



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL EN OBRAS CIVILES

**“ESTUDIO DE LA FRECUENCIA PREDOMINANTE DE
LOS SUELOS DE LA CIUDAD DE CURICÓ MEDIANTE
MEDICIONES IN-SITU CON DISPOSITIVOS DE BAJO
COSTO”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN OBRAS CIVILES

PROFESOR GUÍA: IGNACIO FUENZALIDA
HENRÍQUEZ

PAULO CÉSAR GONÇALVES JEREZ

CURICÓ – CHILE

2022

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

RESUMEN EJECUTIVO

Ante la gran actividad sísmica que presenta nuestro país se ha evidenciado la necesidad de contar con estudios del comportamiento dinámico de los suelos, debido a la diversa respuesta sísmica en una misma localidad. La ejecución de estos estudios depende un alto costo económico, por ello se realiza un estudio de la geología superficiales del suelo de la ciudad de Curicó mediante un dispositivo de bajo costo económico, conformado por una Raspberry Pi y acelerómetro MPU 6050 que permitan medir las frecuencias asociadas al suelo en estudio. Para minimizar las incertezas de las mediciones, se realiza una extensa campaña de campo donde se estudiaron 100 puntos con 244 mediciones de microvibraciones ambientales de 10 a 15 minutos, dividiendo la ciudad en 11 sectores de estudio. Estas señales fueron procesadas utilizando la técnica HVSR o Nakamura, método que se ha utilizado ampliamente en la estimación de la frecuencia predominante de los suelos.

La adquisición, procesamiento e interpretación de resultados se realizó en base a la guía de SESAME (Site EffectS using AMbient Excitations). Posteriormente se construyeron mapas de frecuencias fundamentales del suelo mediante la aplicación de técnicas basadas en sistemas de información geográfica.

Los resultados obtenidos corresponden a curvas H/V de las cuales se obtiene el periodo y la frecuencia predominante de un depósito de suelo. A través de estos datos es posible estimar el contraste de impedancia entre las capas de suelo, una aproximación de la tipología y la amplificación sísmica del suelo.

Los resultados del presente estudio fueron superpuestos en un mapa de geología superficial de la ciudad y comparados con el estudio de Leyton et al. 2013, realizado con un geófono de 3 componentes.

Las mediciones del dispositivo arrojaron grandes errores en depósitos blandos, con gran dispersión de frecuencias, distante de los resultados a comparar, lo que se correlaciona a las bajas frecuencias que estos suelos producen y no son captados por el acelerómetro. Sin embargo, su uso en suelos competentes, compuestos por gravas arenosas y/o arcillosas, especialmente los suelos de la zona sur de Curicó, demuestra resultados aproximados, con una dispersión de frecuencias similar al estudio de Leyton et al. 2013.

Un análisis de sensibilidad del dispositivo en sus componentes y programación, acompañado de unas pruebas en tipologías de suelos conocidas, beneficiaría a determinar si los datos entregados son robustos para fomentar su utilización.

ABSTRACT

Given the great seismic activity that our country presents, it has been evidenced the need to have studies of the dynamic behavior of the soils, due to the diverse seismic response in the same locality. The execution of these studies depends on a high economic cost, so a study of the surface geology of the soil of the city of Curicó is made using a low-cost device, formed by a Raspberry Pi and accelerometer MPU 6050 to measure the frequencies associated with the soil under study. To minimize the uncertainties of the measurements, an extensive field campaign was carried out where 100 points were studied with 244 environmental microvibration measurements of 10 to 15 minutes, dividend the city in 11 study sectors. These signals were processed using the HVSR or Nakamura technique, a method that has been widely used in estimating the predominant frequency of soils.

The acquisition, processing and interpretation of results were carried out based on the SESAME (Site EffectS using AMbient Excitations) guide. Subsequently, fundamental frequency maps of the soil were constructed using techniques based on geographic information systems.

The results obtained correspond to H/V curves from which the period and fundamental frequency of a soil deposit is obtained. Through these data it is possible to estimate the impedance contrast between the soil layers, an approximation of the typology and the seismic amplification of the soil.

The results of this study were superimposed on a map of the surface geology of the city and compared with the study by Leyton et al. 2013, conducted with a 3-component geophone.

The measurements of the device showed large errors in soft deposits, with high frequency dispersion, distant from the results to be compared, which correlates to the low frequencies that these soils produce and are not captured by the accelerometer. However, its use in competent soils, composed of sandy and/or clayey gravels, especially the soils of southern Curicó, shows approximate results, with a frequency dispersion similar to the study by Leyton et al. 2013.

A sensitivity analysis of the device in its components and programming, accompanied by tests in known soil typologies, would benefit to determine whether the data delivered are robust to encourage its use.

*Dedicado a mis padres
Vantuil Gonçalves, Jacqueline Jerez
y hermano, Marco Antonio.
Gracias por su eterno apoyo.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres Jacqueline y Vantuil, por el apoyo incondicional y paciencia en estos 6 años de estudio, por la crianza y formación, que sin duda fueron cruciales para alcanzar mis objetivos.

A mi hermano Marco Antonio, por haber crecido junto a mí, el cariño y por la compañía a realizar mediciones y cargar datos en el software.

A mis familiares, en especial a mis primas, Betania y Paula, por el apoyo en esta larga etapa e innumerables viajes familiares que cada año me recargaron de energía.

Agradezco a mi profesor guía, Ignacio Fuenzalida, por la confianza entregada, por su apoyo, por facilitar la instrumentación necesaria en el desarrollo de este proyecto, la excelente disposición en este proceso y los conocimientos entregados todos estos años.

Agradezco a mis amigos, en especial a Karen, Seba y Coni. El aporte de ustedes fue infinito en este proceso, gracias por la espera, la confianza, el ánimo y el cariño.

A mis compañeros y futuros colegas, por el crecimiento académico mutuo, las conversaciones y gratos momentos compartidos.

Agradezco a todos quienes aportaron en este proceso.

CONTENIDOS

	Página
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	12
1.1. Introducción	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo General	13
1.2.2. Objetivo Específicos	13
1.3. Hipótesis.....	13
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. Sismicidad en Chile.....	14
2.1.1. Tectónica de Placa.....	14
2.1.2. Mecanismo de generación de terremotos en Chile.....	16
2.1.3. Clasificación de ondas sísmicas	18
2.2. Caracterización de la zona de estudio	20
2.2.1. Localización	20
2.2.2. Contexto geológico	21
2.2.3. Sismicidad zona de estudio	22
2.3. Efecto de sitio.....	25
2.4. Leyes de Atenuación	26
2.5. Microzonificación sísmica	28
2.5.1. Microvibraciones ambientales	29
2.5.2. Estudios iniciales de zonificaciones sísmicas en Chile	30
2.5.3. Estudios de microzonificaciones sísmicas en Chile	32
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	36
3.1. Variables de Análisis.....	36
3.2. Metodología propuesta.....	37

	8
3.2.1. Etapa I: Estudios previos.....	39
3.2.2. Etapa II: Prototipo.....	45
3.2.3. Etapa III: Campaña de Campo.....	50
3.2.4. Etapa IV: Procesamiento en Software Geopsy.....	51
3.3 Desarrollo del trabajo.....	53
CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	58
4.1. Resultados.....	58
CAPITULO V: CONCLUSIONES.....	63
5.1. Conclusiones.....	63
ANEXOS.....	65
ANEXO 1: Georreferenciación de puntos y parámetros dinámicos del suelo asociados.....	65
ANEXO 2: Graficas razón espectral H/V.....	73
ANEXO 3: Graficas cantidad de mediciones por intervalos.....	117
ANEXO 4: Distribución de frecuencias.....	121
BIBLIOGRAFÍA.....	123

ÍNDICE FIGURAS

	Página
Figura N°1: Colisión subductiva entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana.	14
Figura N°2: Últimos terremotos en Chile $M > 8.0$	15
Figura N°3: Principales fuentes sismogénicas en Chile.....	17
Figura N°4: Ondas Primarias (P)	18
Figura N°5: Ondas Secundarias (S)	18
Figura N°6: Ondas Rayleigh (R).....	19
Figura N°7: Ondas Love (L)	19
Figura N°8: Localización ciudad de Curicó.....	20
Figura N°9: Ilustración depósitos aluviales provenientes del río Teno y Lontué.	21
Figura N°10: Mapa con la geología superficial de la ciudad de Curicó.....	22
Figura N°11. Historia sísmica y longitud de ruptura.	23
Figura N°12: Intensidades sísmicas MSK del terremoto del año 2010.....	24
Figura N°13: Sitios afectados post-terremoto del año 2010 en Curicó.....	25
Figura N°14: Incidencia del suelo en las ondas sísmicas.....	26
Figura N°15: Distancias epicentrales, hipocentrales y profundidad focal.	27
Figura N°16: Esquemización de microzonificación sísmica.....	28
Figura N°17: Regionalización Sísmica de Chile.....	31
Figura N°18: Frecuencias fundamentales y profundidades del basamento rocoso en la cuenca de Santiago.....	32
Figura N°19: Mapa de isoperiodos del suelo de Valdivia.....	33
Figura N°20: Mapa velocidad de onda de Curicó.....	34
Figura N°21: Frecuencia predominante en la ciudad de Curicó.	35
Figura N°22: Diagrama de flujo.....	38
Figura N°23: Método para la obtención de la Relación Espectral H/V.	41

Figura N°24: Curva H/V con peaks claro.	42
Figura N°25: Curva H/V con curvas planas o con peaks de baja amplitud.	43
Figura N°26: Curva H/V con peak ancho o múltiples peaks	43
Figura N°27: Curva H/V con dos peaks.....	44
Figura N°28: Curva H/V con peaks agudos y de origen industrial	45
Figura N°29: Raspberry Pi Model B+.....	45
Figura N°30: Batería Externa.....	46
Figura N°31: Acelerador MPU-6050.....	47
Figura N°32: Cables Dupont.....	47
Figura N°33: Tornillo con tuerca	48
Figura N°34: Estaca de acero.....	48
Figura N°35: Esquema conexión de pines.	49
Figura N°36: Diseño completo prototipo.....	50
Figura N°37: Sectores poblacionales de Curicó.....	51
Figura N°38: Registro de vibraciones ambientales en las tres componentes y ventanas seleccionadas.....	52
Figura N°39: Ventanas seleccionadas y generación de la relación espectral (SH/SV).....	53
Figura N°40: Distribución de puntos en estudio.	54
Figura N°41: Conformación de un punto en base a 3 mediciones	55
Figura N°42: Adquisición de microvibraciones Alameda de Curicó.....	56
Figura N°43: Adquisición de microvibraciones esquina Calle Dr. Osorio con Membrillar.	56
Figura N°44: Adquisición de microvibraciones frente a Aeródromo General Freire.	57
Figura N°45: Mapa de frecuencias fundamentales	58
Figura N°46: Mapa de frecuencias fundamentales de presente estudio y Leyton et al. (2013)	59

ÍNDICE TABLAS

	Página
Tabla N°1: Definición terminales de conexión.....	49
Tabla N°2: Parámetros selección de ventanas	52
Tabla N°3: Error asociado al dispositivo.	62

ÍNDICE GRÁFICOS

	Página
Gráfico N°1: Cantidad de mediciones por intervalo de frecuencia (Sector 1).....	60
Gráfico N°2: Comparativa en distribución de frecuencias (Sector 1).....	60
Gráfico N°3: Cantidad de mediciones por intervalo de frecuencia (Sector 11).....	62
Gráfico N°4: Comparativa en distribución de frecuencias (Sector 11).....	62

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

La gran actividad sísmica que presenta nuestro país, acompañado de la diversa geología existente a lo largo del territorio nacional y el aumento de la población a lo largo de los años, genera un desafío y al mismo tiempo un problema para la ingeniería chilena. Es de esta forma, que la ocurrencia de terremotos ha provocado secuelas en las diversas estructuras y edificaciones, dejando en evidencia la necesidad de desarrollar estudios de dinámica de suelos en la geología superficial de los asentamientos urbanos.

La experiencia de terremotos previos ha demostrado que la intensidad de los daños y movimientos del suelo están fuertemente influenciados por las condiciones de la zona, debido a la modificación de la señal sísmica, lo que se conoce como efecto de sitio. Esto se puede representar considerando la influencia de los materiales geológicos poco profundos (50-100 metros) que propagan verticalmente las ondas de cuerpo, amplificando la señal en duración y afectando la frecuencia predominante de la señal sísmica.

Frente a estos antecedentes, es posible comprender que la estimación del comportamiento del suelo resulta ser una medida efectiva en la prevención y mitigación para la seguridad sísmica de las estructuras e instalaciones existentes. A pesar de la importancia de los estudios de microzonificación a nivel nacional, su realización depende de altos costos económicos asociados, lo cual dificulta su ejecución periódica y constante, derivando en una problemática que, mediante innovaciones, puede ser suplida.

En consecuencia, este proyecto de investigación y memoria pretende determinar el comportamiento sísmico del suelo de Curicó mediante un estudio de campo centrado en el uso de dispositivos de bajo costo económico que sea capaz de captar y almacenar las microvibraciones transmitidas a través del suelo para luego ser estudiadas por medio de un software, utilizando la relación espectral de componentes horizontales a verticales (HVSR), método popularizado por Nakamura (1989), con el objetivo de generar una caracterización dinámica de los suelos, entregar una interpretación del comportamiento sísmico de la ciudad, que permita adoptar parámetros de diseño sísmico en las futuras construcciones.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Realizar un estudio de la frecuencia predominante de los suelos de la ciudad de Curicó, utilizando un dispositivo de bajo costo económico, empleando la técnica de la razón espectral de Nakamura para lograr una caracterización dinámica de los suelos de la ciudad.

1.2.2. Objetivo Específicos

- Determinar las características de la geología superficial de la ciudad de Curicó mediante un estado del arte y estudios geológicos.
- Construir y programar dispositivo por medio de una placa de programación de bajo costo, para captar señales de un acelerómetro.
- Generar un mapa de Isofrecuencias predominantes de Curicó por medio de un trabajo de campo utilizando dispositivos de bajo costo económico para medir las microvibraciones de los suelos y determinar las frecuencias fundamentales de vibración mediante la técnica de la razón espectral de Nakamura.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos con otros estudios previos y métodos de medición existentes.

1.3. Hipótesis

El estudio de las propiedades dinámicas de los suelos de una ciudad a través de una alta cantidad de mediciones entregadas por un dispositivo de bajo costo económico es tan confiable como las variables entregadas por un dispositivo ultra sofisticado.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Sismicidad en Chile

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica en el mundo y esto se debe a su angosto territorio extendido en el llamado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, el cual concentra algunas de las zonas de subducción más importantes en permanente acumulación de tensiones, derivando en una intensa actividad sísmica.

2.1.1. Tectónica de Placa

Las zonas de subducción se generan en bordes de placas convergentes, en el caso de Chile, la placa de Nazca converge hacia la placa Sudamericana (figura N°1), generando deformaciones y grandes terremotos.

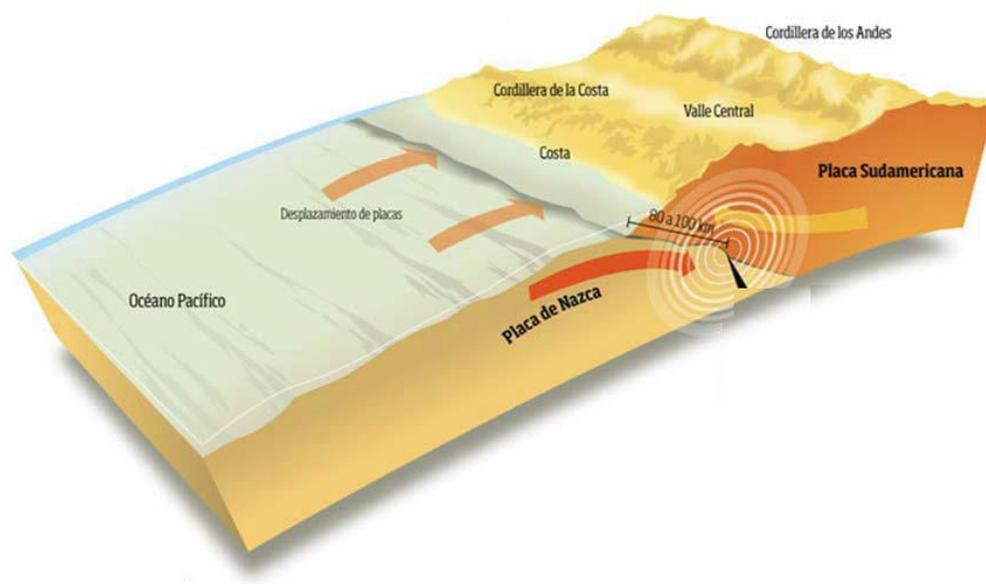


Figura N°1: Colisión subductiva entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana.

Fuente: Alvarado, D., & Valdebenito, G. (2012).

La placa oceánica de Nazca, más densa que la placa continental de Sudamérica, penetra bajo el continente en dirección este con una velocidad de convergencia cercana a 6.8 cm/año con azimut N76°E (Norabuena et al., 1998).

La placa Sudamericana a su vez se desplaza unos 3 cm/año en dirección aproximada hacia el oeste, lo que origina una tasa neta de convergencia estimada entre 8 a 9 cm/año (Silva, N., 2008).

La velocidad de convergencia existente genera una gran acumulación de tensiones año tras año entre las placas, hasta llegar a su límite, donde la roca involucrada falla, siendo incapaz de acumular más tensión, cediendo y activándose de este modo la falla en el contacto, liberando la energía acumulada ocasionando lo que se percibe como terremoto.

La magnitud dependerá de la longitud del área de ruptura y la cantidad de energía acumulada. Además, los terremotos nunca se repiten iguales y nunca liberan completamente la energía almacenada en la zona. En promedio, en los últimos cinco siglos un terremoto destructor de magnitud superior a 8.0 Mw se ha producido cada 10 años en alguna parte del territorio chileno (Madariaga, R., 1998).

En la figura N°2 se presenta una visión esquemática de los más grandes terremotos que se han producido a lo largo del territorio nacional en los últimos 160 años con una magnitud $M_w > 8.0$ a excepción del terremoto de Punta Arenas del año 1949 ($M \sim 7.8$), que corresponden a terremotos de borde de placa transcurrerte en la zona de la falla de Magallanes.

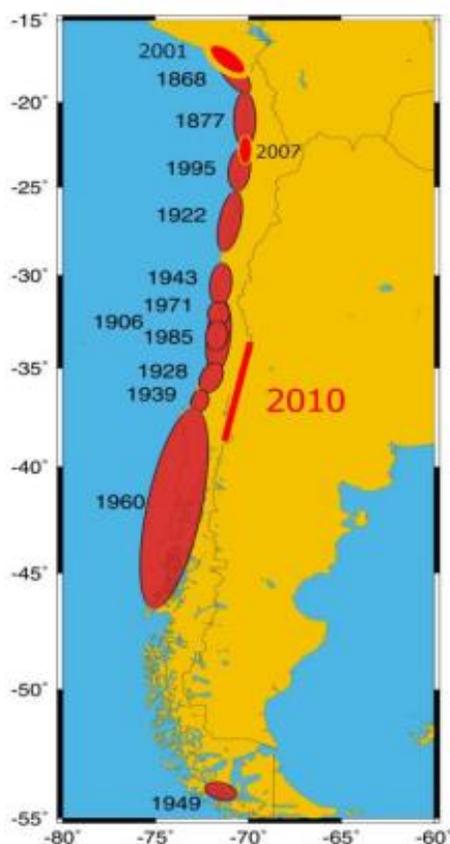


Figura N°2: Últimos terremotos en Chile $M > 8.0$.

Fuente: Centro Sismológico Nacional, UCH.

2.1.2. Mecanismo de generación de terremotos en Chile

La actividad sísmica en nuestro país es producida por cuatro fuentes sismogénicas que definen la sismología total (Centro Sismológico Nacional, UCH):

a) Sismos tipo Interplaca:

También conocido como sismos de subducción, ocurren en el plano de contacto entre las placas Nazca-Sudamericana, con una profundidad focal menor a 60 km, donde el roce entre las placas impide su movimiento, acumulando tensiones hasta que la fuerza neta en la zona interplaca es mayor que la fuerza de roce entre ellas. El tamaño del terremoto (magnitud), es proporcional al área de la zona que logró moverse y a cuánto se movió. Corresponden a este tipo de eventos, los terremotos de Valdivia del año 1960 ($M_w = 9.5$) y Maule de 2010 ($M_w = 8.8$).

b) Sismos Intraplaca de profundidad intermedia:

Ocurren dentro de la placa de Nazca con epicentros en el interior del continente y profundidades focales entre 60 y 200 km. El potencial de daños de estos sismos es mayor que el de los sismos interplaca de la misma magnitud. Ejemplos de estos sismos son los terremotos de Chillán en el año 1939 ($M_s = 8.3$), y Punitaqui en 1997 ($M_w = 7.1$).

c) Sismos Corticales o Superficiales:

Corresponden a aquellos que ocurren dentro de la placa continental, en la corteza a profundidades menores que 30 km, debido a deformación generada principalmente por la convergencia entre las placas y por esfuerzos locales. La principal deformación generada por la subducción es el alzamiento de la cordillera de los Andes. Ejemplo de estos sismos es el terremoto de Las Melosas del año 1958 ($M_w = 6.3$), en el Cajón del Maipo y Curicó en el año 2004 ($M_w = 6.4$).

d) Sismos tipo “outer-rise”:

Se presentan costa afuera de la fosa oceánica, debido a la deformación en la placa de Nazca al tratar de introducirse bajo el continente y que el contacto interplaca no se mueve por estar acoplado (fuerza de roce mayor que la fuerza neta). Son sismos de baja profundidad y en general poseen magnitudes inferiores a 7.0 M_w . Ejemplo de este tipo de sismos, es el terremoto del año 2001 ($M_w = 6.7$), frente a las costas de Valparaíso.

En la figura N°3 se presenta un perfil esquemático con la posición de las principales fuentes sismogénicas en Chile, siendo (a) interplaca, (b) intraplaca de profundidad intermedia, (c) cortical y (d) outer-rise.

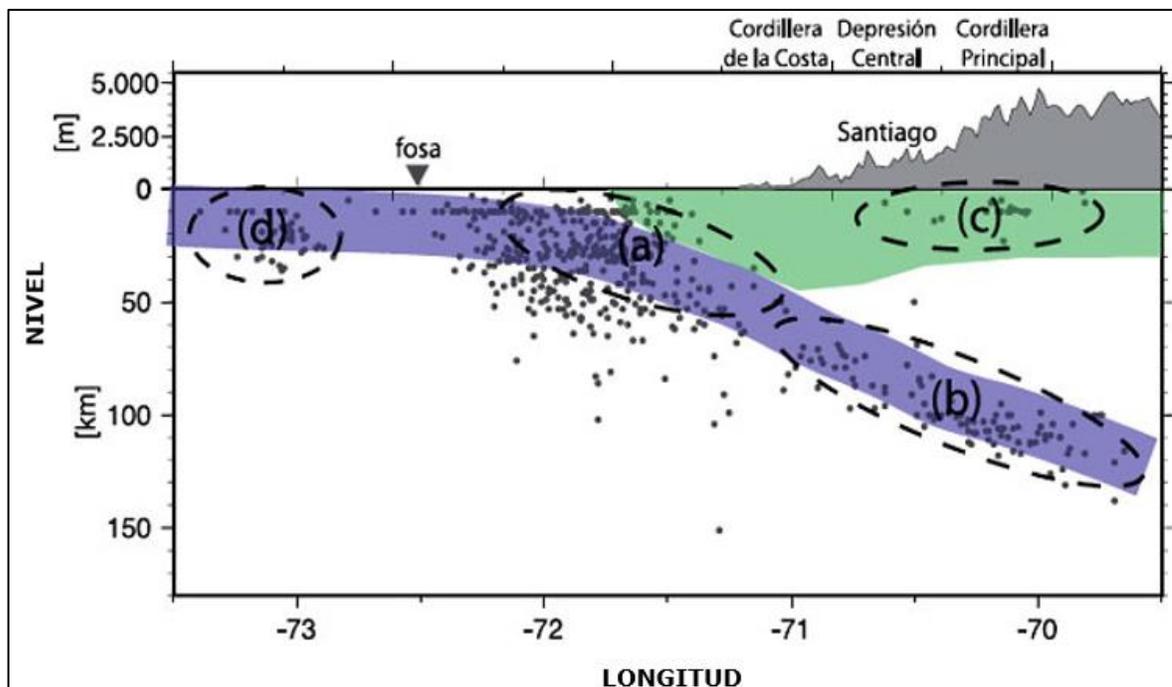


Figura N°3: Principales fuentes sismogénicas en Chile.

Fuente: Leyton et al. (2010a).

Si bien la fuente sismogénica es un factor relacionado con la intensidad de un sismo, también existen otros agentes, tales como; magnitud del sismo, profundidad focal, distancia al epicentro, tipo de suelo, siendo este último el que define las características de propagación de las ondas sísmicas (Tapia, R. 2015).

A pesar de que los sismos de tipo interplaca son los más frecuentes (Leyton et al 2009), los terremotos interplaca de profundidad intermedia han demostrado ser más destructivos, ya que presentan una alta liberación de energía y mayores aceleraciones máximas esperadas (Saragoni et.al, 2004; Leyton et al, 2009).

2.1.3. Clasificación de ondas sísmicas

Se definen las ondas como perturbaciones que se propagan en el espacio y el tiempo, identificándose por medio de ciertas características como; amplitud, periodo, frecuencia, longitud de onda y velocidad.

La energía liberada por los sismos se propaga a través del medio en forma de ondas sísmicas. En un sólido pueden transmitirse dos tipos generales de ondas: Internas (o de cuerpo) y Superficiales.

- a) Las Ondas Internas se subdividen en dos tipos que son las Principales y Secundarias (o de Corte).
- Ondas Primarias (P): se pueden propagar por medios sólidos o fluidos, consisten en la transmisión de compresiones en el mismo sentido que se mueve la onda (figura N°4). Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces más que la de las ondas Secundarias.

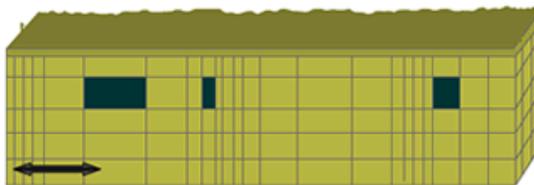


Figura N°4: Ondas Primarias (P)

Fuente: cienciasfera.com (consultado: 22-04-2021)

- Ondas Secundarias (S): estas viajan únicamente en medios sólidos, puesto que los líquidos no soportan esfuerzos de corte (figura N°5). Las partículas se mueven en dirección perpendicular al movimiento de propagación de la onda.

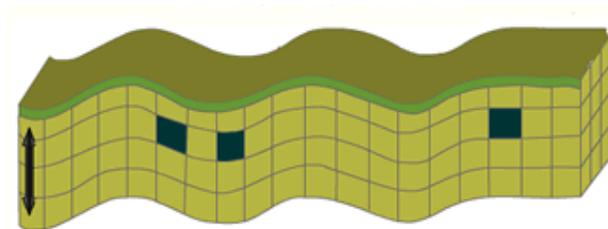


Figura N°5: Ondas Secundarias (S)

Fuente: cienciasfera.com (consultado: 22-04-2021)

b) Las ondas superficiales, también, se subdividen en dos tipos que son las ondas de Rayleigh y Love. Estas ondas son las que poseen menor velocidad de propagación a comparación de las ondas internas.

- Ondas Rayleigh (R): el modo de transmisión de la onda genera un movimiento elíptico retrogrado de las partículas (figura N°6). Su amplitud decrece exponencialmente en profundidad.

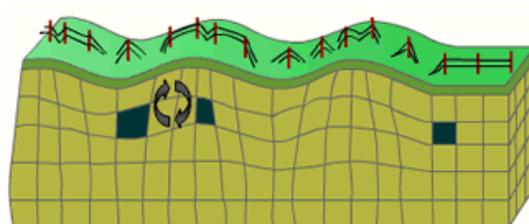


Figura N°6: Ondas Rayleigh (R)

Fuente: cienciasfera.com (consultado: 22-04-2021)

- Ondas Love (L): las partículas se mueven perpendicularmente a la propagación de la onda, como las ondas S, pero en la superficie de la corteza terrestre (Figura N°7).

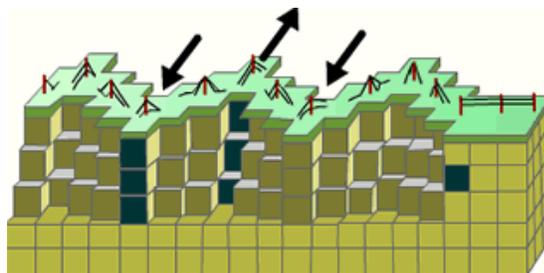


Figura N°7: Ondas Love (L)

Fuente: cienciasfera.com (consultado: 22-04-2021)

2.2. Caracterización de la zona de estudio

2.2.1. Localización

La ciudad de Curicó se localiza a $34^{\circ}58' 60''$ latitud Sur y $71^{\circ}13' 60''$ longitud Oeste, en la región del Maule, a unos 182 kilómetros al sur de la ciudad de Santiago (Figura N° 8). Presenta una altitud de 202 metros sobre el nivel del mar, asentada en medio del valle central, se caracteriza por una ciudad plana, interrumpida por el cerro Carlos Condell.



Figura N°8: Localización ciudad de Curicó.

Fuente: Elaboración Propia

Limita al sur por el estero Guaiquillo y al oriente por la Ruta 5 Sur, por lo que la tendencia de mayor crecimiento de la ciudad se encuentra hacia el Norte y Poniente.

2.2.2. Contexto geológico

Se pueden reconocer de Oeste a Este las siguientes unidades morfoestructurales en la región del Maule: cordillera de la costa, valle central y cordillera principal. La ciudad de Curicó se ubica en la depresión central, la cual está conformada por sedimentos aluviales poco consolidados transportados desde las tierras altas (Figura N°9) y algunos depósitos de ceniza volcánica de grandes erupciones cuaternarias, formando las cuencas sedimentarias donde se encuentra la ciudad (Leyton F. et al., 2013).



Figura N°9: Ilustración depósitos aluviales provenientes del río Teno y Lontué.

Fuente: Modificado de SERNAGEOMIN, 2003.

Estos depósitos aluviales son provenientes del valle del río Teno (norte de Curicó) y Lontué (sur de Curicó), caracterizados por depósitos de gravas redondeadas o sub-redondeadas, los que están incluidos en una matriz de arenas y limos. El espesor mínimo observado para estos depósitos es de 20 metros. Este ambiente de depósitos aluviales se modificó gradualmente en el tiempo hasta llegar a un ambiente fluvial que es más encauzado (Contreras et al., 2010).

El noreste de la ciudad se sitúa en la parte más próxima a la fuente del abanico aluvial, ya que estos depósitos están formados por abundantes gravas antiguas con matriz de arena y limos, presentando una litología muy favorable para la construcción. En la parte céntrica de la ciudad se puede observar el abanico aluvial cortado por varios canales fluviales inactivos y zonas deprimidas del tipo lacustres, asociados a la parte más lejana de la fuente del aluvión (figura N°10).

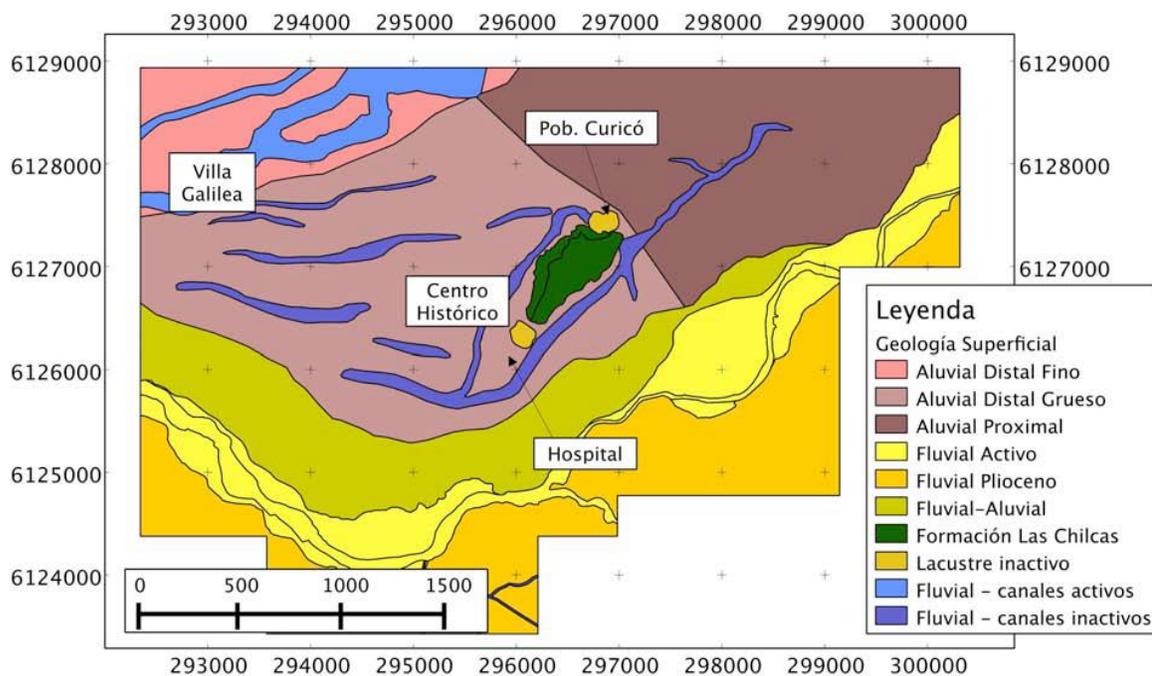


Figura N°10: Mapa con la geología superficial de la ciudad de Curicó.

Fuente: Leyton et al. (2012).

Estos cursos fluviales y lacustres producen la concentración de bancos de arena y sedimentos finos (Contreras et al., 2010). Mientras que la parte ubicada al noroeste presentan canales fluviales activos y zonas compuestas por arena, limo y arcillas en superficie. No hay presencia de una granulometría gruesa. Por lo que presenta una tipología desfavorable para la construcción y es donde actualmente se encuentra la tendencia de mayor crecimiento de la ciudad. Por otro lado, en la zona sur se desarrollan terrazas fluviales antiguas asociadas al curso del estero Guaiquillo, afluente del río Lontué.

2.2.3. Sismicidad zona de estudio

La ciudad de Curicó al estar localizada en el valle central presenta una fuente sismogénica predominante: interplaca, aunque también puede verse afectada por otras fuentes como; cortical, outer-rise e intraplaca, pero en menor intensidad.

Históricamente la zona central se ha caracterizado por una alta actividad sísmica a consecuencia de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, generando grandes terremotos (figura N°11), siendo el último de ellos el terremoto de Mw 8.8 del año 2010, donde liberó la energía acumulada del vacío sísmico existente desde el año 1835.

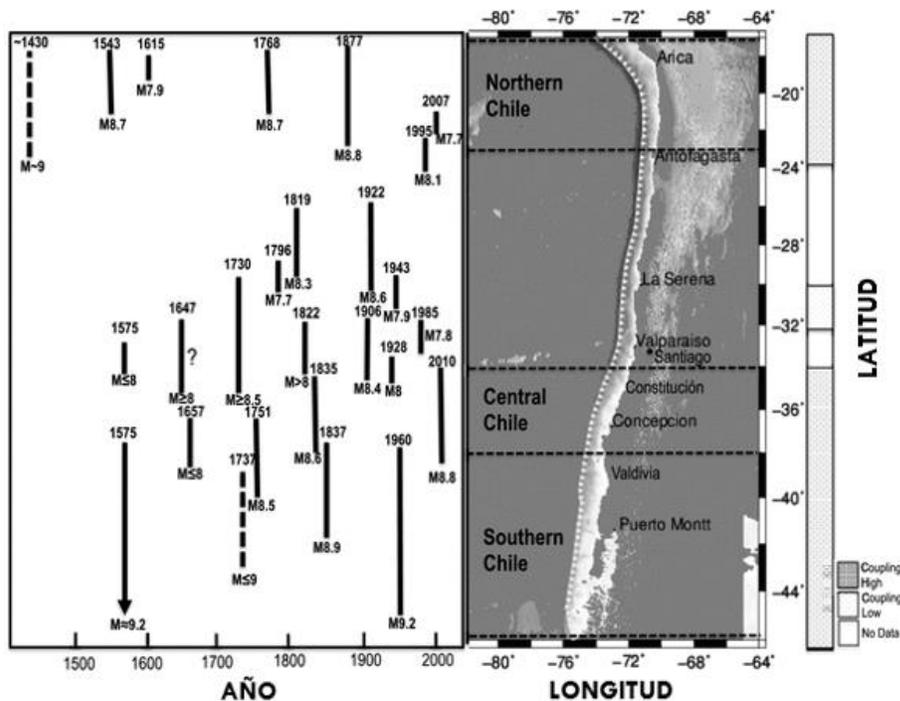


Figura N°11. Historia sísmica y longitud de ruptura.

Fuente: Scholz & Campos (2012).

2.2.3.1. Terremoto de Cobquecura del año 2010

Ocurrido el 27 de febrero del año 2010, con una magnitud de 8,8 Mw. El epicentro se localizó a 43 km al SO de Cobquecura y a 30 km bajo la corteza terrestre. Presentó un área de ruptura de 450 km de largo por un ancho de unos 150 km (Barrientos, S., 2010).

La ruptura del contacto entre las placas se produjo mayoritariamente hacia el norte del epicentro como se muestra en la figura N°12. La zona de máxima intensidad MSK (*Medvedev–Sponheuer–Karnik scale*) reportadas para este terremoto en general concuerda con la zona de máximo desplazamiento (Astroza et al., 2012). Las localidades con la intensidad sísmica más alta se encuentran en la VI y VII Región, zona en la cual habita el 11,2 % de la población de Chile.

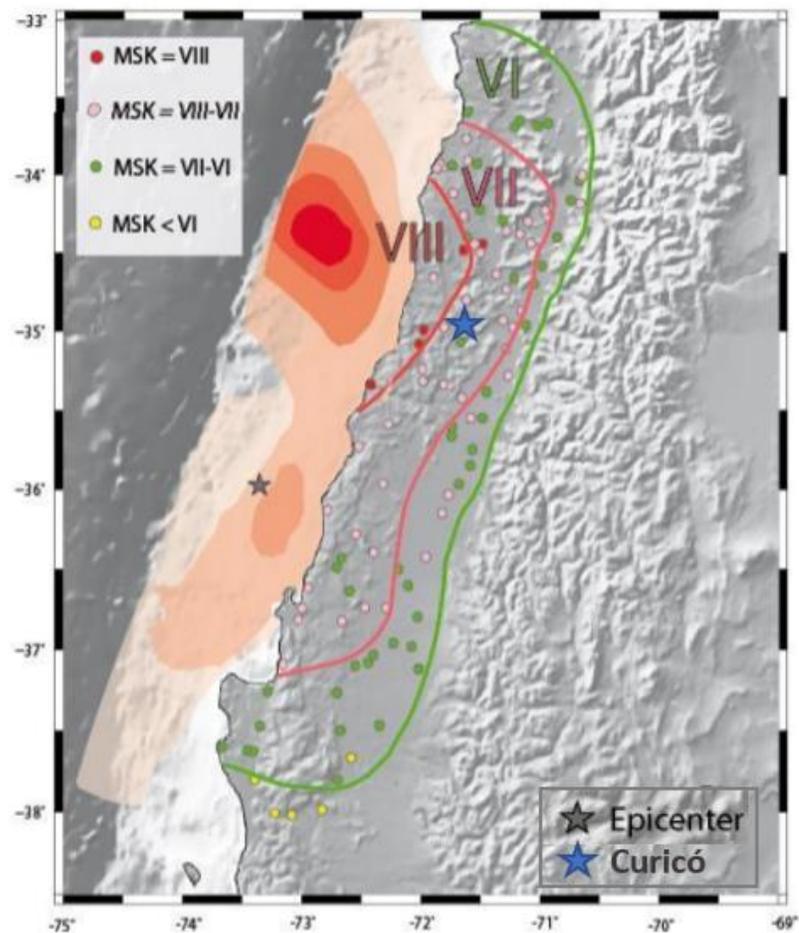


Figura N°12: Intensidades sísmicas MSK del terremoto del año 2010.

Fuente: Modificado de Astroza et al. (2012).

En la ciudad de Curicó el terremoto produjo daños en edificios del área central de la ciudad, el colapso de muros cortafuegos, el desprendimiento de revestimientos exteriores en edificios céntricos, el agrietamiento y colapso de muros de albañilería. En la figura N°12 se esquematiza que un total de 723 propiedades urbanas quedaron totalmente destruidas dentro de Curicó (Urbana E&D, 2010).

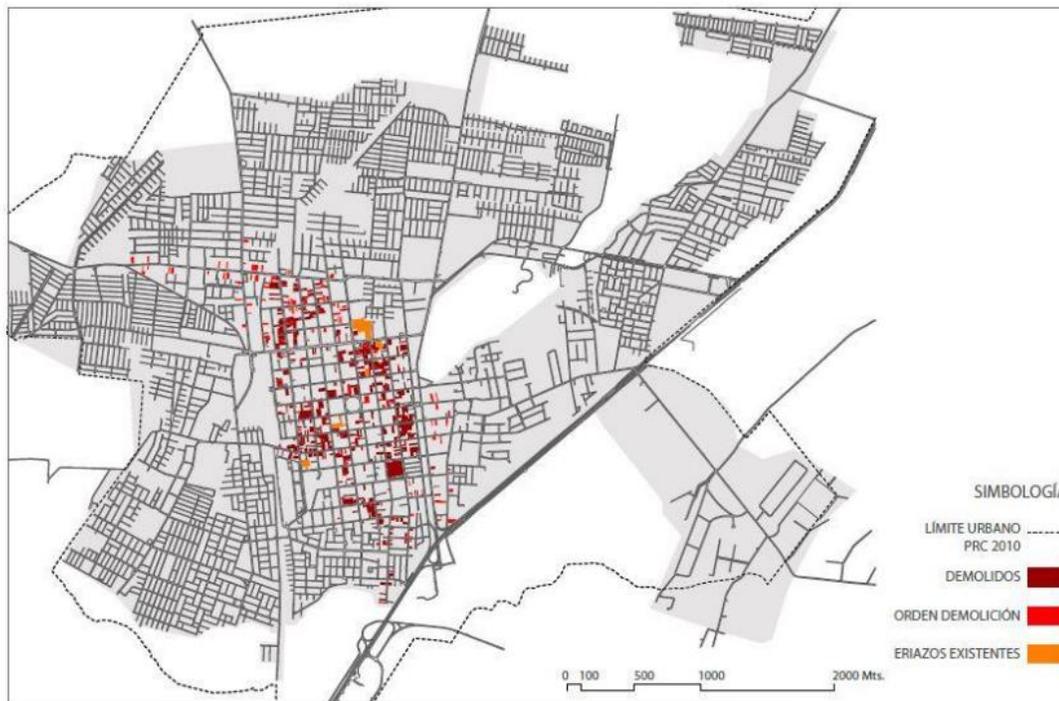


Figura N°13: Sitios afectados post-terremoto del año 2010 en Curicó.

Fuente: Urbana E&D (2010).

2.3. Efecto de sitio

Representa los efectos de respuesta local del suelo, debido a las características geológicas, geotécnicas y topográficas de la superficie donde se sitúa una estructura. La respuesta local del suelo se refiere a la influencia de materiales geológicos relativamente poco profundos (50-100 metros) donde las ondas corporales se propagan verticalmente.

Cuando las ondas atraviesan suelos blandos, no consolidados, el movimiento o la señal de entrada se amplifica de forma muy relevante a comparación de los suelos duros (figura N°14). No solo produce un aumento de la amplitud de las ondas sino también se prolonga la duración de la sacudida sísmica y se modifica su espectro de frecuencia (Kramer, S., 1996).

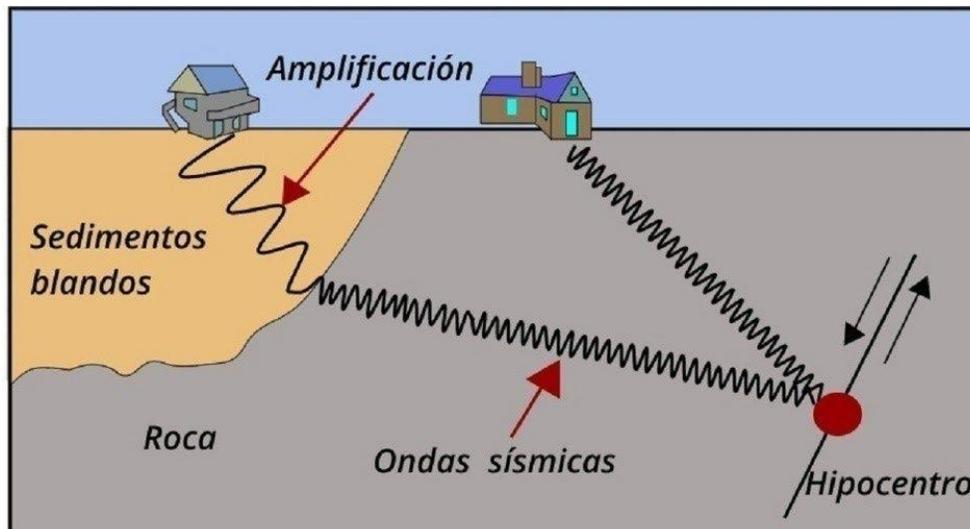


Figura N°14: Incidencia del suelo en las ondas sísmicas.

Fuente: lis.ucr.ac.cr (consultado: 27-06-2021)

La ocurrencia de terremotos ha demostrado que los daños de las estructuras ocurren comúnmente en edificaciones situadas en depósitos de suelos blandos y no regularmente en afloramientos rocosos, evidenciando el peligro existente, ya que la mayoría de los asentamientos humanos en nuestro país están en la depresión central, formada por depósitos jóvenes no consolidados o en cuencas rellenas con sedimentos aluviales (Pasten, 2007).

El caso más emblemático es el terremoto de Michoacán (México, 1985), donde Ciudad de México sufrió los efectos de un sismo con epicentro a más de 400 kilómetros, producto que las ondas sísmicas fueron amplificadas en periodos entorno a 3 segundos, debido a la que la ciudad se sitúa sobre una cuenca cerrada, conformada por grandes espesores de arcillas lacustres (Campillo et al., 1994)

2.4. Leyes de Atenuación

Describen la variación de intensidad del movimiento del terreno en función de la magnitud y la distancia hipocentral o epicentral hacia la fuente sísmica (figura N° 15). El propósito más importante es predecir las aceleraciones que se provocarán, debido a un sismo.

Los principales parámetros para elaborar fórmulas de atenuación son: coordenadas del hipocentro y del epicentro del sismo, la magnitud registrada del sismo, las coordenadas de la estación acelerográfica y la estratigrafía del suelo bajo dicha estación de muestreo (Silva, 2008).

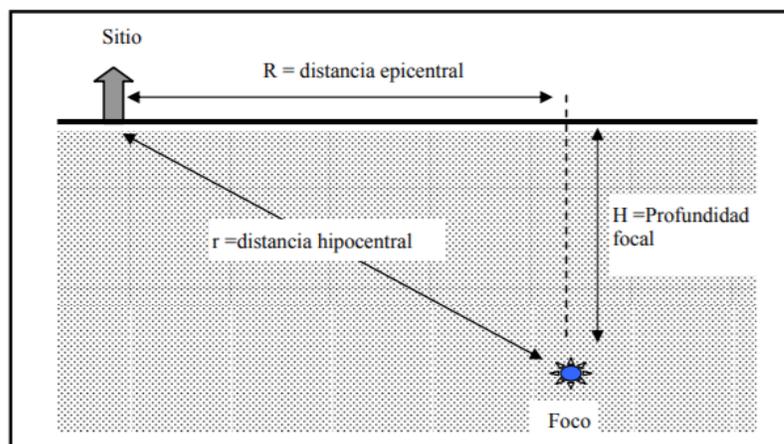


Figura N°15: Distancias epicentrales, hipocentrales y profundidad focal.

Fuente: Silva, N. (2008).

La primera fórmula para Chile de atenuación de aceleraciones horizontales máximas fue propuesta por Labbé et al. (1976), quienes en su base de datos sólo incluyeron registros obtenidos en el acelerógrafo ubicado en Santiago de Chile. En la misma línea, las posteriores formulas se basaron en el aumento de la base de datos de registros sísmicos; Saragoni et al. (1982), Schaad & Saragoni (1989), Barrientos (1980) y Martin (1990).

Los primeros en proponer fórmulas que consideran las principales fuentes sismogénicas en Chile (interplaca e intraplaca de profundidad intermedia), la clasificación del suelo, en base a la velocidad de onda de corte (V_s) y las asperezas más próximas a las fallas, fueron Ruiz y Saragoni (2005a, 2005b). Obteniendo resultados que se ajustan a los datos observados en grandes terremotos interplaca e intraplaca.

Con los datos recopilados del terremoto del año 2010, Astroza (2010) obtuvo curvas de atenuación en función de la distancia al hipocentro y la distancia a la aspereza más próxima.

Recientemente, Montalva et al. (2017) desarrolló una ecuación de predicción de movimiento de suelo para la componente horizontal de los valores espectrales de respuesta de la zona de subducción del país.

2.5. Microzonificación sísmica

Conociendo el peligro constante en la que se encuentra la población, resulta necesario avanzar en estudios de microzonificación sísmica a nivel global y local, ya que son una herramienta sustancial para la reducción del riesgo sísmico en las ciudades, ayudando a mitigar las consecuencias adversas de los terremotos.

El termino microzonificación involucra el concepto de zonificación, pero aplicado en áreas pequeñas de interés y cuyo fin es la división de un determinado territorio en diferentes zonas que presenten un comportamiento similar dentro de ellas durante un sismo (Retamal et al, 1969), como se esquematiza en la figura N°16.

