

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LA CUENCA DE QUITO APLICANDO EL MÉTODO DE LAS COMPONENTES HORIZONTALES A VERTICAL (H/V) A TRAVÉS DE RUIDO AMBIENTAL

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA GEÓLOGA**

OPCIÓN: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

MARÍA FERNANDA REYES ONCE

mafer_14agst@hotmail.com

maría.reyes@epn.edu.ec

DIRECTORA: PhD. ALEXANDRA ALVARADO

aalvarado@igepn.edu.ec

alexandra.alvarado@epn.edu.ec

Quito, Febrero de 2020

DECLARACIÓN

Yo, María Fernanda Reyes Once, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

MARÍA FERNANDA REYES ONCE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María Fernanda Reyes Once, bajo mi supervisión.

PhD. Alexandra Alvarado

DIRECTORA

AGRADECIMIENTOS

A Dios por levantarme y alentarme a seguir cuando ya no tenía fuerzas, a la vida por poner a personas maravillosas a lo largo de este camino, por los buenos y malos momentos que me hicieron una mejor persona.

A mis padres, por apoyarme en este camino al que llamamos vida. En especial a mi madre, por ser mi inspiración y modelo a seguir, por cada consejo que me ha dado, porque ella me enseñó que lo bueno se tarda, pero llega, que la familia es primero que todo, porque pese a las adversidades siempre hay que seguir pa' lante, por su gran corazón, por ser la mejor madre del mundo, por enseñarme a defender mis pensamientos y no callarme ante las injusticias. Nos ha enseñado a luchar por nuestros sueños, GRACIAS POR TANTO AMOR.

A mis hermanos Santy, Gaby y Christian, los mejores hermanos y amigos que me dio la vida, han estado siempre para mí, gracias por sus consejos, por su apoyo y su gran corazón. Espero que siempre estemos juntos.

A mis sobrinos Amir y Samuel por alegrarnos el alma con su llegada.

Deseo expresar mi gratitud al Instituto Geofísico y a las Dras. Aurore Laurendeau y Alexandra Alvarado, por la oportunidad de formar parte de este proyecto y permitirme utilizar la información para realizar la presente tesis. Además, un agradecimiento especial al Área de Sismología.

A Dr. Mario Ruiz, por sus palabras de apoyo, por sus consejos como profe y amigo, por darse el tiempo de revisar la tesis y hacer las correcciones necesarias.

A Dra. Mónica Segovia, por ser una de las mejores personas que he conocido en la vida, por sus excelentes consejos durante la realización de este trabajo y por todo el apoyo brindado mientras lo realizaba.

A Daniel Pacheco, su tiempo y paciencia para despejar mis dudas, además por sus consejos para la realización de este proyecto. MUCHÍSIMAS GRACIAS.

A Fabián Bonilla, Diego Mercerat, Françoise Courboux, Philippe Guéguen y Sandro Vaca por su ayuda y sus consejos para el desarrollo de este proyecto.

A mi familia ONCE, por los buenos momentos que vivimos durante la infancia, en especial a mis primas Cindy, Tammy, Karol, Cielo, Tiphany, Jhoselyn y Keysha.

A mis amigos de PREPO, Robert, Daya, Jimmy y Eugenio por los buenos momentos, en especial a mi mejor y verdadero amigo Robert gracias por salvarme la vida en varias ocasiones. Los quiero amigos.

A mis amigos Dianita, Sammy, Vale, JA, Pao, Danny, Vero y Jhos, por apoyarme incondicionalmente, por ser las mejores personas del mundo, creo que me faltarían hojas para describir lo bueno que son cada uno de ustedes. Gracias por todo, siempre estarán en mi corazón, sin ustedes no hubiera sido lo mismo.

Gracias a todos los que de alguna manera me acompañaron a lo largo de este viaje. A los que están a mi lado y a los que no. Esto recién empieza

Gracias totales.

DEDICATORIA

*A mi madre Aida,
mis hermanos y
sobrinos*

*“El suelo natural nunca es uniforme,
sus propiedades cambian de punto a punto,
mientras que nuestro conocimiento de sus propiedades
se limita a los pocos sitios en que las muestras han sido recogidas”*
Karl Von Terzaghi

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	1
CERTIFICACIÓN	2
AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA	5
ÍNDICE DE CONTENIDO	7
ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABLAS	14
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. La Cuenca de Quito	17
1.2. La respuesta sísmica de la cuenca de Quito y la importancia de su caracterización .	18
1.3. Alcance	19
1.4. Objetivos	21
1.4.1. Objetivo General.....	21
1.4.2. Objetivos Específicos	21
1.5. Área de Estudio	22
2. MARCO GEODINÁMICO DE LA CUENCA DE QUITO	23
2.1. Geología Regional	23
2.1.1. Regiones y Geología	23
2.1.2. Contexto geodinámico	23
2.1.3. Volcanismo Cuaternario.....	25
2.1.4. Fallamiento Continental	27
2.2. Geología y tectónica locales	29
2.2.1. Depresión Interandina (ID o IAV)	29
2.2.2. Sistema de Fallas Activas de Quito (QFS)	30
2.2.3. Descripción Geológica de la Cuenca de Quito	31
2.2.4. Descripción general de los centros volcánicos en los alrededores del Valle Interandino Central.....	32
2.2.4.1. Complejo Volcánico Pichincha (CVP).....	32
2.2.4.2. Complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca (CVAN).....	33
2.2.4.3. Volcán Casitagua	34

2.2.4.4.	Volcán Pululahua	34
2.2.5.	Formaciones geológicas cuaternarias de la subcuenca de Quito.....	36
2.2.5.1.	Formación Machángara.....	37
2.2.5.2.	Formación Mojanda.....	37
2.2.5.3.	Formación Cangahua.....	37
2.2.6.	Depósitos Holocénicos	38
2.2.6.1.	Depósitos del Pululahua.....	38
2.2.6.2.	Depósitos la Carolina	38
3.	RAZÓN ESPECTRAL H/V CON EL RUIDO SÍSMICO AMBIENTE	39
3.1.	Ruido Sísmico Ambiente.....	39
3.2.	Ondas superficiales en el ruido sísmico	40
3.2.1.	Dispersión de ondas superficiales	41
3.2.2.	Técnica de Nakamura o Cálculo de Razones Espectrales.....	42
3.2.2.1.	Determinación de la frecuencia fundamental mediante la técnica de razones espectrales.....	44
3.3.	Confiabilidad	46
3.3.1.	Criterios SESAME: Curva H/V confiable y Pico Claro	46
3.2.2	Clasificación de Curvas H/V (SESAME, 2004).....	48
3.3.2.	Pico Claro	48
3.3.3.	Curva Plana o Pico con Baja Amplitud en Frecuencias Bajas.....	49
3.3.4.	Curvas H/V con pico Ancho o Múltiples picos	49
3.3.5.	Curvas H/V con dos Picos	50
3.3.6.	Picos agudos y de origen industrial	51
4.	METODOLOGÍA.....	52
4.1.	Instrumentación	54
4.2.	Metodología de trabajo de campo	54
4.2.1.	Acoplamiento del sensor en el suelo.....	55
4.2.2.	Instalación del Sensor	55
4.2.3.	Condiciones del Clima	55
4.2.4.	Perturbaciones	55
4.2.5.	Duración y frecuencia de muestreo	55
4.2.6.	Instalación de la estación:.....	57
4.3.	Metodología de procesamiento	60
4.3.1.	Conversión de Archivos.....	61

4.3.2.	Procesamiento de los datos GEOPSY	61
4.3.3.	Obtención de la Curva H/V en Matlab.....	66
4.4.	Análisis de sensibilidad de la curva mHVSr de acuerdo a las características de los sensores.....	66
5.	RESULTADOS	70
5.1.	Campaña 2000 (IG-EPN).....	70
5.1.1.	Curvas H/V con un pico claro y múltiples picos.....	71
5.1.2.	Curvas H/V con Pico no SESAME	74
5.1.3.	Curvas H/V planas.....	78
5.2.	Campaña 2012	80
5.3.	Curvas H/V: Campaña 2016	83
5.4.	Curvas H/V: Campaña 2016, 2017 a2018-Estaciones Temporales.....	85
6.	DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
6.1.	Descripción de las zonas determinadas en función a la frecuencia fundamental (f_0). 90	
6.2.	Distribución de la segunda frecuencia en la cuenca de Quito.....	100
6.3.	Recomendaciones	103
	BIBLIOGRAFÍA	104
	ANEXOS	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 (a) Mapa del Ecuador, (b) Mapa de la provincia de Pichincha y (c) Mapa de la cuenca de Quito y sus límites, se extiende al norte hasta Pomasqui, al sur hasta Guamaní, al este por las lomas alargadas de Puengasí, Ilumbisí y El Batán-La Bota, y al oeste con los complejos volcánicos Atacazo-Ninahuilca (CVAN), Pichincha (CVP), y Pululahua, modificada de Robin et al, (2010).	22
Figura 2.1 Mapa tectónico de Ecuador. Mapa tectónico de Ecuador. La placa de Nazca converge oblicuamente con respecto a la placa sudamericana estable (SOAM) a 58 mm / año (Kendrick et al., 2003), y relativamente a la Sliver Nor-Andino (NAS) a 47 mm / año (Nocquet et al., 2014). El modelo de acoplamiento interseísmico (ISC) de Chlieh et al. (2014) se muestra por los contornos coloreados. Con respecto a América del Sur estable, el NAS se mueve hacia NNE a ~9 mm / año a lo largo del sistema de fallas Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP) (Nocquet et al., 2014; Alvarado et al., 2016). El Inca Sliver se está moviendo hacia el SE a ~5 mm / año (Nocquet et al., 2014; Villegas-Lanza et al., 2016), induciendo un acortamiento en el Cinturón Sub-andino Oriental. La fractura de Grijalva separa dos dominios de la placa de Nazca con diferentes edades y densidades (Lonsdale, 2005). Fallas: SLL: lineamiento de San Lorenzo; EF: Falla de Esmeraldas; EAF: Falla el Ángel; JiF: Falla de Jipijapa; Py: zona de Pisayambo; QFS: Sistema de fallas activo de Quito. Ciudades: E: Esmeraldas; B: Bahía; M: Manta; G: Guayaquil; Q: Quito; L: Latacunga; C: Cuenca; R: Riobamba. Tomado de Vaca et al., (2019).	24
Figura 2.2 Mapa de los volcanes Cuaternario del Ecuador (Bernard y Andrade, 2011).	26
Figura 2.3 Mapa de la tectónica activa del Ecuador. Las líneas rojas continuas representan segmentos de fallas importantes y su cinemática. Las líneas negras punteadas indican las principales fallas. Las líneas negras discontinuas indican las zonas de suturas principales (después de Litherland y Zamora, 1993; Aspden y Litherland, 1992; Hughes y Pilatasig, 2002; Jaillard et al., 2009). El recuadro en el margen superior izquierdo representa el entorno geodinámico regional (Audemard y Audemard, 2002). Sliver Norandino: NAS; Falla de Cosanga-Méndez, según lo definido por Aspden y Litherland [1992]: Cosanga-MF; Sutura Peltetec: Peltetec; Pujilí Melange Suture: Pujili; Falla de Jubones: Jubones; Zona de cizallamiento de Toachi: Toachi; Zona de Pisayambo: Py. QFS: Sistema de fallas activo de Quito. Ciudades: Quito: Q; Latacunga: L; Cuenca: C; Riobamba: R; Guyayaquil: G. Tomado de Alvarado et al. (2016).	28

Figura 2.4 (a) Mapa Geomorfológico del Sistema de Fallas de Quito, tomado de Alvarado, (2012) y (b) vista tridimensional de la cuenca en el Valle Interandino Central. Modificado de Alvarado et al., (2014).	31
Figura 2.5 Mapa Geológico del Complejo Volcánico Pichincha, tomado de Robin et al., (2010).	33
Figura 2.6 Mapa Geológico de Complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca, tomado de Hidalgo, (2006).	34
Figura 2.7 Mapa Geológico del Complejo Volcánico Pululahua, tomado de Vásquez, (2015).	35
Figura 2.8 Estratigrafía de la cuenca de Quito-San Antonio y Guayllabamba. Modificada de Villagómez, (2003).	36
Figura 3.1 Ondas Rayleigh con un movimiento radial y vertical y ondas Love con un movimiento transversal a la propagación, tomado de (https://misistemasolar.com/ondas-sismicas).	41
Figura 3.2 Ilustración del modelo simple asumido para la interpretación de la relación H/V de ruido sísmico ambiente según lo definido por Nakamura 1989.	43
Figura 3.3 Respuestas espectrales teóricas y experimentales en modelos multidimensionales, 1D, 2D y 3D (Bard, 1999).	45
Figura 3.4 Ejemplo de curva H/V que exhibe un pico claro, (f_0) originado por un contraste de impedancia en profundidad. La línea roja gruesa es el promedio de las componentes horizontales sobre la vertical y las líneas rojas más delgadas son los valores $+\sigma$ y $-\sigma$ de la desviación estándar (Proyecto SESAME).	48
Figura 3.5 Ejemplo de curva H/V plana. La línea roja gruesa es el promedio de las componentes horizontales sobre la vertical y las líneas rojas más delgadas son los valores $+\sigma$ y $-\sigma$ de la desviación estándar (Proyecto SESAME).	49
Figura 3.6 Ejemplo de curva H/V que exhibe múltiples picos, (f_1), (f_2) y (f_3) asociados a efectos topográficos. La línea roja gruesa es el promedio de las componentes horizontales sobre la vertical y las líneas rojas más delgadas son los valores $+\sigma$ y $-\sigma$ de la desviación estándar (Proyecto SESAME).	50
Figura 3.7 Ejemplo de curva H/V que exhibe dos picos, (f_0) y (f_1) asociados a dos contrastes de impedancia en profundidad. La línea roja gruesa es el promedio de las componentes horizontales sobre la vertical y las líneas rojas más delgadas son los valores $+\sigma$ y $-\sigma$ de la desviación estándar (Proyecto SESAME).	51

Figura 3.8 Ejemplo de curva H/V que exhibe un pico industrial (f_1) originado por actividades antrópicas. La línea roja gruesa es el promedio de las componentes horizontales sobre la vertical y las líneas rojas más delgadas son los valores $+\sigma$ y $-\sigma$ de la desviación estándar (Proyecto SESAME)..... 51

Figura 4.1 Mapa de ubicación de los registros de ruido sísmico ambiente: los círculos celestes representan la Campaña 2000 (L4-3D), los triángulos morados representan las medidas tomadas por Naya-Alfonso et al., (2012) (Lennartz 5s), los cuadrados azules representan la Campaña de 2016 (Trillium 20 s) y los círculos amarillos y tomates representan las estaciones temporales (CMG-40T y Trillium 120)..... 53

Figura 4.2 Ejemplos de cómo se instalaron los sensores..... 58

Figura 4.3 Hoja de campo establecida por el proyecto SESAME (2004) para el registro de ruido sísmico ambiente, campaña 2016. 59

Figura 4.4 Ejemplo de equipo instalado para la toma de ruido sísmico ambiente. 60

Figura 4.5 Programas utilizados para la obtención de la curva H/V de registros de ruido sísmico ambiente. 61

Figura 4.6 Ingreso de los registros de ruido sísmico ambiente al software GEOPSY..... 62

Figura 4.7 Registro de la señal en las tres componentes (vertical: Z; horizontales N y E) indicando las ventanas seleccionadas por el programa. Ejemplo: Garrochal que se encuentra al sur oriente de Quito, UTM (9962882.6; 774328.7). Tiempo de grabación utilizado en este caso 9 horas..... 63

Figura 4.8 Curva H/V obtenida mediante el procesamiento en el programa GEOPSY, estación GARO. 64

Figura 4.9 Esquema del cálculo de razones espectrales en un punto de ruido, realizado en 2000, proveniente de un sismómetro LEAS-SISMALP3 65

Figura 4.10 Obtención de la curva mediante el programa Matlab 2018, para una estación de 2000, se muestra las amplitudes y las frecuencias de los picos que superan una amplitud H/V mayor a 2. 66

Figura 4.11 Variación de la curva H/V de la estación QUIB al aplicar filtros de acuerdo, a la frecuencia de corte de cada sensor utilizado en las diferentes campañas para el registro de ruido sísmico ambiente..... 67

Figura 4.12 Variación de la curva H/V de la estación SOCA al aplicar filtros de acuerdo, a la frecuencia de corte de cada sensor utilizado en las diferentes campañas para el registro de ruido sísmico ambiente..... 68

Figura 4.13 Variación de la curva H/V de la estación ROQE al aplicar filtros de acuerdo, a la frecuencia de corte de cada sensor utilizado en las diferentes campañas para el registro de ruido sísmico ambiente.....	69
Figura 5.1 Curvas H/V con picos claros divididos en familias de acuerdo a la frecuencia a la que se encuentra el pico.	72
Figura 5.2 Ubicación de los puntos que tienen curvas H/V con pico y múltiples picos claros.	73
Figura 5.3 Curvas H/V con picos no SESAME divididas en familias de acuerdo a la frecuencia a la que se encuentra el pico.....	76
Figura 5.4 Distribución de las familias con curvas H/V con pico no SESAME.	77
Figura 5.5 Muestra las familias de las curvas H/V planas.	78
Figura 5.6 Distribución las familias con curvas H/V planas.	79
Figura 5.7 Curvas H/V para las medidas de ruido sísmico ambiente 2012.	82
Figura 5.8 Ubicación de los puntos de medidas de ruido sísmico ambiente 2016. Se presentan 10 curvas H/V representativas del comportamiento de la cuenca.....	84
Figura 5.9 Ubicación de las estaciones temporales 2016-2018 y las curvas H/V que caracterizan su ubicación.	87
Figura 6.1 Mapa con las diferentes zonas identificadas mediante la obtención de la frecuencia fundamental (f_0) en la cuenca de Quito. Las líneas entrecortadas agrupan los sitios con la misma frecuencia fundamental definiendo las zonas que se proponen.	89
Figura 6.2 Curvas H/V para las estaciones HCAL y CRON.	90
Figura 6.3 Curvas H/V con un pico claro entre 0.85 a 1 Hz de amplitud mayor a 2.5.....	91
Figura 6.4 Curvas H/V con un pico a 1 Hz de amplitud mayor un poco más de 2.	92
Figura 6.5 Estación HCAL con un pico claro a 1.37 Hz y de amplitud mayor a 2.5.....	93
Figura 6.6 Curvas H/V con picos anchos entre 0.5 a 1.2 Hz de amplitud mayor a 2.	94
Figura 6.7 Curvas H/V con picos anchos entre 0.48 a 1 Hz de amplitud mayor a 2.	95
Figura 6.8 Curvas H/V con pico ancho entre 0.2 a 10 Hz de amplitud un poco más de 2. ...	96
Figura 6.9 Zona 5: Familia 1, curvas H/V con más de un pico, cuyo primer pico H/V es menor a 0.5 Hz y de amplitud mayor a 2.5.	97
Figura 6.10 Zona 6: Familia 1 zona 6, curvas H/V con pico claro a 3.5 Hz de amplitud mayor a 3.....	98
Figura 6.11 Mapa de distribución de la segunda frecuencia en la cuenca de Quito.	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Criterios para una curva confiable. (Modificado de SESAME, 2004).	46
Tabla 3.2 Criterios para pico claro. (Modificado de SESAME, 2004).....	47
Tabla 4.1 Resumen de los equipos utilizados en el registro de ruido sísmico ambiente en las diferentes campañas realizadas en la cuenca de Quito.	54
Tabla 4.2 Valores recomendados de adquisición y procesamiento para análisis de relación espectral horizontal a vertical. (Tomado de Dal Moro, 2015).	56
Tabla 5.1 Muestra los valores de la frecuencia fundamental f_0 y el factor de amplificación obtenidas del conjunto de datos de la campaña 2012.	80
Tabla 5.2 Muestra los valores de la frecuencia fundamental f_0 y el factor de amplificación obtenidas del conjunto de datos de la campaña 2016.	83
Tabla 5.3 Muestra los valores de la frecuencia fundamental f_0 y el factor de amplificación obtenidas del conjunto de datos de las estaciones temporales.	85
Tabla 6.1 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 2, familia 1.	92
Tabla 6.2 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 2, familia 2.	93
Tabla 6.3 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 2, familia 3.	94
Tabla 6.4 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 3, familia 1.	95
Tabla 6.5 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 3, familia 2.	96
Tabla 6.6 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 4, familia 1.	97
Tabla 6.7 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 5, familia 1.	98
Tabla 6.8 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 6, familia 1.	99
Tabla 6.9 Modelo de velocidades para la onda P (V_p), tomado de Guerra, (2019).....	99
Tabla 6.10 Calculo de la profundidad promedio del basamento para el norte y sur de la cuenca de Quito.....	100

RESUMEN

Quito, la capital de Ecuador, está amenazada por un importante riesgo sísmico debido a las diferentes fuentes sismogénicas que rodean la ciudad y por la subducción de placa de Nazca. En particular, debido a su configuración como una cuenca superpuesta, las ondas sísmicas presentan una amplificación como ya se ha demostrado en análisis anteriores (Laurendeau et al, 2017). A partir del análisis de los datos acelerométricos registrados por la red RENAC, se ha encontrado una amplificación de baja frecuencia (~ 0.3 Hz) en la parte sur de la cuenca.

La relación espectral horizontal a vertical (H / V) de la técnica de ruido sísmico se ha utilizado ampliamente para la estimación del efecto del sitio y la exploración geofísica a través de la frecuencia fundamental del suelo.

El objetivo principal de este trabajo es estimar la frecuencia fundamental (f_0) de los registros de datos (mHVSR) para determinar las zonas que tienen un comportamiento similar dentro de la cuenca. Los datos de los 759 sitios de la campaña realizada en 2000, se analizaron. Tienen la ventaja de ser numerosos y estar bien distribuidos en la cuenca de Quito, pero los resultados están limitados a 1 Hz, debido a la frecuencia de corte de los sensores utilizados en ese momento. Se analizaron 90 sitios adicionales a partir de mediciones más recientes. Estos datos son menos numerosos, pero su respuesta es bajo 1 Hz, estos datos se usaron para completar la información del mHVSR de los datos de la campaña 2000.

Los resultados de este estudio muestran que la estructura de las capas cuaternarias profundas puede cambiar claramente la forma de la relación H/V, dando como resultado, diferentes frecuencias del suelo.

ABSTRACT

Quito, the capital city of Ecuador, is threatened by an important seismic hazard due to different seismogenic sources surrounding the city and from the Nazca plate subduction zone. In particular, due to its configuration as a piggy-back basin, the seismic waves present an amplification as it has already shown in previous analyses (Laurendeau et al, 2017). From the analysis of accelerometric data recorded by the RENAC network, a low frequency amplification (~ 0.3 Hz) has been ubiquitously found in the southern part of the basin.

The horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratio of the seismic noise technique has been used widely for site-effect estimation and geophysical exploration through the soil fundamental frequency.

The main objective of this work is to estimate the fundamental frequency (f_0) of the data records (mHVSR) to determine zones having similar behavior within the basin. The data from the 759 sites of the campaign carried out in 2000, were analyzed. They have the advantage of being numerous and well distributed in the Quito basin, but the results are limited to 1 Hz, due to the cutoff frequency of the sensors used at that time. An additional 90 sites were analyzed from more recent measurements. These data are less numerous, but mHVSRs are defined between 0.2 Hz. Then, these data were used to complete the mHVSR information of the 2000 campaign data limited to 1 Hz.

The results of this study show that the structure of quaternary layers can clearly change the shape of the H/V ratio, showing different frequencies of the soil.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. La Cuenca de Quito

Ecuador está afectado por la subducción de la placa Nazca bajo la Sudamericana, cuya interacción da origen tanto al volcanismo y a la sismicidad, evidenciados históricamente. El proceso de subducción a lo largo de la margen ecuatoriana ha generado diversos procesos geológicos sobre la placa cabalgante, entre ellos, una constante deformación cortical, que ha sido responsable del levantamiento que ha dado lugar a la formación de las cordilleras Occidental (CO) y Real (CR), separadas por la Depresión Interandina (DI) (Jaillard et al., 2009) y a la vez controladas por grandes sistemas fallas tanto inversas como transcurrentes (Lavenu et al., 1995).

Quito se encuentra ubicada al interior de la Depresión Interandina. Quito, además de ser la capital del Ecuador, es la segunda ciudad más poblada del país. La parte urbana de Quito se asienta en una cuenca alargada de dirección ~N-S de 30 a 40 km de largo y 3 a 5 km de ancho. Tiene una altura promedio de 2800 m y ha sido levantada (tectónicamente) alrededor de 400 m sobre la base del Valle Interandino.

La cuenca de Quito está delimitada en la parte oriental por la expresión superficial del Sistema de Fallas Quito (SFQ) y por el Sistema de Fallas Guayllabamba (SFG). Los dos sistemas se extienden a lo largo de la Depresión Interandina, con una longitud de ~60 km. Los SFQ y SFG son evidenciados por paleo-valles colgados, interrupción de redes de drenaje y estructuras típicas como plegamiento, que demuestran la deformación y levantamiento de la región (Alvarado et al., 2016).

En cuanto a la geología, la cuenca de Quito se encuentra formada por depósitos volcánicos y volcanoclásticos de los próximos edificios Atacazo – Ninahuilca, Complejo Volcánico Pichincha, Casituagua-Illaló y Pululahua. La secuencia sedimentaria consta de lavas, tobas, lahares, sedimentos de tipo aluvial, fluvial, deltáico, lacustres, además de depósitos volcánicos primarios, lahares, flujos hiperconcentrados y depósitos fluviales. La secuencia sedimentaria yace sobre las rocas del basamento Cretácico, asociado al Bloque Pallatanga (Lavenu et al., 1996; Villagómez, 2003). Pero no existen suficientes evidencias que respalden

esta teoría, no existen edades radiométricas, por lo general las edades asignadas en la mayoría de estudios son por correlaciones con edificios volcánicos cercanos, datados principalmente por (Barberi y otros, 1988), indicando una complicada historia de depositación e interacción con la falla.

Quito, debido a su posición geográfica, está amenazada por varios fenómenos naturales tales como movimientos de masa, volcanismo y terremotos. Este trabajo está orientado al estudio de la amenaza sísmica y dentro de este tema, se debe mencionar dos tipos de amenazas que pueden afectar a la ciudad. 1) Los eventos procedentes de la zona de subducción y 2) Eventos superficiales originados en las fallas que componen el límite del Sliver Norandino (NAS) y Sudamérica que atraviesan la cordillera de los Andes y otras al interior del NAS, pero principalmente el sistema de fallas inversas que cruza la ciudad (Naya-Alfonso et al., 2012), según lo han mostrado las evidencias históricas (Del Pino y Yepes, 1990; Beauval et al., 2010).

1.2. La respuesta sísmica de la cuenca de Quito y la importancia de su caracterización

Varios estudios han mostrado que las cuencas sedimentarias tienen una respuesta sísmica propia a este tipo de estructuras. Así, la respuesta sísmica de un valle depende de su geometría. En el caso de una cuenca sedimentaria, las ondas superficiales quedan atrapadas en la cuenca y están sujetas a reflexiones en el borde de la cuenca. También las ondas superficiales interfieren entre sí y con las ondas del cuerpo. Una consecuencia de esto es una respuesta local diferente. En particular, para las estaciones instaladas en los bordes de la cuenca y aquellas instaladas en el centro hay una diferencia en la frecuencia, en la amplitud y en la duración del movimiento sísmico (Bindi et al., 2009). Cuando ocurre un terremoto las ondas sísmicas viajan desde el hipocentro hasta la superficie (suelo) modificándose al atravesar un medio heterogéneo. A las variaciones del movimiento sísmico en espacio, frecuencia, amplitud y duración, causadas por la geometría de los depósitos de suelo y por las características geológicas y topográficas en la superficie del terreno se las conoce como efectos de sitio. Este efecto, también es controlado por la influencia de las propiedades geotécnicas, geológicas de los estratos más superficiales de la corteza terrestre, así como por la topografía del terreno (Chávez, 1987). Los efectos producidos por la geología local consisten en el aumento (amplitud y duración) de las vibraciones debido a la resonancia de

los suelos situados sobre el basamento rocoso (Semblat et al., 2004). Esto ocurre cuando las ondas sísmicas ingresan en una cuenca sedimentaria, cuya disposición estratigráfica muestra un contraste de impedancia con el basamento rocoso. Estas ondas quedan atrapadas, amplificando el movimiento en determinadas frecuencias propias de la cuenca, es decir, aumenta la duración y amplitud de la señal si la frecuencia del movimiento es igual o mayor a las frecuencias del suelo (Bard, 1982; Chávez-García et al., 1996; Faccioli et al., 2002; Pischiutta et al., 2010). Dichos efectos pueden ser cuantificados mediante determinación de la frecuencia de resonancia del suelo (f_0) y el factor de amplificación de la señal en superficie. Los efectos topográficos, a su vez, son amplificaciones o atenuaciones que se observan en las ondas debido a la resonancia ocasionada por la topografía del sitio (Bard et al., 1988).

