas se maximizan, con suelo de arcillas. También se representan los periodos dominantes reportados por Martínez et al. (2015), quienes describen las características litológicas de cada una de las zonas.

2.2 Método de cross-correlación

Para el cálculo de las variaciones de la velocidad sísmica (dv/v) utilizamos el método de cross-correlación, el cual consiste en un análisis de interferometría sísmica donde se agrupan todos los pares de estaciones y se calcula su correlación a partir de la estimación los tiempos de retardo de los coeficientes de correlación dependiendo de las distancias entre cada par de estaciones. Los tiempos de retardo de los coeficientes de correlación apilados todo un año describen el valor de la velocidad promedio denominado v , en cambio los tiempos de retardo apilados en ventanas de 18 días corresponden a las variaciones de velocidad “perturbadas” también llamadas dv (ver Anexo A).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Resultados de HVSR

La Tabla 1 muestra un resumen del análisis detallado que se hizo en cada estación. En el Anexo C se encuentra una descripción exhaustiva de lo que ocurre en cada estación, algunas estaciones se comparan con los periodos dominantes que observamos en la Figura 3, las estaciones que no aparecen dentro del mapa se suponen con periodos dominantes menores a 0.5 segundos, sin embargo no lo tomamos como algo absoluto ya que se han registrado periodos de más de 1 segundo en Zona del Lomas (Lermo et al., 2020), también se incluyen características de la zona en donde se ubica la estación, algunas obtenidas a partir de una visita de campo (ver Anexo D); así como posibles fenómenos que estén asociados a las variaciones en caso de que hayan existido (Arroyo et al., 2013).

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos mediante la técnica de HVSR, divididos por estación.

Estación	Zona I, II, III	Periodo dominante (publicado)	Presenta variaciones estacionales	¿Visitada?	¿Efecto local en periodos cortos?	Cambios hidrológicos
APVM	II	0.8	SI	NO	SI	SI
BJVM	II	0.6	NO	SI	NO	NO
COVM*	II	1.2	-	SI	-	-
CTVM	III	1.5	NO	SI	NO	NO
GMVM*	III	1.8	-	NO	-	-
ICVM	III	2.1	NO	SI	NO	NO
IPVM*	I	0.4	-	SI	-	-
MHVM	I	0.4	SI	SI	SI	SI
PBVM	III	3.0	NO	SI	SI	SI
PTVM	I	0.4	NO	NO	NO	NO
THVM	II	0.5	NO	NO	NO	NO
TLVM	I	0.4	NO	NO	NO	NO
TXVM	II	0.9	NO	NO	NO	NO
VRVM	III	3.0	NO	NO	NO	NO

XCVM	II	0.5	NO	SI	NO	NO
AMVM	I	0.5**	NO	NO	SI	SI
AOVM	I	0.5**	SI	NO	SI	SI
ATVM	I	0.5**	NO	NO	NO	NO
AZVM	I	0.5**	NO	NO	NO	NO
CHVM*	I	0.5**	-	NO	-	-
CIVM*	I	0.5**	-	NO	-	-
CJVM	I	0.5**	NO	SI	SI	SI
INVM	I	0.5**	NO	NO	SI	NO
MAVM	I	0.5**	NO	NO	SI	NO
MCVM	I	0.5**	NO	NO	SI	SI
MPVM	I	0.5**	NO	NO	SI	SI
MZVM	I	0.5**	NO	NO	NO	NO
TOVM	I	0.5**	NO	NO	NO	NO
VTVM	I	0.5**	NO	SI	NO	NO
ZUVM	I	0.5**	NO	NO	SI	NO

* Estaciones que no registraron datos.

** Periodos dominantes estimados.

3.2 Resultados de Cross-correlación

MSNoise fue el programa de cómputo empleado para el cálculo de las correlaciones cruzadas, éste viene con herramientas de graficación por defecto. Para los propósitos de la presente tesis, solo se utilizaron los gráficos de Disponibilidad de Datos y el Diagrama dv/v . Las figuras analizadas, así como el resto de los gráficos por defecto se encuentran en el Anexo E.

El programa realiza la correlación por año, por lo tanto, se obtuvieron tres gráficos de disponibilidad de datos, las cuales sirvieron para corroborar que la rutina de cómputo de HVSR discretizó correctamente los registros. Los diagramas de dv/v se usaron para analizar el porcentaje de variación anual de la velocidad relativa, así como para asociar dicha variación con fenómenos hidrológicos (Clements y Denolle, 2018).

Capítulo 4. Análisis temporal

Debido a que el objetivo general del presente trabajo es estudiar los cambios temporales, presentamos a continuación un análisis que conecta los cambios de velocidad y de amplitud de H/V con fenómenos hidrológicos. Varios autores (Clements y Denolle, 2018; Tsai, 2011; etc) describen detalladamente diferentes procesos que involucran los cambios de dv/v con respecto a termoelasticidad, poroelasticidad y cambios hidrológicos, en nuestro caso los cambios poroelásticos e hidrológicos los consideramos en el mismo fenómeno y la parte termoelástica no será incluida debido a que sólo afecta regiones muy áridas donde el coeficiente de conductividad térmica controla las características elásticas de las rocas (Tsai, 2011).

4.1 Parte hidrológica

Se puede demostrar que los cambios de dv/v dependen de las variaciones de la presión de poro cuando expresamos las funciones de deformación de un medio elástico sujeto a una carga. Las ecuaciones de Berger (1975), descritas en el Anexo F, relacionan dv/v con los cambios de presión de poro para el caso hidrológico.

En las Figura 4, Figura 5 y Figura 6 se presentan las variaciones de velocidad relativa (dv/v) de los años 2018, 2019 y 2020, se superpusieron los valores de precipitación en la estación de Ciudad Universitaria, ya que no encontramos valores de precipitación en toda la cuenca y la información solicitada al SACMEX no se pudo utilizar, debido a que la información de pozos, así como los niveles freáticos es muy limitada y poco útil. Aunque no se observa una clara correlación entre precipitación y los cambios mínimos estimados además de no contar con información de pozos, la tendencia de las figuras muestra una posible relación entre la precipitación y los cambios de velocidad. La variación entre pico y pico es similar a la reportada por otros autores (Hillers et al., 2015), los valores se encuentran en un rango de $\pm 0.2\%$.

Los cambios de velocidad dv/v se hicieron utilizando todas las estaciones del Valle de México, por lo tanto, representan las variaciones hidrológicas de toda la cuenca. Sin embargo, un análisis hidrológico completo de la cuenca del Valle de México está fuera del alcance de la presente tesis, existe trabajo en proceso para integrar los resultados que hemos obtenido con el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM, quienes se han acercado para realizar estudios interdisciplinarios que nos permitan

modelar los flujos subterráneos de la cuenca del Valle de México a través de la información hidrológica que se puede inferir mediante la metodología que hemos presentado en este trabajo (Carciumaru y Ortega, 2022).

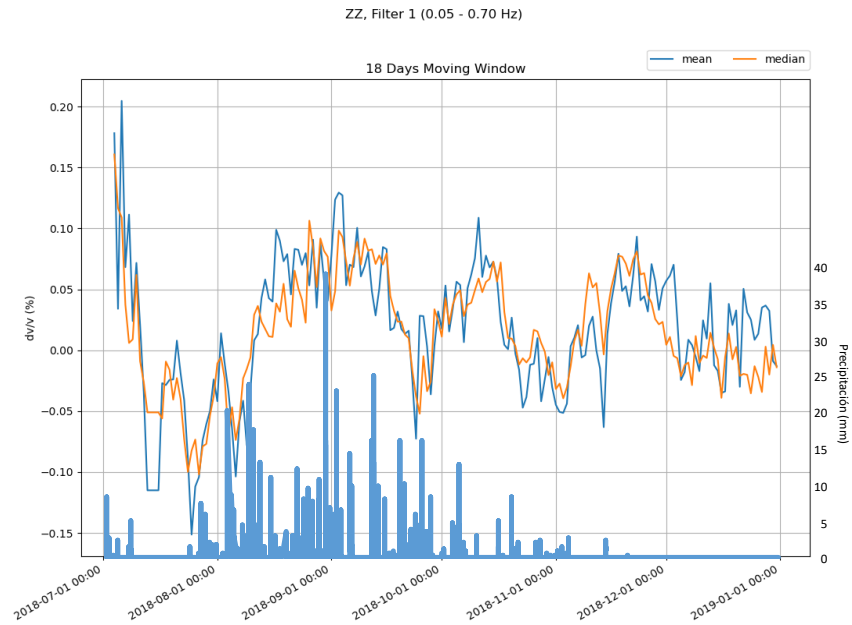


Figura 4. Series de tiempo de dv/v para la cuenca del Valle de México y valores de precipitación de la estación en la Ciudad Universitaria (2018).

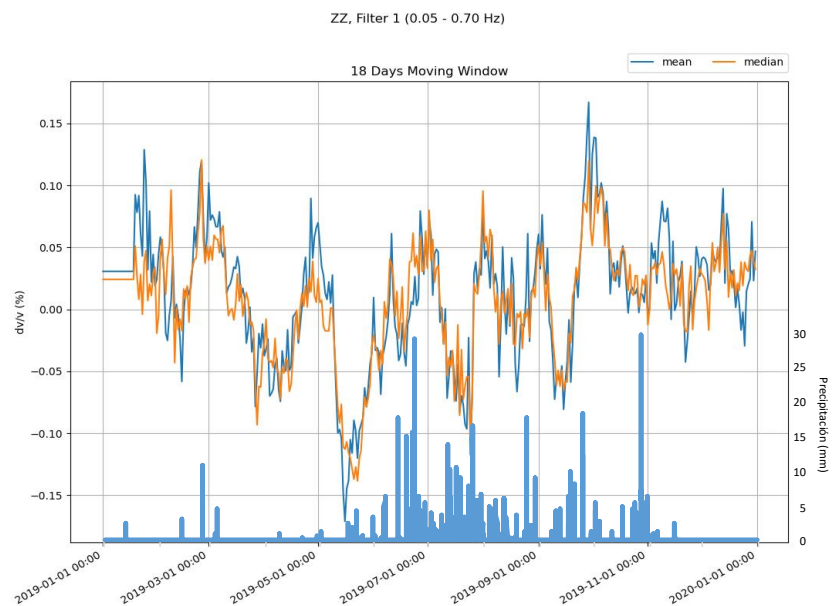


Figura 5. Series de tiempo de dv/v para la cuenca del Valle de México y valores de precipitación de la estación en la Ciudad Universitaria (2019).

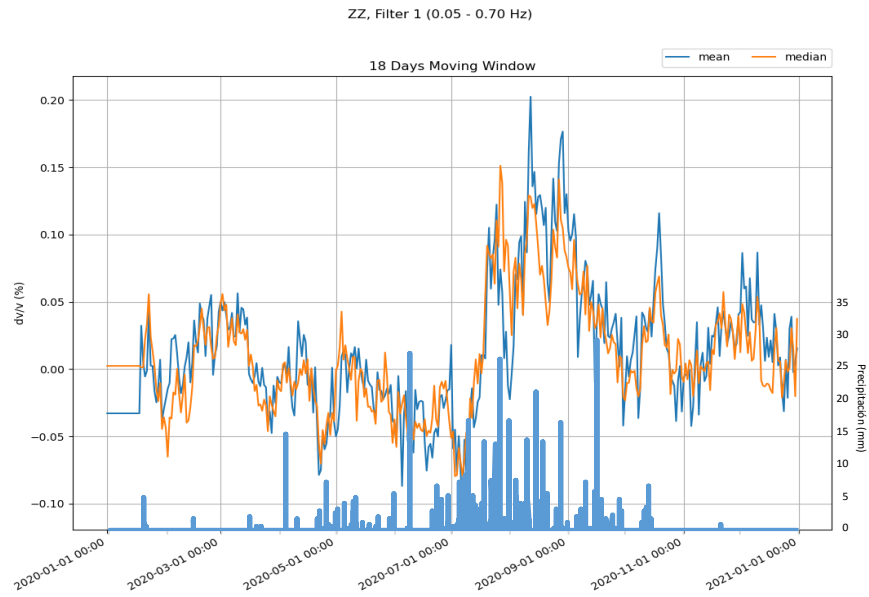


Figura 6. Series de tiempo de dv/v para la cuenca del Valle de México y valores de precipitación de la estación en la Ciudad Universitaria (2020).

Capítulo 5. Cambios terrestres en el agua

Este trabajo es el primero que reporta cambios en las amplitudes de H/V en relación con las variaciones de masas de agua en los flujos subterráneos. En esta sección comparamos los resultados del modelado de masas de agua mediante el satélite GRACE utilizando el análisis modal de H/V.

5.1 Modelado de masas de agua mediante GRACE

En la Figura 7 se observa la comparación de la relación de los modos superiores de vibración usando H/V y los datos gravimétricos GRACE y GRACE-FO de los cambios de masa de agua en el subsuelo. Hay que destacar que las amplitudes de H/V generalmente se descartan en los estudios de vibración ambiental, pero en este caso se escogieron las amplitudes del 4to modo de propagación (0.04 - 0.15 seg) porque claramente tenían fluctuaciones estacionales y se dividió entre el 1er modo que se mantenía virtualmente constante a lo largo del año. Esa relación de amplitudes se calculó en ventanas de 60 minutos para tres años. Por otro lado, el cálculo de desplazamiento de agua del subsuelo se realizó usando la metodología de Wahr et al. (1998) donde se estima el cambio de volumen de agua (Gt) codificado por Sutterley y Velicogna (2019). Las diferencias se deben a la variación de escalas, mientras las mediciones satelitales corresponden a zonas de más de 10 mil kilómetros cuadrados, los análisis de H/V son de solo unos cientos de metros alrededor del punto de medición. Los espacios donde no hay datos son problemas de transmisión y de almacenamiento.

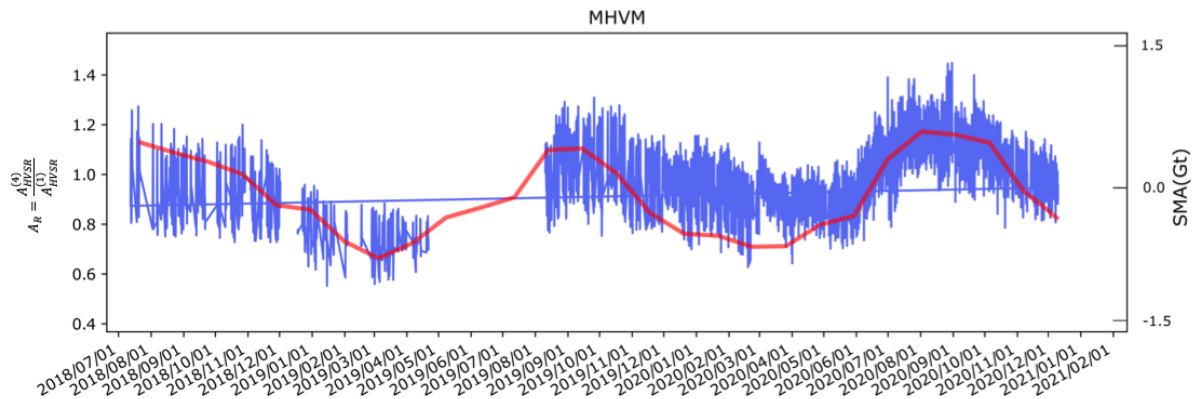


Figura 7. Relación de las amplitudes del método H/V de los modos superiores de amplitud y su comparación con el cambio de masa medido con el satélite GRACE para los años de 2018 a 2021 en un acuífero del centro de México.

Los datos gravitacionales GRACE y GRACE-FO están abiertos al público, están basados en dos satélites gemelos que miden la gravedad terrestre, diseñados para calcular una estimación de los cambios hidrológicos en el subsuelo (Figura 7). Se tienen mediciones mensuales desde 2002, estos valores tienen una resolución aproximada de 1° (111.321 km). Los datos se expresan en coeficientes de esféricos armónicos de orden 20 y dan una primera aproximación de los valores de profundidad hídrica estimada. El cálculo se hace de la siguiente manera, primero se obtienen los coeficientes de esféricos armónicos que representan los valores de cambio de gravedad en la zona del centro de México, después se obtienen los datos de 96 esféricos armónicos de 3 instituciones (JPL-NASA, GFZ-Alemania, CSR-Universidad de Texas), se hace un ajuste mediante una media aritmética y se elimina el ruido de fondo (Sutterley y Velicogna, 2019). Luego se obtienen datos de los satélites LAGEOS-1 y 2, Starlette, Stella y Ajisai, todos ellos tienen información atmosférica que permite hacer un ajuste que elimina la cantidad de humedad y precipitación que se encuentra en la superficie, a fin de calcular únicamente la cantidad de masa de agua que se desplaza en el subsuelo (Wahr et al., 1998). Recientemente hemos observado que los modos superiores miden el cambio de carga hidráulica de forma precisa, sin embargo solamente ocurre en el caso de acuíferos que se pueden relacionar con el periodo de vibración que según la profundidad de ese estrato específico, es decir, no existe un periodo específico que pueda correlacionar los cambios hidrológicos debido a que existen acuíferos a diferentes profundidades y por lo tanto, se encuentran relacionados a los periodos de vibración correspondientes. Entonces al ingresar esta información a los códigos numéricos que simulan los flujos subterráneos (FeFLOW, MODFLOW, etc.) podemos caracterizar un acuífero con un nivel de detalle sin precedente. Con la combinación de datos gravitacionales y datos de ruido ambiental se puede obtener una resolución de pocos kilómetros, por lo tanto, sirve para una modelación numérica de flujos subterráneos en los acuíferos de zonas áridas. En el Anexo F se ejemplifica un diagrama de bloques para hacer un estudio formal de flujos subterráneos para la modelación de acuíferos. Se encuentra trabajo en proceso para poder entender el verdadero significado de la variación de 0.1 segundos que corresponde a los cambios de masa de agua del Valle de México.

Capítulo 6. Interpretación geológica

En la presente tesis se menciona una posible relación entre las variaciones y los cambios en flujos subterráneos, lo que implica que se aclare si se incluyen los acuíferos en general. Además, creemos que trabajos interdisciplinarios de sismología, geotecnia, geohidrología y geología son la clave para entender los procesos hidrológicos de la ciudad más importante de México.

Hay muchos trabajos que describen la estratigrafía de la cuenca y podrían haber sido consultados para tener una mejor descripción del subsuelo, pero a pesar de todos estos estudios todavía no existe un modelo preferente para el Valle de México. Existe una controversia entre la cantidad y la extensión de acuíferos en el Valle de México. Por ejemplo, Rodríguez y Ochoa (1989), mencionan que el subsuelo de la Cuenca de México se caracteriza por una estratigrafía que permite la existencia de un sistema multiacuífero de tres grandes cuerpos, que si bien tienen relación, sobre todo en la recarga, las propiedades petrofísicas varían al variar el material que aloja el agua. Sin embargo, otros autores creen que el sistema es muy complejo, incluyendo acuíferos milenarios con periodos de recarga de decenas de miles de años confinados bajo los sistemas de acuíferos superficiales, además de los cuerpos subvolcánicos que se encuentran sobre los acuíferos.

6.1 Rocas de Basamento

También es importante tener conocimiento de la profundidad de las rocas impermeables, es decir, conocer la geometría de la cuenca, por esta razón presentamos una descripción de la litología de las rocas de basamento.

La geología del Valle de México está controlada por los depósitos recientes del Cenozoico, vulcanitas y lavas del Pleistoceno (Mooser, 2018). Es importante destacar que la distribución de estas unidades litológicas es heterogénea y en ocasiones resulta un trabajo arduo entenderlo. Las Tobas y Lahares del Pleistoceno cubren rocas de baja velocidad por lo que es difícil deducir la verdadera estratigrafía inferior. Se han observado 3 acuíferos en el VM, el acuífero superior está conformado por los sedimentos lacustres superficiales, el acuífero medio por la formación Tepozteco con profundidades de 1000 a 2000 metros formada por abanicos aluviales intercalados por lahares y lavas, y el acuífero inferior por formaciones calizas en el basamento de 2000 a 2500 metros.

Las vulcanitas del Plioceno como el Peñón y el cerro del Tepeyac se encuentran sobre depósitos lacustres (e.g. Taximay), es decir, las zonas de lomas no son completamente rocas de basamento que puedan ser consideradas como sitio de referencia. Las rocas inferiores de basamento se encuentran plegadas (Oligoceno medio) y en ocasiones existen fallas del Pleistoceno que cortan esta serie de rocas.

Capítulo 7. Discusión

Recientemente Khadangi et al. (2021) estudiaron el sitio llamado The Field Research Station (FRS) mediante técnicas HVSR a lo largo de tres años. Khadangi et al. (2021) demostraron que las frecuencias entre 7-8 Hz son las que tienen variaciones significativas a lo largo del año, ellos no observaron variaciones a frecuencias menores y en el caso de FRS estas frecuencias corresponden a los primeros 5 metros. En sus observaciones, Khadangi et al. (2021) proponen que la presencia de agua es la responsable de los cambios observados en los resultados de HVSR. En cambio, nosotros encontramos cambios en todos los periodos y los podemos asociar a los diferentes acuíferos que controlan el Valle de México. Esto no significa que sea el único fenómeno que altera los cambios de las propiedades dinámicas del sitio de forma estacional, por ejemplo, existe evidencia de que las perturbaciones de velocidad están controladas por sismos de magnitud moderada a distancias menores a los 100 km (M. Denolle, comunicación personal, 12 de septiembre de 2022).

Observamos que las variaciones de periodos dominantes son bajas, el rango de variación es de 0.1 segundos a lo largo de un año. Esta variación no impacta en estructuras importantes y no tiene relevancia en los mapas de zonificación del VM. Aunque existen cambios de velocidad a lo largo del año, esperábamos que los espesores de las capas que vibran fueran constantes, es decir, que la capa vibratoria estaría controlada por sedimentos y una capa dura. Sin embargo, los estudios muestran que este espesor no es constante sino variable y además los espesores que cambian son del orden de 2 a 10 metros. Estas estimaciones se hacen de forma indirecta debido a que conocemos exclusivamente el periodo de vibración y las velocidades de corte.