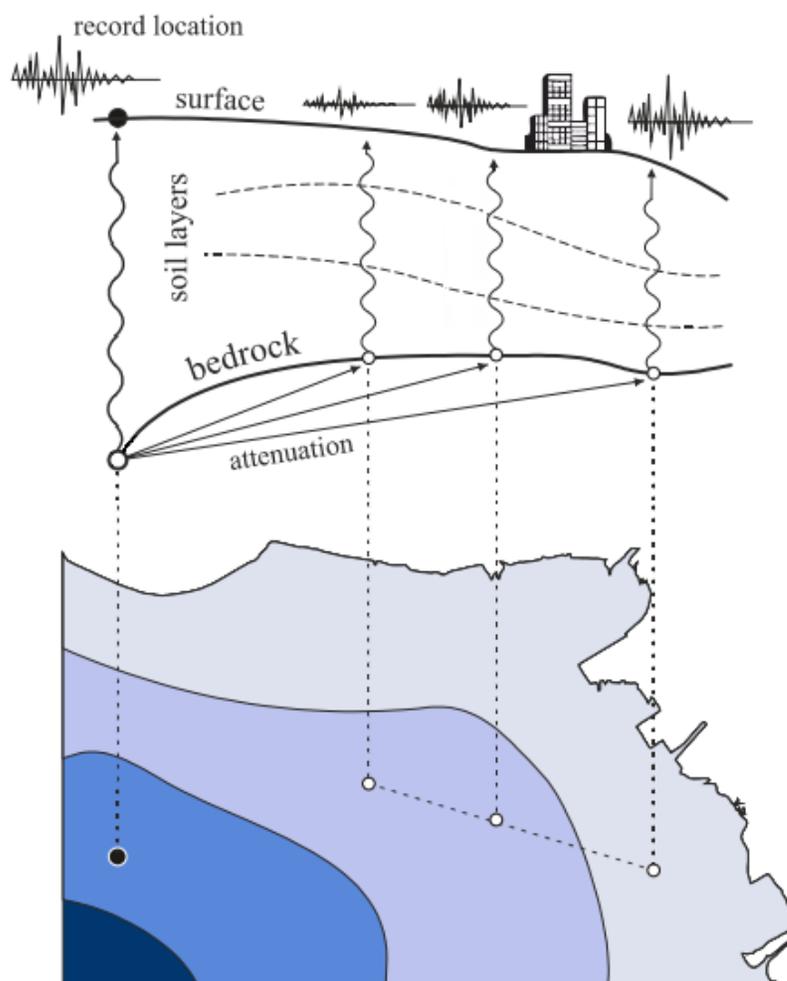


Figura N°16: Esquematización de microzonificación sísmica.

Fuente: Papanikolaou (2021)

Los métodos para determinar la respuesta del suelo se clasifican en métodos numéricos y métodos experimentales. El método numérico se utiliza cuando no se dispone de instrumentación adecuado, privilegiando la información geológica de las capas del suelo en estudio. El método experimental utiliza ruidos ambientales y registros sísmicos para obtener la frecuencia fundamental de vibración del suelo y estimar amplificaciones sísmicas (Alvarado & Valdebenito, 2012). Los estudios basados en microtemblores o microvibraciones ambientales (*microtremor*) han tenido bastante aceptación en el desarrollo de microzonificaciones sísmicas.

2.5.1. Microvibraciones ambientales

Los *microtremores* son vibraciones del suelo producidas por fuentes naturales o artificiales. Las ondas generadas por microvibraciones ambientales son un compuesto entre ondas de cuerpo y ondas superficiales del tipo Rayleigh y Love, las cuales se clasifican en (Bard, 1998):

- Bajas Frecuencias (0.3 – 0.5 Hz): causados por olas oceánicas a grandes distancias, la amplitud espectral es estable y esta correlacionada, a gran escala, con las condiciones meteorológicas del mar.
- Frecuencias Intermedias (0.5 – 1 Hz): vinculadas al oleaje que rompe en las costas y al viento, su amplitud espectral es inestable.
- Altas Frecuencias (superiores a 1 Hz): relacionadas a la actividad humana, la amplitud espectral se adapta a la actividad generada.

Los primeros estudios basados en la aplicación de los microtremores fueron realizados por Aki (1957) y Kanai (1957) evidenciando la eficiencia que tiene el análisis de microvibraciones ambientales para determinar las propiedades dinámicas del suelo.

De las diversas metodologías que se han desarrollado para trabajar con los *microtremores*, el método de relaciones espectrales (H/V) también conocido como método de Nakamura (1989) ha logrado aceptación por la fiabilidad de sus resultados, acompañada de rapidez y economía en su ejecución.

Inicialmente el método fue propuesto por Nogoshi e Igarashi (1971) como una herramienta para estimar la respuesta sísmica del suelo, pero es Nakamura (1989) quien lo populariza, ya que permite conocer la frecuencia fundamental de vibración del suelo a través de la relación espectral de las componentes horizontal y vertical (H/V) de las microvibraciones ambientales medidas en la superficie.

Por ello un gran número de experimentos (Lermo & Chavez-Garcia, 1993; Gitterman et al. 1996; Bonnefoy-Claudet et al., 2006a) han demostrado que el procedimiento H/V puede aplicarse con éxito para identificar la frecuencia fundamental de los depósitos de suelo. Por lo que se ha transformado en una gran herramienta para los estudios de microzonificación sísmica.

A continuación, se presentan algunos proyectos de microzonificación realizados en diversos países del mundo: Canadá (Motazedian et al, 2010), México (Chavez-Garcia & Cuenca, 1995), Ecuador (Guéguen et al., 1997), Portugal (Teves-Costa et al. 1996), España (Alfaro et al, 1999), Suiza (Fáh et al. 1997), Italia (Strollo et al, 2011), India (Purnachandra et al., 2011), Egipto (Sherif et al, 2011), Japón (Konno & Ohmachi, 1998), Nueva Zelanda (Toshinawa et al., 1997), entre otros.

2.5.2. Estudios iniciales de zonificaciones sísmicas en Chile

En nuestro país, el primer antecedente relacionado con zonificaciones sísmicas fue el trabajo de Gajardo y Lomnitz (1960), el cual estaba orientado en identificar regiones con sismicidad uniforme a través de un coeficiente de correlación aplicando el método de Tsuboi (1958). Para ello utilizaron las estadísticas de los terremotos registrados entre los años 1942-1958. Luego, Welkner (1964), trabajando en base al estudio de Gajardo y Lomnitz (1960), aumentó la cantidad de registros, analizando los sismos entre los años 1906-1958 subdividiendo el país en 15 zonas sísmicas. Posteriormente, Labbé (1976) efectuó una regionalización a partir de datos homogeneizados de una muestra de 573 sismos de un período de 65 años aplicando el método de Tsuboi (1958). Además, calculó la frecuencia anual de ocurrencia de terremotos para cada zona, determinando los parámetros regionales de sismicidad de la relación empírica de Gutenberg y Richter (1958) identificando 3 zonas sísmicas.

Barrientos (1980) propone una división del país en zona costera y cordillerana, argumentando que la actividad sísmica además de variar respecto a la latitud, también lo hace en longitud. Para ello utilizó 443 eventos de magnitud $M_s \geq 5,5$ estableciendo para cada región sísmica (figura N°17) un promedio de ocurrencia. En la misma línea, Martin (1990) utiliza 2224 registros de magnitud de Richter $\geq 4,5$ empleando dos criterios de división, uno longitudinal y otro transversal, calculando los parámetros de la ecuación de Gutenberg y Richter (1958) para cada una de las zonas definidas.

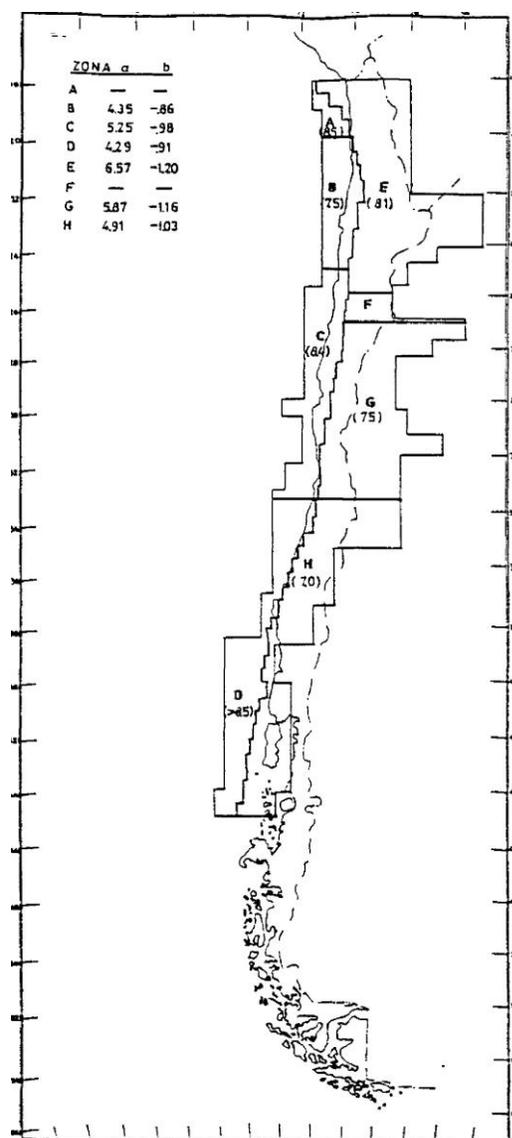


Figura N°17: Regionalización Sísmica de Chile.

Fuente: Barrientos (1980).

La mayoría de los trabajos mencionados anteriormente realizaron zonificaciones sísmicas en base a la ocurrencia de terremotos sin considerar la influencia de cada una de las fuentes sísmogénicas y de las leyes de atenuación particulares a cada zona (Leyton, 2010b).

2.5.3. Estudios de microzonificaciones sísmicas en Chile

Pasten (2007), utilizó el método de Nakamura para estimar la respuesta sísmica de Santiago (figura N°18). Realizando un estudio de campo de más de 250 medidas de 15 minutos de duración en diferentes sitios, elaboró una clasificación de los depósitos de suelos basada en las frecuencias fundamentales y en las tipologías de las curvas H/V.

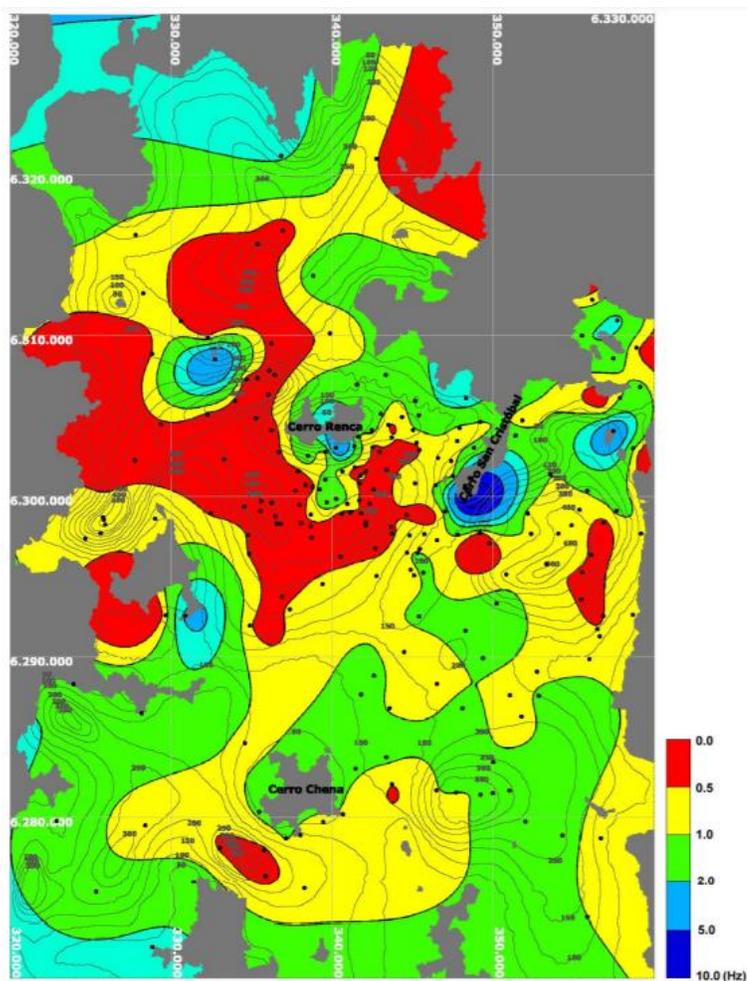


Figura N°18: Frecuencias fundamentales y profundidades del basamento rocoso en la cuenca de Santiago.

Fuente: Pasten (2007).

Leyton et al (2010b) propuso una zonificación sísmica del área Metropolitana de Santiago, donde consideró: las características de la geología superficial; las propiedades dinámicas de los suelos medido a partir de la propagación media de la onda de corte de los 30 metros superiores

(V_{S30}) y el período de vibración fundamental (con la relación espectral H/V); y la amplificación del suelo durante un gran terremoto estimado por intensidades sísmicas evaluadas a partir de la distribución de daños.

Alvarado & Valdevenito (2012), mediante el método de Nakamura desarrollaron un mapa de isoperiodos (figura N°19) para representar la distribución de los periodos fundamentales de vibración del suelo urbano de la ciudad de Valdivia, Chile. Para este estudio se realizaron 260 mediciones de microvibraciones ambientales entre 15 y 20 minutos de duración en distintos sitios. Los resultados principales del estudio de microzonificación fueron comparados con los estudios geológicos y geotécnicos disponibles.

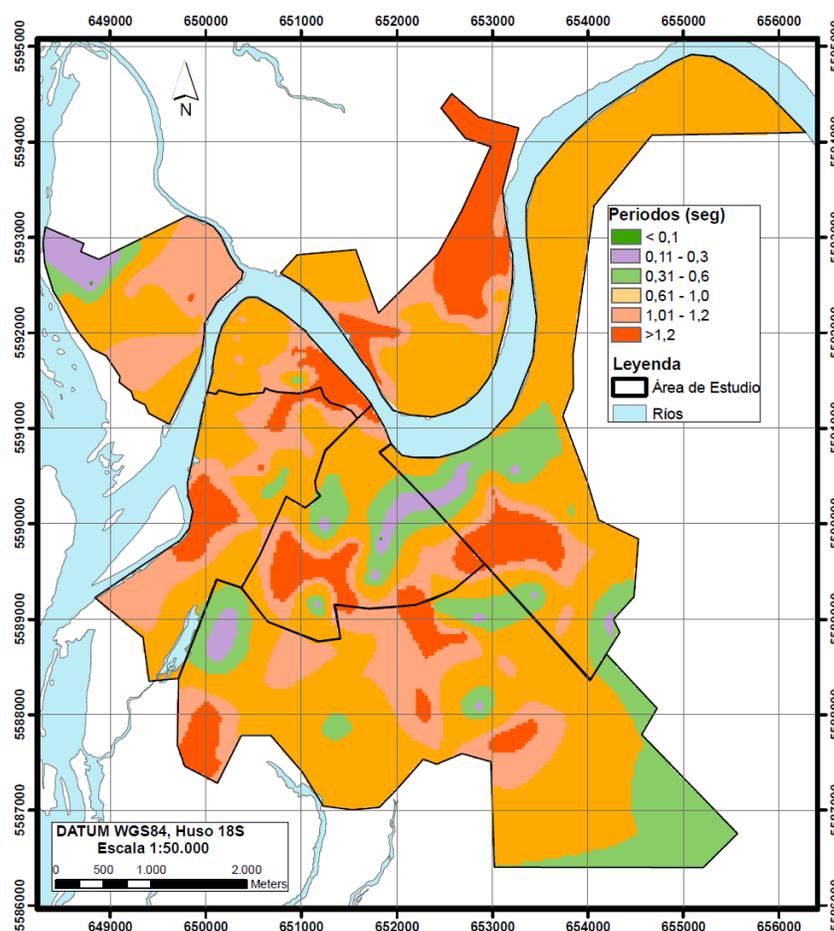


Figura N°19: Mapa de isoperiodos del suelo de Valdivia.

Fuente: Alvarado & Valdevenito (2012).

En cuanto a la ciudad de Curicó, el primer trabajo de microzonificación fue realizado por Araneda et al. (1996), con el objetivo de realizar una evaluación local del suelo de cimentación. Este estudio se llevó a cabo mediante experimentos de refracción de microtremores, donde determinó la velocidad de propagación de ondas de compresión (V_P) de la zona urbana (figura N° 20).

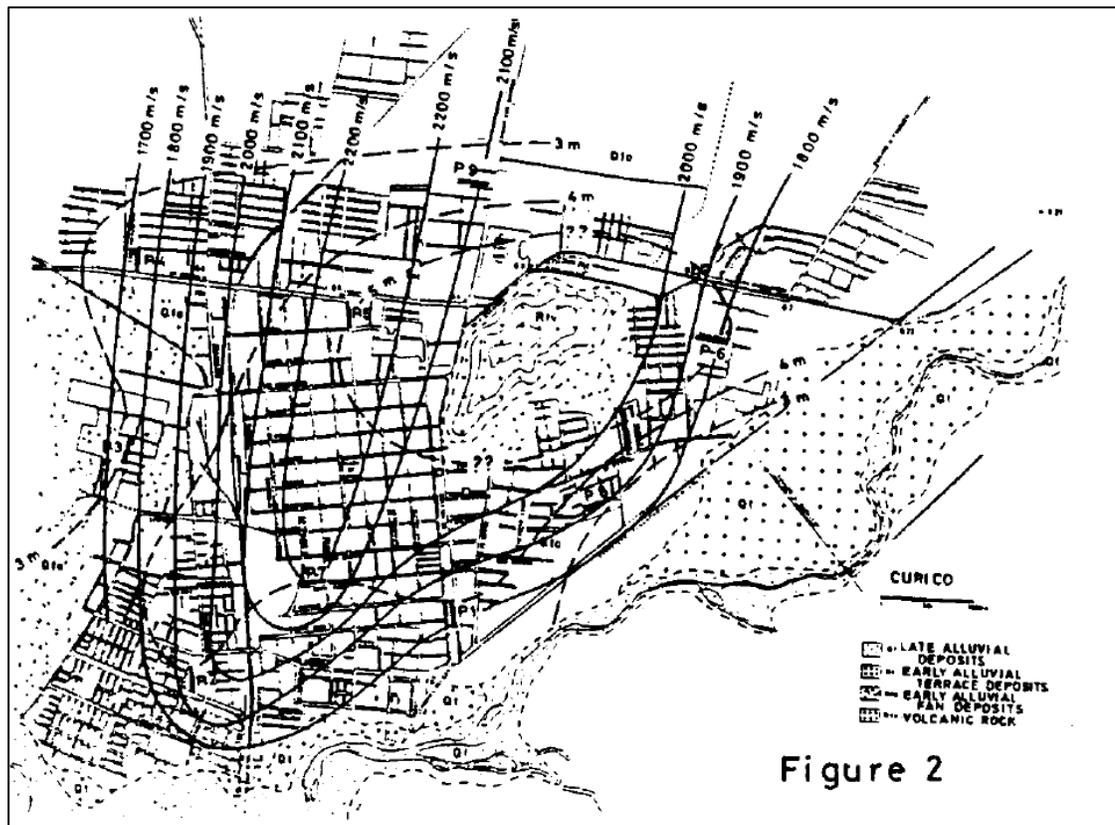


Figura N°20: Mapa velocidad de onda de Curicó.

Fuente: Araneda et al. (1996).

Recientemente, Leyton et al (2013) determinó la frecuencia predominante de diferentes sectores de la ciudad (figura N°21), a través de 110 mediciones de microvibraciones ambientales, utilizando un geófono de 3 componentes con una frecuencia fundamental de 4.5 Hz, donde aplicó el método HVSR popularizado por Nakamura (1989). Los resultados obtenidos fueron complementados con la información geológica local, las intensidades y daños del terremoto de Cobquecura del año 2010, desarrollando una microzonificación de la ciudad identificando zonas con distintas frecuencias predominantes del suelo e intensidades MSK (*Medvedev–Sponheuer–Karnik scale*) ante un sismo severo.

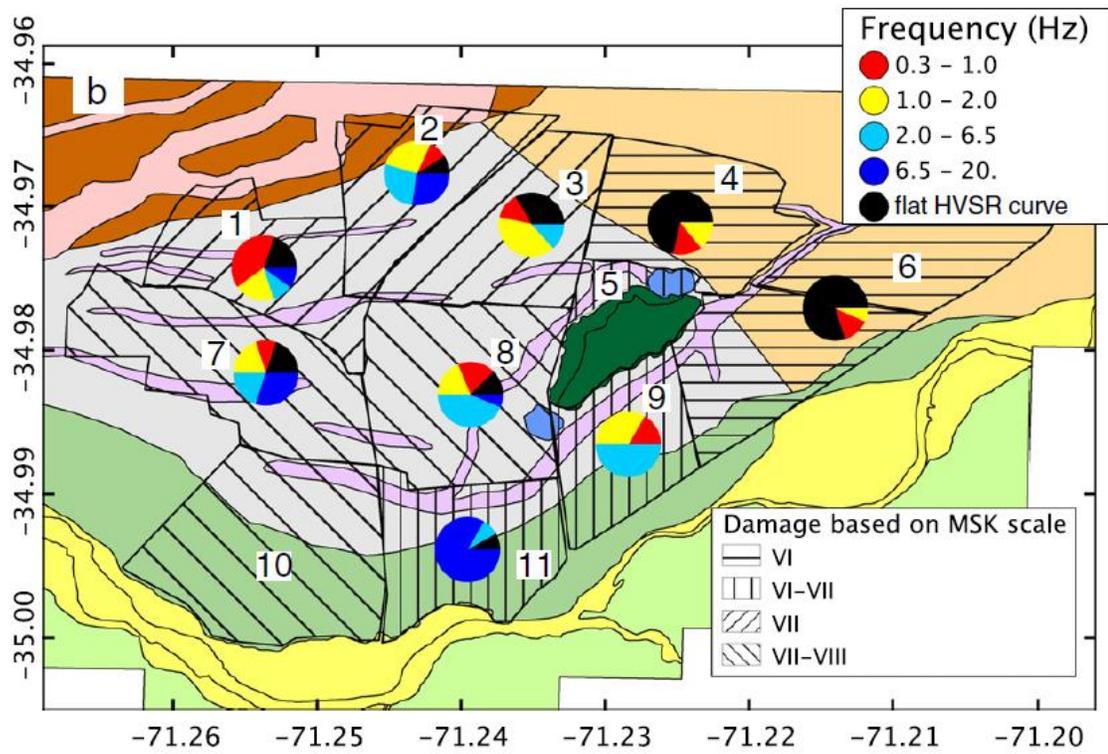


Figura N°21: Frecuencia predominante en la ciudad de Curicó.

Fuente: Leyton et al. (2013).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Variables de Análisis

A continuación, se caracterizan las variables observadas en la investigación según su naturaleza:

A. Independientes:

- Vibraciones: Corresponde a las generadas por fuentes naturales o artificiales.
- Sensibilidad del instrumento: Se refiere a la capacidad de detectar vibraciones del suelo, la cual no se puede ajustar y va a determinar la calidad de los datos.
- Cantidad de Mediciones: Corresponde al número de lecturas a realizar, con la cual se busca reducir las incertezas generadas por la calidad del instrumento.

B. Dependientes:

- Amplitud del Peak: Corresponde al resultado gráfico de la relación espectral H/V. Ésta depende del estrato de suelo y vibraciones existentes, debido a que es muy sensible al contraste de impedancia.
- Frecuencia predominante (f_0): Depende de la amplitud del peak, ya que se correlaciona con esta variable.

3.2. Metodología propuesta

Este estudio presenta una parte teórica, enfocado en presentar el método de relaciones espectrales H/V, exponer las recomendaciones para la adquisición de datos in situ, el procesamiento y la interpretación de los resultados; esto como base para iniciar con la segunda parte del estudio, la cual presenta un enfoque experimental, donde se realizará una extensa campaña de campo para continuar con un procesamiento computacional de los registros.

La metodología de trabajo propuesta se basa en las siguientes 4 etapas:

- a) La primera etapa se encarga de presentar el método de Nakamura, donde se exponen las recomendaciones para la adquisición de datos in situ, el procesamiento y la interpretación de los resultados.
- b) Posteriormente se inicia con el diseño y fabricación del dispositivo de bajo costo, acompañado de un proceso de ensayos y ajustes, donde se busca comunicación eficaz entre la placa de programación y el acelerómetro, para el registro de las mediciones y garantizar el traspaso de vibraciones del terreno hacia el dispositivo.
- c) Posterior a diseño del dispositivo, se llevará a cabo la campaña de campo para la recopilación de datos en terreno.
- d) Finalmente, se realiza el procesamiento de los registros con software Geopsy, para determinar la frecuencia predominante de los suelos medidos y desarrollar un mapa de isofrecuencias de la ciudad de Curicó.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo con las etapas definidas previamente:

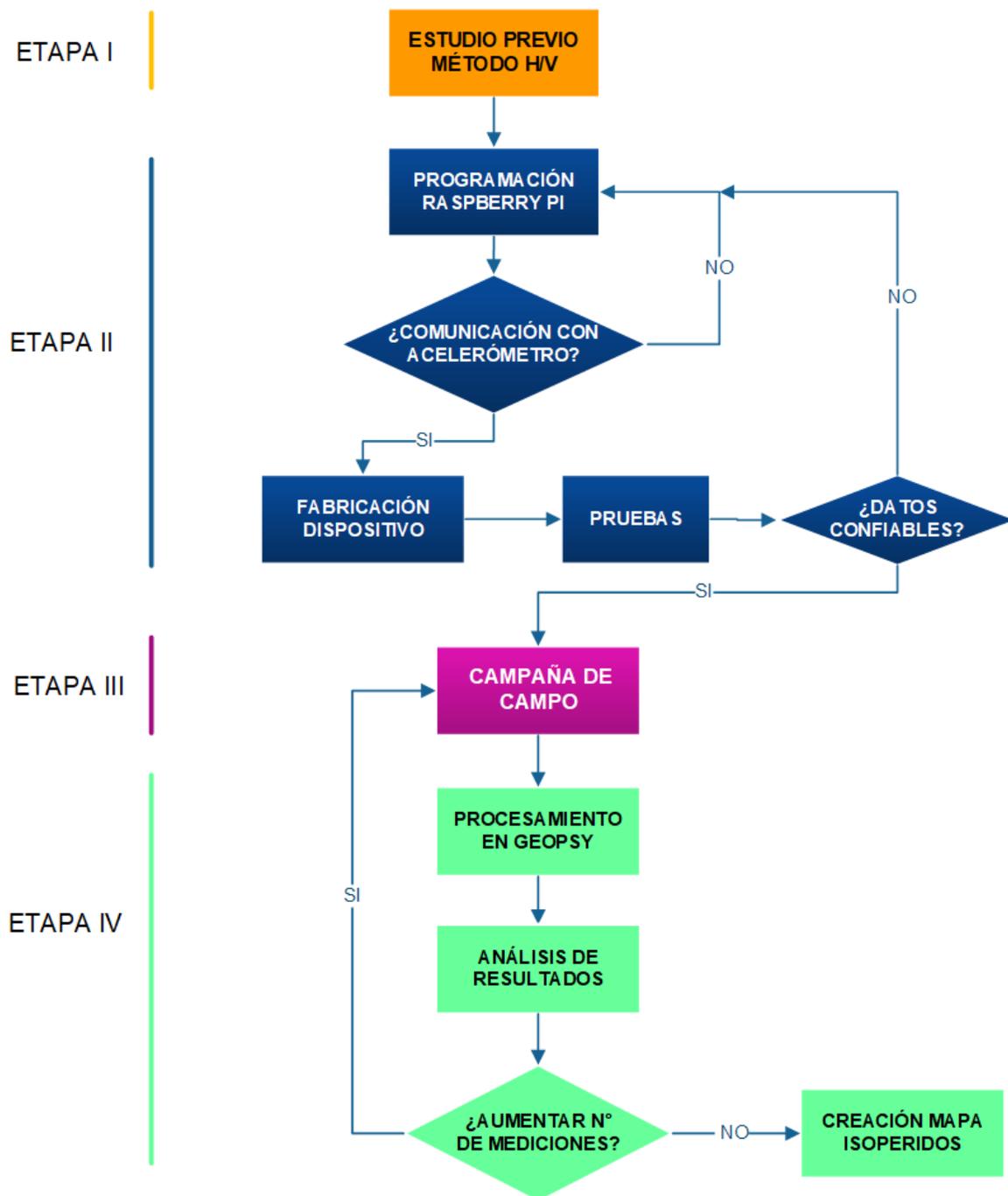


Figura N°22: Diagrama de flujo

Fuente: Elaboración propia

3.2.1. Etapa I: Estudios previos

I. Descripción del Método de Nakamura o Razón Espectral H/V

El método de Nakamura (1989) sugiere que la relación espectral de las componentes horizontal y vertical de las microvibraciones ambientales medidas en la superficie se asemeja a la función de transferencia del depósito de suelos.

Se asume que los *microtremores* están compuestos por ondas entre las que predominan principalmente las ondas Rayleigh, se establece un modelo del terreno donde existe una capa blanda de sedimentos que se ubica sobre un medio rocoso infinito. Se supone que entre estos medios las propiedades mecánicas como la densidad y la velocidad de corte son muy diferentes (Alvarado & Valdevenito, 2012).

La función de transferencia se define como:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}}$$

Ecuación 3-1

Además, como las vibraciones horizontales y verticales son iguales en la base:

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} = 1$$

Ecuación 3-2

Producto que las microvibraciones ambientales contiene ondas Rayleigh, el espectro horizontal de superficie S_{HS} se ve afectado por estas. Nakamura indica que el movimiento vertical no se amplifica por las capas superficiales, ya que ondas superficiales no alteran el movimiento en la base.

El movimiento vertical de la onda Rayleigh se representa por:

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}}$$

Ecuación 3-3

Si no se generan onda Rayleigh, $E_s = 1$. Si se aumenta el efecto de la onda, E_s se hace mayor a 1. También asume que el efecto de la onda Rayleigh es igual para las componentes vertical y horizontal.

Definiéndose una nueva función de transferencia:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} = \frac{R_S}{R_B}$$

Ecuación 3-4

Donde:

$$R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}}$$

Ecuación 3-5

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}}$$

Ecuación 3-6

R_S y R_B se obtienen dividiendo los espectros vertical y horizontal de la superficie con los de la base respectivamente.

Como las vibraciones horizontales y verticales son iguales en la base, por lo tanto, no hay diferencia entre los espectros de movimiento vertical y horizontal, obteniendo:

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}} = 1$$

Ecuación 3-7

Luego, la función de transferencia es:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} = \frac{R_S}{1} = R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}}$$

Ecuación 3-8

Demostrando que la función de transferencia de las capas superficiales puede ser estimada a Partir de microvibraciones ambientales medido en superficie y el peak de la relación espectral H/V corresponde a la frecuencia fundamental del suelo.

Para la solidez de resultados, Nakamura recomienda realizar mediciones en 3 direcciones: una vertical y 2 horizontales (N-S y E-O), ya que de esta forma las características dinámicas del suelo serán estimadas de mejor manera.

A continuación, se resume la metodología de la relación espectral H/V con ruido sísmico ambiente (figura N°23):

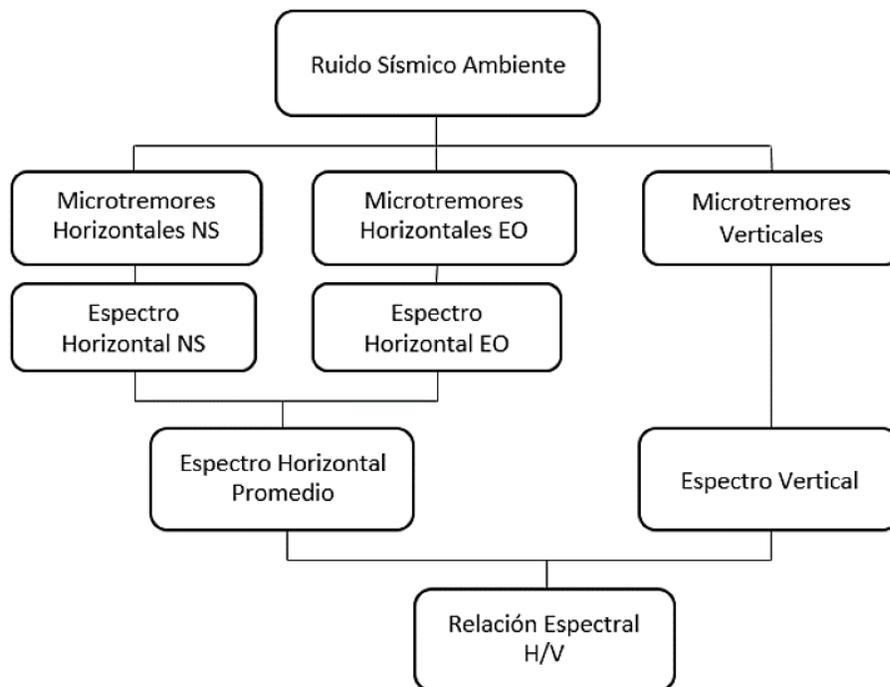


Figura N°23: Método para la obtención de la Relación Espectral H/V.

Fuente: Serafín & Franco (2017)

II. Criterio SESAME

El proyecto SESAME (Site EffectS using AMbient Excitations) es una comisión europea cuyo objetivo es trabajar en el tema de mitigación de riesgo sísmico con especial atención a las áreas urbanas.

En 2004, SESAME publicó una guía para la implementación del método de relación espectral H/V, la cual presenta recomendaciones para la adquisición de datos in situ, el procesamiento y la interpretación de los resultados que deben tenerse en cuenta para un estudio de efectos locales de sitio utilizando la técnica H/V con ruido sísmico ambiental (Serafín & Franco, 2017).

III. Tipología de Curvas H/V

SESAME en su estudio presenta cinco tipos de resultados probables de obtener al realizar un estudio utilizando la técnica H/V (Gómez, V., 2013; Valderrama, J., 2020):

i. Peak Claro

Se evidencia un peak de máxima amplitud que es considerado como una estimación confiable de la frecuencia fundamental del depósito de suelos (figura N°24). Si la amplitud del peak es mayor que 4 existe un marcado contraste de impedancia en profundidad y el sitio es susceptible a amplificación sísmica.

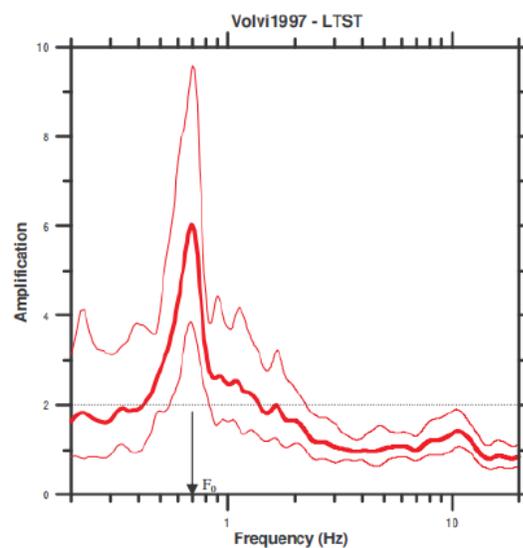


Figura N°24: Curva H/V con peaks claro.

Fuente: Bard y SESAME Team (2004)

ii. Curvas planas o con peaks de baja amplitud

Este caso puede deberse a un bajo contraste de impedancia en profundidad, sedimentos rígidos sobre el basamento rocoso, donde las amplificaciones son bajas (figura N°25). En caso de conocer la existencia de suelos blandos, el problema puede deberse a malas condiciones climáticas o mal acople suelo-sensor. SESAME en su guía recomienda que cuando se den estos resultados se deben realizar más pruebas en el sitio.

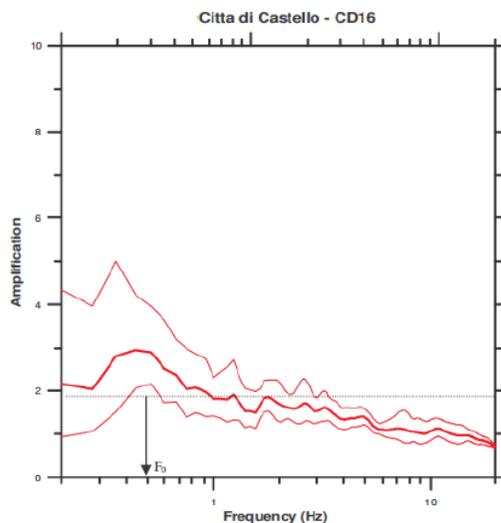


Figura N°25: Curva H/V con curvas planas o con peaks de baja amplitud.

Fuente: Bard y SESAME Team (2004)

iii. Peak ancho o múltiples peaks

Para este tipo de casos la disponibilidad de información geológica, y geofísica del terreno, puede permitir discriminar cuál de los peaks es la frecuencia fundamental (figura N°26).

La presencia de los demás peaks pueden estar relacionados a complejos campos de ondas debido a importantes variaciones 2D y 3D de la estructura subyacente. La propagación de ondas sísmicas incluye ondas difractadas (de cuerpo y superficiales) generadas a lo largo de la pendiente y de discontinuidades (Valderrama, J., 2020).

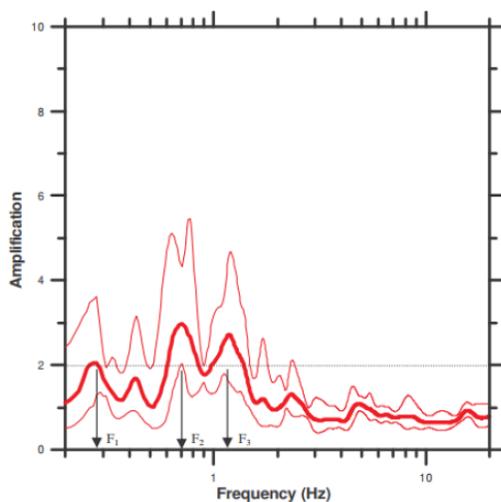


Figura N°26: Curva H/V con peak ancho o múltiples peaks

Fuente: Bard y SESAME Team (2004)

iv. Dos Peaks ($f_1 > f_0$)

Esta situación ocurre cuando existen dos grandes contrastes de impedancia a dos diferentes escalas: uno para una estructura profunda y otro para una estructura superficial. Debido al contraste de impedancia a baja profundidad el estrato superficial se comporta de forma independiente del resto de la columna de suelo. Las dos frecuencias, F_0 y F_1 , con $F_0 < F_1$ pueden ser interpretadas como características para cada escala, siendo F_0 la frecuencia fundamental (figura N°27). Se sugiere revisar la geología del sector y analizar la existencia de estratos blandos de poco espesor, sedimentos duros de gran espesor y un basamento rocoso de mucha dureza (Valderrama, J., 2020).

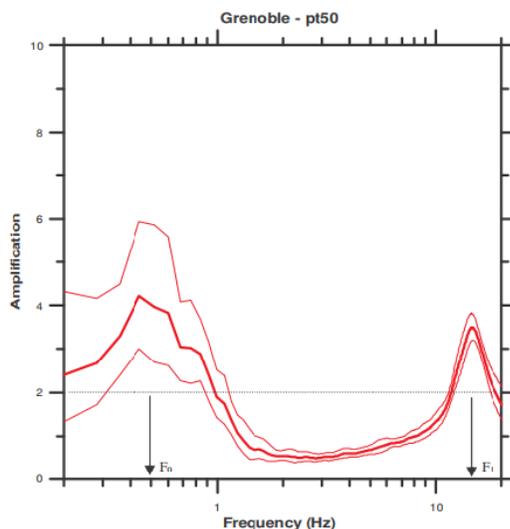


Figura N°27: Curva H/V con dos peaks.

Fuente: Bard y SESAME Team (2004)

v. Peaks agudos y de origen industrial

Se observa la presencia de un peak estrecho, debido a la actividad industrial cercana al punto de medición. La guía de SESAME sugiere para corroborar que la medición corresponde a actividad industrial, variar los parámetros de suavizado para observar que el peak se estrecha más, y a la vez su amplitud crece (figura N°28).

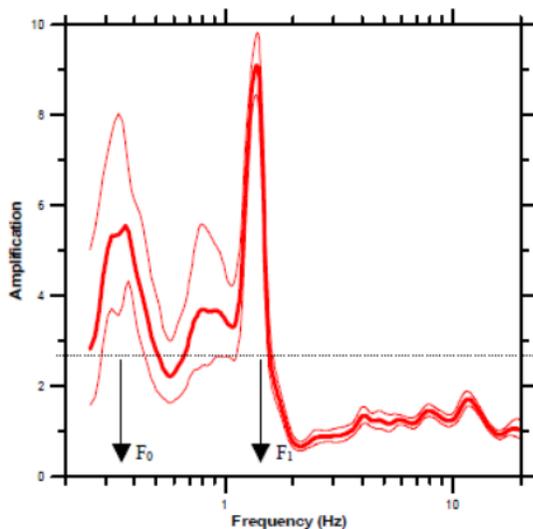


Figura N°28: Curva H/V con peaks agudos y de origen industrial

Fuente: Bard y SESAME Team (2004)

3.2.2. Etapa II: Prototipo

I. Equipos y materiales para el prototipo

a) Raspberry pi

La Raspberry Pi es una computadora de bajo costo económico y de tamaño compacto, la cual puede ser conectada a un monitor de computador, mouse y teclado (figura N°29). Este equipo trabaja con un sistema operativo Linux capaz de realizar códigos de programación en lenguaje Python.



Figura N°29: Raspberry Pi Model B+

Fuente: Elaboración propia

Fue creada en el año 2012 por la Raspberry Pi Foundation, con el objetivo de enseñar las ciencias básicas de la computación en las escuelas y universidades de Reino Unido, pero al poco tiempo de su lanzamiento miles de unidades comenzaron a ser vendidas a programadores aficionados para empezar a experimentar con nuevos proyectos.

Gran parte de la popularidad del producto fue debido a su bajo costo, a su versatilidad y facilidad de modificar para diferentes proyectos y a la capacidad de ejecutar el sistema operativo Linux, el cual es un sistema operativo muy popular entre los desarrolladores por ser de software libre (Raspberrypi, 2021).

Respecto a la programación del dispositivo, se escribe un código que obtenga los datos registrados del acelerómetro conectado por medio de cables dupont y guarde estos directamente en un sistema de almacenamiento a través de internet para el posterior procesamiento.

b) Batería de litio externa

Este accesorio alimentará la Raspberry Pi con corriente, producto que las mediciones serán efectuadas en varios puntos de la ciudad sin un cómodo acceso a electricidad (figura N°30).



Figura N°30: Batería Externa

Fuente: pcfactory (consultado: 06-09-2021)

c) Acelerómetro

Modelo MPU-6050 es un sensor de movimiento que posee un acelerómetro y un giroscopio en los 3 ejes, cuenta con una interfaz I2C y posee una librería muy difundida para su uso inmediato, que le permite conectarse a cualquier microcontrolador (figura N°31).

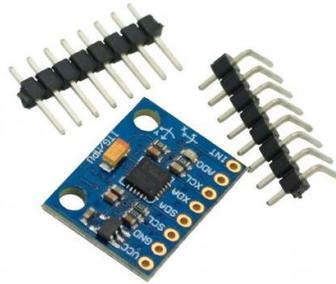


Figura N°31: Acelerador MPU-6050

Fuente: mechatronicstore (consultado: 06-09-2021)

d) Cables Dupont

Son cables de conexión mecho-hembra, para efectuar una correcta comunicación entre Raspberry y acelerómetro (figura N°32), su largo puede ser variable.



Figura N°32: Cables Dupont

Fuente: mechatronicstore (consultado: 06-09-2021)

e) Tornillos con tuerca

Se utilizan para sujetar el acelerómetro a la estaca y garantizar un buen contacto para el traspaso de vibraciones (figura N°33). Estos tienen un diámetro de 3mm y largo de 8mm.



Figura N°33: Tornillo con tuerca

Fuente: mechatronicstore (consultado: 06-09-2021)

f) Estaca de acero

Se utiliza una estaca sólida de acero para asegurar el traspaso de vibraciones hacia el acelerómetro que estará sujeto en los soportes soldados de la estaca (figura N°34).



Figura N°34: Estaca de acero.

Fuente: Elaboración Propia

II. Diseño y Fabricación

La conexión y comunicación entre Raspberry Pi y el acelerómetro MPU 6050 se realiza mediante cables dupont, como se muestra en la figura N°35:

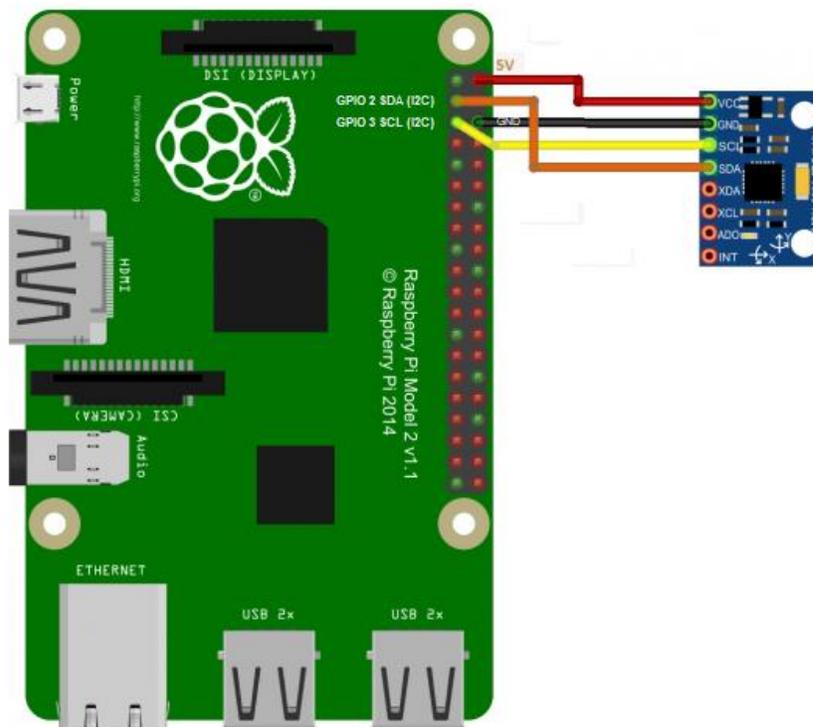


Figura N°35: Esquema conexión de pines.

Fuente: Elaboración Propia

Donde los pines o terminales para la conexión se definen a continuación:

Terminal Raspberry Pi	Terminal MPU 6050	Definición
5V	VCC	Es el voltaje de la fuente de alimentación.
GND	GND	Es la tierra de la fuente de alimentación.
GPIO 3 SCL	SCL	Reloj de serie I2C
GPIO 2 SDA	SDA	Terminal de datos en serie de I2C.

Tabla N°1: Definición terminales de conexión

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, el acelerómetro es sujetado al soporte lateral de la estaca por medio de tornillos, para asegurar el contacto y traspaso de vibraciones.

Finalmente, para realizar la lectura de vibraciones se debe hincar la estaca y conectar el dispositivo a la batería externa como fuente de poder. Los datos de cada medición se almacenarán automáticamente en el dispositivo y posteriormente se cargarán al sistema de almacenamiento a través de una red de internet.

A continuación, se presenta el diseño final del dispositivo para la presente investigación (figura N°36):

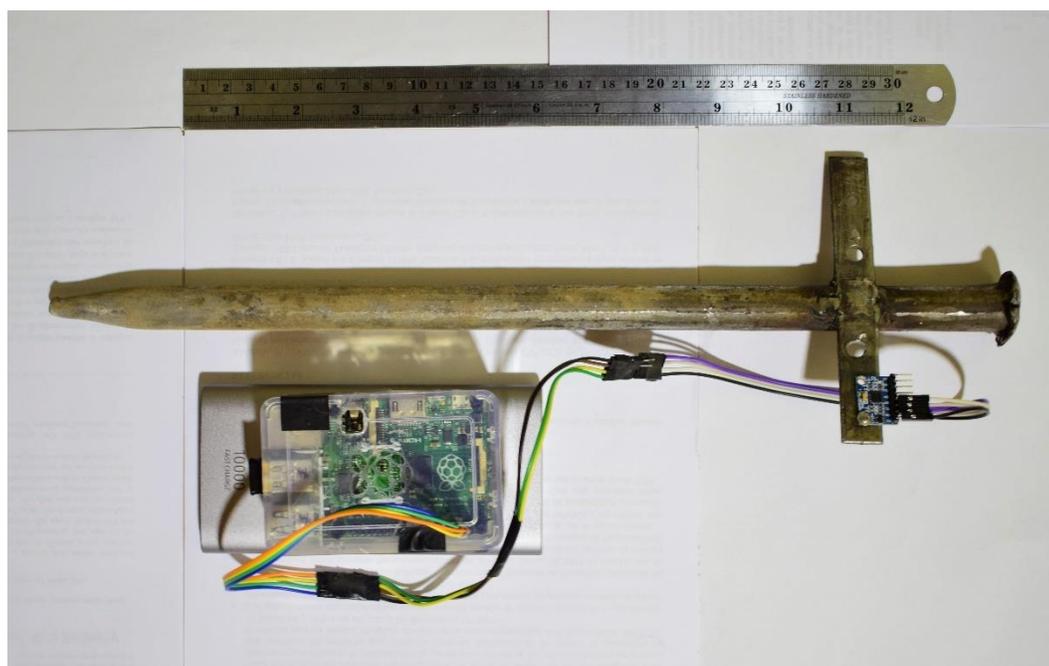


Figura N°36: Diseño completo prototipo.

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Etapa III: Campaña de Campo

El área de estudio en la zona urbana de Curicó tiene aproximada de 18.3 km². Esta zona se dividirá en los mismos 11 sectores (figura N°37) del estudio de Leyton et al., 2013, con la finalidad de realizar un certera comparativa y correcta planificación de las mediciones.