Entender el comportamiento de los suelos en regiones con alta actividad sísmica es importante para determinar las posibles amplificaciones de las ondas sísmicas. La estimación clara del movimiento del suelo en un determinado sitio (diferentes zonas de una localidad), respecto a las diferentes fuentes sísmicas, permite la toma de decisiones adecuadas tendientes a mitigar el riesgo sísmico (Bard, 1999).

1.3. Alcance

En la cuenca de Quito se han realizado estudios sísmicos y geotécnicos con el objetivo de conocer los efectos de sitio en la ciudad y determinar zonas que muestren el mismo comportamiento del suelo frente a un sismo, es decir, la variación de las ondas en amplitud y frecuencia al pasar de un medio profundo a otro más superficial. Para Quito, Guéguen et al. (2000) realizaron medidas de ruido sísmico ambiente con una duración de 2 minutos, en toda la ciudad (más de 650 puntos de medida). Este estudio definió tres zonas de diferente comportamiento. Cabe mencionar que, el trabajo de Guéguen et al., (2000) se realizó antes del proyecto SESAME en 2004, el cual da lineamientos sobre la manera de medir y procesar los datos de ruido sísmico ambiente. Las medidas de este trabajo tienen limitaciones para describir la respuesta del suelo a frecuencias más bajas que 1 Hz y solo es posible identificar los picos de resonancia a alta frecuencia, los cuales, solamente dan información de la parte superficial de la cuenca. Adicionalmente, estudios posteriores, a partir de los datos de acelerógrafos (Naya-Alfonso et al., 2012; Laurendeau et al., 2017), permiten identificar picos de resonancia alrededor de 0.3-0.6 Hz, que pueden corresponder a un fuerte contraste de

impedancia entre las capas superficiales y el basamento, lo que podría dar indicios de la geometría de la cuenca y de su profundidad.

Para el estudio de los efectos de sitio existen diferentes metodologías, con las cuales se puede tener una idea de la respuesta que tendrá lugar frente a la ocurrencia de un terremoto. En este trabajo, se utilizará la técnica de Nakamura (1989) o razones espectrales H/V, que permite determinar la frecuencia de resonancia natural de un sitio a través de medidas de ruido sísmico ambiente. La base de esta técnica mHVSR (Nakamura, 1989; Bonilla et al. 1997) reside en calcular el cociente entre el espectro de Fourier de las componentes horizontales sobre el espectro de la componente vertical y obtener así la frecuencia fundamental de resonancia del suelo (f_0). Donde, la frecuencia fundamental de resonancia del suelo se define, como la frecuencia del primer pico de la curva H/V. La estimación de la frecuencia de resonancia ayuda a dar una idea inicial de las variaciones en profundidad de las principales capas que componen una cuenca.

Para este estudio, se usa datos recolectados en diferentes campañas, realizadas por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) en colaboración con Instituciones externas. Así se tiene:

1. En el año 2000 se registraron 759 medidas de ruido sísmico ambiente, con una duración de 15 minutos (Bernard Guiller, IRD 2000). Debido a que estas medidas fueron realizadas con un sensor L4-3D (respuesta plana de 1 a 100Hz), presentan limitaciones para describir la respuesta del suelo a frecuencias más bajas que 1Hz. Aun cuando estos resultados presentan limitaciones, la idea es correlacionar las curvas HVSR de estas medidas con los nuevos datos y establecer sitios que muestren comportamientos similares frente a un evento sísmico.
2. Naya-Alfonso et al. (2012), presenta 16 medidas de ruido sísmico ambiente, con una duración de la medida de 2 h, realizadas con sismómetros Lennartz 5s, con una respuesta plana entre 0.2 y 50Hz.

3. A finales de 2016, IG-EPN se realizaron 63 medidas de ruido sísmico ambiente con un sismógrafo Trillium 120 s con respuesta plana entre 0.0083 y 100 Hz, en puntos ubicados en dos líneas: norte a sur y este a oeste, con una duración entre 1 y 2 horas.
4. El cuarto set de datos proviene de la RED SÍSMICA TEMPORAL 4B, tomados entre los años 2016, 2017 a 2018. Este trabajo se desarrolló en el contexto del proyecto de cooperación ecuatoriano-francés REMAKE (Siesmic Risk in Ecuador: Mitigation, Anticipation, and Knowledge of Earthquakes. En este caso se instalaron 20 estaciones temporales para medir el ruido sísmico ambiente de forma continua por con sensores CMG-40T (16 estaciones) y Trillium 120 s (4 estaciones), cuya respuesta plana esta entre 0.2 a 100 Hz y 0.0083 a 100 Hz respectivamente.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la frecuencia fundamental (f_0) de los suelos en la cuenca de Quito utilizando los datos de ruido ambiente registrados en las campañas de 2000, 2012, 2016 y 2016, 2017-2018 Estaciones Temporales, para establecer zonas que presenten la misma respuesta (misma frecuencia amplificada) al paso de las ondas sísmicas.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar curvas H/V de las campañas de ruido sísmico ambiente de 2000, 2012, 2016 y 2016, 2017 a 2018-Estaciones temporales.
- Identificar los diferentes picos de resonancia para frecuencias > 1 Hz, que responden a los criterios SESAME (2004). Para frecuencias < 1 Hz, se identifica a los picos no claros, dada la limitación de los datos del año 2000.
- Comparar los resultados entre las diferentes campañas de ruido sísmico ambiente realizadas en la cuenca de Quito e interpretar los picos a baja frecuencia en las curvas H/V de la campaña de ruido de 2000, dada la limitación de estas medidas.
- Generar mapas de frecuencias de resonancia.

- Correlacionar las características geológicas con los resultados de las observaciones sísmicas.

1.5. Área de Estudio

La cuenca de Quito (Figura 1.1) que comprende la zona de estudio, se ubica en la Provincia de Pichincha, cantón Quito, en la parte central del Valle Interandino. Se extiende por el norte hasta la parroquia de Pomasqui, y por el sur hasta Guamaní. Está limitada al este por las lomas alargadas de Puengasí, Ilumbisí y El Batán-La Bota en dirección de sur a norte, y al oeste con los complejos volcánicos Atacazo-Ninahuilca (CVA), Pichincha (CVP) y Casitagua (Figura 1.1).

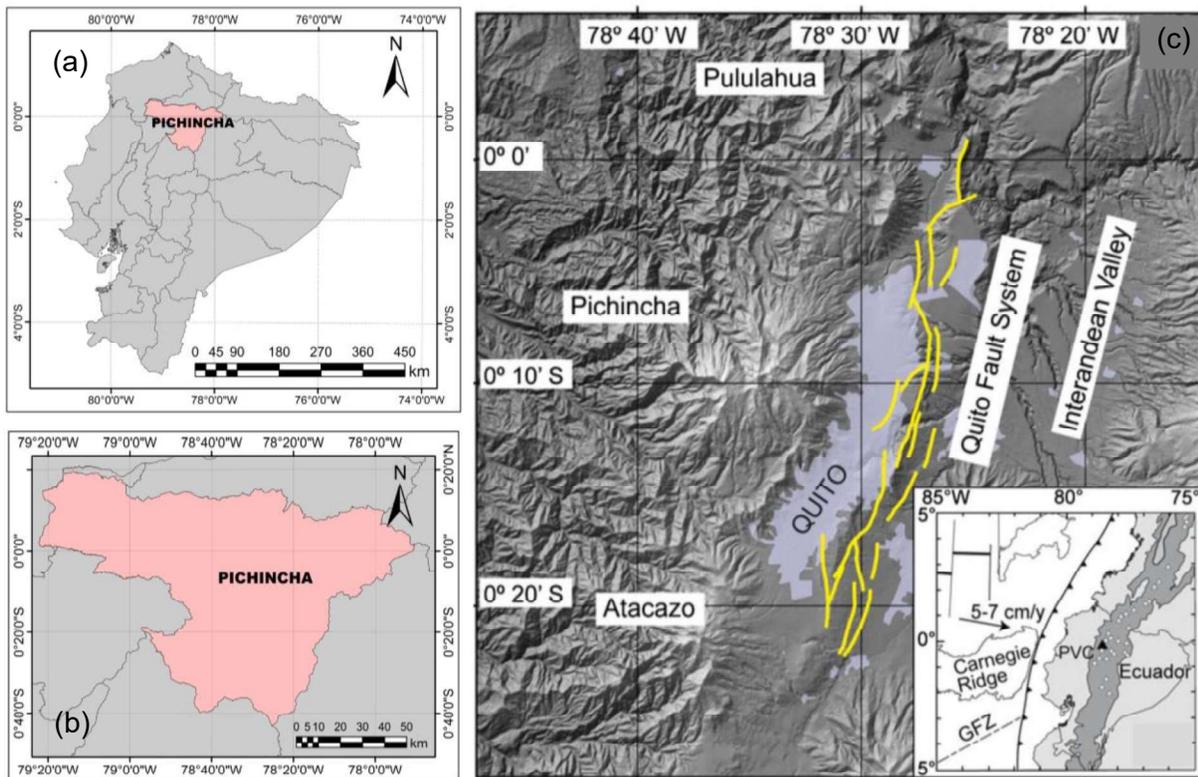


Figura 1.1 (a) Mapa del Ecuador, (b) Mapa de la provincia de Pichincha y (c) Mapa de la cuenca de Quito y sus límites, se extiende al norte hasta Pomasqui, al sur hasta Guamaní, al este por las lomas alargadas de Puengasí, Ilumbisí y El Batán-La Bota, y al oeste con los complejos volcánicos Atacazo-Ninahuilca (CVAN), Pichincha (CVP), y Pulumahua, modificada de Robin et al, (2010).

2. MARCO GEODINÁMICO DE LA CUENCA DE QUITO

2.1. Geología Regional

2.1.1. Regiones y Geología

El Ecuador continental consta de cinco regiones principales, cada una con características morfológicas y geológicas determinadas, producto de complejos procesos de colisión/acreción de terrenos alóctonos contra el margen sudamericano desde el Triásico (Litherland et al., 1994). En forma general, cada una de las cinco regiones se puede caracterizar como sigue:

La región Costa, está compuesta por un basamento oceánico, cubierto por depósitos de ante-arco de edad Paleógeno – Neógeno (Feiniger y Bristow, 1980; Jaillard et al., 1996; Reynaud et al., 1999; Benítez, 1995).

La Cordillera Occidental, está conformada de rocas volcánicas e intrusivas, máficas e intermedias, asociadas con depósitos turbidíticos, del Cretácico Tardío al Oligoceno (Vallejo, 2007; Vallejo et al., 2009).

El Valle o Depresión Interandina (ID o IAV), situada entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Real, está compuesta por potentes secuencias de depósitos volcánicos, principalmente Pliocénicos – Pleistocénicos, que cubren casi todo el basamento (Winkler et al., 2005).

La Cordillera Real, compuesta de rocas metamórficas del Paleozoico – Mesozoico y separada de la Depresión Interandina por la falla de Peltetec (Aspden y Litherland, 1992; Litherland et al., 1994).

La Cuenca Oriente, que incluye la Zona Subandina, se desarrolló sobre la Placa Sudamericana específicamente sobre Cratón Guayanés como respuesta al levantamiento de la Cordillera Real (Jaillard et al., 1996).

2.1.2. Contexto geodinámico

El Ecuador situado en los Andes septentrionales; su contexto geodinámico está influenciado por la interacción de las placas Caribe, Cocos, Nazca y Sudamericana. Como resultado de la convergencia oblicua (dirección N83°E) y una velocidad de 55-58 mm/año de la placa Nazca, respecto Sudamérica estable, el Sliver Nor-Andino (NAS) se mueve en dirección

N35°E a una velocidad de 8.7 mm/año (Figura 2.1) (Nocquet et al., 2014), a través del Sistema de Fallas Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP) (Alvarado et al., 2016). Este proceso, además, ha dado origen a una importante actividad sísmica y volcánica a partir del Mioceno (Pennigton, 1981; Ego et al., 1996; Kellogg y Vega, 1995; Gutscher et al., 1999; Trenkamp et al., 2002).

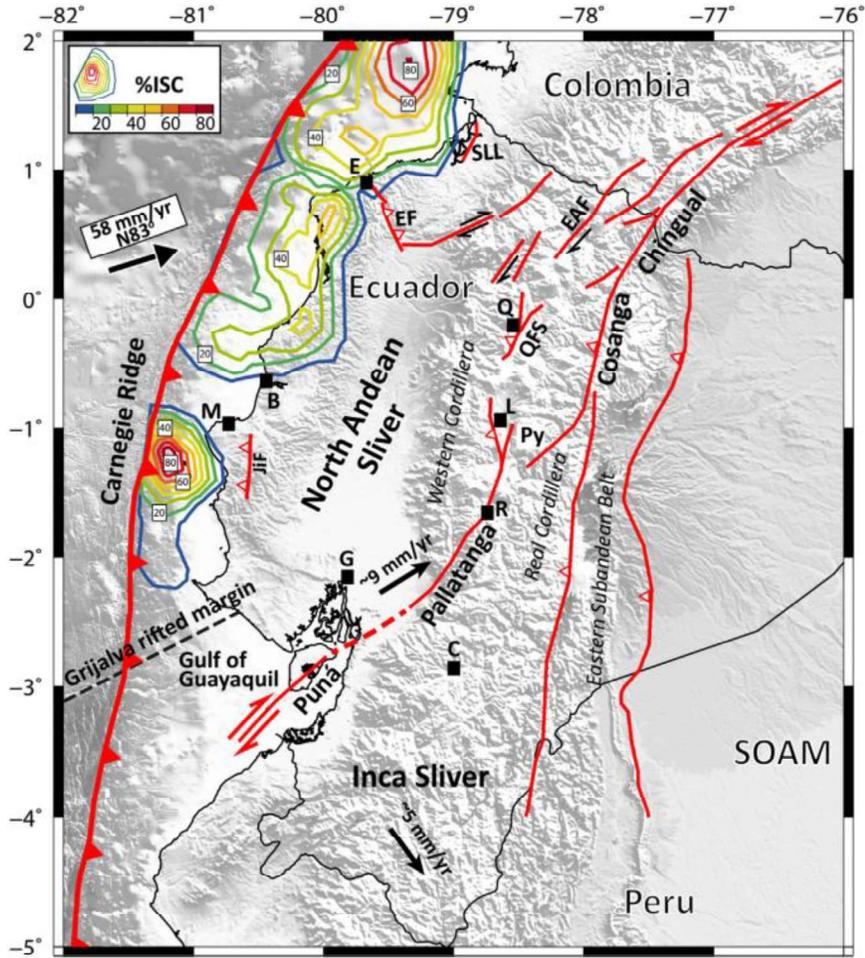


Figura 2.1 Mapa tectónico de Ecuador. La placa de Nazca converge oblicuamente con respecto a la placa sudamericana estable (SOAM) a 58 mm / año (Kendrick et al., 2003), y relativamente a la Sliver Nor-Andino (NAS) a 47 mm / año (Nocquet et al., 2014). El modelo de acoplamiento interseísmico (ISC) de Chlieh et al. (2014) se muestra por los contornos coloreados. Con respecto a América del Sur estable, el NAS se mueve hacia NNE a ~9 mm / año a lo largo del sistema de fallas Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP) (Nocquet et al., 2014; Alvarado et al., 2016). El Inca Sliver se está moviendo hacia el SE a ~5 mm / año (Nocquet et al., 2014; Villegas-Lanza et al., 2016), induciendo un acortamiento en el Cinturón Sub-andino Oriental. La fractura de Grijalva separa dos dominios de la placa de Nazca con diferentes edades y densidades (Lonsdale, 2005). Fallas: SLL: lineamiento de San Lorenzo; EF: Falla de Esmeraldas; EAF: Falla el Ángel; JIF: Falla de Jipijapa; Py: zona de Pisayambo; QFS: Sistema de fallas activo de Quito. Ciudades: E: Esmeraldas; B: Bahía; M: Manta; G: Guayaquil; Q: Quito; L: Latacunga; C: Cuenca; R: Riobamba. Tomado de Vaca et al., (2019).

2.1.3. Volcanismo Cuaternario

Durante el Cuaternario, el volcanismo y las glaciaciones han sido los principales factores que han modelado el paisaje andino ecuatoriano. El cinturón volcánico en el Ecuador se extiende de norte a sur a lo largo de todo el Ecuador, con un ancho alrededor de 80 km y una longitud cercana a 350 km. La actividad volcánica cuaternaria se identifica por el desarrollo de estratovolcanes con edades menores a 1.3 Ma (Barberi et al., 1998), cuyos productos incluyen flujos de lava de composición básica a ácida, flujos piroclásticos y domos de composición dacítica a riolítica (Barberi et al., 1988; Hall y Beate, 1991).

En el Ecuador se han reconocido 84 volcanes cuaternarios, muchos de ellos activos (Figura 2.2; Bernard y Andrade, 2011).

Los edificios volcánicos se hallan distribuidos en cuatro grupos: volcanes de la Cordillera Occidental, Cordillera Real, Depresión Interandina y Tras-Arco (Hall y Beate, 1991).

Los productos volcánicos de estratovolcanes Plio-Cuaternarios han aportado significativamente al relleno de la Depresión Interandina (Hall, 1977), dando una topografía peculiar en la región andina del norte.

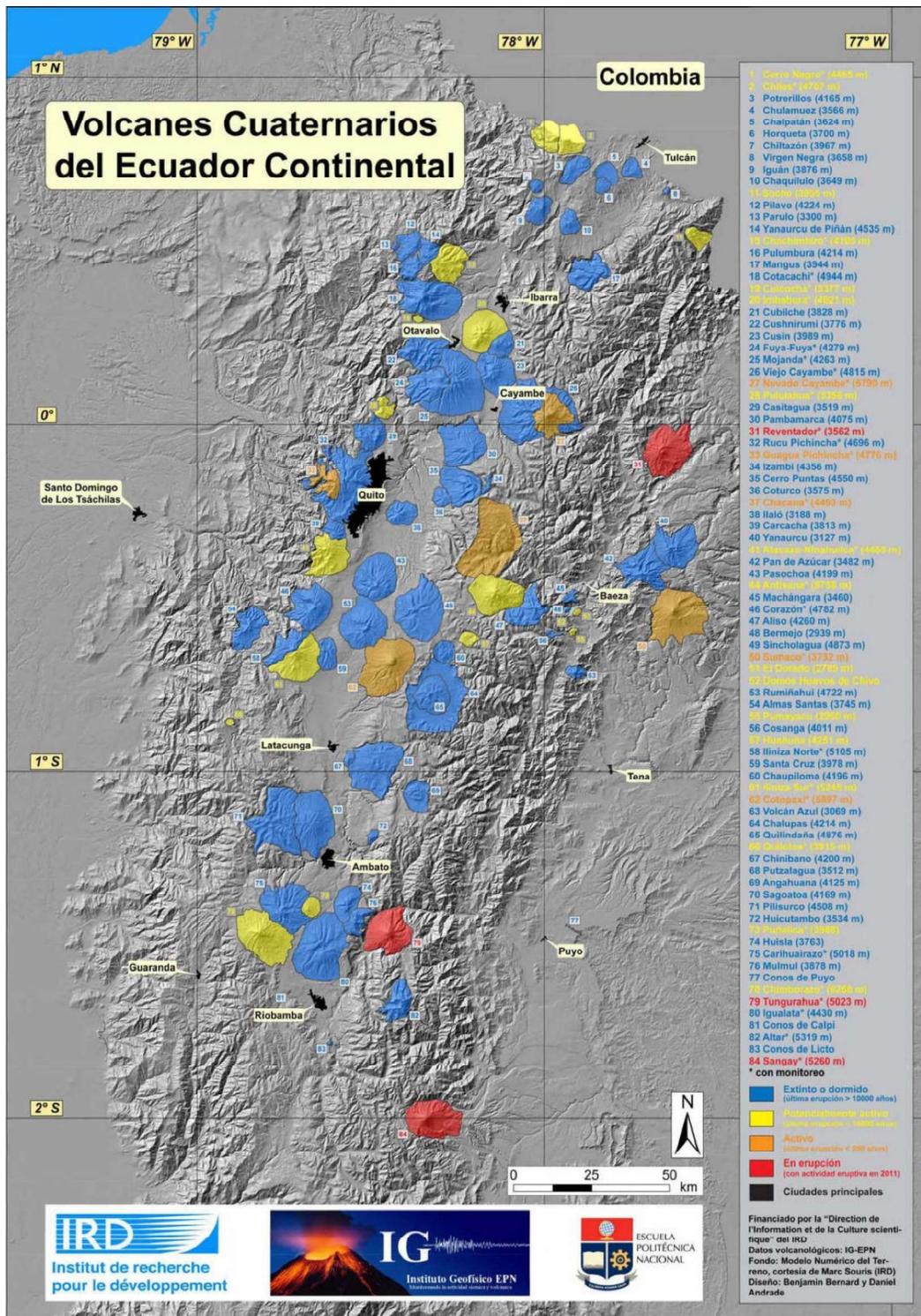


Figura 2.2 Mapa de los volcanes Cuaternario del Ecuador (Bernard y Andrade, 2011).

2.1.4. Fallamiento Continental

La interacción de la placa Nazca con el Sliver Nor Andino ocasiona la acumulación de deformación en la margen (zona de contacto). Parte de la deformación es transmitida a la placa cabalgante (Alvarado et al., 2016., Vaca et al., 2019). Según Rivadeneira et al. (2007) actualmente hay varios sistemas importantes de fallas en la placa superior, los cuales están acumulando deformación y que en determinado momento podrían afectar al territorio nacional. Entre estos se puede mencionar: el sistema de fallas activas formado por los segmentos Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná. Este sistema empieza en el Golfo de Guayaquil, atraviesa la Cordillera Occidental, el Valle Interandino (en la zona de Riobamba (R) y Pisayambo (Py) y luego la Cordillera Real; (Figura 2.3, Alvarado et al., 2016). Un segundo sistema de fallas es el que delimita el levantamiento subandino. Por el occidente, este ramal nace en el sector de Cosanga y se extiende hacia el sur delimitando el borde oriental de la Cordillera Real. Hacia el este, delimita concretamente el mencionado levantamiento y se extiende hacia el Perú. Estos dos sistemas se caracterizan por estar formados por fallas inversas. Otros sistemas de fallas menos extensos que los anteriores son: el sistema de fallas inversas de Quito (QFS), el sistema Pastocalle-Poaló-Saquisilí y el sistema El Ángel-San Gabriel que caracterizan la deformación al interior del NAS.

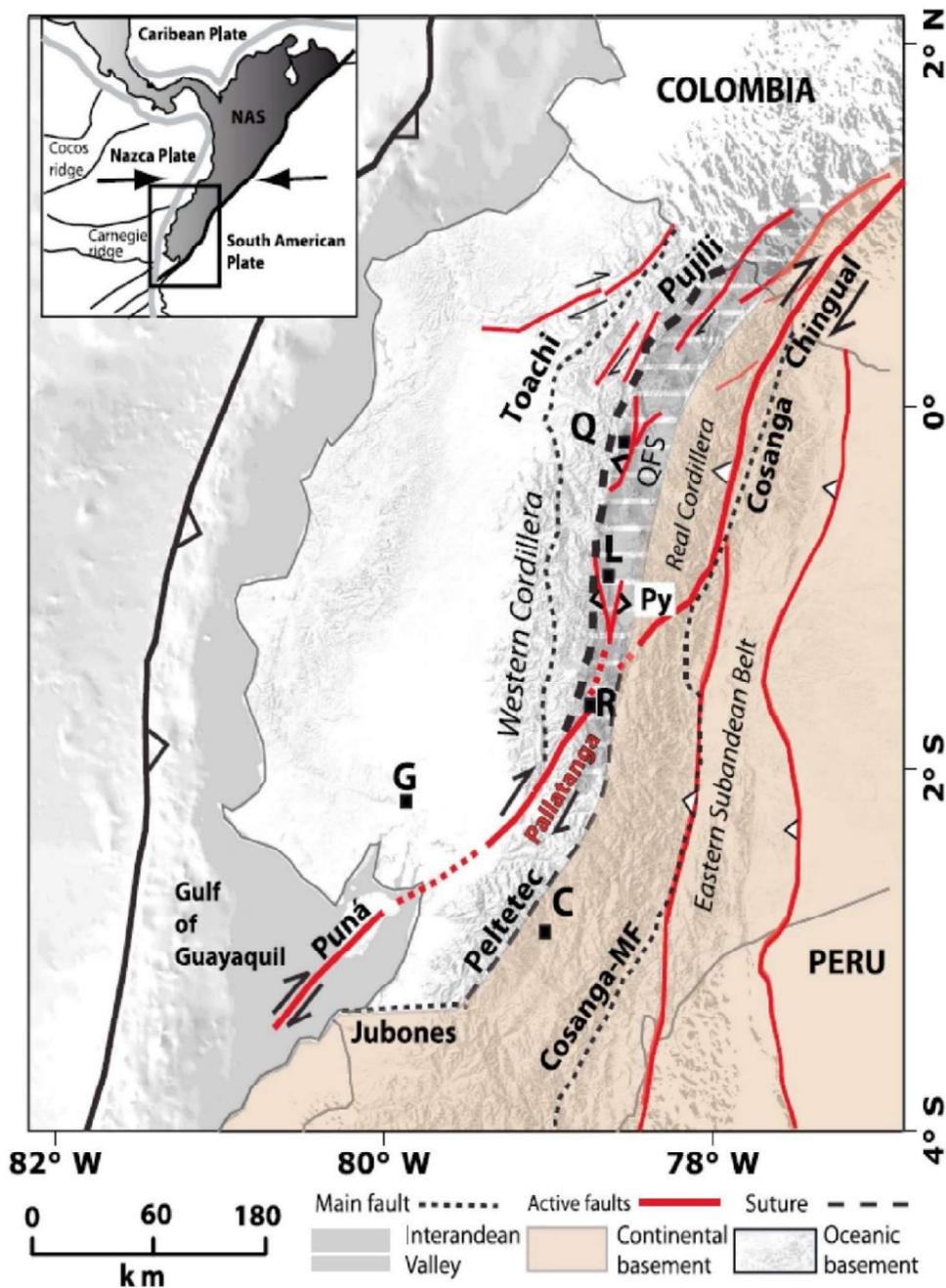


Figura 2.3 Mapa de la tectónica activa del Ecuador. Las líneas rojas continuas representan segmentos de fallas importantes y su cinemática. Las líneas negras punteadas indican las principales fallas. Las líneas negras discontinuas indican las zonas de suturas principales (después de Litherland y Zamora, 1993; Aspden y Litherland, 1992; Hughes y Pilatasig, 2002; Jaillard et al., 2009). El recuadro en el margen superior izquierdo representa el entorno geodinámico regional (Audemard y Audemard, 2002). Sliver Norandino: NAS; Falla de Cosanga-Méndez, según lo definido por Aspden y Litherland [1992]: Cosanga-MF; Sutura Peltetec: Peltetec; Pujilí Melange Suture: Pujilí; Falla de Jubones: Jubones; Zona de cizallamiento de Toachi: Toachi; Zona de Pisayambo: Py. QFS: Sistema de fallas activo de Quito. Ciudades: Quito: Q; Latacunga: L; Cuenca: C; Riobamba: R; Guyayaquil: G. Tomado de Alvarado et al. (2016).

2.2. Geología y tectónica locales

La cuenca de Quito se sitúa en la Depresión Interandina o Valle Interandino (ID o IAV). La formación y evolución de esta cuenca está asociada a la actividad del sistema de fallas de Quito y al volcanismo. Esta cuenca ha sido rellenada por secuencias de depósitos volcanoclásticos, volcano- sedimentarios, fluvio-lacustres y aluviales (Lavenu et al., 1992; Lavenu et al., 1996; Villagómez, 2003; Winkler et al., 2005)

Los depósitos volcánicos y volcanoclásticos que rellenan la cuenca de Quito provienen de los edificios próximos Atacazo - Ninahuilca y Pichincha. La secuencia inferior consiste de lavas, tobas, lahares, sedimentos aluviales, fluviales, deltaicos y lacustres correspondientes a las Formaciones Pisque y San Miguel (Jaya, 2009).

2.2.1. Depresión Interandina (ID o IAV)

Es una depresión topográfica de dirección N-S a NNE-SSW entre la cordillera Real y la cordillera Occidental (Winkler et al., 2005). Está restringida por la falla Calacalí-Pallatanga en el oeste y la Falla Peltetec en el este (Litherland et al., 1994).