Por otro lado, no se encuentra una relación lineal entre las variaciones de velocidad y las variaciones de periodos dominantes. Esta relación debe ser evidente y estar sustentada en las ecuaciones de transferencia donde el periodo dominante T_0 se relaciona con el espesor y la velocidad de corte mediante el llamado periodo de sitio característico $T_0 = 4H/V_s$. Hay que recordar que en el VM los periodos dominantes tienen rangos de 0.5-4.5 segundos y observamos que los cambios estacionales pueden ocurrir en cualquier periodo, incluso en los periodos dominantes. Es importante en un futuro hacer un estudio de mecánica de suelos en diferentes épocas del año para los casos en los cuales los periodos dominantes aumentan significativamente su amplitud. Esto se debe a que, en general, no existen leyes en los códigos de construcción de la Ciudad de México donde recomienden revisar los cambios de la estructura de velocidad de corte a lo largo de un año. Un espectro de diseño sísmico depende de la estructura de

velocidades sísmicas del sitio, sin embargo, se estima la amplificación de las ondas sísmicas a partir de la combinación de los espesores y las velocidades de onda de corte sin importar la época del año. Pero como hemos demostrado en este trabajo las velocidades y las amplitudes cambian, por lo que es necesario un estudio más detallado para los casos en los cuales se identifiquen fluctuaciones en los periodos dominantes.

Capítulo 8. Conclusiones

Finalmente presentamos las siguientes conclusiones generales:

Los cambios más evidentes en la velocidad y los periodos de vibración a lo largo de tres años se encuentran relacionados con cambios hidrológicos, descartando los fenómenos termoelásticos y de esfuerzos estáticos de Coulomb. Esto ocurre a cualquier profundidad donde se encuentre asociado un fenómeno estacional.

Las variaciones de velocidad se realizaron a través de un promedio de todas las estaciones del Valle de México y representan cambios en toda la región, en cambio los estudios de H/V fueron específicos para cada estación. Para el caso de las variaciones de velocidad encontramos que hay variaciones significativas a lo largo de los tres años y posiblemente están correlacionadas con fenómenos meteorológicos e hidrológicos. No se encuentra evidencia de cambios de velocidad producidos por sismos lejanos ni tampoco por cambios termoelásticos.

Para los estudios de H/V encontramos que posiblemente se relacionan a cambios en flujos subterráneos y en algunos casos representa claramente las variaciones de la cantidad de agua contenida en el subsuelo y medida mediante datos satelitales de la gravedad terrestre que se encuentran calibrados para cuantificar las variaciones de los niveles piezométricos en los acuíferos. A pesar de que la resolución de los datos satelitales es a un nivel regional de cientos de kilómetros, se observan variaciones temporales similares del nivel de agua subterránea con los espesores de los periodos de vibración medidos con H/V.

En muchos casos los periodos dominantes no coinciden con los periodos fundamentales observados, estas variaciones siempre se pueden atribuir a los casos especiales de cada estación.

Es importante realizar estudios de efectos de sitio antes de llevar a cabo una microzonificación sísmica, considerando que éstos nos entregan los parámetros a considerar, tales como: geología del sitio, propiedades dinámicas del suelo y efectos antropogénicos asociados.

Tomando en cuenta lo anterior, sería conveniente generar mapas dinámicos donde se reflejen los cambios temporales de los efectos de sitio.

Literatura citada

- Aki, K. 1957. Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, pp. 415–456. Recuperado el 14 de enero de 2022, de <https://es.scribd.com/document/436020440/Space-and-time-spectra-of-stationary-stochastic-waves-with-special-reference-to-microtremors>
- Andrus, R. D., Stokoe, K. H., y Hsein Juang, C. 2004. Guide for Shear-Wave-Based Liquefaction Potential Evaluation. *Earthquake Spectra*, 20(2), pp. 285–308. doi: 10.1193/1.1715106
- Arroyo, D., Ordaz, M., Ovando-Shelley, E., Guasch, J. C., Lermo, J., Perez, C., Alcantara, L., y Ramírez-Centeno, M. S. 2013. Evaluation of the change in dominant periods in the lake-bed zone of Mexico City produced by ground subsidence through the use of site amplification factors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Elsevier, 44, pp. 54–66. doi: 10.1016/J.SOILDYN.2012.08.009
- Bard, P., Acerra, C., Aguacil, G., y Anastasiadis, A. 2008. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), pp. 1–2. Recuperado el 10 de noviembre de 2022, de https://www.researchgate.net/publication/235623175_Guidelines_for_the_implementation_of_the_HV_spectral_ratio_technique_on_ambient_vibrations_measurements_processing_and_interpretation
- Benito, B. y Cabañas, L. 1999. Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica. *Física de La Tierra*, 11, pp. 49–79. Recuperado el 14 de noviembre de 2022, de <https://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/download/FITE9999110049A/12072>
- Berger, J. 1975. A note on thermoelastic strains and tilts. *Journal of Geophysical Research*, 80(2), pp. 274–277. doi: 10.1029/JB080i002p00274
- Berger, J. 1975. A note on thermoelastic strains and tilts. *Journal of Geophysical Research*, 80(2), pp. 274–277. doi: 10.1029/JB080i002p00274
- Brenguier, F., Campillo, M., Hadziioannou, C., Shapiro, N. M., Nadeau, R. M., y Larose, E. 2008. Post-seismic relaxation along the San Andreas fault at Parkfield from continuous seismological observations. *Science*. American Association for the Advancement of Science, 321(5895), pp. 1478–1481. doi: 10.1126/SCIENCE.1160943/SUPPL_FILE/BRENGUIER.SOM.PDF
- Buendía Sánchez, L. M. y Reinoso Angulo, E. 2019. Análisis de los daños en viviendas y edificios comerciales durante la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 101, pp. 19–35. doi: 10.18867/ris.101.508
- Carciumaru, D. y Ortega, R. 2022. Cambios hidrológicos a partir de mediciones geofísicas: una alternativa para la modelación de flujos subterráneos. En *Puerto Vallarta. Unión Geofísica Mexicana*.
- Chávez-García, F. J. y Montalva, G. A. 2014. Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y Proyectos*. Universidad Católica de la Santísima Concepción, 16, pp. 6–30. doi: 10.4067/S0718-28132014000200001
- Clements, T. y Denolle, M. A. 2018. Tracking Groundwater Levels Using the Ambient Seismic Field. *Geophysical Research Letters*, 45(13), pp. 6459–6465. doi: 10.1029/2018GL077706

- Comisión Federal de Electricidad. 2008. Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por sismo. 2008a ed. IIE, México, D.F.
- de Bragança Pereira, C. A. y Stern, J. M. 2001. Model selection: Full Bayesian approach. *Environmetrics*, 12(6), pp. 559–568. doi: 10.1002/env.482
- Hillers, G., Ben-Zion, Y., Campillo, M., y Zigone, D. 2015. Seasonal variations of seismic velocities in the San Jacinto fault area observed with ambient seismic noise. *Geophysical Journal International*, 202(2), pp. 920–932. doi: 10.1093/gji/ggv151
- INEGI. s/f. Población. Cuéntame de México. Recuperado el 10 de noviembre de 2022, de <https://www.cuentame.inegi.org.mx/poblacion/default.aspx?tema=P>
- 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. En XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Cancún, Quintana Roo. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. Recuperado el 14 de noviembre de 2022, de https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1_Reunion_Cancun/2_XXVI_Reunion_Nacional/6_Geotecnia_sismica/ISAGBH_1.pdf
- Kanai, K. y Tanaka, T. 1954. Measurement of the microtremor. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 32, pp. 199–209.
- Khadangi, L., Gilbert, H., Savard, G., Macquet, M., y Lawton, D. 2021, October. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr) Seasonal Variations at a Shallow CO₂ Injection Site, The CaMI Field Research Station in Alberta, Canada. AGU Fall Meeting 2021, New Orleans.
- Kramer, S. L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Lachet, C. y Bard, P. Y. 1994. Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42(5), pp. 377–397. doi: 10.4294/jpe1952.42.377
- Lecocq, T., Caudron, C., y Brenguier, F. 2014a. Msnoise, a python package for monitoring seismic velocity changes using ambient seismic noise. *Seismological Research Letters* (Vol. 85, Issue 3). Seismological Society of America. doi: 10.1785/0220130073
- Lecocq, T., Caudron, C., y Brenguier, F. 2014b. MSNoise, a Python Package for Monitoring Seismic Velocity Changes Using Ambient Seismic Noise. *Seismological Research Letters*, 85(3), pp. 715–726. doi: 10.1785/0220130073
- Lermo, J. y Chávez-García, F. J. 1994. Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletin of the Seismological Society of America*. *Geoscience World*, 84(5), pp. 1350–1364. doi: 10.1785/BSSA0840051350
- Lermo, J., Sánchez-Sesma, J., Ramos, E., Monroy, I., Jiménez, N., Torres, R., y Machado, O. 2020. Actualización de la zonificación sísmica de la Ciudad de México y áreas aledañas-Parte Norte. 97 pp. Recuperado el 10 de noviembre de 2022, de <https://transparencia.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/603/44b/1c6/60344b1c69beb045505965.pdf>

- Lunedei, E. y Malischewsky, P. 2015. A review and some new issues on the theory of the H/V technique for ambient vibrations. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. Kluwer Academic Publishers, 39, pp. 371–394. doi: 10.1007/978-3-319-16964-4_15/FIGURES/6
- Martínez, J., Lermo, J., Vergara-Huerta, F., y Ramos, E. 2015, noviembre. Avances en la zonificación sísmica de la Ciudad de México y Zona de Chalco, Edo. de Méx., propuesta de nuevo mapa de periodos dominantes para las NTC para Diseño por sismo del Reglamento del D. F. En *Zonificación CDMX*. Acapulco. SMIS. Recuperado el 14 de noviembre de 2022, de https://www.researchgate.net/publication/320430826_AVANCES_EN_LA_ZONIFICACION_SISMICA_DE_LA_CUADRA_DE_MEXICO_Y_ZONA_DE_CHALCO_EDO_DE_MEX_PROPUESTA_DE_NUEVO_MAPA_DE_PERIODOS_DOMINANTES_PARA_LAS_NTC_PARA_DISENO_POR_SISMO_DEL_REGLAMENTO_DEL_D_F.
- Mooser, F. 2018. Geología del Valle de México y otras regiones del país. En *Investigaciones Geográficas: Vol. I (Issue 98)*. CICM, Ciudad de México. doi: 10.14350/rig.59876
- Murnaghan, F. D. 1951. Finite deformation of an elastic solid. John Wiley & Sons, New York. doi: 10.2307/2371405
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research*, 30, pp. 25–33. Recuperado el 14 de noviembre de 2022, de https://www.sdr.co.jp/papers/hv_1989.pdf
- Pinzón, L. A., Leiva, D. A. H., Moya-Fernández, A., Schmidt-Díaz, V., Pujades, L. G., Pinzón, L. A., Leiva, D. A. H., Moya-Fernández, A., Schmidt-Díaz, V., y Pujades, L. G. 2021. Seismic site classification of the Costa Rican Strong-Motion Network based on VS30 measurements and site fundamental period. *Earth Sciences Research Journal*. Maestría en Geofísica, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia., 25(4), pp. 383–389. doi: 10.15446/esrj.v25n4.93927
- Quintanar, L., Cárdenas-Ramírez, A., Bello-Segura, D. I., Espíndola, V. H., Pérez-Santana, J. A., Cárdenas-Monroy, C., Carmona-Gallegos, A. L., y Rodríguez-Rasilla, I. 2018. A Seismic Network for the Valley of Mexico: Present Status and Perspectives. *Seismological Research Letters*. Geoscience World, 89(2A), pp. 356–362. doi: 10.1785/0220170198
- Rigo, A., Sokos, E., Lefils, V., y Briole, P. 2021. Seasonal variations in amplitudes and resonance frequencies of the HVSR amplification peaks linked to groundwater. *Geophysical Journal International*, 226(1), pp. 1–13. doi: 10.1093/gji/ggab086
- Rivet, D., Campillo, M., Sanchez-Sesma, F., Shapiro, N. M., y Singh, S. K. 2015. Identification of surface wave higher modes using a methodology based on seismic noise and coda waves. *Geophysical Journal International*, 203(2), pp. 856–868. doi: 10.1093/gji/ggv339
- Rodríguez, C. R. y Ochoa, A. C. 1989. Estudio Geoelectrico del sistema acuifero de la cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2), pp. 191–205. Recuperado el 14 de noviembre de 2022, de https://repositorio.unam.mx/contenidos/estudio-geoelctrico-del-sistema-acuifero-de-la-cuenca-de-mexico-4101793?c=r1Y3aE&d=true&q=*&i=1&v=1&t=search_0&as=0
- Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M. A., y Rodríguez-Castellanos, A. 2011. A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophysical Journal International*, 186(1), pp. 221–225. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x

- Seed, H. B., Romo, M. P., Sun, J., Jaime, A., y Lysmer, J. 1987. Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the earthquake of sept. 19, 1985. doi: 10.1193/1.1585498
- Sens-Schönfelder, C. 2008. Synchronizing seismic networks with ambient noise. *Geophysical Journal International*, 174(3), pp. 966–970. doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03842.x
- Sens-Schönfelder, C. y Wegler, U. 2011. Passive image interferometry for monitoring crustal changes with ambient seismic noise. *Comptes Rendus Geoscience*, 343(8–9), pp. 639–651. doi: 10.1016/j.crte.2011.02.005
- Servicio Sismológico Nacional. s/f. SSN - Red de estaciones sismológicas | UNAM, México. Recuperado el 10 de noviembre de 2022, de: <http://www.ssn.unam.mx/acerca-de/estaciones/>
- Stehly, L., Campillo, M., y Shapiro, N. M. 2007. Traveltime measurements from noise correlation: stability and detection of instrumental time-shifts. *Geophysical Journal International*, 171(1), pp. 223–230. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03492.x
- Sutterley, T. C. y Velicogna, I. 2019. Improved Estimates of Geocenter Variability from Time-Variable Gravity and Ocean Model Outputs. *Remote Sensing*, 11(18), pp. 2108. doi: 10.3390/rs11182108
- Tsai, V. C. 2011. A model for seasonal changes in GPS positions and seismic wave speeds due to thermoelastic and hydrologic variations. *Journal of Geophysical Research*, 116(B4). doi: 10.1029/2010JB008156
- Wahr, J., Molenaar, M., y Bryan, F. 1998. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), pp. 30205–30229. doi: 10.1029/98JB02844
- Wegler, U. y Sens-Schönfelder, C. 2007. Fault zone monitoring with passive image interferometry. *Geophysical Journal International*, 168(3), pp. 1029–1033. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03284.x

Anexos

ANEXO A

Método sísmico HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio)

Esta técnica asume que los efectos de sitio son debidos a una sola capa de suelo sobre un semiespacio elástico, aislando el efecto de sitio, mediante el empleo de cocientes espectrales.

Una función de transferencia es un modelo matemático que, a través de un cociente, relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada o excitación.

La función de transferencia para un sitio corresponde a S_T .

$$S_T = \frac{H_S}{H_B} \quad (1)$$

H_S = Espectro de Fourier horizontal de una estación superficial.

H_B = Espectro de Fourier horizontal del basamento.

En el dominio del tiempo, una señal sísmica estocástica se puede definir como el resultado de la convolución entre las señales que la provocan (o entre las señales fuentes). Si lo llevamos al dominio de las frecuencias, esta queda simplemente representada por la multiplicación de dichas señales.

Definiendo $(*)$ como el operador de convolución y $(\cdot)$ como la multiplicación, tenemos:

$$H_S(t) = F_H(t) * F_R(t) * S(t) \quad (2)$$

$$H_S(f) = F_H(f) \cdot F_R(f) \cdot S(f) \quad (3)$$

Y

$$H_B(f) = F_H(f) \quad (4)$$

Donde:

F_H = Espectro de Fourier de ondas de cuerpo polarizadas horizontal (Fuentes lejanas).

F_R = Espectro de Fourier de ondas Rayleigh (Fuente cercana).

S = Espectro de Fourier del efecto de sitio.

Nakamura (1989) supone una componente vertical superficial libre de efectos de sitio y una componente vertical del basamento, tal como sigue:

$$V_S(f) = F_V(f) \cdot F_R(f) \quad (5)$$

$$V_B(f) = F_V(f) \quad (6)$$

Donde:

V_S = Espectro de Fourier vertical de una estación superficial.

F_V = Espectro de Fourier de ondas de cuerpo polarizadas vertical (fuentes lejanas).

F_R = Espectro de Fourier de ondas Rayleigh (fuentes cercanas).

V_B = Espectro de Fourier vertical del basamento.

Al suponer que las componentes superficiales horizontal y vertical del movimiento son alteradas por ondas Rayleigh en la misma medida, se propone una función de efecto de sitio modificada que compense la alteración sufrida producto de las ondas superficiales:

Se puede obtener de lo anterior que:

$$\frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}} = \frac{\frac{F_H \cdot F_R \cdot S}{F_H}}{\frac{F_V \cdot F_R}{F_V}} S(f) \quad (7)$$

El cociente H_S/H_B permite eliminar el efecto de las fuentes lejanas polarizadas horizontalmente.

El cociente V_S/V_B permite eliminar el efecto de las fuentes lejanas polarizadas verticalmente.

La razón entre estos cocientes elimina el efecto de las fuentes cercanas, de este modo prevalece sólo el efecto de sitio $S(f)$.

De la ecuación anterior, tenemos:

$$\frac{H_S}{V_S} \cdot \frac{1}{\frac{H_B}{V_B}} = R_S \cdot \frac{1}{R_B} = S(f) \quad (8)$$

Donde R_S y R_B son los cocientes espectrales H/V superficial y en el basamento, respectivamente.

Con base en observaciones, se ha obtenido que, para suelos rocosos, el espectro $H/V \approx 1$, ya que las amplitudes de las componentes vertical y horizontal de los microtremores son similares en la base rocosa ($R_B \approx 1$, para un amplio rango de frecuencias donde existe sustrato firme).

Se define así la función de transferencia modificada S_{TT} como:

$$S_{TT} = R_S \cdot \frac{1}{R_B} \approx R_S \quad (9)$$

Por lo tanto, podemos observar que la función de transferencia de capas sedimentarias superficiales puede estimarse con observaciones de microtremores en superficie.

$$S_{TT} \approx R_S = \frac{H_S}{V_S} \quad (10)$$

Hay muchos estudios que demuestran teóricamente la relación entre el pico máximo del espectro H/V y el periodo fundamental o de resonancia del suelo (Lachet y Bard, 1994; Lermo y Chávez-García, 1994). Además, se puede estimar la profundidad (H) de la capa sedimentaria utilizando información de estratigrafía del suelo, como sigue:

$$H = \frac{V_S}{4F_0} \quad (11)$$

Donde:

V_S = Velocidad de onda de corte en todo el depósito.

F_0 = Frecuencia fundamental.

Procesado

Se hace la selección de estaciones disponibles para el año de estudio, en este caso del 1º de Enero al 31 de diciembre de 2020 y así para los dos años anteriores. Para cada una de las estaciones, se separan las componentes horizontales y verticales siguiendo las recomendaciones de la guía SESAME (Bard et al., 2008), primero las componentes E-W y N-S se combinan en una sola mediante una media aritmética para usarlas como un solo registro. Debido a que se hace en el dominio espectral, la amplitud de estas dos componentes es la que se utiliza como la componente horizontal. Estas componentes se escriben en un archivo demultiplexado en formato MINISEED y se obtiene un archivo por día.

Se elabora una rutina de cómputo que separe cada día en 24 horas, por lo que se obtendrán 24 archivos. El programa discrimina los archivos incompletos y se pasará a la siguiente hora. En cada hora se procede a calcular su razón espectral H/V. El código se configuró conforme a las recomendaciones de la guía SESAME (Bard et al., 2008), las cuales se muestran a continuación:

- Window Length: 60 seconds
- Bandpass Filter Boolean: False
- Cosine Taper Width: 10%
- Konno and Ohmachi Smoothing Coefficient: 40%
- Resampling:
 - Minimum Frequency: 0.1 Hz
 - Maximum Frequency: 50 Hz
 - Number of Points: 200
- Sampling Type: 'log'
- Method for Combining Horizontal Components: 'geometric-mean'

- Distribution for f_0 from Time Windows: 'log-normal'
- Distribution for Mean Curve: 'log-normal'

El programa filtra los datos mediante una rutina pasabandas Butterworth, posteriormente hace un remuestreo a 20 muestras por segundo y finalmente realiza la división espectral. El método que escogimos tiene 3 formas de estimar la división espectral: promedio cuadrado, media geométrica y azimuth único. Se sigue la recomendación de la guía SESAME (Bard et al., 2008) y se escoge la media geométrica, este método elimina la línea base y después aplica un taper cosenoidal. Posteriormente se calcula el periodo fundamental, recordando que nuestra definición de periodo fundamental es aquel periodo que se estima a partir de la amplitud máxima del espectro.

El programa originalmente puede hacer un análisis similar a la Figura 8, pero para poder diferenciar en tiempo a lo largo de años, como decidimos dividirlo en 24 horas, para el caso de un año tendríamos aproximadamente 150 mil resultados a analizar individualmente.

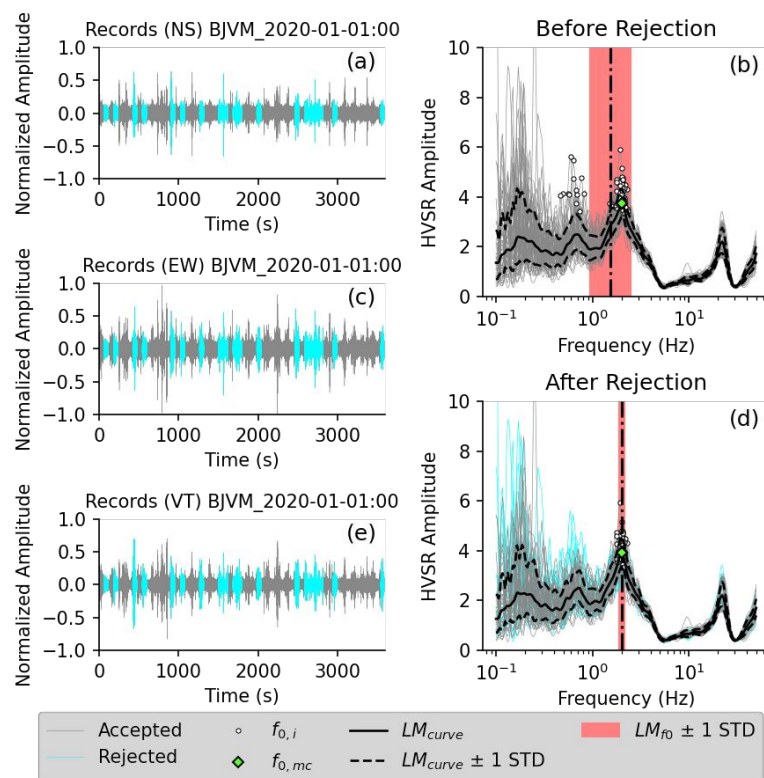


Figura 8. Resultado de HVSr de la estación BJVM (Benito Juárez). La rutina cuenta con un algoritmo de rechazo de ventanas en el dominio de la frecuencia totalmente automatizado, por eso podemos observar un gráfico antes del rechazo (Before Rejection) y uno después del rechazo (After Rejection).