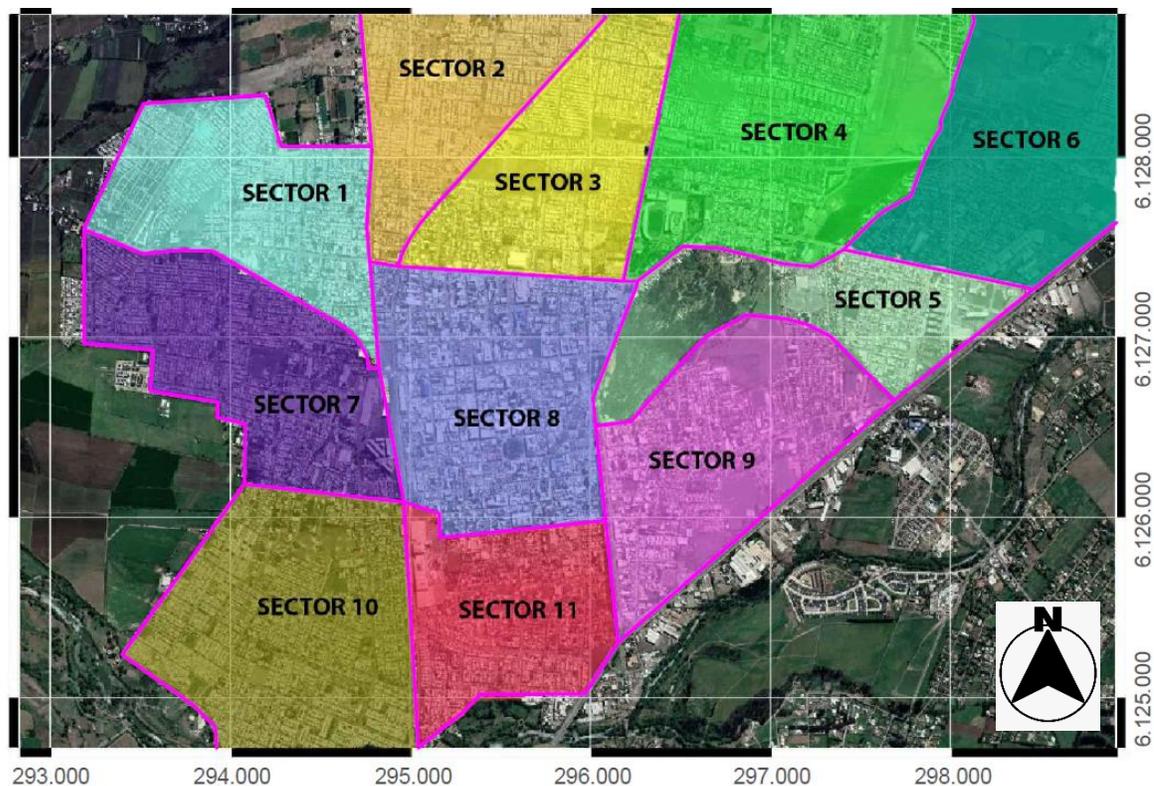


Figura N°37: Sectores poblacionales de Curicó

Fuente: Elaboración propia

Las mediciones se llevaron a cabo siguiendo el criterio SESAME (Bard y SESAME Team, 2004): Se iniciará con una grilla de 500 metros de distancia entre 2 puntos adyacentes de registros, reduciendo a 250 metros, en caso de que los 2 registros tengan gran variación en su periodo fundamental.

3.2.4. Etapa IV: Procesamiento en Software Geopsy

Geopsy es un software de código abierto para aplicaciones e investigación geofísica. Nacido en 2005 durante el Proyecto Europeo SESAME, ha proporcionado herramientas para el procesamiento de vibraciones ambientales (geopsy.org, 2021).

- i. Cargar mediciones y ejecutar H/V

La salida de las mediciones debe ser en formato “.txt” para cargarlos fácilmente al software Geopsy. Posteriormente se procede a completar datos de entrada, componente (E-W, N-S, Vertical) y nombre de estación, el cual debe ser única para las 3 componentes y así diferenciarlos de otras estaciones.

ii. Selección de Ventanas

Se procedió a la selección de ventanas, en la que se deben definir previamente algunos parámetros indicados en la Tabla N°2, con la finalidad de filtrar señales atípicas como vibraciones artificiales, las cuales pueden generar resultados poco representativos del suelo en estudio.

Lw (s)	60
Smáx	2.0
Smín	0.25
t _{lta} (s)	30
t _{sta} (s)	1

Tabla N°2: Parámetros selección de ventanas

Fuente: Elaboración propia

Donde:

Lw : Duración ventana

t_{sta} : amplitud promedio de la señal en un período corto de tiempo.

t_{lta} : amplitud promedio de la señal en un período más largo de tiempo.

Smáx : valor umbral que evita ventanas de tiempo con amplitudes transitorias energéticas.

Smín : valor umbral que evita ventanas de tiempo con amplitudes anormalmente bajas.

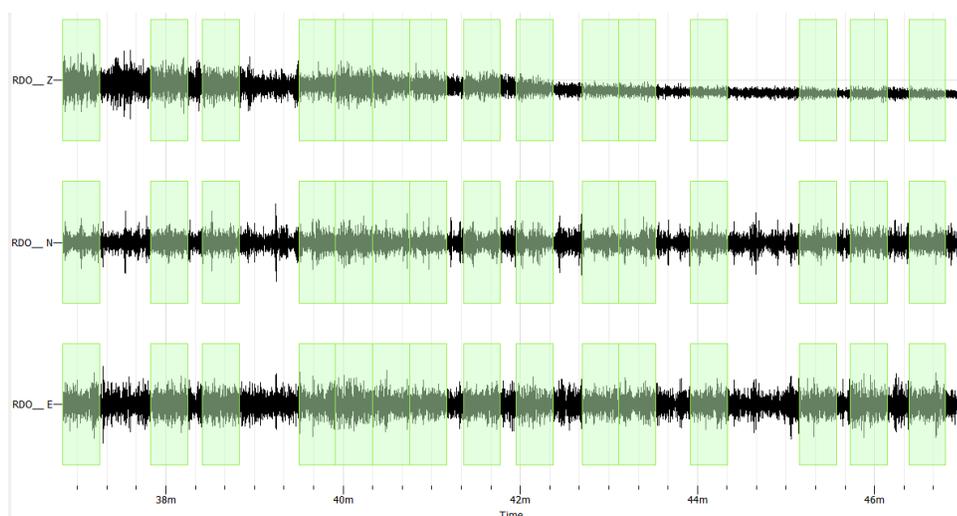


Figura N°38: Registro de vibraciones ambientales en las tres componentes y ventanas seleccionadas.

Fuente: Elaboración propia

iii. Procesamiento y resultados

Internamente el software calcula la razón espectral en cada una de las ventanas seleccionadas en la figura N°39), tanto para los ejes horizontales (S_{H1} y S_{H2}) y verticales (S_V). Posteriormente se combinan los espectros horizontales en forma cuadrática para obtener una componente horizontal final S_H . Finalmente, se calcula la razón espectral S_H/S_V .

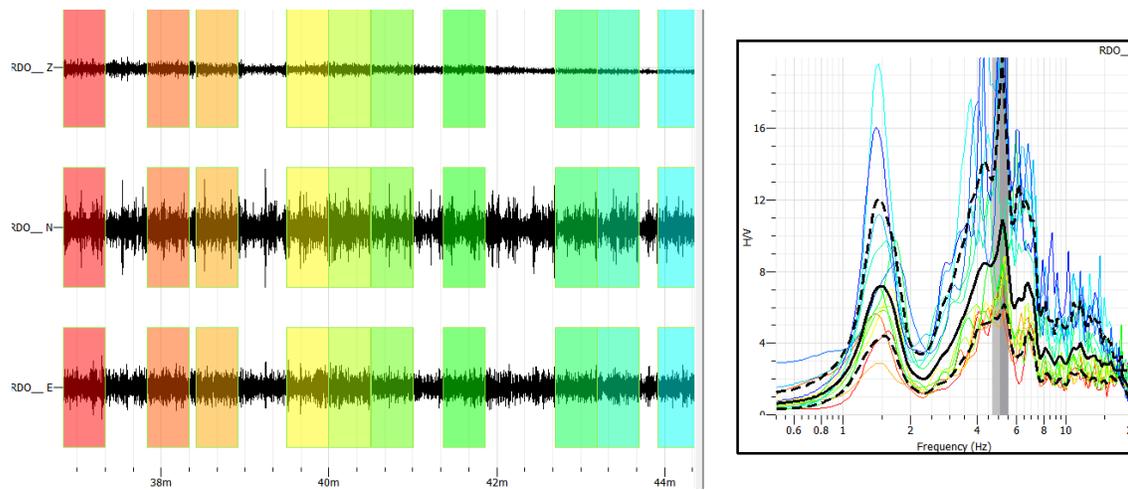


Figura N°39: Ventanas seleccionadas y generación de la relación espectral (S_H/S_V).

Fuente: Elaboración propia

3.3 Desarrollo del trabajo

Etapa I

- Revisión bibliográfica de estudios que evidencian que la solución propuesta es factible. Por otro lado, se describir método de Nakamura (H/V).

Etapa II

- Compra de equipos y materiales
- Programación de Raspberry
- Fabricación del dispositivo.
- Pruebas y ajustes del dispositivo.

Etapa III

- Planificar trabajo de campo:

Se inicia con un distanciamiento de 500 metros entre 2 puntos adyacentes de registros, reduciendo a 250 m, en caso de que los 2 registros tengan gran variación en su periodo fundamental.

- Campaña de campo:

Las condiciones para realizar las mediciones deben ser las óptimas, factores como: tráfico vehicular o peatonal, clima, entre otros; pueden generar errores o dañar el dispositivo.

Iniciada la grabación, se debe evitar el tránsito de personas, vehículos por las inmediaciones del dispositivo, para evitar vibraciones artificiales de gran amplitud que alteren los resultados.

La nomenclatura de las mediciones contara de 3 dígitos (figura N°40), el primero corresponde al N° del sector y los siguientes 2 al punto estudiado (por ejemplo; S-203, corresponde al sector 2 y punto 03).

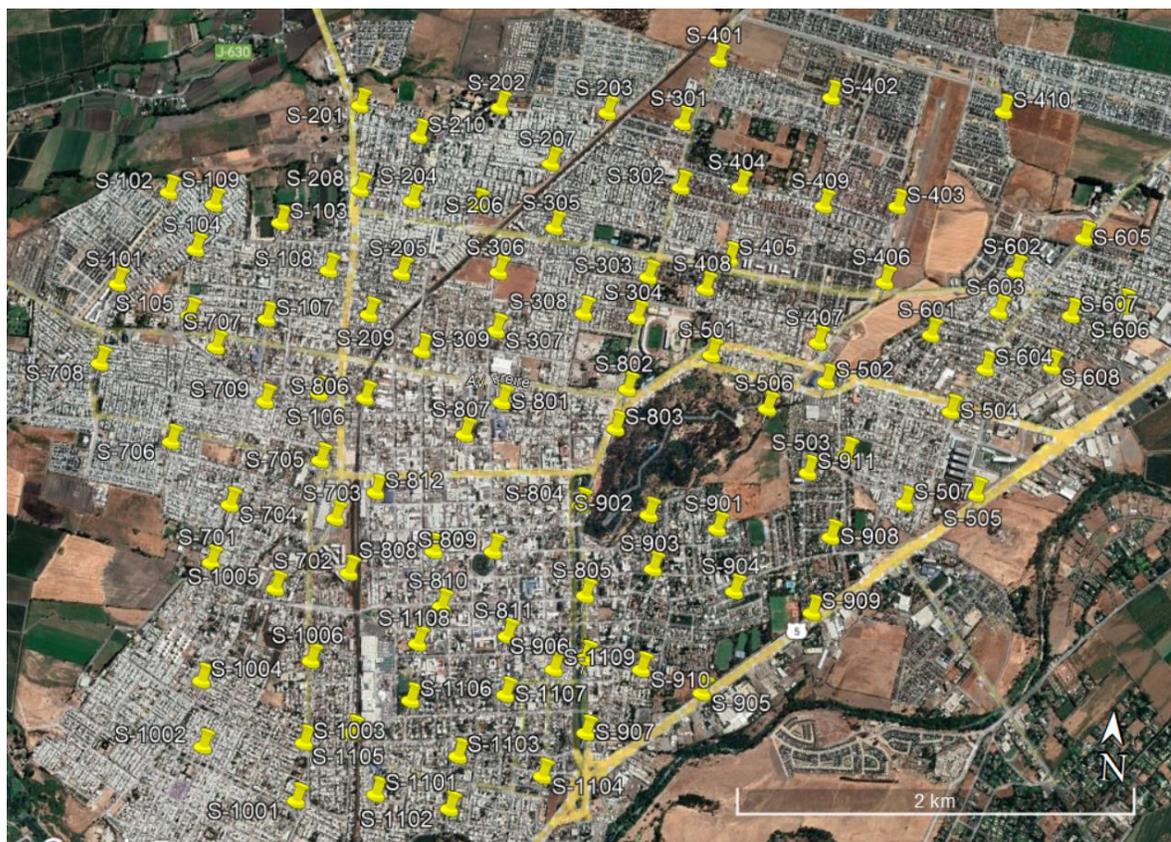


Figura N°40: Distribución de puntos en estudio.

Fuente: Elaboración propia

Se realizarán 2 o 3 mediciones por cada punto georreferenciado, con la finalidad de reducir la incertidumbre generada por la calidad del dispositivo y así aumentar la confiabilidad de los resultados. Estas mediciones se promedian para obtener la frecuencia fundamental del punto estudiado.

Las 3 mediciones por punto conformaran un triángulo con una distancia relativa de 2-3 metros, ajustando la distancia y número de mediciones al entorno si es necesario. Se considera este rango de distancia entre mediciones, ya que no genera una gran variación estratigráfica de los suelos, sin alterar el resultado final del punto en estudio.

Por ejemplo, las mediciones M-101, M-102 y M-103 (figura N°41), conforman el punto S-101 utilizado para la microzonificación.

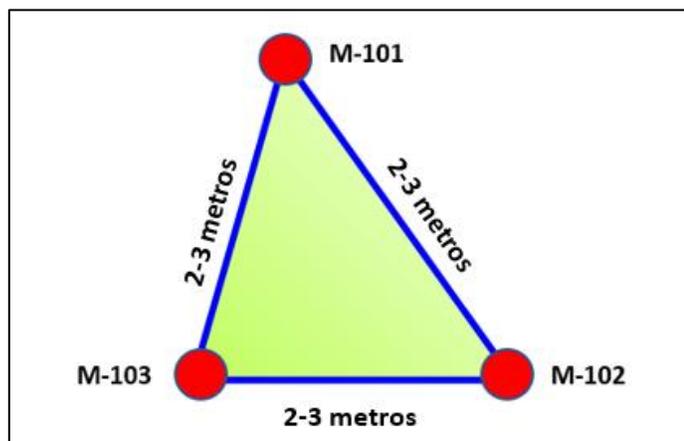


Figura N°41: Conformación de un punto en base a 3 mediciones

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se registra la fecha y hora de medición, sector de medición, coordenadas UTM y algún otro tipo de información pertinente.

Finalizada la medición, se apaga el dispositivo y se realiza el traslado al punto siguiente.

A continuación, se presentan imágenes de las mediciones efectuadas en distintos sectores de la ciudad:



Figura N°42: Adquisición de microvibraciones Alameda de Curicó

Fuente: Elaboración propia



Figura N°43: Adquisición de microvibraciones esquina Calle Dr. Osorio con Membrillar.

Fuente: Elaboración propia



Figura N°44: Adquisición de microvibraciones frente a Aeródromo General Freire.

Fuente: Elaboración propia

Etapa IV

- Procesamiento de datos

Con software computacional, para determinar la frecuencia predominante del suelo.

- Análisis de resultados

Se analizan los datos y se determina si se continua con las mediciones o se inicia con la construcción del mapa de frecuencia fundamental y comparativa de resultados.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Resultados

Se presentan las frecuencias predominantes obtenidas a través del procesamiento en el programa Geopsy en un mapa georreferenciado en base al Datum y elipsoide de referencia WGS 84.

Los resultados del presente estudio fueron superpuestos con el mapa de geología superficial de Curicó, realizado por Leyton et al. (2012). Se clasifican los valores en 4 intervalos con colores distintivos, obteniendo los siguientes resultados:

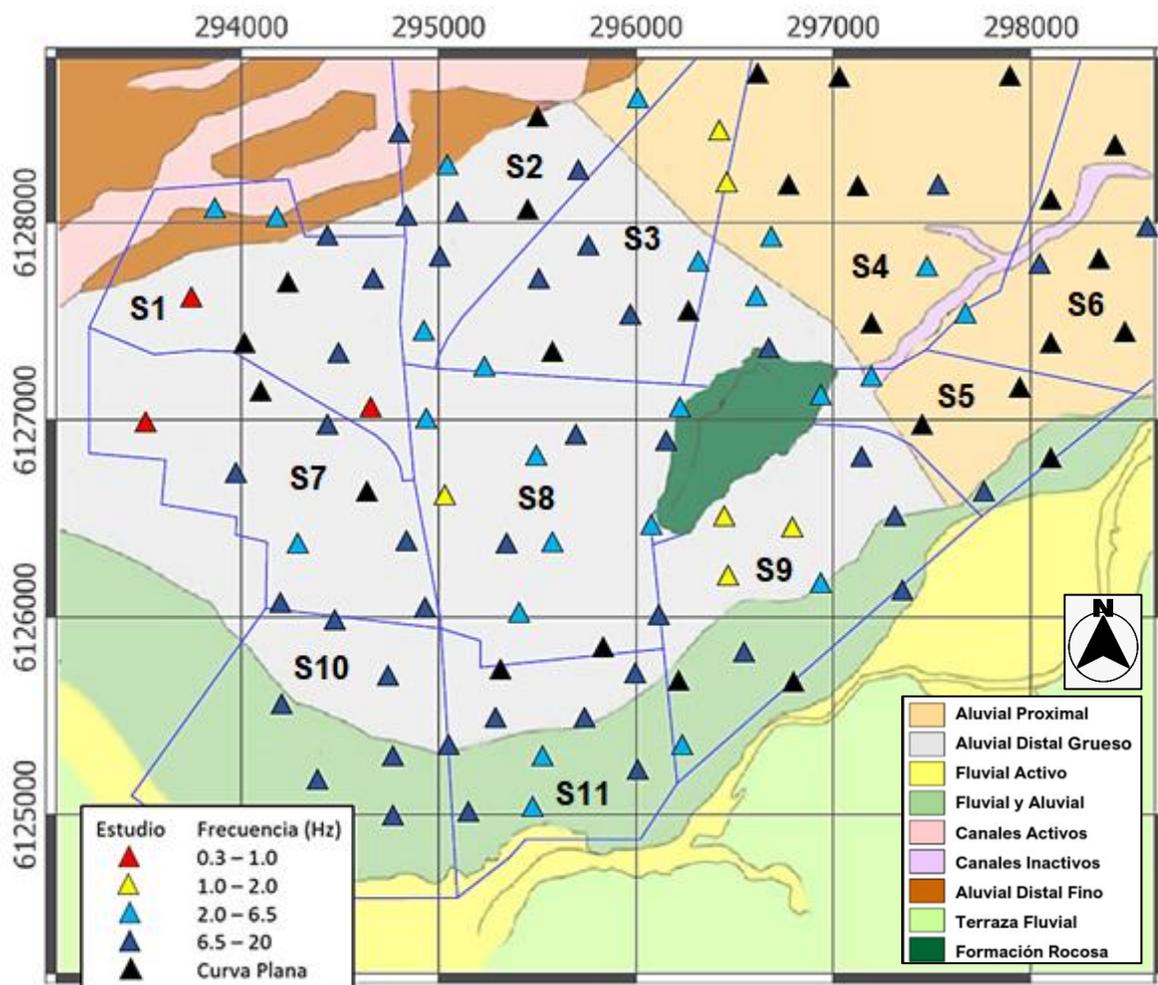


Figura N°45: Mapa de frecuencias fundamentales

Fuente: Elaboración propia

Se efectúa un análisis comparativo con los resultados obtenidos por Leyton et al. (2013), superponiendo estos con los resultados del actual estudio, con el objetivo de buscar comparaciones y determinar correlaciones, obteniendo los siguientes resultados:

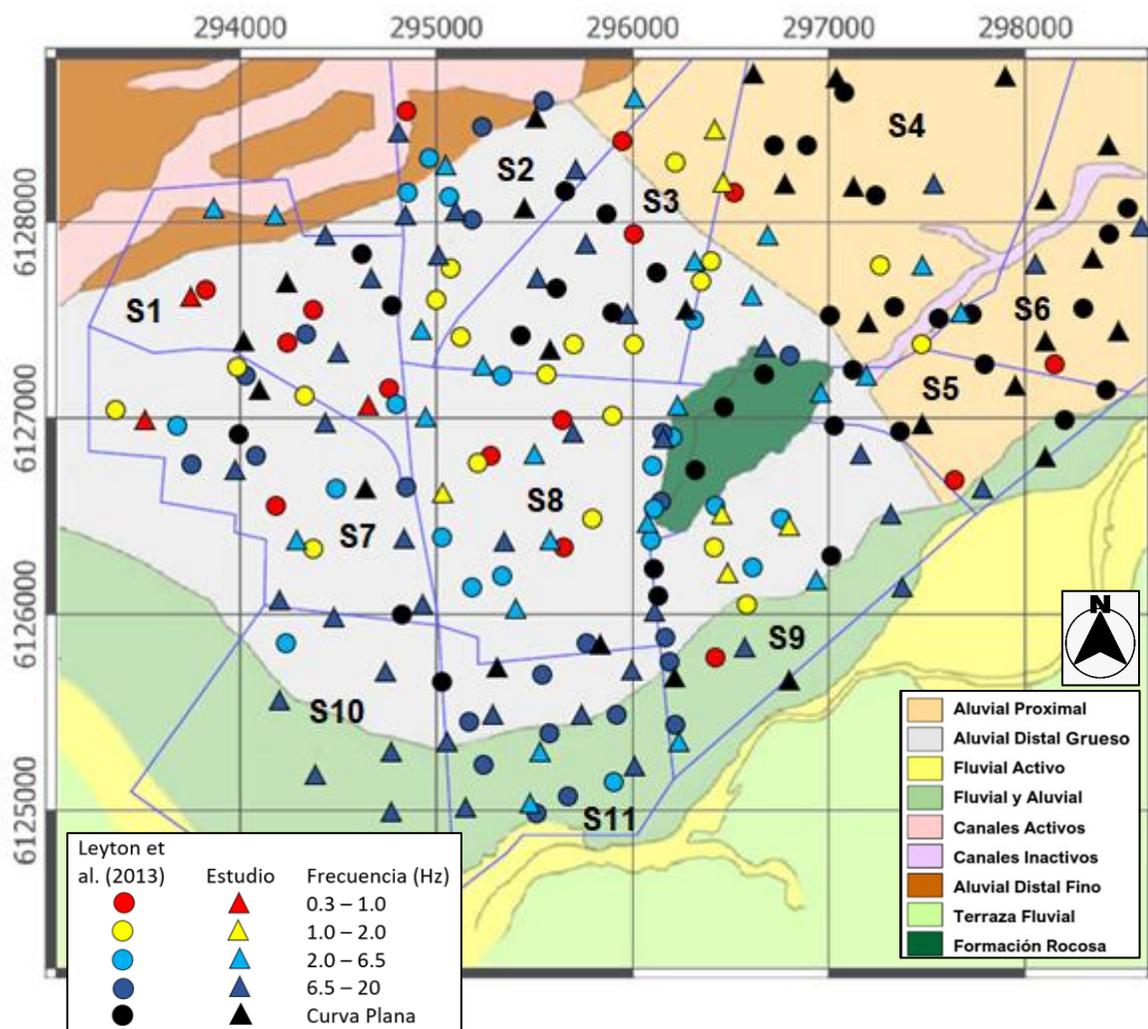


Figura N°46: Mapa de frecuencias fundamentales de presente estudio y Leyton et al. (2013)

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos en cada uno de los sectores, se realiza una descripción y comparativa de la distribución de frecuencias:

- En el sector 1, el dispositivo presenta una gran distribución de frecuencias altas (sobre 2.0 Hz), a diferencia de Leyton et al. (2013), que presenta una predominancia de frecuencias bajas (grafico N°1). Al comparar la distribución de frecuencias en la gráfica N°2, se observa un error superior al 100%, ya que el dispositivo genera un rango amplio, concentrado en frecuencias altas.

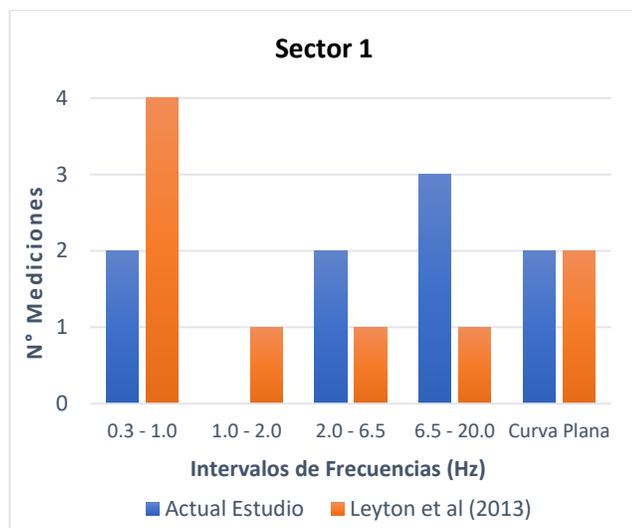


Gráfico N°1: Cantidad de mediciones por intervalo de frecuencia (Sector 1).

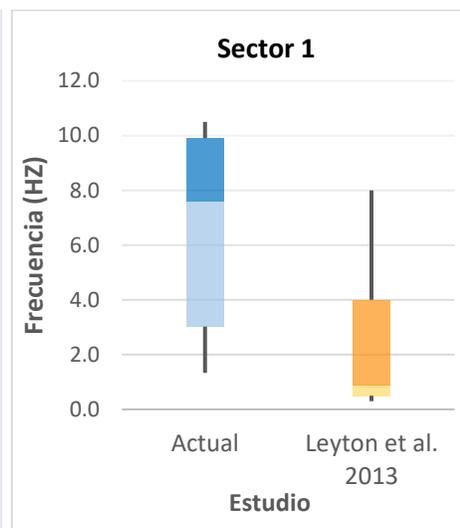


Gráfico N°2: Comparativa en distribución de frecuencias (Sector 1).

- En el sector 2, las frecuencias medidas por el dispositivo son heterogéneas entre los 2.0 y 20.0 Hz, sin observar una disminución teórica en las cercanías de los depósitos finos del norte. Por otro lado, el estudio comparativo de Leyton et al. (2013) muestra mediciones asociadas a frecuencias entre 1.0 y 6.5 Hz. Obteniendo el dispositivo un error igual a 64%. No es posible identificar una clara correlación con la geología local.
- En el sector 3, los resultados de Leyton et al. (2013) presentan una predominancia en frecuencias entre 1.0 y 2.0 Hz en las zonas cercanas a la formación rocosa y por otro lado, curvas planas, donde no es posible estimar una frecuencia fundamental del suelo, pero se correlaciona a un suelo competente. Sin embargo, el actual estudio tiene resultados heterogéneos en el sector, con un error superior al 100% en el análisis de distribución comparativa de mediciones.

- En el sector 4, en los depósitos aluviales proximales, encontramos para ambos estudios curvas planas de H/V o picos de pequeña amplitud, lo cual se correlaciona con la presencia de suelos de material grueso. Además, el presente estudio presenta algunas frecuencias altas desde 2.0 a 6.5 Hz en las proximidades a depósitos aluviales distales gruesos. Al ser zonas predominantes de curvas planas, el error del dispositivo es 71%, asociado a la cantidad de mediciones por intervalo.
- En el sector 5 y 6, ambos estudios presentan gran cantidad de curvas planas, lo cual se correlaciona al depósito aluvial próxima, estos depósitos están formados por abundantes gravas con matriz de arena y limos, por ello la no existencia de un “peak” predominante. Al ser zonas predominantes de curvas planas, el error del dispositivo es 89% y 58% respectivamente, asociado a la cantidad de mediciones por intervalo.
- En el sector 7, los resultados de Leyton et al. (2013) presentan una predominancia en frecuencias entre 6.5 y 20.0 Hz. Sin embargo, las mediciones del dispositivo tienen resultados heterogéneos en el sector, con error de 56%.
- En el sector 8, el centro de la ciudad, el dispositivo generó una distribución de frecuencias altas entre 2.0 y 20.0 Hz, a diferencia de las frecuencias heterogéneas de Leyton et al. (2013) debido al abanico aluvial cortado por varios canales fluviales inactivos y zonas deprimidas del tipo lacustres. Obteniendo un error del 61% en la comparativa de los estudios.
- En el sector 9, ambos estudios tienen una gran distribución de frecuencias, entre 1.0 y 20.0 Hz, influenciada por la existencia de 2 tipologías de suelos, depósitos aluviales distales gruesos en el norte y zona fluvial y aluvial en el sur. El dispositivo presenta un error del 7% en las mediciones totales comparadas.
- En el sector 10, el actual estudio presenta frecuencias altas entre 6.5 y 20.0 Hz, asociado a los depósitos de material grueso. Sin información disponible para análisis comparativo.
- En el sector 11, en ambos estudios existe un predominio de frecuencias altas en el intervalo 6.5 y 20.0 Hz, asociados a suelos competentes, lo cual se correlaciona al depósito aluvial distal grueso y fluvial activo (grafica N°3). El estudio realizado obtiene un error del 14%, obteniendo frecuencias menores respecto a la comparación con Leyton et al. (2013) (grafica N°4).

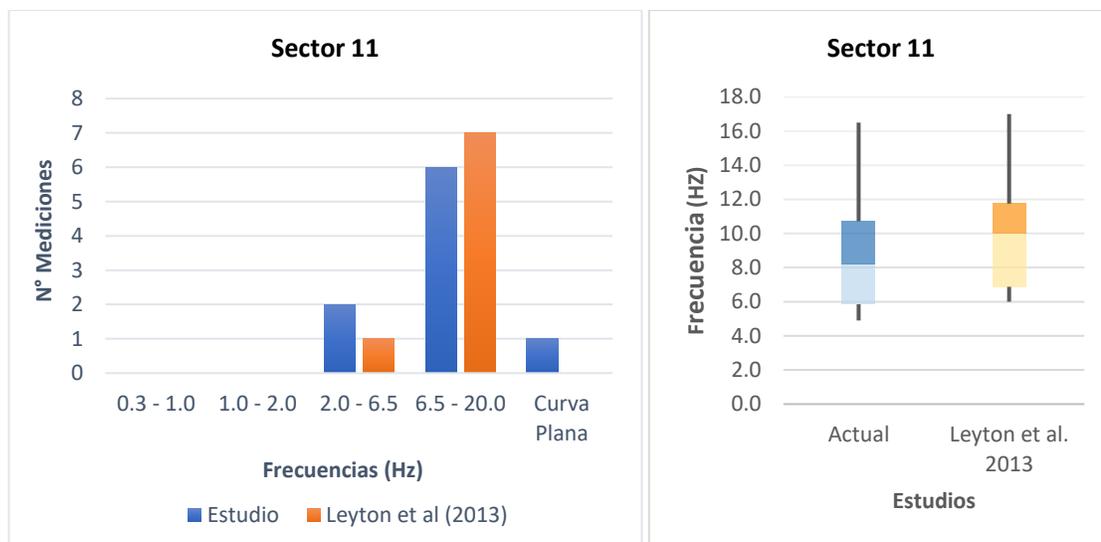


Gráfico N°3: Cantidad de mediciones por intervalo de frecuencia (Sector 11).

Gráfico N°4: Comparativa en distribución de frecuencias (Sector 11).

Obteniendo finalmente el siguiente cuadro resumen:

Sector	% Error	Tipo de suelo
1	> 100	Arena, limo y arcillas en superficie.
2	64	Arena, limo y arcillas en superficie.
3	> 100	Gravas con arenas y finos.
4	71	Gravas con matriz de arenas y limos.
5	89	Gravas con matriz de arenas y limos.
6	58	Gravas con matriz de arenas y limos.
7	56	Gravas con arenas y finos.
8	61	Gravas con arenas y finos.
9	7	Gravas con arenas y finos; Terrazas de gravas y arenas.
10	-	Gravas con arenas y finos; Terrazas de gravas y arenas.
11	14	Gravas con arenas y finos; Terrazas de gravas y arenas.

Tabla N°3: Error asociado al dispositivo.

Fuente: Elaboración propia

En el Anexo 3 y 4 se presentan las gráficas resultantes para cada uno de los sectores.

CAPITULO V: CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

Considerando los resultados obtenidos a partir de la medición de un dispositivo de bajo costo y utilizando el método de Nakamura, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

El método de Nakamura para la obtención de frecuencias predominantes de los puntos en estudio resulta ser una herramienta de fácil aplicación, rápido en el procesamiento de datos y práctico en la fase de análisis de resultados, por lo que su uso debe ser promovido en el estudio de caracterización dinámica de los suelos.

La estimación del comportamiento del suelo mediante el método de Nakamura no funciona para clasificar sísmicamente un tipo de suelo, ya que, la normativa vigente, exige como primer parámetro un perfil de velocidades de los primeros 30 metros (V_{S30}). Sin embargo, es un buen estimador de la función de amplificación del suelo, lo que nos ayuda a tener idea de cual podría ser la amplificación del movimiento sísmico considerando distintas frecuencias de vibración.

En base al uso del dispositivo, al efectuar una comparación entre las frecuencias obtenidas y el estudio de Leyton et al. (2013), se observó que el error en las mediciones disminuye en suelos competentes, constituidos por gravas y arenas, especialmente los sectores con terrazas fluviales, esto debido al contraste de impedancia entre los estratos de la zona y el rango de frecuencias altas que generan estos depósitos, siendo captado por el acelerómetro. Además, en sectores con suelos de mayor granulometría, como el noreste de la ciudad, donde el contraste entre las capas es menor, los resultados del dispositivo arrojan un mayor porcentaje de frecuencias altas que el estudio de Leyton et al. (2013), confirmando que el dispositivo presenta mayor sensibilidad a frecuencias altas.

En general el dispositivo tiende a medir frecuencias más altas a las esperadas en suelos blandos, y no refleja el contraste de impedancia existente en el lugar, por lo que el sensor no es lo suficientemente sensible para captar las frecuencias bajas de estos suelos.

Además, se ha evidenciado las limitaciones del dispositivo en zonas urbanas céntricas, ya que requiere ser hincado, por lo cual necesita superficies no pavimentadas para su funcionamiento, a diferencia de un geófono de 3 componentes que solo debe apoyarse en cualquier superficie.

Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad en el diseño del dispositivo, con la finalidad de variar la placa de programación, buscando una mejor capacidad operativa de almacenamiento de la información y, por otro lado, buscar una mayor sensibilidad del acelerómetro, con capacidad de lecturas menores a 1.0 Hz, relacionado a suelos blandos. Con el objetivo de determinar si los datos entregados son robustos para fomentar su utilización.

ANEXOS

ANEXO 1: Georreferenciación de puntos y parámetros dinámicos del suelo asociados.

SECTOR 1

		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f (Hz)	f₀ (Hz)	Factor de Amplitud	Tipología Curva
S-101	101	293552.9	6127458.7	1.4	1.3	1.6	Tipo 3
	102			1.8			
	103			0.8			
S-102	104	293777.6	6127977.5	5.3	4.3	1.6	Tipo 2
	105			4.7			
	106			2.9			
S-103	107	294644.7	6127555.3	10.8	10.5	1.6	Tipo 2
	108			10.8			
	109			9.9			
S-104	110	293941.4	6127682.0	10.1	9.2	1.0	Plana
	111			12.5			
	112			5.0			
S-105	113	293951.2	6127339.4	4.9	10.3	1.1	Plana
	114			12.8			
	115			13.1			
S-106	116	294659.1	6127003.5	2.7	1.8	1.1	Tipo 2
	117			0.8			
S-107	118	294349.3	6127354.4	11.4	7.6	1.2	Tipo 2
	119			3.4			
	120			8.0			
S-108	121	294364.0	6127861.0	11.9	9.5	1.4	Tipo 1
	122			8.5			
	123			8.2			
S-109	124	294007.9	6127920.	6.6	5.9	1.1	Tipo 3
	125			5.1			

SECTOR 2

		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f (Hz)	f₀ (Hz)	Factor de Amplitud	Tipología Curva
S-201	201	294689.8	6128544.1	6.3	9.4	1.5	Tipo 1
	202			10.7			
	203			11.2			
S-202	204	295448.6	6128559.4	11.7	9.4	1.4	Plana
	205			9.3			

	206			7.1			
S-203	207	295997.5	6128592.8	2.0	4.3	1.7	Tipo 2
	208			5.1			
	209			5.7			
S-204	210	295031.6	6128037.8	12.6	12.4	1.0	Tipo 1
	211			12.2			
	212			11.8			
S-205	213	294917.6	6127714.2	8.5	10.4	1.3	Tipo 2
	214			11.9			
	215			10.7			
S-206	216	295422.2	6128050.4	7.8	8.6	1.0	Plana
	217			9.4			
S-207	218	295730.7	6128297.4	12.9	10.1	1.0	Tipo 2
	219			7.3			
S-208	220	294754.8	6128049.1	6.3	7.3	1.4	Tipo 1
	221			7.2			
	222			8.5			
S-209	223	294755.2	6127482.2	2.4	3.1	1.7	Tipo 2
	224			3.7			
S-210	225	295010.7	6128377.1	5.5	6.2	1.2	Tipo 2
	226			3.7			
	227			9.3			

SECTOR 3

		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f (Hz)	f _o (Hz)	Factor de Amplitud	Tipología Curva
S-301	301	294689.8	6128544.1	2.3	2.0	1.5	Tipo 1
	302			2.4			
	303			1.2			
S-302	304	296288.8	6127751.1	0.6	1.9	1.3	Tipo 2
	305			3.6			
	306			1.4			
S-303	307	296426.8	6128230.3	2.1	3.5	1.7	Tipo 2
	308			5.8			
	309			2.7			
S-304	310	295781.0	6127963.0	3.6	3.9	1.2	Plana
	311			3.3			
	312			4.9			
S-305	313	295517.0	6127706.0	15.8	12.5	1.2	Tipo 2
	314			11.3			
	315			10.3			

S-306	316	295534.0	6127402.0	14.0	11.9	1.5	Tipo 2
	317			8.9			
	318			12.8			
S-307	319	295534.0	6127402.0	10.7	10.4	1.4	Plana
	320			10.1			
S-308	321	295974.9	6127533.3	12.4	14.1	1.3	Tipo 2
	322			15.7			
S-309	323	295164.1	6127263.7	5.0	5.4	1.5	Tipo 2
	324			5.8			

SECTOR 4

		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f (Hz)	f ₀ (Hz)	Factor de Amplitud	Tipología Curva
S-401	401	296547.2	6128922.4	16.30	14.1	1.1	Plano
	402			11.80			
S-402	403	297151.9	6128776.4	15.70	11.6	1.1	Plano
	404			7.50			
S-403	405	297537.9	6128234.1	11.50	10.6	1.0	Tipo 2
	406			4.50			
	407			15.70			
S-404	408	296720.2	6128263.0	6.30	12.1	1.1	Plano
	409			16.30			
	410			13.80			
S-405	411	296696.6	6127881.1	5.40	3.5	1.2	Tipo 2
	412			1.50			
S-406	413	297502.7	6127834.3	1.40	3.7	1.1	Tipo 2
	414			6.30			
	415			3.50			
S-407	416	297186.9	6127491.1	10.70	10.5	1.0	Plano
	417			14.70			
	418			6.00			
S-408	419	296587.9	6127717.7	1.80	2.8	1.4	Tipo 3
	420			3.70			
S-409	421	297157.7	6128202.7	15.30	15.5	1.0	Plano
	422			15.60			
S-410	423	298047.6	6128782.2	15.80	16.35	1	Plano
	424			16.90			

SECTOR 5

		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f (Hz)	f_o (Hz)	Factor de Amplitud	Tipología Curva
S-501	501	296647.0	6127378.1	15.80	16.35	1.45	Tipo 2
	502			16.90			
S-502	503	297245.7	6127296.7	2.40	2.7	1.35	Tipo 2
	504			3.00			
S-503	505	297379.7	6126933.4	6.10	6.25	1.2	Plana
	506			6.40			
S-504	507	297890.3	6127199.8	7.80	12.65	1	Plana
	508			17.50			
S-505	509	298053.5	6126791.8	9.60	7.6	1.05	Plana
	510			5.60			
S-506	511	296956.2	6127130.8	2.70	4.65	1.3	Tipo 2
	512			6.60			
S-507	513	297695.2	6126712.7	11.5	12.7	1.2	Tipo 2
	514			14.6			
	515			12.0			

SECTOR 6

		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f (Hz)	f_o (Hz)	Factor de Amplitud	Tipología Curva
S-601	601	297760.5	6127584.8	4.10	4.2	1.05	Tipo 2
	602			4.20			
S-602	603	298167.0	6127950.6	11.60	11.5	1.05	Plana
	604			11.40			
S-603	605	298111.6	6127675.2	15.10	12.4	1.15	Tipo 1
	606			9.60			
S-604	607	298050.7	6127434.2	11.60	13.3	1.0	Plana
	608			15.00			
S-605	609	298505.5	6128154.5	3.80	6.6	1.05	Plana
	610			9.30			
S-606	611	298730.8	6127819.5	7.80	7.0	1.15	Tipo 2
	612			6.10			
S-607	613	298466.2	6127747.8	16.00	14.0	1.1	Plana
	614			11.90			
S-608	615	298387.5	6127474.3	7.70	6.5	1.3	Tipo 2
	616			5.20			

SECTOR 7

		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f (Hz)	f _o (Hz)	Factor de Amplitud	Tipología Curva
S-701	701	294205.5	6126089.3	8.3	10.0	1.3	Tipo 2
	702			10.7			
	703			11.1			
S-702	704	294910.0	6126102.4	12.0	10.7	1.3	Tipo 2
	705			12.5			
	706			7.5			
S-703	707	294811.9	6126370.2	15.8	16.5	1.9	Tipo 3
	708			17.2			
S-704	709	294266.4	6126390.9	4.0	4.3	1.8	Tipo 1
	710			4.5			
S-705	711	294703.6	6126657.4	3.2	4.3	1.2	Plana
	712			4.5			
	713			5.3			
S-706	714	293928.6	6126682.2	17.2	15.3	1.2	Tipo 2
	715			18.0			
	716			10.7			
S-707	717	294105.4	6127187.7	4.5	3.8	0.9	Plana
	718			3.0			
S-708	719	293519.4	6127049.2	0.7	0.8	2.0	Tipo 2
	720			0.9			
S-709	721	294389.4	6126932.9	10.6	10.0	1.8	Tipo 2
	722			9.4			

SECTOR 8

		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f (Hz)	f _o (Hz)	Factor de Amplitud	Tipología Curva
S-801	801	295600.0	6127038.0	5.3	5.8	1.5	Tipo 2
	802			6.1			
	803			6.0			
S-802	804	296235.0	6127164.0	5.8	3.6	1.5	Tipo 3
	805			3.6			
	806			1.5			
S-803	807	296193.0	6126957.0	11.1	9.6	1.5	Tipo 2
	808			7.9			
	809			9.9			

S-804	810	296051.7	6126551.4	8.2	6.1	1.5	Tipo 2
	811			5.4			
	812			4.6			
S-805	813	296119.1	6126099.9	13.7	15.3	1.4	Tipo 2
	814			16.9			
S-806	815	294899.1	6126996.9	6.1	6.6	1.6	Tipo 2
	816			7.8			
	817			5.8			
S-807	818	295427.8	6126855.3	7.8	6.2	1.5	Tipo 2
	819			4.6			
S-808	820	295330.3	6126251.2	7.1	6.8	1.5	Tipo 2
	821			6.4			
S-809	822	295631.5	6126277.2	2.0	3.1	1.2	Tipo 2
	823			4.1			
S-810	824	295397.7	6125978.7	5.7	4.7	1.3	Tipo 2
	825			3.8			
	826			4.6			
S-811	827	295744.5	6125860.0	7.2	8.1	1.2	Plana
	828			9.0			
S-812	829	295004.4	6126525.7	1.0	1.2	1.2	Tipo 3
	830			1.4			

SECTOR 9

		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f	fo	Factor de Amplitud	Tipología a Curva
S-901	901	296641.4	6126452.8	0.60	1.6	1.37	Tipo 2
	902			2.70			
	903			1.40			
S-902	904	296403.5	6126535.9	0.80	1.5	1.20	Tipo 2
	905			2.90			
	906			0.80			
S-903	907	296449.3	6126265.6	0.90	1.4	1.5	Tipo 1
	908			1.80			
S-904	909	296870.1	6126189.8	3.70	2.3	1.2	Tipo 2
	910			0.80			
S-905	911	296752.6	6125668.5	9.00	8.1	1.15	Plana
	912			7.10			
S-906	913	296150.2	6125787.9	7.60	7.4	1.1	Plana
	914			7.10			

S-907	915	296187.5	6125417.4	2.00	4.0	1.7	Tipo 2
	916			6.00			
S-908	917	297335.2	6126511.2	11.90	10.0	1.1	Tipo 2
	918			8.00			
S-909	919	297271.6	6126119.0	6.60	8.9	1.37	Tipo 2
	920			9.30			
	921			10.90			
S-910	922	296436.0	6125756.0	11.30	11.2	1.30	Tipo 2
	923			10.90			
	924			11.30			
S-911	925	297192.8	6126823.3	11.50	9.5	1.40	Tipo 2
	926			8.30			
	927			8.80			

SECTOR 10

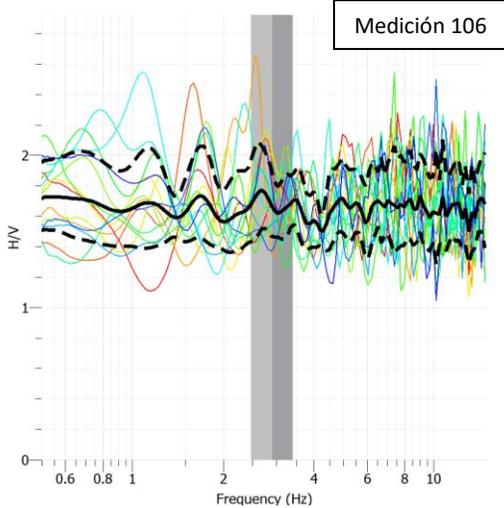
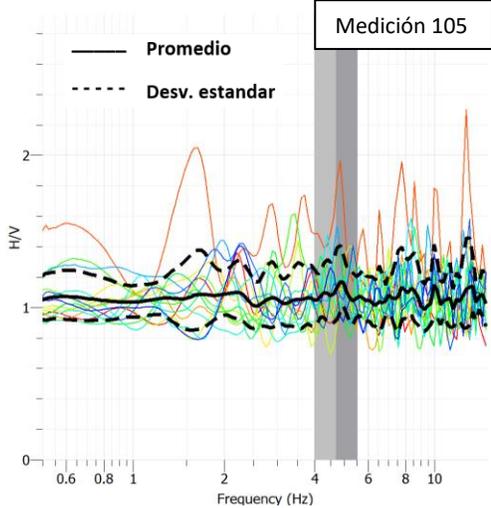
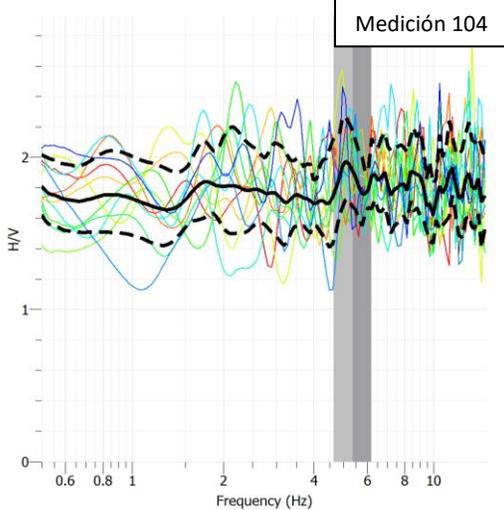
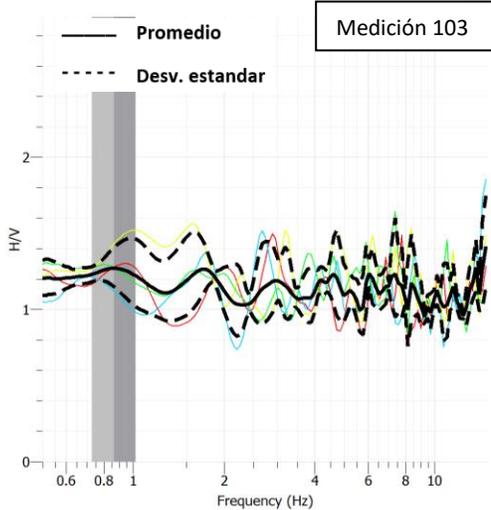
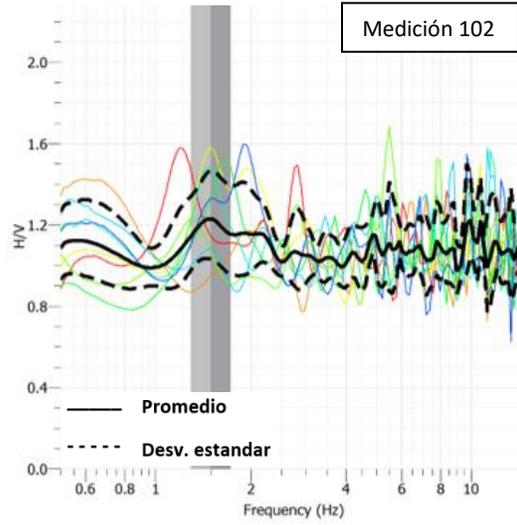
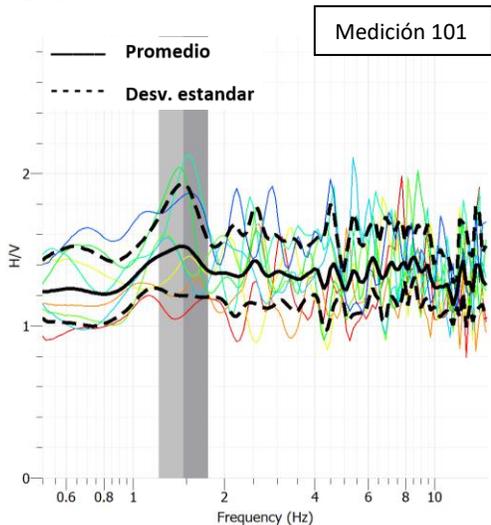
		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f (Hz)	f _o (Hz)	Factor de Amplitud	Tipología Curva
S-1001	1001	294769.0	6124947.0	12.4	13.4	1.5	Tipo 1
	1002			15.7			
	1003			12.0			
S-1002	1004	294239.9	6125111.8	5.0	7.4	1.7	Tipo 2
	1005			8.3			
	1006			9.0			
S-1003	1007	294777.5	6125236.4	16.6	14.2	1.8	Tipo 2
	1008			11.8			
S-1004	1009	294123.3	6125534.6	16.2	13.0	1.7	Tipo 2
	1010			9.8			
S-1005	1011	294546.6	6125989.5	17.4	14.6	1.7	Tipo 2
	1012			11.8			
S-1006	1013	294767.3	6125645.3	10.8	10.4	1.5	Tipo 2
	1014			9.9			