Tiene aproximadamente 25 km de ancho, 300 km de largo y se extiende desde la zona del Chota al norte, hasta la zona de Alausí al sur. Empezó a formarse desde el Mioceno Tardío-Plioceno, presumiblemente desde el norte (Winkler et al., 2002).

El basamento de la Depresión Interandina, en el cual se ha depositado una gran cantidad de material volcánico y sedimentario es pobremente conocido. La ocurrencia de fortuitas zonas donde afloran rocas del sustrato parecidas a las de la Cordillera Occidental y Real, han llevado a proponer una serie de modelos. Sin embargo, lo más probable es que el basamento sea tectónicamente complejo e incluya rocas de ambas Cordilleras en una cuña de acreción que tuvo lugar en el Cretácico Temprano (Egüéz & Aspden, 1993), correspondientes a rocas oceánicas (gabro) y rocas metamórficas (cuarcitas negras) pertenecientes a los terrenos Pallatanga y Guamote respectivamente (Villagómez, 2003; Spikings et al., 2005).

La Depresión Interandina se encuentra dividida en tres segmentos por dos importantes nudos, estos marcan grandes cambios en la orientación de la estructura: Valle Interandino Norte, Valle Interandino Central, (comprende la zona Quito-San Antonio-Guayllabamba), Valle Interandino Sur (Villagómez, 2003).

El segmento central está limitado por el nudo formado por los volcanes Mojanda y Cusín, mientras que en su límite sur se encuentran el nudo formado por los volcanes Rumiñahui, Pasochoa, Cotopaxi e Illiniza (Villagómez, 2003).

2.2.2. Sistema de Fallas Activas de Quito (QFS)

El principal rasgo geo-morfológico en el IAV central es el Sistema de Fallas Activas inversas de Quito y se extiende una longitud de ~60 km (Alvarado, 2012). Su expresión morfológica está definida por un conjunto de lomas con una misma orientación (N a NNE). Se denominan de norte a sur de la siguiente manera: Bellavista-Catequilla (BC), Carcelén-El Inca (CEI), Ilumbisí-La Bota (ILB) y Puengasí (P) (Figura 2.4). Los segmentos definen tres subcuencas: Quito, San Antonio y Guayllabamba (Villagómez, 2003).

La loma que se encuentra más al norte ha sido denominada: pliegue-flexura Calderón- San Antonio (Ego, 1993), flexura Tentadero-Jarata o estructura Bellavista (Samaniego, 1994; Alvarado, 1996) o pliegue Catequilla-Monjas (Ego y Sebrier, 1996). Las dos lomas meridionales han sido llamadas pliegue Amaguaña-Calderón (Ego, 1993) estructuras Ilumbisí-Batán, Puengasí (Egüez y Alvarado, 1994). La evidencia morfológica, tectónica y estratigráfica sugiere que la loma más septentrional (BC en Figura 2.4) pertenece a un pliegue asociado con un segmento de falla inversa buzando al oeste (Falla Catequilla: CF) (Alvarado et al., 2014), el cual se inició desde el Plioceno hasta el Pleistoceno Tardío antes que las otras estructuras. Mientras que CEI, ILB y P (Figura 2.4) son estructuras con flexuramiento, que representan un segmento de falla más joven que buza en la misma dirección que la loma BC, es decir, al oeste. Este segmento sur empezó a actuar desde el Pleistoceno Tardío hasta la actualidad y está compuesto por un grupo de fallas activas más pequeñas (Villagómez, 2003).

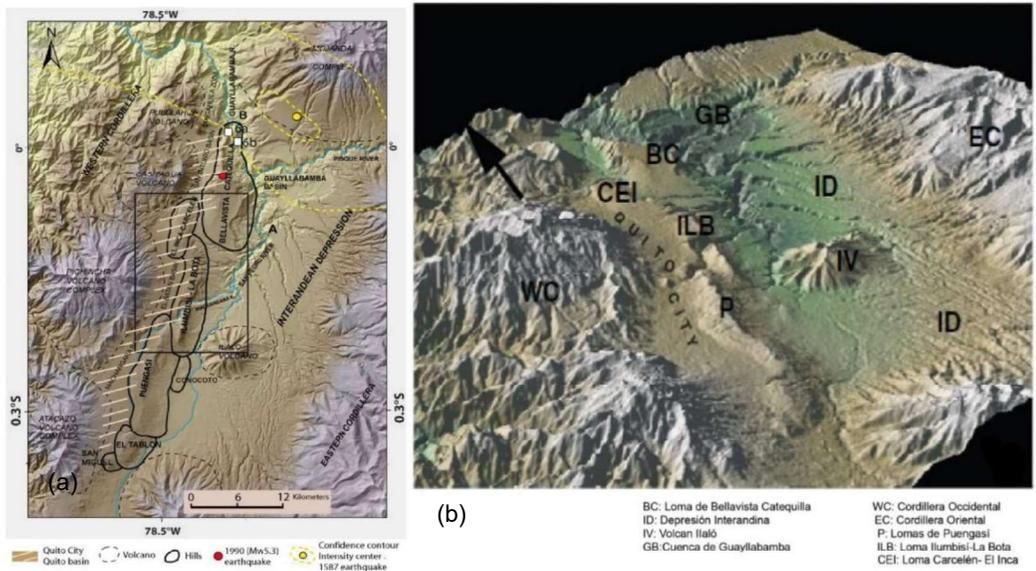


Figura 2.4 (a) Mapa Geomorfológico del Sistema de Fallas de Quito, tomado de Alvarado, (2012) y (b) vista tridimensional de la cuenca en el Valle Interandino Central. Modificado de Alvarado et al., (2014).

La actividad de esta falla ha ocasionado el levantamiento de la cuenca de Quito hasta 500 metros sobre el Valle Interandino (Ego, 1995), separando a la cuenca de Quito de la cuenca de Guayllabamba (Alvarado, 2012).

Los planos de falla del sistema no se observan en la superficie (Villagómez, 2003). Estudios de microsismicidad sugieren un valor de buzamiento de alrededor de 55° bajo la ciudad de Quito (Bonilla et al., 1992; Alvarado et al., 2014).

El Sistema de Fallas de Quito representa la principal amenaza en caso de ruptura, constituyéndose en una fuente sismogénica peligrosa para Quito y sus alrededores (Alvarado, 2012). Varios estudios muestran que el Sistema de Fallas de Quito ha afectado a los depósitos volcanoclásticos cuaternarios. Las principales evidencias son los paleo-valles colgados, la interrupción de las redes de drenaje y estructuras típicas de plegamiento que muestran una continua deformación y levantamiento de la región (Alvarado et al., 2014). Estas características generalmente se observan en regiones afectadas por actividad tectónica cuaternaria (Jackson et al., 1996; Audin et al., 2003; Ramsey et al., 2008).

2.2.3. Descripción Geológica de la Cuenca de Quito

La subcuenca de San Antonio de Pichincha conjuntamente con la subcuenca de Quito se habría separado del resto del Callejón Interandino en el Pleistoceno Superior durante la depositación de una secuencia volcánica y volcano-sedimentaria denominada Formación

Machángara (Villagómez, 2003). El relleno de la subcuenca de Quito es de edad Cuaternaria y corresponde a materiales primarios o secundarios de origen volcánico. Los edificios que aportaron al relleno volcano-sedimentario en la en la cuenca Quito son: Pichincha, Atacazo-Ninahuilca, Casitagua y Pululahua (Jaya, 2009).

2.2.4. Descripción general de los centros volcánicos en los alrededores del Valle Interandino Central

El Valle Interandino Central se encuentra formada por depósitos volcánicos y volcanoclásticos que se encuentran próximos a los edificios Atacazo – Ninahuilca, Pichincha, Casitagua y Pululahua los cuales se describen a continuación:

2.2.4.1. Complejo Volcánico Pichincha (CVP)

Las rocas del basamento del CVP, están formadas por lavas antiguas, se localizan en la parte sur este y el extremo noroccidental del complejo volcánico (Figura 2.5). La edad es de 1.1 y 0.9 Ma, para las lavas basales de la cuchilla de EL Cinto (Robin et al., 2010); esta edad es similar a la obtenida en la base de las secuencias de flujos de lavas andesíticas de complejo Pichincha 1.32 Ma (Barberi et al. 1988, 1989). Este conjunto de lavas tiene un espesor de 300 m y su composición es del tipo andesitas ácidas y dacitas.

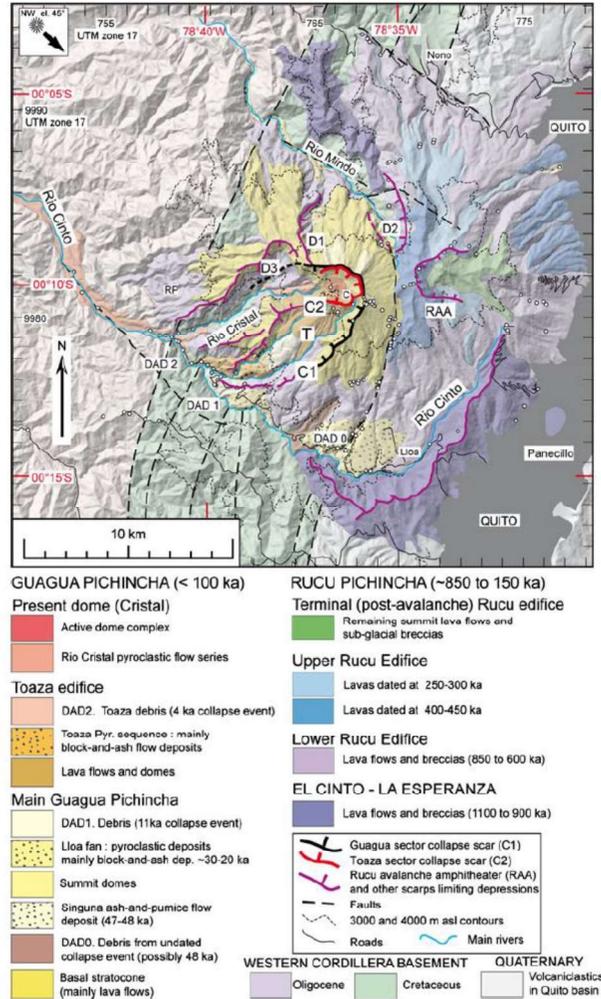


Figura 2.5 Mapa Geológico del Complejo Volcánico Pichincha, tomado de Robin et al., (2010).

2.2.4.2. Complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca (CVAN)

Según Hidalgo (2006) e Hidalgo et al. (2008), el Complejo volcánico se encuentra dividido en tres edificios principales: La Carcacha, el Atacazo y un conjunto de domos más recientes denominado Ninahuilca. El más antiguo es el edificio la Carcacha cuya edad es de 1.29 Ma aproximadamente (Figura 2.7) de composición andesítica ácida.

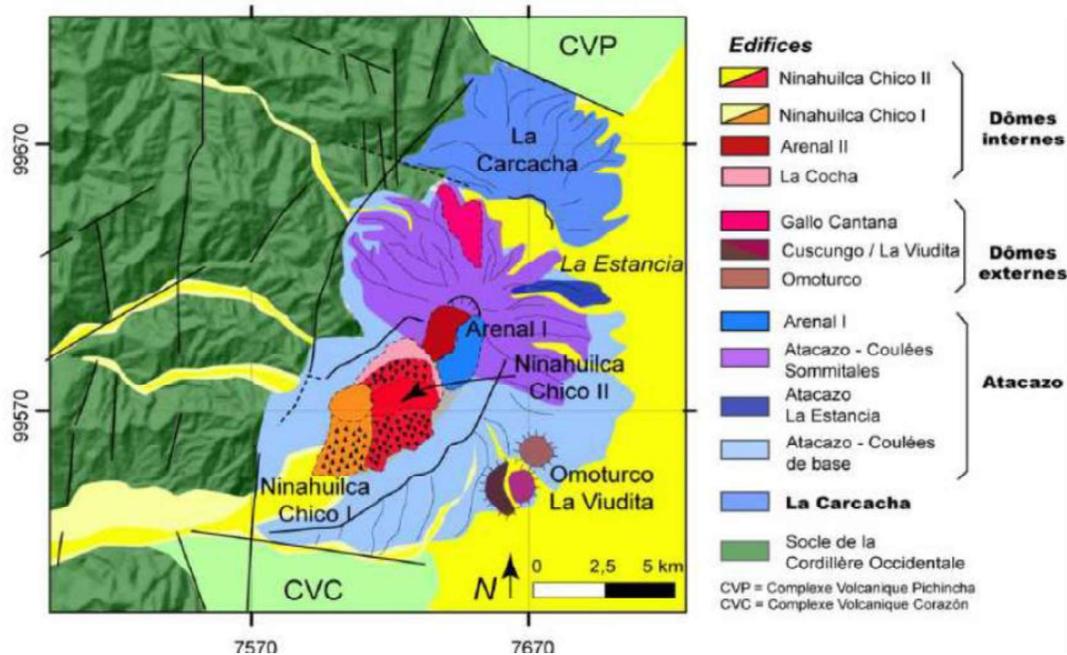


Figura 2.6 Mapa Geológico de Complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca, tomado de Hidalgo, (2006).

2.2.4.3. Volcán Casitagua

Comprende lavas andesíticas piroxénicas, muestra cicatrices que sugieren que su edificio sufrió colapsos sectoriales hacia el occidente. Este volcán es poco estudiado. Los resultados radiométricos muestran una edad Pliocenos para el Casitagua (OLADE-INECEL, 1980; Barberi et al., 1988).

2.2.4.4. Volcán Pululahua

Según Papale y Rosi (1993), debido a una serie de erupciones durante las cuales 5-6 km cúbicos de magma dacítico fueron expulsados, se formó una caldera hace 2450 años AP. El depósito asociado de caída de pómez basal representa un volumen aproximado de 1.1 km cúbicos. En el interior de la caldera se extruyó un nuevo grupo de domos (Unidad III) que fue rellenada parcialmente y produjo flujos “block and ash” que se encuentran sobre el occidente. También se identifican pequeñas caídas de pómez en los flancos occidental y suroccidental de la caldera producto de la misma actividad.

Según Andrade (2002), en el Pleistoceno Tardío se produjo la extrusión de un primer grupo de domos a pocos kilómetros al norte del volcán Casitagua. Los depósitos asociados a estos domos son flujos tipo “block and ash” (colapso de domo). Un segundo conjunto de domos se formó al sur y oeste de la Unidad I destruyendo en parte a los domos que se localizan más al sur de la misma. De igual manera que la Unidad I se depositó flujos “block and ash” (colapso de domo). La Marca, el domo más joven de la Unidad II, posiblemente fue extruido entre 11940 y 10800 años AP.

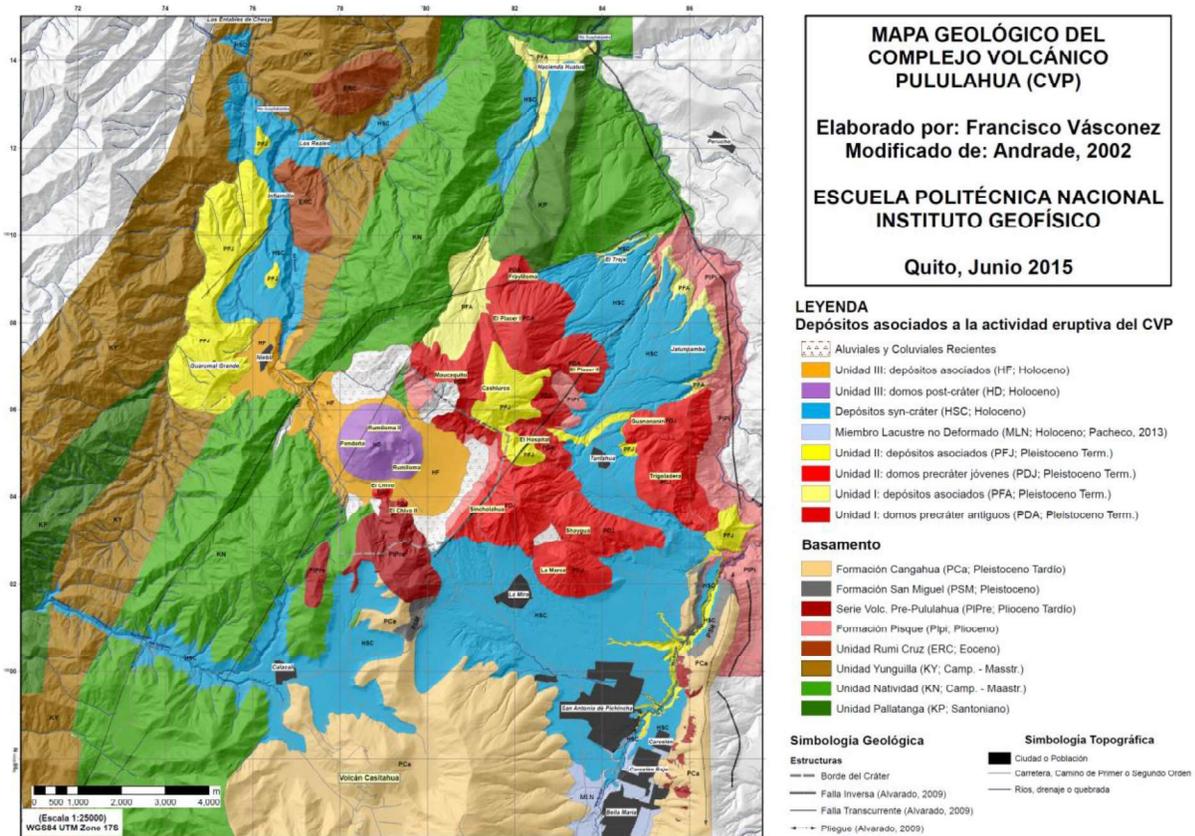


Figura 2.7 Mapa Geológico del Complejo Volcánico Pululahua, tomado de Vásconez, (2015).

2.2.5. Formaciones geológicas cuaternarias de la subcuenca de Quito

En la figura 2.8, se muestra los sedimentos cuaternarios que rellanan la subcuenca de Quito y su posible correlación con las subcuencas de Guayllabamba y San Antonio de Pichincha.

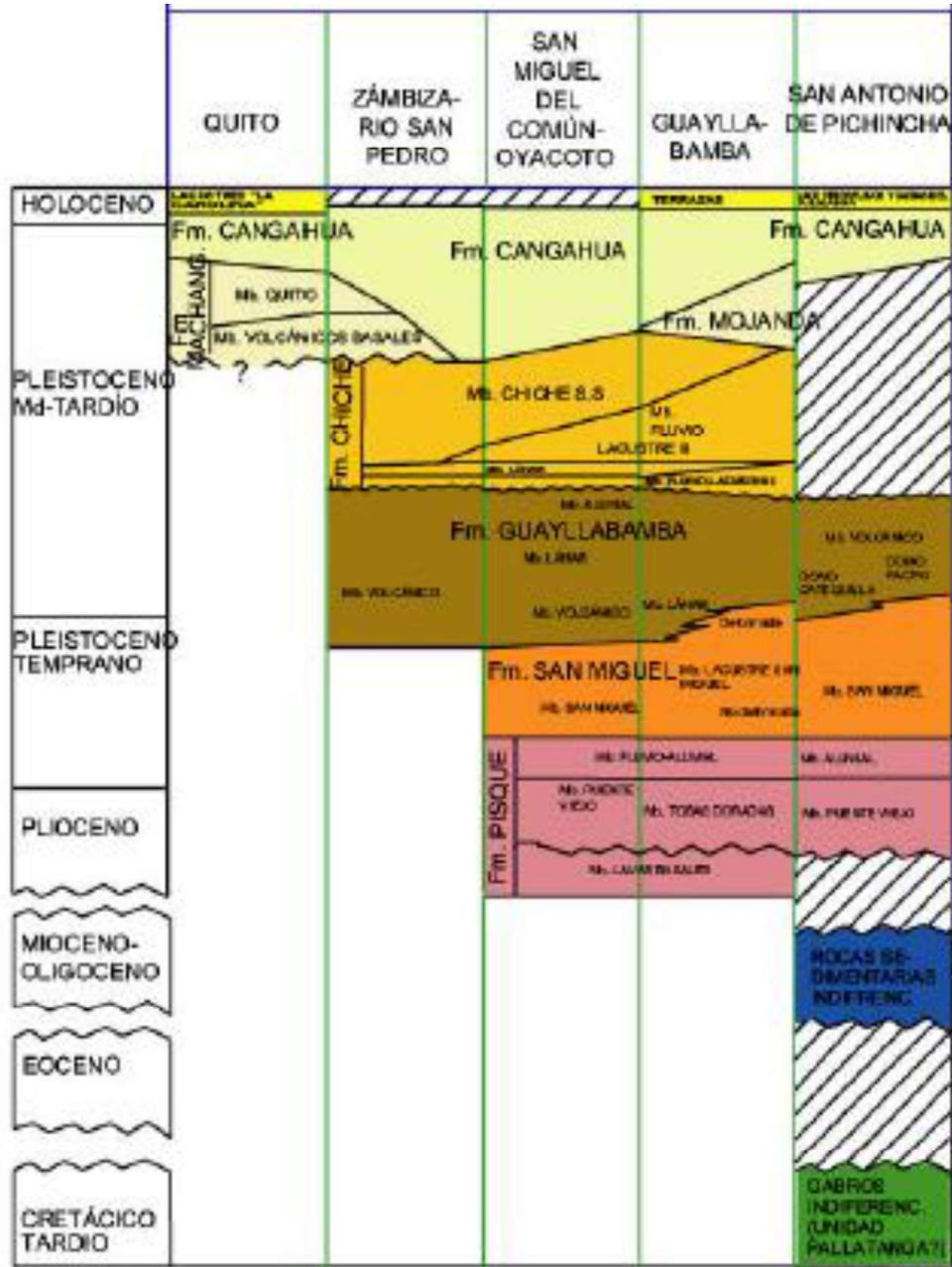


Figura 2.8 Estratigrafía de la cuenca de Quito-San Antonio y Guayllabamba. Modificada de Villagómez, (2003).

2.2.5.1. Formación Machángara

Esta formación está compuesta por depósitos volcanoclásticos en su parte basal y por depósitos epiclásticos en la parte superior (Villagómez, 2003; Winkler et al. 2005). Tradicionalmente fue considerada de edad similar a la Fm. Guayllabamba, similar a la Fm. Pisque (Ego y Sebrier, 1996) o equivalentes a las Fms. Pisque y Chiche (Alvarado, 1996; Jiménez y Alvarado, 2001). Villagómez (2003), la limita para la zona de Quito y la evidencia de campo la coloca sobre la Fm. Chiche. Alvarado (1996) subdivide a la formación en dos unidades:

Mb. Volcánicos Basales, está formada por depósitos volcánicos primarios, incluyen depósitos de avalanchas, flujos piroclásticos, lavas andesíticas, caída de ceniza y pómez (Villagómez, 2003; Winkler et al., 2005). El contacto inferior con la Fm. Chiche representa una discordancia angular con un ángulo mayor hacia el Norte (Villagómez, 2003).

Mb. Quito, los testigos de perforación obtenidos en el centro de la cuenca de Quito (Sector la Y), indican que esta unidad seguramente consistiría también de facies lacustres y palustres (Alvarado, 1996; Jiménez y Alvarado, 2001).

2.2.5.2. Formación Mojanda

Localizada al norte, consiste en productos volcánicos y volcanoclásticos del Complejo Volcánico Mojanda (volcanes Mojanda y Fuya-Fuya). Se encuentran formados mayormente por lahares y debris flow intercalados con ceniza, surges piroclásticos, arenas fluviales y conglomerados (Villagómez, 2003), estos representan una secuencia de piroclastos retrabajados en un ambiente fluvial y eólico (Winkler et al., 2005).

2.2.5.3. Formación Cangahua.

La Fm. Cangahua se encuentra distribuida a lo largo del corredor interandino desde Pasto en Colombia hasta Cañar al sur del Ecuador, posee un espesor que puede superar los 100 m, de color kaki amarillento (Jaya, 2009). Constituida por ceniza volcánica, ceniza retrabajada, sedimentos fluviales, lacustres y suelos incipientes. Tiene un porcentaje alto de sílice (65%), vidrio volcánico, además de minerales volcánicos, lo que indica que la Cangahua procede de volcanes de carácter dacítico-riolítico y no a volcanes andesíticos (Hall y Beate, 1991). Estas tobas se encuentran sobreyaciendo discordantemente las Fm. Machángara o Chiche. Se definen edades de 21 ka y 100 ka basadas en la hidratación de la

obsidiana y termoluminiscencia (Claperton y Vera, 1986). No obstante Hall y Mothes (2008), muestran a la formación Cangahua intercalada con el flujo de ceniza de Chalupas con una edad de 211ka. Así mismo, el depósito de caída pliniana derivada de la caldera de Chacana denominado “capa Pifo”, a más de 40 km al este de Quito con una edad de ~170 ka, se encuentra dentro de la secuencia de tobas.

2.2.6. Depósitos Holocénicos

En el Holoceno, la subcuenca de San Antonio fue rellenada con productos piroclásticos provenientes del volcán Pululahua y en las subcuencas de Quito y San Antonio se depositaron sedimentos lacustres locales.

2.2.6.1. Depósitos del Pululahua

Los depósitos del Pululahua consisten, en flujos piroclásticos, lahares, colapso de domos y productos detríticos radialmente distribuidos desde la caldera (Villagómez, 2003). Andrade (2002) estimó una edad de actividad del complejo volcánico de 165 ka. Está compuesta por dos unidades: el miembro basal formado por flujos piroclásticos, de espesor aproximado 30 m; mientras que el segundo miembro más superficial está constituido de caídas de ceniza y pómez de colores blanco-grisáceos de 8 m de espesor (Villagómez, 2003).

2.2.6.2. Depósitos la Carolina

Jiménez y Alvarado (2001) la definen como paquetes de limos, arcillas, arenas medias a gruesas, intercaladas con ceniza y caídas de pómez, cuyos ambientes de formación varían entre fluviales, lacustres y palustres, se puede ver depósitos fluviales con canales superficiales y flujos de lodo. Mothes et al. (2004) marca la existencia de varios lahares, cenizas volcánicas primarias y niveles de suelo en estos abanicos.

3. RAZÓN ESPECTRAL H/V CON EL RUIDO SÍSMICO AMBIENTE

El método de la razón espectral horizontales sobre la vertical del ruido sísmico ambiente, inicialmente propuesta por Nogoshi e Igarashi (1971) y después modificada por Nakamura (1989), es una técnica, que sirve para evaluar las características del suelo como: los tipos de suelo, profundidad y espesores de los depósitos sedimentarios. Esta técnica plantea que la razón espectral H/V del ruido sísmico ambiente medido en la superficie de los depósitos sedimentarios representa la cuasi función de transferencia del suelo (Nakamura, 2000), es decir, un estimado de la amplificación real del sitio. Sin embargo, se ha demostrado que define de manera precisa la frecuencia fundamental del suelo. Este método se ha sido utilizado en varias ciudades del mundo por su bajo costo, rápido despliegue y alta efectividad para encontrar la frecuencia fundamental del suelo, permitiendo identificar zonas constituidas por suelos blandos, los cuales son susceptibles a amplificación sísmica (Guéguen et al., 2006).

3.1. Ruido Sísmico Ambiente

Es una señal sísmica continua originada por diferentes fuentes que no están relacionadas entre sí (Chávez-García y Montalva, 2014). Según Aki (1957) y Aki (1965), las fuentes de ruido sísmico ambiente resultan de fenómenos naturales y antropogénicos. Este tipo de señales son utilizadas principalmente para el estudio de propiedades y caracterización de las capas del suelo.

Las fuentes naturales de ruido sísmico ambiente provienen en su mayoría del oleaje del océano (0.2 Hz), choque de las olas en la costa (0.5 Hz), variación de la temperatura y presión atmosférica (0.1 Hz), es decir, frecuencias menores a 1 Hz. Si las fuentes están caracterizadas por señales con frecuencias mayores a 1 Hz, estas provienen de actividades antrópicas inducidas por el hombre como, por ejemplo; el tráfico, la industria y otras actividades humanas. En zonas urbanas, el ruido sísmico ambiente es considerado principalmente artificial y se propaga como una mezcla de ondas superficiales y ondas de cuerpo (Bonney -Claudet et al., 2006a).

Las fuentes de ruido sísmico ambiente de baja frecuencia se encuentran generalmente en los océanos más cercanos y esta señal es transmitida desde la fuente hasta el sitio de estudio

como ondas superficiales a través de la corteza. Estas ondas interactúan con las estructuras locales especialmente en cuencas sedimentarias y debido a sus grandes longitudes de onda pueden alcanzar profundidades de penetración significativa, creando así un campo de ondas local más complejo, esto produce que las heterogeneidades presentes en el subsuelo sean excitadas por ondas superficiales largas, las cuales actúan como puntos de difracción y generan ondas superficiales locales. Mientras que las ondas de alta frecuencia en la mayoría de las veces corresponden a fuentes más cercanas, es decir cercanas a la superficie; entonces el tren de ondas incluye tanto ondas superficiales como de cuerpo (SESAME 2004).