Esta cantidad de datos hace imposible un análisis visual, por tal razón se generó una rutina de cómputo que procese automáticamente los datos, manteniendo siempre un alto control de calidad de los resultados, basándonos en la guía de SESAME (Bard et al., 2008), el resultado de este proceso lo podemos observar en la Figura 9.

Nuestro método consiste en obtener un periodo mínimo y un periodo máximo aceptable. Esto es, se discriminó dentro de un gran rango de periodos aquel intervalo donde se encuentra realmente el periodo dominante. Debido a que se analizó un gran espectro de frecuencias, es importante enfocarse exclusivamente en el rango donde ocurren los periodos dominantes según los mapas publicados, de esta manera pudimos separar los modos superiores. Le denominamos modos superiores a los periodos de vibración que corresponden a los picos máximos cuando se separan las vibraciones en periodos característicos dependiendo de la profundidad de los estratos que lo componen.

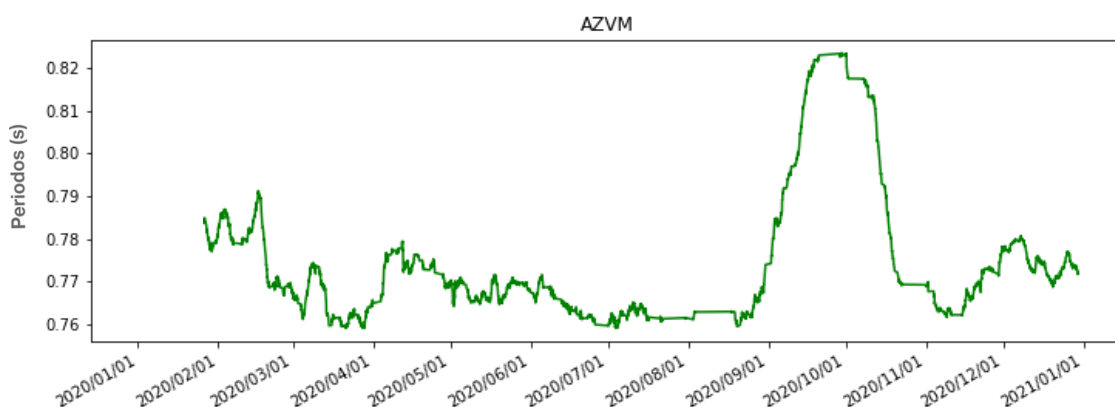


Figura 9. Resultado del proceso automatizado para la estación AZVM. Se pueden apreciar los valores de los picos máximos a lo largo de un año para la estación Atizapán.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de la variación de los periodos máximos en un lapso de un año, los periodos del pico máximo no tienen una variación significativa, pues va de 0.76 a 0.82 segundos, aparentemente la variación es despreciable, pero es necesario revisar estos resultados con mayor detalle. Esta estación solo cuenta con un año de datos y debido a que se encuentra fuera del mapa de referencia (Figura 3), solo podemos suponer periodos menores a un segundo, pero no es posible verificar si existe una variación estacional.

El proceso se realizó para todas las estaciones, un ejemplo de otra estación donde si podemos verificar la existencia de una variación estacional se puede apreciar en la Figura 10, en el mes de febrero de 2019 notamos un máximo, el cual se repite en el mes de febrero de 2020.

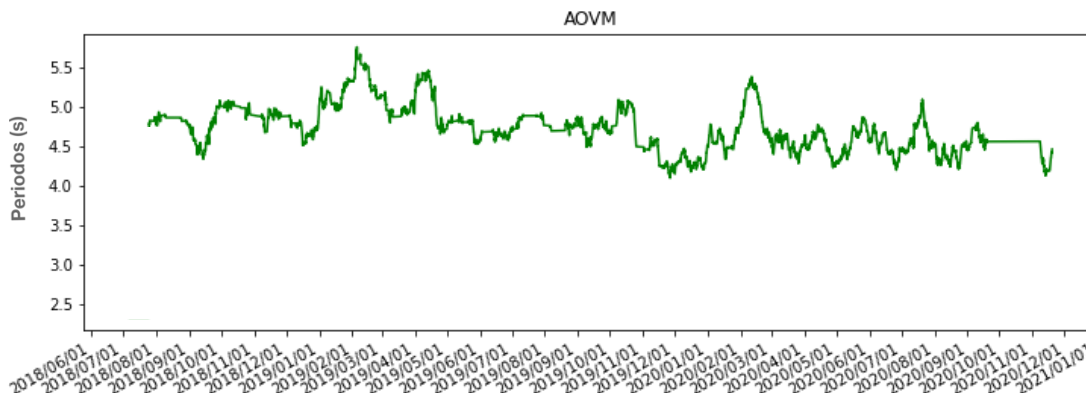


Figura 10. Resultados del proceso automatizado para la estación Álvaro Obregón.

Una vez obtenidos los resultados para todas las estaciones, nos encontramos con que la gran mayoría de las estimaciones automáticas del periodo fundamental tienen un gran margen de error, es decir, el cálculo del periodo de vibración que corresponde al pico máximo del espectro, como los resultados del proceso automático presentados en las Figura 9Figura 10, así como en el Anexo B.

La razón por la cual se presenta este comportamiento se debe a que son diferentes periodos superiores los que alcanzan el valor máximo a lo largo del año, es decir, el periodo dominante no tiene siempre el valor máximo. En otras palabras, es común que en un espectro el pico máximo aparezca en periodos que corresponden a estratos de vibración diferentes a la roca dura. Además, los resultados muestran que aparentemente no existen variaciones cíclicas que dependan de cambios estacionales, esto se debe a que los algoritmos simplemente escogen los valores máximos sin hacer un análisis modal, o de cambios estacionales, por lo tanto, se procede a analizar visualmente las figuras que se encuentran separadas por cada hora de datos registrados.

Comparamos los periodos fundamentales de estas figuras con los periodos dominantes del mapa de la Figura 3 para ver si el periodo dominante coincide con el pico máximo y observamos muchos casos en los que el pico más alto se encontraba antes o después del señalado en el mapa. También existe una gran variabilidad en la amplitud de los picos máximos, especialmente en modos superiores. Entonces nos

encontramos ante algún fenómeno estacional donde los modos superiores tienen la característica de tener amplitudes altas, incluso superiores a los periodos dominantes. En otras palabras, los periodos de mayor vibración no son los del estrato rígido, sino los estratos más superficiales. Este fenómeno ocurre unos pocos meses al año y después esos estratos dejan de tener relevancia.

Se hicieron varias pruebas, por ejemplo, analizando los periodos más cortos, los cuales corresponden a los modos superiores, recordando que son aquellos picos máximos que se separan las vibraciones en periodos característicos dependiendo de la profundidad de los estratos que lo componen. Después de este análisis cuidadoso observamos que los modos superiores no varían en periodo significativamente a lo largo del año, sin embargo, sus amplitudes si tienen una relación cíclica y estacional.

Un ejemplo de este análisis cuidado lo podemos ver en la Figura 11, en esta estación encontramos algo muy interesante, el periodo fundamental refiriéndonos al pico máximo que se observa en el espectro, se encuentra en lo que creemos es el cuarto modo y tiene una amplitud mayor que el primer modo en ciertos meses del año.

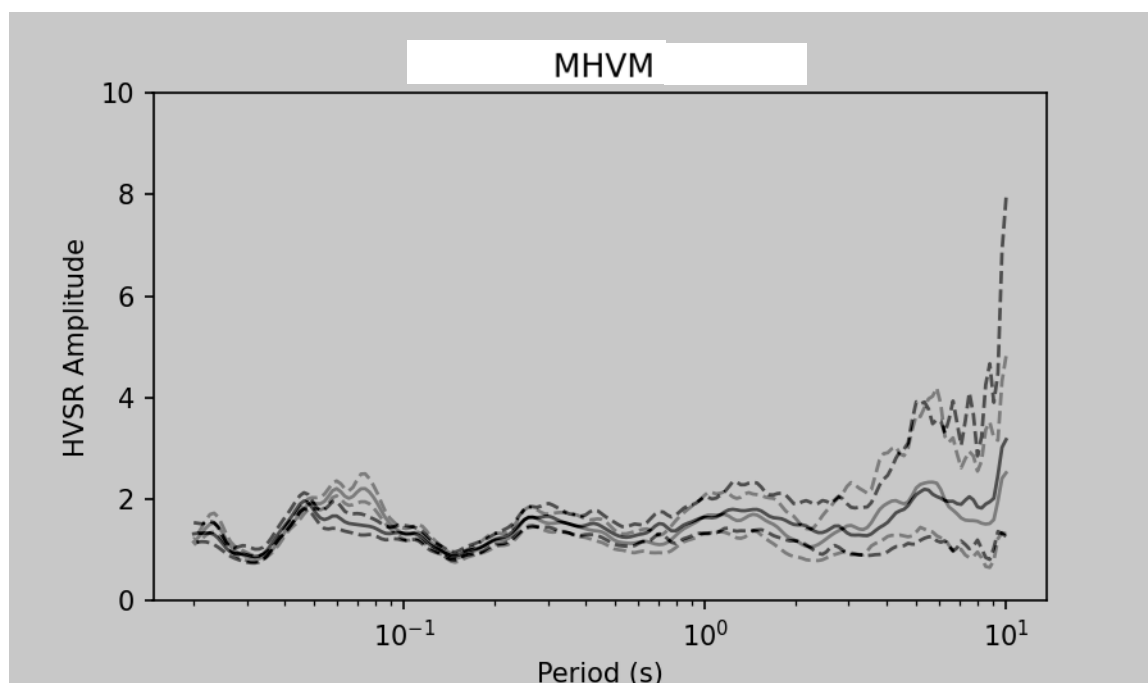


Figura 11. Espectros de amplitud que corresponde a la estación Miguel Hidalgo en donde se aprecian las fluctuaciones de periodo que sufre el modo cuarto. En tonalidades grises se observan las amplitudes que aparecen en ciertos periodos del año, pero no están presentes todo el tiempo. Las líneas punteadas representan $\pm$ una desviación estándar. Esta estación está en Zona I, por lo tanto, debe tener periodos dominantes menores a un segundo y eso demuestra la variación estacional en la región de los periodos dominantes.

Análisis usando normalización modal

Comúnmente el método H/V se utiliza para estimar periodos de vibración. Rara vez se utiliza para estudiar las amplitudes, en otras palabras, ha sido un segundo método para corroborar que otros estudios coinciden con los periodos de vibración. Por ejemplo, el método SPAC se utiliza para calcular velocidades de corte y el espesor del sedimento, pero debido a que la velocidad de corte y los espesores se relacionan con los periodos de vibración, entonces el método H/V ha sido muy útil para verificar los resultados. En nuestro caso, el método H/V también es útil para estudiar las amplitudes, no solamente para estudiar los periodos. Eso se debe a que recientemente se ha avanzado en la comprensión del campo de ondas que existe al estudiar el ruido ambiental. Por esta razón decidimos hacer un análisis de normalización modal. El propósito de este análisis es interpretar los cambios estacionales que se observan en las amplitudes de los espectros con otros estudios que relacionan los cambios hidrológicos del balance de aguas subterráneas. Primeramente, escogemos los espectros que tengan información relevante, después aplicamos un análisis de normalización al que hemos denominado análisis de normalización modal.

Rigo et al. (2021) clasifica los espectros en tres categorías y menciona que los registros que tienen más de tres máximos nos pueden indicar que están constituidos tanto por ondas de cuerpo como ondas superficiales, ya que el periodo que representa el tercer modo de propagación es tres veces el periodo del primer modo, así como también podría estar relacionado con la presencia de una capa muy cercana a la superficie. Al estar ligados podemos decir que la relación entre los modos será siempre la misma y será independiente de la amplitud que presenten, en la Figura 12 podemos ver esa relación, escalamos el espectro que aparece en color azul, marcamos las mesetas de dos picos, haciendo la demostración de que sin importar la amplitud con la que inicie la curva, las relaciones entre los modos se mantendrán iguales. Una explicación teórica de la amplitud de H/V la presentó Sánchez-Sesma et al. (2011) donde relacionan H/V con la parte imaginaria de las funciones de Green y el promedio de densidad de energía de las ondas de corte, el cual es una medida de la iluminación difusa. Esto significa que la función se encuentra escalada por un valor dependiendo de la energía de densidad espectral la cual varía dependiendo de la excitación, en la Figura 12 se representa (en color verde y naranja) ese valor escalar significando que la función se encuentra desplazada en el eje vertical. Por esta razón, una normalización entre dos modos de vibración siempre se debe de mantener constante.

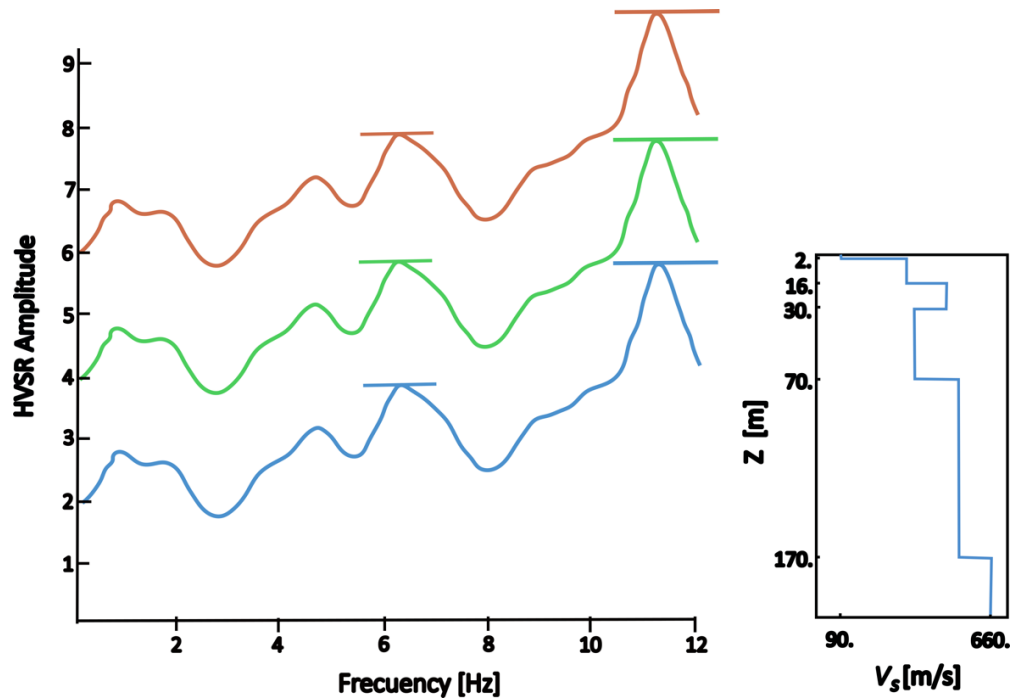


Figura 12. Relación de modos con escalamiento del espectro.

A partir de esa observación, se hizo un programa de cómputo que calculara el promedio diferencial entre el cuarto modo y el primer modo, como resultado tenemos la figura que se muestra a continuación.

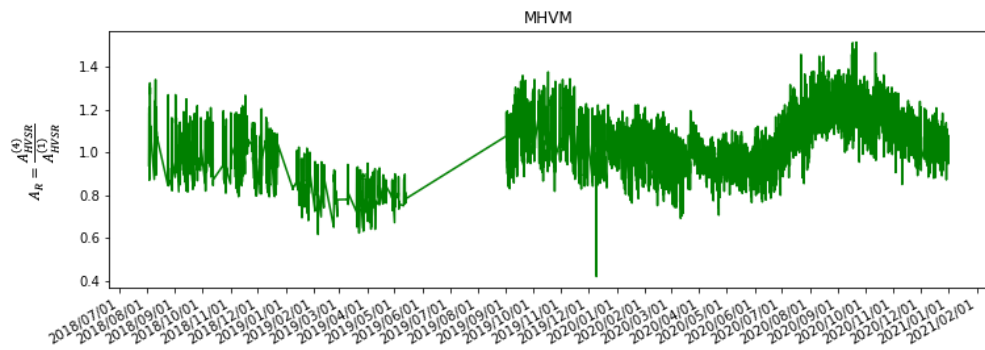


Figura 13. Relación de amplitudes. Cuarto modo entre primer modo.

La Figura 13 representa la variación temporal del único modo que presenta cambios a lo largo del año sobre un modo que se mantiene constante a lo largo de todo el año, es decir, se compara la variación de la amplitud del espesor que tiene cambios estacionales sobre algún espesor que no presenta ningún

cambio. Por ejemplo, suponiendo que se trata de un nivel piezométrico sobre una roca rígida entonces tendremos los cambios de la cabeza hidráulica a través del tiempo.

A continuación, representamos la relación de amplitudes modales de HVSR como:

$$A_R = \frac{A_{HVSR}^{(4)}}{A_{HVSR}^{(1)}} \quad (12)$$

Donde:

A_R = Amplificación relativa.

$A_{HVSR}^{(1)}$ = Amplitud máxima de HVSR (primer modo).

$A_{HVSR}^{(4)}$ = Amplitud máxima de HVSR (cuarto modo).

Nótese que en la ecuación (12) los modos superiores que corresponden a los periodos de vibración que cambian con el tiempo están representados con $A_{HVSR}^{(4)}$ mientras que los modos superiores que corresponden a los periodos de vibración estacionales, es decir, a las vibraciones de estratos de roca rígida donde no hay cambios a lo largo del año se representan con $A_{HVSR}^{(1)}$. De esta manera presentamos la relación que existe entre los modos superiores asociados a un espesor con su respectivo periodo.

Método de correlación cruzada

MSNoise es un programa de cómputo utilizado para monitorear cambios de velocidad sísmica mediante el uso de ruido sísmico ambiental (Lecocq et al., 2014a).

Nuestro enfoque para medir las variaciones de la velocidad se basa en tres pasos:

1. El primer paso es calcular las funciones de correlación cruzada (FCC) de series de tiempo de ruido sísmico en diferentes fechas para pares individuales de sensores sísmicos.
2. Medir los retrasos en el tiempo de viaje de las diferentes llegadas entre estas FCC individuales y una FCC de referencia definida.
3. Promediar estos retrasos sobre varios pares de sensores comparándolos con un tiempo de referencia e interpretarlos utilizando un modelo simple de cambio uniforme de velocidad relativa dentro del área estudiada ($\delta v = v$ constante).

Cálculo de funciones de correlación cruzada

El cálculo se realiza en un equipo de cómputo de alto rendimiento (HPC, por sus siglas en inglés). Para cada trabajo (*job*) de correlación cruzada, las formas de onda se pre-procesan y luego se analizan. Esto se hace mediante la base de datos escogida que controlará todos los pares posibles y asignará una etiqueta de procesado.

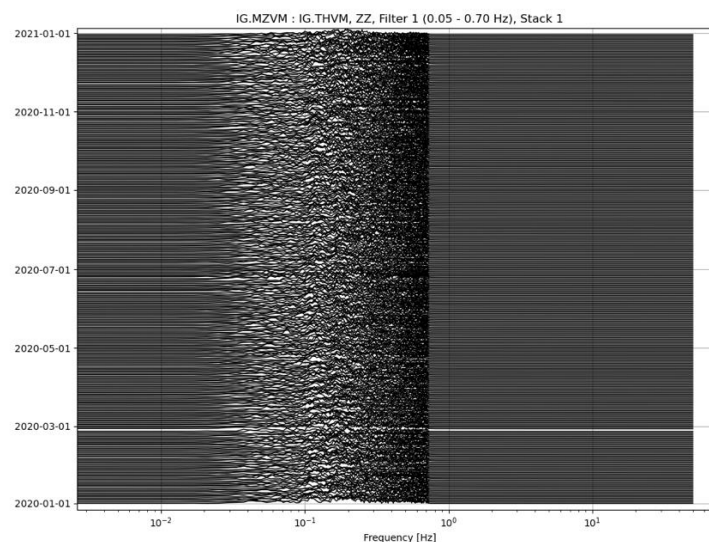


Figura 14. CCF's spectrum vs Time. Este gráfico muestra el espectro de las funciones de correlación cruzada en diferentes ventanas de tiempo.

Pre-procesamiento de forma de onda

Para cada estación, se utilizan todos los registros que potencialmente contienen todos los datos del día. A continuación, las trazas se fusionan y se dividen para obtener las secciones sin interrupciones. Luego se les eliminará la media, se elimina la tendencia, se le aplica un filtrado taper cosenoidal y se fusionan nuevamente en una ventana de un día de duración. Si es más corto que un día, la traza se complementa con ceros. Si es más largo, se corta para que coincida con el inicio/final del día. Posteriormente, cada traza de un día de duración se filtrará dependiendo cada caso y luego se diezmará o se reducirá.

Procesado

Una vez que todas las formas de onda están cargadas en la memoria, el cálculo se realiza por iteración en los pares de estaciones, en los diferentes componentes a procesar y luego en los diferentes filtros para cada ventana definida con cortes de 30 minutos por defecto, configurables en la Tabla 2 que aparece más adelante.

Los componentes radial (R) y transversal (T) se calculan a partir de la rotación de los componentes este (E) y norte (N). El ángulo de rotación se define como el azimut (Az) entre los dos sensores.

$$R = N \cos(Az) + E \sin(Az) \quad (13)$$

$$T = N \sin(Az) - E \cos(Az) \quad (14)$$

La correlación cruzada se realiza en el dominio de frecuencia. Sean $x(t)$ y $y(t)$ dos series de tiempo y $X(f)$ y $Y(f)$ sus transformadas de Fourier. La operación de correlación se define entonces como:

$$C(f) = X^*(f) \times Y(f) \quad (15)$$

siendo $X^*(f)$ el complejo conjugado de $X(f)$. Si $x(t) = y(t)$, entonces la operación se llama autocorrelación. La FCC $c(t)$ es la transformada de Fourier inversa de $C(f)$. Si se desea guardar el $c(t)$, entonces para cada segmento de 30 minutos se puede almacenar en un directorio de salida en la computadora. Nuevamente, si se desea, se almacena la pila de distintos días que no contengan ceros, infinitos o NaNs. Esta pila es de 48 segmentos cada uno de 30 minutos y finalmente se almacenan los valores de $c(t)$.

Tabla 2. Configuración general de MSNoise.