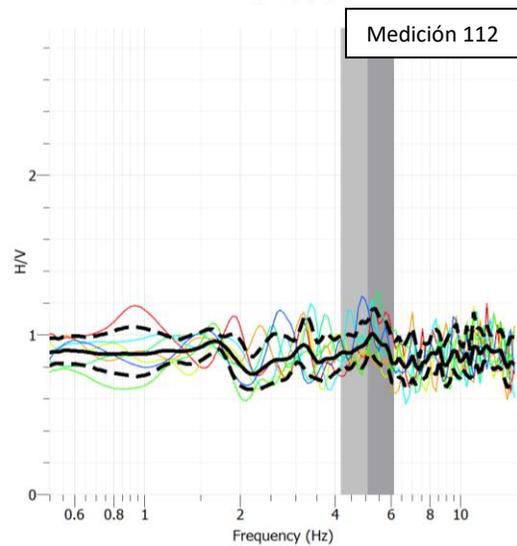
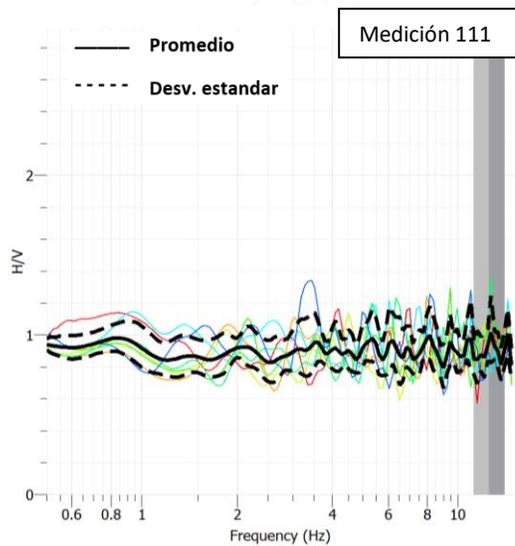
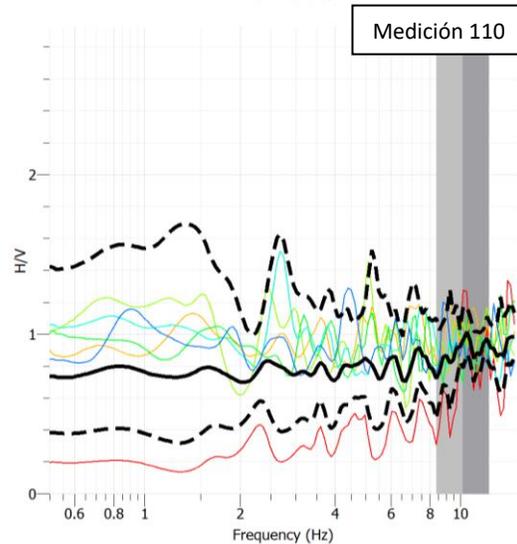
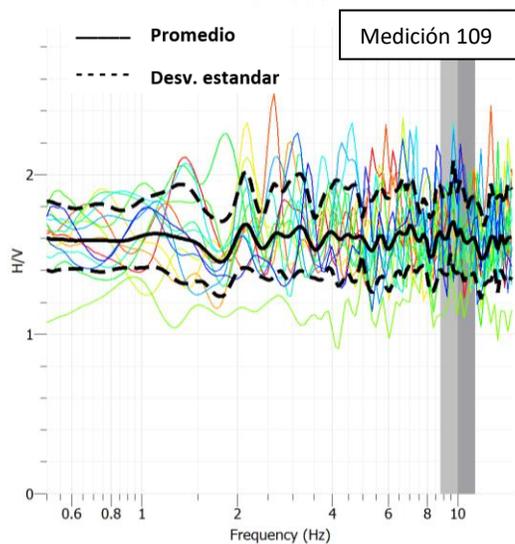
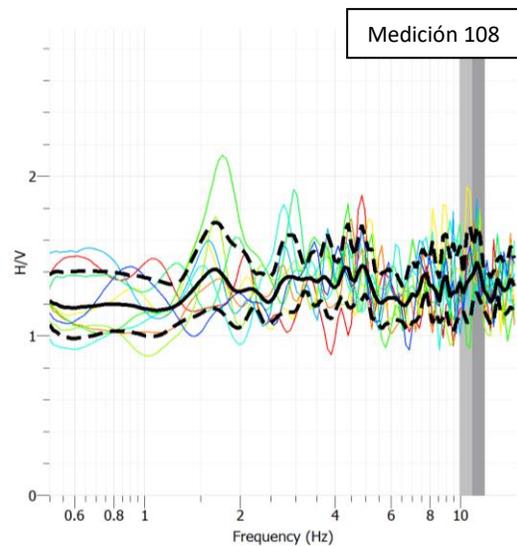
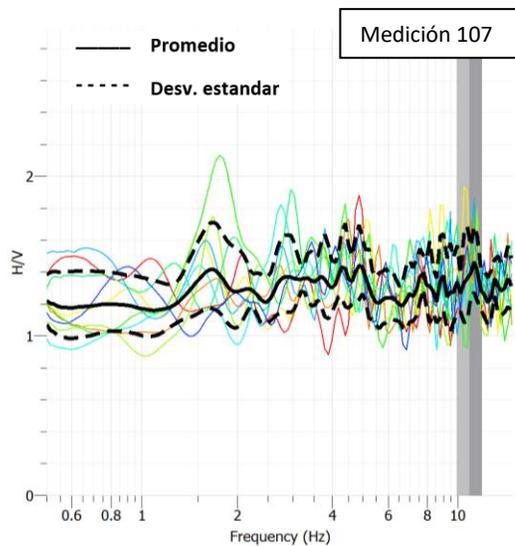
SECTOR 11

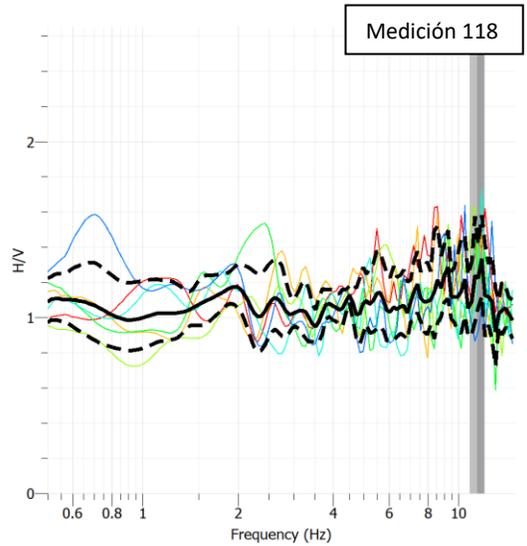
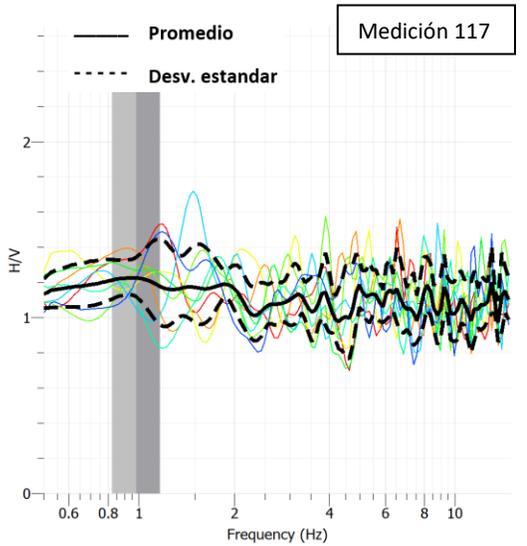
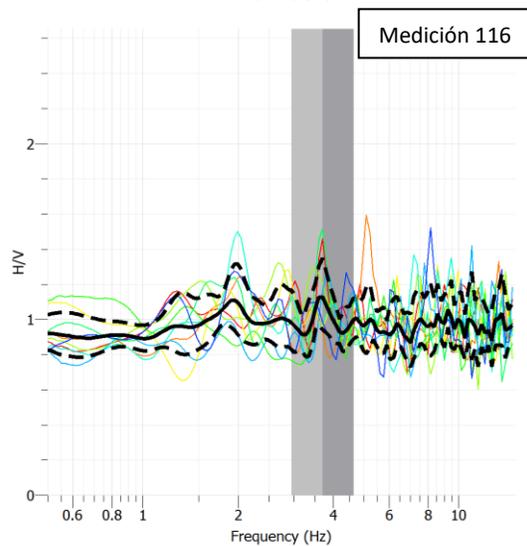
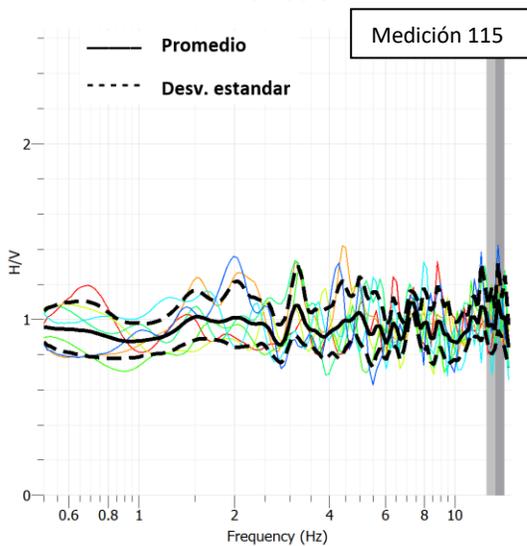
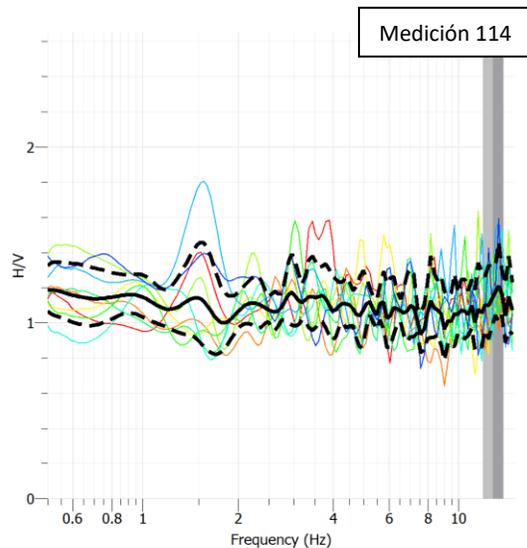
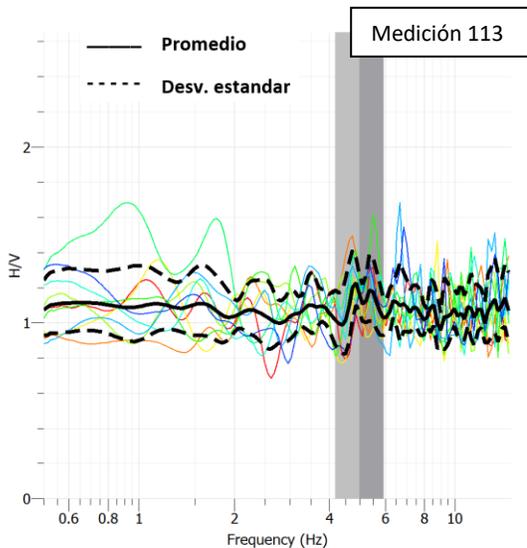
		Georreferenciación (UTM)					
Punto	Medición	m E	m S	f (Hz)	f _o (Hz)	Factor de Amplitud	Tipología Curva
S-1101	1101	295164.7	6125015.3	10.9	11.2	1.2	Tipo 2
	1102			11.5			
S-1102	1103	295540.4	6124986.6	5.2	5.3	1.1	Tipo 2
	1104			5.3			
S-1103	1105	295558.1	6125243.0	5.6	4.9	1.1	Tipo 2
	1106			4.2			
S-1104	1107	295997.8	6125184.6	8.9	6.3	1.2	Tipo 1
	1108			3.6			
S-1105	1109	295009.0	6125301.4	8.8	7.8	1.9	Tipo 1
	1110			8.5			
	1111			6			
S-1106	1112	295290.6	6125495.0	8.7	8.2	1.7	Tipo 2
	1113			7.7			
S-1107	1114	295765.4	6125568.1	10.7	10.2	1.7	Tipo 2
	1115			10.6			
	1116			9.4			
S-1108	1117	295352.8	6125788.4	9.9	10.1	1.0	Plana
	1118			10.3			
S-1109	1119	295996.2	6125717.0	15.8	16.5	1.4	Tipo 2
	1120			17.2			

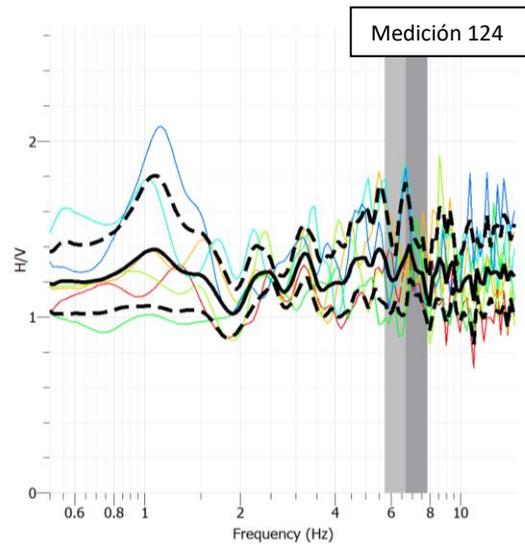
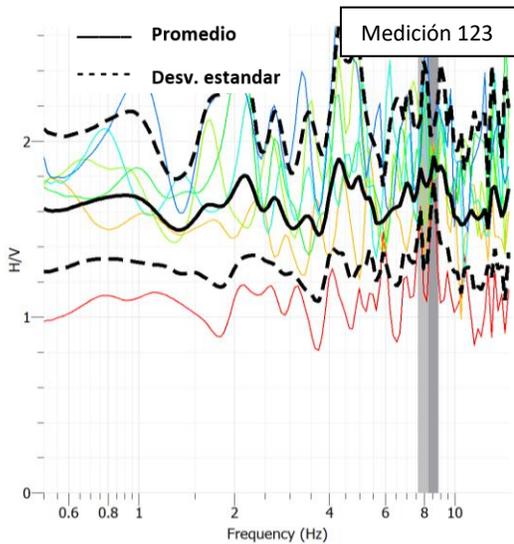
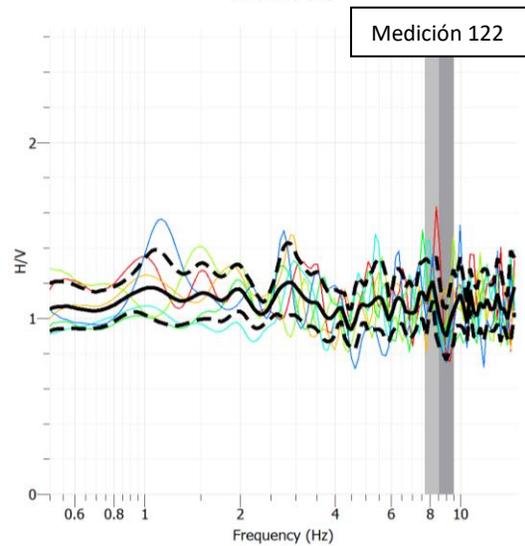
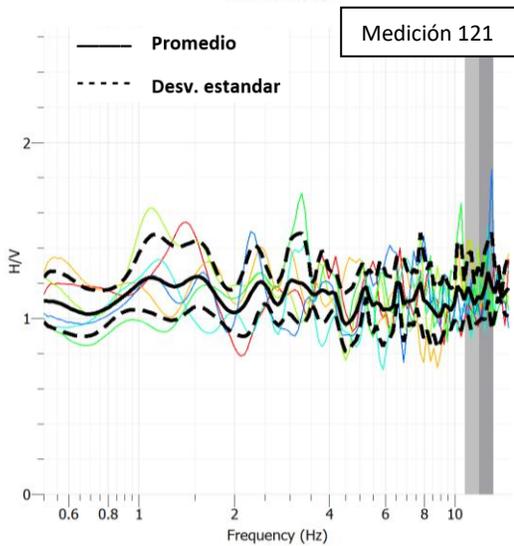
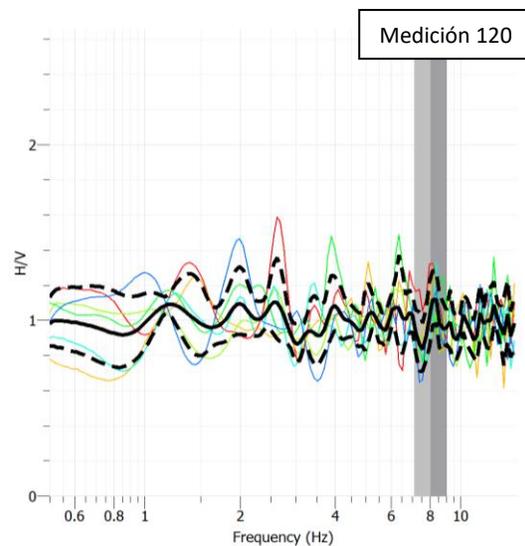
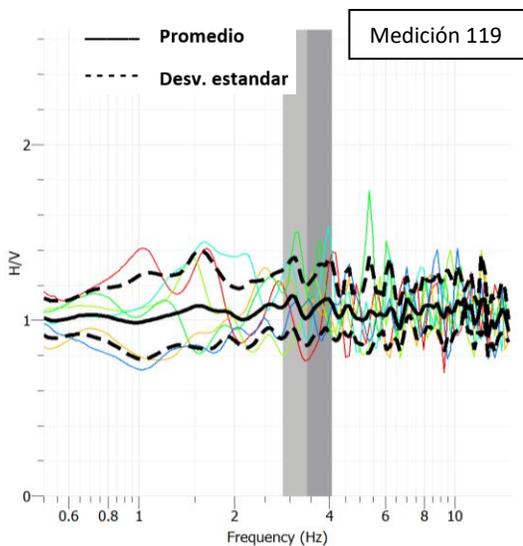
ANEXO 2: Graficas razón espectral H/V

SECTOR 1

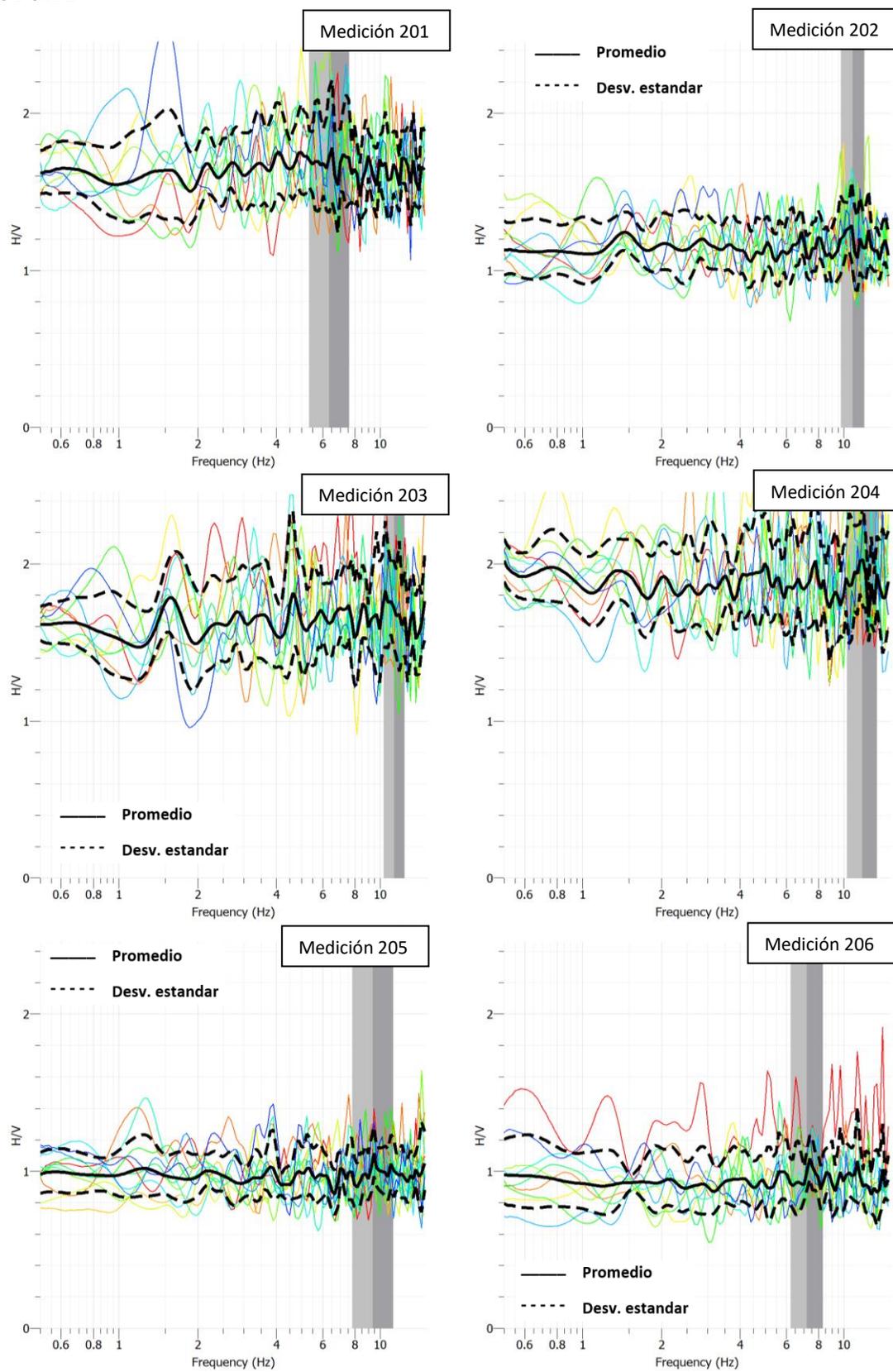


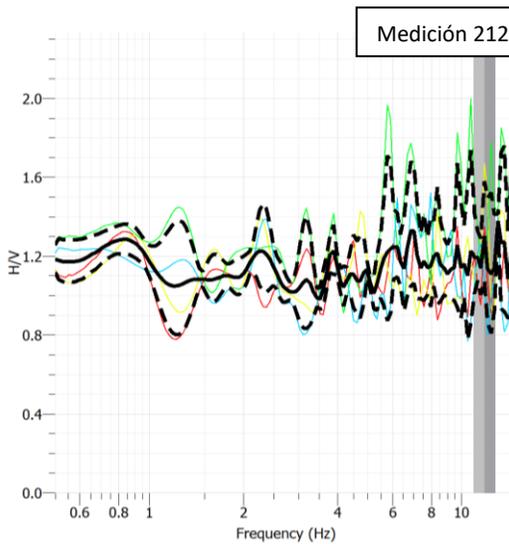
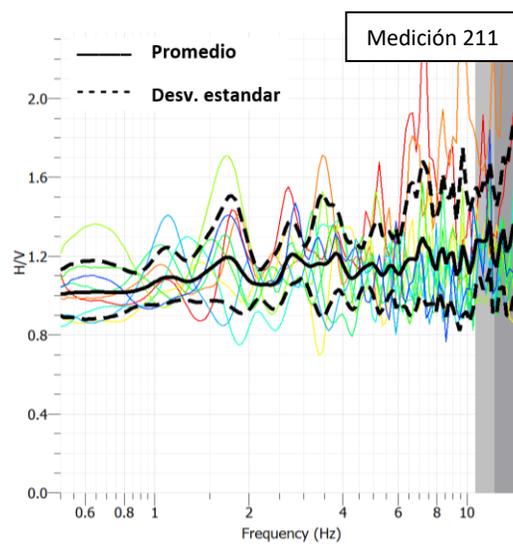
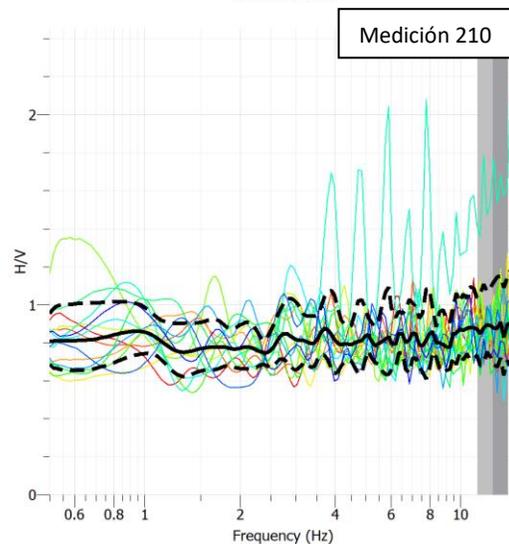
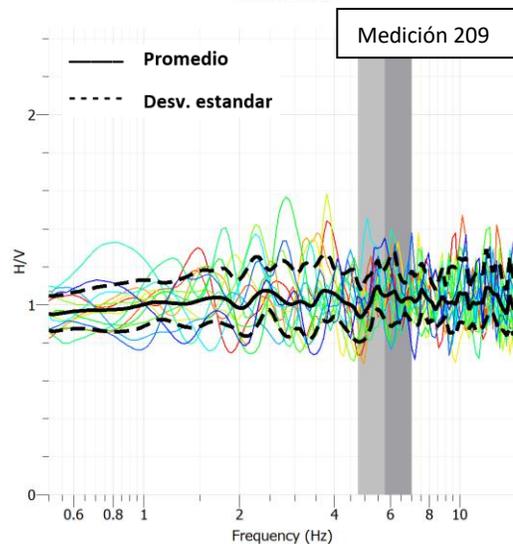
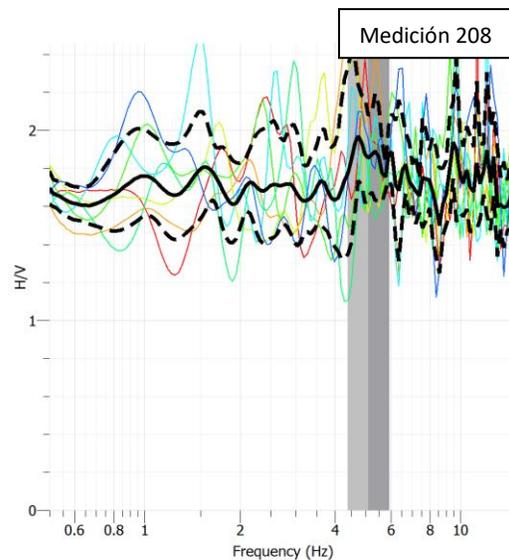
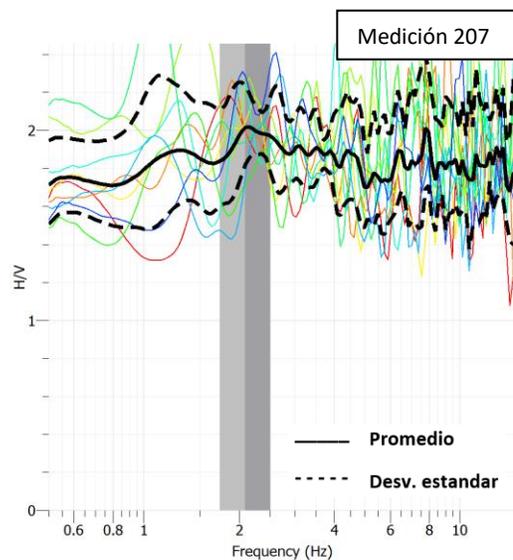


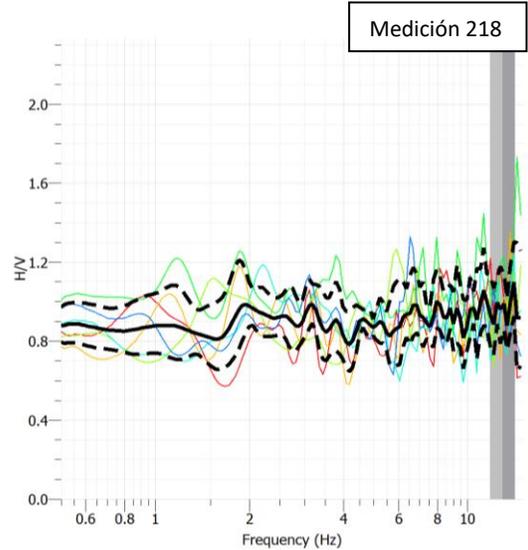
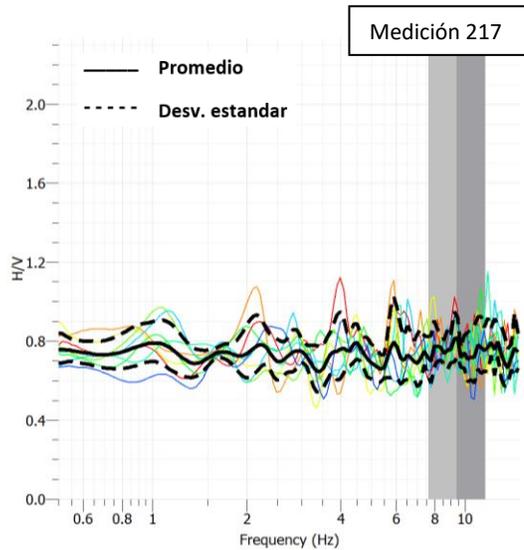
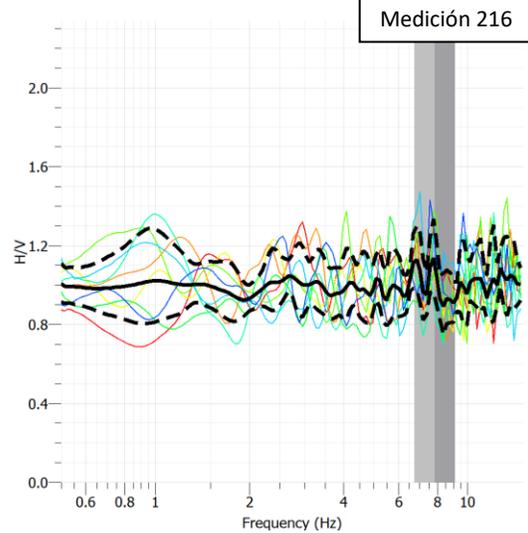
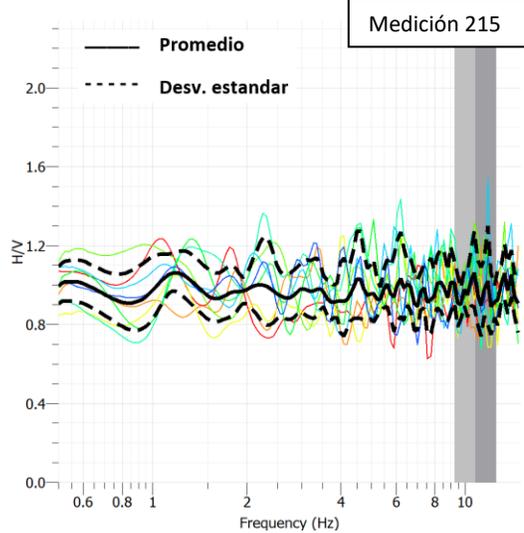
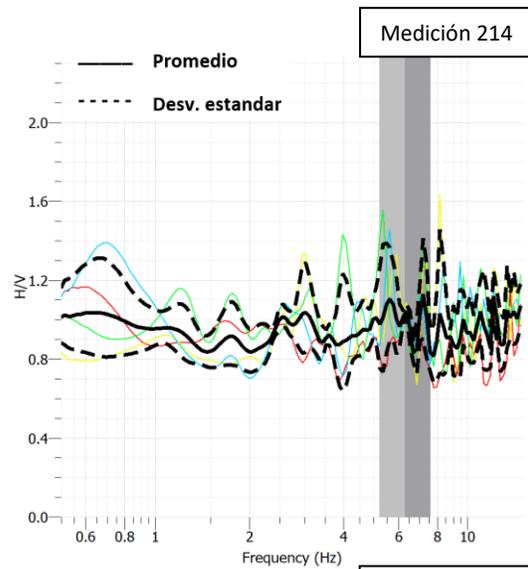
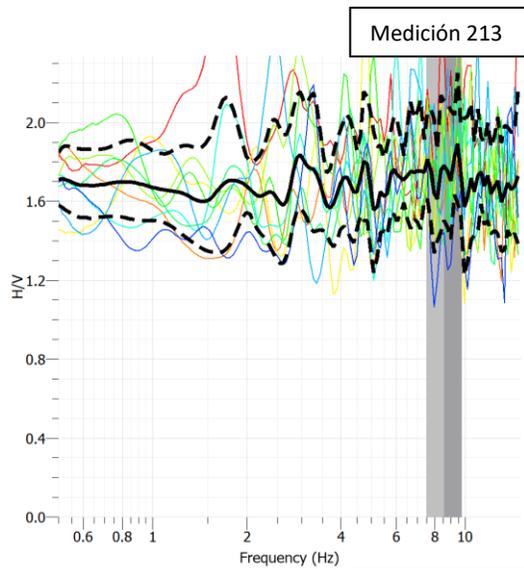


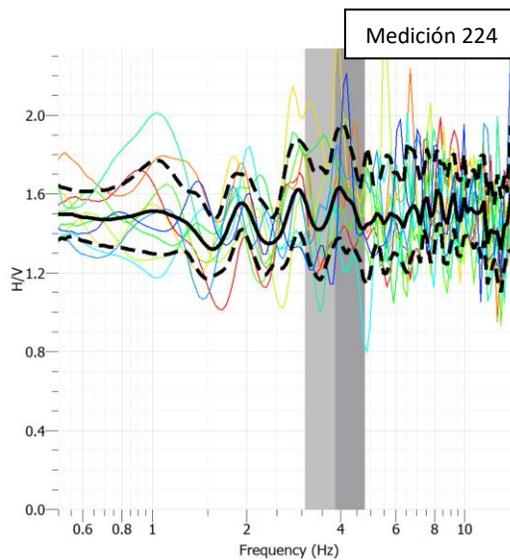
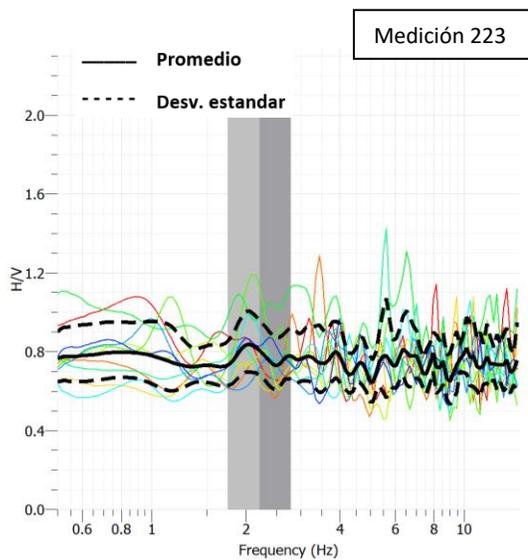
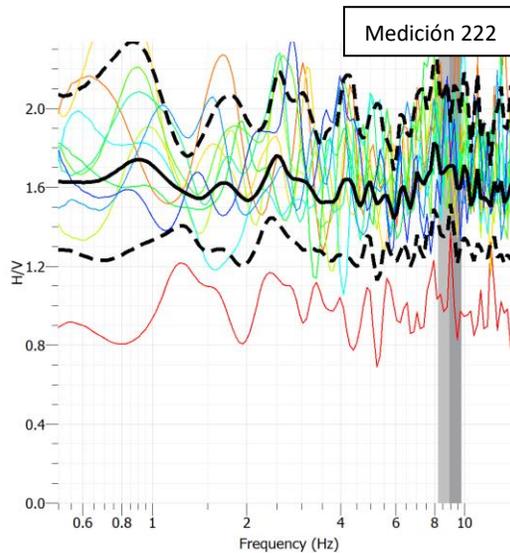
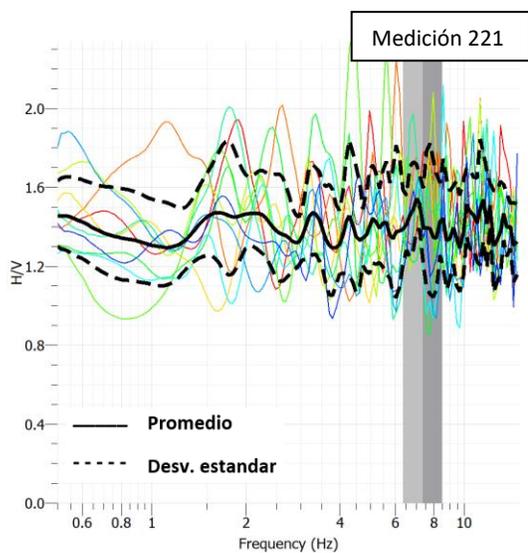
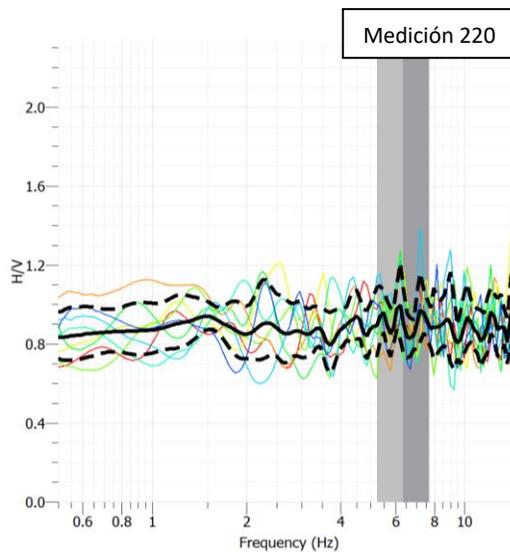
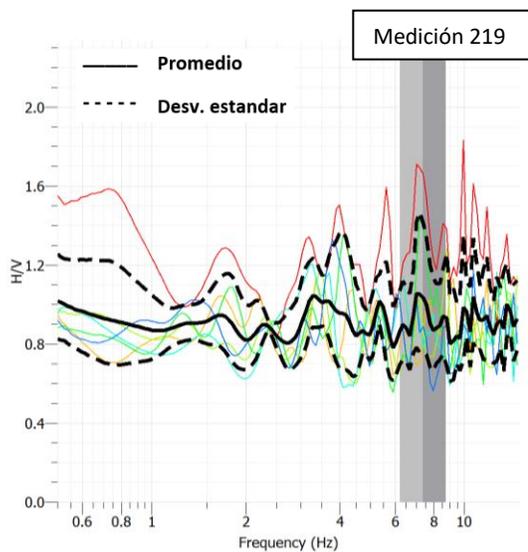


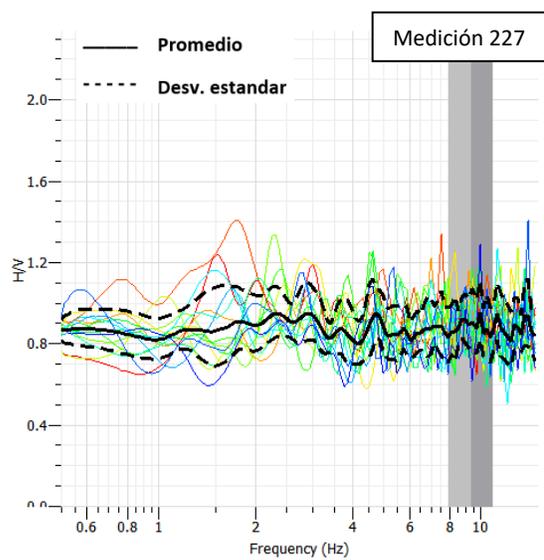
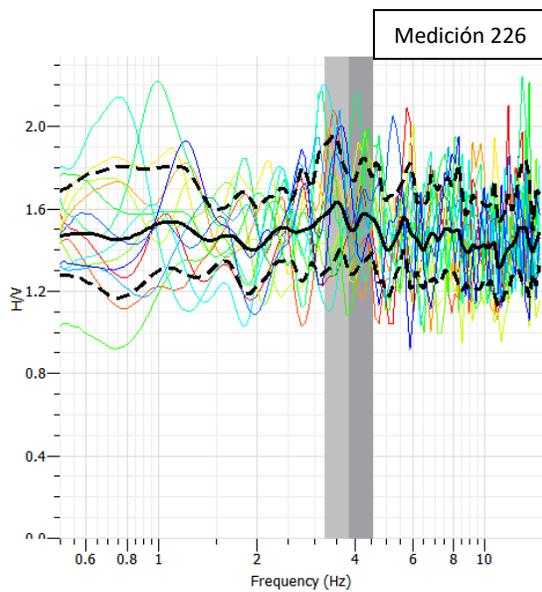
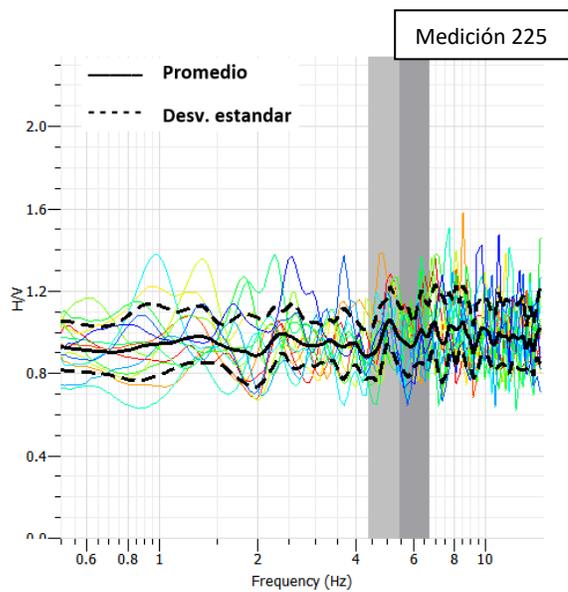
SECTOR 2



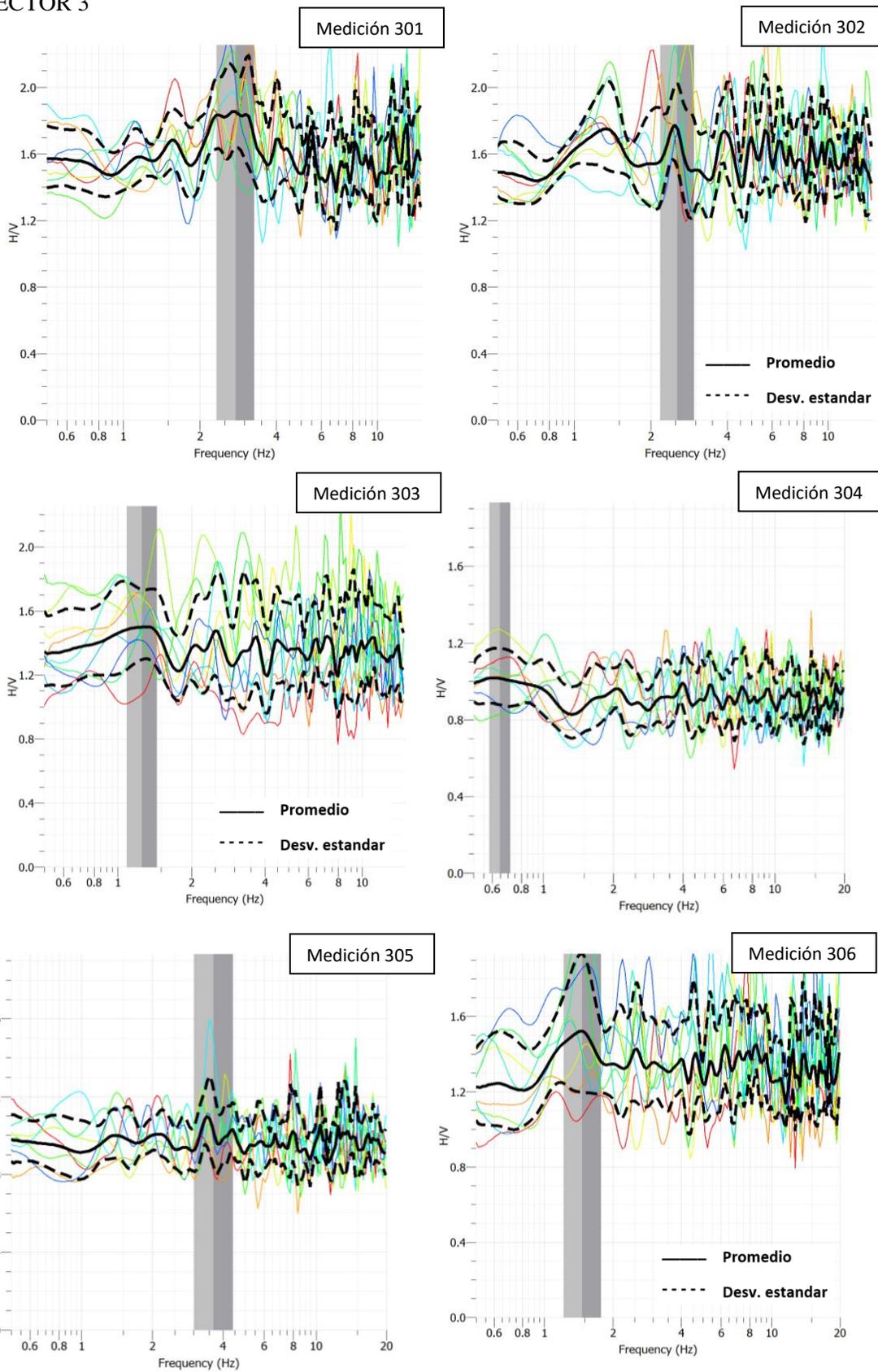


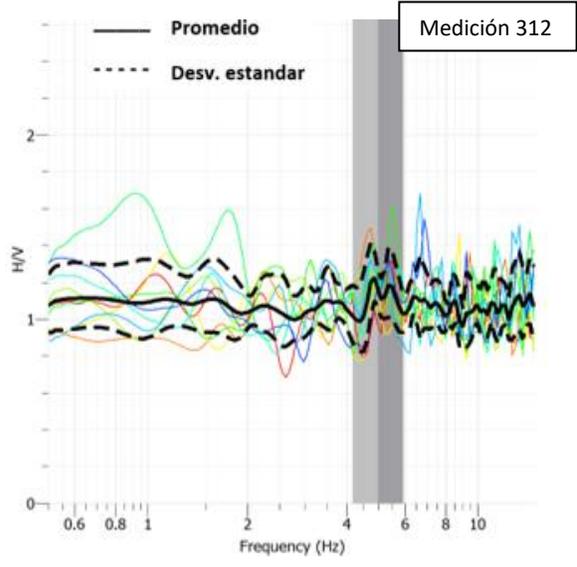
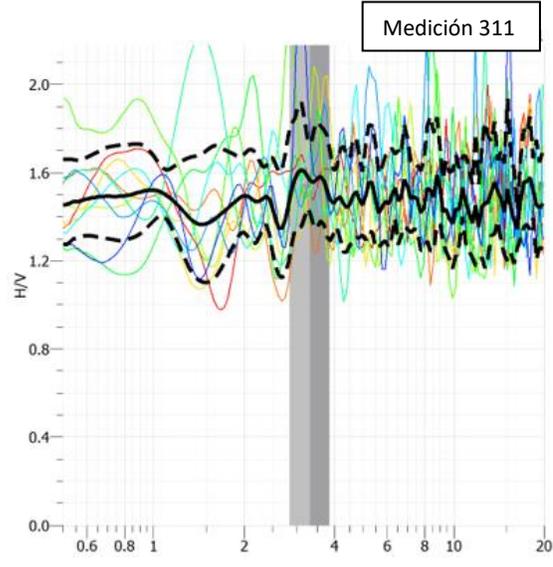
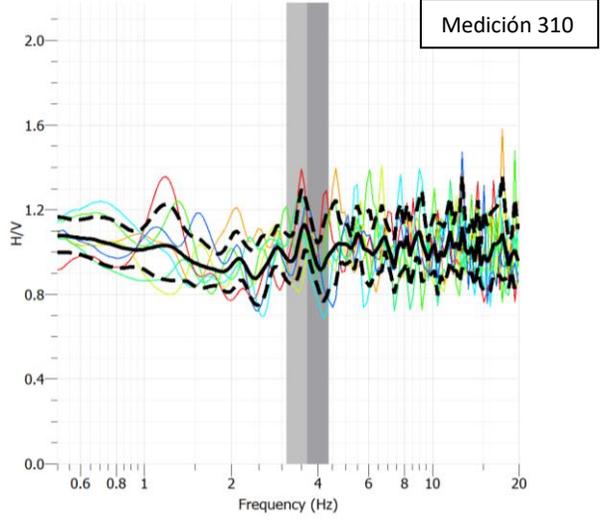
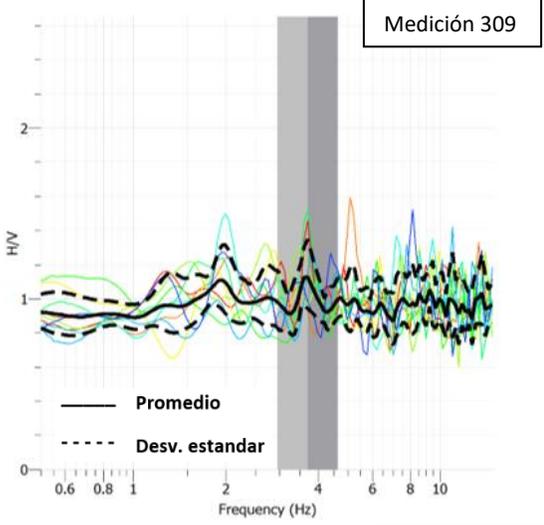
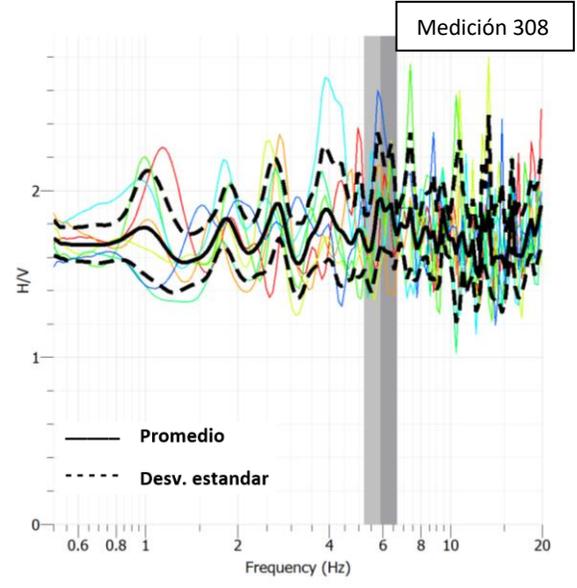
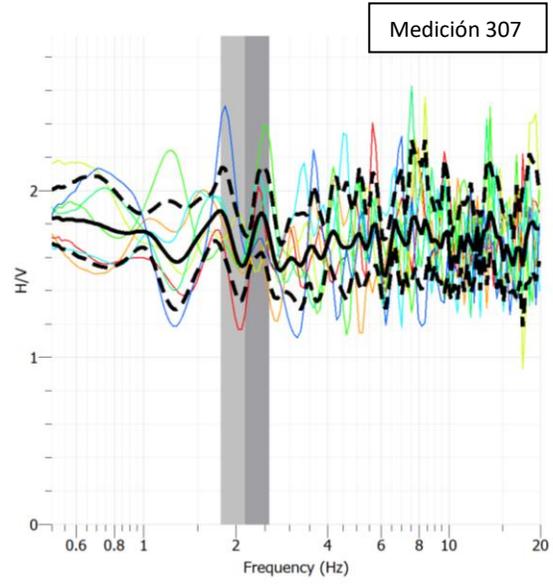