3.2. Ondas superficiales en el ruido sísmico

Se originan por la interacción de las ondas de cuerpo con la superficie libre de la Tierra y se propagan de forma paralela a la superficie. Estas ondas muestran su máxima amplitud en la superficie libre, y decrece exponencialmente con la profundidad (Stein y Wysession, 2003). Las ondas superficiales se distinguen de las ondas de cuerpo en varios aspectos: se propagan más lentamente, su amplitud decae lentamente con la profundidad y sus velocidades son fuertemente dependientes de la frecuencia (Shearer et al. 2009). Este tipo de ondas pueden ser muy destructivas en un evento sísmico debido a su larga duración y gran amplitud.

Las ondas superficiales se clasifican en dos tipos: 1) Las ondas Rayleigh se originan por la interacción de las ondas P, SV (componente vertical de la onda S) con la superficie libre de la Tierra; muestra un movimiento elíptico en el plano horizontal y vertical en dirección contraria a la propagación de la onda. 2) Las ondas Love se forman de la interacción de las ondas SH (componente horizontal de las ondas S) con la superficie de la Tierra su movimiento es transversal o de cizalla, normal a la dirección de propagación (Figura 3.1).

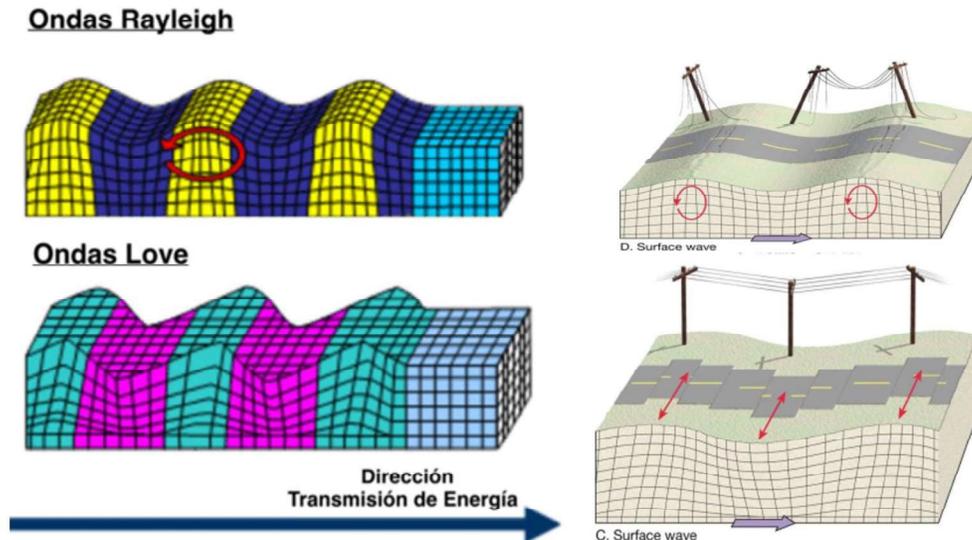


Figura 3.1 Ondas Rayleigh con un movimiento radial y vertical y ondas Love con un movimiento transversal a la propagación, tomado de (<https://misistemasolar.com/ondas-sismicas>).

El ruido sísmico ambiente se compone tanto de ondas de cuerpo como superficiales, pero es difícil saber qué proporción hay de cada tipo. Estudios realizados por Bonnefoy-Claudet et al. (2006 b), muestran que el ruido sísmico a baja frecuencia consiste predominantemente de ondas Rayleigh, mientras que para frecuencias mayores a 1Hz su composición es compleja debido a que la fuente es principalmente antrópica.

3.2.1. Dispersión de ondas superficiales

Cuando las ondas superficiales con diferentes longitudes de onda atraviesan un medio heterogéneo, estas penetran a diferentes profundidades y viajan con velocidades características de los medios que cruzan, y esta propiedad es fundamental ya que la variación de la velocidad con respecto a la longitud de onda permite inferir información acerca de subsuelo, es decir, brinda información acerca de la frecuencia fundamental del sitio, que se genera cuando las ondas llegan a la superficie. La profundidad de penetración de las ondas de superficie depende de su frecuencia, las velocidades de las ondas de superficie serán diferentes para diferentes frecuencias, esto se denomina dispersión. Así el resultado de la dispersión es que la forma de la onda cambia con la distancia desde la fuente por lo que no se puede describir la propagación como constante (Park et al., 1998). Del análisis de la dispersión que sufren las ondas al pasar un medio se pueden deducir características de la estructura por

la que han viajado. Por lo tanto, es importante diferenciar entre dos tipos de velocidad: la velocidad de fase y la velocidad de grupo.

Velocidad de fase: es la velocidad con la que una frecuencia determinada de un grupo de ondas o una fase, definida como la cresta o el valle se propaga por un medio (Linares, 2005).

Velocidad de grupo: es la velocidad con la que se propaga un grupo de ondas o la velocidad con la que se transporta su envolvente a lo largo del eje x. También es la velocidad con la que se propaga la energía (TOMASI, 2003).

3.2.2. Técnica de Nakamura o Cálculo de Razones Espectrales

La relación H/V está relacionada con la trayectoria elíptica de las ondas Rayleigh y se puede usar para estimar la frecuencia fundamental (f_0) de onda de los suelos blandos, debido a que la componente vertical de las ondas Rayleigh tiende a desaparecer a esa frecuencia, causando un pico en la relación. La estimación de la frecuencia de resonancia (en presencia de un fuerte contraste de impedancia) se ha demostrado precisa tanto experimental como teóricamente. Los depósitos de suelo están expuestos a vibraciones inducidas por fuentes naturales y antropogénicas, dichas fuentes generadoras de vibraciones pueden considerarse que en suma producen una sollicitación dinámica aleatoria, la cual admite que los depósitos de suelos tiendan a vibrar preferencialmente de acuerdo a su frecuencia fundamental (Nakamura, 1989; Chávez-García and Cuenca, 1998).

Varios estudios empíricos muestran que para modelos unidimensionales (1D) de una capa de suelo homogéneo que se encuentra sobre una capa de roca muy rígida.

Las funciones de transferencia de capas superficiales se pueden dar por la relación:

$$S_T = \frac{H_S}{H_B}$$

Dónde: S_T es la función de transferencia para el movimiento horizontal, H_S y H_B son las componentes horizontales del movimiento en la superficie y en el basamento respectivamente.

Sin embargo, considerando la gran contribución de la propagación de las ondas Rayleigh en el ruido sísmico ambiente, se asume que la componente vertical de la señal no se amplifica

para las capas superficiales (Figura 3.2), entonces la relación E_R definida a continuación debería representar el efecto de las ondas Rayleigh en el movimiento vertical.

$$E_R = \frac{V_S}{V_B}$$

Dónde: E_R es la función de transferencia para el movimiento vertical, V_S y V_B representan el espectro vertical del movimiento en la superficie y en el basamento respectivamente.

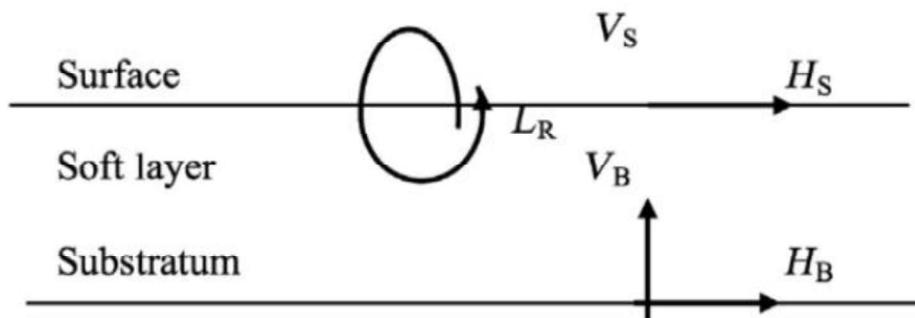


Figura 3.2 Ilustración del modelo simple asumido para la interpretación de la relación H/V de ruido sísmico ambiente según lo definido por Nakamura 1989.

Suponiendo que el efecto de las ondas de Rayleigh es igual para los componentes horizontales y verticales, es posible definir una relación espectral,

$$S_M = \frac{S_T}{E_R} = \frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}}$$

Como condición final, se supone que para todas las frecuencias de interés

$$\frac{H_B}{V_B} = 1$$

Por lo tanto, una estimación de la función de transferencia es dada por la relación espectral entre los componentes horizontal y vertical del movimiento en la superficie

$$S_M = \frac{H_S}{V_S}$$

Algunas de las condiciones anteriores ya fueron probadas, experimentalmente y teóricamente por diferentes autores (Lermo y Chávez-García, 1994; Nakamura, 1989). Así relación H/V en las rocas del basamento no tienen una dirección predominante de movimiento y cualquier amplificación del movimiento en la superficie es por la presencia de capas de sedimentos blandos.

3.2.2.1. Determinación de la frecuencia fundamental mediante la técnica de razones espectrales

La frecuencia fundamental (f_0) se define como, la frecuencia natural en la que una estructura tiende a vibrar preferencialmente cuando la longitud de onda es cuatro veces el espesor de la capa de suelo (SESAME, 2004). Para modelos unidimensionales (1D), el estudio de las razones espectrales H/V de ruido sísmico ambiente permite obtener la frecuencia fundamental de resonancia de la onda S de la capa sedimentaria que se encuentra sobre una roca de espesor infinito (semi-espacio), con bastante precisión. Lo anterior está vinculado al espesor y al valor promedio de la velocidad de onda S (V_s) de la capa sedimentaria (Lachet and Bard, 1994; Fäh et al., 2001). Pero, la existencia de una capa simple de sedimentos casi nunca se cumple en casos reales, comúnmente siempre se encuentran capas de varias litologías, lo que ocasiona que las curvas H/V exhiban más de un pico que se relacionarían a los efectos 2D y 3D, es decir, cómo se encuentra la disposición de los materiales en profundidad y en términos de una cuenca sedimentaria es la influencia de las estructuras 2D y 3D en el movimiento del terreno, que incluye las reflexiones de las

ondas de cuerpo y las superficies generadas en los márgenes de la cuenca (Mulas, 2009). Así cuando existen variaciones geológicas y topográficas en profundidad se producen ondas más complejas con diferentes frecuencias (Figura 3.3).

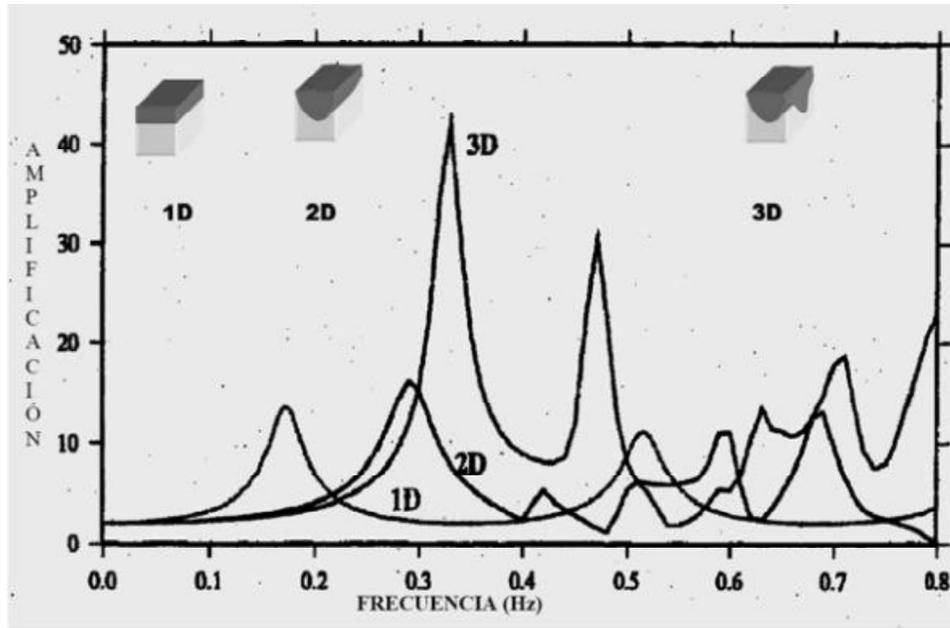


Figura 3.3 Respuestas espectrales teóricas y experimentales en modelos multidimensionales, 1D, 2D y 3D (Bard, 1999).

Ventajas y desventajas del método

- La principal ventaja del método es que es una técnica sencilla y de fácil ejecución. El registro de datos y su procesamiento es sencillo, lo que significa bajos costos.
- Permite determinar de manera precisa la frecuencia fundamental de vibración del suelo (Nakamura, 1989; Chávez-García and Cuenca, 1998), pero no permite determinar la función de amplificación (Lermo and Chávez-García, 1993; Bonnefoy-Claudet et al., 2009).
- Funciona muy bien en suelos que no se ven afectados por efectos topográficos.

3.3. Confiabilidad

El proyecto SESAME (2004), se creó en el año 2001 en Europa cuya finalidad es trabajar en la mitigación del riesgo en áreas urbanas. En 2004 publicó una guía sobre la aplicación del método de razones espectrales H/V con vibraciones ambientales, en el cual se detallan los procedimientos a tomar en cuenta para el registro de datos en el lugar de estudio, el procesamiento e interpretación de resultados y los parámetros a tomar en cuenta para la instalación de las estaciones y toma de medidas de ruido.

3.3.1. Criterios SESAME: Curva H/V confiable y Pico Claro

El proyecto SESAME utilizó parámetros matemáticos como la desviación estándar, amplitud en intervalos próximos al pico, número, longitud y solape de ventanas de registros para asegurar el procesamiento de datos sea realizado correctamente y certificar que la geometría de la curva H/V cumple con los criterios establecidos por el proyecto para obtener una estimación confiable de la frecuencia fundamental (f_0) de suelo.

A continuación, se muestran los criterios establecidos por proyecto SESAME para una curva H/V confiable y pico claro. La curva será confiable si se cumplen al menos dos de los tres criterios (Tabla 3.1), mientras que el pico será claro si cumple cinco de los seis criterios (Tabla 3.2).

Tabla 3.1. Criterios para una curva confiable. (Modificado de SESAME, 2004).

Criterios para Curva Confiable	
i.	$f_0 > \frac{10}{l_w}$
ii.	$f_0 > \frac{10}{l_w} n_c(f_0) > 200$
iii.	$\sigma_A(f) < 2$; para $0.5 f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 > 0.5$ [Hz] $\sigma_A(f) < 3$; para $0.5 f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 < 0.5$ [Hz]

Tabla 3.2 Criterios para pico claro. (Modificado de SESAME, 2004).

Criterios para Peak Claro	
i.	$\exists f^- \in \left[\frac{f_0}{4}, f_0\right] \mid A_{H/V}(f^-) < \frac{A_0}{2}$
ii.	$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < \frac{A_0}{2}$
iii.	$A_0 > 2$
iv.	$f_{peak} \left[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f) \right] = f_0 \pm 5\%$
v.	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
vi.	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

Donde:

- lw : longitud de la ventana.
- nw : número de ventanas seleccionadas para la curva H/V.
- nc : número de ciclos significativos.
- f : frecuencia.
- f_{sensor} : frecuencia de desconexión del sensor.
- f_0 : frecuencia pico de amplitud de la curva H/V.
- σf : desviación estándar de la frecuencia de la curva H/V.
- $\varepsilon(f_0)$: valor umbral para la condición de estabilidad $\sigma f < \varepsilon(f_0)$.
- A_0 : amplitud pico de la curva H/V. Se asocia a la frecuencia f_0 .
- $A_{H/V}(f)$: amplitud de la curva H/V a una frecuencia f .
- f^- : frecuencia entre $f_0/4$ y f_0 para que $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$.
- f^+ : frecuencia entre f_0 y $4f_0$ para que $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$.
- $\sigma_A(f)$: desviación estándar de $A_{H/V}(f)$.
- $\sigma_{\log_{H/V}}$: desviación estándar de la curva $\log_{H/V}(f)$.
- $\theta(f_0)$: valor umbral para la condición de estabilidad $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$.
- f_{peak} : Frecuencia asociada al valor de máxima amplitud (pico).

3.2.2 Clasificación de Curvas H/V (SESAME, 2004)

Para la interpretación de las curvas H/V, el proyecto SESAME (2004), ha clasificado las curvas H/V de la siguiente manera:

3.3.2. Pico Claro

Para que un pico sea considerado como claro, debe cumplir al menos cinco de los seis criterios establecidos por el SESAME; (Tabla 3.2) así, el valor de la frecuencia asociada al pico es una estimación confiable de la frecuencia fundamental (f_0) del suelo. Por otra parte, si la amplitud del pico es mayor a 2, hay un fuerte contraste de impedancia entre la roca base y el relleno sedimentario, lo que quiere decir que el sitio es propenso a amplificación sísmica. La amplificación sísmica inicia en la frecuencia pico y se mantiene incluso después de que la amplitud de la curva decrece.

Los criterios para identificar un pico claro se basan en:

- ✓ $A_{H/V}(f_0/4)$ y $A_{H/V}(4f_0)$, esto ayuda a caracterizar cuan estrecho es el pico.
- ✓ $A > 2$, este criterio sirve para calificar cuán nítido es un pico, se basa en la amplitud del pico H/V, el valor relativo de amplitud con respecto a otros picos en otras bandas de frecuencia.
- ✓ El valor relativo de la desviación estándar, indican si el pico es estable o no.

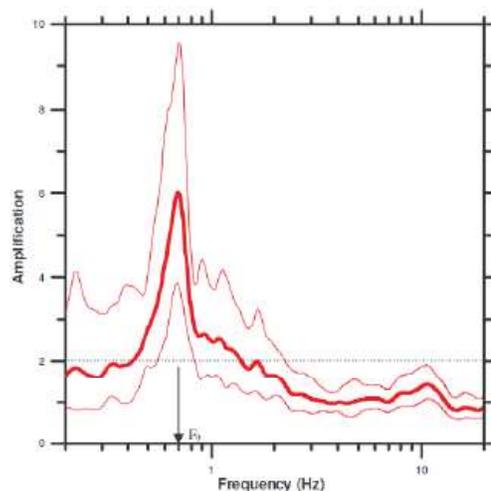


Figura 3.4 Ejemplo de curva H/V que exhibe un pico claro, (f_0) originado por un contraste de impedancia en profundidad. La línea roja gruesa es el promedio de las componentes horizontales sobre la vertical y las líneas rojas más delgadas son los valores $+\sigma$ y $-\sigma$ de la desviación estándar (Proyecto SESAME).

3.3.3. Curva Plana o Pico con Baja Amplitud en Frecuencias Bajas

- ✓ La respuesta plana en las curvas H/V puede indicar un bajo contraste de impedancia en profundidad.
- ✓ Si se tiene la certeza de suelos blandos y las curvas exhiben picos menores a 2 de amplitud, esto se puede deber a las condiciones climáticas de la zona por ejemplo el viento fuerte cuando se registraba la medida o mal acople suelo-sensor.
- ✓ Si estas curvas se observan en sitios donde hay roca, es un indicativo de sedimentos rígidos sobre la roca base, por lo tanto, se esperan amplificaciones menores a 2, es decir, bajas amplificaciones (Lachet y Bard, 1994; Bard, 1999; Konno y Ohmachi, 1998; Bonnefoy-Claudet et al., 2008).
- ✓ Si se observa picos de baja amplitud no es recomendable hacer una interpretación de la curva H/V, SESAME (2004).

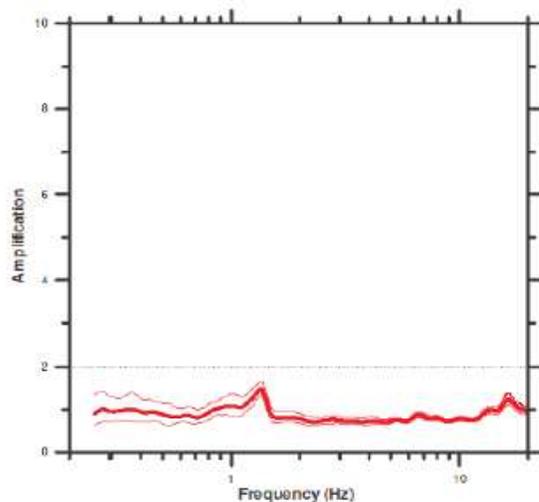


Figura 3.5 Ejemplo de curva H/V plana. La línea roja gruesa es el promedio de las componentes horizontales sobre la vertical y las líneas rojas más delgadas son los valores $+\sigma$ y $-\sigma$ de la desviación estándar (Proyecto SESAME).

3.3.4. Curvas H/V con pico Ancho o Múltiples picos

Cuando las curvas muestran un pico ancho o varios picos, estos están relacionados con campos de ondas complejos relacionados con importantes variaciones 2D y 3D de las estructuras en la profundidad. La propagación de ondas ocurre a lo largo de pendientes y discontinuidades. El origen de la relación H/V para estas curvas no puede ser explicado por

la propagación unidimensional de las ondas, por lo tanto, seleccionar una frecuencia pico puede llevar a conclusiones erróneas y no confiables de la frecuencia fundamental (Bonney-Claudet et al., 2008).

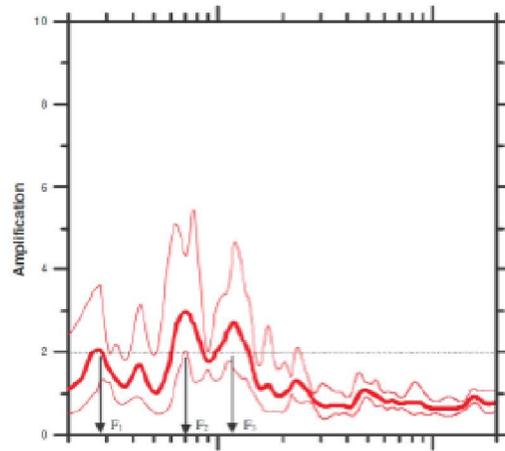


Figura 3.6 Ejemplo de curva H/V que exhibe múltiples picos, (f_1), (f_2) y (f_3) asociados a efectos topográficos. La línea roja gruesa es el promedio de las componentes horizontales sobre la vertical y las líneas rojas más delgadas son los valores $+\sigma$ y $-\sigma$ de la desviación estándar (Proyecto SESAME).

3.3.5. Curvas H/V con dos Picos

Las curvas H/V pueden exhibir dos picos que cumplen los criterios de pico claro, estas curvas son muy raras, y ocurren cuando existen dos fuertes contraste de impedancia a escalas diferentes, la primera para una estructura profunda y la segunda es más somera. Las dos frecuencias pueden ser interpretadas como característica de cada escala, siendo la frecuencia del primer pico la fundamental (f_0). Para la interpretación de estas curvas se debe revisar la geología y analizar la existencia sedimentos duros gruesos, estratos blandos de poco espesor y de un basamento rocoso muy duro.

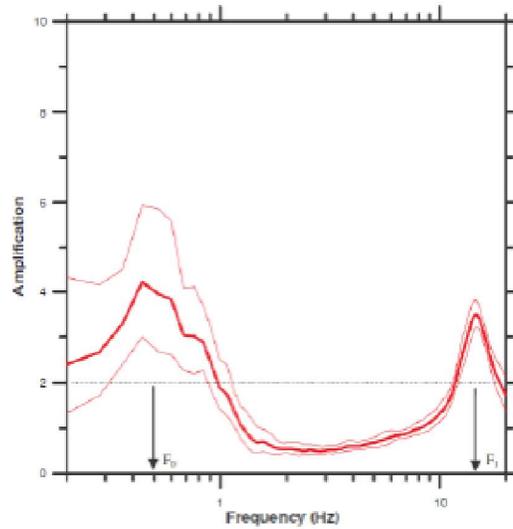


Figura 3.7 Ejemplo de curva H/V que exhibe dos picos, (f_0) y (f_1) asociados a dos contrastes de impedancia en profundidad. La línea roja gruesa es el promedio de las componentes horizontales sobre la vertical y las líneas rojas más delgadas son los valores $+\sigma$ y $-\sigma$ de la desviación estándar (Proyecto SESAME).

3.3.6. Picos agudos y de origen industrial

Las curvas H/V que exhiben un pico estrecho, el cual es característico de sitios donde hay presencia de máquinas industriales, para confirmar que la curva presente este pico se puede variar los parámetros de suavizado, dado que al realizar cambios en ese parámetro el pico se vuelve más agudo en las tres componentes de Fourier y simultáneamente la amplitud crece.

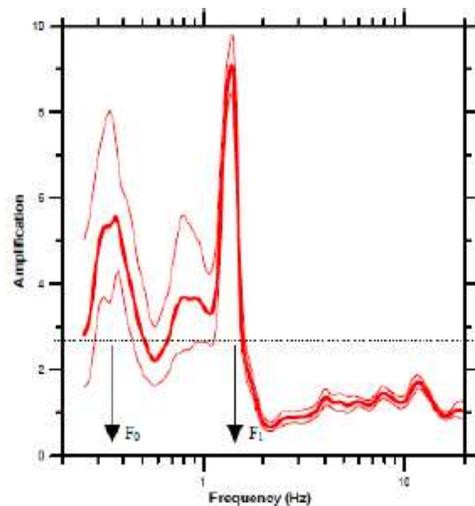


Figura 3.8 Ejemplo de curva H/V que exhibe un pico industrial (f_1) originado por actividades antrópicas. La línea roja gruesa es el promedio de las componentes horizontales sobre la vertical y las líneas rojas más delgadas son los valores $+\sigma$ y $-\sigma$ de la desviación estándar (Proyecto SESAME).

4. METODOLOGÍA

Los datos de ruido sísmico ambiente permiten obtener información sobre una estructura geológica sin necesitar del uso de fuentes controladas de ondas sísmicas. En este caso se utilizó las medidas de vibraciones ambientales de cuatro campañas realizadas en la ciudad de Quito, las cuales son utilizadas como señales sísmicas similares a la señal proveniente de terremotos, éstas provienen de fenómenos de origen natural y de actividades humanas que se propagan en forma de ondas elásticas por el suelo (Taga, 1993; Bard, 1999).

1. El primer conjunto de datos consta de 759 medidas de ruido sísmico ambiente se realizó en los años 2000, por Bernard Guiller (IRD) (Figura 4.1).
2. El segundo conjunto de datos proviene del estudio de Alfonso-Naya et al. (2012), consta de 16 medidas de ruido sísmico ambiente que se registraron cerca de las estaciones en Quito de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC). Esta red cubre las tres regiones del país y permite reunir información de movimientos fuertes para estudios del suelo y el cálculo de aceleraciones (Figura 4.1).
3. El tercer conjunto de datos consta de 63 medidas de ruido sísmico ambiente realizadas en el año 2016 por el IG-EPN (Figura 4.1).
4. El cuarto conjunto de datos proviene de la RED SÍSMICA temporal 4B (20 estaciones), instaladas en los años 2016, 2017 a 2018, se desarrolló en el contexto del proyecto francés REMAKE, Seismic Risk in Ecuador: Mitigation, Anticipation, and Knowledge of Earthquakes WP4: Evaluación del riesgo sísmico en Quito, (Diego Mercerat, Aurore Laurendeau, Françoise Courboux, Alexandra Alavarado, Fabián Bonilla, Etienne Bertrand, Philippe Guéguen, Philippe Charvis, Philippe Langlaude, Michel Pernoud, Juan Barros, María Fernanda Reyes (2016)): ANR-Remake Quito Basin. International Federation of Digital Seismograph Networks. Dataset/Seismic Network. 10.7914/SN/4B_2016 (Figura 4.1).