Nombre	Valor	Nombre	Valor
analysis_duration	86400	maxlag	120
archive_format		mov_stack	18
autocorr	N	network	*
cc_sampling_rate	100	output_folder	CROSS_CORRELATIONS
cc_type	CC	overlap	0.5
cc_type_single_station_AC	CC	plugins	
cc_type_single_station_SC	CC	preprocess_highpass	0.01
channels	*	preprocess_lowpass	8
components_to_compute	ZZ	preprocess_max_gap	10
components_to_compute_single_station		preprocess_taper_length	20
corr_duration	1800	pws_power	2
crondays	600	pws_timegate	10
data_folder	/INGVDATA/RSVMS DS/	ref_begin	01/01/20
data_structure	SDS	ref_end	01/01/21
dtl_lag	static	remove_response	N
dtl_maxdt	0.1	resampling_method	Lanczos
dtl_maxerr	0.1	response_format	dataless
dtl_mincoh	0.65	response_path	inventory
dtl_minlag	5	response_prefilt	(0.005, 0.006, 30.0, 35.0)
dtl_sides	right	sac_format	doublets
dtl_v	1	stack_method	linear
dtl_width	40	startdate	01/01/20
enddate	31/12/20	stretching_max	0.01
export_format	MSEED	stretching_nsteps	1000
hpc	N	whitening	A
keep_all	N	whitening_type	B
keep_days	Y	windsorizing	3

ANEXO B

Resultados del proceso automático de HVSR

En un análisis preliminar, se revisaron los cambios de periodos dominantes en las ventanas espectrales de interés. Claramente se observa que los cambios de periodos son mínimos, en general son cambios de ± 0.5 segundos (Figura 15). Esta variación no es relevante para estudios de sitio, por lo tanto, no implica un cambio significativo en los mapas de periodos dominantes del Valle de México, sin embargo, es importante analizar detalladamente las variaciones de los espectros en el contexto de amplificaciones de sitio (Rigo et al., 2021). Es decir, el verdadero riesgo sísmico está en las amplificaciones de las ondas sísmicas cuando inciden en suelos de baja velocidad.

Al analizar con detalle estas figuras, observamos que existen dos tipos de variación, las variaciones que representan un cambio mínimo en los periodos máximos y los sitios donde hay variaciones significativas, por ejemplo, AMVM tiene una variación de amplitud que va de 5.0 a 5.8 pero APVM varía de 14 a 24. Sorprendentemente, estos cambios no parecen estar relacionados con el sitio. Por otro lado, existen varios sitios como por ejemplo Benito Juárez, donde claramente se observan cambios abruptos en forma de escalón o caja, es decir, con variaciones discontinuas y no diferenciables.

Es importante aclarar que no existe consenso en la definición de periodos dominantes, periodos fundamentales, periodos característicos, modos normales y modos superiores. Por ejemplo Rivet et al. (2015) presenta un artículo donde describe la importancia de los modos superiores, argumentando que éstos son los que controlan las amplificaciones de sitio del valle de México, en cambio otros autores como J. Lermo y F. J. Chávez destacan la importancia de los periodos dominantes. Pensamos que esta diferencia puede deberse a dos factores:

- 1) los periodos dominantes dependen de la escala de análisis, es decir, en estudios de geotecnia donde la profundidad máxima es de 75 m, los periodos superiores se refieren a las capas menores a esta profundidad y el periodo dominante está referido a la capa principal de vibración en este rango de profundidad. En cambio, para escalas de pocos kilómetros, el periodo dominante se refiere a la profundidad de la cuenca. En escalas de corteza, el periodo dominante se refiere a la corteza terrestre y los periodos superiores se convierten en los periodos dominantes a escalas más pequeñas (Rivet et al., 2015),

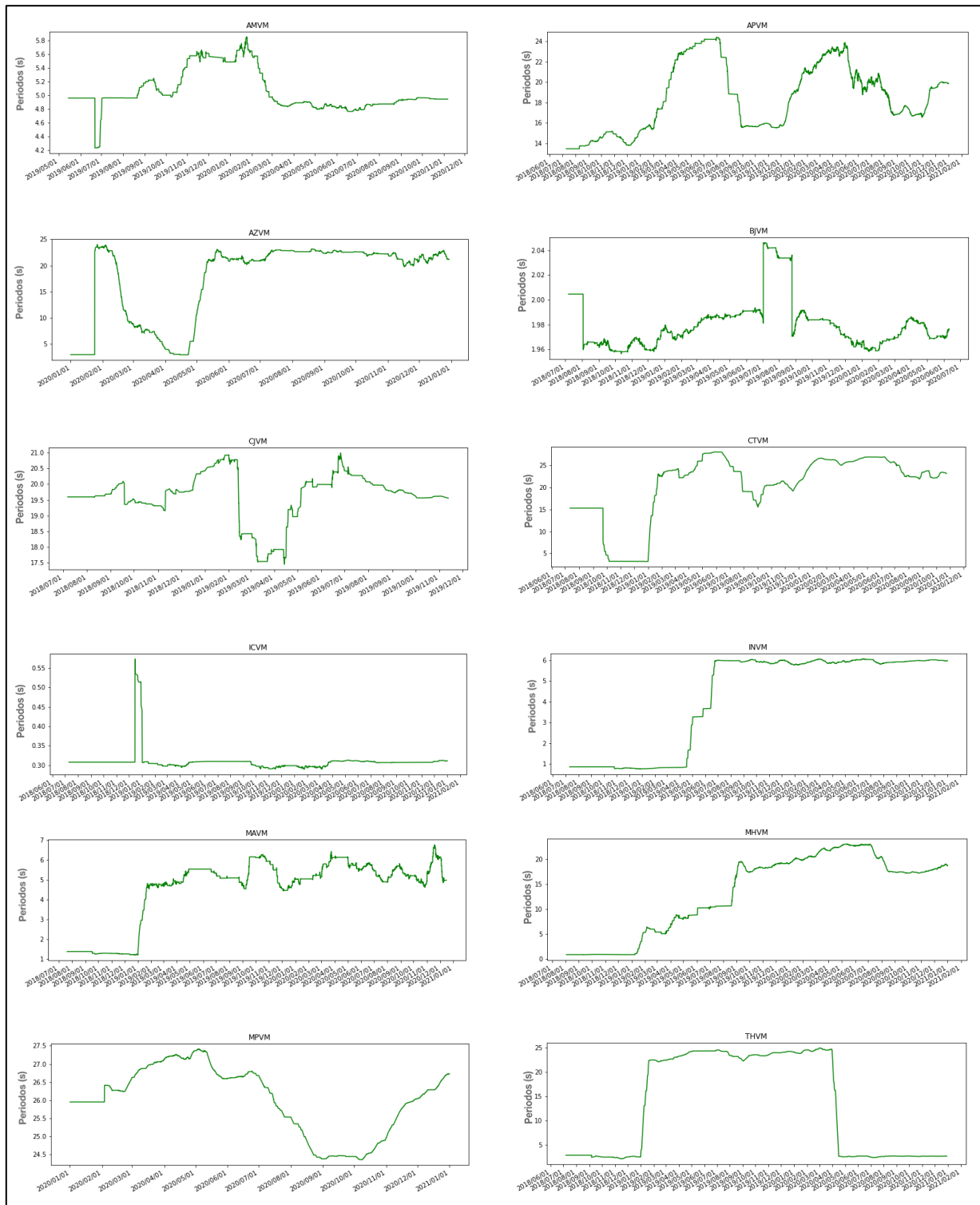


Figura 15. Resultados del proceso automático de HVSR donde se demuestra que este tipo de análisis no siempre representa un cambio estacional cíclico relacionado a algún proceso físico.

- 2) la segunda razón de esta falta de consenso es la diferencia entre periodos dominantes y modos de propagación en geotecnia, ingeniería civil y propagación de ondas en sismología. Por ejemplo, es común hablar de periodos dominantes y periodos superiores refiriéndose a los modos principales de vibración de los edificios. En esos casos, las estructuras se flexionan y vibran a diferentes modos. En cambio, en geotecnia los periodos dominantes y superiores se refieren a los estratos de vibración, los cuales están limitados por estratos planos y cambios de velocidad en el subsuelo. No es raro que estas definiciones causen confusión al lector, porque están ligadas en el estudio de la ingeniería sísmica. Este cuestionamiento lo presentan varios autores, por ejemplo (Benito y Cabañas, 1999) sugieren que la causa de esta confusión se debe a que las disciplinas de ingeniería sísmica e ingeniería geotécnica no siempre están vinculadas con fines comunes. De cualquier forma, no es difícil relacionar este tipo de conceptos cuando se trabaja directamente con estructuras y efectos de sitio, como es el caso de interacción suelo-estructura.

Otro problema es el estudio de los espectros de sitio, por ejemplo, la función de transferencia y la relación espectral H/V también conocida como HVSR (H/V spectral ratio). Ambas expresiones son similares, mientras que la función de transferencia es una versión teórica, el HVSR es una versión empírica con la misma finalidad.

ANEXO C

Resultados de HVSR divididos por zonas

El Valle de México está clasificado en regiones, para los mapas de periodos dominantes se dividía en 3 regiones, Zona de Lago, Zona de Transición y Zona de Lomas. Actualmente, se ha eliminado la Zona de Transición (Lermo et al., 2020) y simplemente se consideran las Zonas de Lago y Lomas.

Resultados de H/V en la Zona del Lago

En general los espectros de la Zona III denominada Zona de Lago, tienen un pico muy claro, pero no ocurre todo el tiempo. En los mapas de periodos dominantes se observan duraciones mayores a un segundo. En la mayoría de los casos observados el periodo fundamental coincide con el periodo dominante, pero en algunos sitios los periodos que hemos calculado están muy lejos de los reportados en el mapa de periodos dominantes del Valle de México.

Estación CTVM (Cuauhtémoc)

Esta estación se encuentra ubicada dentro de las instalaciones de un centro de cultura, la edificación es una capilla colonial protegida denominada “Capilla Británica”. Se observaron letreros de alta tensión que al parecer se encuentran enterrados a muy pocos metros del sensor. Es importante destacar que el túnel del metro de la línea 2 está a unos 20 metros del sitio, por lo tanto, los resultados espectrales están afectados por todos estos elementos.

Por lo antes mencionado, interpretamos este comportamiento como una estación que está controlada exclusivamente por cambios antropogénicos, es decir, únicamente lo afectan actividades humanas. En primera, esta estación se encuentra exactamente arriba de un túnel del metro de la línea 2, la cual se encuentra en un ambiente artificial controlado por bombas que continuamente extraen el exceso de agua, además es importante destacar la presencia de un puente de grandes dimensiones que inevitablemente resuena a lo largo del año en un periodo fijo. Por otro lado, los cambios a frecuencias altas reflejan las diferentes actividades humanas que ocurren en su entorno, por ejemplo, se observó un letrero de alta tensión que pertenece a la casa de cultura y posiblemente se energiza en ciertas épocas del año. Además,

es un sitio de tráfico pesado y continuo no es raro que ocurran actividades de mantenimiento, construcciones asociadas y reparaciones. Observamos que este tipo de estaciones sísmicas son comunes cuando se hacen trabajos de esta naturaleza en zonas urbanas como la Ciudad de México. Es importante destacar que en los mapas de periodos dominantes este sitio debe tener su periodo máximo a los 1.5 seg. (Figura 3), sin embargo, el periodo fundamental parece estar a los 1.17 seg. Esto se debe probablemente a la influencia de las estructuras grandes como el puente de concreto que se encuentra a muy pocos metros del sitio. En cambio, existe un pequeño pico en 1.5 seg. el cual interpretamos precisamente como el periodo dominante del sitio y claramente no es tan evidente como el periodo fundamental de 1.17 seg., esto demuestra la dificultad que existe en elegir los periodos dominantes de sitio.

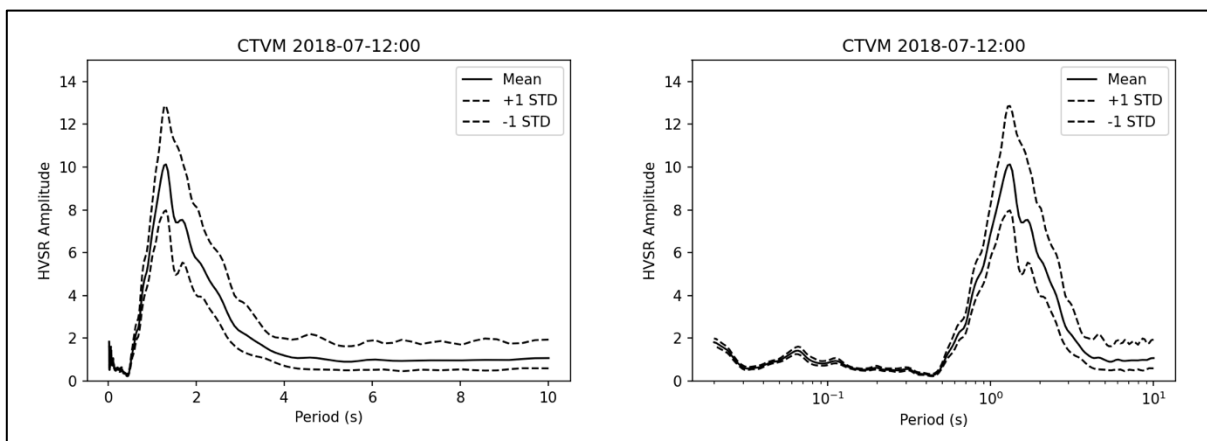


Figura 16. CTVM_2018-07-12/00.



Figura 17. Estación CTVM. La estación se encuentra cerca de una capilla británica donde se aprecian letreros de alta tensión, en la calzada podemos observar un puente y a pocos metros la estación del metrobús Revolución.

Estación ICVM (Iztacalco)

Se encuentra localizada dentro de las instalaciones de la preparatoria número 3 de la Universidad Nacional Autónoma de México. La estación está muy cerca de una estructura de un piso. Los espectros de HVSR son de alta calidad y muestran un periodo dominante muy bien definido.

Aparentemente esta es una estación que se puede interpretar con un modelo sencillo, sin embargo, al hacer un análisis más detallado existen algunas incongruencias que debemos puntualizar, por ejemplo, el periodo dominante debería estar en 2.5 segundos, sin embargo, el periodo fundamental de este sitio está a los 3 segundos. Aunque este error podría ser mínimo, debido a la resolución de nuestro instrumento, creemos que es poco probable que sea un error de medición. En cambio, esta diferencia parece deberse a cambios locales, por ejemplo, es probable que haya zonas de canalización en Iztacalco, sobre todo en la parte central donde hace poco continuaban activos los canales de desagüe.

Podemos observar que hay un ligero pico a los 2 segundos el cual es muy cercano a los 2.5 segundos que esperábamos, por lo tanto, es posible que existan dos periodos característicos. Uno con una profundidad de 43 metros de un sedimento blando de muy baja velocidad de aproximadamente 70 m/s, el cual probablemente esté limitado por alguna estructura geológica discordante (sean cenizas volcánicas o piroclásticos) seguidos por otro estrato de baja velocidad con un espesor de 50 metros y velocidad de 110 m/s. Esto implica que es posible que los mapas de periodos dominantes requieran de una resolución con mucho más detalle, por ejemplo, un mapa de periodos dominantes para cada delegación.

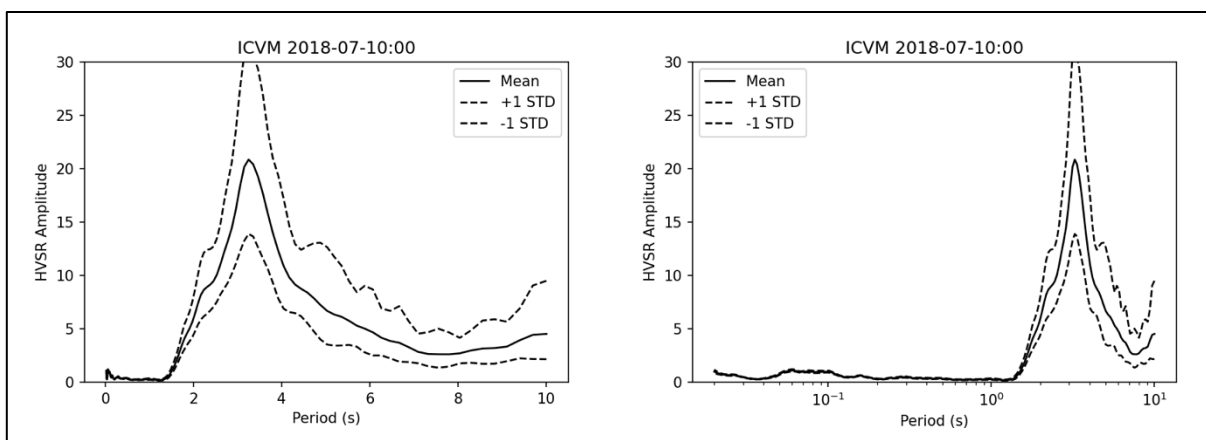


Figura 18. ICVM_2018-07-10/00.



Figura 19. Estación ICVM. La estación se encuentra adentro de una escuela, muy cerca de los edificios.

Estación VRVM (Venustiano Carranza)

Esta estación es similar a la estación Iztacalco, se encuentra cerca de las instalaciones del Instituto Mexicano del Seguro Social desplantadas en un solo piso, sus espectros HVSR son bien definidos, ya que no parece haber variaciones considerables, la curva sólo cambia en amplitud, pero nunca en periodo.

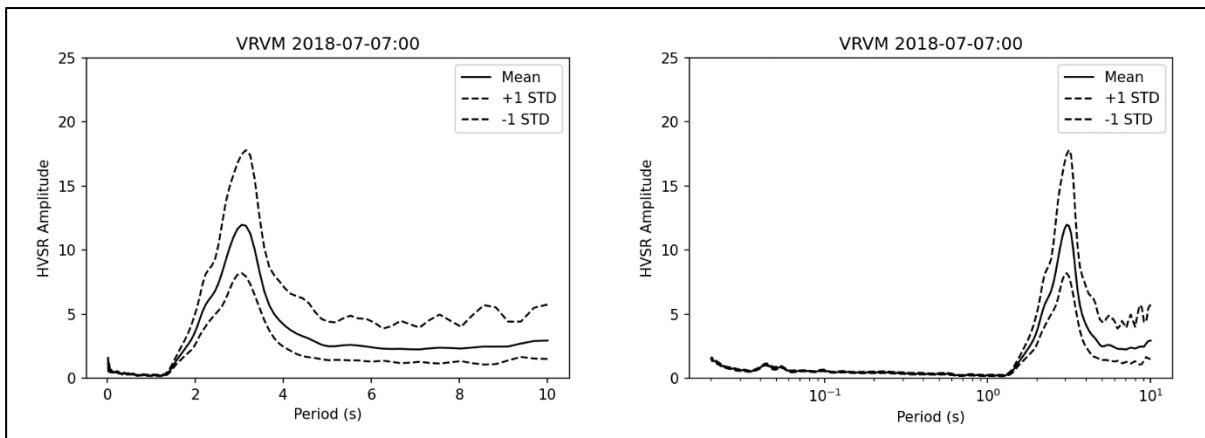


Figura 20. VRVM_2018-07-07/00.

Esta es la única estación donde los resultados realmente representan la información del actualizado mapa de periodos dominantes (Lermo et al., 2020), es importante destacar que esta estación está cerca del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, por lo tanto, tenemos una fuente continua de ruido ambiental en varias frecuencias, además es una zona relativamente homogénea en el sentido geológico y urbano.



Figura 21. Estación VRVM. La estación se encuentra en un asilo cerca de un IMSS y entre estructuras de un nivel.

Resultados de H/V en la Zona de Transición

A pesar de que la nueva nomenclatura no define la Zona de Transición, es importante resaltar que estos sitios corresponden a las zonas más complejas. En general se observan que los periodos no están bien definidos, es decir, las amplitudes máximas son difíciles de identificar. A veces aparecen amplitudes máximas a periodos inesperados, es decir, que las amplitudes máximas no siempre se encuentran en el periodo dominante de vibración. En la parte de discusión se explican las posibles causas de estos importantes cambios.

Estación APVM (Azcapotzalco)

No se visitó en persona esta estación, pero se obtuvieron imágenes de la página del Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2022), para observar que había a su alrededor. Esta estación se encuentra en las instalaciones de protección civil. Se observa una estructura de un piso dentro de un espacio amplio. El pico

principal no está bien definido y representa periodos cercanos a 1 segundo. También existen diversos máximos en modos superiores.

Pensamos que esta estación tiene una litología compleja, el sitio puede sufrir los efectos de cambios hidrológicos, climáticos y antropogénicos, la amplitud de H/V es en general baja. Esta zona probablemente ha sido influenciada por diferentes efectos de tipo litológico y sedimentológico, en algunos momentos el espectro representa formas completamente diferentes cuando se observan a tiempos variables.

Es importante destacar que la zona de transición aparentemente refleja una zona de alta peligrosidad sísmica, esto se debe a que los periodos dominantes asignados se encuentran ligeramente debajo de un segundo, Buendía Sánchez y Reinoso Angulo (2019) realizaron un análisis de las estructuras colapsadas en la CDMX donde relacionan el periodo elástico de la estructura con el periodo fundamental del suelo, la gran mayoría de las estructuras que colapsó se encontraban en suelos con periodos entre 0.5 y 1.5 segundos. Por lo que se sugiere que se estudie esta estación más a detalle debido a que es difícil asignarle con claridad un valor al periodo fundamental.

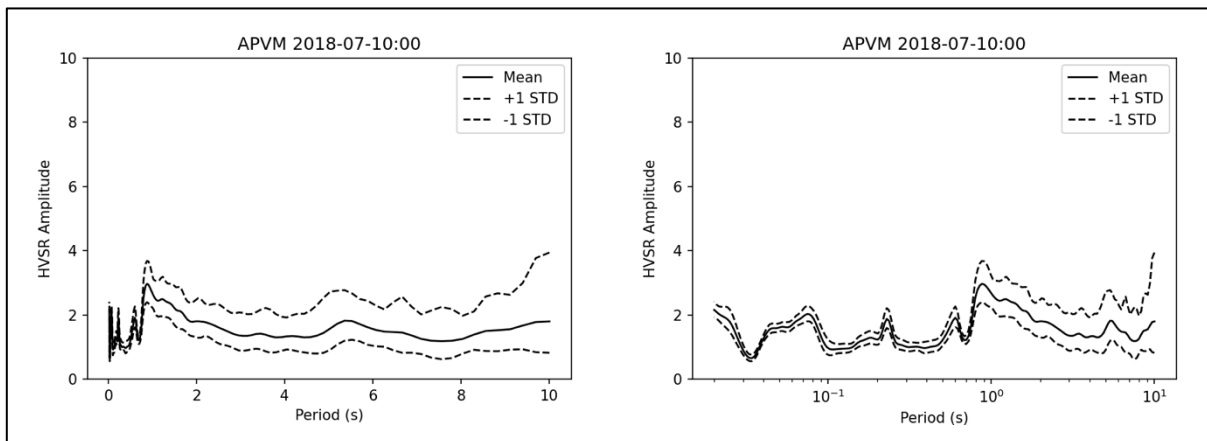


Figura 22. APVM_2018-07-10/00.