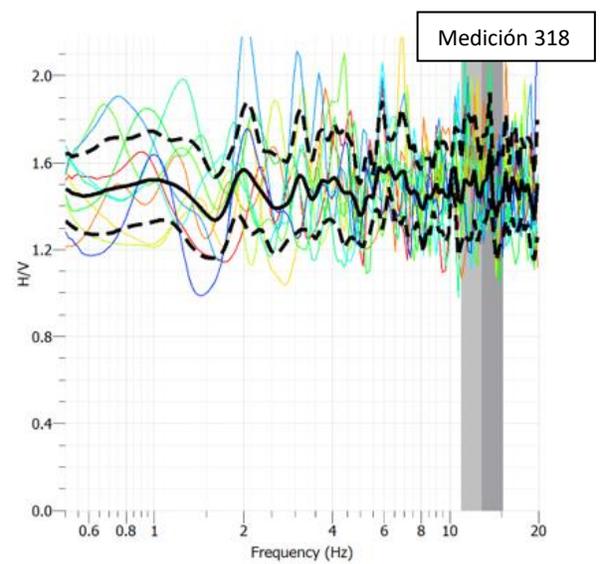
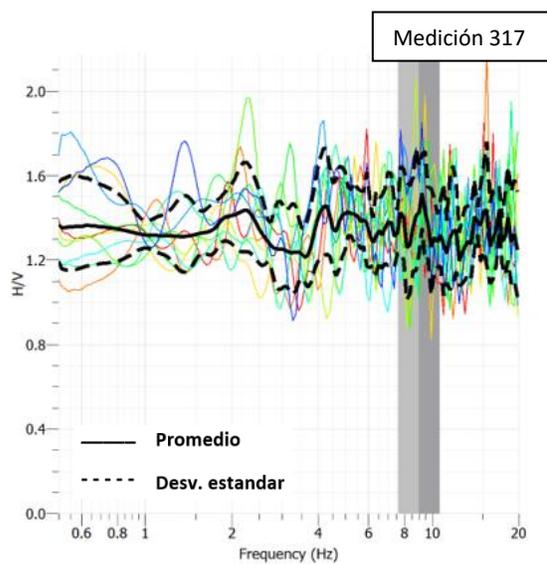
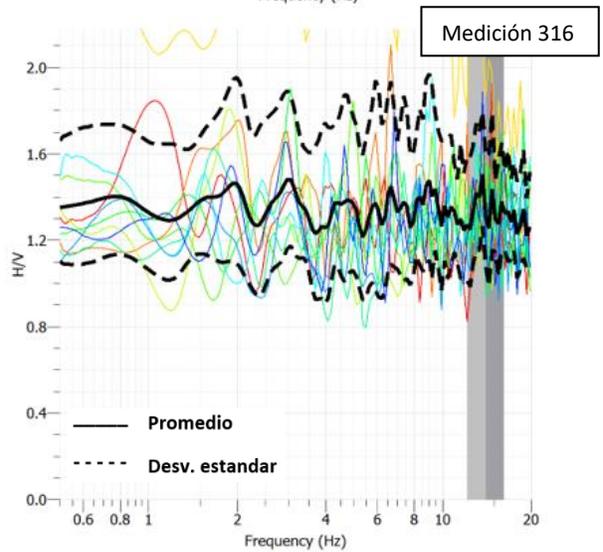
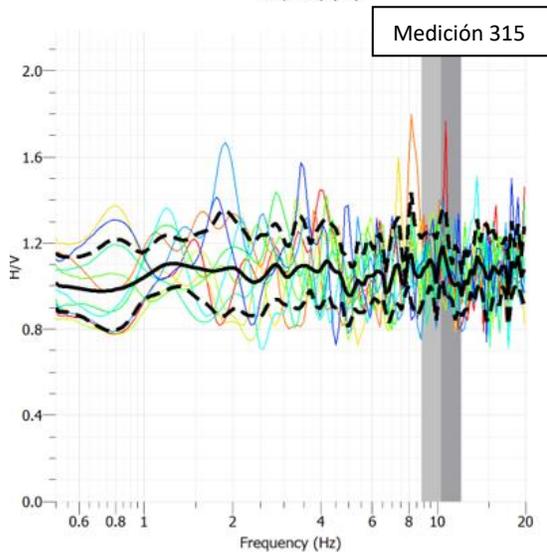
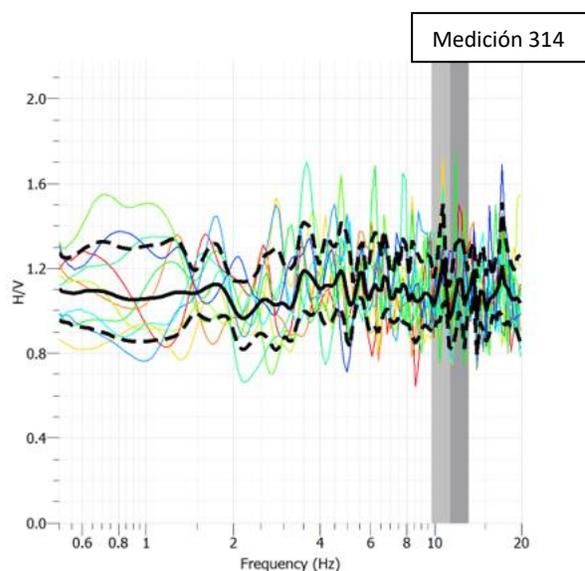
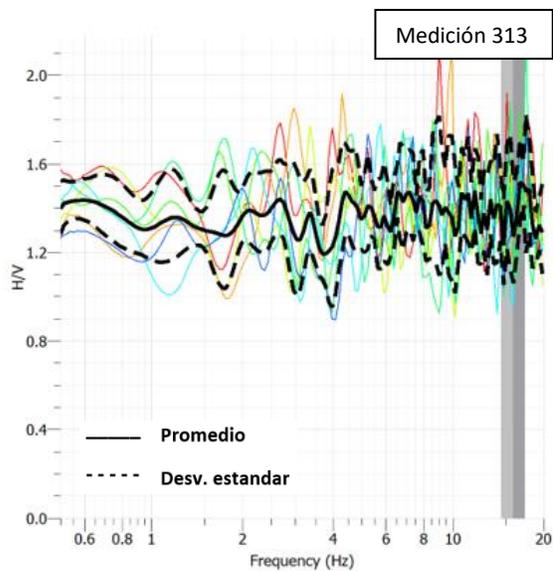


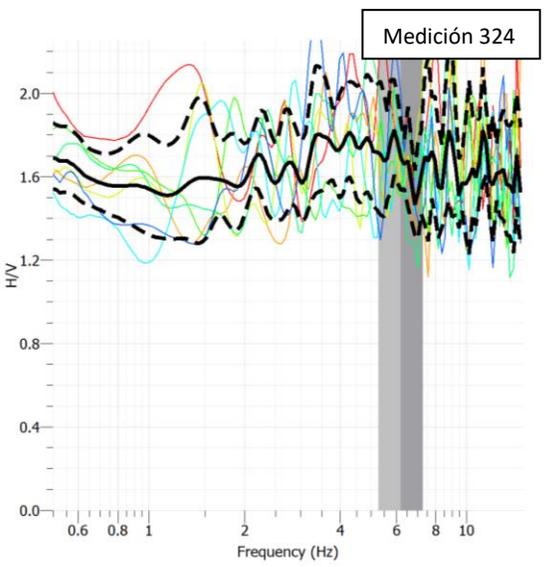
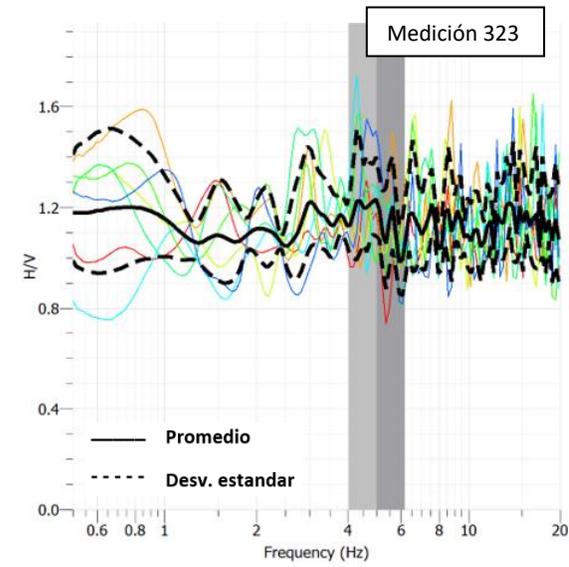
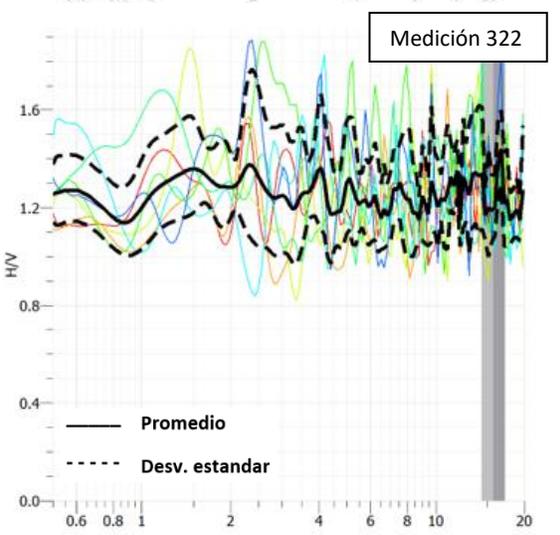
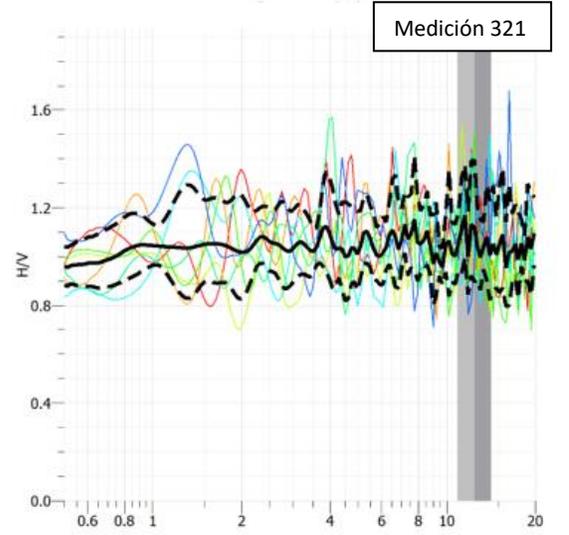
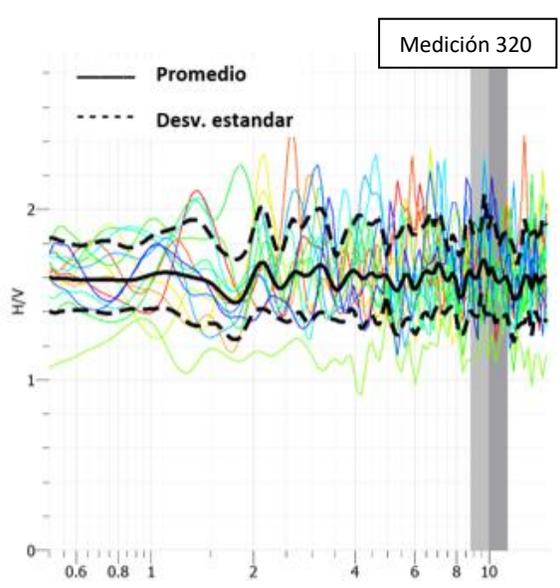
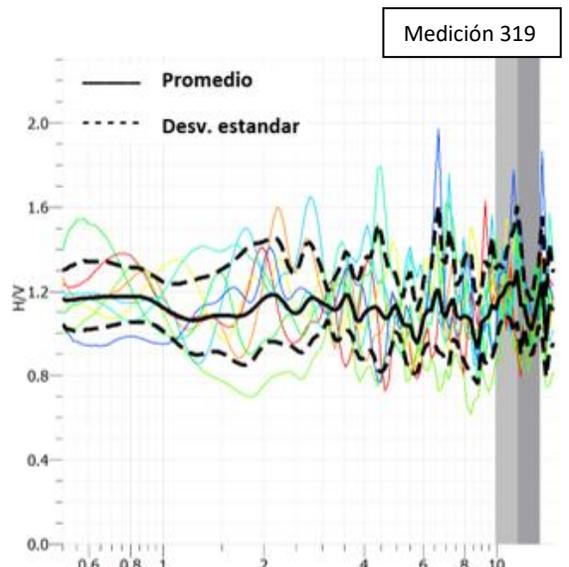


SECTOR 3

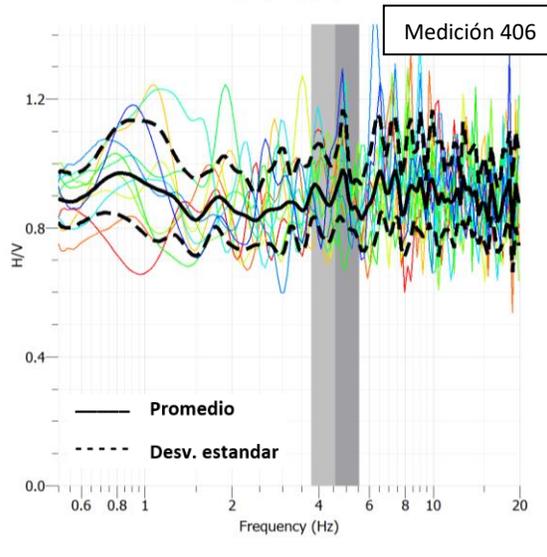
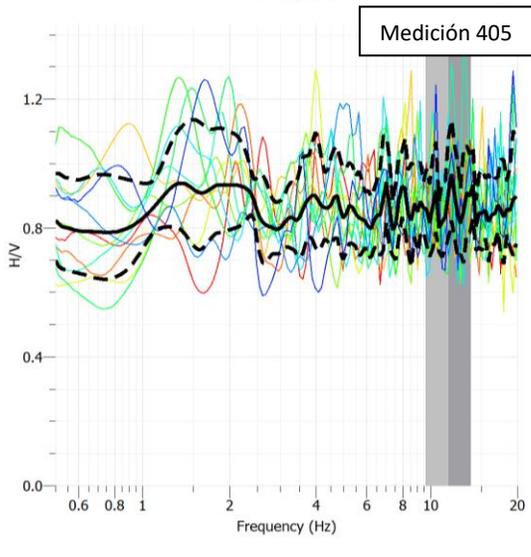
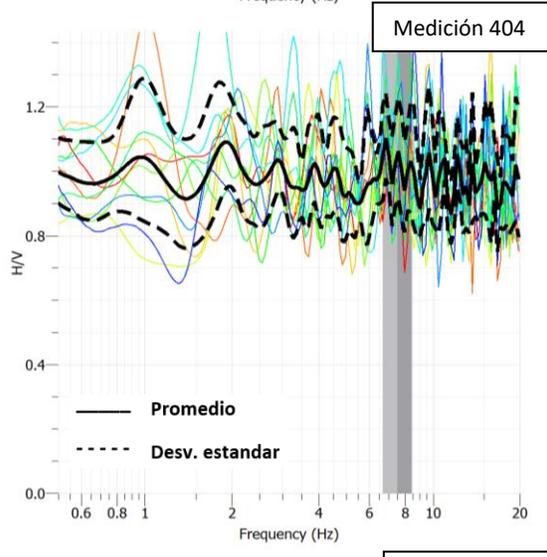
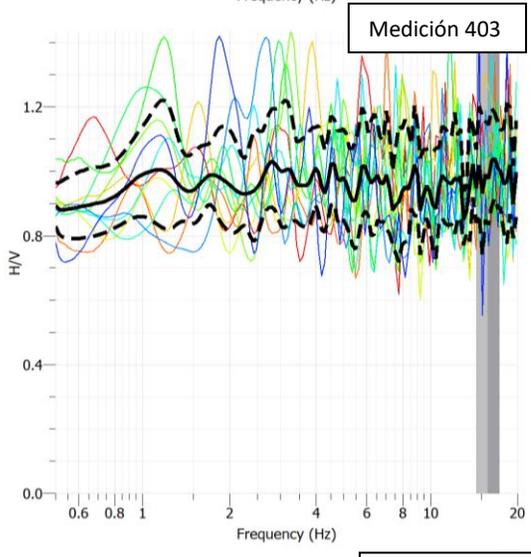
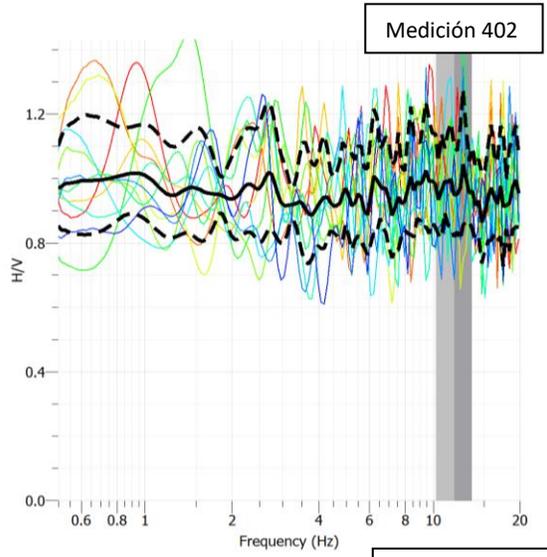
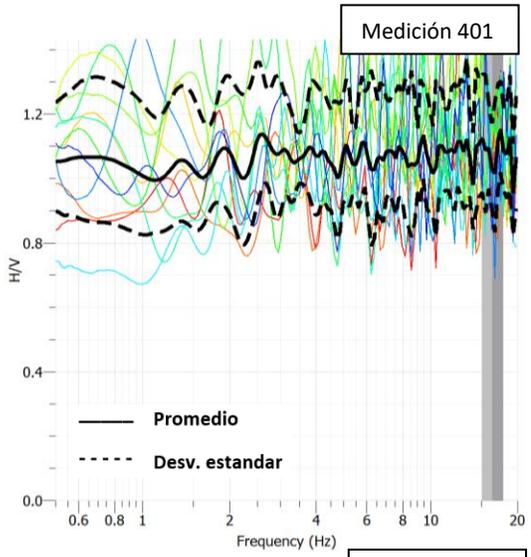


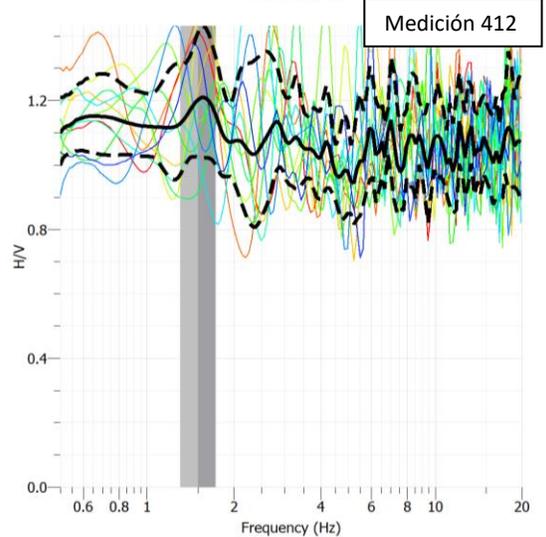
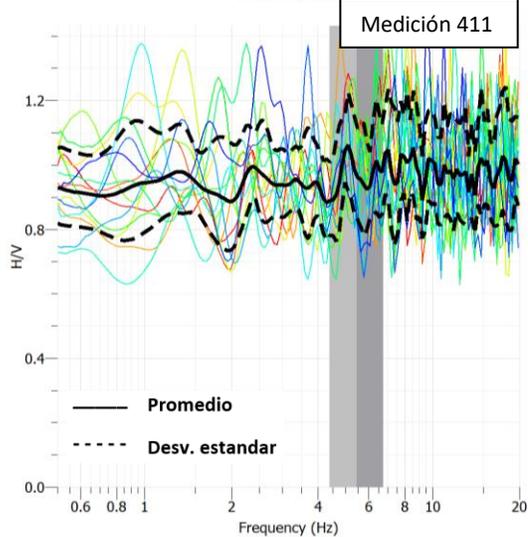
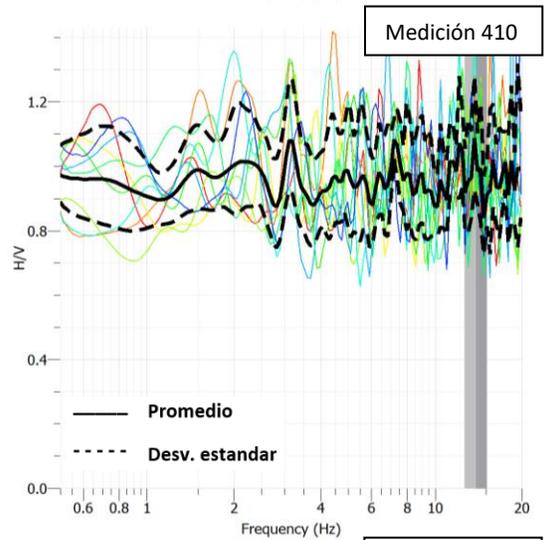
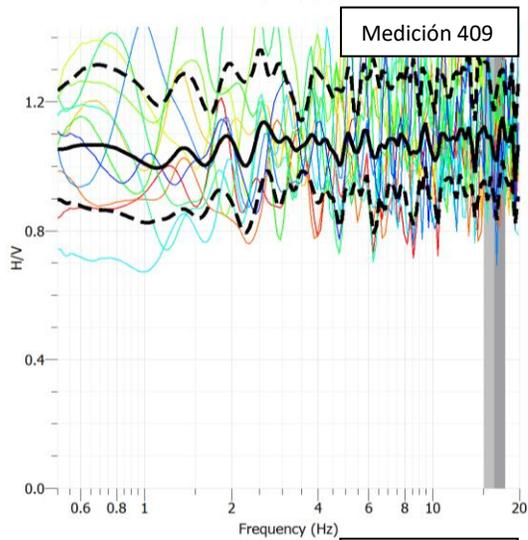
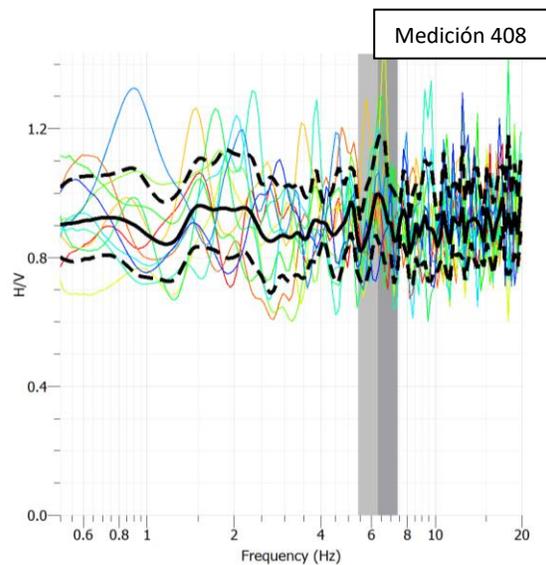
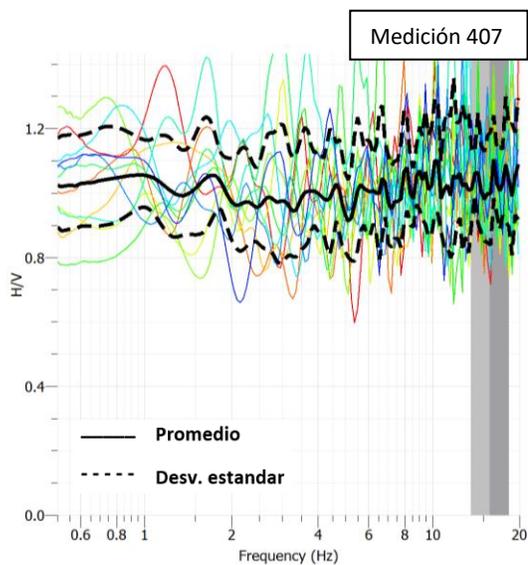


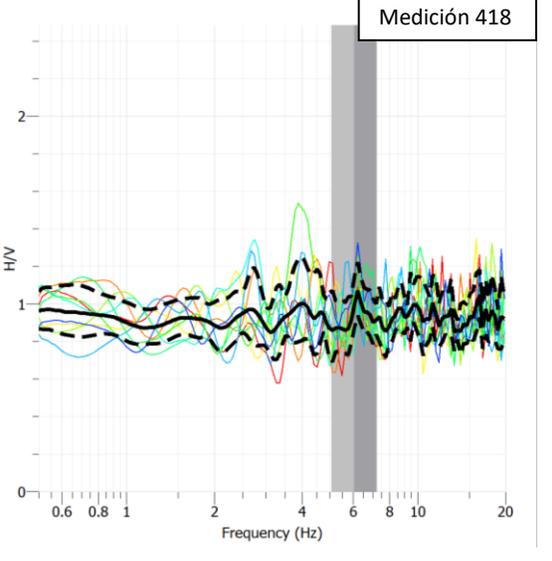
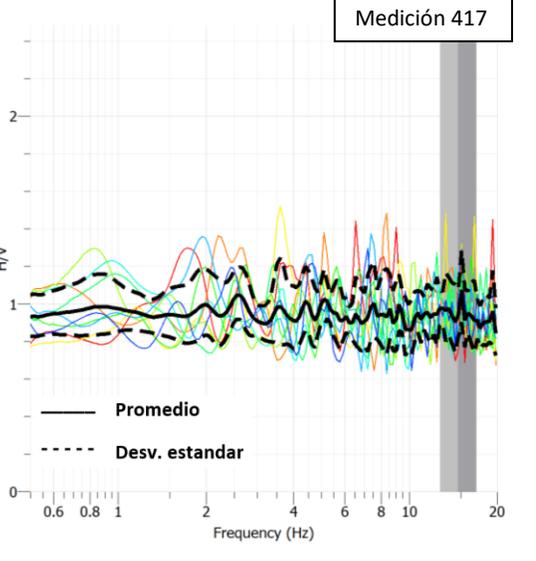
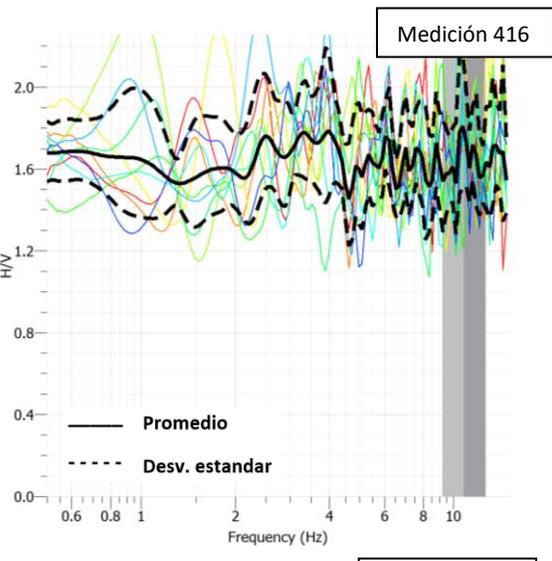
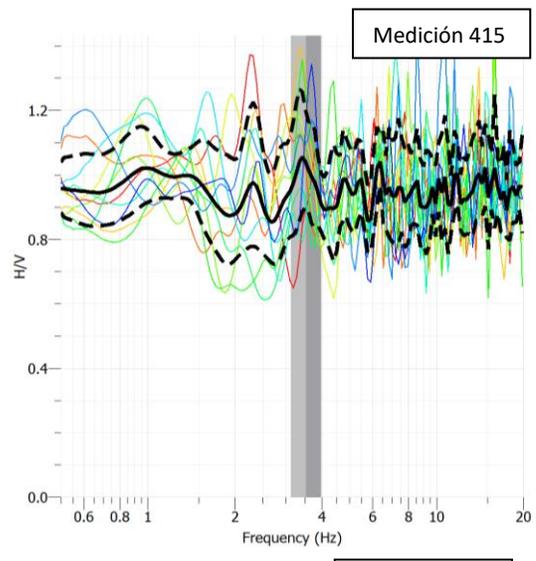
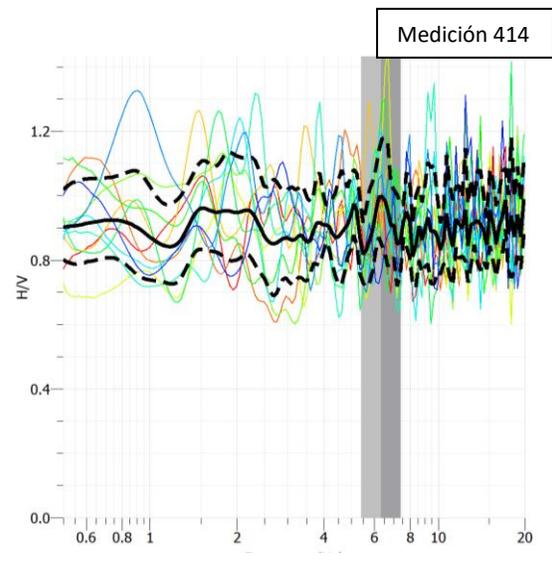
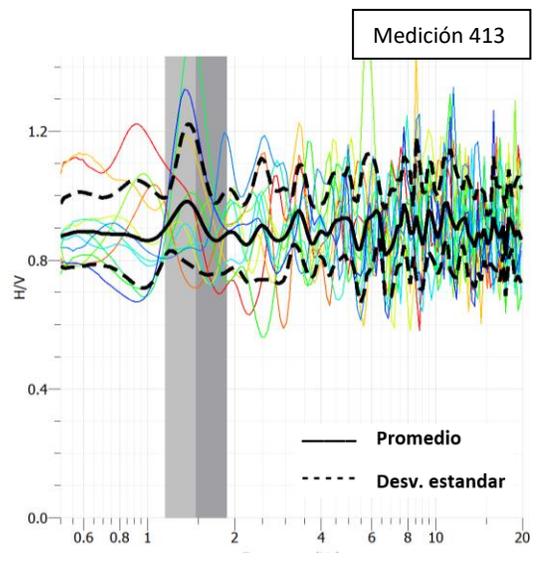


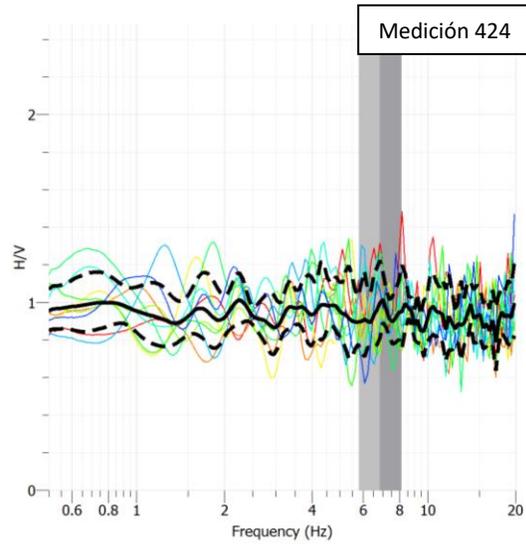
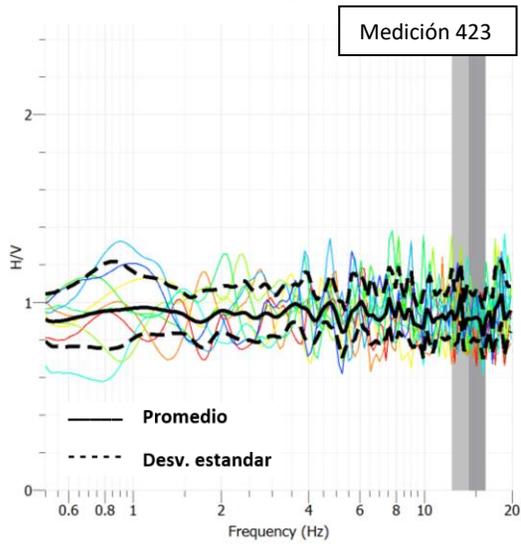
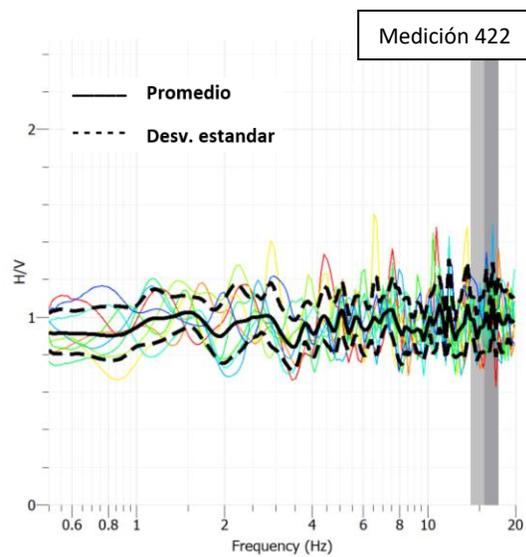
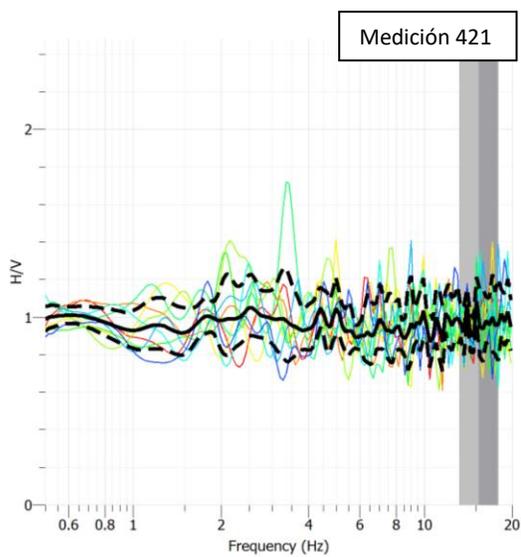
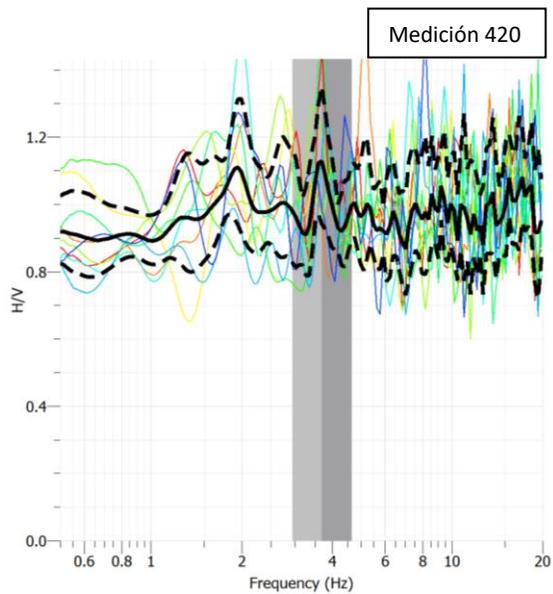
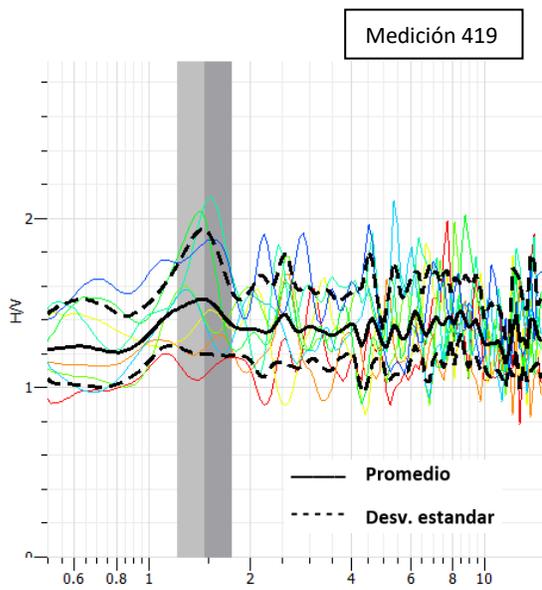


SECTOR 4

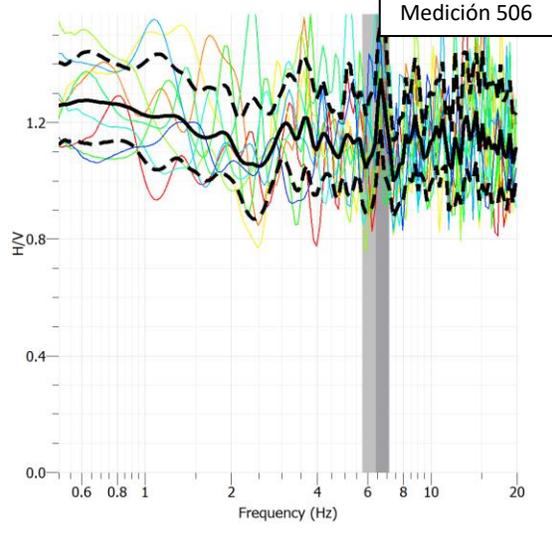
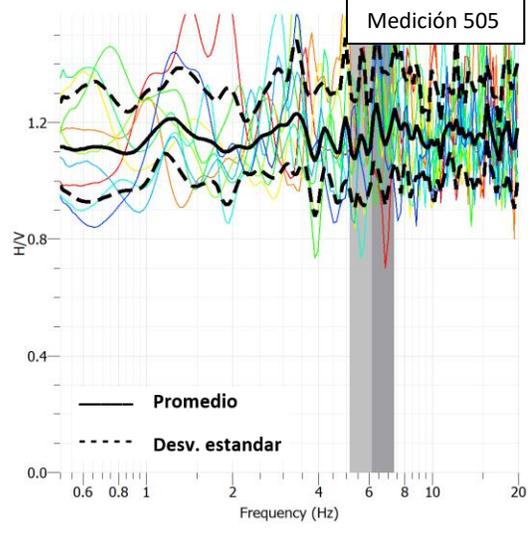
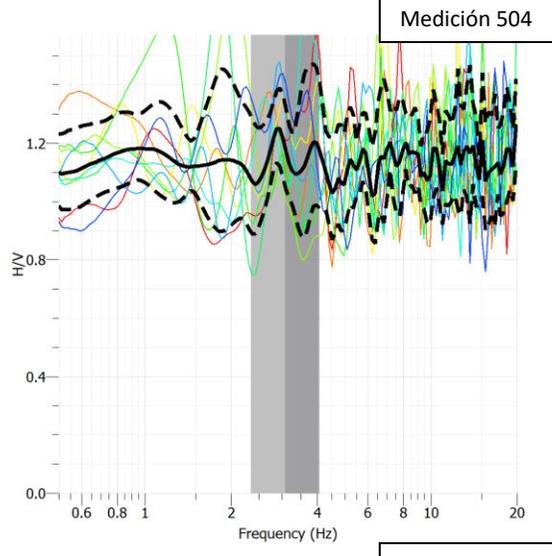
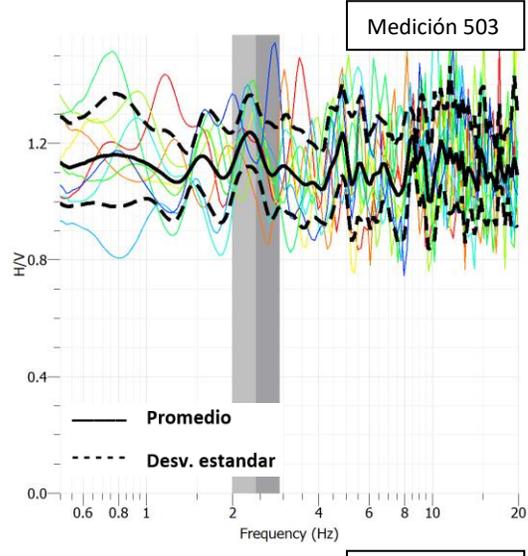
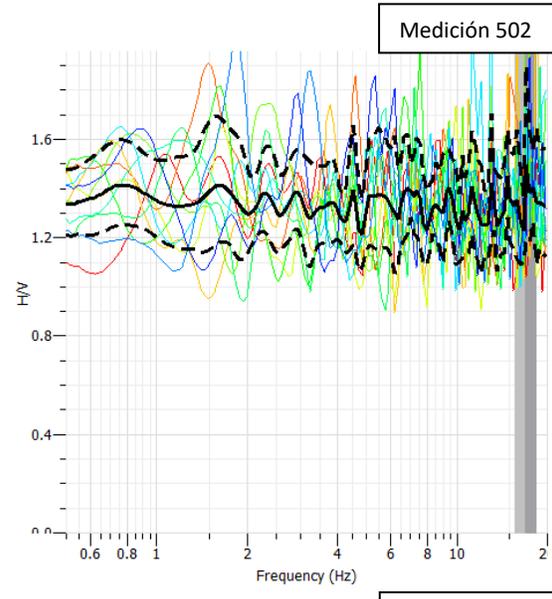
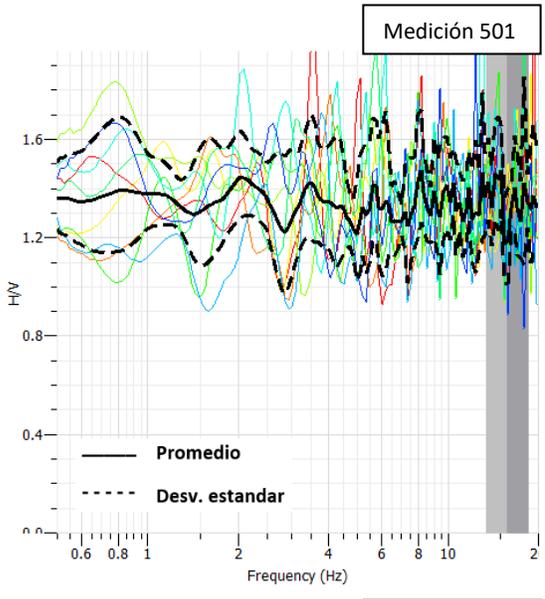


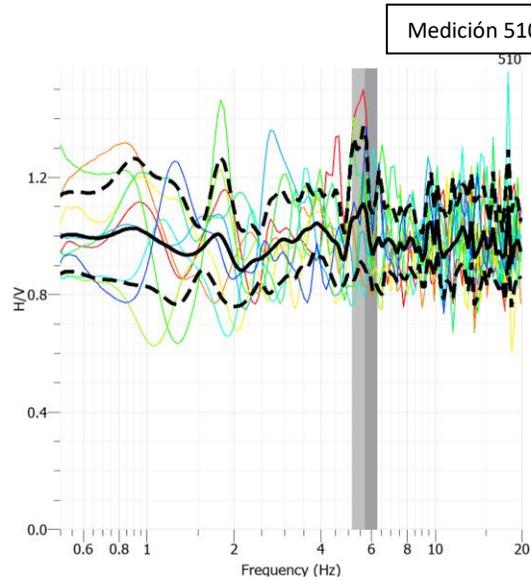
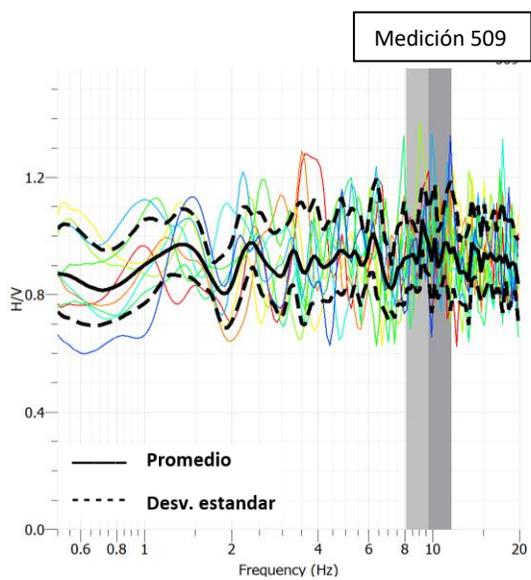
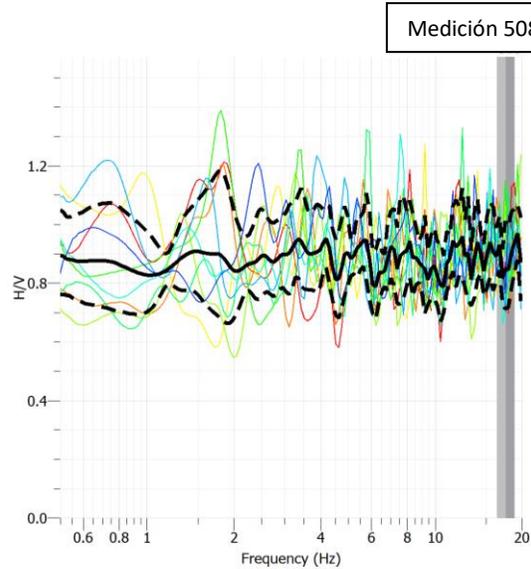
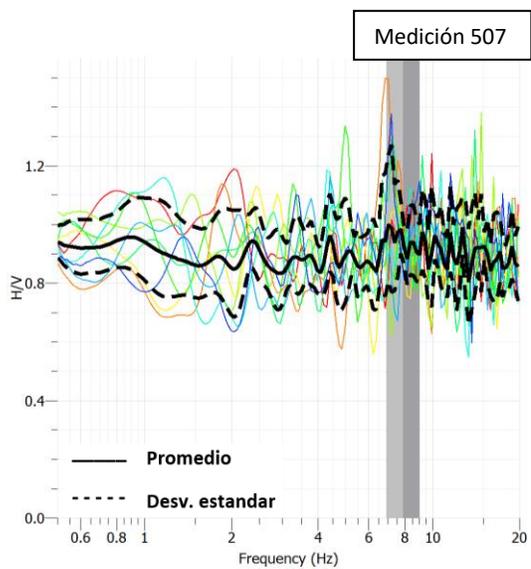


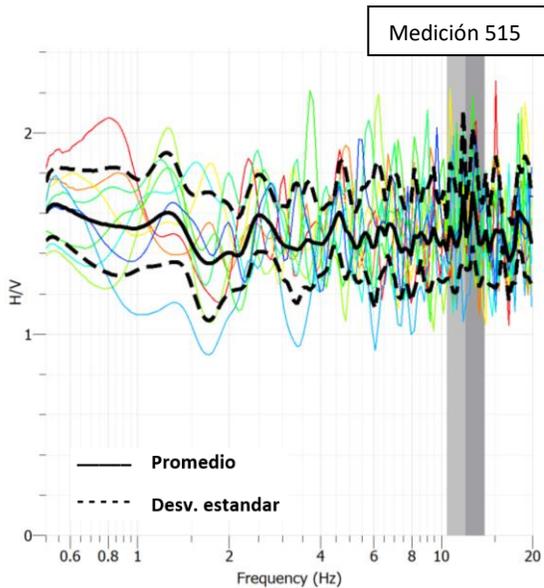
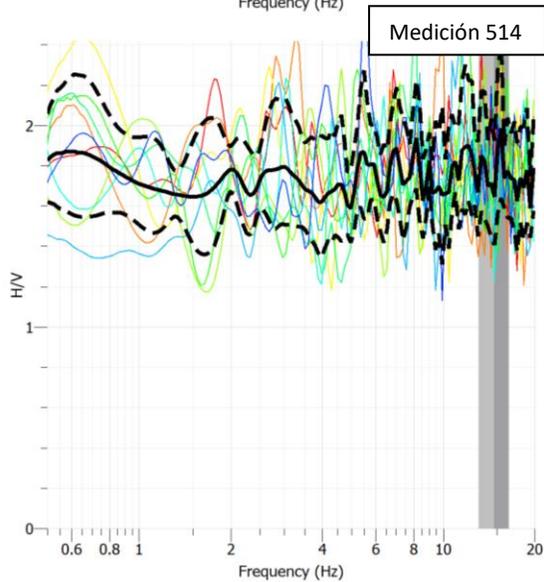
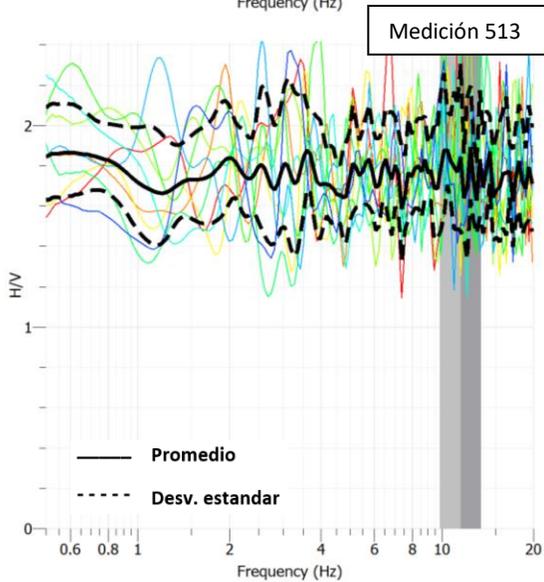
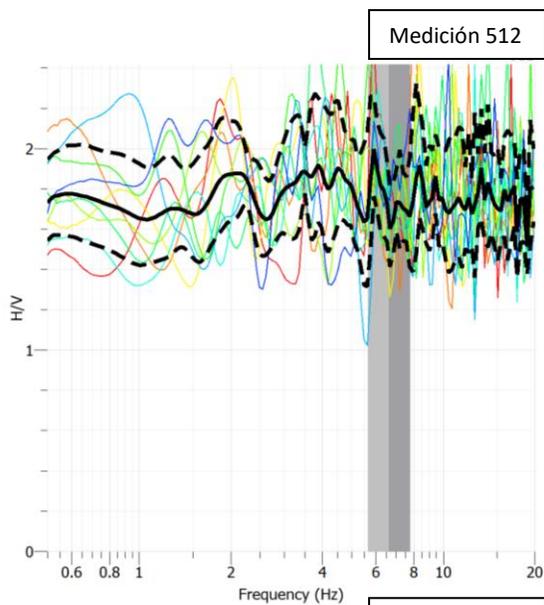
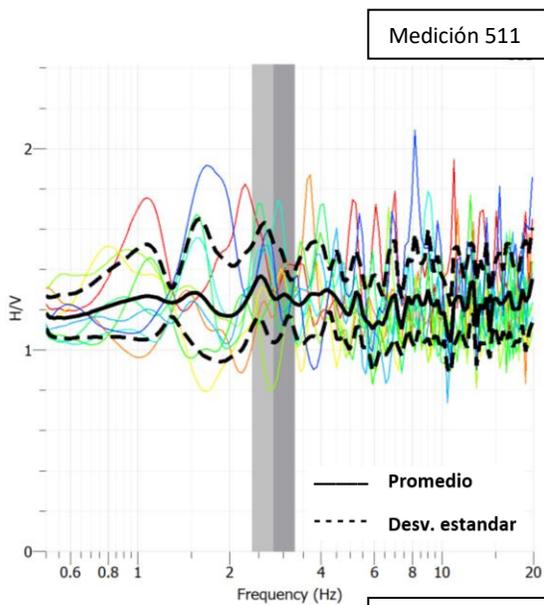