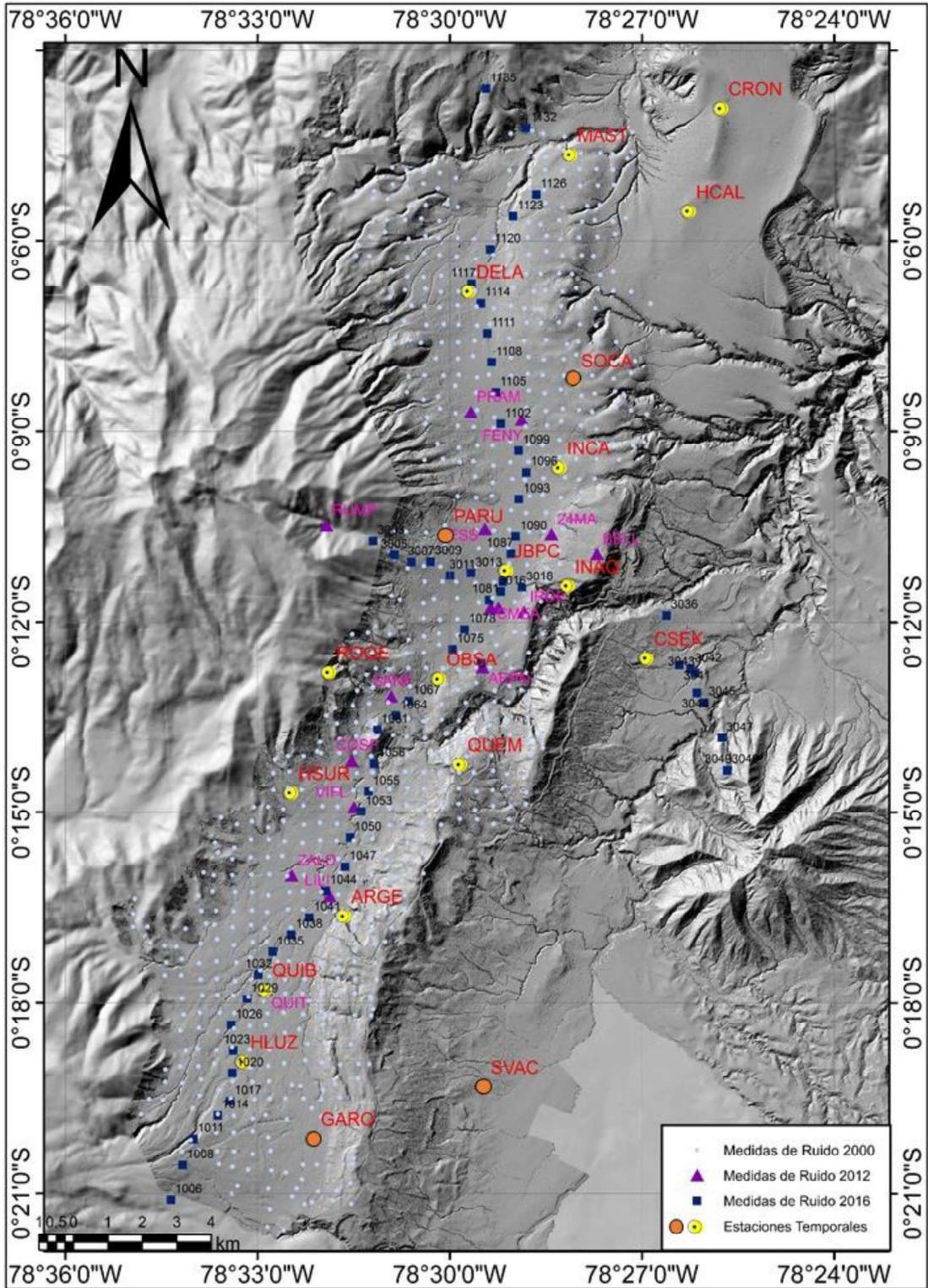


Figura 4.1 Mapa de ubicación de los registros de ruido sísmico ambiente: los círculos celestes representan la Campaña 2000 (L4-3D), los triángulos morados representan las medidas tomadas por Naya-Alfonso et al., (2012) (Lennartz 5s), los cuadrados azules representan la Campaña de 2016 (Trillium 20 s) y los círculos amarillos y tomates representan las estaciones temporales (CMG-40T y Trillium 120).

4.1. Instrumentación

Para el registro de ruido sísmico ambiente se utilizaron varias estaciones, las cuales constan de:

- Digitalizador
- Sismógrafo
- GPS
- Antena

En la tabla 4.1 se puede observar un resumen de los equipos utilizados en las diferentes campañas de ruido sísmico ambiente con las características principales del sensor, el tiempo de duración y el número de registros. (Para más información acerca de los equipos ver Anexo I).

Tabla 4.1 Resumen de los equipos utilizados en el registro de ruido sísmico ambiente en las diferentes campañas realizadas en la cuenca de Quito.

Campañas de ruido sísmico ambiente	DIGITALIZADOR	SENSOR	Frecuencia de muestreo	Frecuencia de corte	Duración de la medida	Número de medidas
2000	Desconocido	L4-3D	100 Hz	1 a 100 Hz	15 min	759
2012	REF-TEK 130	Lennartz 5s	100 Hz	0.2-50 Hz	20 a 60 min	16
2016	REF-TEK 130	Trillium 20s	100 Hz	0.05-100 Hz	1 a 2 h	63
2016-2018	REF-TEK 130/ GURALP CMG- CD24	Trillium 120s y CMG-40T	200 Hz	0.2/0.0083-100 Hz	continuo	20

4.2. Metodología de trabajo de campo

Para la adquisición de datos de ruido sísmico ambiente, es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones establecidas por el proyecto SESAME, (2004) para la aplicación de la técnica de razones espectrales H/V:

4.2.1. Acoplamiento del sensor en el suelo

Si el suelo donde se coloca el sensor es de asfalto o concreto no afecta los resultados de H/V en la banda de frecuencias de interés, pero si los sitios son de césped o suelos blandos hay que evitar colocar los sensores, puesto que el viento puede producir perturbaciones. Además, se debe evitar tomar datos en suelos saturados de agua o suelos sin cohesión, ya que el sensor no se acoplará correctamente al suelo, lo que dará como resultado curvas perturbadas.

4.2.2. Instalación del Sensor

El sensor debe ser colocado en el suelo y nivelado adecuadamente de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Además, se debe evitar que haya estructuras como: edificios, casas, aeropuertos, árboles, etc. cercanas al sensor, dado que estas pueden influir en el resultado; las estructuras subterráneas como tuberías alcantarrillados, etc., pueden alterar la amplitud del movimiento en la componente vertical.

4.2.3. Condiciones del Clima

Se debe evitar grabar en días de viento, durante lluvias intensas y temperaturas extremas dado que estas condiciones pueden afectar notablemente los resultados.

4.2.4. Perturbaciones

Las fuentes locales de corta duración (pasto, tren, automóviles, etc.) pueden alterar los resultados. El tráfico rápido en las carreteras afecta a la relación H/V si se encuentran entre los 15 a 20 metros de distancia, mientras que el tráfico del centro de la ciudad influye en las relaciones H/V cuando las distancias son más cortas. Se debe evitar registrar las mediciones cerca de fuentes monocromáticas como: máquinas de construcción, bombas, máquinas industriales, etc.

4.2.5. Duración y frecuencia de muestreo

La duración y la frecuencia de muestreo son parámetros que deben ser controlados en función del objetivo del estudio y la geología local del sitio. La frecuencia de muestreo depende de la frecuencia máxima de interés para el estudio, es decir, si deseamos analizar

frecuencias hasta 30 Hz, será suficiente tener una frecuencia de muestreo de 60 Hz; así, a la frecuencia máxima que es posible recuperar de la señal se la conoce como frecuencia Nyquist que es la mitad de la frecuencia de muestreo a la que se “configura” el digitalizador. La duración de grabación se refiere al tiempo que el equipo permanece instalado y grabando datos; para obtener una cantidad suficiente información para el análisis de una curva H/V robusta, el proyecto SESAME (2004), en uno de sus criterios definió que el número de ciclos significativos (n_c) debe ser mayor a 200. Puesto que n_c esta en función de varios parámetros (frecuencia máxima, longitud y número de ventanas), no es posible establecer de manera general cuántos minutos se necesitan para obtener una curva H/V robusta, por ello el proyecto propuso parámetros donde se establece un estimado de la duración del registro de ruido sísmico de acuerdo a la frecuencia a la que se quiere ir, es decir, si en el sitio de estudio se sospecha de un pico H/V de muy baja frecuencia (aproximadamente de 0.2 Hz), la duración de la medida debe ser al menos de media hora y para el análisis de ventanas (l_w) un mínimo de 50 s por otro lado, si hay un posible pico a 10 Hz, la longitud de la ventana puede ser de 5 s y la duración de la grabación de 2 mim (Tabla 4.2)

Tabla 4.2 Valores recomendados de adquisición y procesamiento para análisis de relación espectral horizontal a vertical. (Tomado de Dal Moro, 2015).

f_0 (Hz)	Minimum Value for l_w (s)	Recommended Minimum Record Duration (min)
0.2	50	30
0.5	20	20
1	10	10
2	5	5
5	5	3
10	5	2

La frecuencia mínima (f_{min}) para calcular las curvas H/V depende de la frecuencia de corte del sensor (f_{min} sensor), por ejemplo los equipos utilizados para el registro de ruido sísmico de este estudio tienen las siguientes frecuencias de corte:

- Trillium 120 s, tiene una frecuencia de corte inferior, de 0.0083 HZ.
- Trillium 20 s, tiene una frecuencia de corte inferior, de 0.05 HZ.
- L4-3D, tiene una frecuencia de corte inferior, de 1 HZ.
- Lennartz 5 s, tiene una frecuencia de corte inferior, de 0.2 HZ.
- CMG40T, tiene una frecuencia de corte inferior, igual a 0.02 HZ.
- También, depende de la duración de las ventanas, es decir, si tenemos:
- Ventanas de 100 s la frecuencia mínima a resolver es 0.1 Hz
- Ventanas de 50 s la frecuencia mínima a resolver es 0.2 Hz
- Ventanas de 20 s la frecuencia mínima a resolver es 0.5 Hz.

Entonces la duración de las ventanas que se va a elegir depende de la frecuencia mínima (f_{min}) en el proceso, lo que quiere decir que está en función de:

- La duración total del registro, en el cual se necesita al menos 10 ventanas.
- De la estacionalidad del ruido que se registra, es decir, de cuan constaste es debido a que si hay ventanas que tienen picos provenientes de fuentes tales como, por ejemplo los carros, es muy difícil sacar ventanas de ruido estacionario.
- De las características del sensor, es decir, si se tiene un sensor que con frecuencia de corte de 1 Hz, no sirve registrar una duración de ventanas de 100s, dado que la señal bajo la frecuencia de corte no es confiable.
- Del procesamiento que se va a aplicar, por ejemplo si se observa bajas frecuencias en la señal se puede elegir utilizar un filtro tipo "high pass" para eliminar estas frecuencias y entonces la nueva señal se puede utilizar para ver frecuencias más grandes que el filtro.

4.2.6. Instalación de la estación:

Para el registro de datos se procede a armar el equipo de la siguiente manera:

Installation



Figura 4.2 Ejemplos de cómo se instalaron los sensores.

- Se determina la ubicación precisa.
- El sensor debe ser colocado en un hueco de aproximadamente 40 cm de profundidad, en el cual se coloca una placa de granito para asentar y nivelar al sensor.
- Se comprueba la horizontalidad del sensor con una burbuja de precisión, y se controla con los tornillos de nivelación; se ajusta la tuerca de seguridad para fijar su nivelación.
- Se orienta el sensor con el norte geográfico. Se conecta el cable a la entrada correspondiente del sensor en el digitalizador.
- Se coloca la antena GPS del equipo (permite tener precisión en el tiempo) en un área firme, y se conecta a la entrada al digitalizador.
- Se conecta el cable de alimentación, y al encender la pantalla del digitalizador, se confirman los parámetros de configuración para la grabación.
- Se verifica que los tres canales (3 componentes: 1 vertical y 2 horizontales dispuestas perpendicularmente entre sí) estén funcionando correctamente, si no es así debe

esperarse un tiempo prudente para verificar si las componentes ya se han estabilizado.

- Cuando ya están verificados todos los parámetros, se procede a tapar al sensor con un balde para su luego ser enterrado.
- Se anota en la hoja de campo la hora exacta de inicio de grabación, día juliano, nombre del archivo, número de estación, las características del suelo en donde se coloca la estación y cualquier observación que pueda generar variaciones en la medición (Figura 4.3).

FICHA DE CAMPO DE MEDIDA DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

Operador: <i>Dario Fuentes</i>	Fecha: <i>13-12-2016</i>	Proyecto: <i>M2Q</i>																																			
Código del punto: <i>1072</i>	Dirección: <i>Plaza República de la India</i>	Tipo de GPS: <i>Garmin</i>																																			
Latitud: <i>S00: 12.7562</i>	Longitud: <i>W 078: 30.1082</i>	Altitud: <i>+ 02825</i>																																			
Marca digitalizador: <i>Reitek-130</i>	Marca sensor: <i>Willium</i>	N° de foto:																																			
Serial digitalizador:	Serial sensor: <i>2993</i>	Ref. memoria:																																			
Nombre del archivo:	Frecuencia de muestreo: <i>100 Hz</i>	Gain: <i>1</i>																																			
Hora de inicio de la grabación (TU): <i>18h31</i>	Hora final de la grabación (TU): <i>19h45</i>																																				
Condiciones climáticas	Viento <input type="checkbox"/> sin <input type="checkbox"/> débil <input checked="" type="checkbox"/> moderado <input type="checkbox"/> fuerte Lluvia <input checked="" type="checkbox"/> sin <input type="checkbox"/> débil <input type="checkbox"/> moderada <input type="checkbox"/> fuerte Temperatura: _____ Comentarios: _____																																				
Tipo de terreno	<input type="checkbox"/> Tierra <input type="checkbox"/> dura <input type="checkbox"/> Grava <input type="checkbox"/> Arena <input type="checkbox"/> Roca <input type="checkbox"/> Hierba <input type="checkbox"/> corta alta <input type="checkbox"/> suave <input type="checkbox"/> Asfalto <input type="checkbox"/> Hormigón <input checked="" type="checkbox"/> Adoquín <input type="checkbox"/> Otros <input checked="" type="checkbox"/> Suelo seco <input type="checkbox"/> Suelo húmedo Comentarios: _____																																				
Acoplamiento sensor / terreno:	<input type="checkbox"/> natural <input type="checkbox"/> enterrado <input checked="" type="checkbox"/> artificial <input type="checkbox"/> adecuado Comentarios: _____																																				
Densidad de construcción:	<input type="checkbox"/> ninguna <input type="checkbox"/> dispersa <input checked="" type="checkbox"/> densa <input type="checkbox"/> otros Comentarios: _____																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TRÁFICO</th> <th>ninguno</th> <th>poco</th> <th>moderado</th> <th>denso</th> <th>tráfico intenso</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>carros</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td><i>30m</i></td> </tr> <tr> <td>camiones</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td><i>30m</i></td> </tr> <tr> <td>peatones</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td><i>5m</i></td> </tr> <tr> <td>otros</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	TRÁFICO	ninguno	poco	moderado	denso	tráfico intenso	Distancia	carros						<i>30m</i>	camiones						<i>30m</i>	peatones						<i>5m</i>	otros							Fuentes de ruido (fábricas, obras, bombas, ríos, ...) <input type="checkbox"/> ninguno <input type="checkbox"/> sí, <input type="checkbox"/> tipo _____ distancia: _____ ESTRUCTURAS CERCANAS (Árboles, pozos, construcciones, puentes, estructuras enterradas, tubería, drenaje, quebradas, edificios) (descripción, altura, distancia) <i>Construcciones de 30m de alto a 10m de distancia</i>	
TRÁFICO	ninguno	poco	moderado	denso	tráfico intenso	Distancia																															
carros						<i>30m</i>																															
camiones						<i>30m</i>																															
peatones						<i>5m</i>																															
otros																																					

Figura 4.3 Hoja de campo establecida por el proyecto SESAME (2004) para el registro de ruido sísmico ambiente, campaña 2016.

- El digitalizador se coloca en una caja plástica para evitar que se dañe por las diferentes condiciones climáticas o por las diferentes actividades humanas (Figura 4.5).

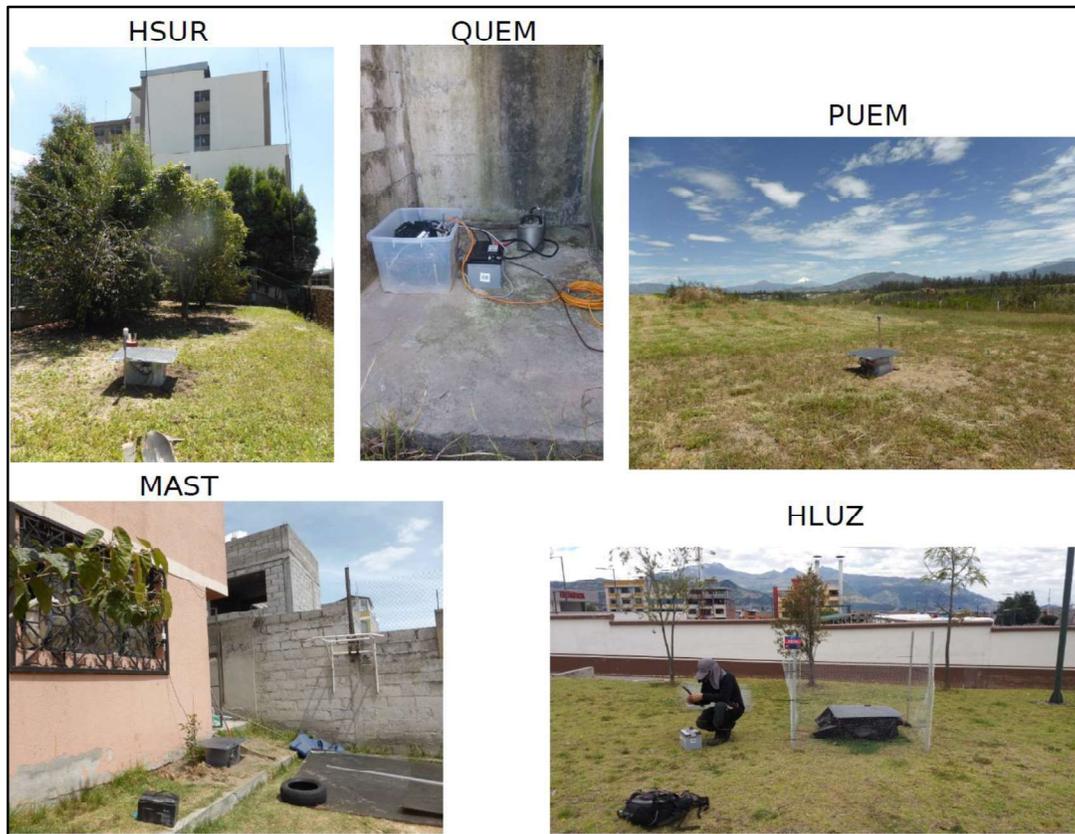


Figura 4.4 Ejemplo de equipo instalado para la toma de ruido sísmico ambiente.

- Finalizado el proceso de grabación, se reporta la hora y se desconecta la corriente, luego se bloquean las masas del sensor (de ser necesario), y se continúa con el desmontaje del equipo.

4.3. Metodología de procesamiento

El procesamiento de señales se realizó utilizando los siguientes programas informáticos:

- Geopsy: Programa libre creado por el proyecto SESAME (2004) de la Unión Europea. Permite el procesamiento, visualización y organización de medidas geofísicas mediante su interfaz gráfica.
- Matlab R2018a: programa con licencia para realizar cálculos y gráficos.

En la figura 4.6 se puede observar cómo se utilizaron los programas antes mencionados.



Figura 4.5 Programas utilizados para la obtención de la curva H/V de registros de ruido sísmico ambiente.

4.3.1. Conversión de Archivos

Cuando se descargan los datos de los digitalizadores, estos se encuentran en un formato propio de cada digitalizador (bruto); estos archivos se convierten a SAC mediante una rutina en LINUX. Después estos archivos son cargados al software GEOPSY en el cual se realiza el cálculo de las razones espectrales y se obtiene un archivo de texto, con el cual se grafican las curvas H/V en Matlab.

4.3.2. Procesamiento de los datos GEOPSY

GEOPSY es un programa que permite calcular las razones espectrales de los registros de ruido ambiente de manera simple, pero hay que definir algunos parámetros para que la señal se analice correctamente y obtener resultados confiables.

Para cada estación se utilizó el siguiente procedimiento: Importar las señales de las dos componentes horizontales y la vertical y se aplicó un filtro pasa-alto para atenuar las bajas frecuencias, ($f < f_c$ inferior) (Figura 4.6).

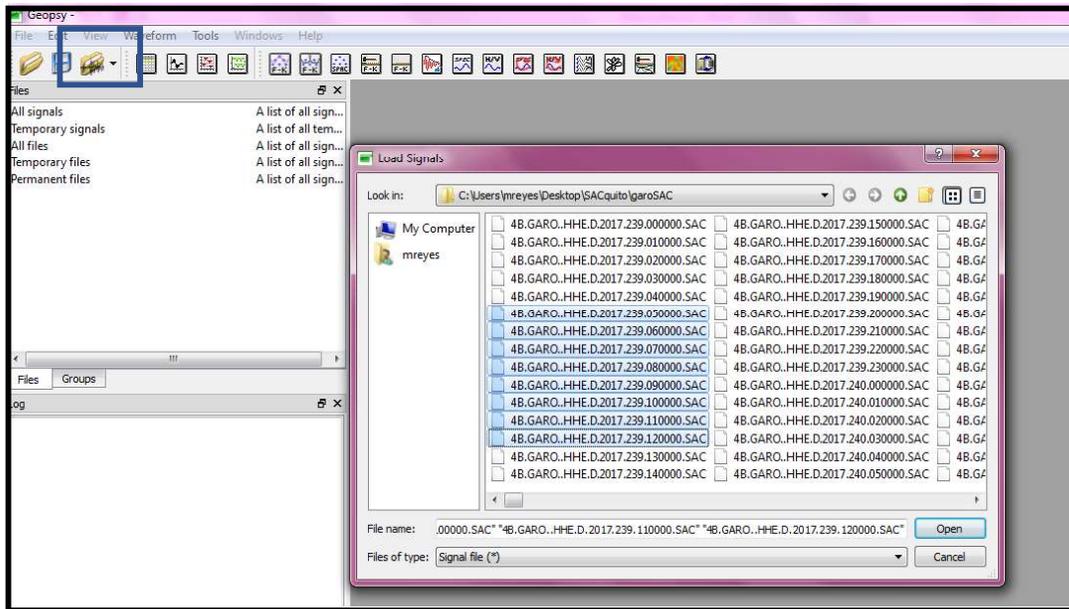


Figura 4.6 Ingreso de los registros de ruido sísmico ambiente al software GEOPSY.

Dependiendo de la duración del registro se configuran los parámetros para la selección de ventanas. Para seleccionar las ventanas se compara entre dos parámetros STA y LTA. STA (Short Term Average) es la amplitud de la señal en un período corto de tiempo, denotado como t_{STA} , con valores entre 0.5 a 2.0 segundos, para el análisis se usó un $STA=1.0s$ y un LTA (Long Term Average) es la amplitud de la señal en un período de tiempo mayor, denotado como t_{LTA} , con valores entre 20 a 60 segundos, para las señales del año 2000 se utilizó $LTA = 50.0s$ y para el resto de datos es $30.0s$. El parámetro S_{max} (STA/LTA) es el valor umbral que evita ventanas de tiempo con amplitudes transitorias energéticas, típicamente los valores son alrededor de 1.5 a 2.5. Cuando supera un valor umbral S_{max} , se dice que el ruido es puntual, mientras que, si STA/LTA no supera S_{max} , el ruido es estacionario. Para evitar una señal de muy baja amplitud se ha definido un valor umbral inferior S_{min} (STA/LTA) de acuerdo al tipo de sensor utilizado y a los parámetros establecidos por el SESAME, (2004). Si la amplitud de la señal está entre los valores umbrales máximo y mínimos, esa parte de la señal es considerada para el cálculo de la razón H/V.

La longitud de las ventanas se determina de acuerdo al tiempo de duración de cada medida de ruido, para obtener el número de ventanas de manera automática se da clic en select, y se elige el tipo de suavizado Konno & Ohmachi ($b=40$). Dependiendo del tipo de sensor utilizado para el registro de ruido ambiente se determina el rango de frecuencia en el cual se van a graficar las curvas H/V, es decir, si el sensor tiene una frecuencia de corte de 1 a 100

Hz la curva se grafica a partir de 0.5 a 50Hz (frecuencias inferior y superior hasta las cuales la curva puede ser confiable), si la frecuencia de corte del sensor es de 0.0083 Hz hasta 100 Hz, el rango para hacer la gráfica es de 0.01 Hz a 50 Hz. El programa selecciona las ventanas de manera automática, calcula la transformada de Fourier para cada componente y determina la curva H/V (Figura 4.8 y 4.9).

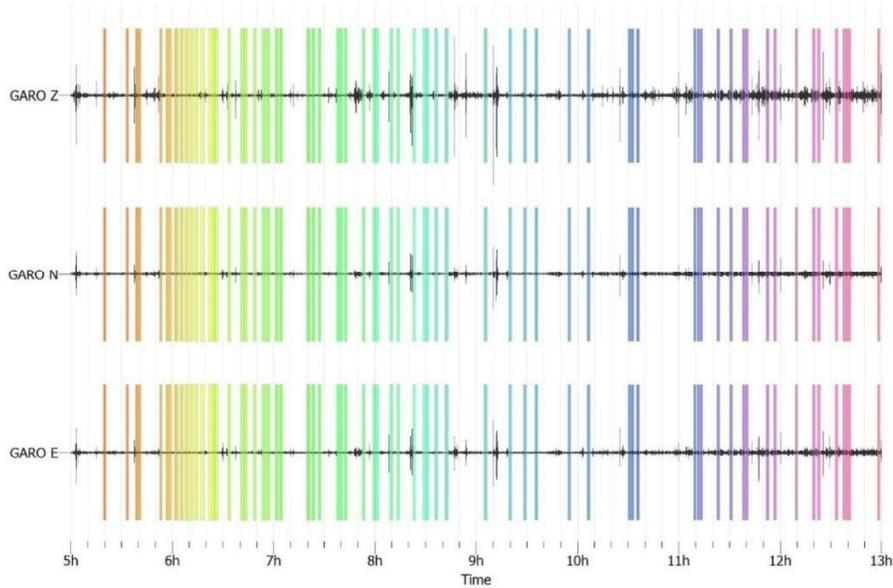


Figura 4.7 Registro de la señal en las tres componentes (vertical: Z; horizontales N y E) indicando las ventanas seleccionadas por el programa. Ejemplo: Garrochal que se encuentra al sur oriente de Quito, UTM (9962882.6; 774328.7). Tiempo de grabación utilizado en este caso 9 horas.

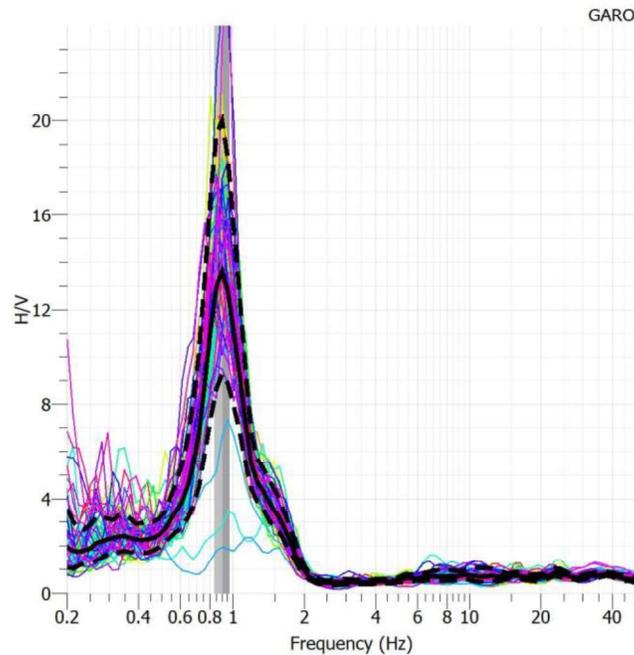


Figura 4.8 Curva H/V obtenida mediante el procesamiento en el programa GEOPSY, estación GARO.