Estación BJVM (Benito Juárez)

La estación se encuentra en una casa de cultura de la Ciudad de México. Aparentemente es un sitio con un periodo bien definido a los 0.5 segundos. Sin embargo, en nuestra visita obtuvimos información relevante. Este sitio se encuentra sobre una placa de concreto que pertenecía a una antigua fábrica textil. Esa losa nunca se removió y se encuentra enterrada a pocos metros.

Observamos que esta estación no presentó variación anual de ningún tipo, pero en cambio era evidente que existían otros periodos característicos que no se pueden distinguir, se piensa que son los que realmente representan el sitio. Un punto interesante es que logramos identificar que los sitios que se encuentran “contaminados” por estructuras ocultas, son los sitios que no presentan cambios estacionales. Sus periodos son constantes a lo largo del año. En cambio, los periodos que realmente representan las características dinámicas del sitio, son lo que encontramos en los espectros que tienen ligeras variaciones en periodos y amplitudes.

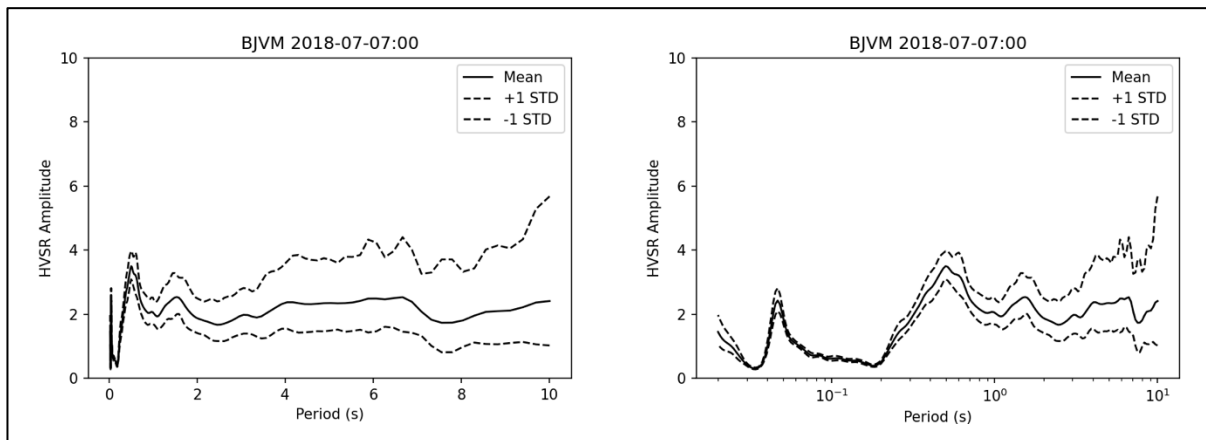


Figura 23. BJVM_2018-07-07/00.



Figura 24. Estación BJVM. La estación se encuentra adentro de una casa de cultura entre dos edificios.

Estación THVM (Tláhuac)

La estación Tláhuac no se visitó pero es una estación que presenta un pico a los 5 segundos. Aparentemente este valor es incorrecto debido a su ubicación. Sin embargo, se cree que es un sitio que

puede presentar periodos largos. Primeramente, el pico máximo tiene una amplitud de 4 en los espectros HVSR, esta amplitud es cuatro veces menor que Venustiano Carranza, Iztacalco y Cuauhtémoc. Se encuentra en un sitio donde las rocas de la formación Tarango y las Sierras Mayores del Cuaternario Superior han cubierto completamente otros sedimentos aluviales de grandes planicies. Es probable que estos sedimentos se encuentren entre 800 y 1000 metros de profundidad. Si hacemos una aproximación por medio de la relación entre los parámetros de profundidad, velocidad y periodo dominante (CFE, 2008), las rocas de 800 m/s de esta zona estimarían periodos dominantes de 5 segundos.

Cuando comparamos con el mapa de periodos dominantes parece ser que esta estación está completamente fuera del lugar, es decir, el periodo fundamental está en 5 segundos, en cambio el periodo dominante del mapa de la Figura 3 debería corresponder a 0.5 segundos. Algunos investigadores han observado este tipo de inconsistencias, por ejemplo Jaramillo et al. (2012) observó periodos muy largos en zonas relativamente competentes. Creemos que es importante comparar la amplitud de los espectros H/V para poder diferenciar los periodos fundamentales de los periodos característicos que ocurren cuando se excitan capas relativamente duras, pero con bajas velocidades que generan amplitudes menores que no representan la excitación del antiguo Vaso de Texcoco. Es decir, si existe un periodo fundamental pero que no necesariamente está relacionado al periodo dominante.

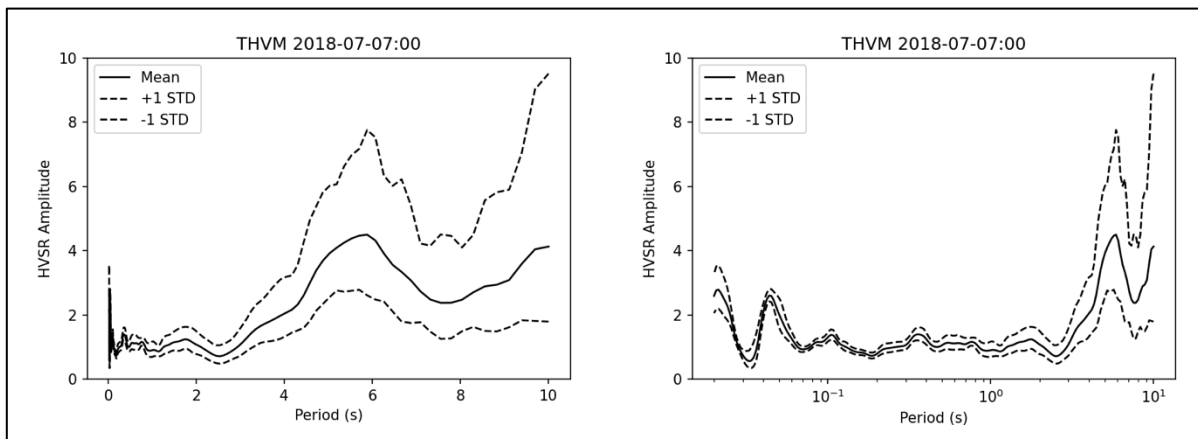


Figura 25. THVM_2018-07-07/00.

Estación TXVM (Texcoco)

La estación Texcoco predice correctamente los valores esperados en los mapas de periodos dominantes (Figura 3). Se puede usar como un punto de referencia para estudios posteriores, sobre todo, para entender las zonas de altos gradientes hidrológicos.

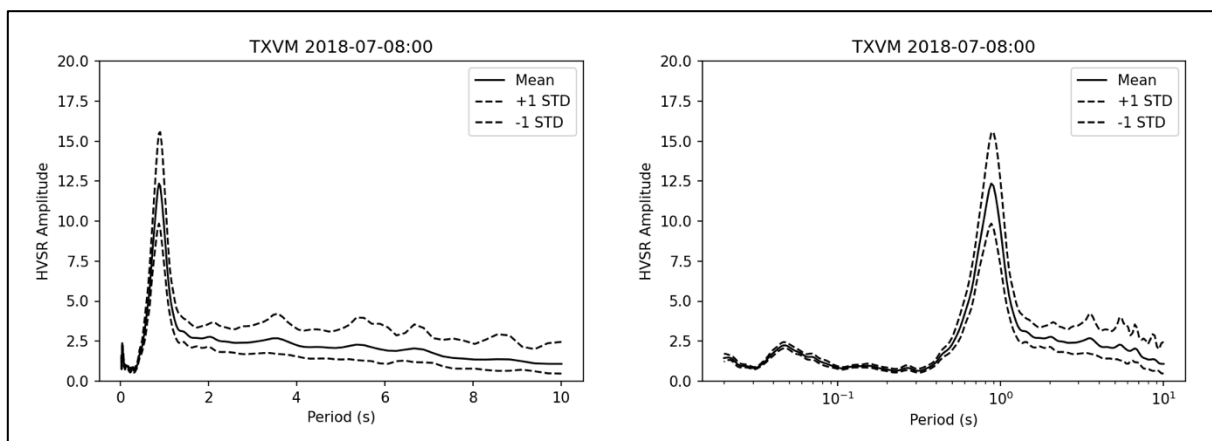


Figura 26. TXVM_2018-07-08/00.

Estación XCVM (Xochimilco)

Esta estación presenta cambios interesantes, su periodo dominante coincide con el fundamental. Sin embargo, presenta elementos similares a la estación Tláhuac, debido a su entorno geológico y proximidad, es probable que entre 700 y 900 mts. de profundidad se encuentren sedimentos de abanicos aluviales, es decir, espesores ligeramente menores pero que pueden estar controlados por el mismo sistema profundo.



Figura 27. Estación XCVM. La estación se encuentra cerca de un árbol grueso y alto, atrás hay un salón de clases y a un lado se encuentra un complejo departamental.

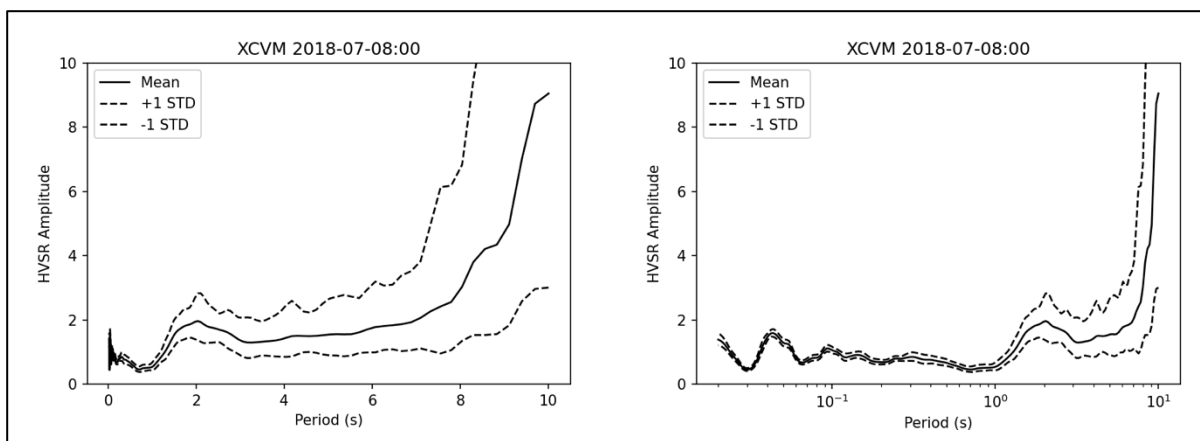


Figura 28. XCVI_2018-07-08/00.

Resultados de H/V en la Zona de Lomas

La zona de Lomas es la zona de mayor dificultad de estudio. Esta zona debe reflejar espectros planos. Teóricamente, los espectros H/V se representan en forma de una línea constante cuando no existe amplificación debido a que tenemos una roca competente sin interfases de sedimentos blandos. Pero nuestras observaciones muestran todo lo contrario, estos espectros resultan variar fuertemente con el tiempo.

Estación AMVM (Amecameca)

Esta estación se encuentra en la Zona de Lomas, con un periodo dominante estimado de 0.4 segundos, como podemos apreciar en la Figura 29 el periodo fundamental se observa a los 0.2 segundos, lo cual implica una variación menor.

Por ser un sitio con basamento rocoso, esperaríamos una curva plana en todos los periodos, pero solo ocurre de 0.6 a 10 segundos, al inicio aparecen tres picos, el primero parece que su máximo está en 0.2 segundos. Sin embargo, la estructura es más compleja, porque hay otros periodos que hacen interferencia, por lo que se divide en tres (intervalo de 0.2 a 0.4 segundos), en el mes de junio el pico del centro llega a superar el periodo dominante a lo largo del día (amplitud máxima en 0.3 segundos), estos periodos corresponden a estructuras de 50 metros aproximadamente.

Debido a que los cambios ocurren anualmente pensamos que se trata de variaciones de origen antropogénico, el dominante (0.2 segundos) no parece mostrar variación significativa durante el año, el

segundo pico tiene su máximo en 0.08 segundos pero en enero de 2020 también llega a superar la amplitud del periodo dominante durante el día, a principios de abril parece disiparse y a finales de julio vuelve a incrementar. Esta variación probablemente se encuentra controlada por los cambios cíclicos del nivel freático.

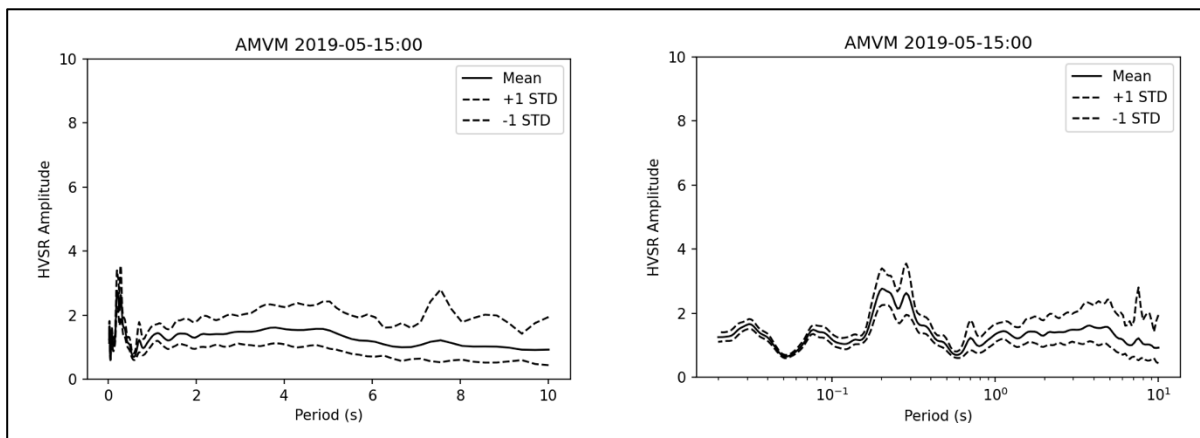


Figura 29. AMVM_2019-05-15/01.

Estación AOVN (Álvaro Obregón)

Teóricamente cualquier espectro H/V en la Zona de Lomas debe ser plano para todas las frecuencias, esto se debe a que no deberían existir depósitos de sedimentos blandos, por lo tanto, esta relación se debe mantener constante a lo largo del año. Sin embargo, encontramos que esto no es cierto, en el caso de la estación Álvaro Obregón se observan efectos de todo tipo, primero un periodo fundamental claro a los 1.6 segundos, la cual es variable en todos los sentidos, esto es temporal y espectral, es decir, aumenta ligeramente en modos superiores en un lapso de varios meses.

Por otro lado, los periodos menores también tienen variabilidad a lo largo del año, todas estas variaciones son claramente estacionales y se disipan a lo largo de algunos meses, pero aparecen nuevamente al siguiente año.

Una consecuencia interesante de estas observaciones se refiere a la definición de lo que es una estación de referencia, es decir, teóricamente se supone que cualquier estación en la Zona de Lomas o de roca dura debe tener características estacionarias, pero no es así. Creemos que es necesario hacer una revisión cuidadosa en los sitios de roca dura o en la Zona de Lomas.

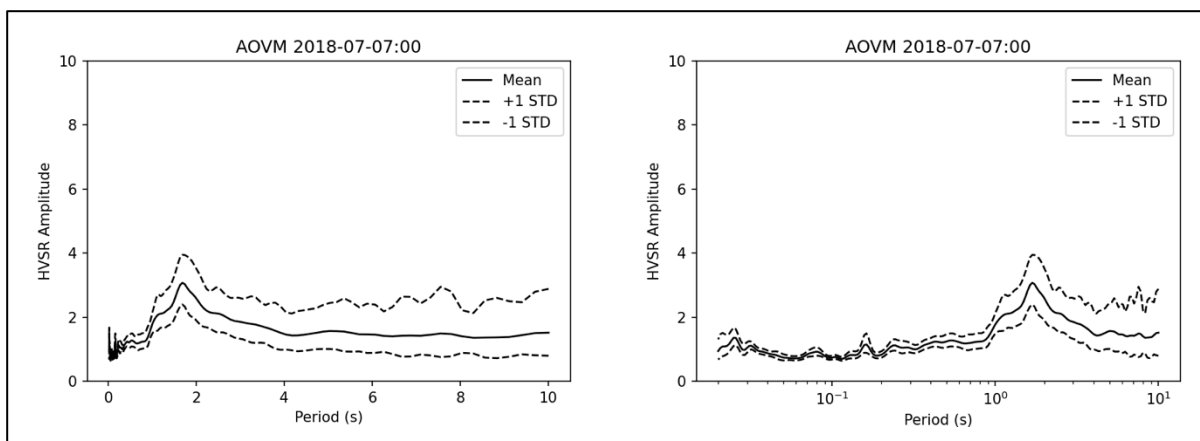


Figura 30. AOVm_2018-07-07/00.

Estación ATVM (Atlacomulco)

Atlacomulco se encuentra muy lejos del Valle de México y está localizado en otro tipo de valle aluvial, en este se puede observar un periodo fundamental de 0.7 segundos, pero con una amplitud considerable. Es importante destacar que a pesar de que los estudios de periodos dominantes se han realizado desde hace varios años, solo se han hecho en sitios muy específicos, especialmente en la Ciudad de México. Sin embargo, los núcleos de población se han esparcido a lo largo de toda la República, incluyendo sitios como Atlacomulco, en donde se debería realizar una zonificación más a detalle.

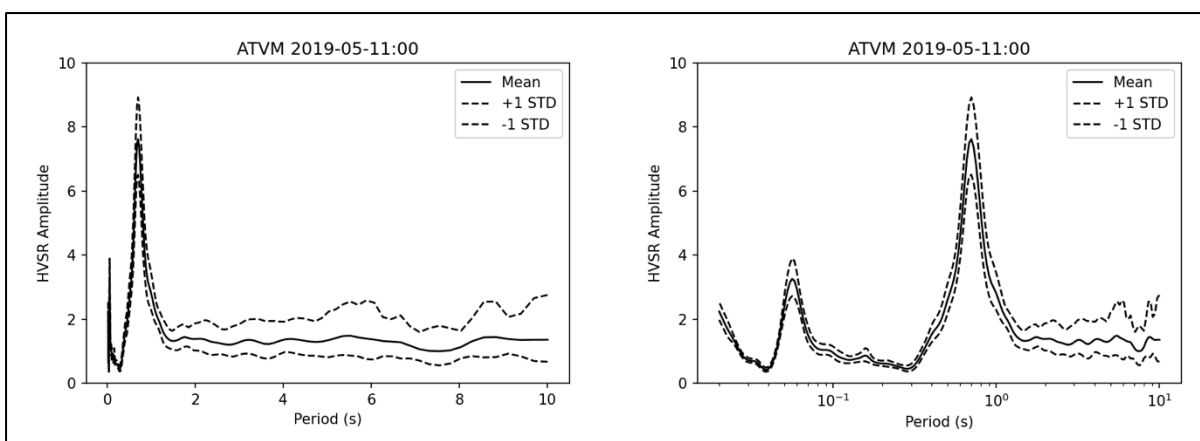


Figura 31. ATVM_2019-05-11/00.

Estación AZVM (Atizapán)

Atizapán es una estación que es muy difícil de analizar porque a pesar de que se encuentra en Zona de Lomas y que refleja relativamente un espectro plano, las amplitudes máximas están invertidas. Si

analizáramos una función de transferencia de un sitio donde la frecuencia dominante siempre es la de menor valor, es decir, a medida que las frecuencias aumentan, las amplitudes disminuyen. En este caso, ocurre lo contrario, por lo tanto, interpretamos que el periodo característico de los sedimentos de menor espesor son los que controlan la vibración de este sitio.

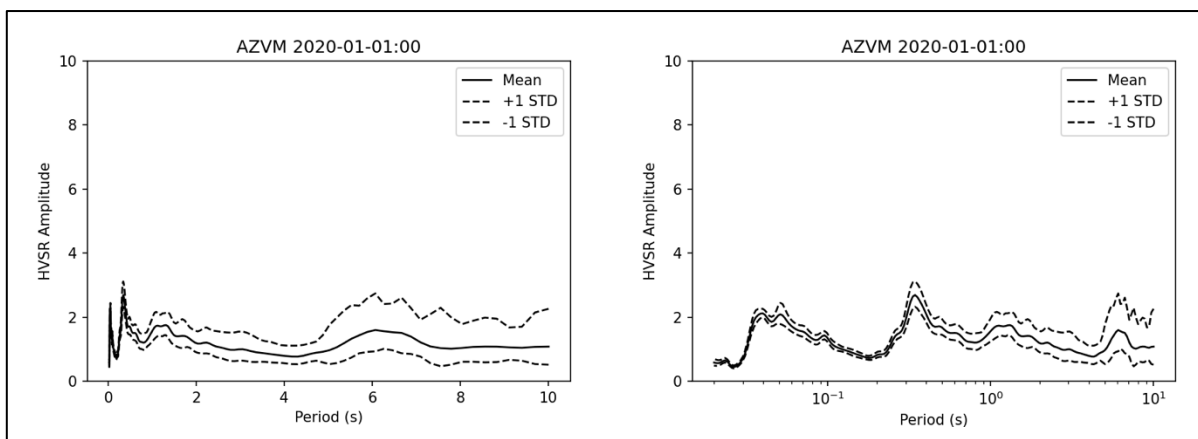


Figura 32. AZVM_2020-01-01/00.

Estación CJVM (Cuajimalpa)

En este caso, la primera curva no varía en amplitud, pero la meseta máxima se amplía y se reduce a lo largo del día, pasa de entre 0.6 a 1.8 a 0.6 a 2 segundos. No conocemos las causas de porqué se observa una meseta a ciertas horas y luego desaparece, además de que hay poca información del periodo que se analizó. Una posibilidad podría ser condiciones muy locales, por ejemplo, el cauce del río que se encuentra a pocos metros de la estación.