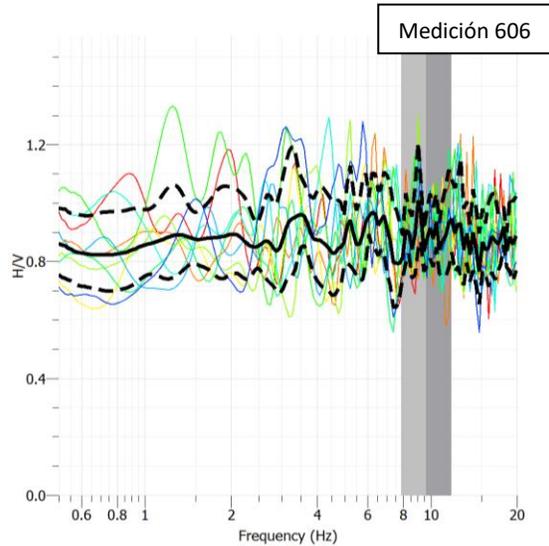
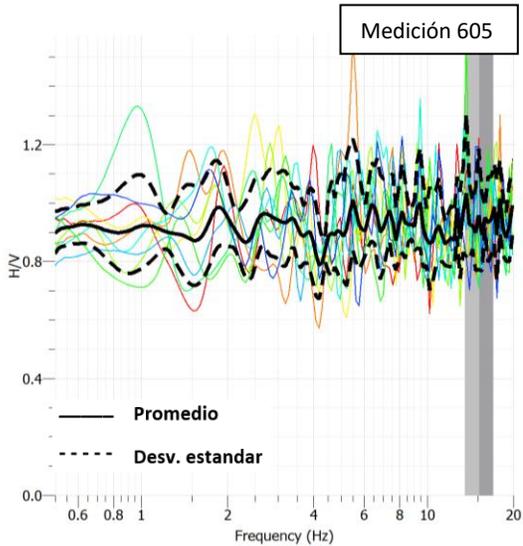
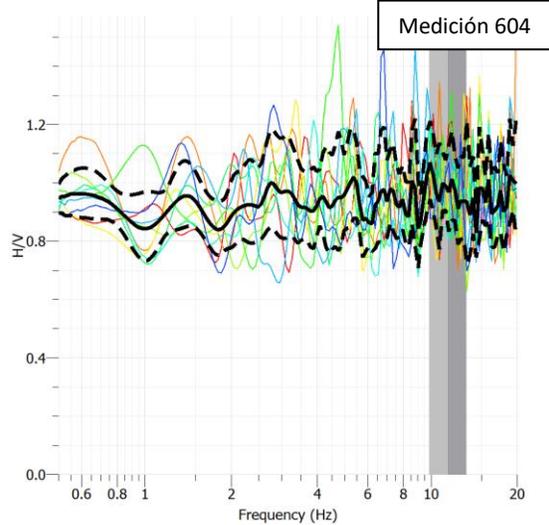
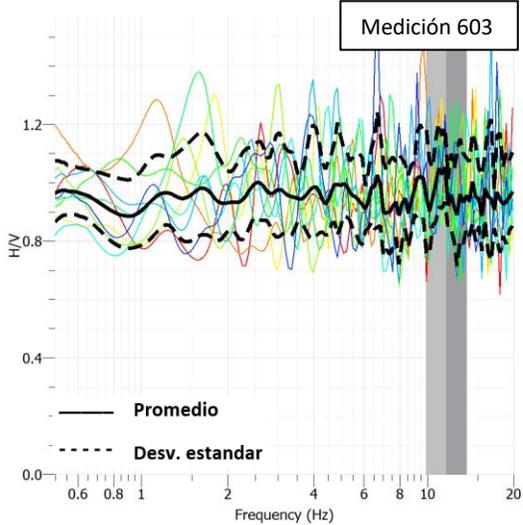
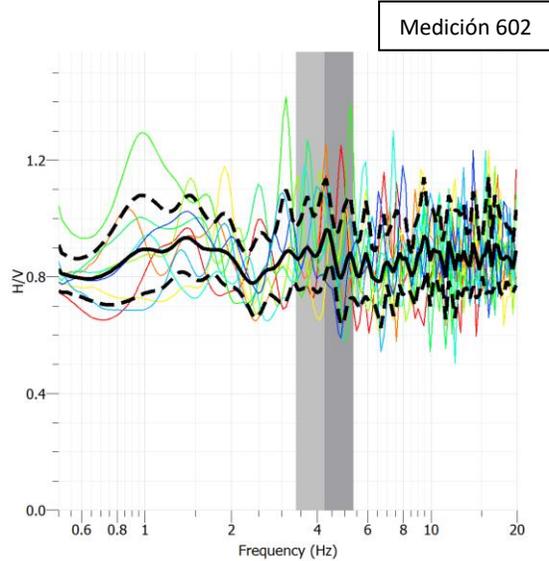
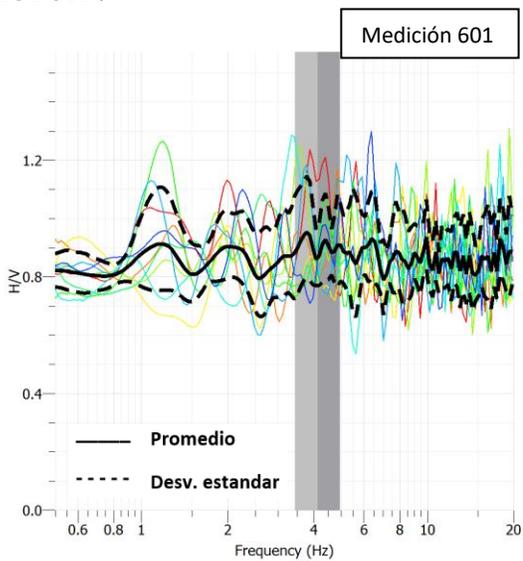
SECTOR 5

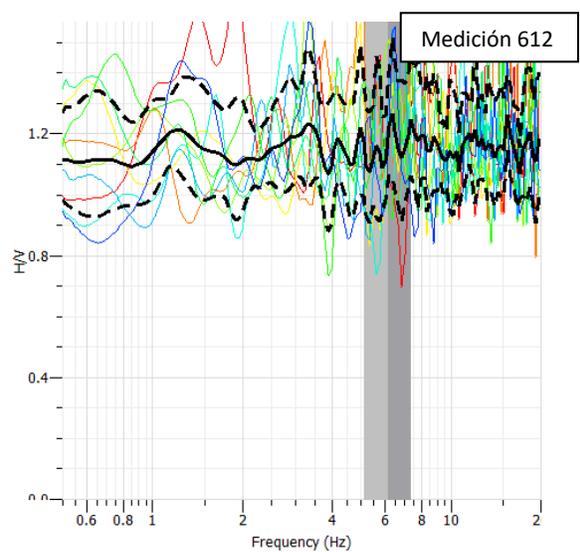
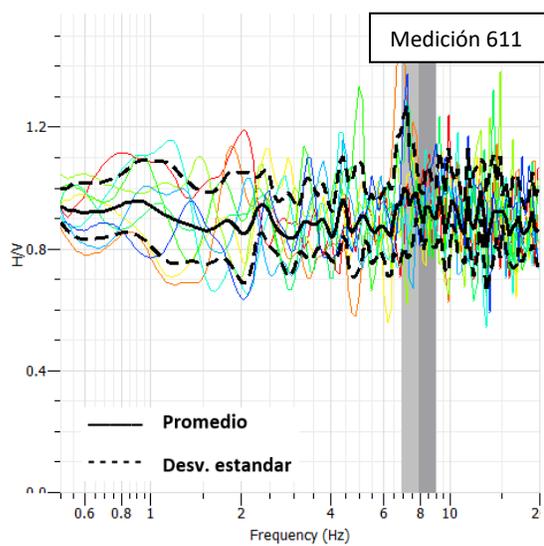
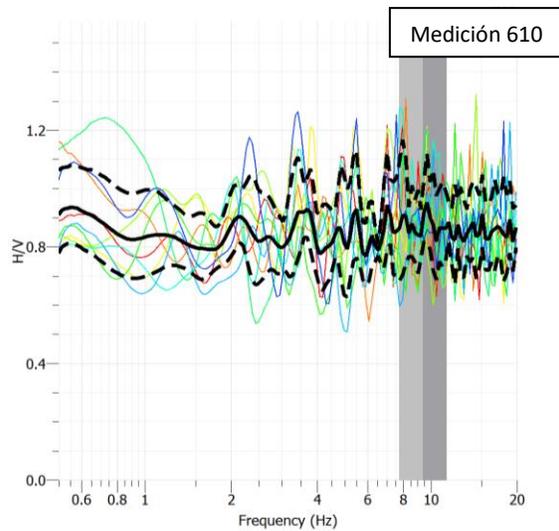
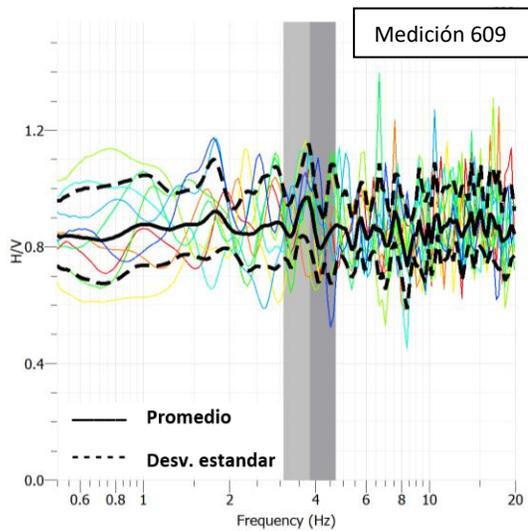
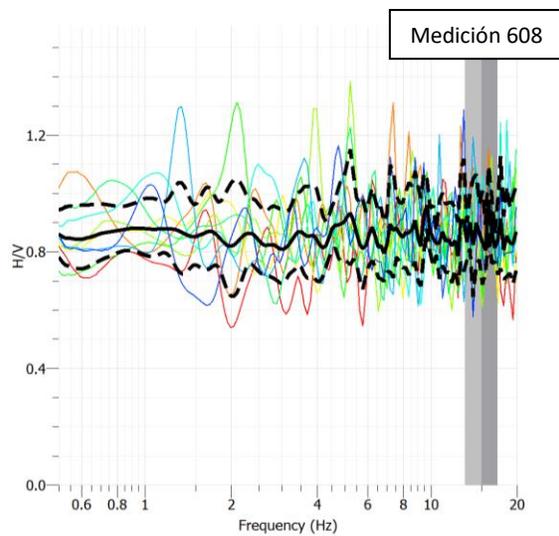
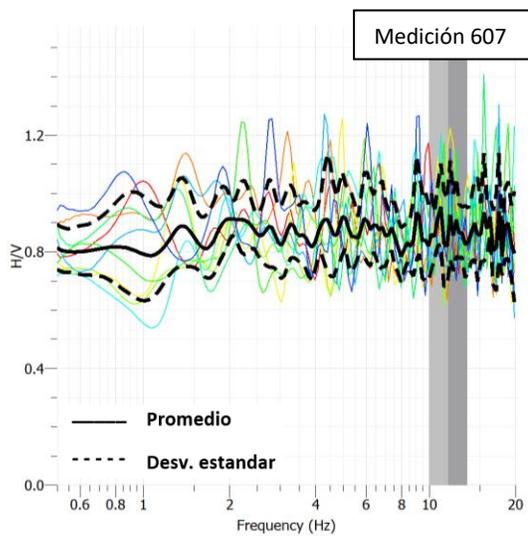


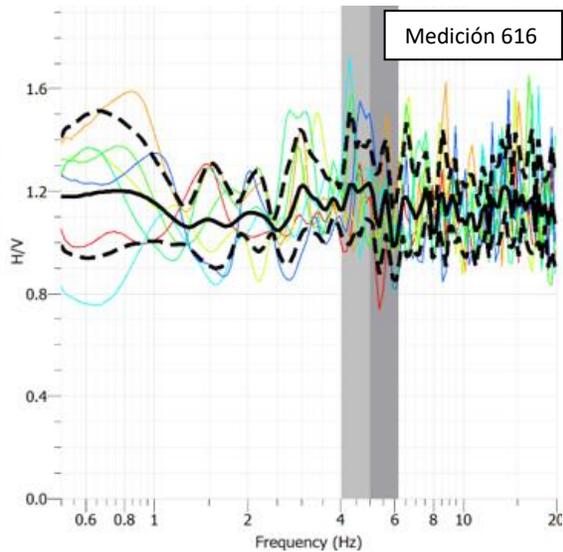
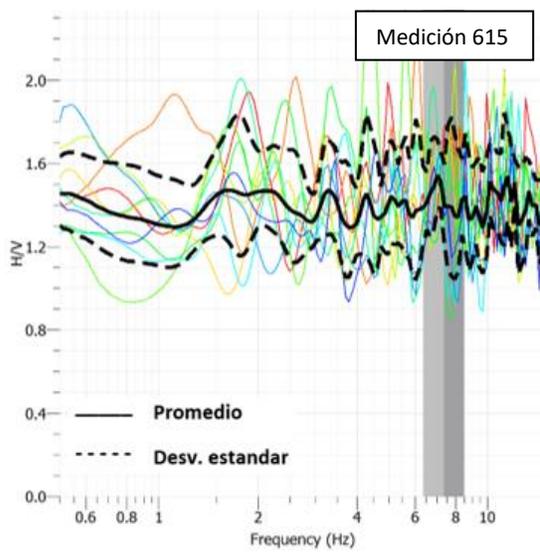
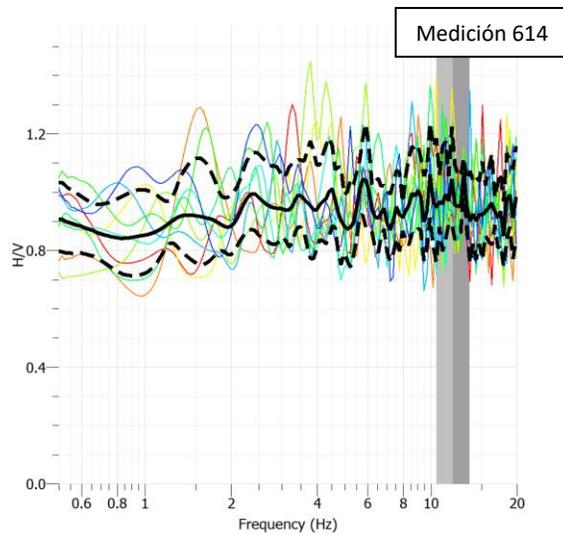
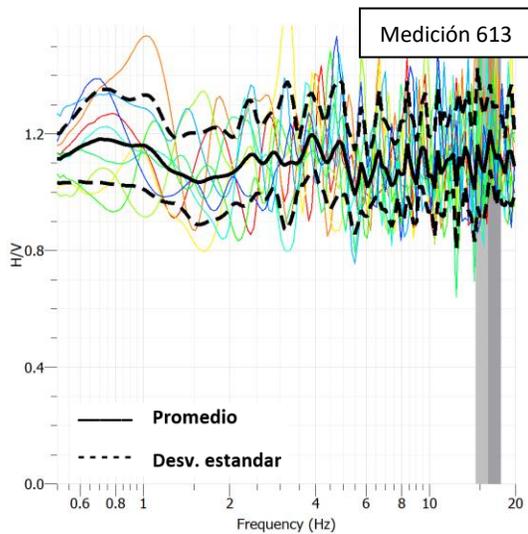




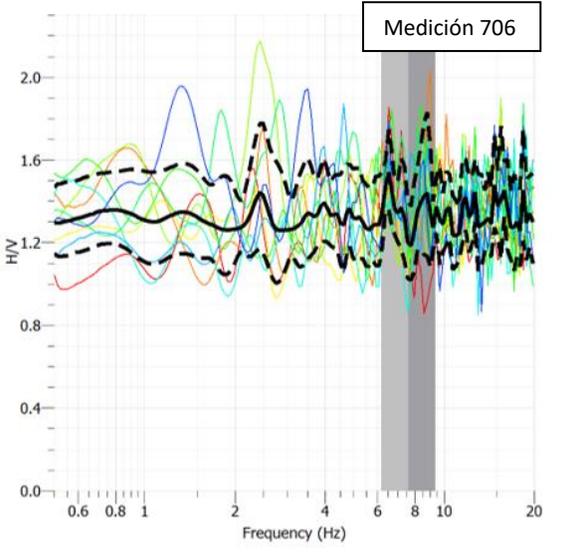
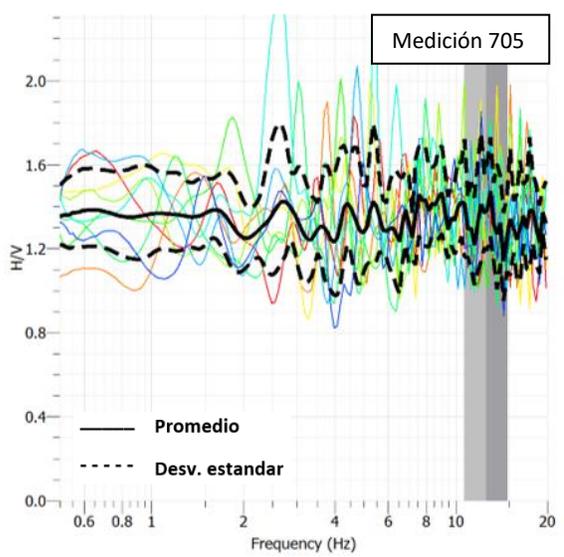
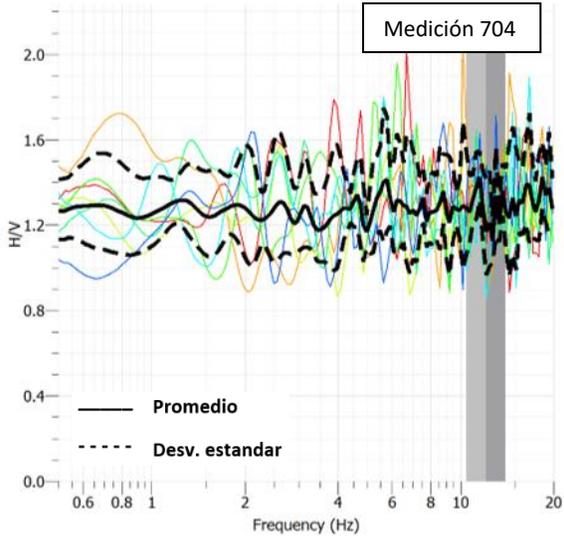
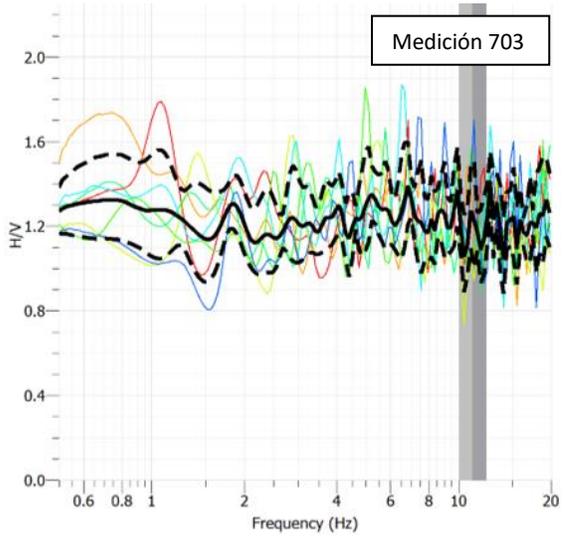
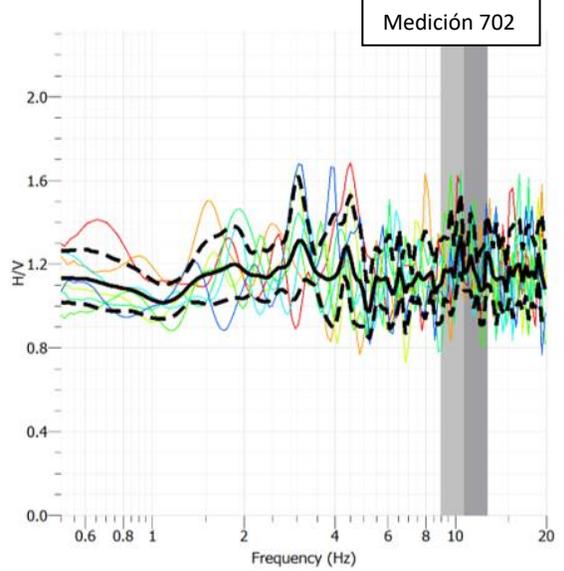
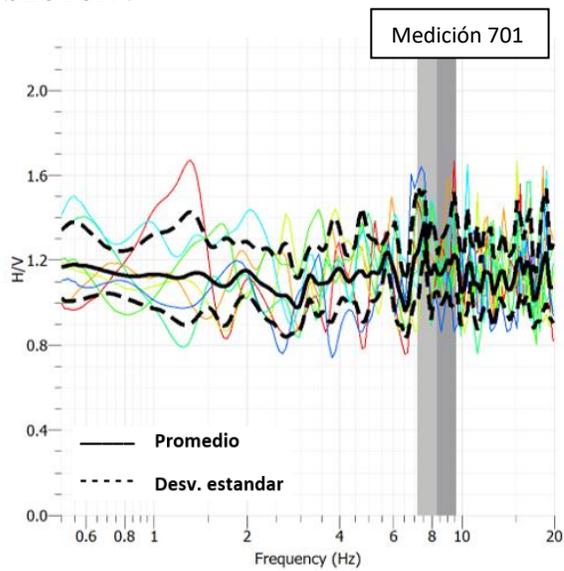
SECTOR 6

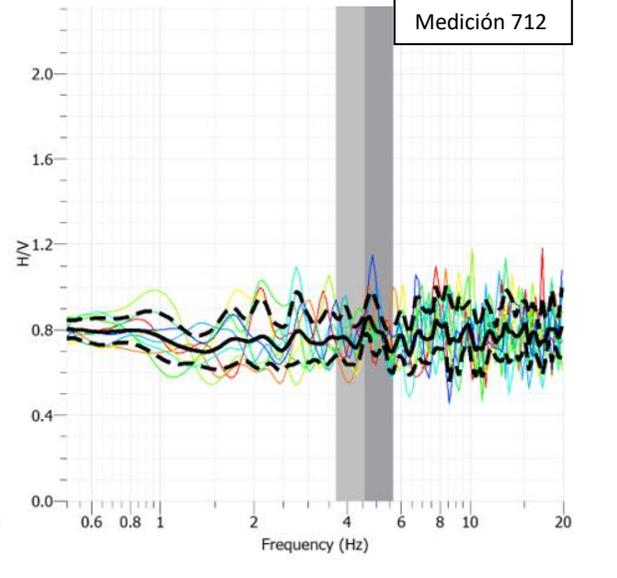
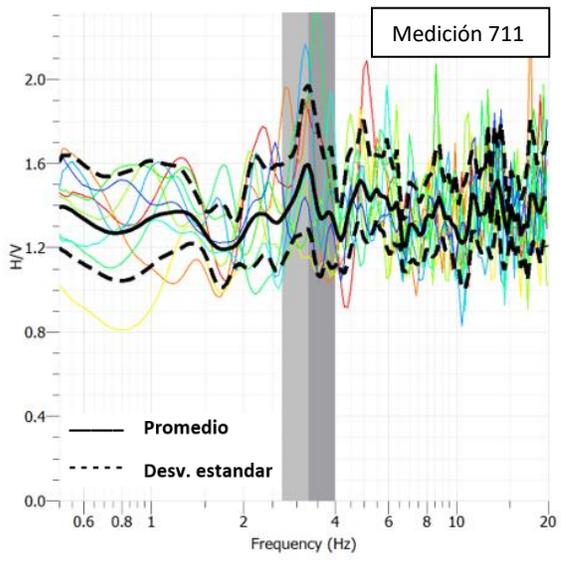
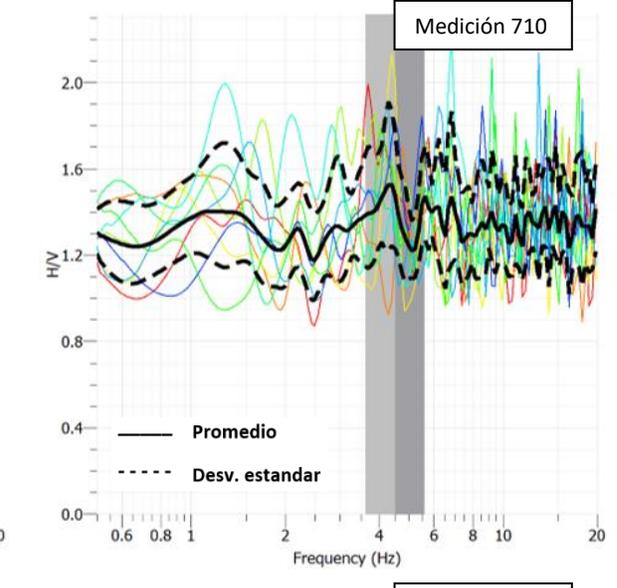
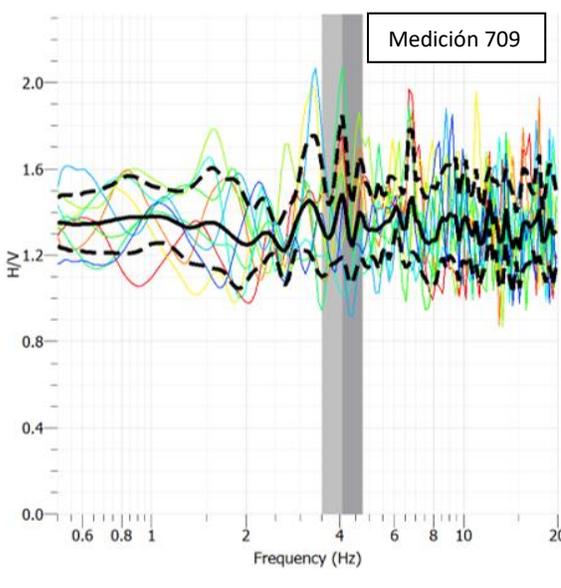
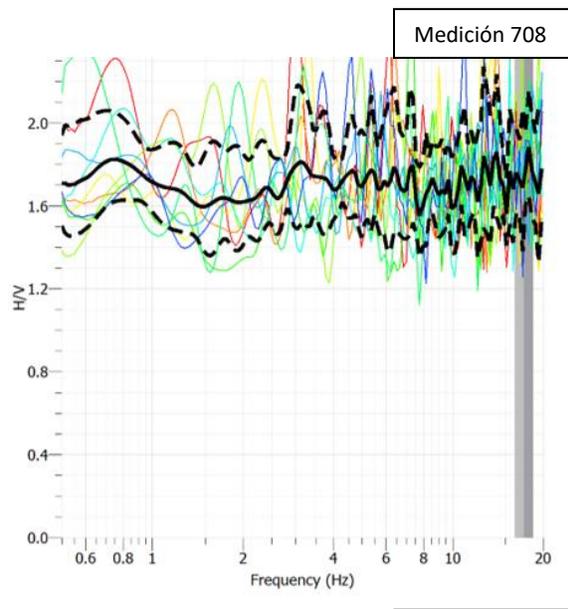
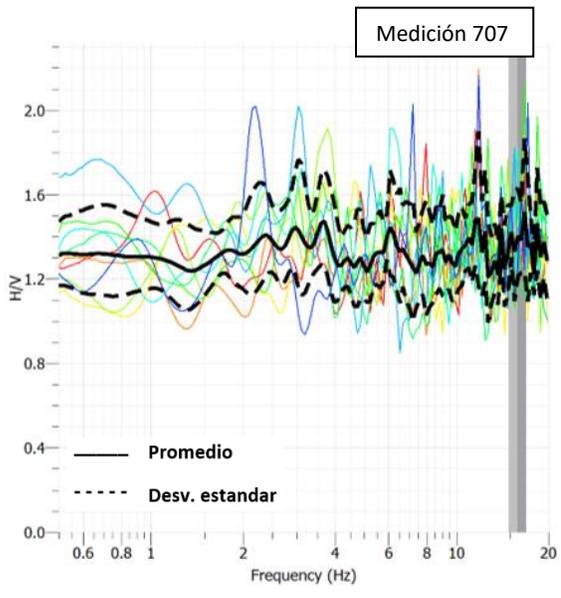


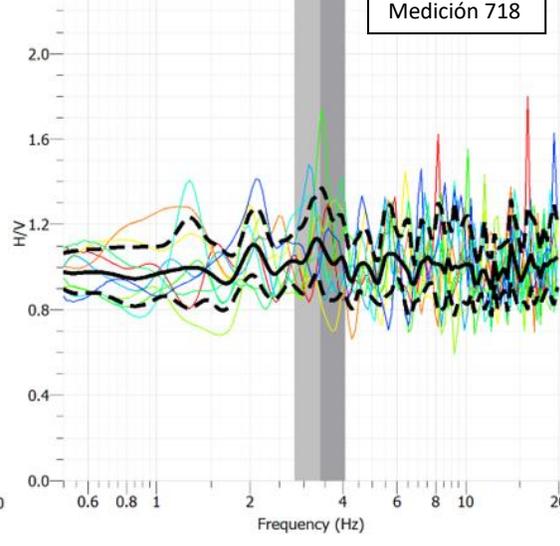
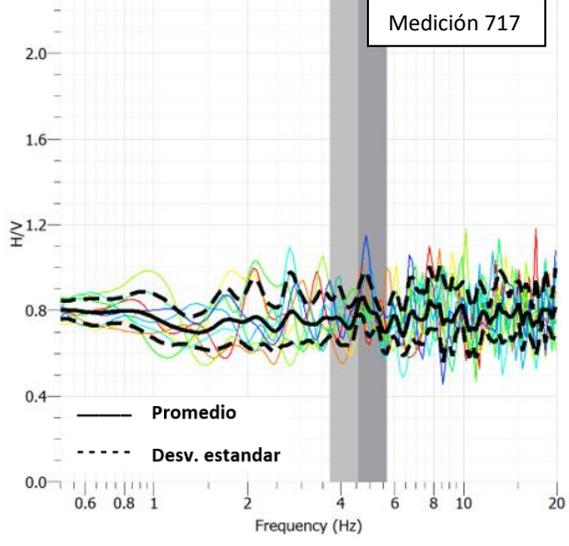
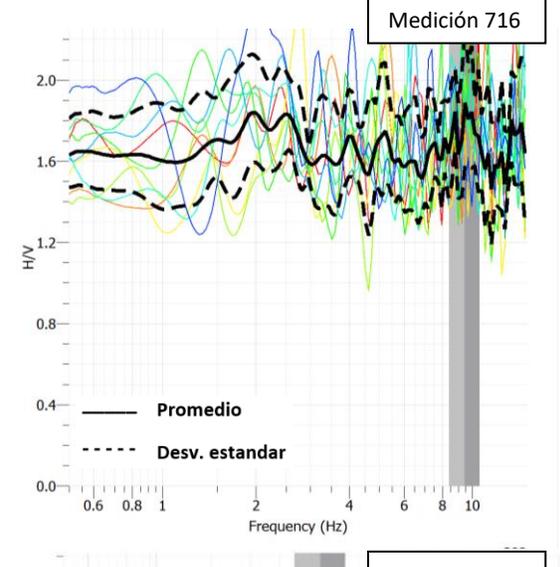
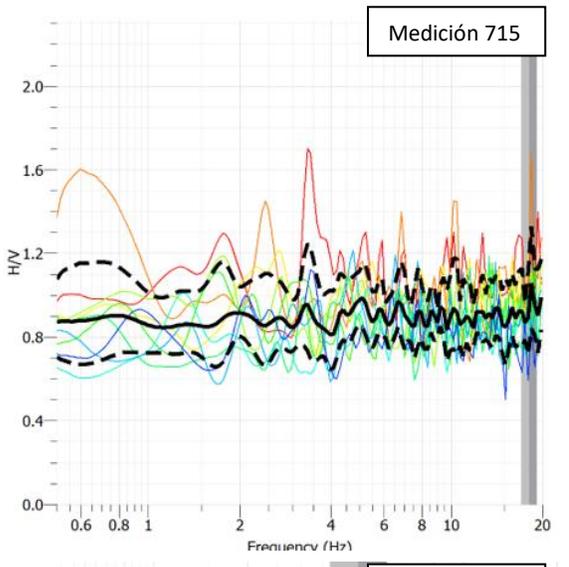
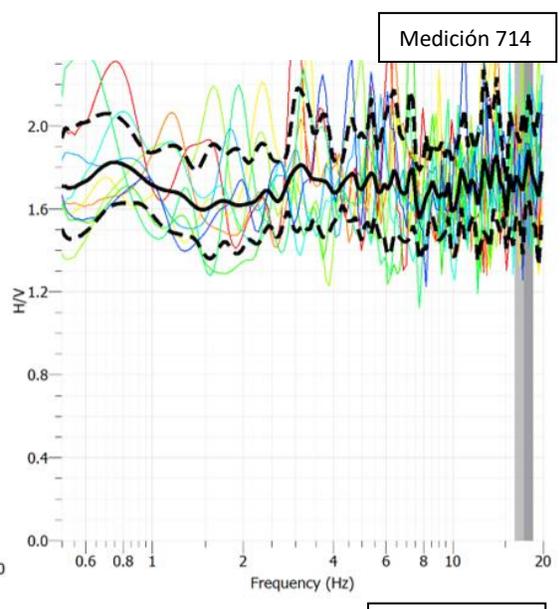
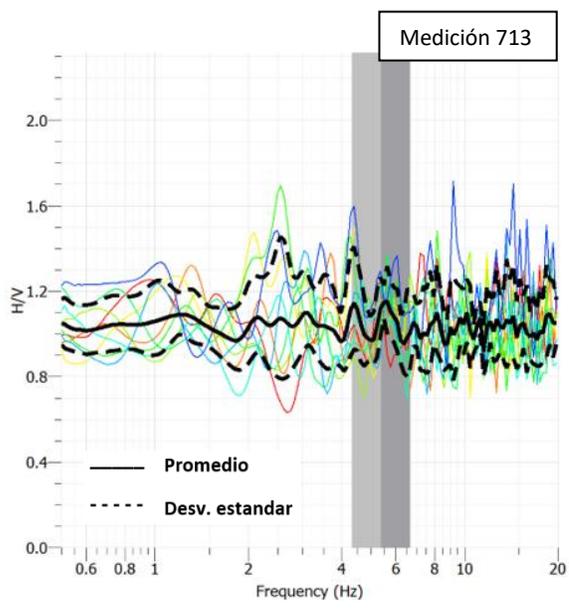


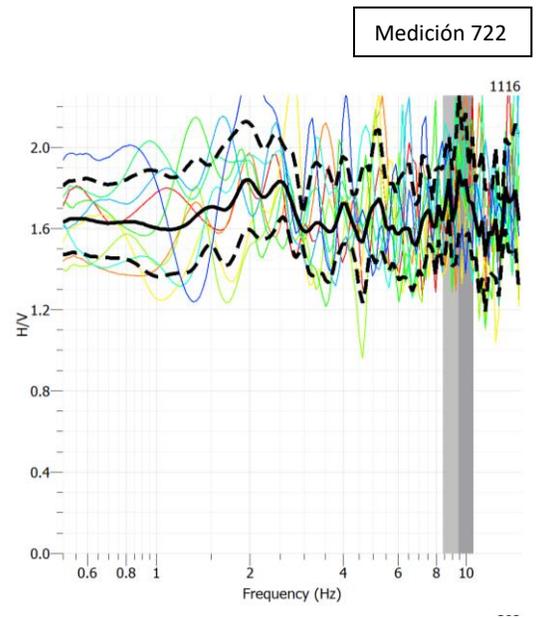
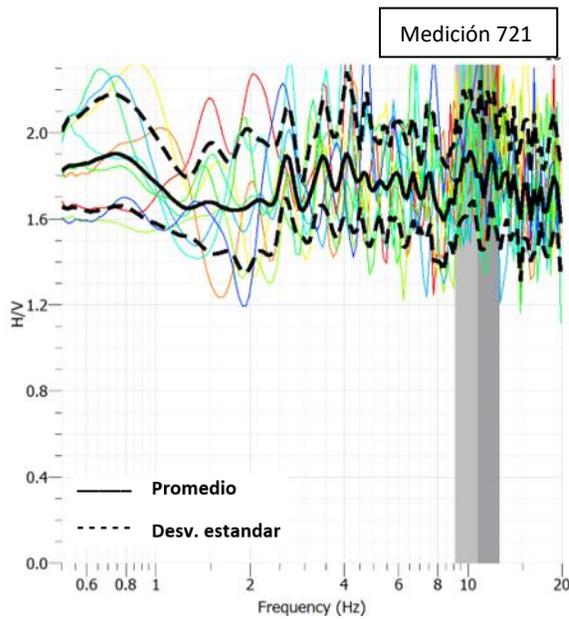
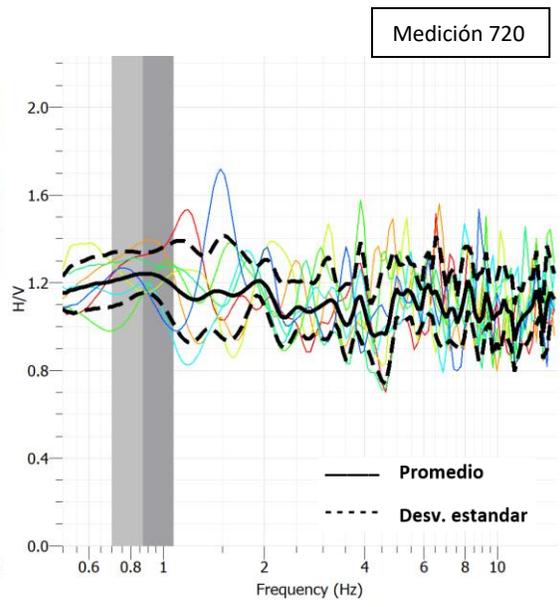
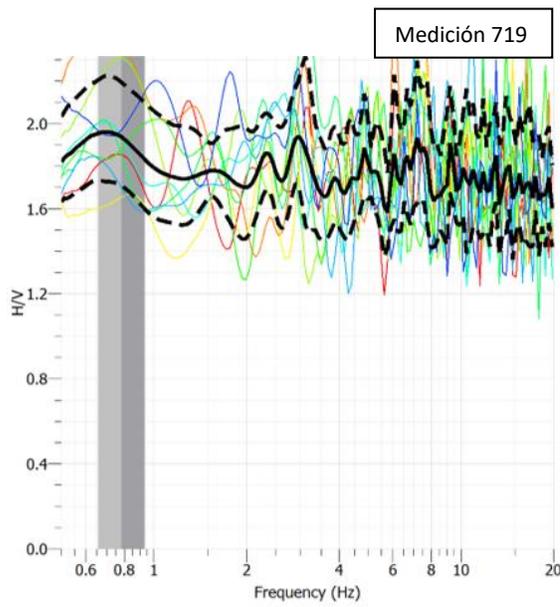


SECTOR 7

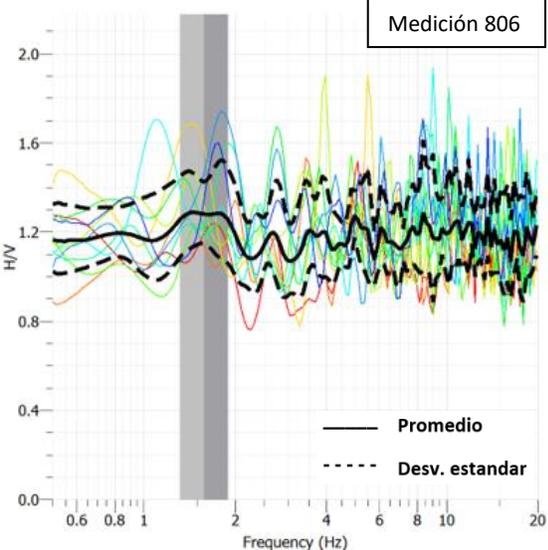
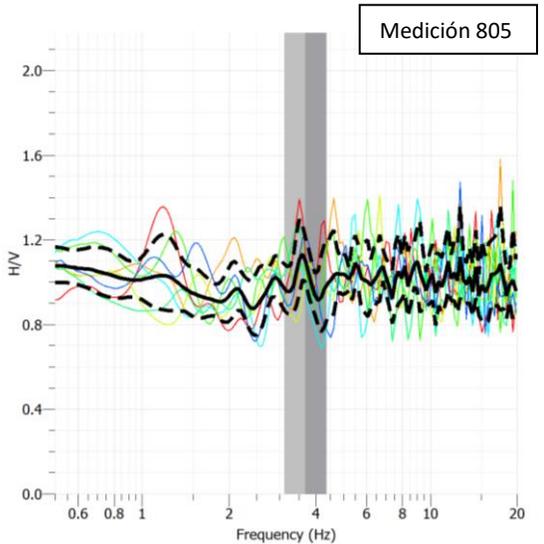
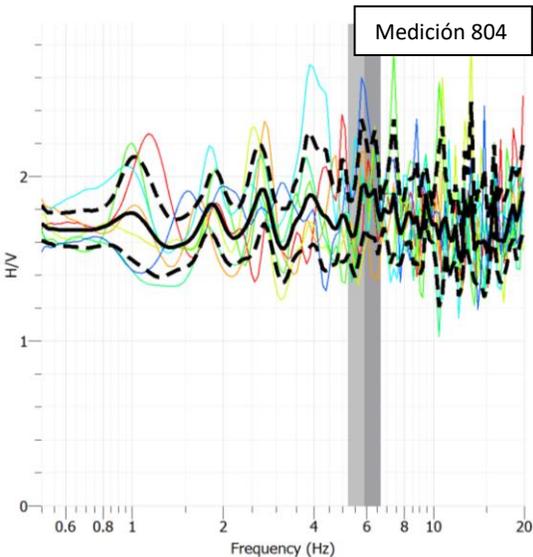
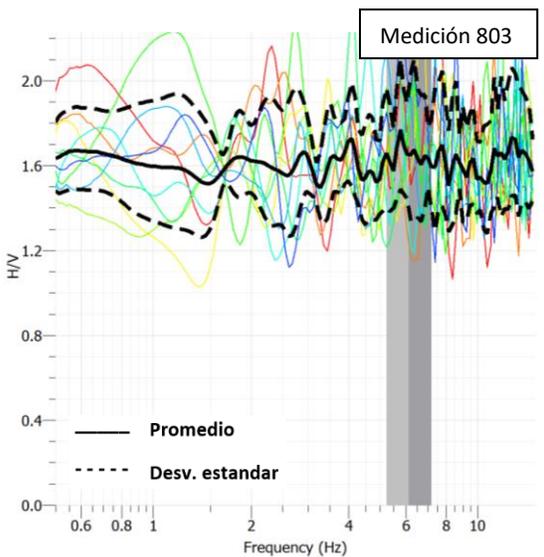
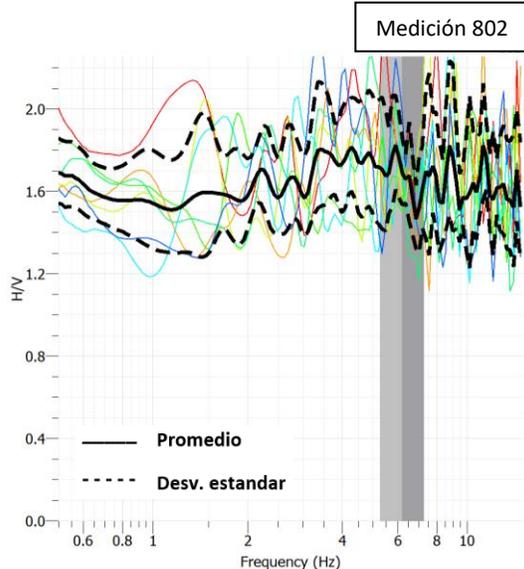
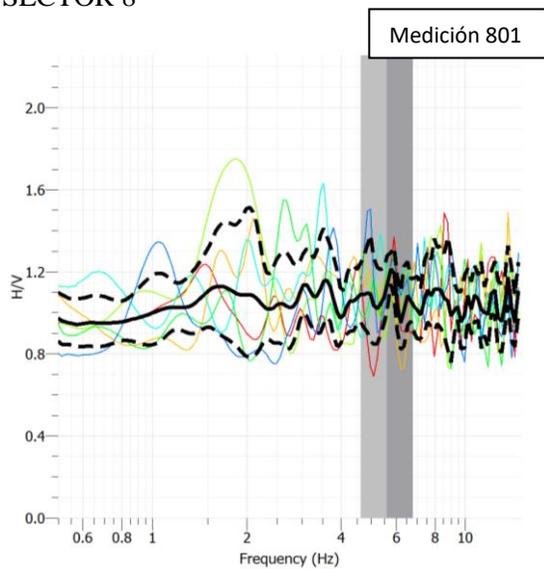