El cálculo de las razones espectrales se realiza de la siguiente manera:

Para cada ventana de datos se obtiene los espectros de la señal (amplitud vs. frecuencia) en cada componente (N-S (SH1), E-W (SH2), Z (SV)). El espectro horizontal (SH) se define a partir de la siguiente razón:

$$SH = \sqrt{\frac{SH_1^2 + SH_2^2}{2}}$$

A continuación, se divide el resultado del espectro horizontal combinado SH, por el espectro vertical SV (razón espectral entre la resultante horizontal y la vertical), obteniéndose el resultado conocido como H/V, mHVSR o curvas de ruido sísmico ambiente

Una vez realizado el procedimiento para cada ventana, se suman las razones espectrales de cada ventana y se obtiene el promedio y la desviación estándar:

$$H/V_{prom}(fi) = \frac{\sum_{j=1}^{n_{ventanas}} \log(H/V_{nj}(fi))}{n_{ventanas}}$$

$$\sigma_{H/V}(fi) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_{ventanas}} \log^2(H/V_{nj}(fi)) - n_{ventanas} \log^2(H/V_{prom}(fi))}{n_{ventanas} - 1}}$$

$$\sigma_{H/V}(fi) = 10^{\sigma_{H/V}(fi)}$$

El cálculo de las razones espectrales se sintetiza en la Figura 4.10

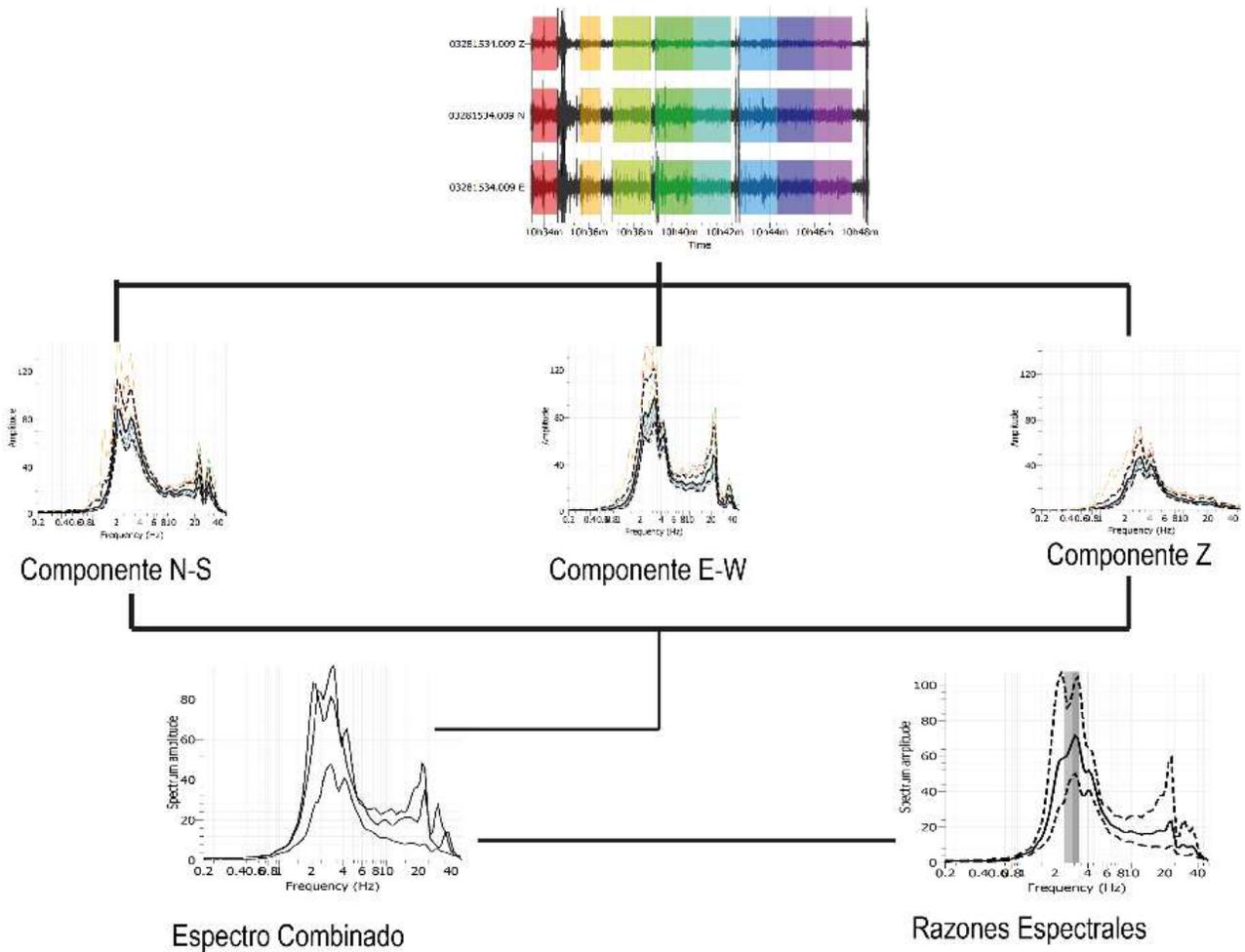


Figura 4.9 Esquema del cálculo de razones espectrales en un punto de ruido, realizado en 2000, proveniente de un sismómetro LEAS-SISMALP3

4.3.3. Obtención de la Curva H/V en Matlab

Mediante el código realizado en este programa se realizó el gráfico de las curvas H/V.

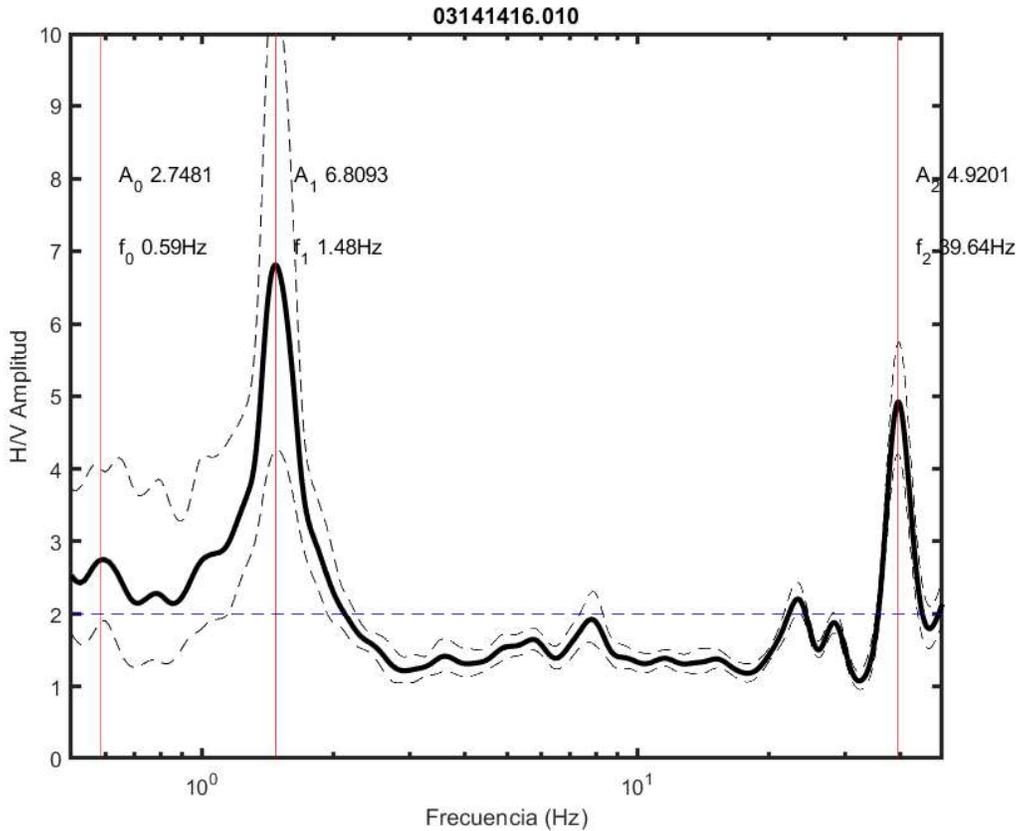


Figura 4.10 Obtención de la curva mediante el programa Matlab 2018, para una estación de 2000, se muestra las amplitudes y las frecuencias de los picos que superan una amplitud H/V mayor a 2.

4.4. Análisis de sensibilidad de la curva mHVSR de acuerdo a las características de los sensores

A continuación, se puede ver como se modifican las curvas H/V de tres estaciones de la red temporal 4B cuando se varían algunos parámetros en el procesamiento de las señales. Las estaciones escogidas fueron: QUIB, que se encuentra en Quitumbe en el sur de la cuenca de Quito (Figura 4.2). Muestra dos picos, el primero a 0.28 y un segundo a 16.52 Hz, SOCA, que se encuentra ubicada en el norte oriente de Quito en el Hospital Solca (Figura 4.2) exhibe un pico claro a 1 Hz y ROQE, ubicada en las faldas del CVP, muestra un pico H/V alrededor de 3 Hz. A los datos de las estaciones temporales se les aplicó un filtro pasa banda, de acuerdo a la frecuencia de corte de los sensores utilizados en las diferentes campañas de ruido

sísmico ambiente en la ciudad de Quito. De acuerdo a los sensores se aplicó los siguientes filtros

- Sin filtro Trillium 120 s
- Filtro de 0.05 a 100 Hz (tipo Trillum 20 s)
- Filtro de 0.2 a 100 Hz (tipo Lennartz 5s y CMG-40T)
- Filtro de 1 a 100 Hz (tipo L4-3D)

La longitud de cada ventana se estableció de acuerdo a la duración de la señal. La duración de los registros es de 3 horas, entoces la longitud de la ventana puede tomar valores mayores a 50 s SESAME (2004), en este caso se tomó una longitud de 200 s.

QUIB

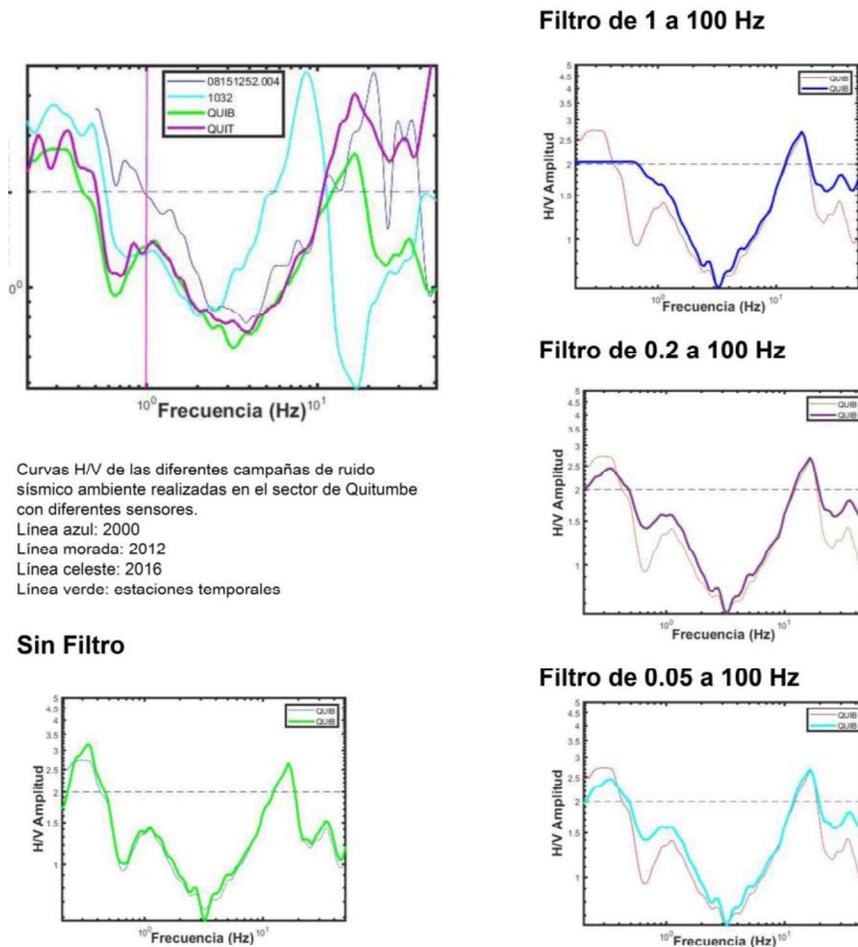
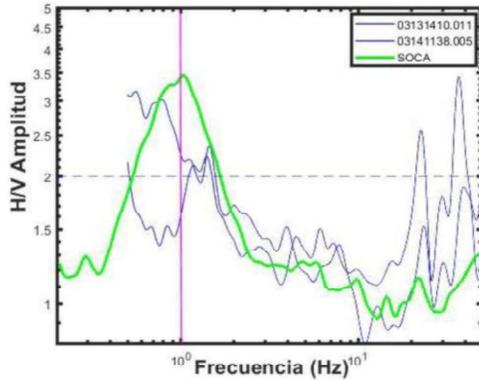


Figura 4.11 Variación de la curva H/V de la estación QUIB al aplicar filtros de acuerdo, a la frecuencia de corte de cada sensor utilizado en las diferentes campañas para el registro de ruido sísmico ambiente.

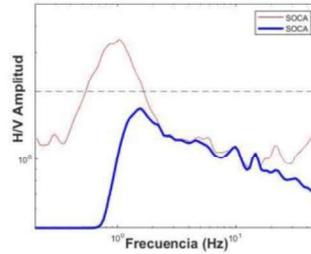
Como se puede observar en los gráficos, al aplicar filtros de acuerdo al sensor con los cuales se registraron las medidas de ruido sísmico ambiente, el único que muestra limitación es el que se encuentra entre 1 a 100 Hz, pues el pico H/V de 0.3 Hz que se observa en las demás curvas desaparece.

SOCA

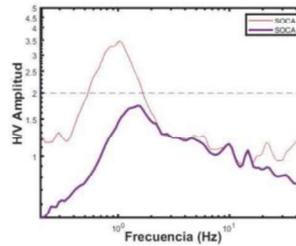


Curvas H/V de las diferentes campañas de ruido sísmico ambiente realizadas en el sector de Quitumbe con diferentes sensores.
 Línea azul: 2000
 Línea verde: estaciones temporales

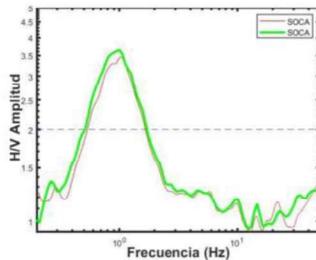
Filtro de 1 a 100 Hz



Filtro de 0.2 a 100 Hz



Sin Filtro



Filtro de 0.05 a 100 Hz

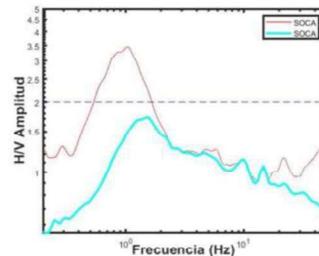


Figura 4.12 Variación de la curva H/V de la estación SOCA al aplicar filtros de acuerdo, a la frecuencia de corte de cada sensor utilizado en las diferentes campañas para el registro de ruido sísmico ambiente.

Al aplicar diferentes tipos de filtros a tres horas de datos en la estación SOCA, se puede observar que la curva H/V cambian su forma y amplitud, siendo el cambio más notable cuando a la señal se le aplica el filtro entre 1 a 100 Hz, en la cual se puede apreciar que la curva es

plana entre 0.1 a 1 Hz. Además, el pico a 1Hz que muestra la estación se desplaza alrededor de 1.5 Hz y presenta una amplitud menor a 2 para cualquier tipo de filtro aplicado.

ROQE

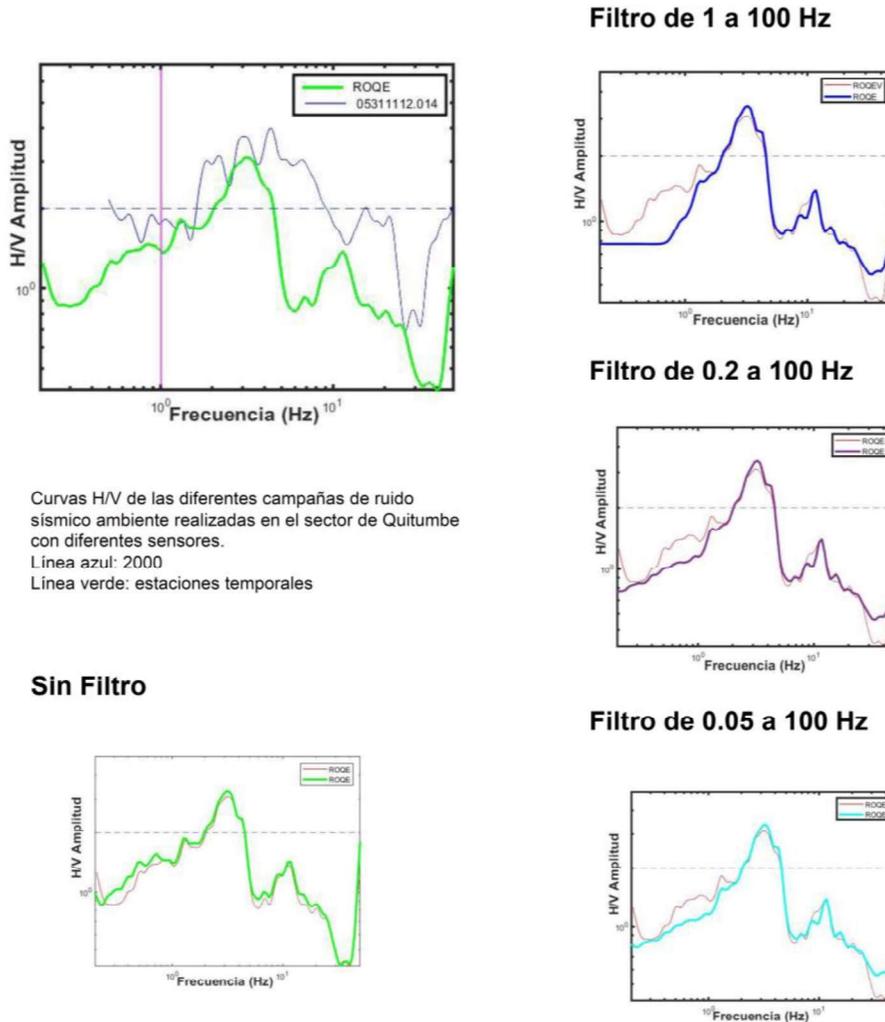


Figura 4.13 Variación de la curva H/V de la estación ROQE al aplicar filtros de acuerdo, a la frecuencia de corte de cada sensor utilizado en las diferentes campañas para el registro de ruido sísmico ambiente.

En la estación ROQE se empleó de igual forma los mismos filtros y parámetros. En general el pico a 3 Hz no se ve afectado, pero la amplitud de la curva H/V es un poco más grande cuando se aplican los filtros. En la curva H/V en la cual se aplicó el filtro entre 1 a 100 Hz se observa que la curva es plana bajo 1 Hz.

5. RESULTADOS

Este estudio se efectuó adoptando las normas del proyecto SESAME (2004), el cual brinda parámetros para el análisis de registros de ruido sísmico ambiente (ver capítulo 3), mediante el uso de la técnica de Nakamura o de la razón espectral horizontal sobre vertical. Esta razón proporciona la frecuencia fundamental (f_0) del sitio donde se realizan los registros de ruido sísmico ambiente.

A las medidas del año 2000 se les aplicó el análisis de confiabilidad establecido por el proyecto SESAME (2004), para identificar diferentes picos de resonancia para frecuencias > 1 Hz, que responden a los criterios SESAME y para frecuencias < 1 Hz se identificó los picos no claros, los cuales fueron comparados y relacionados con los picos a baja frecuencia obtenidas con los datos de las nuevas campañas de ruido sísmico ambiente, para establecer si son confiables o no. En otras palabras, se completó la ventana de frecuencias.

A continuación, se describen los resultados obtenidos de las diferentes campañas de ruido sísmico ambiente realizadas en la cuenca de Quito.

5.1. Campaña 2000 (IG-EPN)

Uno de los resultados interesantes que se obtuvo de este estudio fue la identificación y clasificación de las distintas topologías de las curvas H/V del año 2000, las cuales indican contraste de impedancia entre el suelo-roca. La clasificación o topología de las curvas resultó difícil, puesto que para su obtención influyen varios parámetros entre los cuales se encuentran la forma en que fue registrado el ruido sísmico ambiente, además que las características geológicas y topográficas de la cuenca de Quito parecen ser muy complejas. Sin embargo, observando la forma y la frecuencia de las curvas fue posible deducir rasgos generales de la estructura del subsuelo. De este análisis, se define que las curvas H/V de la campaña de año 2000, presentan tres topologías:

- ✓ Curvas con un pico claro y múltiples picos,
- ✓ Curvas con pico no SESAME (picos que no cumplen los parámetros establecidos por el SESAME) y,
- ✓ Curvas planas

Dentro de cada tipo, se han identificado familias de acuerdo a la frecuencia a la que se encuentran los picos claros, los picos no SESAME (picos que no cumplen los parámetros establecidos por el SESAME) y las curvas planas.

5.1.1. Curvas H/V con un pico claro y múltiples picos

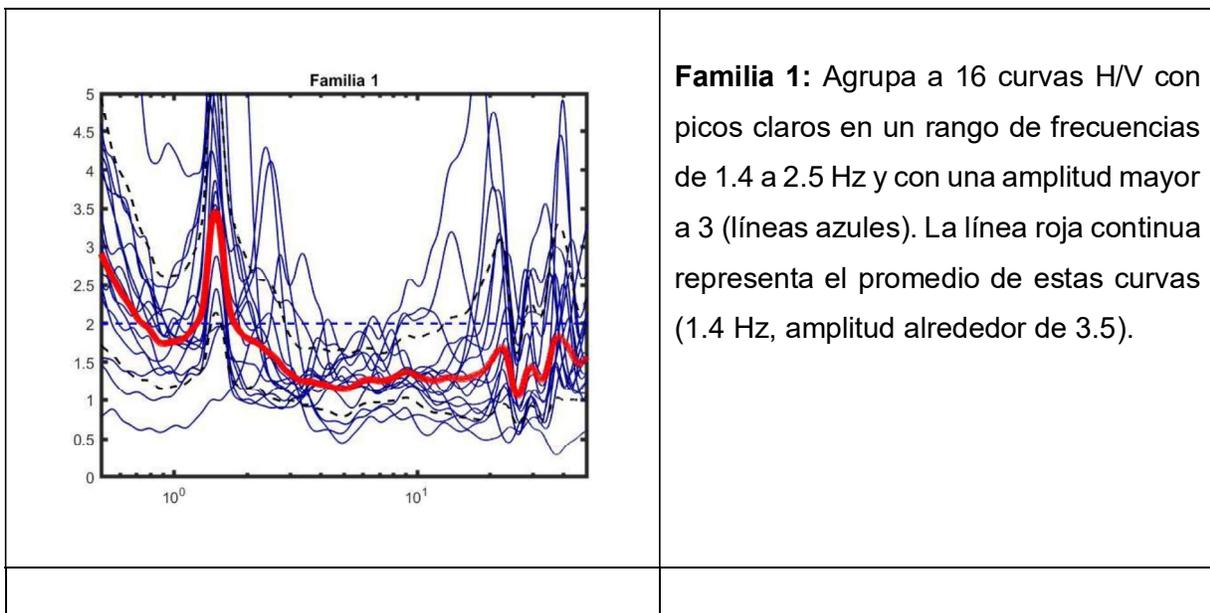
Estos dos tipos de curvas presentan un pico o varios picos claros SESAME, es decir, picos los criterios definidos por el Proyecto SESAME (2004).

Como resultado del análisis de las 759 medidas de ruido sísmico ambiente se establece que, 119 curvas H/V presentan un solo pico claro y 23 curvas H/V presentan múltiples picos, lo que en conjunto equivale a 18.73% del total.

Las curvas H/V correspondientes a un solo pico claro están distribuidas tanto al norte como al sur de la cuenca de la siguiente manera: 53 curvas H/V al norte, 46 curvas H/V al sur, y 22 curvas H/V en el centro de la cuenca.

Las curvas H/V que presentan más de un pico claro son muy raras, pero es probable que estos picos estén relacionados con la estructura subterránea de la cuenca en 2D o 3D. Las curvas H/V que presentan múltiples picos están distribuidas de la siguiente manera, 10 al norte, 7 al sur y 4 en el borde occidental del centro de la cuenca

En función de la frecuencia a la que se observan los picos, se han definido 4 familias (figura 5.1).



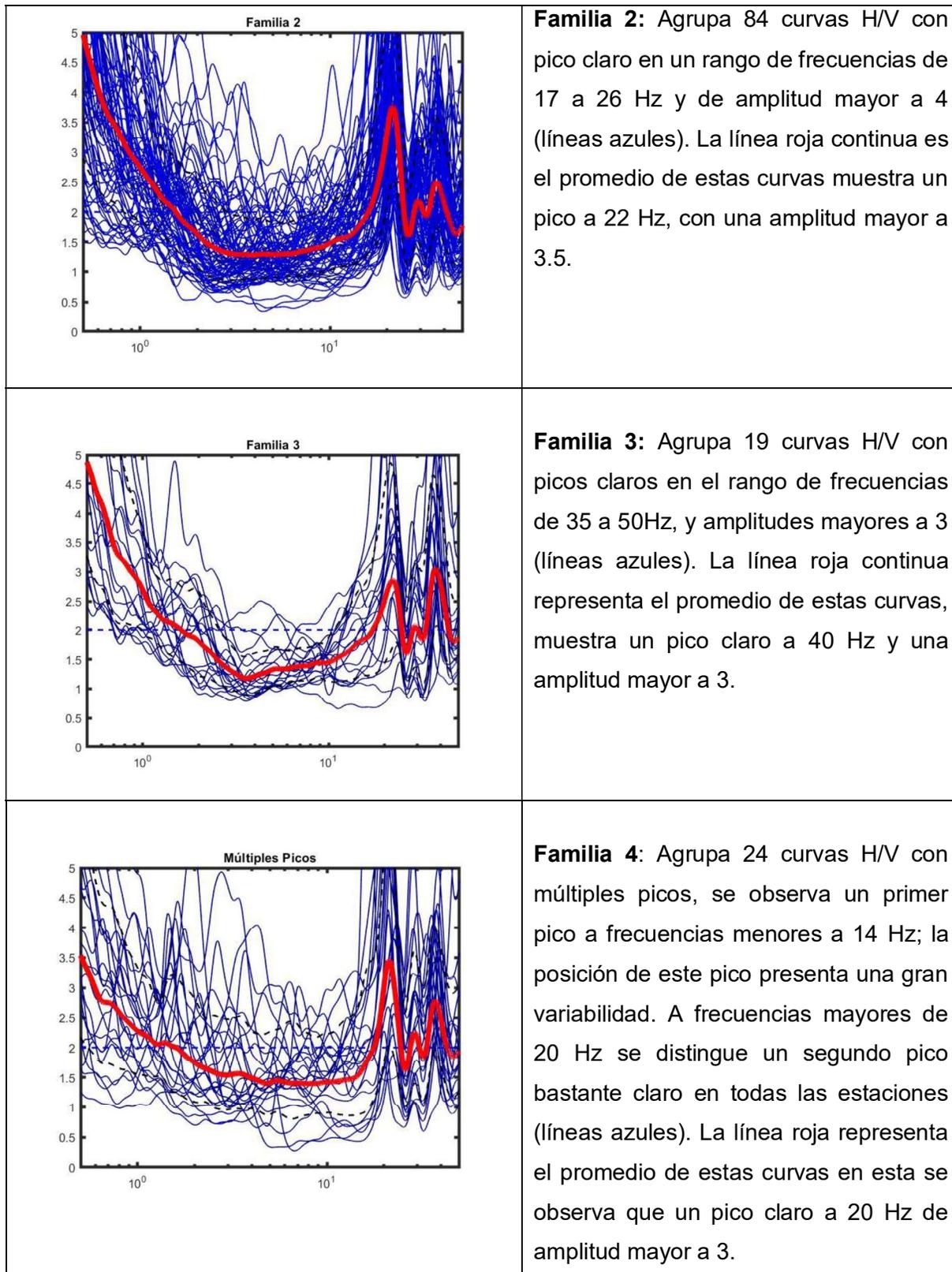


Figura 5.1 Curvas H/V con picos claros divididos en familias de acuerdo a la frecuencia a la que se encuentra el pico.

En la figura 5.2, se observa la distribución de los puntos con curvas H/V con pico claro y múltiples picos sobre la cuenca de Quito.