Además, los cambios que se observan en los periodos más bajos, como que tiende a aumentar en ciertas ocasiones, por ejemplo el 09 de julio de 2019 a la 01:00am pasó de 4 a 7 en amplitud, volvió a su amplitud normal en cuestión de horas, pueden estar relacionados con la altura del techo que vemos en la Figura 34, por cambios de velocidad en el viento o por la actividad hidrológica del arroyo cerca que se encuentra a pocos metros de distancia y a una profundidad aproximada de 5 metros, con una velocidad de corte de 40 m/s que corresponde a los sedimentos no consolidados. Se pueden observar las variaciones de la saturación del nivel freático, es decir, los cambios del nivel de agua.

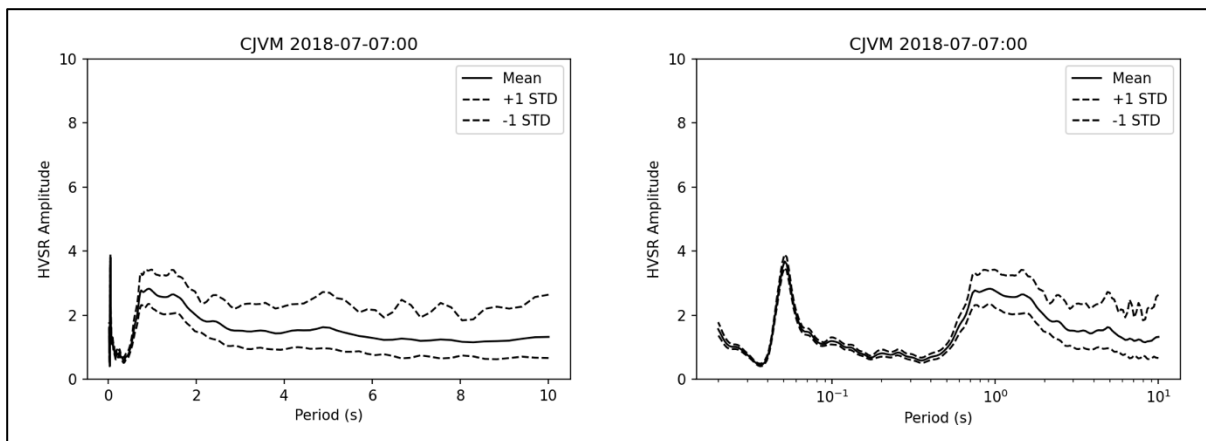


Figura 33. CJVM_2018-07-07/00.



Figura 34. Estación CJVM. La estación se encuentra en una escuela, al lado de estructuras altas y cerca de un río.

Estación INVM (ININ)

Esta estación debería presentar una curva plana parecida al tramo de 1 a 10 seg., sin embargo, podemos observar 3 picos que varían en amplitud, pero su forma y periodos se mantienen estables en el tiempo.

La zona plana tampoco presenta variaciones considerables, sin embargo, se puede inferir que la señal real debería ser plana en su totalidad por la zona en que se encuentra pero debido a que está dentro de un Instituto de Investigaciones Nucleares, los tres picos pueden considerarse como una señal externa que detecta el instrumento y recubre la señal real.

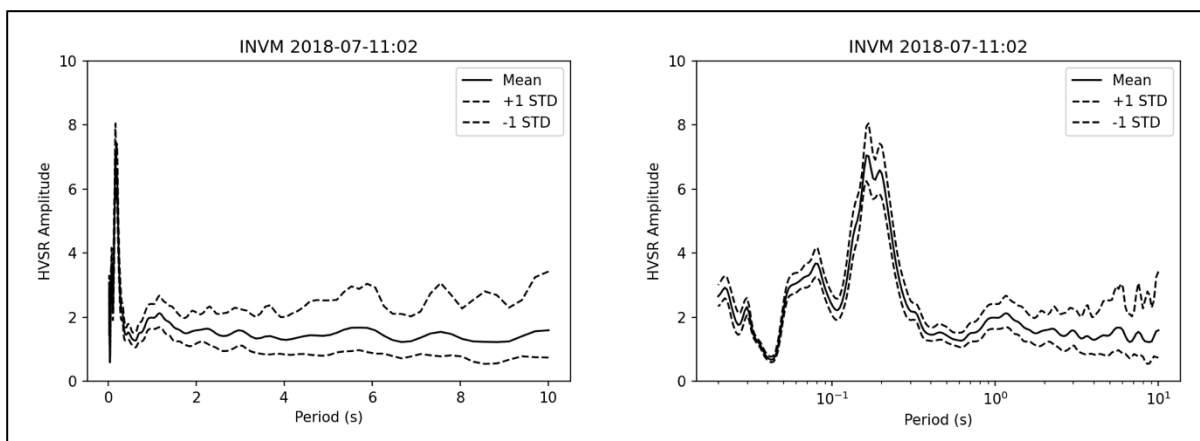


Figura 35. INVM_2018-07-11/02.

Estación MAVM (Malinalco)

Esta estación también refleja que no se manifiestan cambios hidrológicos todo el tiempo en todas las estaciones sísmicas, nuevamente es un caso similar al de Atlacomulco, donde el sitio se encuentra muy lejano al Valle de México y presenta algún tipo de efecto de sitio.

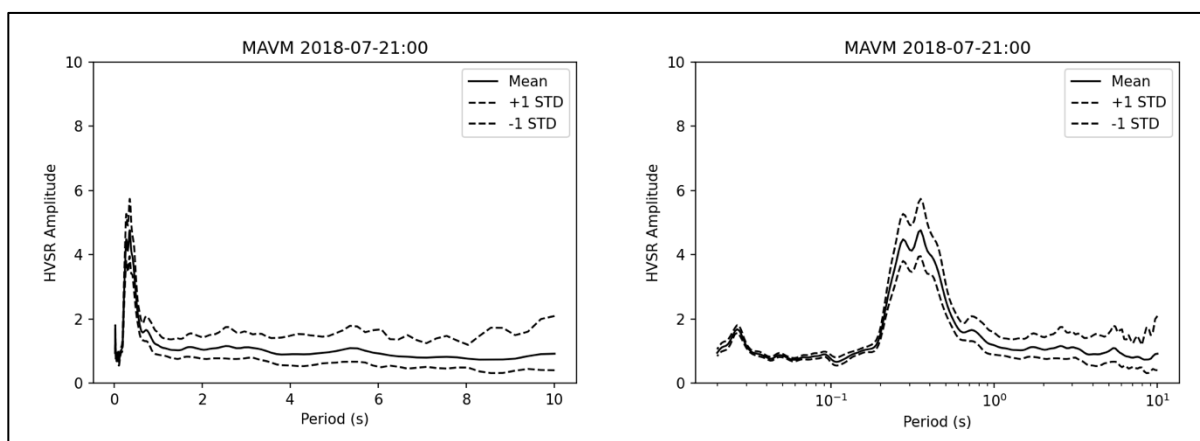


Figura 36. MAVM_2018-07-21/00.

Estación MCVM (Magdalena Contreras)

Es probable que debajo de este sitio tengamos dos acuíferos a diferentes profundidades, el primer acuífero se encuentra no confinado y representa el pico de la derecha porque tiene variaciones estacionales muy definidas, en cambio, el que tiene la frecuencia dominante se encuentra en un acuífero confinado, por lo tanto, no cambia de amplitud a lo largo de las estaciones del año. Esta interpretación se puede

correlacionar con los mapas geológicos del Valle de México donde se han caracterizado hasta 4 acuíferos diferentes y muestran en algunos casos que se encuentran debajo de las rocas volcánicas más jóvenes.

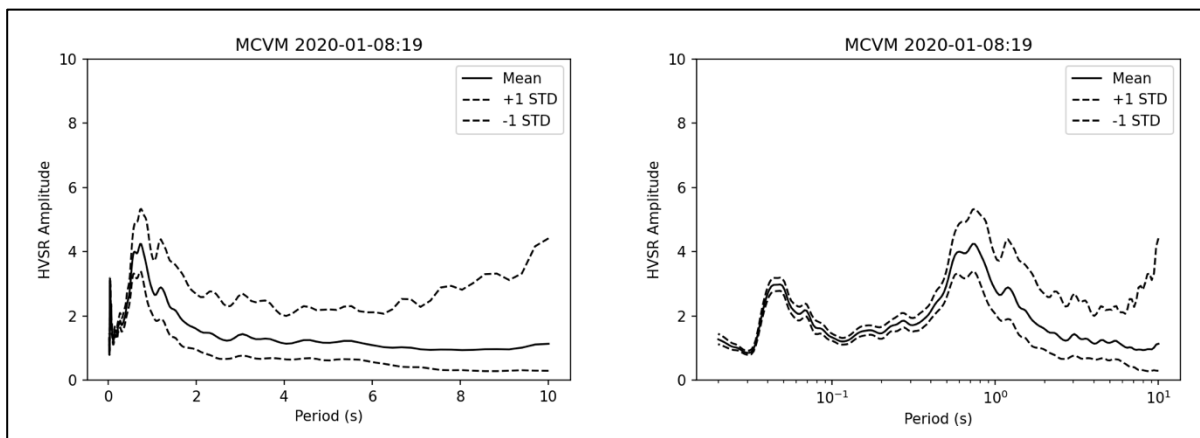


Figura 37. MCVN_2020-01-08/19.

Estación MHVM (Miguel Hidalgo)

Esta estación se encuentra dentro del Panteón Civil de Dolores, el cual está dentro del cerro Chapultepec que pertenece a rocas volcánicas del periodo Terciario, por la zona en la que se encuentra se espera una curva más plana y uniforme, sin embargo, se pueden apreciar cuatro picos, de los cuales los tres no presentan cambios en amplitud o periodo, se mantienen constantes a lo largo del tiempo, el primero si llega a superar la amplitud del segundo. Por lo anterior, podemos decir que es difícil identificar cual es el periodo dominante, ya que el periodo fundamental no coincide con el que se especifica en la Figura 3.

La estación Miguel Hidalgo ocupa una mención especial en este trabajo debido a que, los cambios en los modos superiores son claramente estacionales y se encuentran controlados por los flujos subterráneos de todo el Valle de México. Debido a esto, se realizó un análisis cuidadoso para entender su relación con los cambios de agua del subsuelo, los cuales se presentan en el capítulo 5. Comparando la Figura 11 con la Figura 38 podemos ver la aparición y desaparición de modos superiores muy cerca de los 0.05 segundos. Que corresponden a una profundidad aproximada de 8 metros, que es precisamente donde se localiza el nivel freático. Esta zona es interesante porque representa los cambios de masas de agua de todo el Valle de México, tal vez porque funciona como una zona de recarga para los acuíferos del Valle de México.

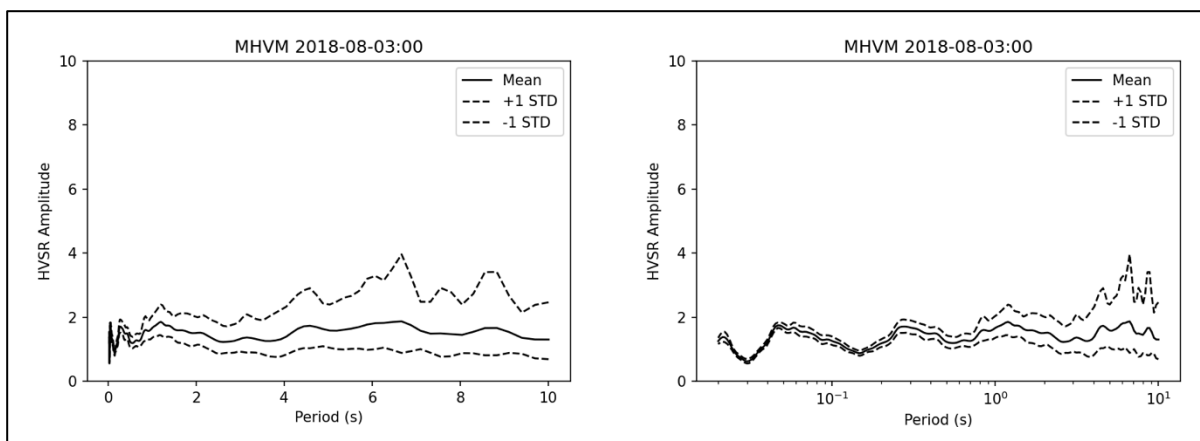


Figura 38. MHVM_2018-08-03/00.



Figura 39. Estación MHVM. La estación se encuentra adentro de un panteón, en una zona despejada, al lado tiene un edificio de un nivel.

Estación MPVM (Milpa Alta)

Esta estación refleja actividad antropogénica en todos los sentidos, probablemente relacionado a cambios en la actividad cultural, por ejemplo, en época de siembra o de eventos importantes como días festivos o cambios de estaciones que es cuando cambian las actividades agrícolas, además a periodos bajos es probable que existan algunas relaciones con el patrón hidrológico de la zona.

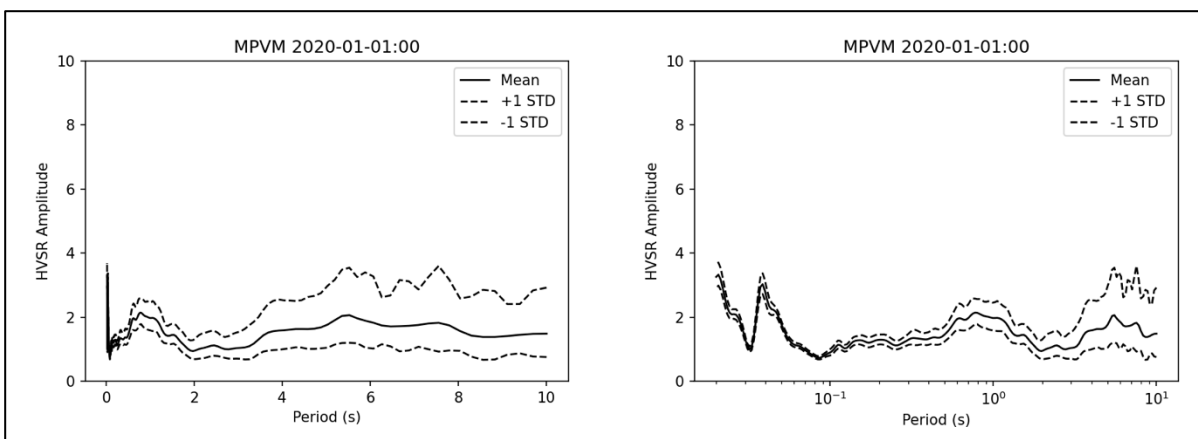


Figura 40. MPVM_2020-01-01/00.

Estación MZVM (Mezontepec)

Esta estación tiene muy poca información para poder asociar los cambios en el espectro a la litología del lugar. Su periodo fundamental no corresponde con el mapa de periodos dominantes, por lo que se vuelve a hacer hincapié en un análisis a detalle de las estaciones ubicadas en la Zona de Lomas.

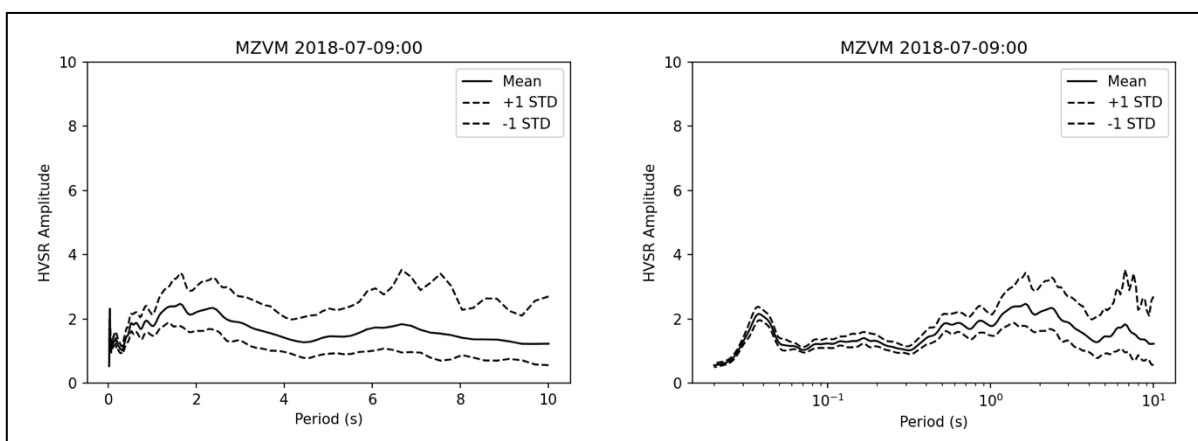


Figura 41. MZVM_2018-07-09/00.

Estación PBVM (Peñón de los Baños)

En esta estación podemos observar una curva plana y dos picos con mayor amplitud en periodos bajos, sin embargo, éstos parecen cambiar con el paso de los días pero manteniendo una secuencia, primero se forman dos con la misma amplitud, después el de la derecha aumenta su amplitud y el de la izquierda disminuye, por último aparece uno con una amplitud considerable, esto se repite durante los 3 años. En

cambio, el resto del espectro no presenta variación, se mantiene estable en periodo y amplitud. Por la ubicación en la que se encuentra esta estación, esas variaciones en los periodos bajos pueden deberse a la interferencia que provoca una torre de radar perteneciente al aeropuerto que se encuentra a un lado de la caseta como podemos observar en la Figura 43. En este sitio no fue posible encontrar el periodo dominante reportado en el mapa de la Figura 3, probablemente se debe al tipo de roca volcánica en el cual se encuentra la estación de Peñón de los Baños. En los mapas geológicos del Valle de México se observa que el Peñón de los Baños corresponde a edificios volcánicos que no se encuentran asociados al resto de la litología del Valle de México.

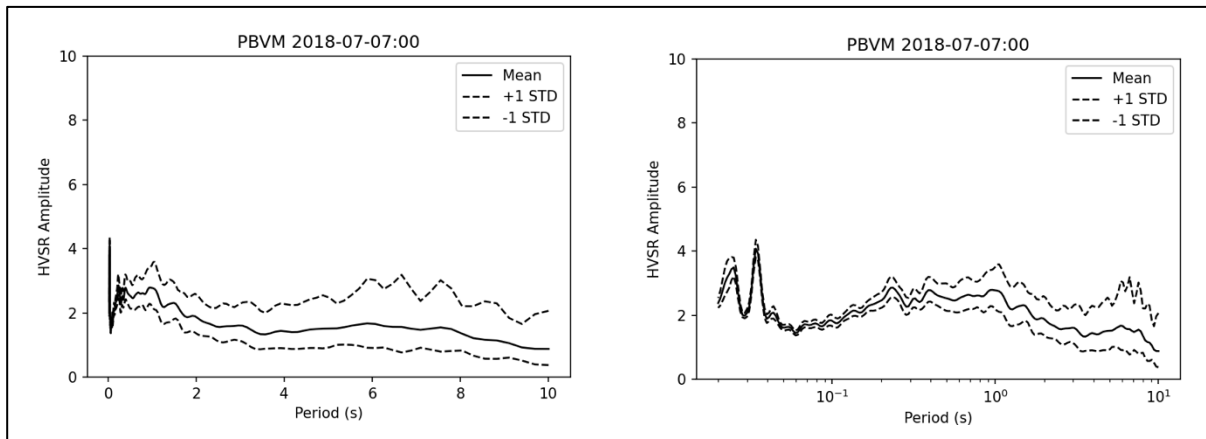


Figura 42. PBVM_2018-07-07/00.

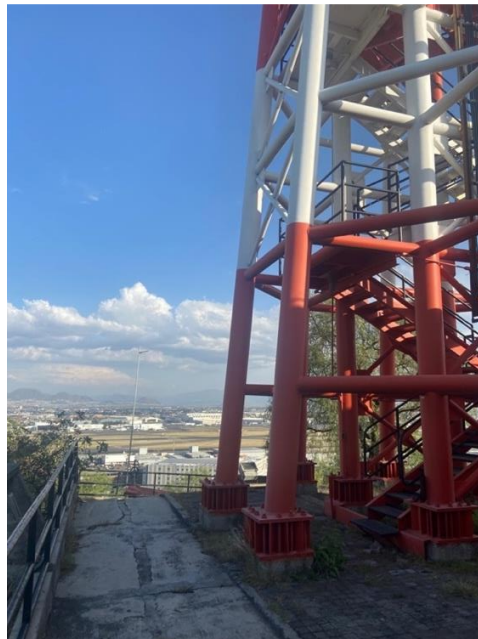


Figura 43. Estación PBVM. La estación se encuentra cerca de una torre de radar.

Estación PTVM (Pico Tres Padres)

Hay muy poca información registrada en esta estación, por lo que se pudieron analizar todas las imágenes. Las primeras dos imágenes son horas del mismo día de enero donde podemos ver una curva relativamente plana, que se mantiene estable ese día, de ahí se brinca al 14 de abril donde se sigue manteniendo estable las primeras horas (de 2 a 13hrs), a las 14 hrs hay interferencia en la señal y la recuperamos hasta las 17 hrs, la curva sigue sin presentar variaciones, brinca al 21 de mayo a las 0 hrs en donde la variación está en los periodos bajos, donde el primer pico parece tener un pequeño aumento en su amplitud pero solo durante 3 hrs ya que a las 4 hrs el pico se redujo a la misma amplitud que el resto de la curva, aumenta conforme pasan las horas hasta las 8 hrs donde empezó a disminuir nuevamente. A las 14 hrs del mismo día la señal vuelve a registrar una interferencia, se recupera la señal hasta las 18 hrs, aún sin variación hasta la última imagen que es a las 21 hrs.

Debido a la escasa información, este sitio es similar a una medición clásica donde no se hace un análisis estacional, en este caso no es posible saber si el aparente periodo fundamental que ocurre a los 1.5 seg. realmente se trata de un efecto permanente o estacional. Esto probablemente corresponde a observaciones similares donde otros investigadores han encontrado periodos dominantes de más de un segundo en Zona de Lomas

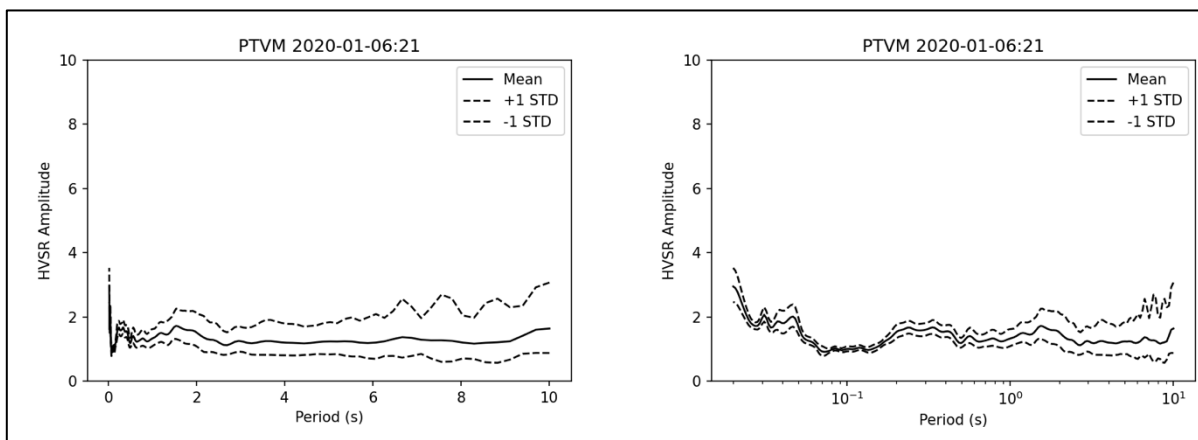


Figura 44. PTVM_2020-01-06/21.