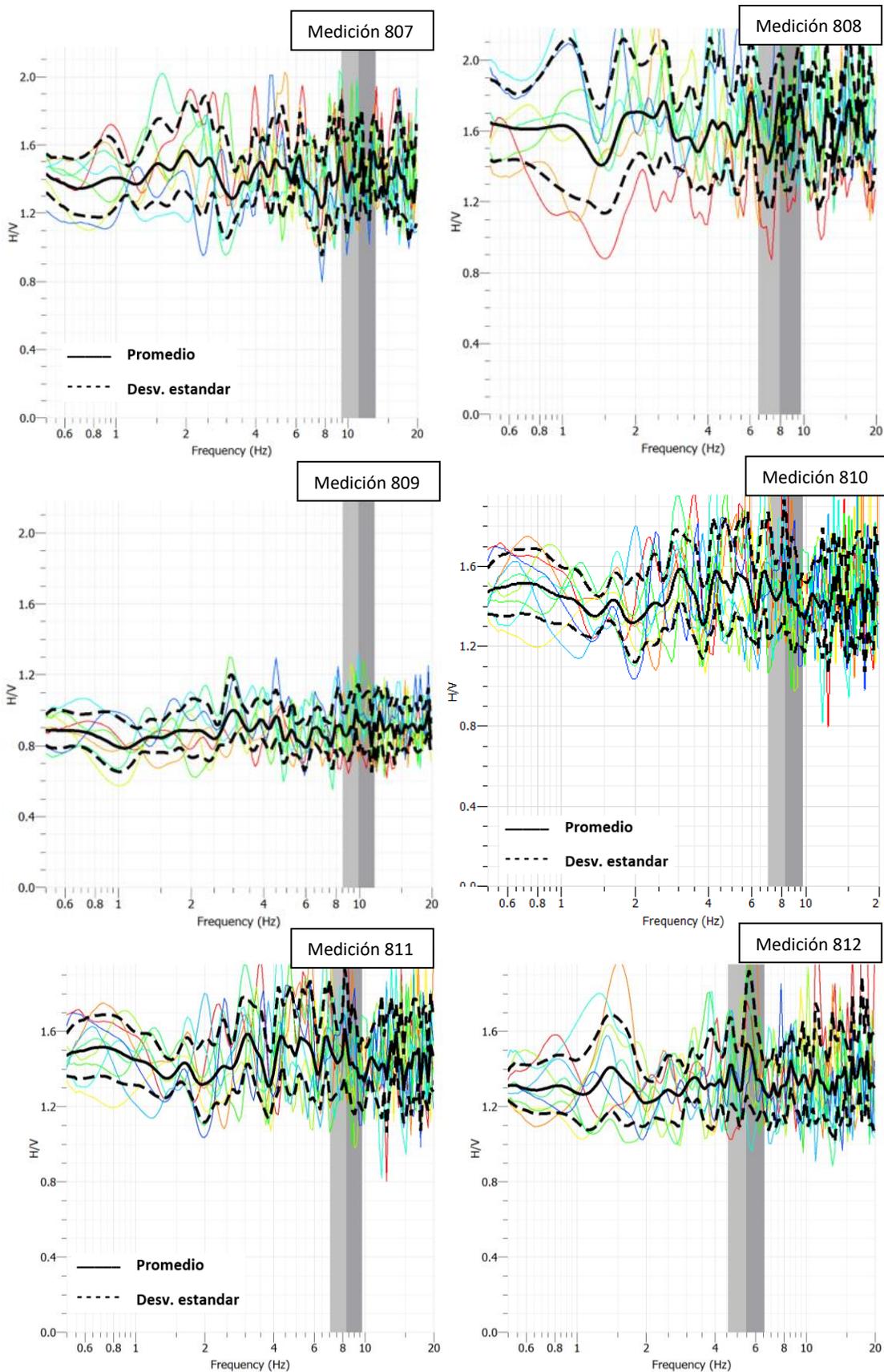


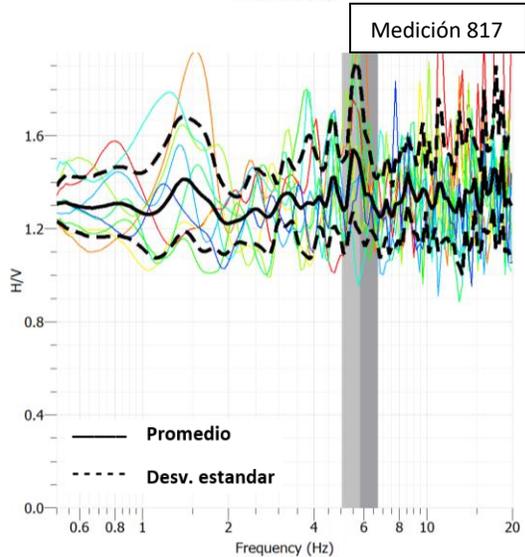
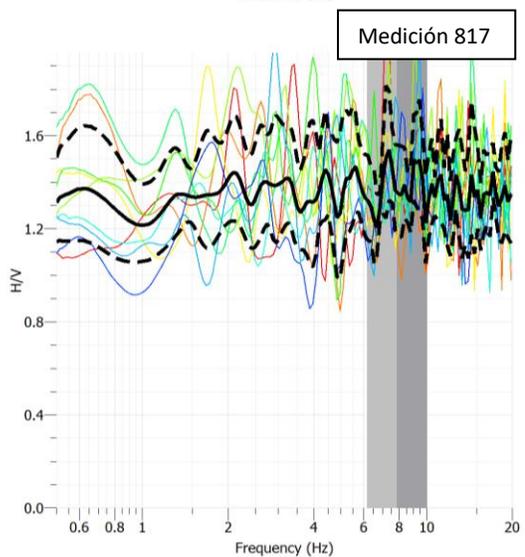
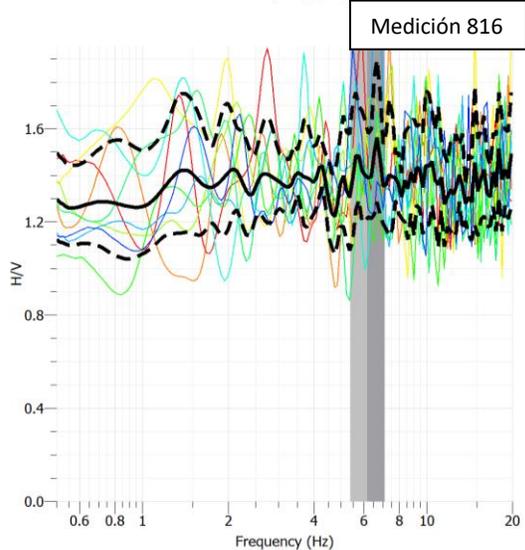
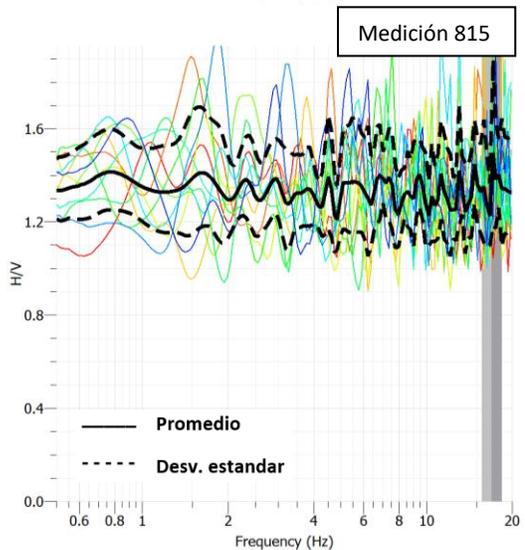
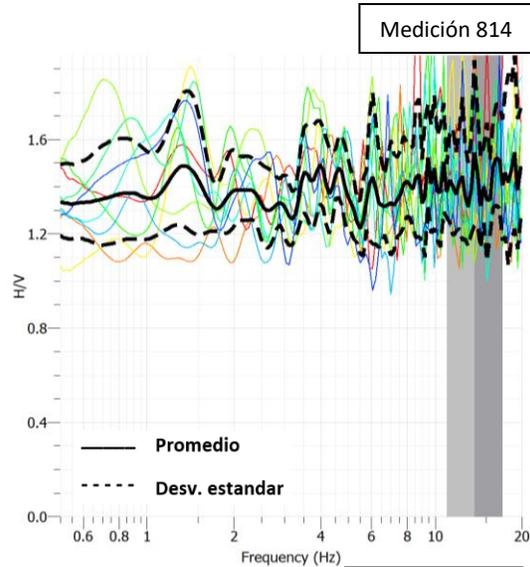
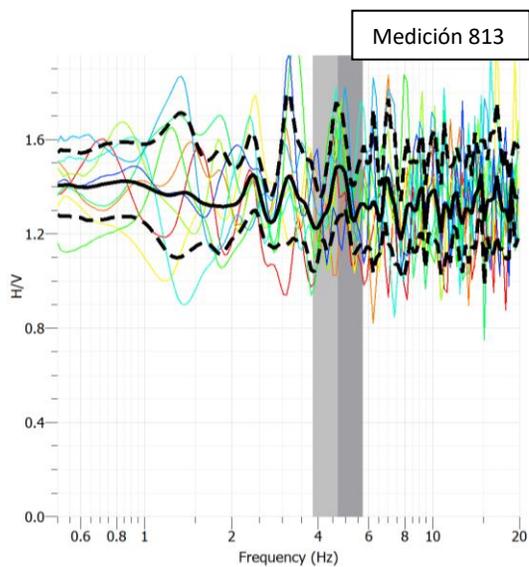


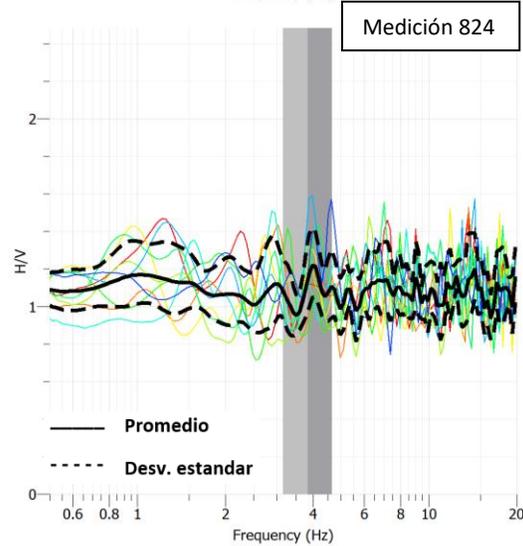
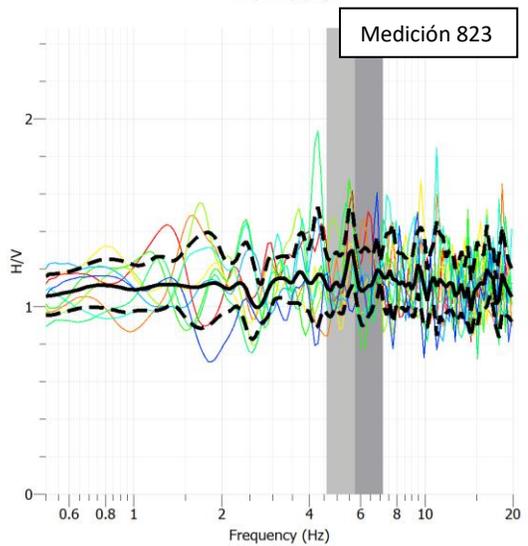
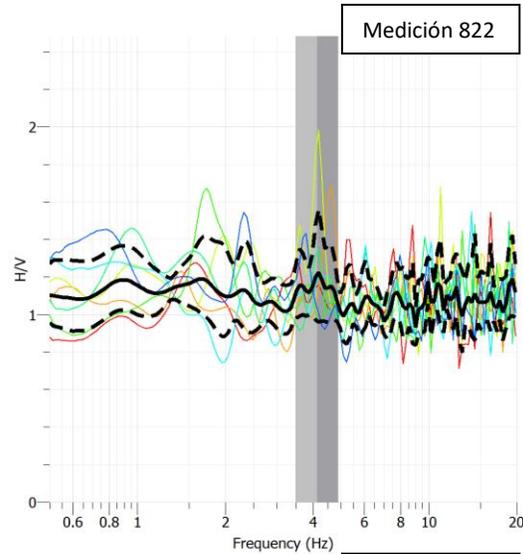
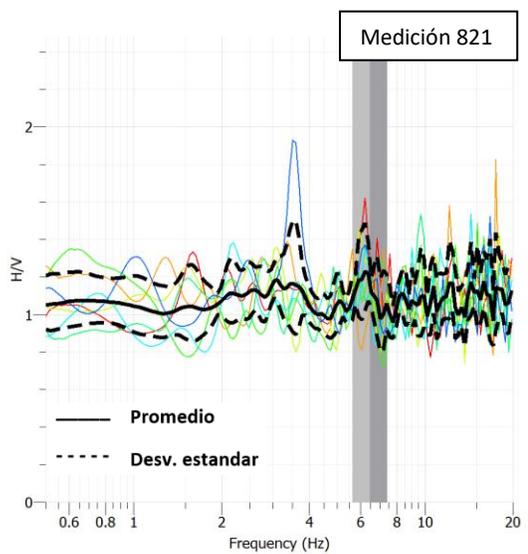
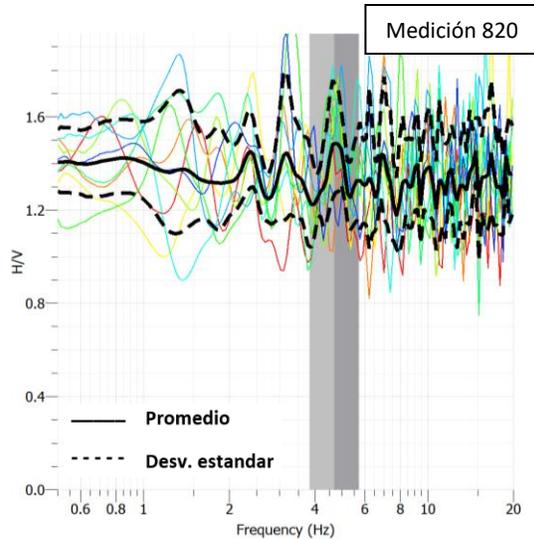
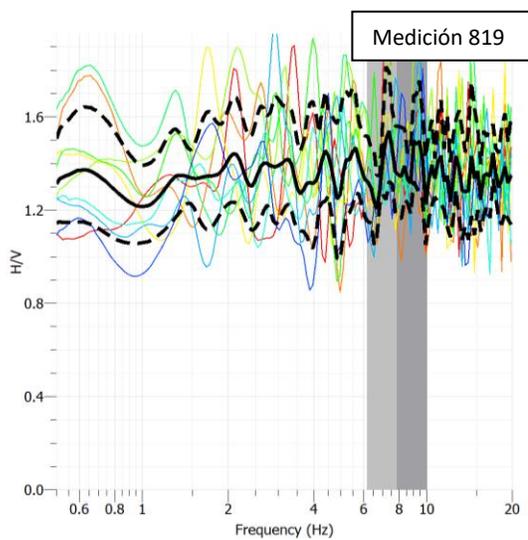


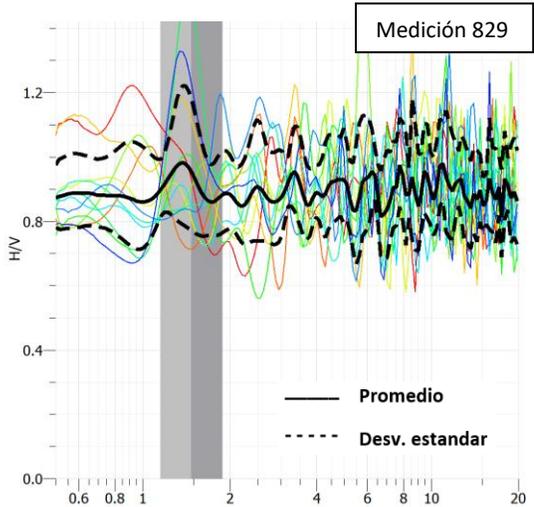
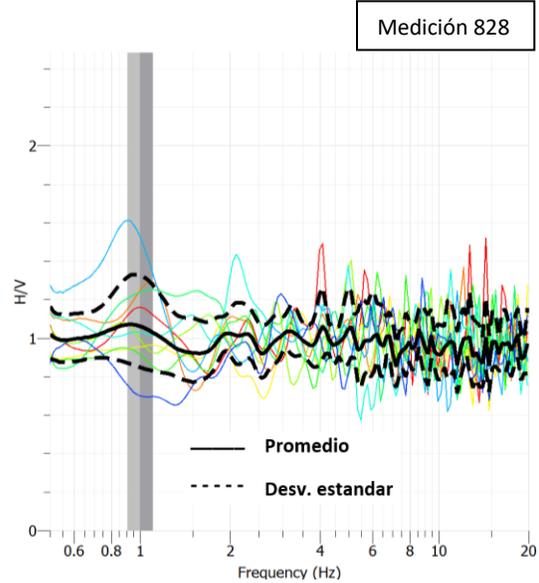
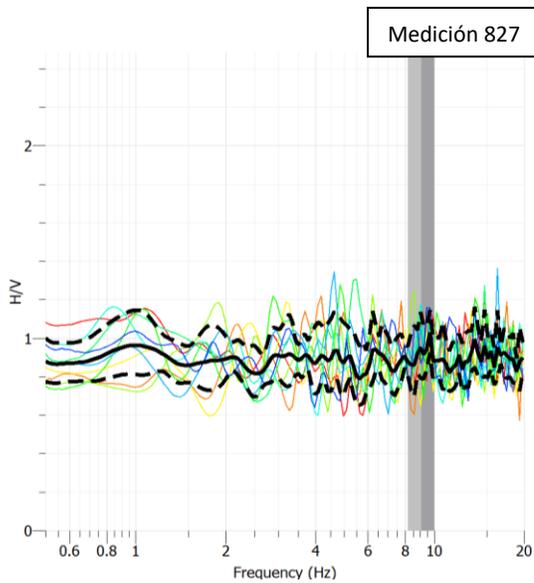
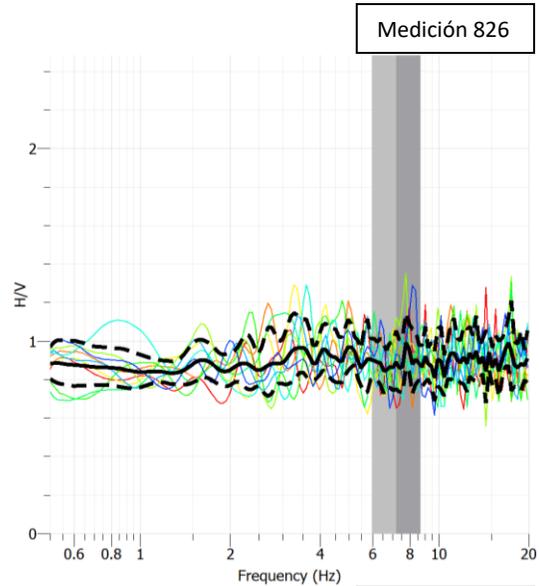
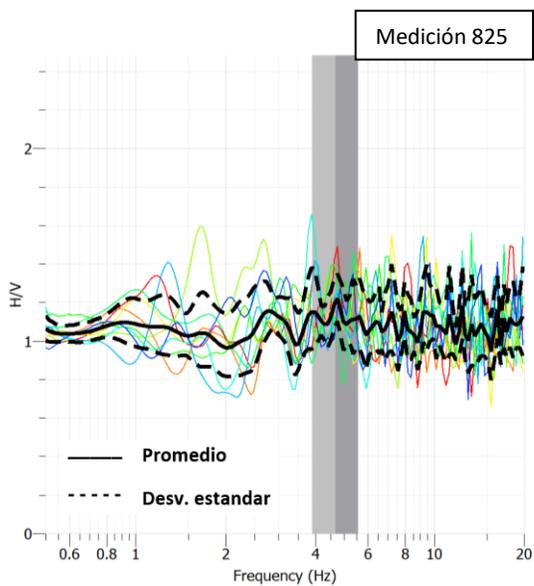
SECTOR 8



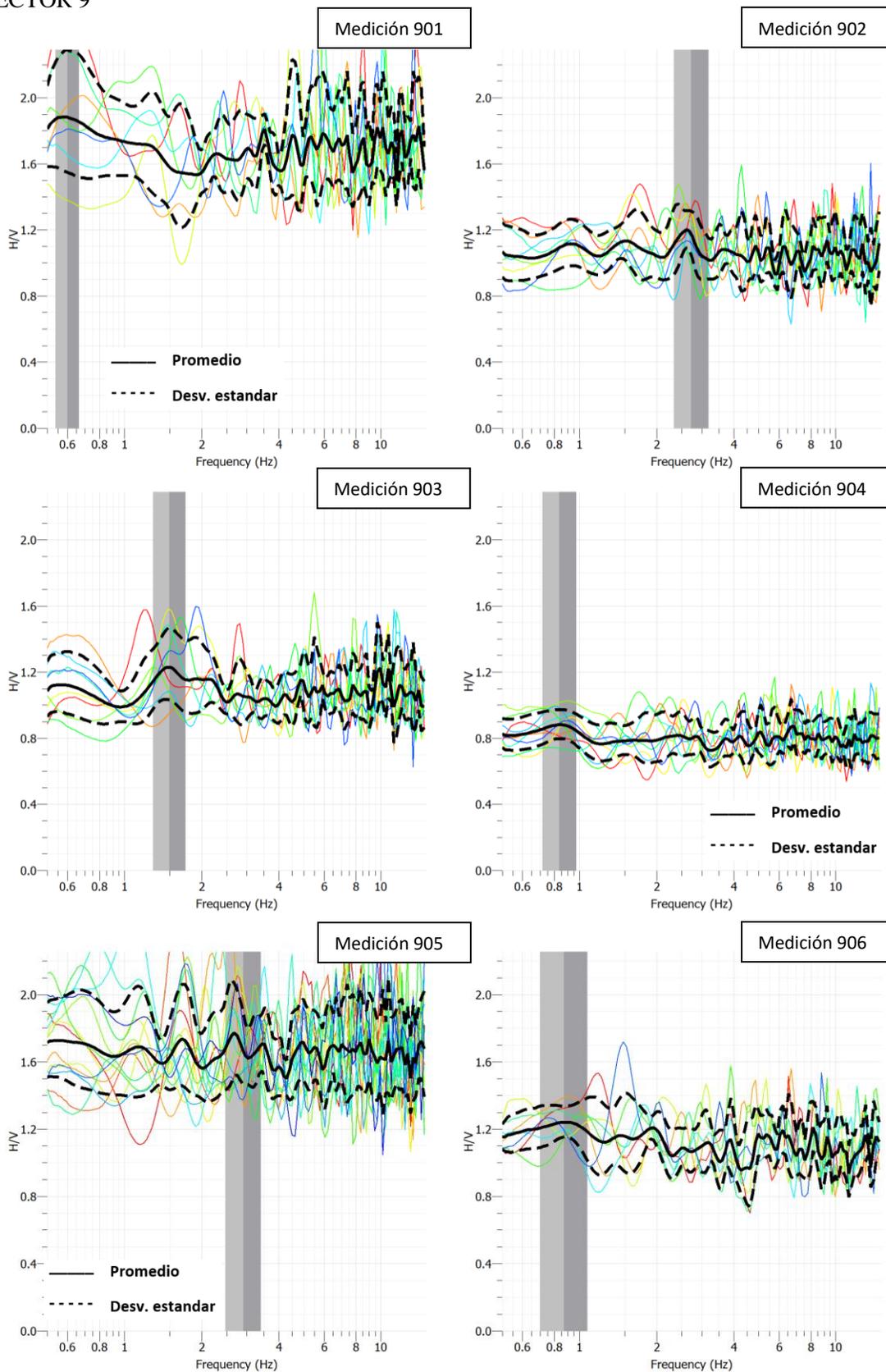


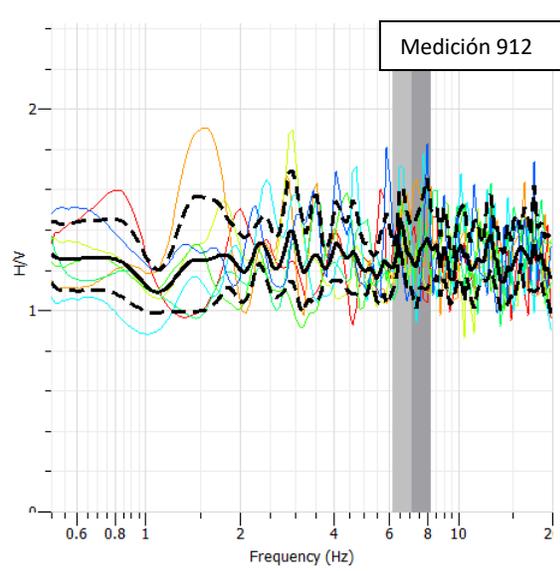
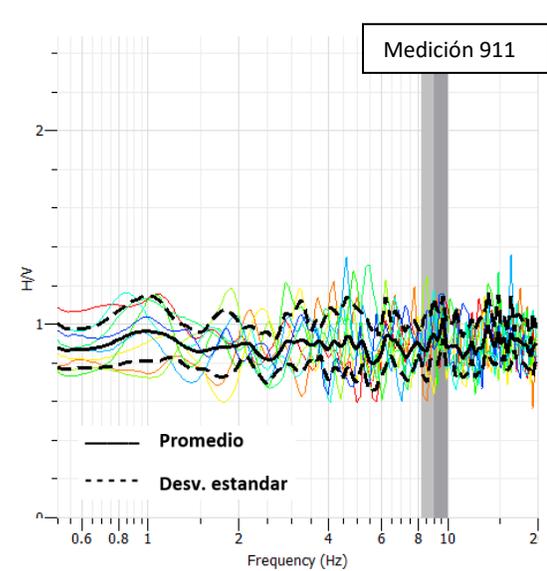
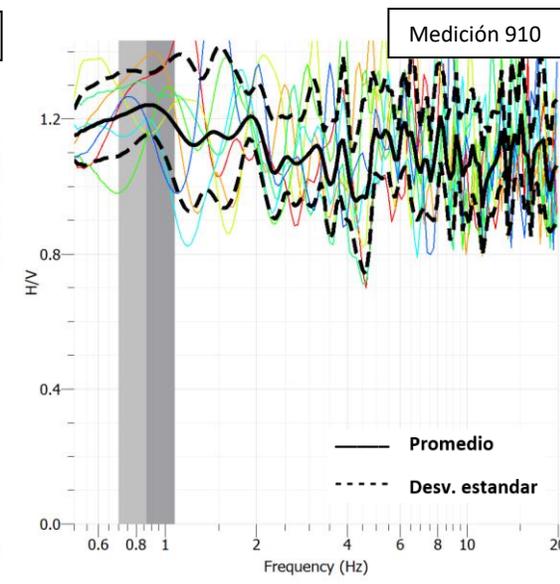
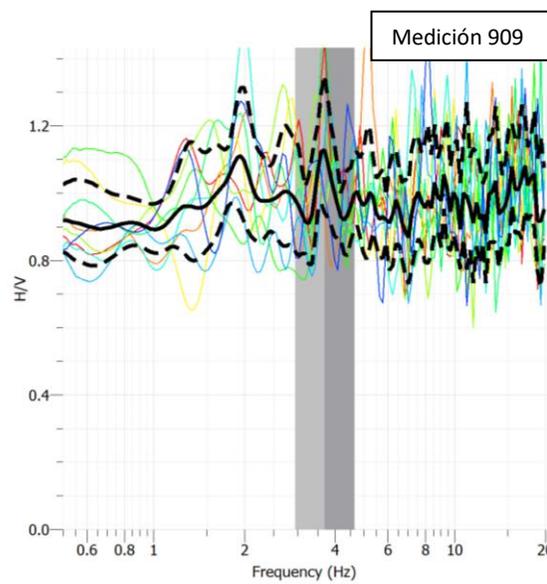
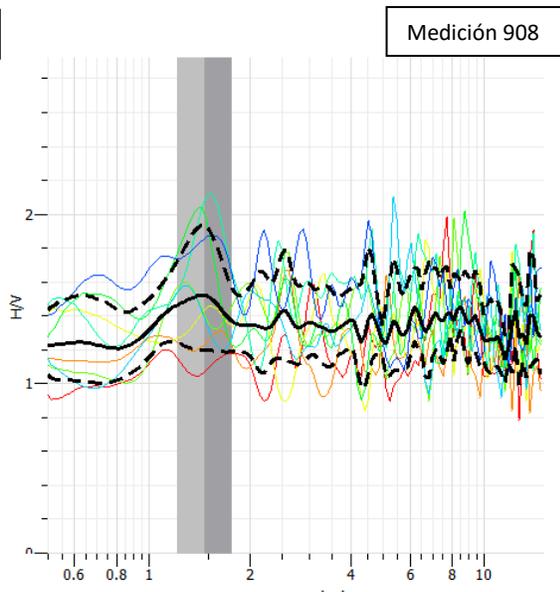
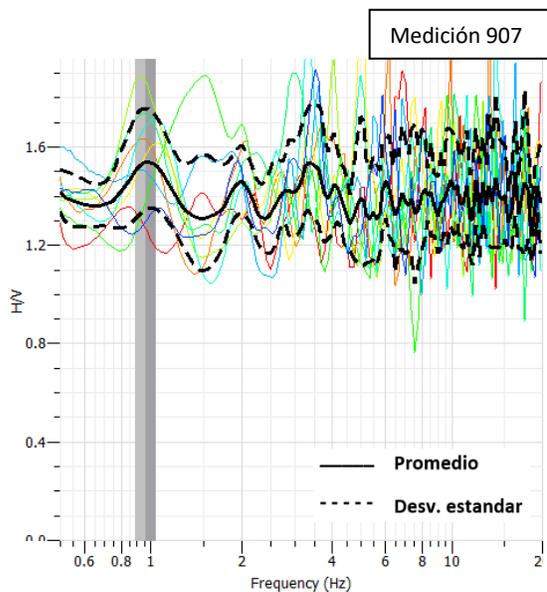


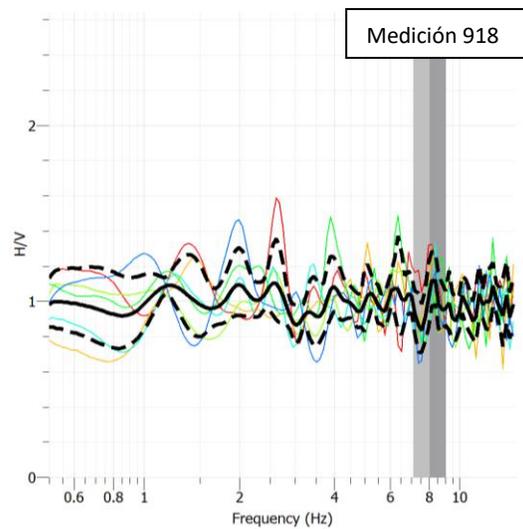
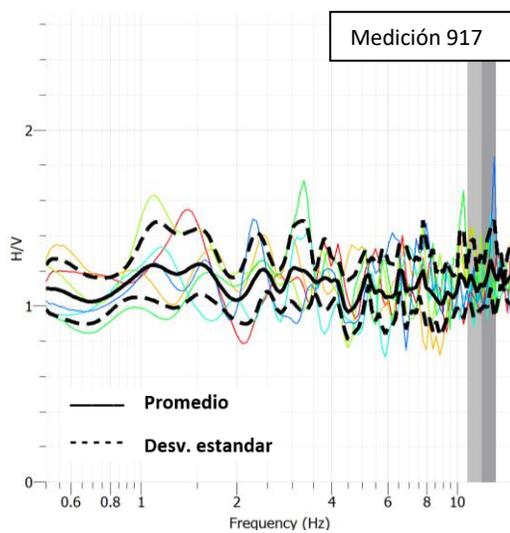
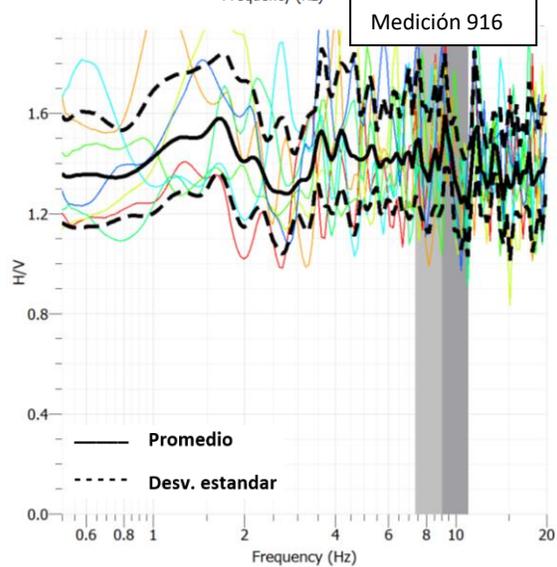
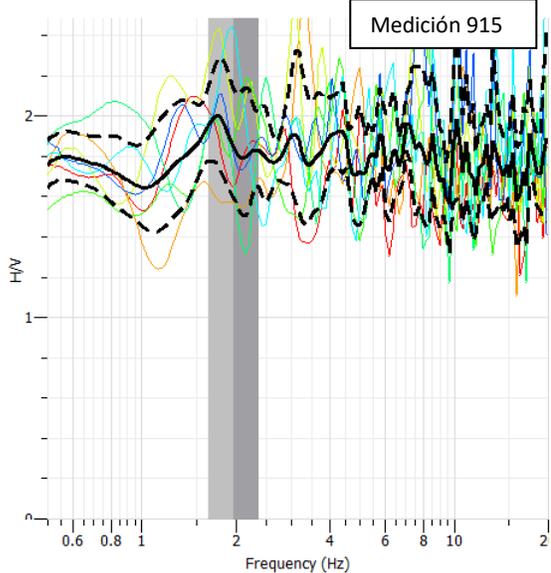
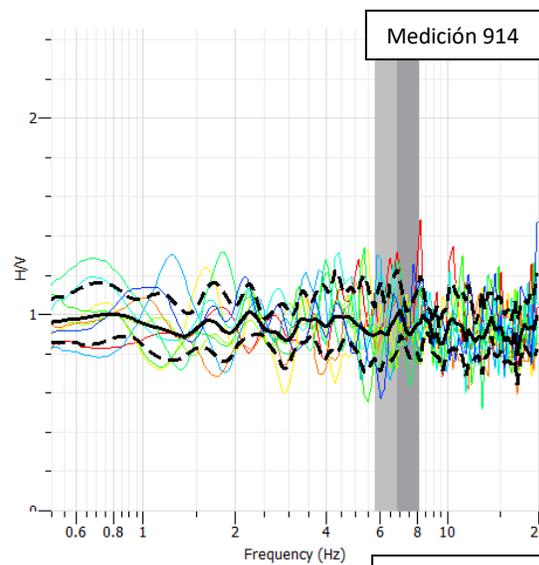
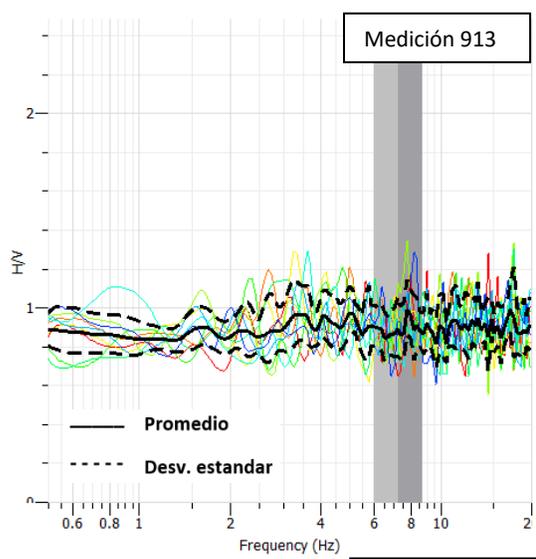


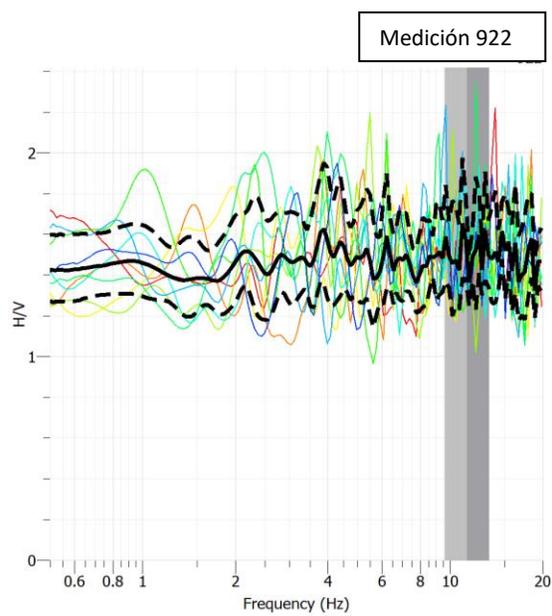
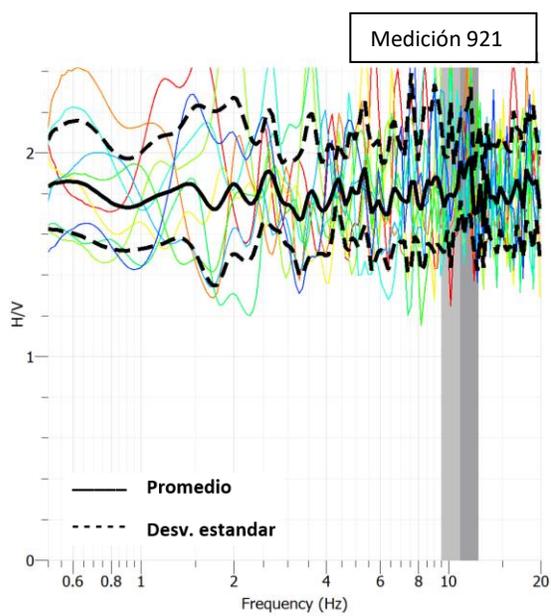
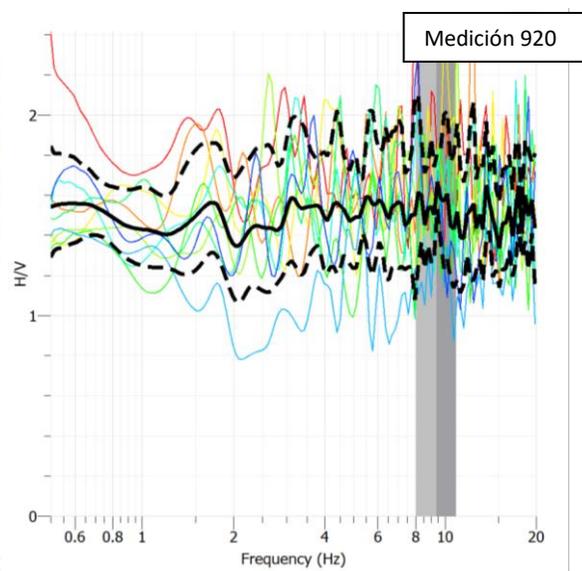
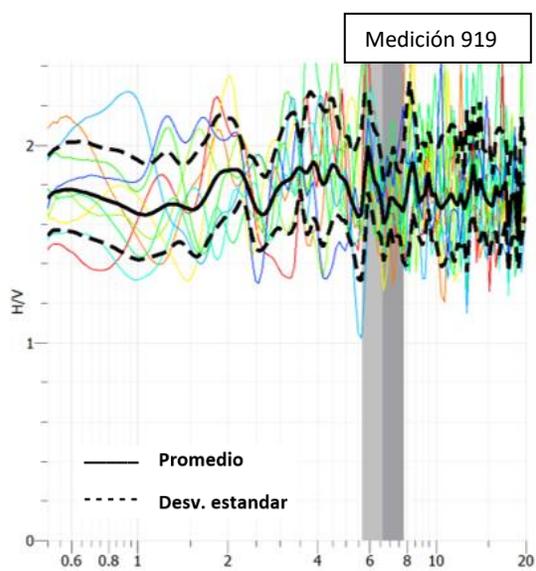


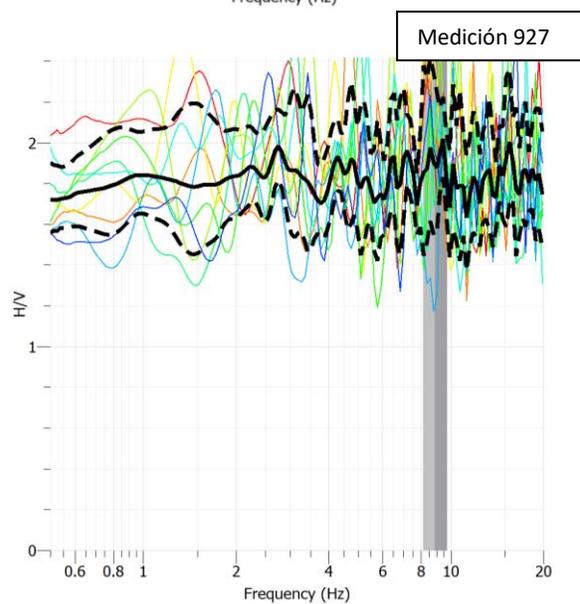
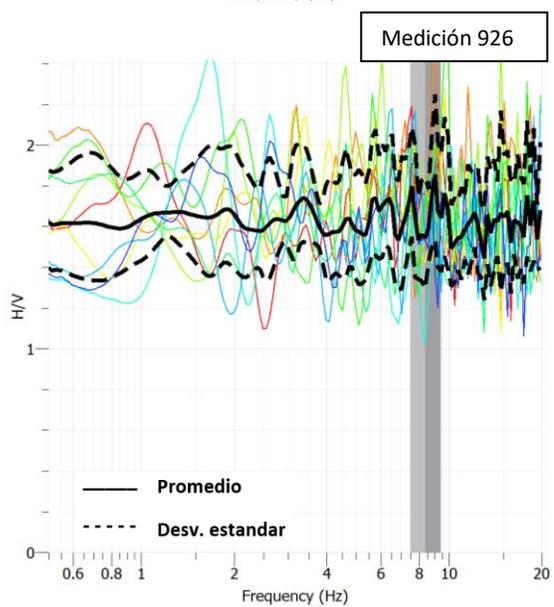
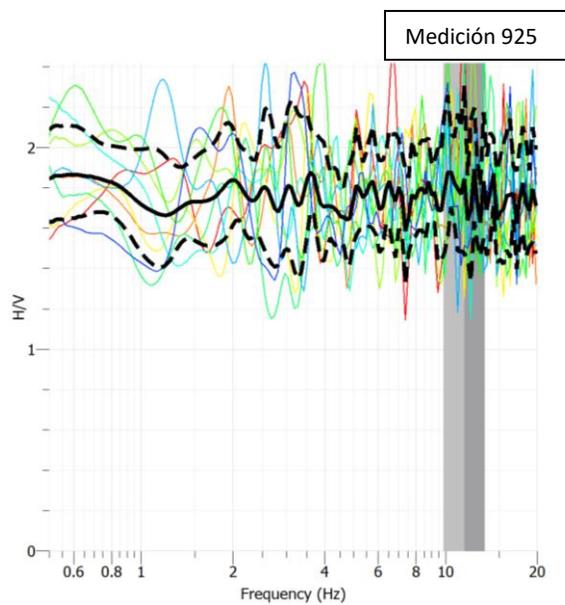
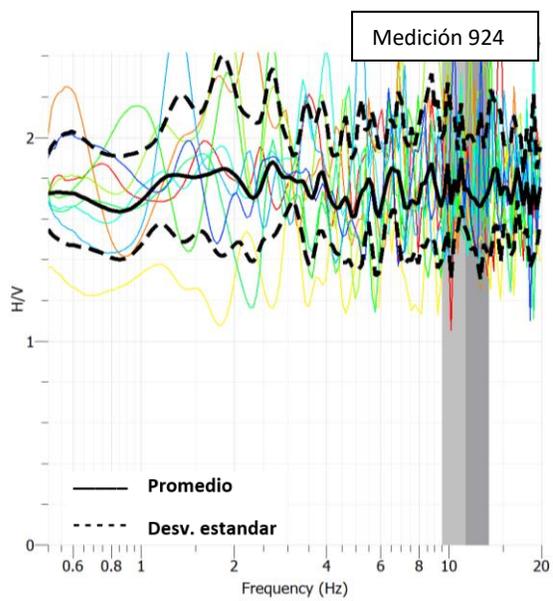
SECTOR 9



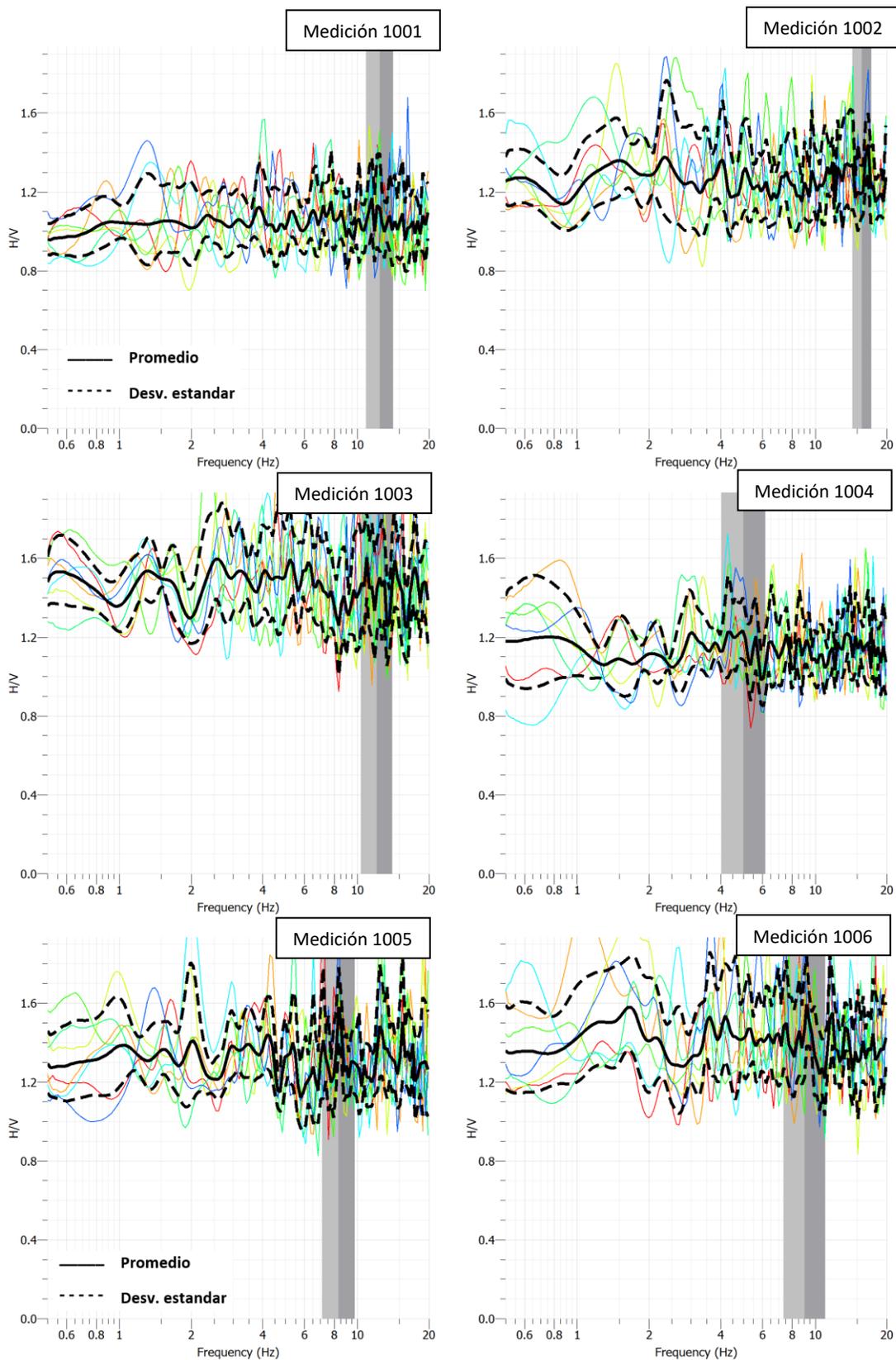


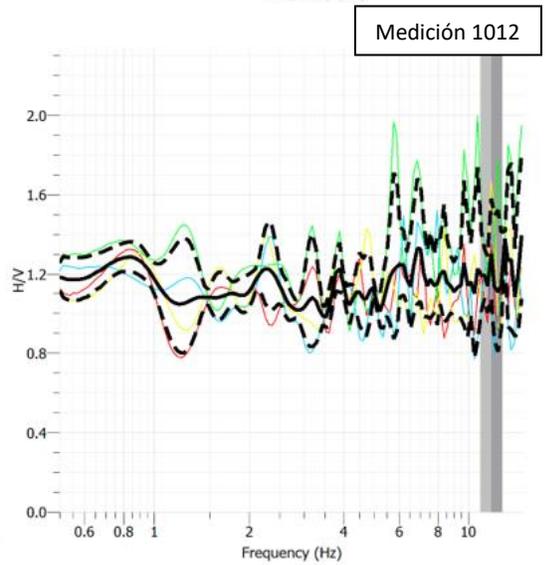
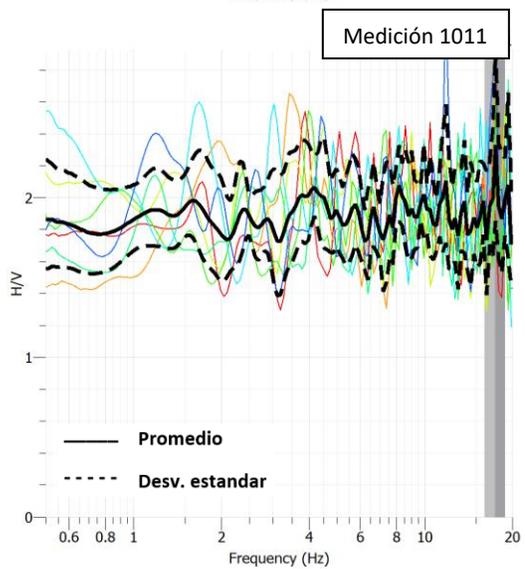
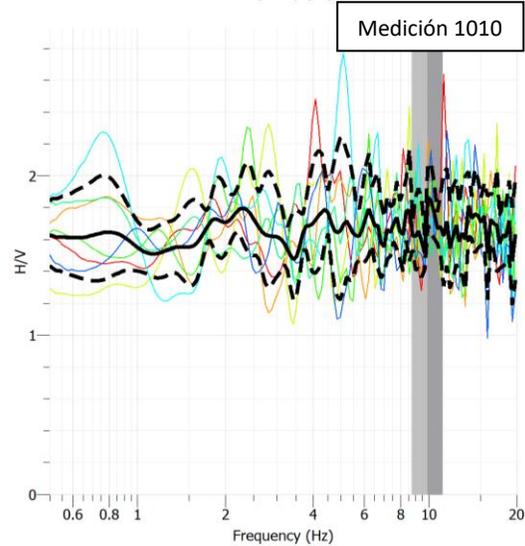
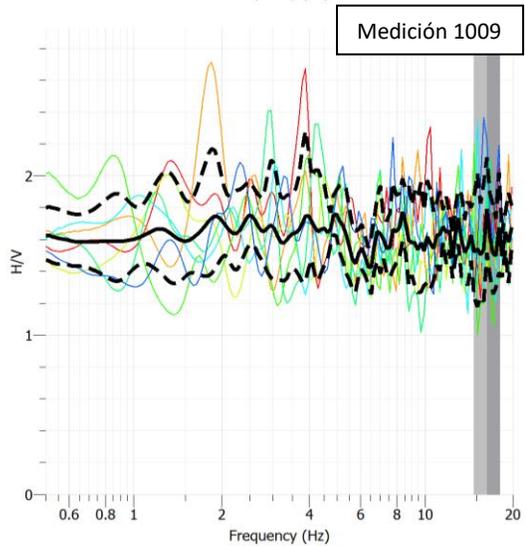
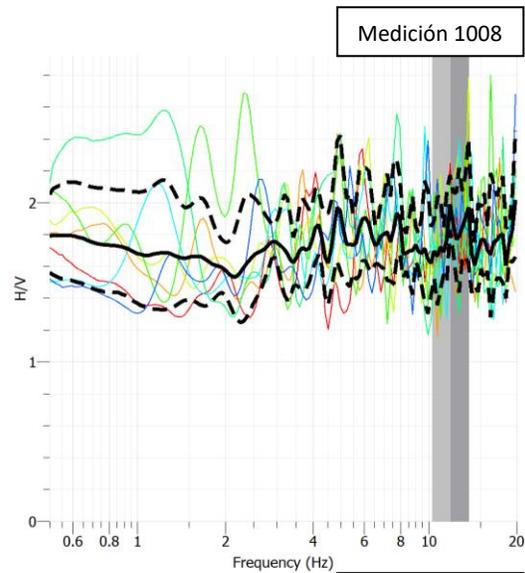
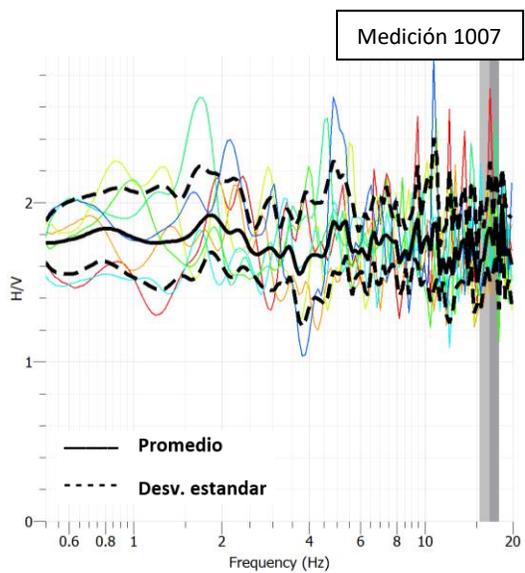