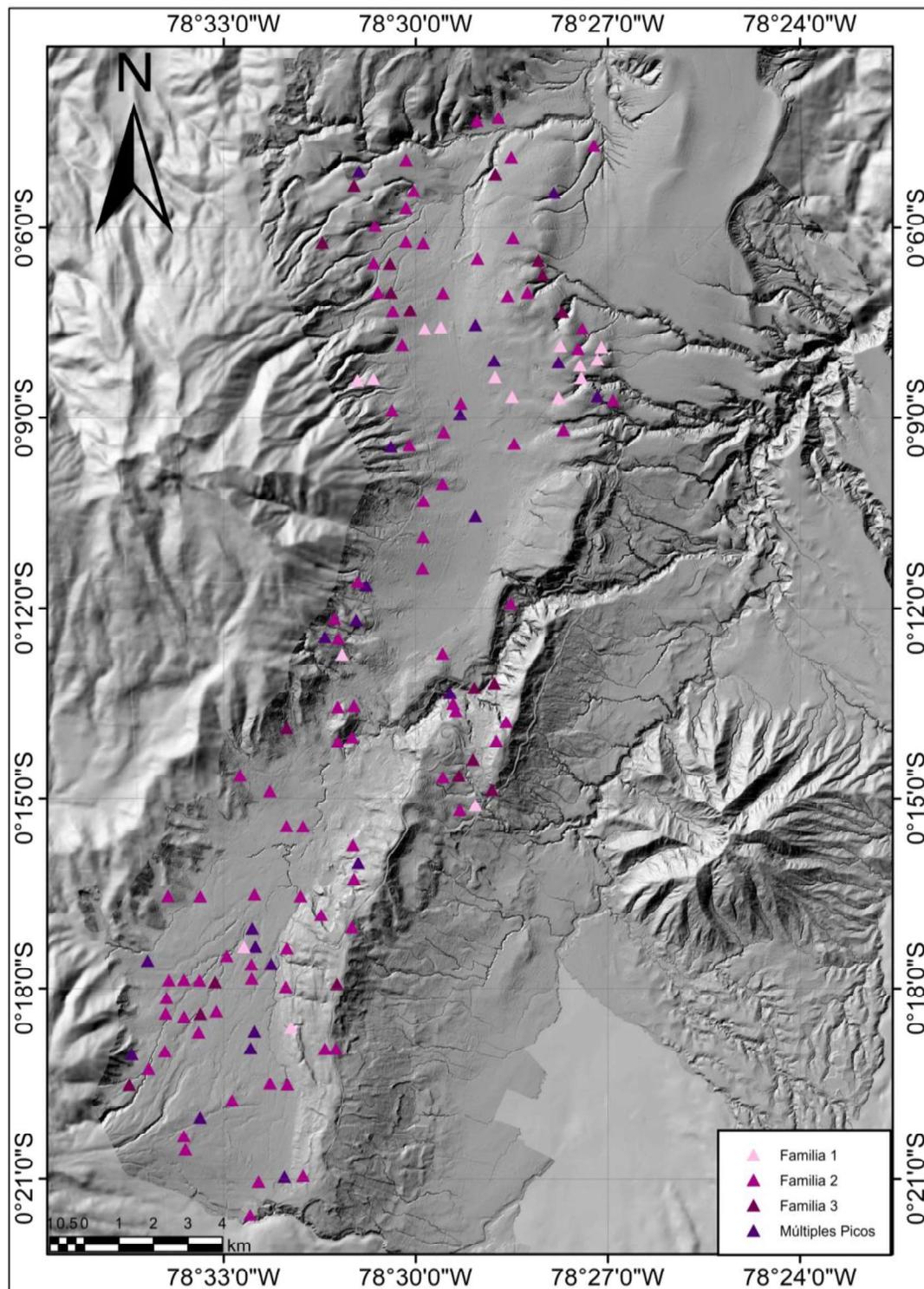
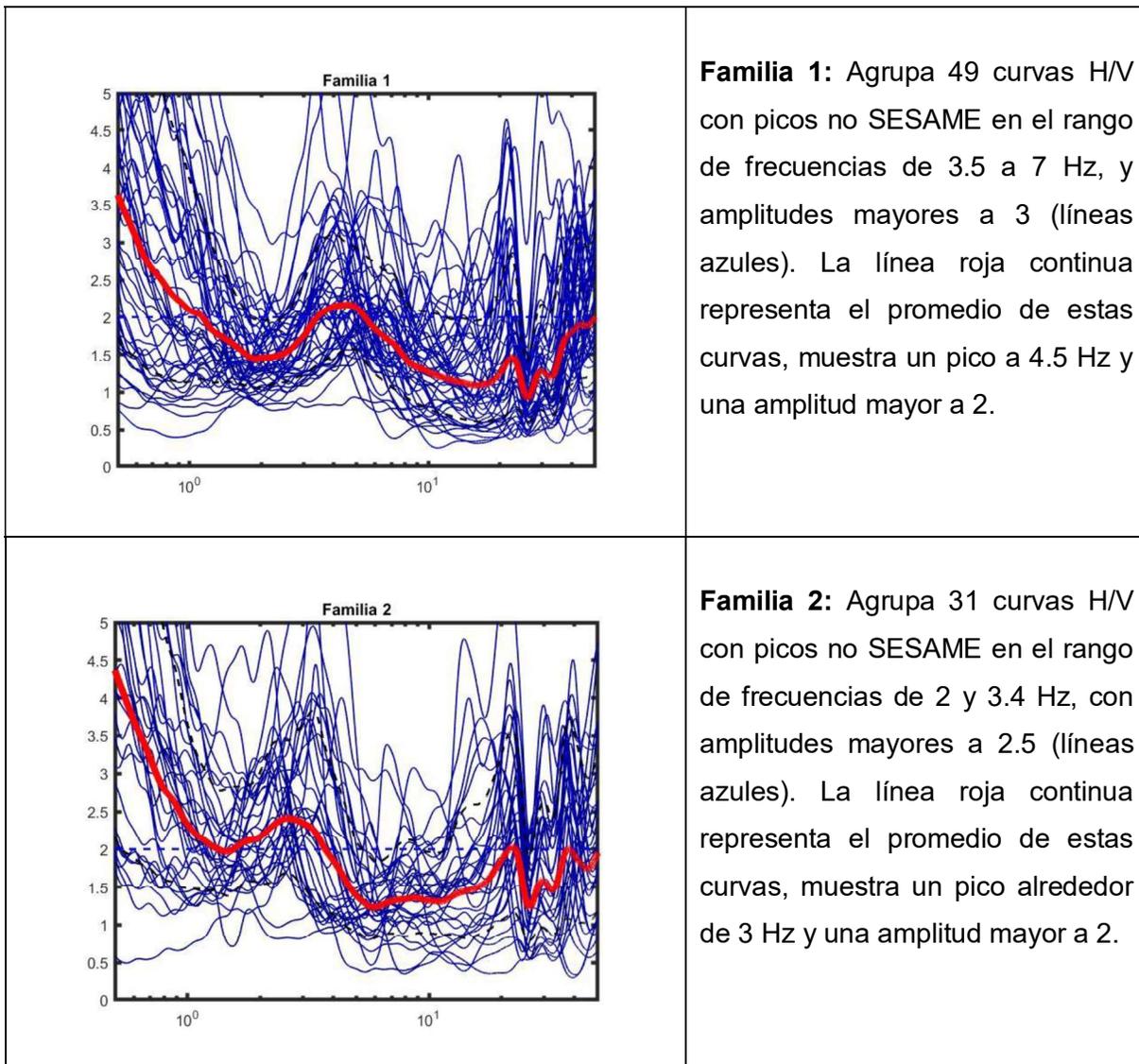
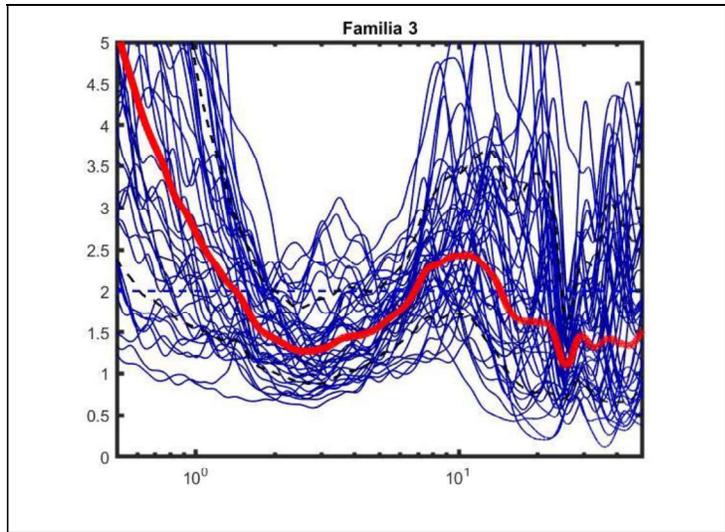


Figura 5.2 Ubicación de los puntos que tienen curvas H/V con pico y múltiples picos claros.

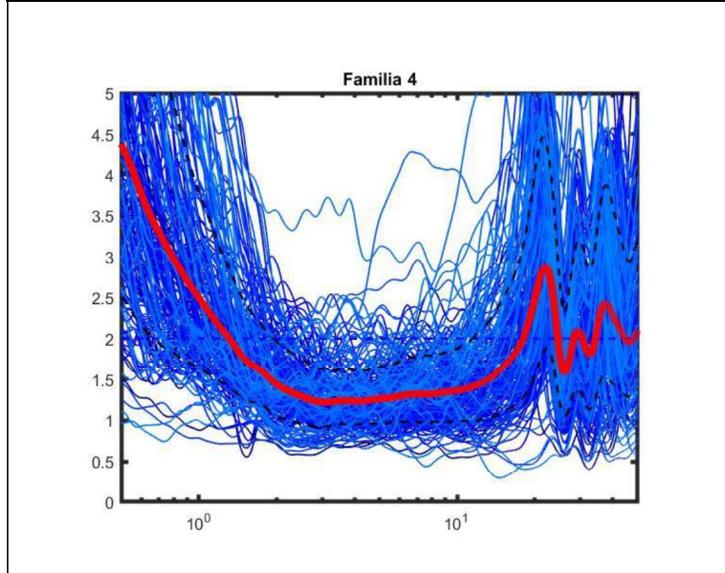
5.1.2. Curvas H/V con Pico no SESAME

Este tipo de curvas con pico no SESAME son las más numerosas y se encuentran distribuidas por toda la cuenca (Figura 5.4). Estas curvas muestran picos de amplitud mayor a 2, pero no cumplen todos los criterios SESAME (2004) es decir, que no cumplen al menos cinco de los seis criterios establecidos para que el pico sea claro. Luego del análisis de los 759 puntos de ruido ambiente se establece que 448 pertenecen a este tipo, es decir, el 59.025 % del total de las curvas. Estas 448 curvas, se han dividido en 6 familias de acuerdo a la frecuencia a las que se encuentran los picos de las razones espectrales (Figura 5.3).

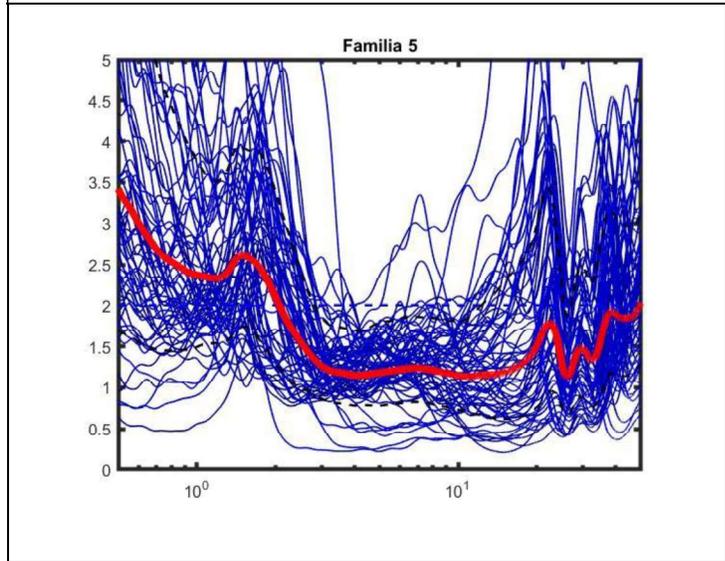




Familia 3: Agrupa 42 curvas H/V con picos no SESAME en el rango de frecuencias de 7 a 15 Hz, con amplitudes mayores a 2.5 (líneas azules). La línea roja continua representa el promedio de estas curvas, muestra un pico alrededor de 10 Hz y una amplitud mayor a 2.



Familia 4: Agrupa 188 curvas H/V con picos no SESAME en el rango de frecuencias de 17 a 23 Hz, con amplitudes mayores a 2.5 (líneas azules). La línea roja continua representa el promedio de estas curvas, muestra un pico alrededor de 22 Hz y una amplitud mayor a 2.5.



Familia 5: Agrupa 67 curvas H/V con picos no SESAME en el rango de frecuencias de 1.4 a 2.2 Hz, con amplitudes mayores a 2.5 (líneas azules). La línea roja continua representa el promedio de estas curvas, muestra un pico alrededor de 1.4 Hz y una amplitud mayor a 2.5.

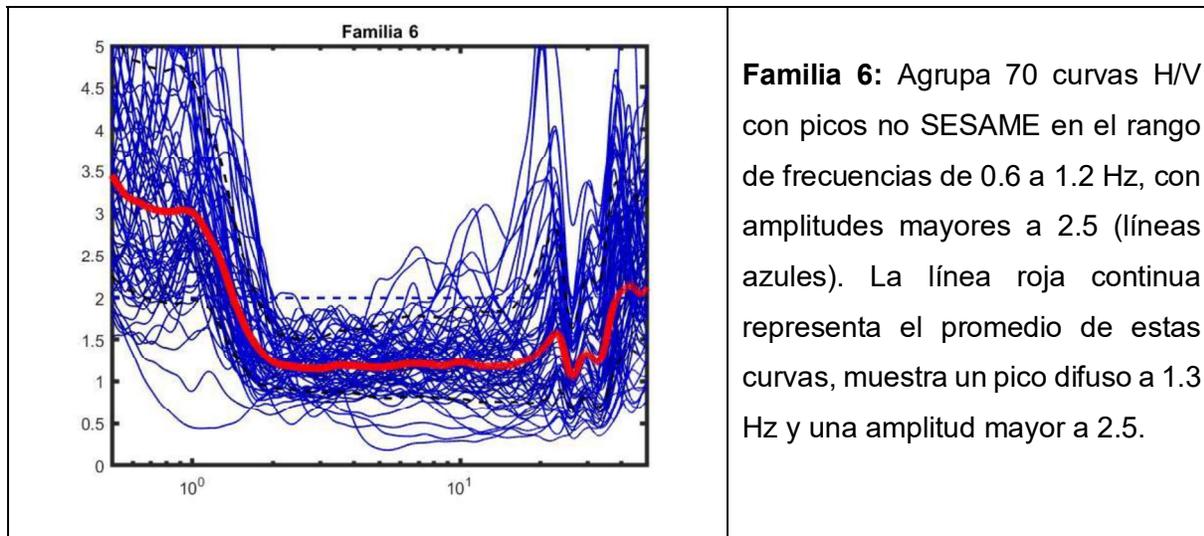


Figura 5.3 Curvas H/V con picos no SESAME divididas en familias de acuerdo a la frecuencia a la que se encuentra el pico.

En la figura 5.4, se muestra cómo están distribuidas estas familias de curvas con pico no SESAME sobre la cuenca de Quito.

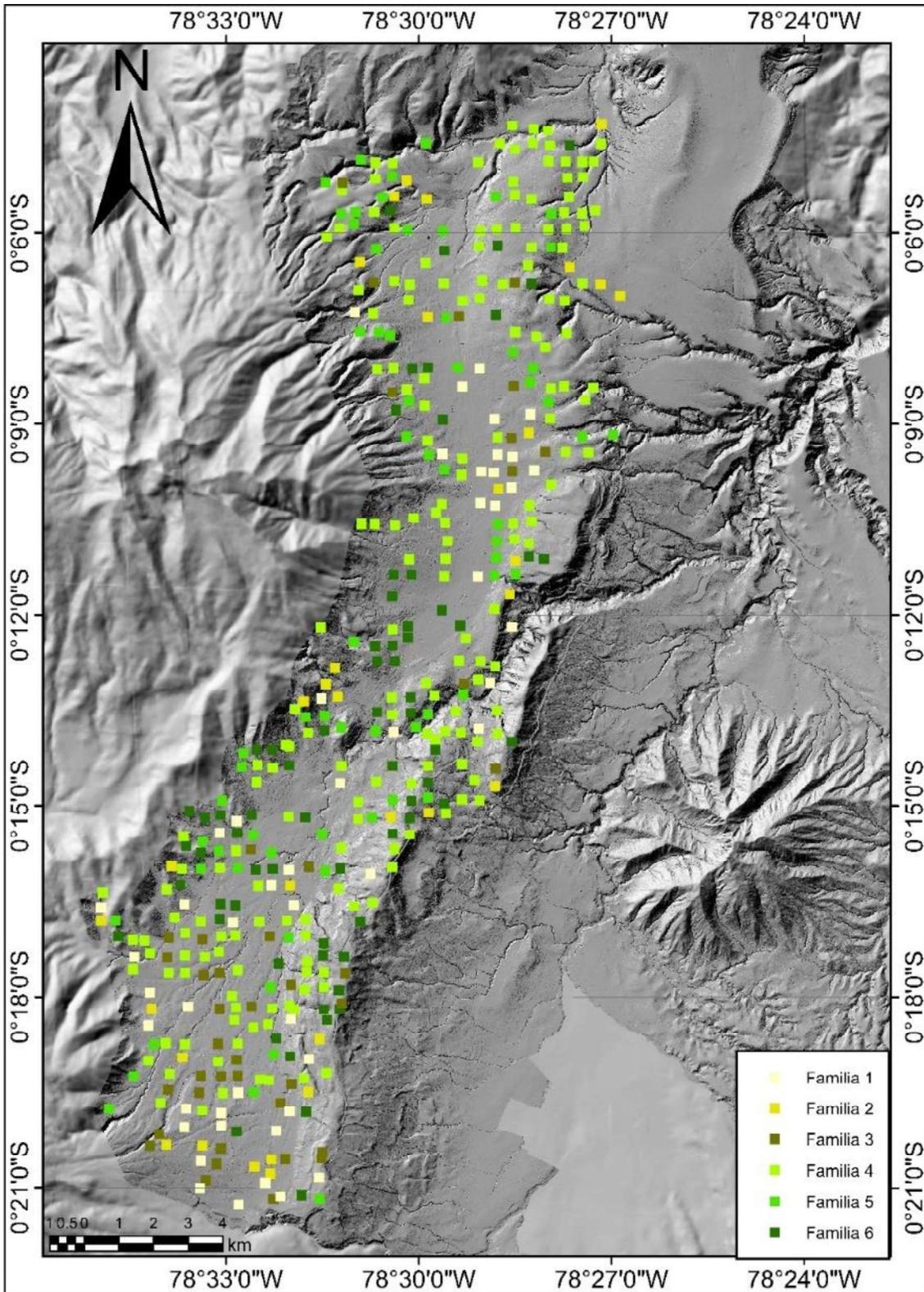


Figura 5.4 Distribución de las familias con curvas H/V con pico no SESAME.

5.1.3. Curvas H/V planas

Las curvas planas se encuentran dispersas de norte a sur por toda cuenca (Figura 5.6). Se obtuvieron 169 curvas planas, lo que equivale a 22.26 % de todas las medidas de ruido sísmico ambiente utilizadas. Se las ha dividido en dos familias de curvas: totalmente planas, y las que presentan espectros con picos menores o iguales a 2 Hz.

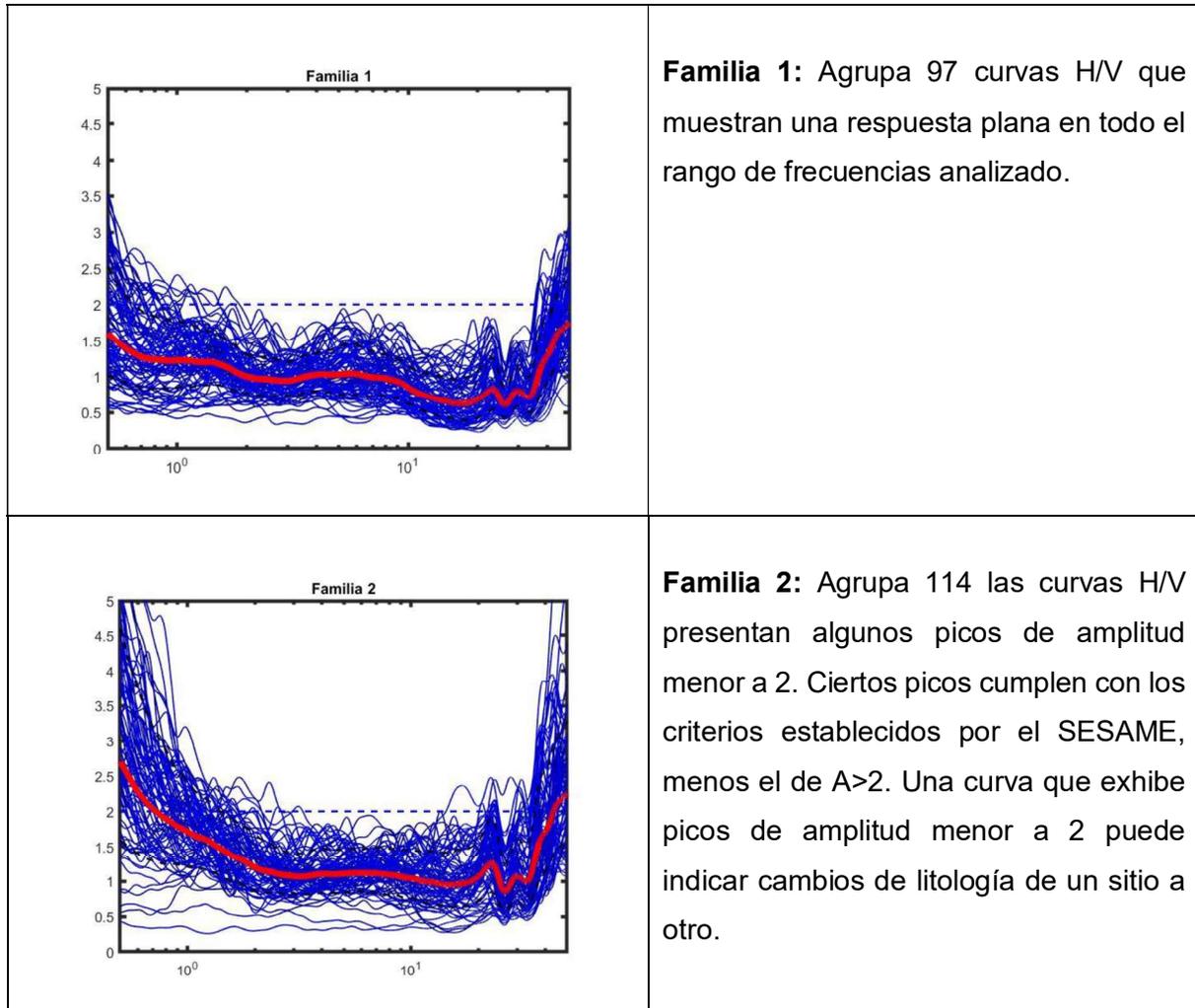


Figura 5.5 Muestra las familias de las curvas H/V planas.

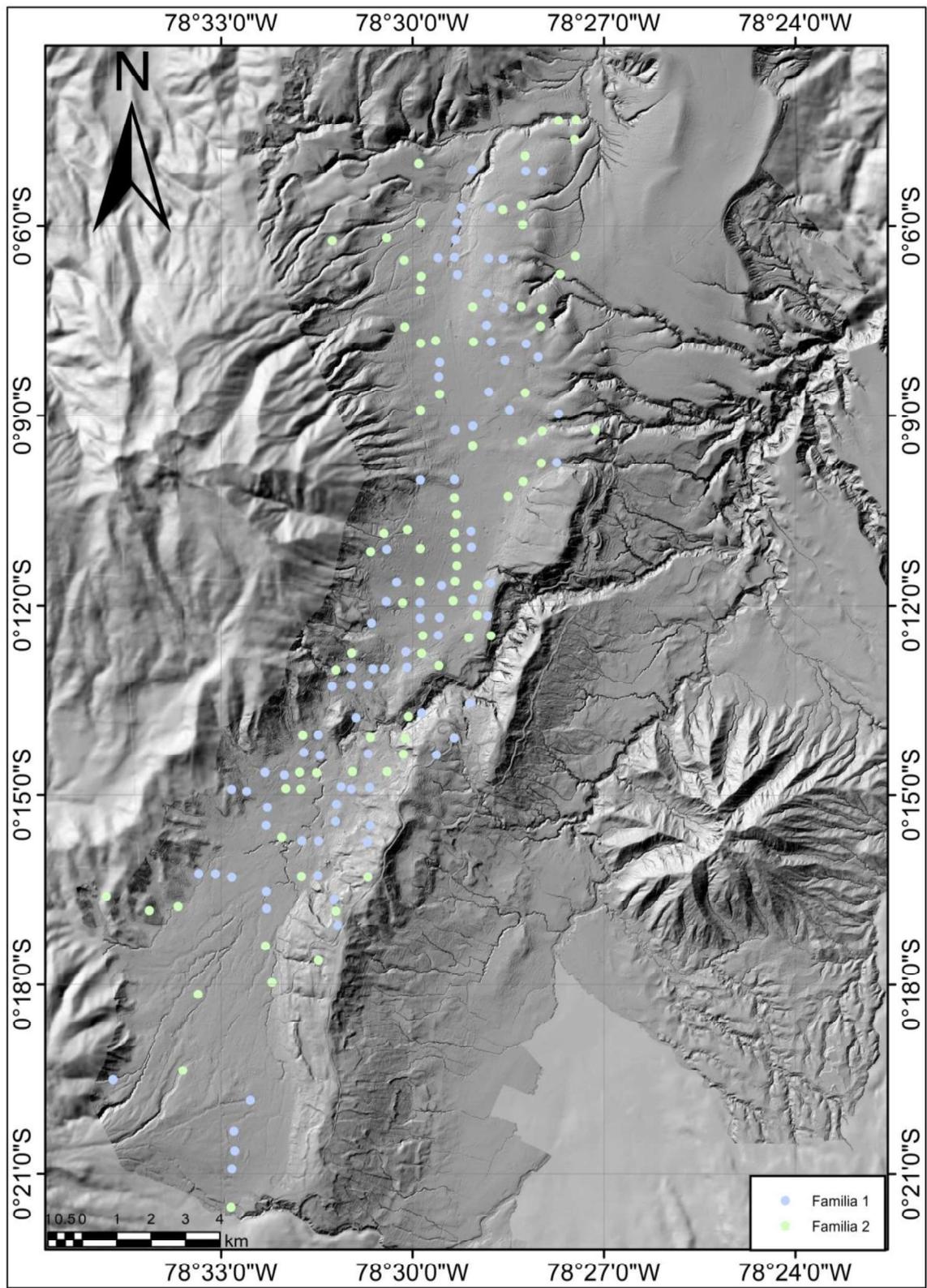


Figura 5.6 Distribución las familias con curvas H/V planas.

Debido a que la topología de las curvas H/V presentan una gran variabilidad espacial, no se ha podido definir zonas con el mismo comportamiento. Por esta razón, se ensayó otra opción, la cual se explicará más adelante. Pese, ha podido identificar curvas H/V similares a las curvas H/V obtenidas de las nuevas campañas en la cuenca de Quito, además se identificaron picos secundarios que posiblemente se relacionen con un contraste de impedancia más somero entre dos capas superficiales o con los efectos 2D y 3D de la cuenca.

5.2. Campaña 2012

En la tabla 5.1 se muestra los valores de la frecuencia fundamental (f_0), el factor de amplificación y el número de picos obtenidos de aplicar el método de razones espectrales H/V a este conjunto de datos:

Tabla 5.1 Muestra los valores de la frecuencia fundamental f_0 y el factor de amplificación obtenidas del conjunto de datos de la campaña 2012.

Ubicación	Estación	A_0	f_0 (Hz)	A_1	f_1 (Hz)
NORTE	PRAM	23.03	0.95		
	24MA	21.35	0.85		
	BELL	3.53	1.26		
	FENY	2.54	0.5		
	CMEA	3.09	0.48	2.098	6.62
	CIRC	3.52	0,26	2.095	6.45
	AEPN	2.78	0,54		
	IESS	1.97	0,26		
	IRDE	2.19	0.45	4.239	19.57
	RUMP	7.39	4.72		
CENTRO	COSF	3.10	0.48		
	SANF	2.99	0.82	3.237	26.69
SUR	LILI	3.72	0.35	3.09	3.54
	VIFL	3.90	0,46		
	QUIT	3.11	0.34	4.058	16.53
	ZALD	2.62	0.35	2.264	3.9

En la figura 5.7, se observa cómo se encuentran distribuidas las estaciones del año 2012 sobre la cuenca de Quito, además muestra las curvas H/V obtenidas del análisis de los registros de ruido sísmico ambiente.

Las estaciones que se encuentra en el Norte de la cuenca de Quito en su mayoría exhiben un primer pico ancho entre 0.26 a 1 Hz. Solo la estación RUMP muestra un pico claro alrededor de 4 Hz posiblemente relacionado con la topografía del lugar CVP.

En el centro de la Cuenca de Quito las estaciones COSF y SANF muestran picos anchos de amplitud mayor a 3.

Al sur de la ciudad, las cuatro estaciones exhiben un primer pico frecuencias menores a 0.5 Hz de amplitud mayor a 3.