Estación TLVM (Tlalpan)

No hay mucha información consecutiva para esta estación, pero las variaciones no parecen ser significativas, podría decirse que no existen ya que no se aprecian aumentos de amplitud, en ocasiones una disminución de la misma pero no se tendría una razón muy certera debido a que ocurre en pocos días y no sé sabe si el resto de los días pasó lo mismo. Una situación similar a lo que vimos en Pico Tres Padres.

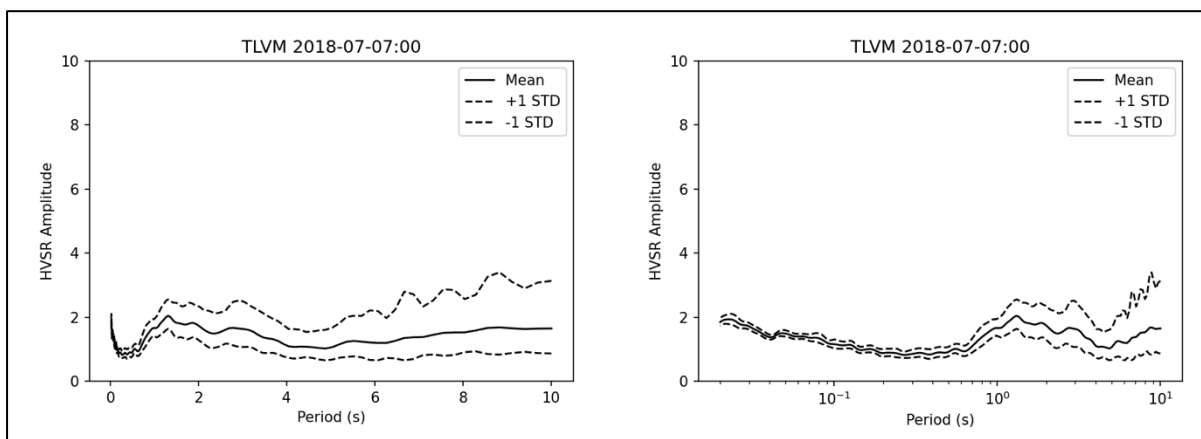


Figura 45. TLVM_2018-07/00.

Estación TOVM (Toluca)

En esta estación podemos observar una curva plana, muy limpia que no presenta variación en amplitud o periodo después de 0.1 seg., ya que antes tenemos un pico que, si bien no varía considerablemente, su forma puede cambiar en ocasiones, suele disiparse, pero no aumentar en amplitud. Creemos que Toluca es el mejor sitio de referencia en todo el centro de México, porque realmente representa un sitio donde todo el espectro es constante y plano a lo largo de todo el año, incluso a los cambios ambientales e hidrológicos, tal vez esto se deba al tipo de roca impermeable y a las condiciones litológicas del sitio.

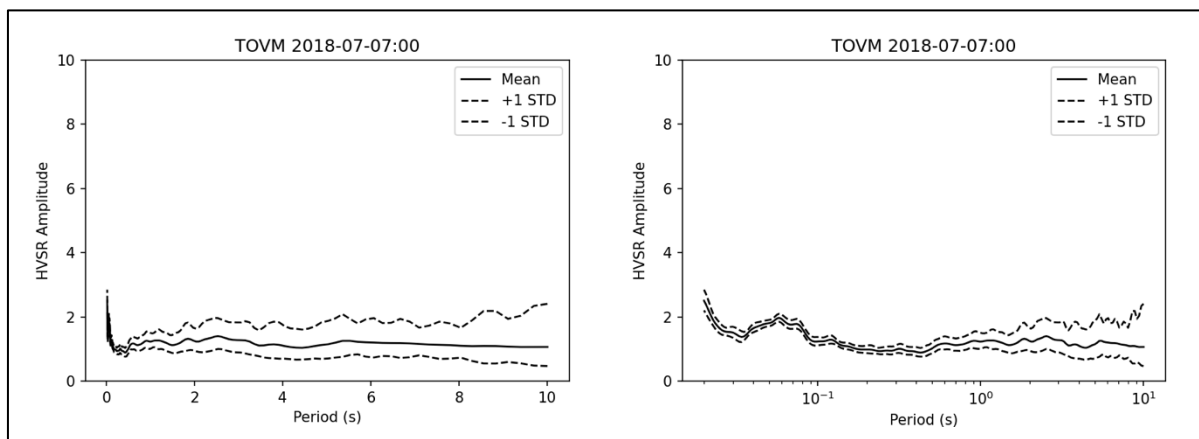


Figura 46. TOVM_2018-07-07/00.

Estación VTVM (Valle de Teotihuacán)

Esta estación probablemente es de las pocas donde se ha logrado obtener un periodo dominante en la Zona de Lomas adecuado al mapa de la Figura 3. Esta situación también demuestra la enorme dificultad de analizar los sitios con periodos menores a 1 seg.

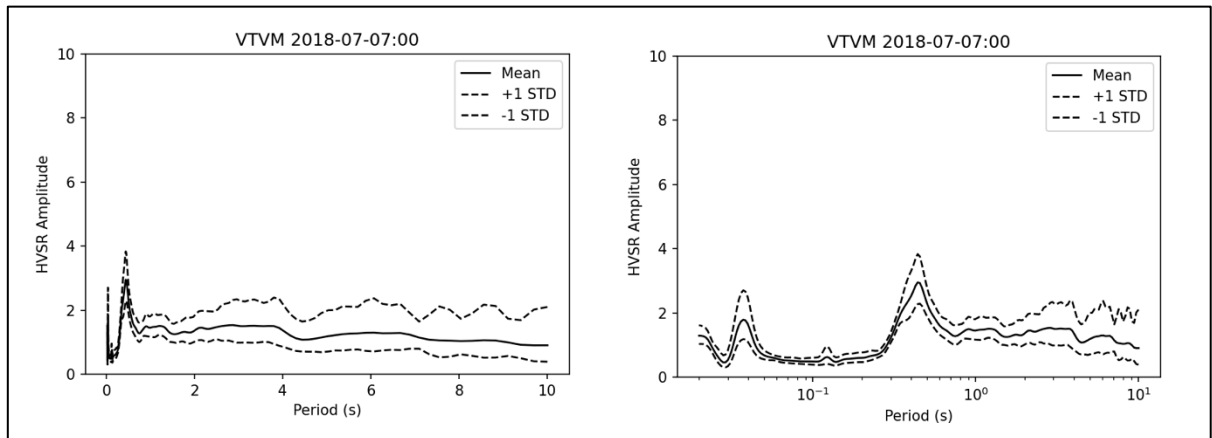


Figura 47. VTVM_2018-07-07/00.



Figura 48. Estación VTVM. La estación se encuentra en un espacio despejado cerca de un árbol y a pocos metros de una sala de ordeño.

Estación ZUVM (Zumpango)

Esta estación se encuentra cerca de un valle aluvial alejado del Valle de México, por lo tanto, debe analizarse fuera del contexto de los mapas de periodos dominantes exclusivos para los periodos fundamentales asociados al Lago de Texcoco y al valle central.

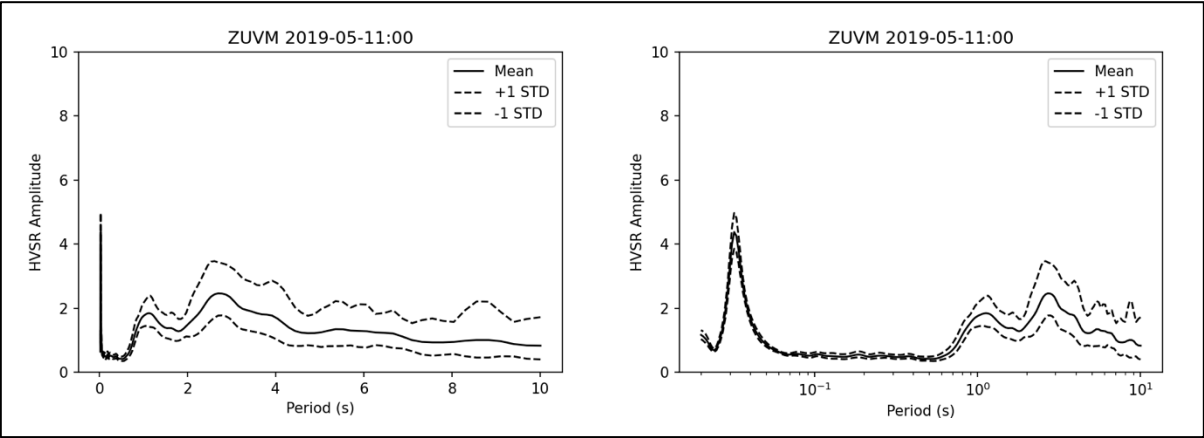


Figura 49. ZUVM_2019-05-11/00.

ANEXO D

Visita de campo

Durante el periodo del 28 de mayo al 03 de junio de 2022 se hicieron visitas de campo a las estaciones, no todas las estaciones fueron visitadas, pero en general se tuvo un panorama completo de la situación de las estaciones. Creemos que es fundamental conocer los sitios y analizar puntualmente cada caso en particular. La gran cantidad de situaciones anómalas tienen una posible explicación física, además, después de visitar todas las estaciones, pudimos generar nuevas hipótesis en los casos que era necesario y analizar las discrepancias de nuestros resultados con resultados previos.

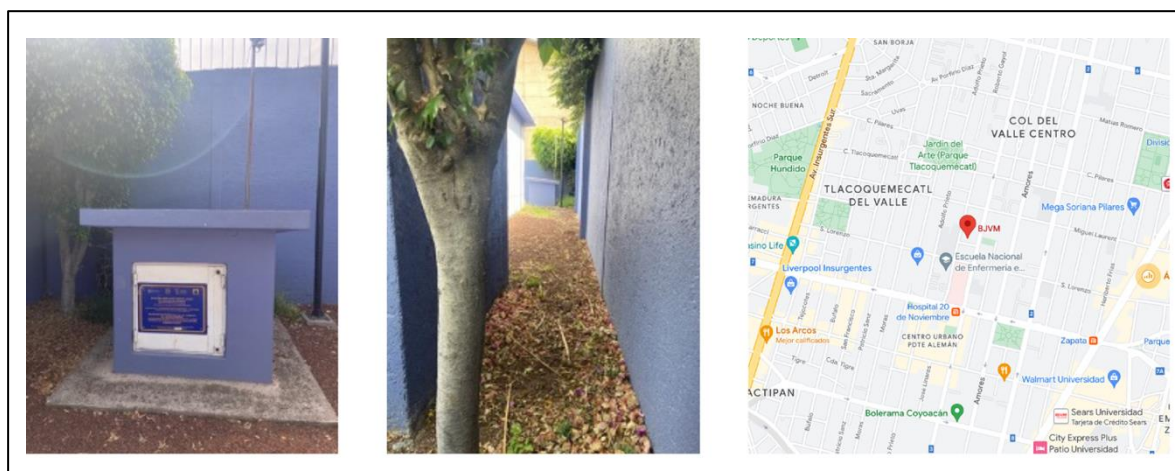


Figura 50. Estación BJVM (Benito Juárez). Ubicada en Zona II (Zona de Transición).

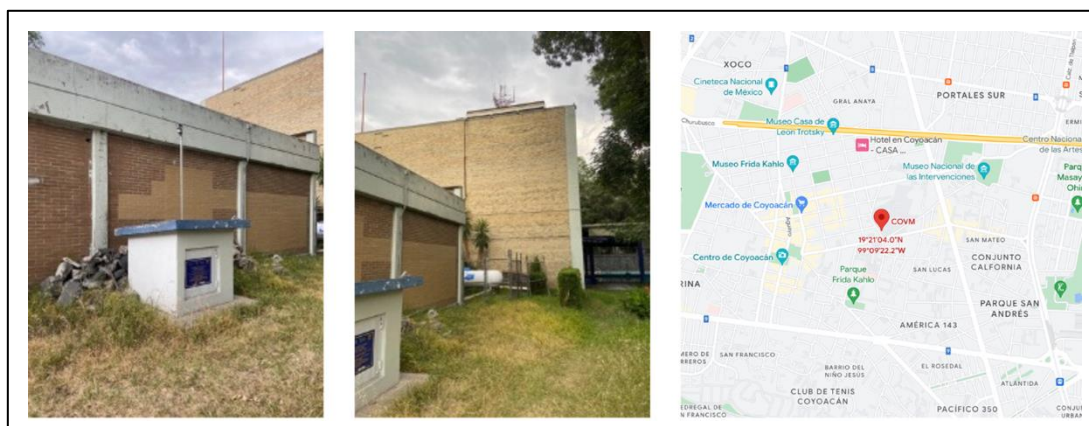


Figura 51. Estación COVM (Coyoacán). Ubicada en Zona II (Zona de Transición). No registró datos.

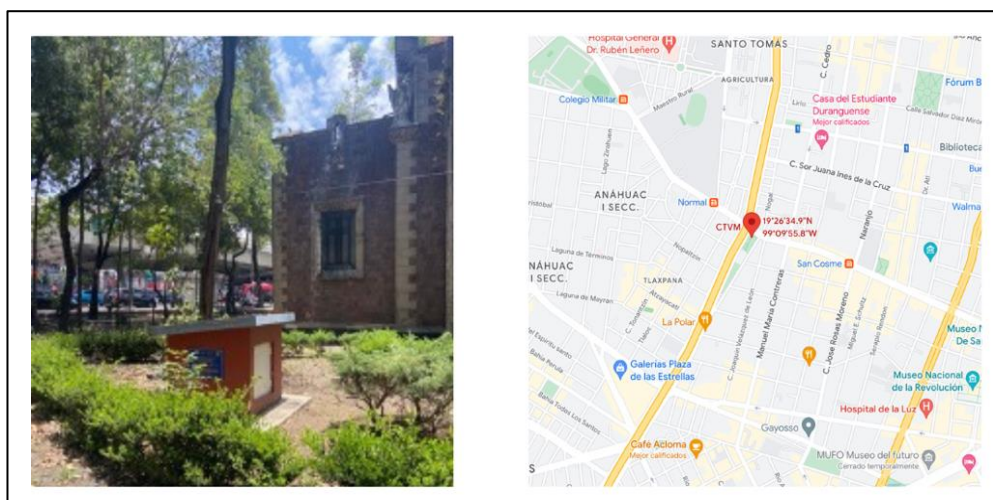


Figura 52. Estación CTVM (Cuauhtémoc). Ubicada en Zona III (Zona del Lago).

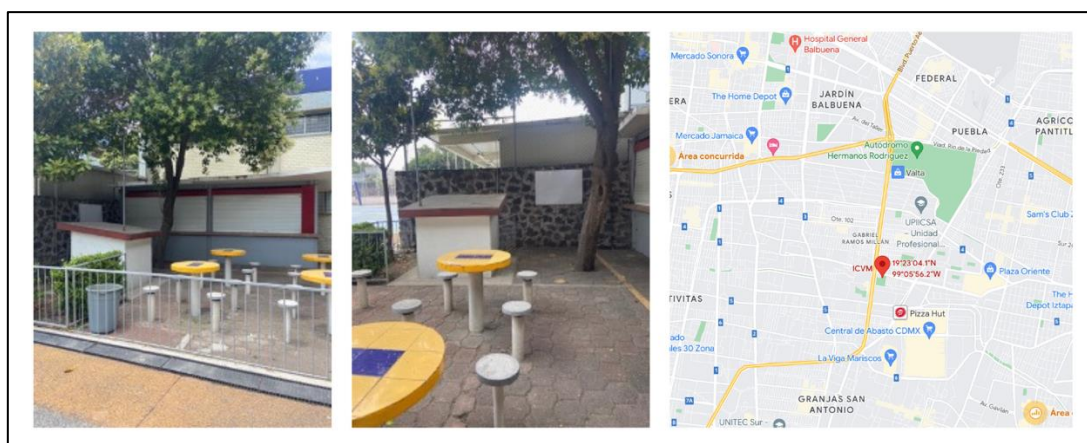


Figura 53. Estación ICVM (Iztacalco). Ubicada en Zona III (Zona del Lago).

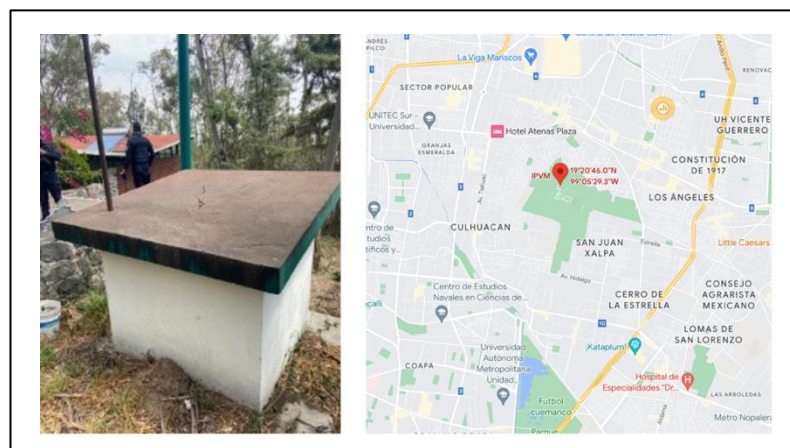


Figura 54. Estación IPVM (Iztapalapa). Ubicada en Zona I (Zona de Lomas). No registró datos.

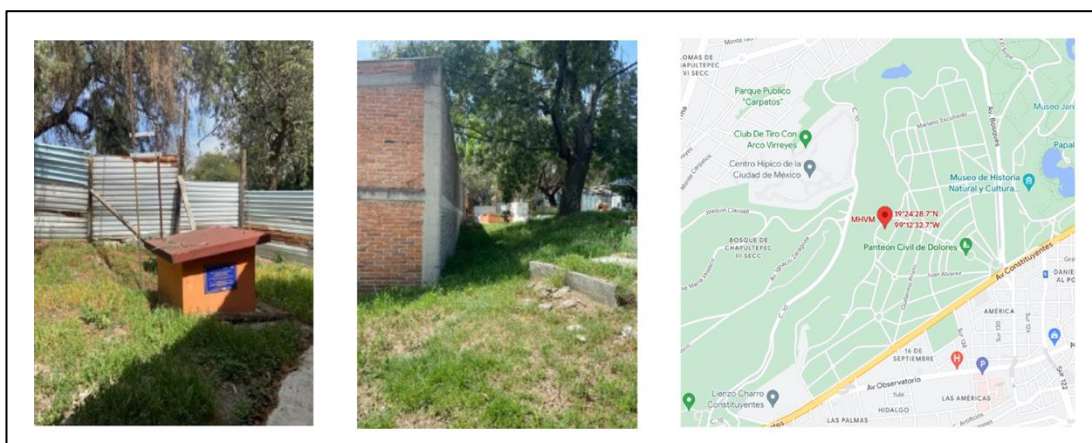


Figura 55. Estación MHVM (Miguel Hidalgo). Ubicada en Zona I (Zona de Lomas).

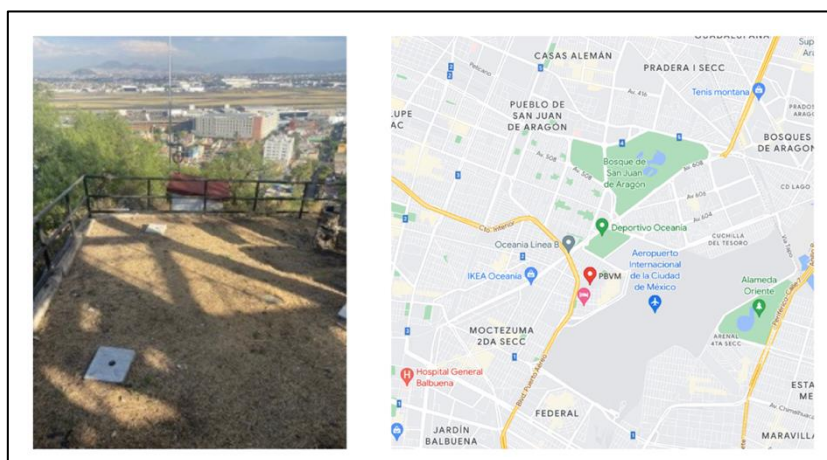


Figura 56. Estación PBVM (Peñón de los Baños). Ubicada en Zona III (Zona del Lago).



Figura 57. Estación XCVN (Xochimilco). Ubicada en Zona II (Zona de transición).



Figura 58. Estación CJVM (Cuajimalpa). Ubicada en Zona I (Zona de Lomas).

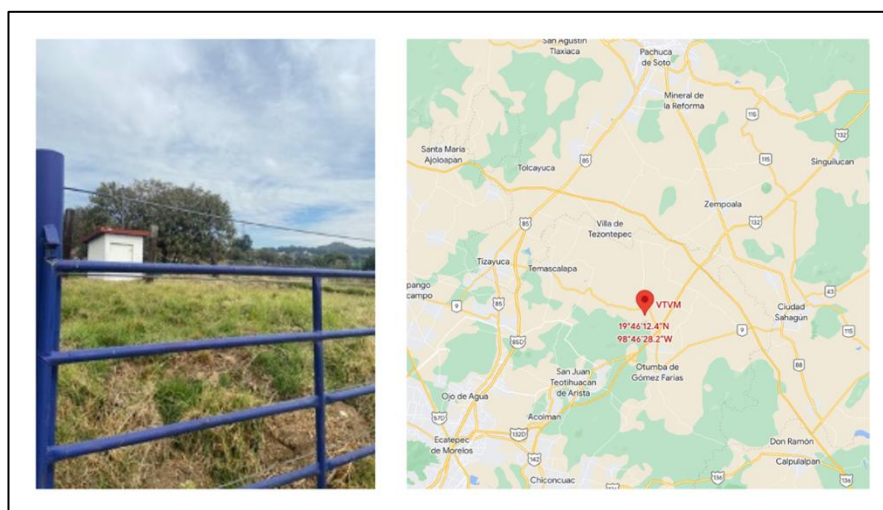


Figura 59. Estación VTVM (Valle de Teotihuacán). Ubicada en Zona I (Zona de Lomas).