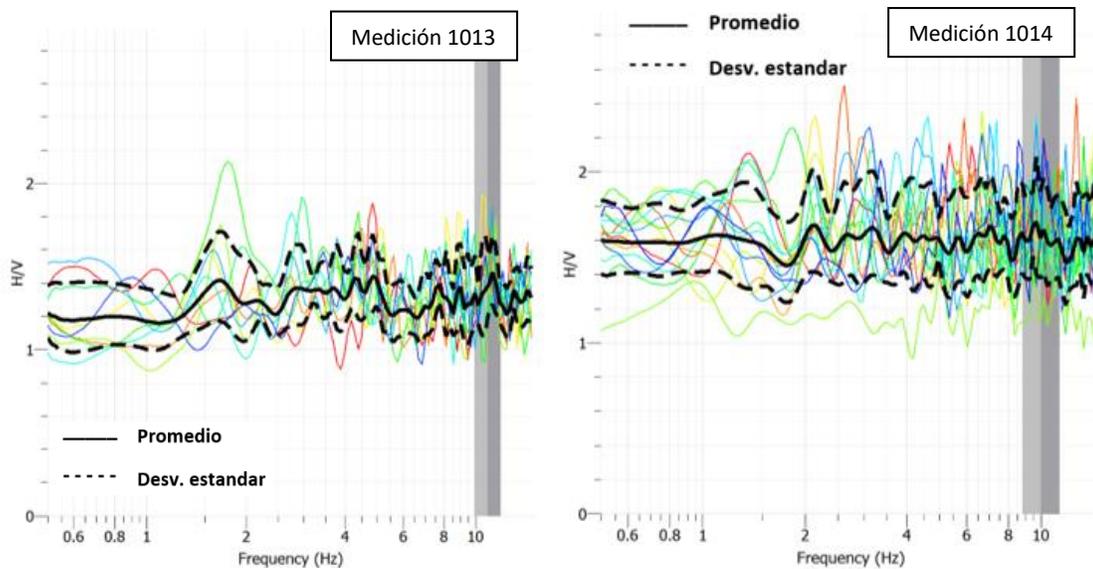




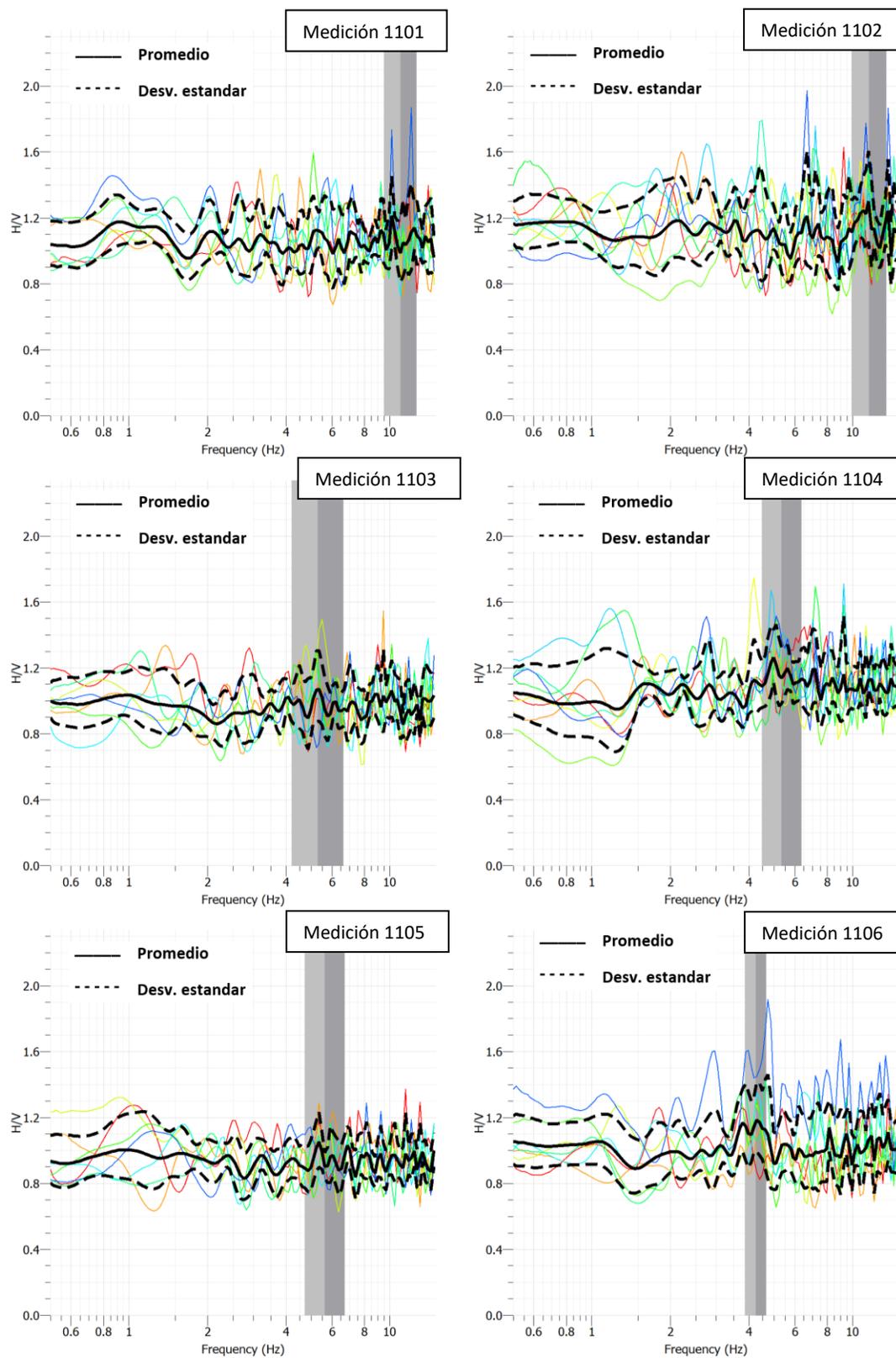
SECTOR 10

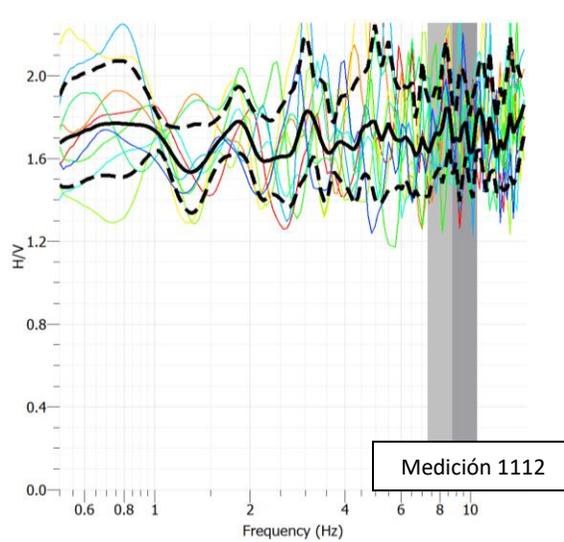
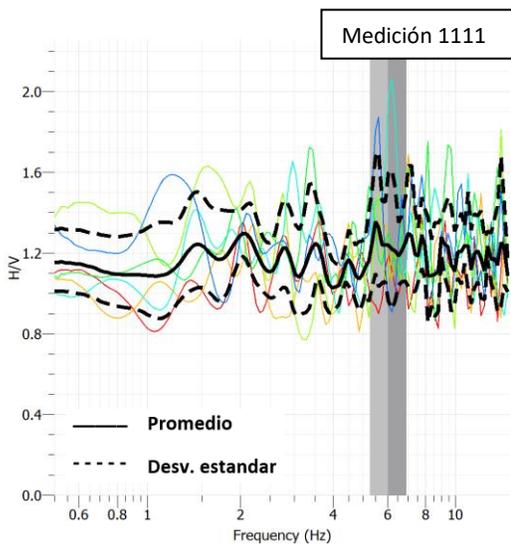
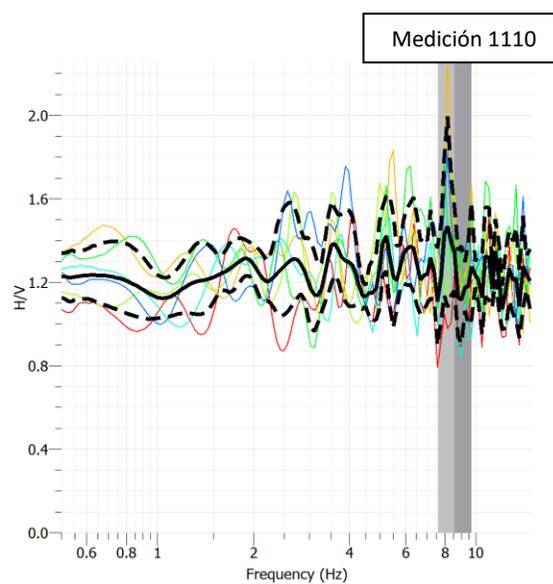
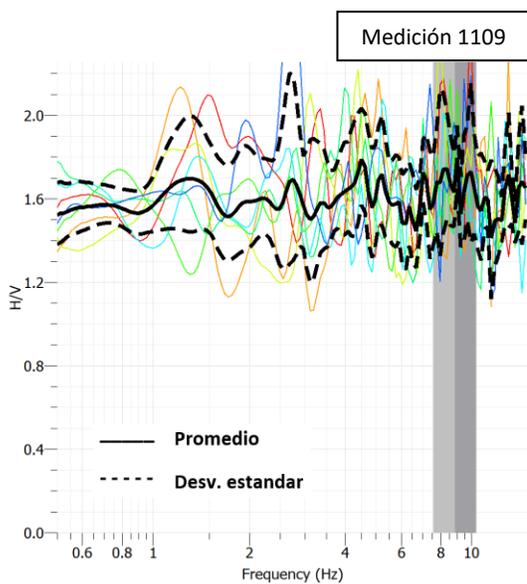
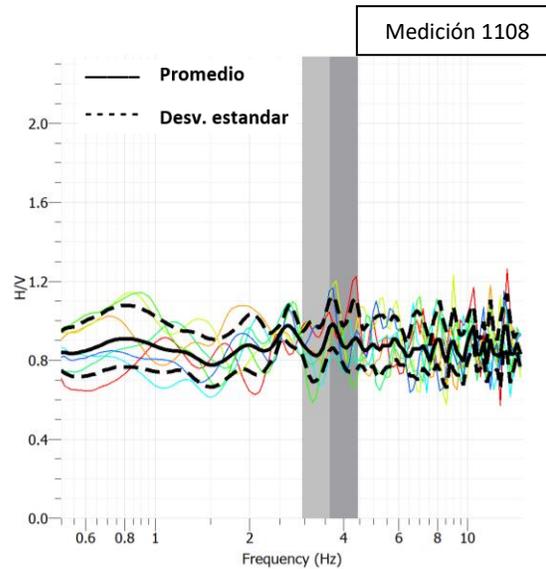
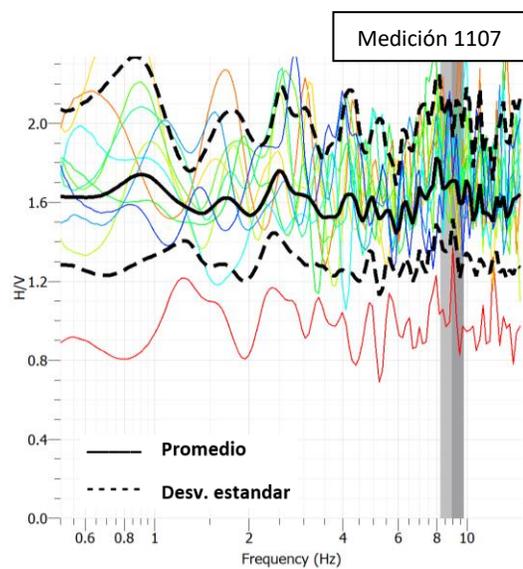


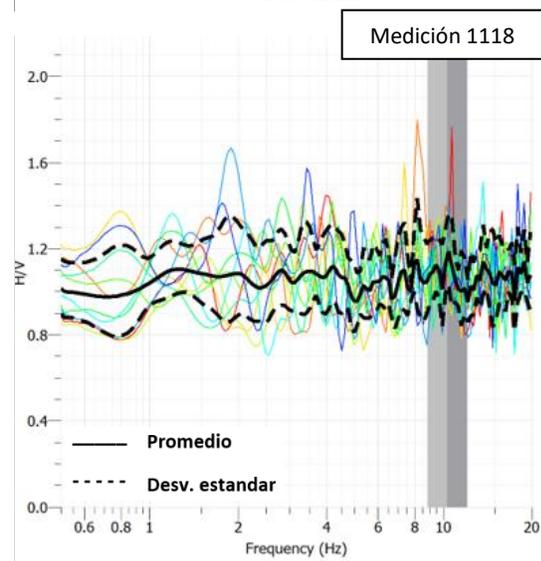
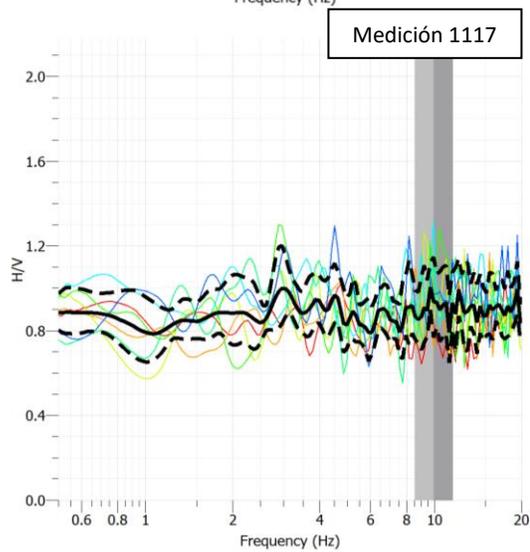
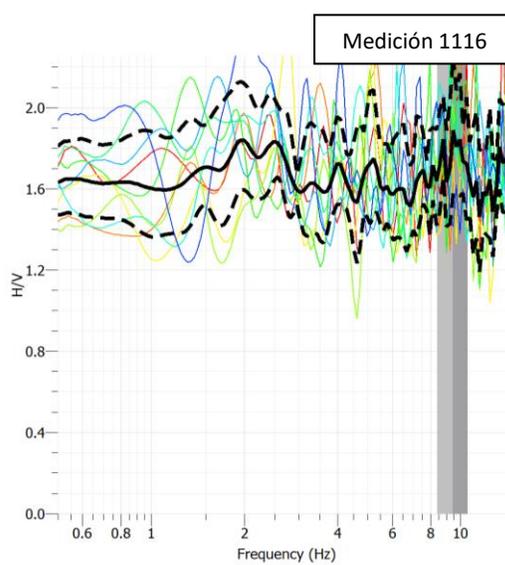
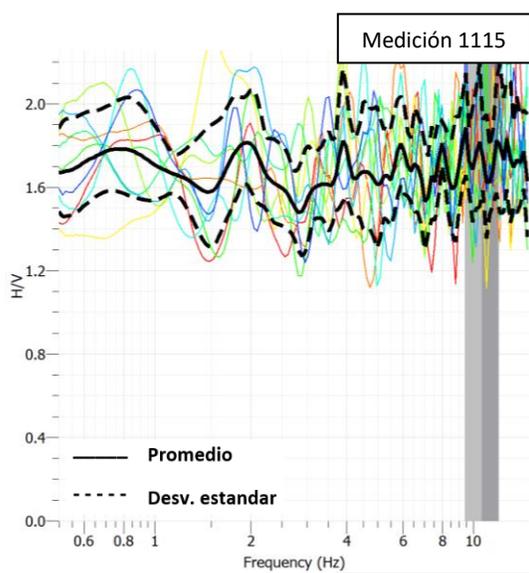
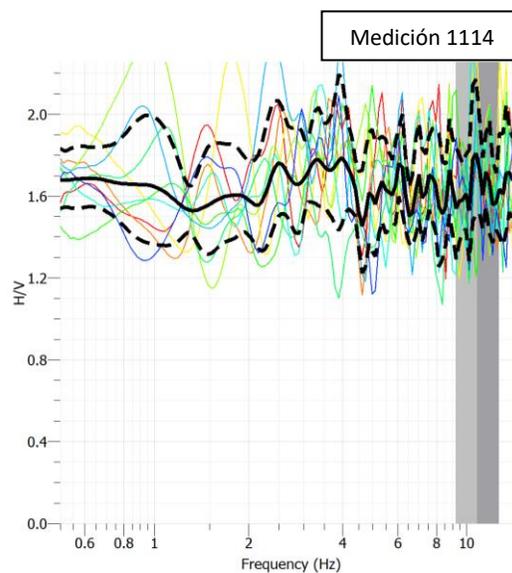
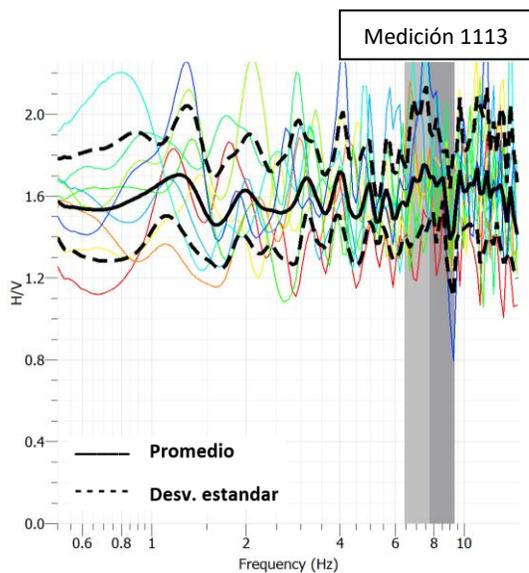


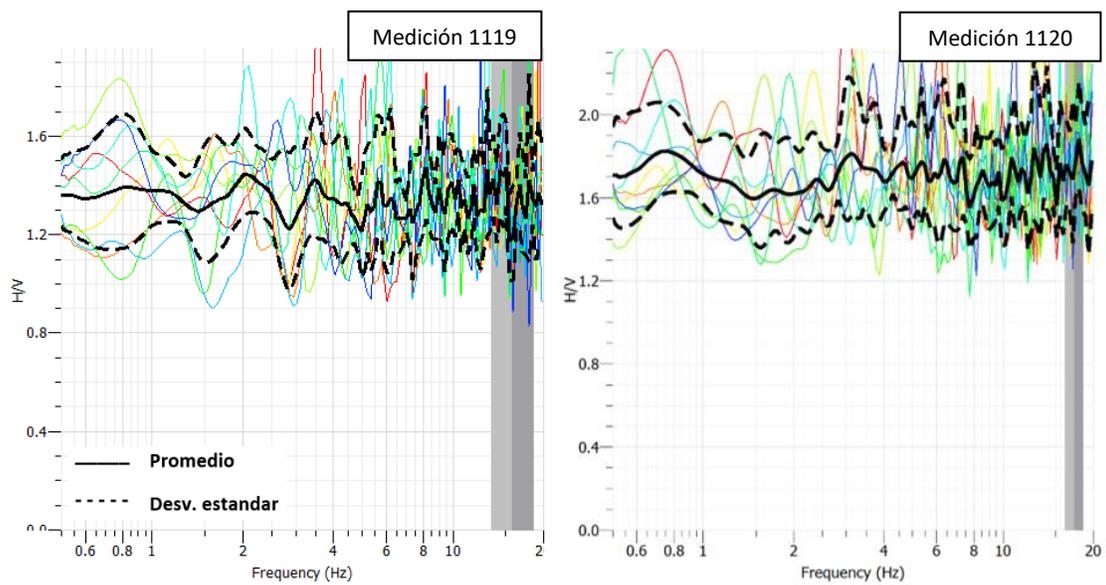


SECTOR 11

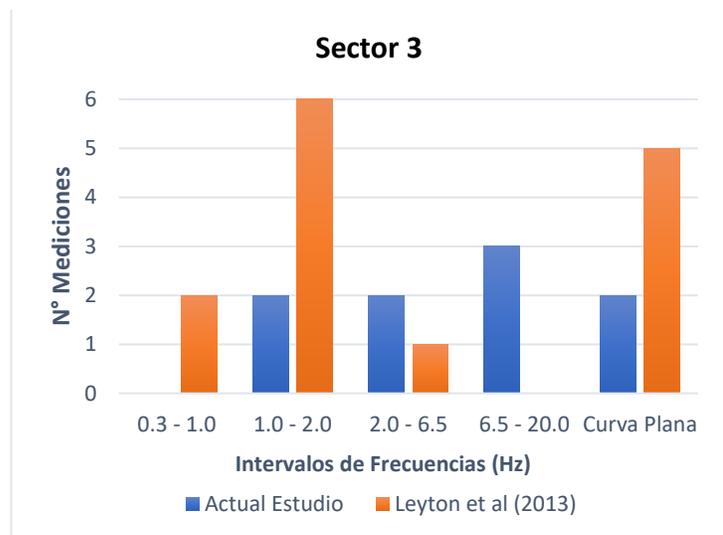
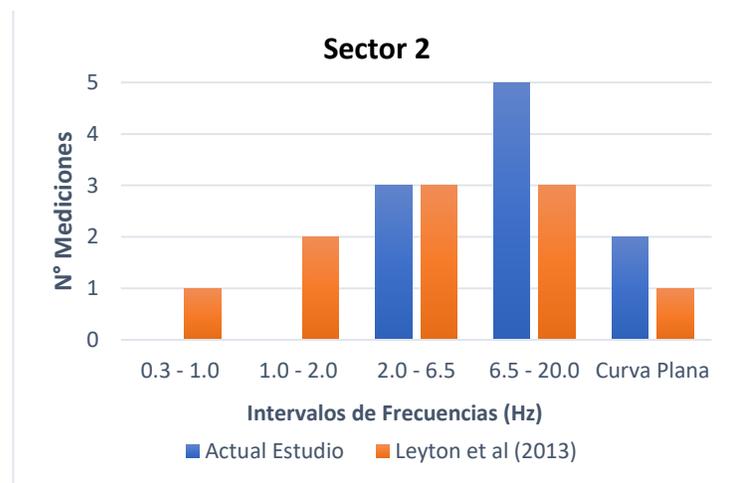
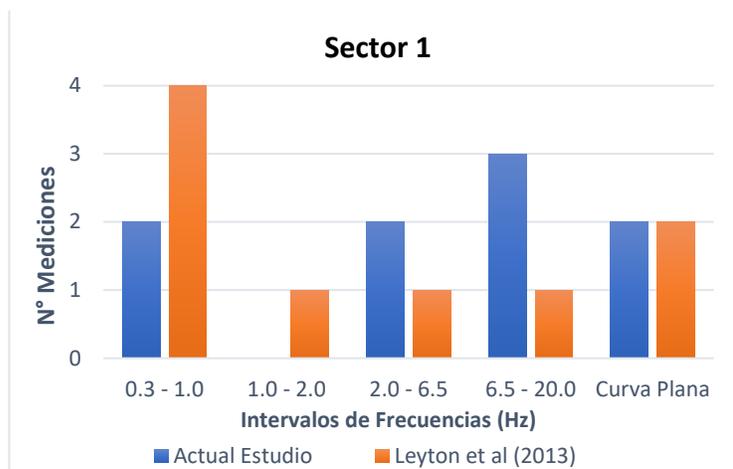


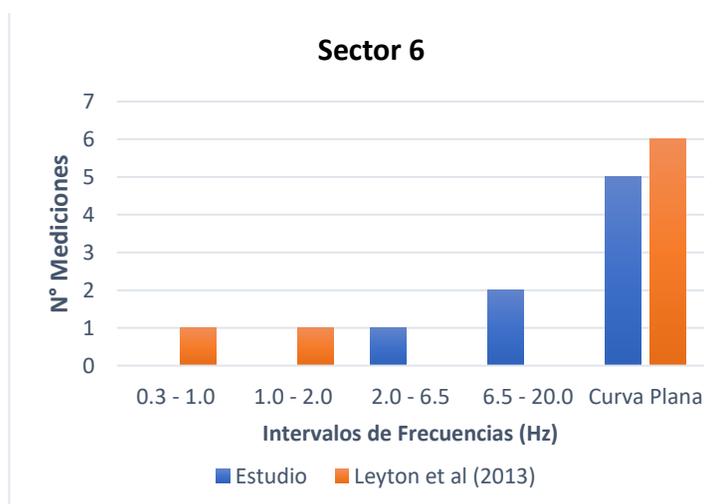
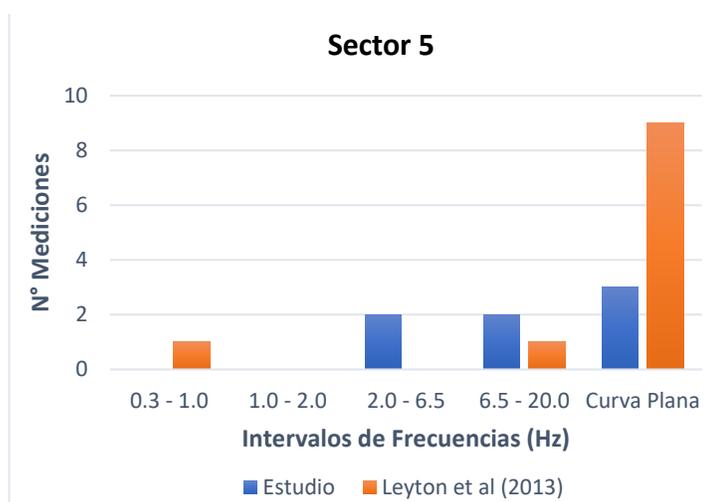
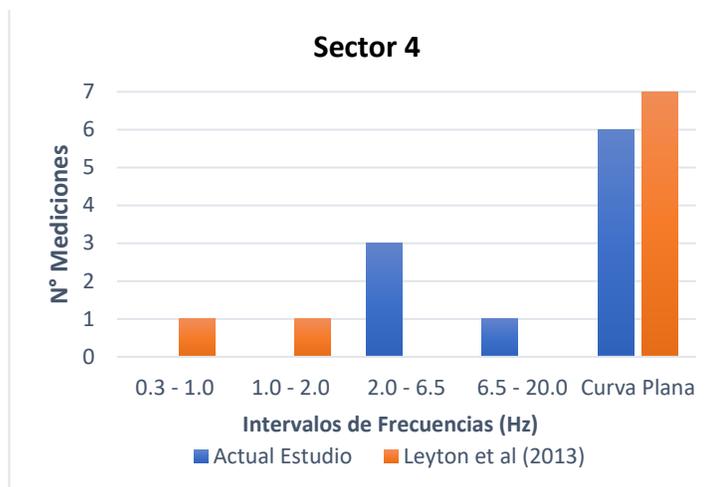


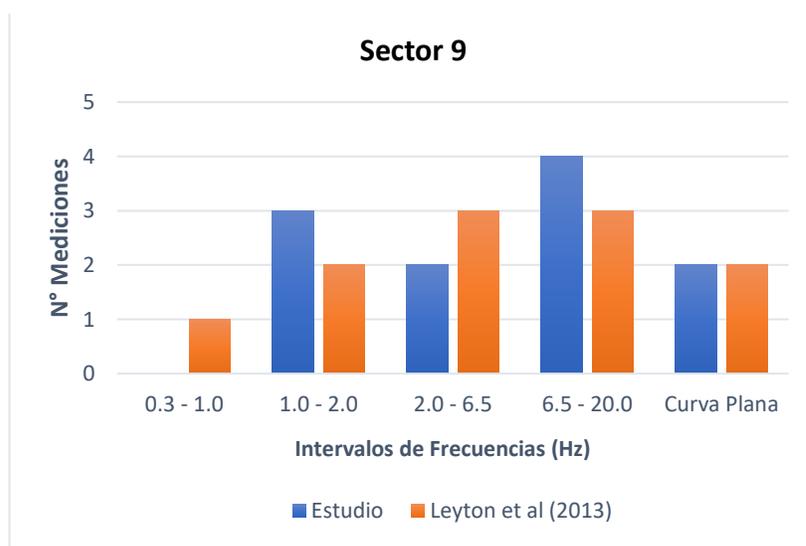
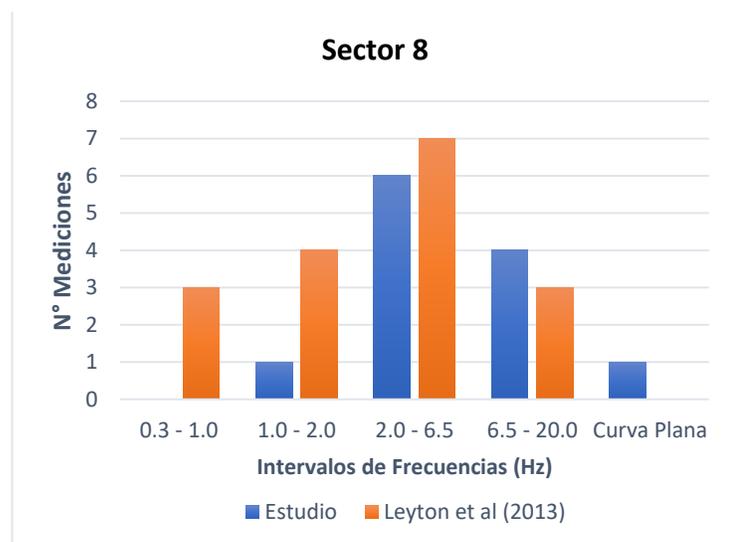
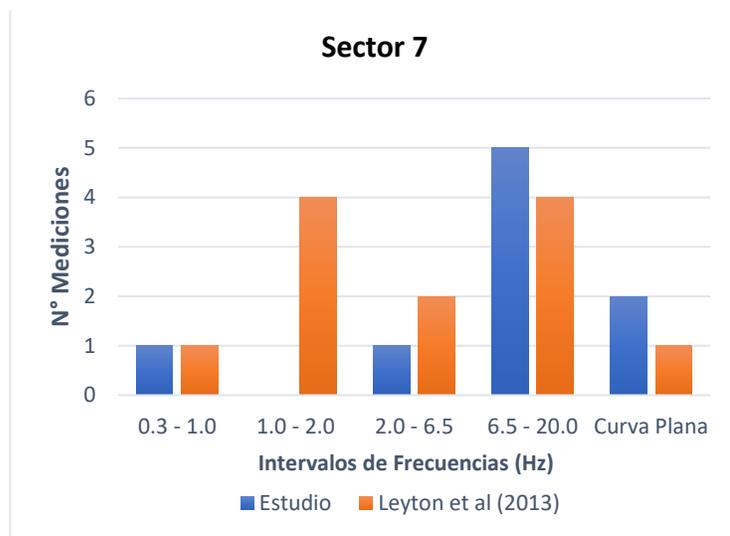


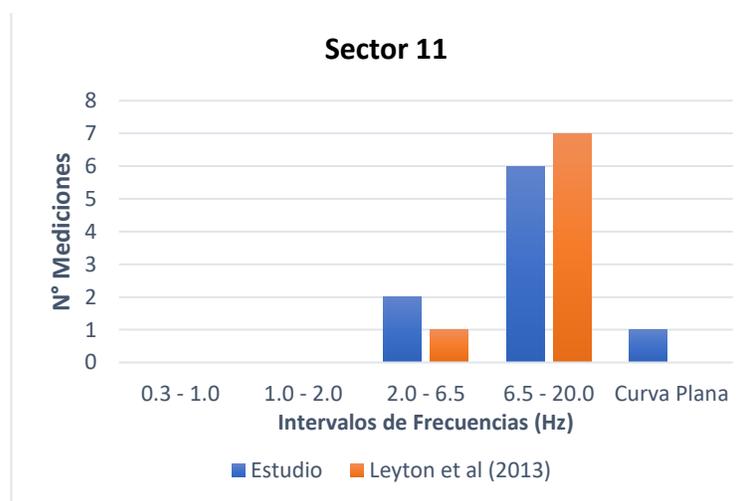
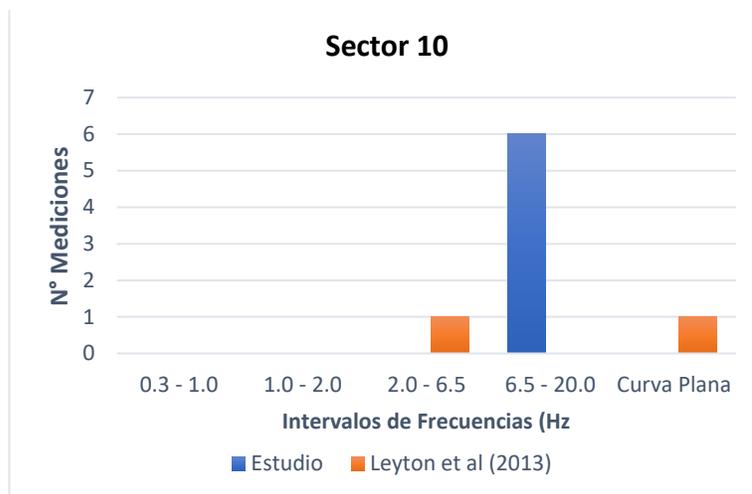


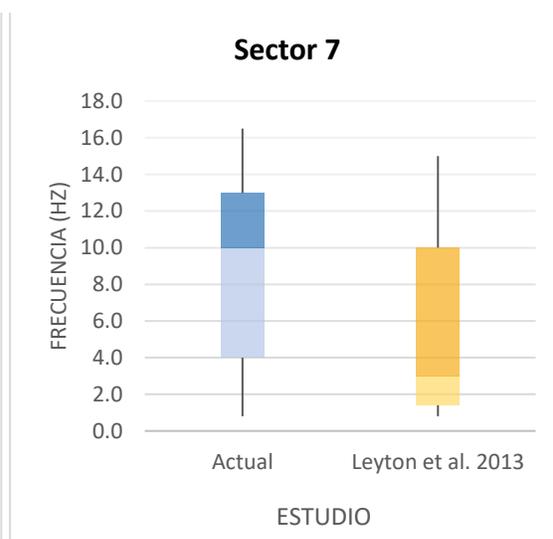
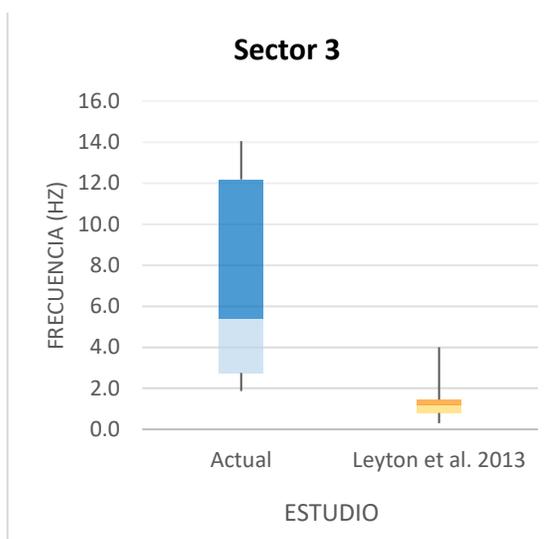
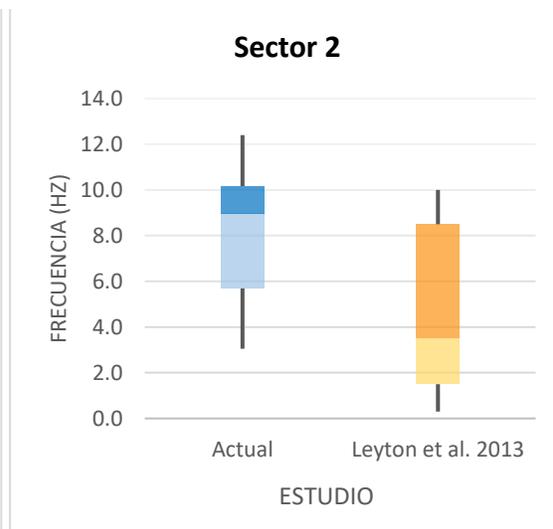
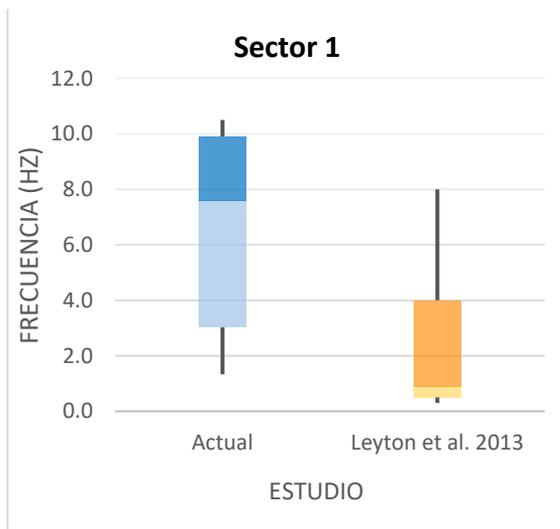
ANEXO 3: Graficas cantidad de mediciones por intervalos

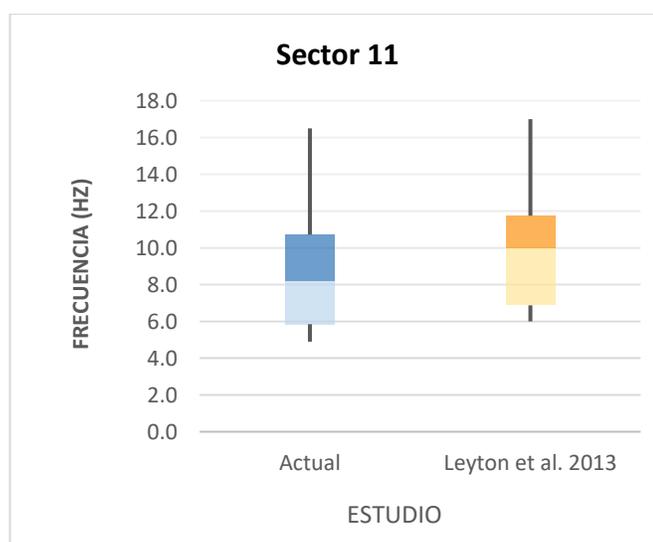
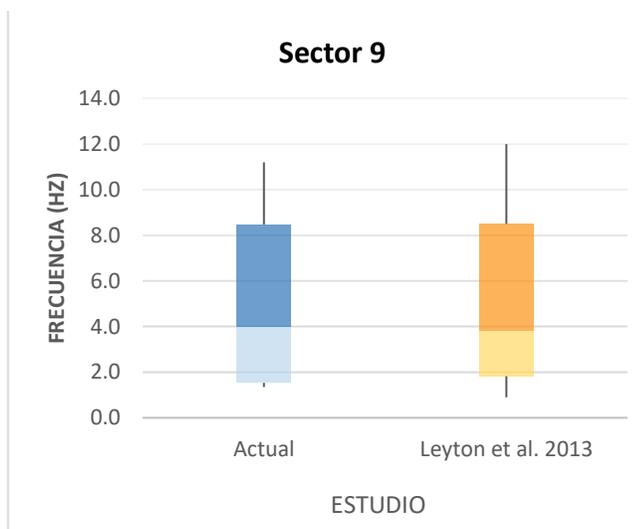
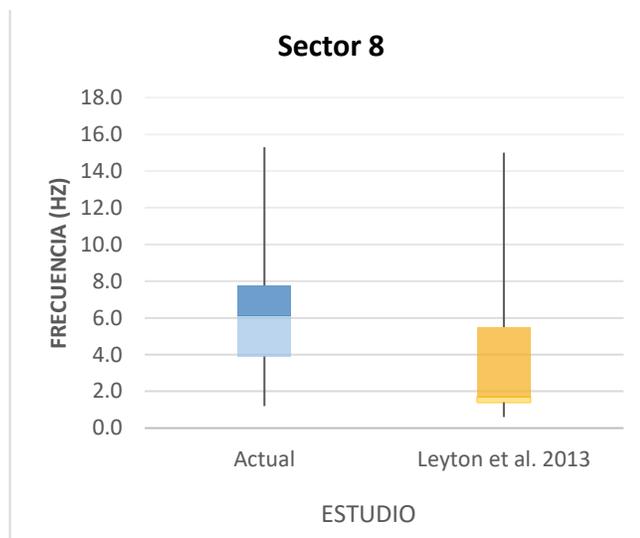








ANEXO 4: Distribución de frecuencias



BIBLIOGRAFÍA

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremores. *Bull Earthquake Res Inst.* pp. 415- 456.
- Alfaro, A.; M. Navarro; J. Sánchez; L. Pujades. (1999). "Microzonificación sísmica de Barcelona usando el método de Nakamura. Ventajas y limitaciones" Murcia, España. pp. 273-278.
- Araneda, M., Monge, J., Avendaño M. (1996). Microzoning studies in the Maule region, Chile. In *Proceedings of the eleventh World Conference on Earthquake Engineering*. Paper N° 702.
- Alvarado, D., & Valdebenito, G. (2012). Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Valdivia. Etapa 1: Determinación del Peligro Uniforme y Caracterización Dinámica de los Suelos Empleando la Técnica de la Razón Espectral de Nakamura. Memoria de Título, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Astroza, M.; F. Cabezas; M. Moroni; L. Massone; S. Ruiz; E. Parra; F. Cordero; A. Mottadelli. (2010). "Intensidades sísmicas en el área de daños del terremoto del 27 de febrero de 2010" Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil, p. 23.
- Astroza, M., Ruiz, S., & Astroza, R. (2012). Damage assessment and seismic intensity analysis of the 2010 (Mw 8.8) Maule earthquake. *Earthquake Spectra*, Vol. 28, pp. 145-164.
- Bard, P. (1998), "Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation?. The effects of Surface Geology on Seismic Motion", Irikura, Kudo, Okada y Sasatani (eds).
- Bard, P. y SESAME-Team. (2004). Guidelines for the implementation for the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations-measurements, processing and interpretations, SESAME European research project EVG1-CT-2000-00026.
- Barrientos, S. (1980). "Regionalización Sísmica de Chile" Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias con Mención en Geofísica, Departamento de Geofísica. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Barrientos, Sergio (2010). Informe Técnico Actualizado: Terremoto Cauquenes 27 febrero 2010, Servicio Sismológico, Universidad de Chile.
- Bonnefoy-Claudet, S.; C. Cornou; P. Y. Bard; F. Cotton; P. Moczo; J. Kristek; D Fähr. (2006). "H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations" *Geophysics. J. Int.*, 167: pp. 827-837.

- Campillo, M., Bard, P. Y., Sánchez-Sesma, F., & Chávez-García, F. J. (1994). El terremoto de Michoacán de septiembre de 1985: efectos de fuente, trayecto y sitio. *Física de la Tierra*, (6), pp. 157-200.
- Centro Sismológico Nacional (CSN). Universidad de Chile. Sismicidad y Terremotos en Chile. Consultado: 30-04-2021, disponible en: http://www.sismologia.cl/pdf/difusion/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf
- Ciencia Tierra: ondas sísmicas. Consultado: 22-05-2021, disponible en: http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ss_micas.html
- Chavez-Garcia. F.J., and J. Cuenca. (1996). Site effects in Mexico City urban zone. A complementary study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 15. pp. 141-146.
- Contreras, Juan P.; Arenas, Manuel; Falcón, María F. (2010). Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de Curicó, Región del Maule. Mapa 14-2: Peligro de licuefacción. In *Geología para la reconstrucción y la gestión del riesgo*, 1. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-10-43: 12 p., 21 mapas diferentes escalas. Santiago.
- Efecto de sitio. Laboratorio de ingeniería sísmica, Universidad de Costa Rica. Consultado: 27-06-2021, disponible en: <http://www.lis.ucr.ac.cr/239>
- Fäh, D., E. Rüttener, T. Noack and P. Kruspan (1997). Microzonation of the city of Basel, *Journal of Seismology* Vol. 1, pp. 87-102.
- Gajardo, E., Lomnitz, C. (1960). "Seismic provinces in Chile". *Proc of the 2nd world conference on Earth. Eng.* Vol 3, pp. 1529-1540.
- Geopsy Project. Consultado: 04-10-2021, disponible en: <https://www.geopsy.org/>
- Gitterman, Y., Zaslavsky, Y., Shapira, A., & Shtivelman, V. (1996). Empirical site response evaluations: case studies in Israel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15(7), pp. 447-463.
- Guéguen, P. Chatelain, J., Guillier, B., (1997). Microzonificación de Quito, Ecuador. Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional Quito.
- Gómez, V. H. (2013). Estudio de la robustez de la estimación espectral de la técnica H/V de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos. Valdivia.

- Ilustre Municipalidad de Curicó (2017). Actualización plan de desarrollo comunal 2017-2024 Ilustre Municipalidad de Curicó.
- Kanai, K. (1957). "The requisite conditions for predominant vibration of ground" Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.
- Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, New Jersey.
- Konno, K; T. Ohmachi (1998). "Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor" Bull. Seism. Soc. Am. 88-1: pp. 228-241.
- Labbé J.C., A. Goldasck,, and G. R. Saragoni (1976). "Algunas relaciones macrosísmicas para la evaluación del riesgo sísmico en Chile". Segundas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. p. F7.1-F7.14 (V.2).
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bulletin of the seismological society of America, 83(5), 1574-1594.
- Leyton, F., Ruiz, J., Campos, J., & Kausel, E. (2009). Intraplate and interplate earthquakes in Chilean subduction zone: A theoretical and observational comparison. Physics of the Earth and Planetary interiors, Vol. 175 (1-2), pp. 37-46.
- Leyton, Felipe, Ruiz, Sergio, & Sepúlveda, Sergio A. (2010a). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. Andean geology, Vol. 37(2), pp. 455-472.
- Leyton, F.; S. Sepúlveda; M. Astroza; S. Rebolledo; L. González; S. Ruiz; C. Fonca; M. Herrera; J. Lavado. (2010b). "Zonificación sísmica de la cuenca de Santiago, Chile" 10º Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Valdivia-Santiago, Chile. Paper N°11.
- Leyton, F., Arenas, M., & Contreras, J. P. (2012). Geología superficial, frecuencias predominantes de suelos y observaciones de licuefacción en Curicó tras el terremoto del Maule 2010. VII Congreso Chileno de Geotecnia, Universidad de Concepción.
- Leyton, F., Ruiz, S., Sepúlveda, S. A., Contreras, J. P., Rebolledo, S., & Astroza, M. (2013). Microtremors' HVSR and its correlation with surface geology and damage observed after the 2010 Maule earthquake (Mw 8.8) at Talca and Curicó, Central Chile. Engineering geology, Vol. 161, pp. 26-33.
- Madariaga, Raúl. (1998). Sismicidad de Chile. Física de la Tierra, N°10, pp. 221-258.

- Martin, A. (1990). "Hacia una nueva regionalización y cálculo del peligro sísmico en Chile". Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodriguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), pp. 901-911.
- Motazedian, D; J.A. Hunter; M. Belvaux; S. Sivathayalan; A. Pugin; L. Chouinard; K. KhaheshiBanab; H.L. Crow; M. Tremblay; D. Perret; P. Rosset (2010). "Seismic microzonation of Montreal and Ottawa, Canada" In proceedings 10th Canadian & 9th US National Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada.
- Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface" *Quarterly report of railway technical research institute* 30(1): pp. 25-33.
- Nogoshi, M.; T. Igarashi, (1971). "On the amplitude characteristics of microtremors (part 2)" *J. Seismol. Soc. Japan*, (in Japanese with English abstract).24: pp. 26-40
- Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I. S., Ocola, L. & Ellis, M. (1998). Space geodetic observations of Nazca-South America convergence across the central Andes. *Science*, Vol. 279, pp. 358-362.
- Papanikolaou, V. K., Karakostas, C. Z., & Theodoulidis, N. P. (2021). A Low-Cost Instrumentation System for Seismic Hazard Assessment in Urban Areas. *Sensors*, 21(11), 3618.
- Pasten, C. (2007). "Respuesta sísmica de la Cuenca de Santiago" Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención ingeniería geotécnica. Universidad de Chile. Santiago.
- Purnachandra, N, M. Ravi Kumar, T. Seshunarayana, A. Shukla, G. Suresh, Y. Pandey, R. Dharma Raju, S. Pimprikar, Chandra Das, K. Gahalaut, P. Mishra, H. Gupta (2011). "Site amplification studies towards seismic microzonation in Jabalpur urban area, central India" *Physics and Chemistry of the Earth*.
- Retamal, E.; C. Norambuena; J. Veiga; P. Ortigosa. (1969). "Microrregionalización sísmica de la ciudad de Valdivia" *Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica*. Lima, Perú. Paper N° 21.

- Ruiz, S.; G.R. Saragoni (2005a). "Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos principales de sismogénesis y los efectos del suelo". Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción. Paper N° 9.
- Ruiz, S. y Saragoni, G. R. (2005b). "Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile de terremotos interplaca tipo thrust considerando los efectos del suelo y las asperezas". IX Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción, Chile.
- Saragoni, G. R., Astroza, M., & Ruiz, S. (2004). Comparative study of subduction earthquake ground motion of north, central and south America. In 13th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada. Paper N° 104.
- Saragoni, G. R., J. Crempien, and R. Araya (1982). "Características experimentales de los movimientos sísmicos fuertes latinoamericanos" Revista del I.D.I.E.M, University of Chile, Chile, 21, 67 87.
- Schaad, C. y Saragoni, G. R., 1989. "Fórmulas de atenuación considerando el terremoto de Chile de 1985". 5tas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. p.379-388(V.1).
- Serafin, S., y Franco, J. (2017). Aportes para una nueva zonificación geotécnica de Viña del Mar: estimación de la profundidad del basamento rocoso en la cuenca del Marga-Marga a partir de mediciones espectrales H/V.
- SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería). (2003). Mapa Geológico de Chile, Versión Digital. Santiago, Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, scale 1: 1,000,000 (CD-ROM, version 1.0).
- Sherif, E.H; F, Elsayed Abdel-Azeem; O, Adel; E.A.M, Gad. 2011. "Seismic microzonation of Marsa Alam, Egypt using inversion HVSR of microtremor observations" Journal of Seismology, Volume 16, Issue 1, pp.55-66.
- Silva Bustos, N. (2008). Caracterización y determinación del peligro sísmico en la Región Metropolitana. Memoria de Título, Universidad de Chile, Santiago.
- Strollo, A.; S. Parolai; D. Bindi; L. Chiauzzi; R. Pagliuca; M. Mucciarelli; J. Zschau, Jochen. 2011. "Microzonation of Potenza (Southern Italy) in terms of spectral intensity ratio using joint analysis of earthquakes and ambient noise" JF. Bulletin of Earthquake Engineering.
- Tapia, Ricardo (2015). Terremoto 2010 en Chile y vivienda social: Resultados y aprendizajes para recomendación de políticas públicas (Tesis Doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Superior de Arquitectura.

- Teves-Costa, P., Matias, L., & Bard, P. (1996). Seismic behaviour estimation of thin alluvium layers using microtremor recordings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15(3), pp. 201-209.
- Toshinawa, T., Taber and J.J. Berrill, (1997). Distribution of ground motion intensity inferred from questionnaire survey, earthquake recordings, and microtremor measurements a case study in Christchurch. New Zealand, during the 1994 Arthurs Pass earthquake, *Bull. seism. Soc. Am.*, 87-2, pp. 356-369.
- Tsuboi, C. (1958). Earthquake province-domain of sympathetic seismic activities. *Journal of Physics of the Earth*, 6(1), pp. 35-49.
- Urbana E&D. (2010). Informe N°1 PRES Curicó. Diagnóstico urbano ciudad de Curicó.
- Welkner, P. (1964). Estudio de la sismicidad en Chile y su aplicación al cálculo antisísmico. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Valderrama González, J. A. (2020). Aplicación del método NAKAMURA H/V, para el estudio de sedimentos lacustres en la población Vergara, Viña del Mar, Chile (Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello).