ANEXO E

Resultados de MSNoise

Las figuras que vemos a continuación son las salidas del código MSNoise, en la Figura 60 observamos la disponibilidad de datos para cada año analizado, la Figura 61 es ejemplo de un interferograma entre un par de estaciones, la Figura 62 nos muestra lo mismo que la figura anterior pero usando movimiento apilado por medio de ondulaciones, la Figura 63 tiene el resultado de los cálculos de MWCS en dos imágenes superpuestas, la Figura 64 nos muestra la distancia entre estaciones tomando un stack de referencia, y por último en la Figura 65 y tenemos la variación de la velocidad dv/v por cada año procesado.

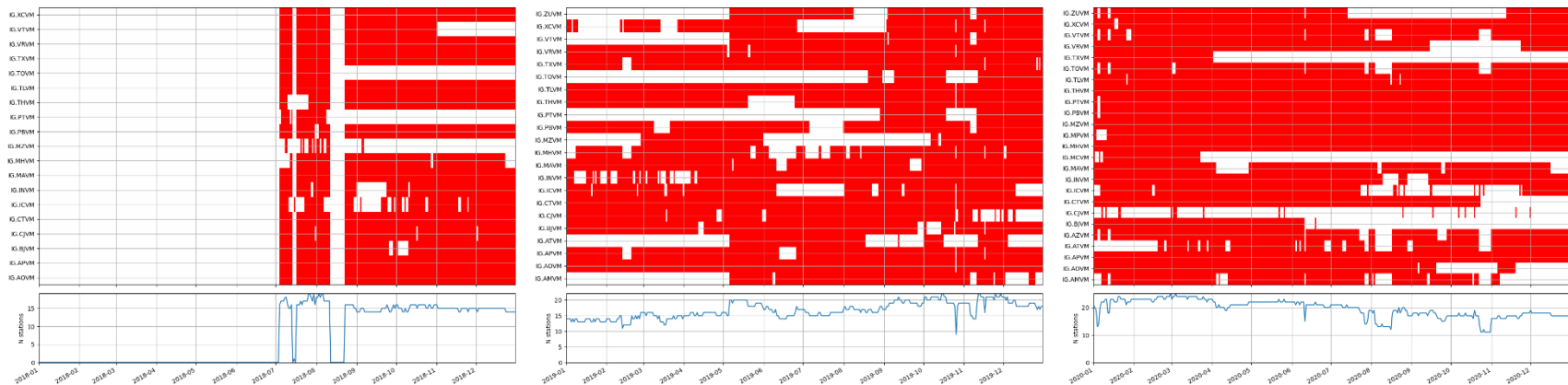


Figura 60. Disponibilidad de datos. Los tres gráficos que observamos representan la disponibilidad de datos (en color rojo) en cada estación (indicada en el eje Y) y la fecha en que fue registrado (indicado en el eje X), los espacios en blanco representan los días en los que no hubo registro.

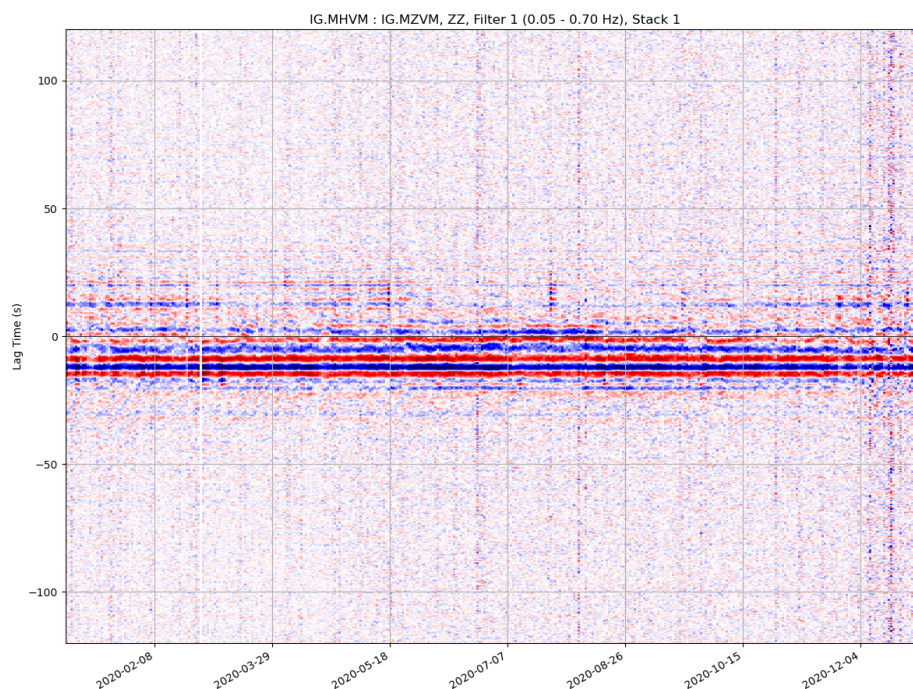


Figura 61. Interferograma. Este gráfico muestra las funciones de correlación cruzada (CCF) entre un par de estaciones frente al tiempo. Incluye el CCF diario o movimiento apilado por medio de una imagen.

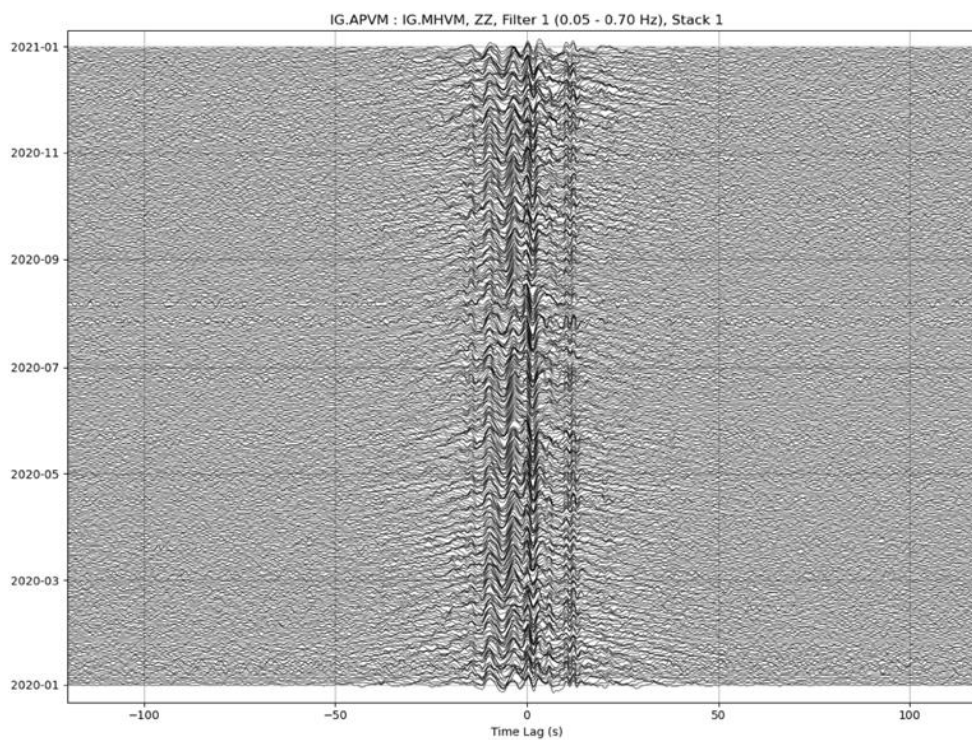


Figura 62. CCF vs Tiempo. Este gráfico muestra las funciones de correlación cruzada (CCF) frente al tiempo. Incluye el CCF diario o movimiento apilado por medio de ondulaciones.

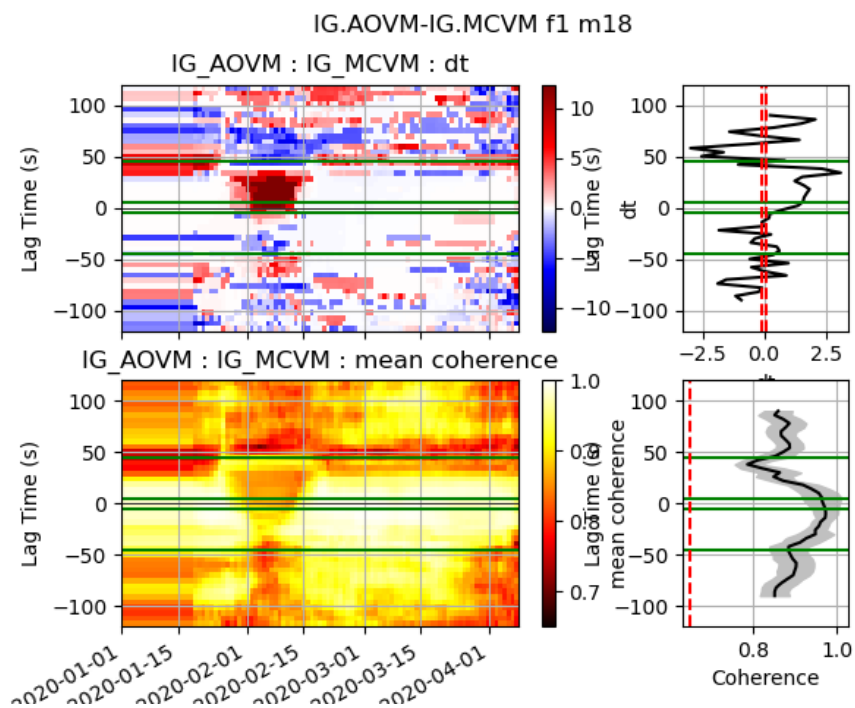


Figura 63. MWCS. Este gráfico muestra el resultado de los cálculos de MWCS en dos imágenes superpuestas. Uno es el dt calculado frente al desfase de tiempo y el otro es la coherencia. La imagen se construye apilando horizontalmente los MWCS de diferentes días. Los dos paneles de la derecha muestran la desviación media y estándar por desfase de tiempo. Los desfases de tiempo seleccionados por el cálculo de dt/t se presentan con líneas horizontales verdes, y la coherencia mínima o la dt máxima están en rojo.

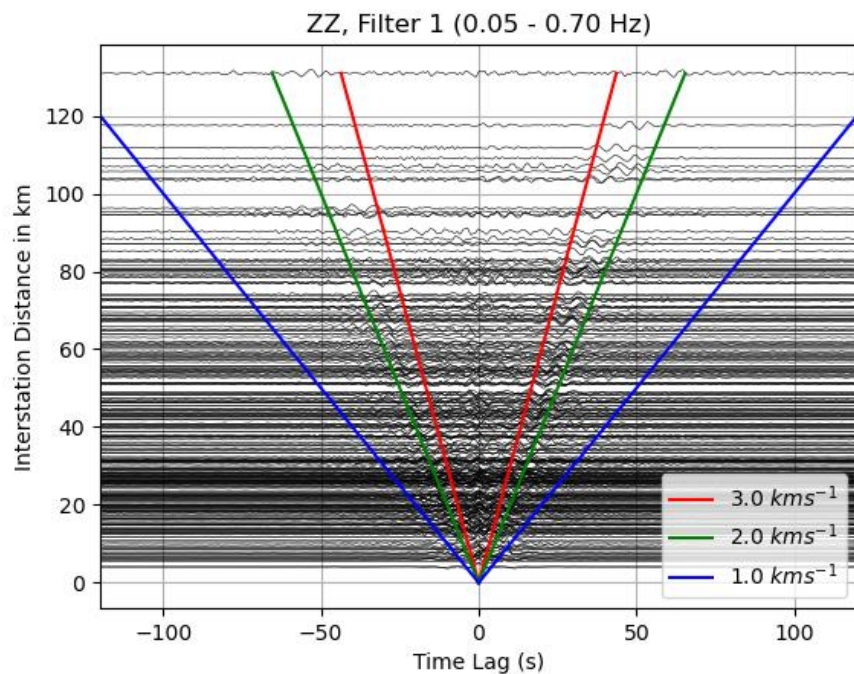


Figura 64. Distancia. Entre estaciones tomando un stack de referencia.

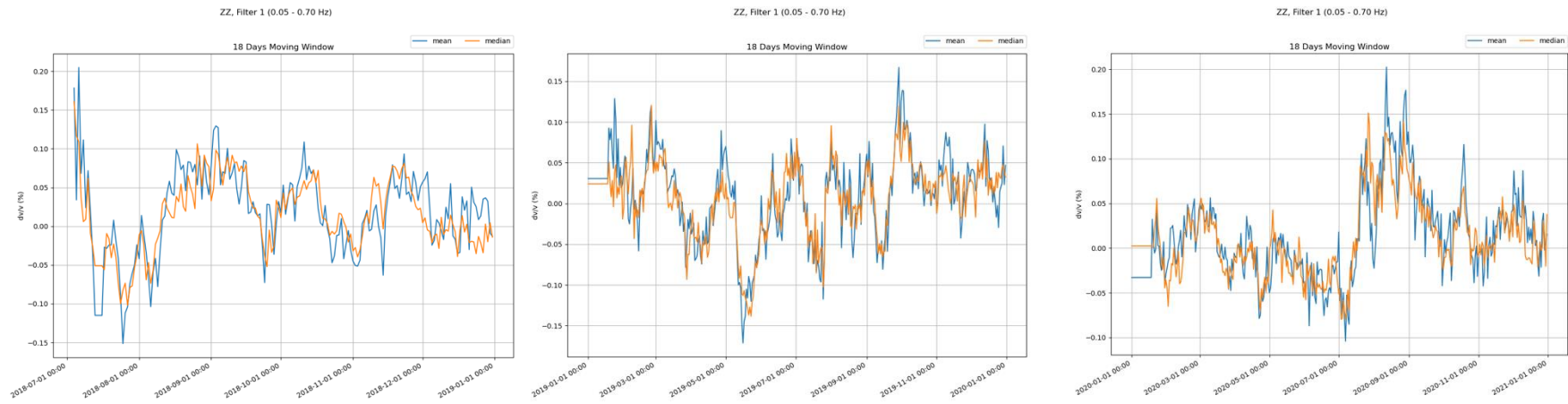


Figura 65. DV/V. En la siguiente figura podemos observar tres diagramas de la variación anual en dv/v (%) para cada año analizado (2018, 2019 y 2020), en seis pilas de ventanas móviles diferentes (18 días).

ANEXO F

Relación de dv/v para modelación hidrológica

El modelado matemático formal se puede resumir mediante los siguientes postulados:

Primero, partimos de las deformaciones que sufre un medio cuando está sujeto a una carga, es decir, en el caso de un acuífero, los cambios estacionales que genera la presencia de agua hacen que la deformación en la superficie se refleje mediante la medición de sus constantes elásticas. Partimos de las ecuaciones de esfuerzo y deformaciones (Berger, 1975):

$$\epsilon_{xx} = -A_e(t) \sin kx \cdot e^{-ky} [1 - 2\nu - ky] \quad (16)$$

$$\epsilon_{yy} = -A_e(t) \sin kx \cdot e^{-ky} [1 - 2\nu + ky] \quad (17)$$

$$\epsilon_{xy} = -A_e(t) \sin kx \cdot e^{-ky} ky \quad (18)$$

Donde $A_e(t)$ está definida por:

$$A_e(t) = \frac{(1 + \nu)\phi p_0}{E} \cos(\omega t) \quad (19)$$

E es el módulo elástico, ϕ es la porosidad, p_0 es la variación de presión de poro, ν es la relación de poisson, k número de onda, y ω es la frecuencia angular. El tensor de deformaciones ϵ está orientado en direcciones arbitrarias x , y . Las ecuaciones (16), (17), (18) y (19) están simplificadas de tal forma que las distancias en el dominio del número de onda y las frecuencias que medimos tengan relación con las mediciones en los acuíferos. Recordando que las clásicas definiciones de velocidad s , $V_s^2 = \frac{\lambda}{\rho}$ y velocidad p , $V_p^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}$ se pueden representar en un medio deformado mediante las ecuaciones de Murnaghan (1951), cuando se describen los 3 primeros órdenes de la función de energía:

$$\rho V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\epsilon_1 \quad (20)$$

$$\rho V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\epsilon_1 + 2\mu\epsilon_2 + n\epsilon_3/2, \quad (21)$$

$$\rho V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\epsilon_1 + 2\mu\epsilon_3 + n\epsilon_2/2, \quad (22)$$

Si rotamos las ecuaciones (16), (17), y (18) en tres direcciones principales donde $\epsilon_3 = 0$ tenemos:

$$\epsilon_1 = A_e(t)e^{-ky}ky[\text{sink}x \cdot (1 - \nu) + (1 - ky)] \quad (23)$$

$$\epsilon_2 = A_e(t)e^{-ky}ky[\text{sink}x \cdot (1 - \nu) - (1 - ky)] \quad (24)$$

De (20), (21) y (22) con (23) y (24), se obtienen las relaciones de variación de velocidad para cambios infinitesimales:

$$\frac{\Delta V_{11}}{V_0} = \frac{A(t)e^{-ky}}{\lambda + 2\mu} [(2\lambda + 5\mu + 2m)(1 - ky) + (3\lambda + 5\mu + 2l + 2m)\text{sink}x(1 - 2\nu)] \quad (25)$$

$$\frac{\Delta V_{12}}{V_0} = A(t)e^{-ky}[(1 - ky) + \frac{\lambda + 3\mu + m}{\mu}\text{sink}x(1 - 2\nu)] \quad (26)$$

Sustituyendo (19) en (25) y (26):

$$\frac{\Delta V_{11}}{V_0} = \frac{(1 + \nu)\phi p_0}{E} \cos(\omega t) \frac{e^{-ky}}{\lambda + 2\mu} [(2\lambda + 5\mu + 2m)(1 - ky) + (3\lambda + 5\mu + 2l + 2m)\text{sink}x(1 - 2\nu)] \quad (27)$$

$$\frac{\Delta V_{12}}{V_0} = \frac{(1 + \nu)\phi p_0}{E} \cos(\omega t) e^{-ky} [(1 - ky) + \frac{\lambda + 3\mu + m}{\mu}\text{sink}x(1 - 2\nu)] \quad (28)$$

Las ecuaciones (25) y (26) son expresiones que representan la variación infinitesimal de la velocidad, en el caso de V_p es la ecuación (25) y en el caso de V_s es la ecuación (26). En estas ecuaciones se usan los parámetros elásticos, los cuales son sencillos de obtener con estudios de geotecnia, pero lo más importante es que se puede demostrar con datos de especímenes de suelo que son de varios órdenes de magnitud menores que los parámetros m , n , l , que son las constantes de Murnaghan (1951).

Para cada tipo de suelo, estas constantes de Murnaghan son específicas, además mediante técnicas de estimación de parámetros (de Bragança Pereira y Stern, 2001), por ejemplo, análisis de inferencia Bayesiana, la cual no solo estima la contribución de los parámetros mediante Markov Chain Monte Carlo

(MCMC). En la Figura 66 presentamos una representación esquemática de la estimación de los parámetros del Acuífero mediante esta novedosa técnica.

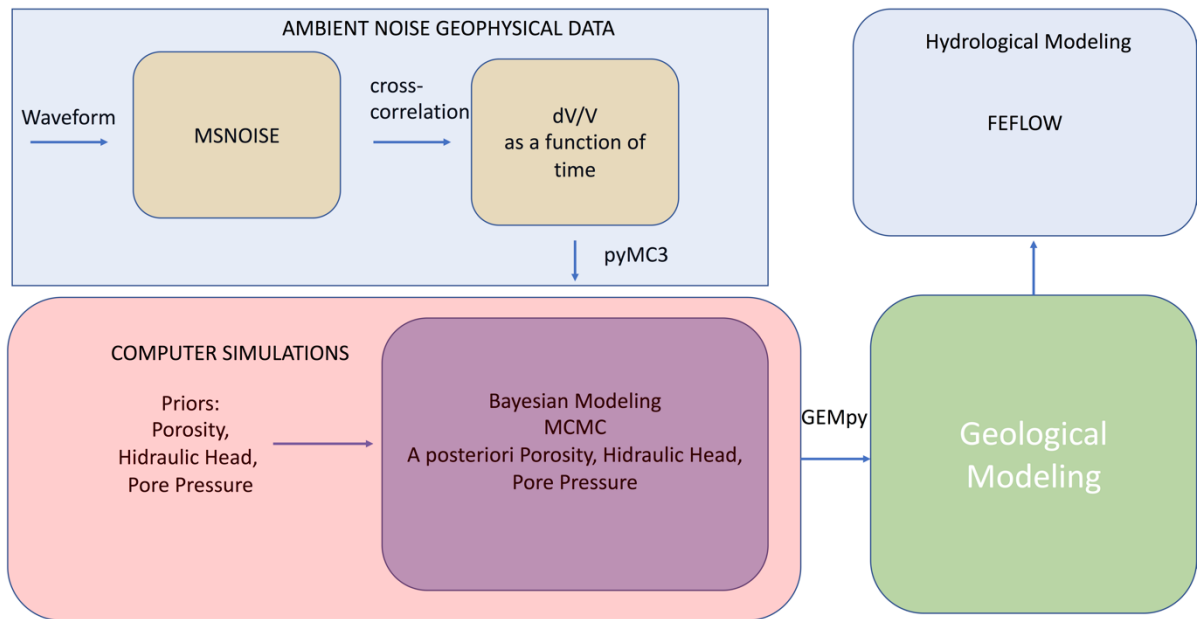


Figura 66. Diagrama de bloques donde se representa los elementos del procesado de la técnica de obtención de parámetros del acuífero mediante datos de vibración ambiental. Primero se obtienen los datos de las estaciones sísmicas y se calculan los coeficientes de cross-correlación para obtener las funciones dv/v como función del tiempo. El código libre MSNOISE permite hacer este análisis de forma eficiente. El grupo de trabajo tiene amplia experiencia en este procesado. Después, se realiza un análisis de inferencia Bayesiana con las ecuaciones (27) y (28). De esta forma se encuentran dos parámetros hidráulicos que se integran para los modelos geológicos. Finalmente se integran en ecuaciones de balance mediante códigos de elemento finito para estimar escenarios de sistemas de flujo subterránea.