De las 16 estaciones 7 muestran más de un pico a frecuencias mayores a 5 Hz, este posiblemente estaría relacionado a contraste de impedancia más someros entre las capas de sedimentos.

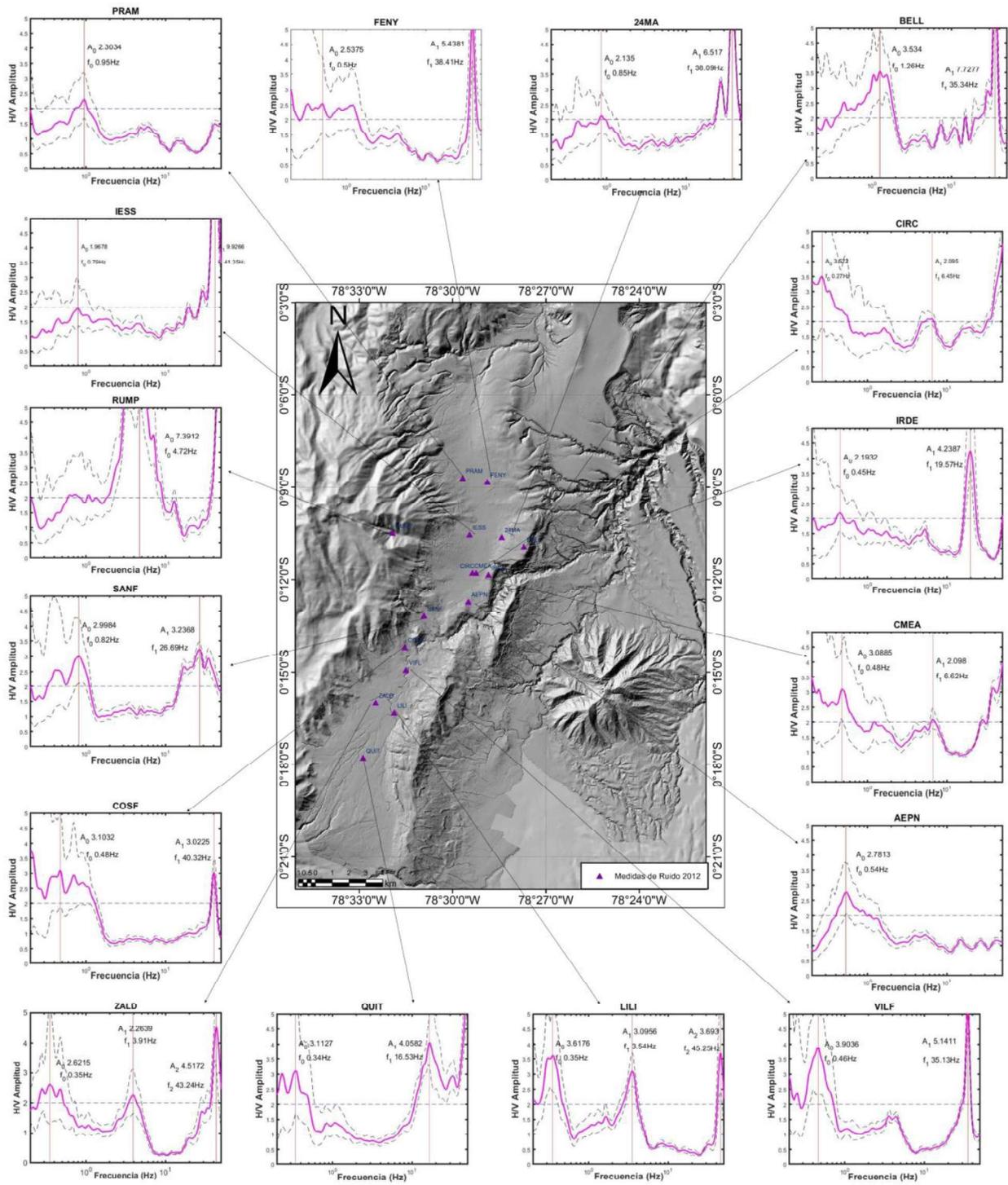


Figura 5.7 Curvas H/V para las medidas de ruido sísmico ambiente 2012.

5.3. Curvas H/V: Campaña 2016

En la campaña 2016 se realizaron dos perfiles, el primero de norte a sur y el segundo de este a oeste (Figura 5.8). En la tabla 5.2, se muestra los valores de la frecuencia fundamental (f_0), el factor de amplificación y el número de picos obtenidos de aplicar el método de razones espectrales H/V a este conjunto de datos:

Tabla 5.2 Muestra los valores de la frecuencia fundamental f_0 y el factor de amplificación obtenidas del conjunto de datos de la campaña 2016.

Ubicación	Estación	A_0	f_0 (Hz)	A_1	f_1 (Hz)
NORTE	1026	-	-	8.369	32.46
	1108	33.121	0.5		
	1093	3	0.5	4.012	4.09
	1084	3.446	0.49	3.112	7.13
SUR	1075	5.309	0.49		
	1053	4.414	0.46		
	1047	41.147	0.34	3.182	2.65
	1032	3.74	0.28	4.772	8.59
	1023	2.765	0.27	2.692	15.3
	1011	8.47	0.46	4.33	3.61

En figura 5.8, se observa diez ejemplos de los resultados obtenidos de las estaciones del año 2016, que se escogieron para mostrar el comportamiento de la cuenca.

Al Norte, la estación 1126 muestra una respuesta plana hasta frecuencias menores que 30Hz, y un pico marcado alrededor de 32.5Hz de amplitud 8. Las estaciones 1108, 1093 y 1084 exhiben picos anchos a 0.55 Hz con amplitudes mayores a 3. Un segundo pico es observado en las estaciones 1093 y 1084 entre 3 y 7 Hz de amplitud mayor a 3.

Al Sur, las estaciones 1075, 1053, 1047, 1032, 1023 y 1011 exhiben picos a frecuencias menores a 0.5 Hz de amplitud mayor a 2.5. Un segundo pico es observado a frecuencias entre 2 a 4 Hz de amplitud mayor a 2.5. La presencia de más de un pico a frecuencias mayores a 1 Hz, estaría relacionado a contraste de impedancia más somera entre las capas de sedimentos.

Mientras se analizaban las curvas H/V de esta campaña se pudo apreciar que estas tenían problemas puesto que al registrar los datos no se tomó en cuenta que los sensores necesitan alrededor de tres horas para estabilizarse, por ende, se hizo la comparación solo con las curvas H/V del año 2016 que no muestren similitud a las demás campañas.

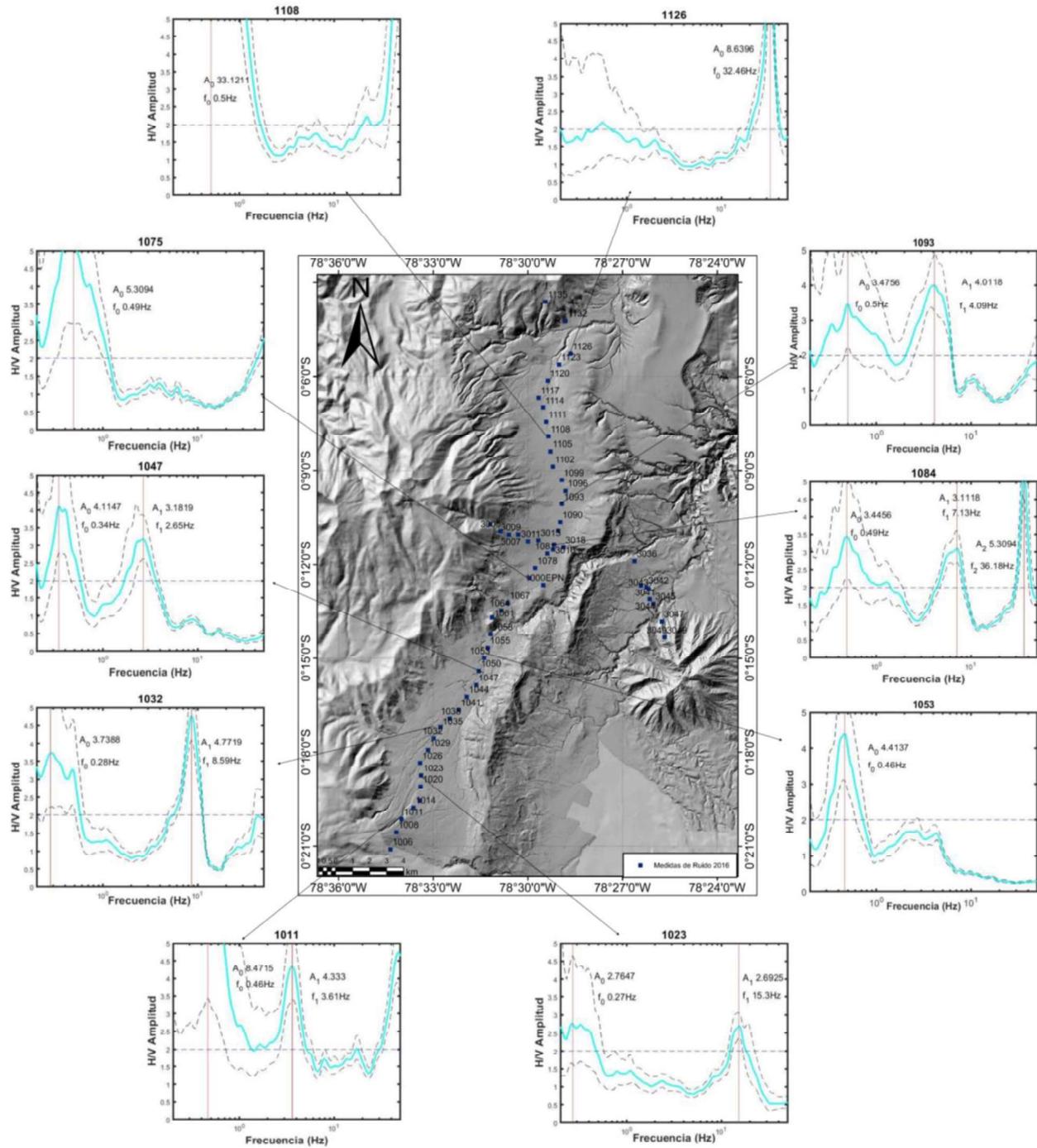


Figura 5.8 Ubicación de los puntos de medidas de ruido sísmico ambiente 2016. Se presentan 10 curvas H/V representativas del comportamiento de la cuenca.

5.4. Curvas H/V: Campaña 2016, 2017 a 2018-Estaciones Temporales

En la tabla 5.3, se muestra los valores de la frecuencia fundamental (f_0), el factor de amplificación y el número de picos obtenidos de aplicar el método de razones espectrales H/V a este conjunto de datos:

Tabla 5.3 Muestra los valores de la frecuencia fundamental f_0 y el factor de amplificación obtenidas del conjunto de datos de las estaciones temporales.

Ubicación	Estación	A_0	f_0 (Hz)	A_1	f_1 (Hz)
NORTE	CRON	-	-		
	MAST	2.045	0.99		
	HCAL	2.594	1.37		
	DELA	2.099	1		
	SOCA	3.46	1.04		
	PARU	2.634	1.01		
	INCA	3.338	0.95		
	JBPC	2.45	4.6		
CENTRO	INAQ	2.5616	1.75		
	ROQE	3.1107	3.16		
	OBSA	3.433	1	1.92	7.29
SUR	QUEM	6.0564	0.87	2.873	15.91
	HSUR	5.00	0.84		
	HLUZ	2.8339	0.26	2.593	3.55
	QUIB	2.73	0.28	2.634	16.52
	ARGE	2.245	0.33	2.166	4.24
VALLE	GARO	12.254	0.89		
	CSEK	2.263	19.92		
	PUEM	2.243	1.9		
	SVAC	3.359	1.01		

En figura 5.9, la distribución de las estaciones temporales, además de las curvas H/V obtenidas del análisis de este conjunto de datos.

Al Norte de la ciudad de Quito, la estación CRON muestra una respuesta plana. Se observan picos anchos en cinco estaciones: MAST, DELA, INCA, INAQ y JBPC con amplitudes mayores a 2. Mientras que en HCAL, SOCA y PARU se observa picos definidos entre 1 y 1.4 Hz con amplitudes mayores a 2.5.

En el Centro de la cuenca de Quito, ROQE, OBSA y QUEM exhiben picos claros entre 0.8 y 3 Hz de amplitud mayor a 3. El valor de la frecuencia obtenida ROQE se relacionaría con la geología del sitio el CVP.

Al Sur de la cuenca de Quito, se puede observar un pico difuso en las estaciones ARGE, QUIB, HLUZ a frecuencias alrededor de 0.3Hz con una amplitud mayor a 2 y en las estaciones HSUR y GARO se ve un pico claro alrededor de 0.8 Hz de amplitud mayor a 5.

Tres estaciones se encuentran localizadas en el valle de Quito. Al Norte, la estación PUEM muestra una curva H/V con un pico difuso a 1.9 Hz de amplitud 2.3, en la parte central, la estación CSEK muestra un pico claro a una frecuencia de 20Hz y de amplitud 2.26; finalmente la estación SVAC que se encuentra más hacia el sur, muestra un pico claro de amplitud 3.4 a 1Hz.

Un segundo pico de amplitud mayor a 2, se observa en las estaciones OBSA, ARGE, HLUZ, DELA, QUIB y QUEM que podría relacionarse con la geología del sitio o con los efectos 2D y 3D de la cuenca.

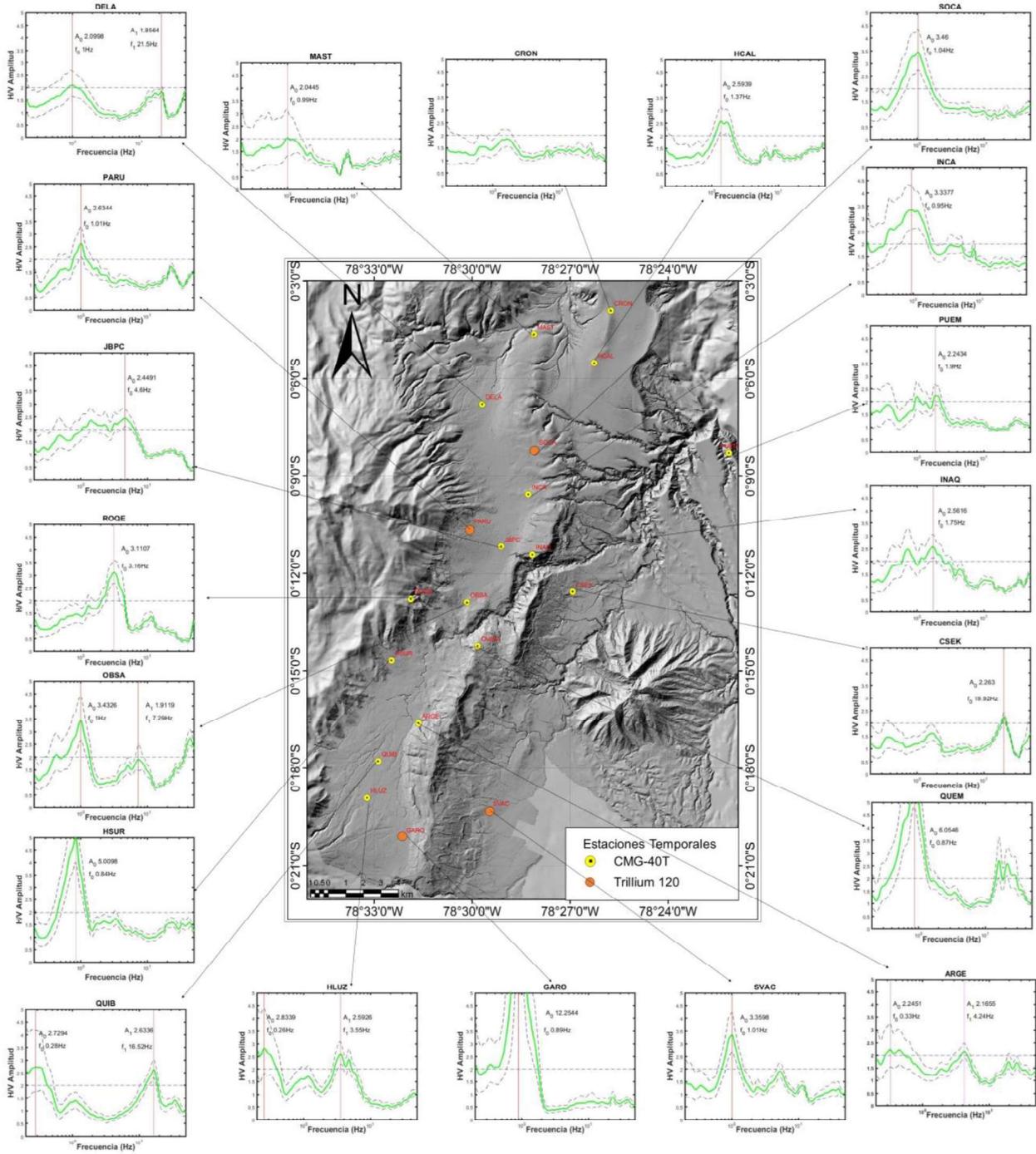


Figura 5.9 Ubicación de las estaciones temporales 2016-2018 y las curvas H/V que caracterizan su ubicación.

6. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio se realizó con el objetivo de determinar la frecuencia fundamental (f_0) de los suelos y así establecer zonas en la cuenca de Quito que muestren un mismo comportamiento de amplificación del movimiento frente a un evento sísmico. Para ello se ha recopilado datos de cuatro campañas de ruido sísmico ambiente realizadas en el años 2000, 2012, 2016 y 2016, 2017 a 2018 con los datos de las estaciones temporales, las cuales han permitido cumplir con los objetivos de este estudio pese a la limitación de la campaña del año 2000 en bajas frecuencias, y de los datos de la campaña realizada en el año 2016 cuyas curvas H/V obtenidas mostraron frecuencias diferentes a las de las otras campañas, debido a que no se tomó en cuenta que los sensores utilizados en ese estudio necesitaban alrededor de tres horas para estabilizarse.

El análisis realizado a los datos de la campaña del año 2000, siguiendo las recomendaciones y directrices del proyecto SESAME (2004), permitió definir qué, 119 curvas H/V muestran un pico claro, 23 curvas H/V múltiples picos, 472 curvas H/V muestran pico no SESAME y 169 son curvas H/V planas. Estas curvas tienen una distribución variable sobre toda la cuenca (Anexo I), por lo que resultó difícil establecer sitios con una misma frecuencia fundamental (f_0). Debido a esto, para poder establecer zonas con un mismo comportamiento se optó por tomar las curvas de los registros del 2012 y de las estaciones temporales como curvas referenciales de los sitios. Con esto se pudo establecer que pese a la limitación a baja frecuencia que tienen los datos del año 2000, las curvas H/V muestran una forma similar a las curvas H/V de las otras campañas, desde 0.5 Hz en adelante (Anexo II).

Mediante esta comparación de las curvas H/V, se pudo establecer seis zonas en función de la forma y de la frecuencia fundamental (f_0) de los picos H/V (Figura 6.1).

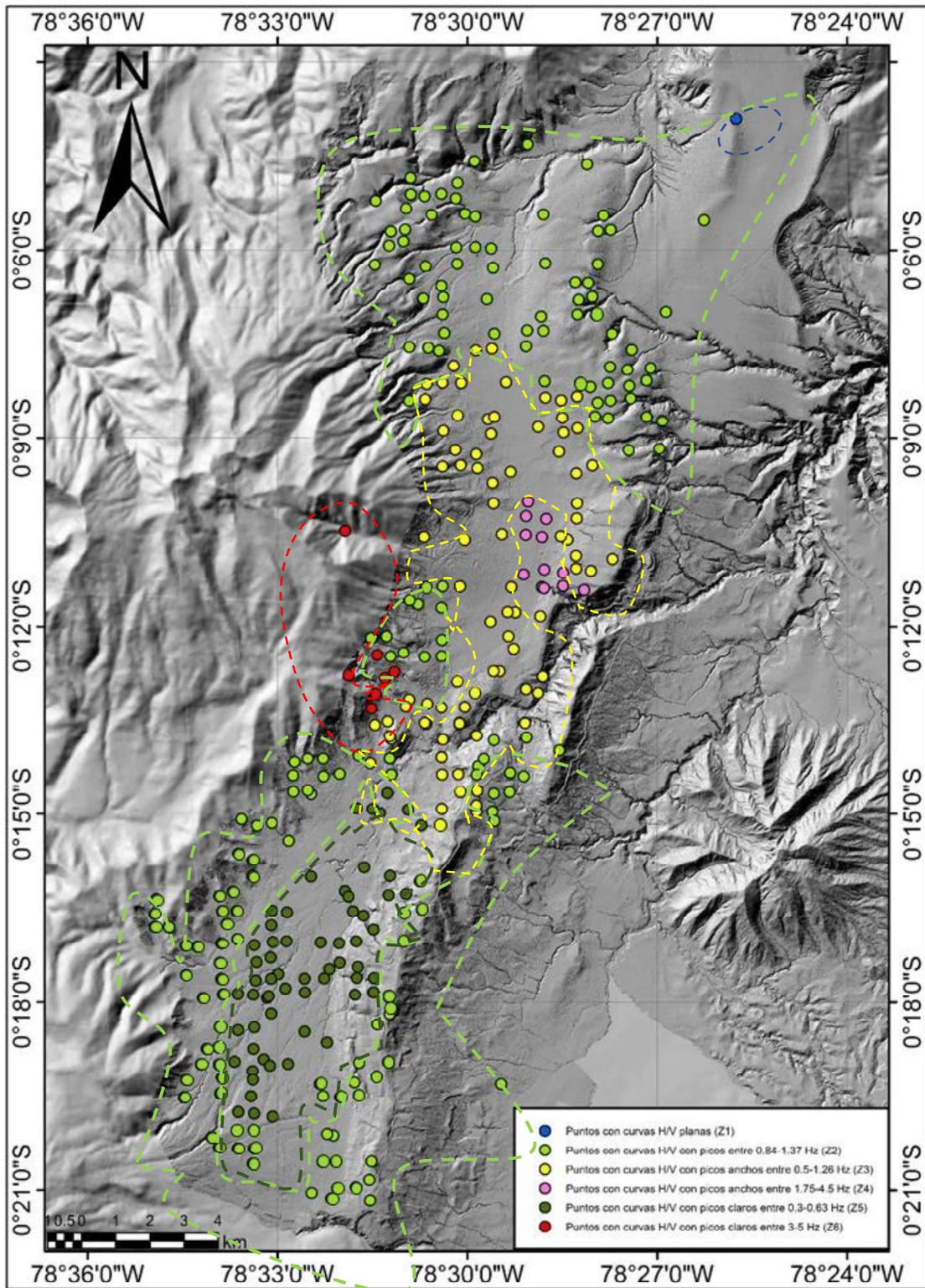


Figura 6.1 Mapa con las diferentes zonas identificadas mediante la obtención de la frecuencia fundamental (f_0) en la cuenca de Quito. Las líneas entrecortadas agrupan los sitios con la misma frecuencia fundamental definiendo las zonas que se proponen.

6.1. Descripción de las zonas determinadas en función a la frecuencia fundamental (f_0)

Zona 1: Caracterizada por curvas H/V planas

La única estación que presenta una curva de este tipo es CRON, ubicada al NE de la cuenca de Quito (Figura 6.1). En base a las recomendaciones del proyecto SESAME, (2004) no se debe hacer interpretaciones en sitios que muestren esta respuesta sin antes hacer más pruebas con el método de Nakamura o empleando otros análisis. Pacheco et al., (2019) realizó una serie de análisis con los datos de la estación CRON, en los cuales se varió los parámetros como el tiempo de duración de la medida, la longitud de ventanas y se calculó la razón espectral H/V obteniéndose un pico de 2.5 de amplitud aproximadamente a una frecuencia de 1.37 Hz. En esta estación se puede observar la limitación del método, si utilizamos diferentes formas de calcular la relación H/V y variamos los parámetros antes mencionados. Si comparamos CRON con la estación HCAL (Figura 6.2) se observa una forma similar entre sí, un pico a la misma frecuencia de amplitud menor a 2, por lo que se la considera como plana (SESAME, 2004). En conclusión, para comprobar los resultados obtenidos se necesitan realizar más estudios en este sitio.

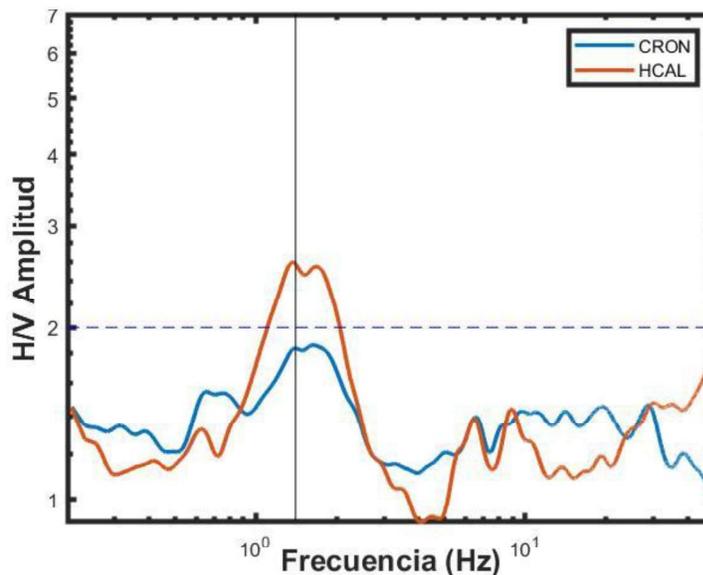


Figura 6.2 Curvas H/V para las estaciones HCAL y CRON.

Zona 2: Caracterizada por curvas H/V con picos claros

Estos sitios se caracterizan por tener curvas H/V que muestran picos claros a frecuencias entre 0.85 a 1.37 Hz tanto para las curvas referencia como para las estaciones de 2000. Se las ha dividido en tres familias de acuerdo con su forma y valor de la frecuencia del pico H/V (Anexo II).

Familia 1: Se observa en las estaciones PARU, SOCA, OBSA, QUEM, HSUR, GARO, SVAC (Figura 6.3) y en las estaciones del año 2000 (Tabla 6.1; Anexo II). La frecuencia fundamental (f_0) para este grupo se encuentra entre 0.85 a 1 Hz y la amplitud del pico es mayor a 2.5. En las estaciones que se encuentran al norte de la cuenca la frecuencia fundamental del pico H/V se encuentra a 1 Hz, mientras que para las estaciones que se encuentran al sur de la cuenca la frecuencia fundamental (f_0) es alrededor de 0.85 Hz, lo que posiblemente indicaría que el basamento en la parte sur se encuentra a mayor profundidad que en el norte de la ciudad.

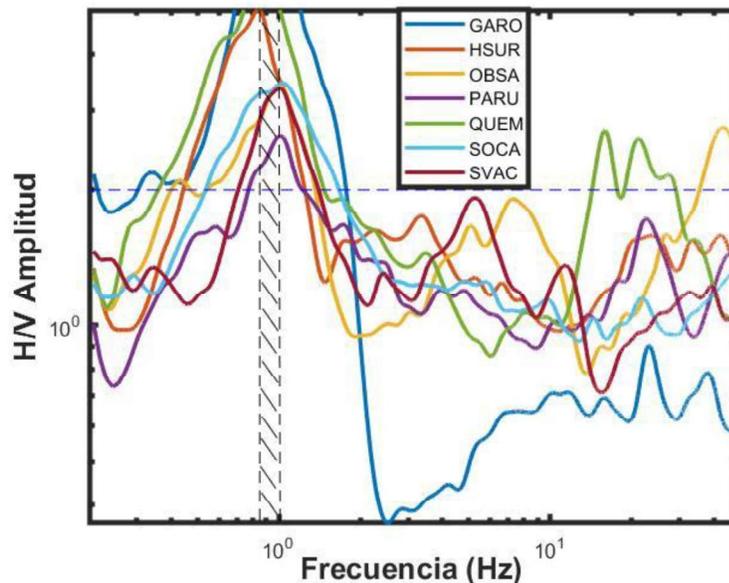


Figura 6.3 Curvas H/V con un pico claro entre 0.85 a 1 Hz de amplitud mayor a 2.5.

Tabla 6.1 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 2, familia 1.

Estaciones del año 2000					
03131436.012	03221509.008	04271432.017	06081340.004	06231151.009	08301211.004
03140952.001	03231040.002	05231151.003	06091249.013	06231341.011	08301250.005
03141023.002	03231118.003	03101030.003	06091140.011	06231426.012	09181203.003
03141048.003	03231234.005	05251326.004	07051424.006	06231510.013	09181257.005
03141113.004	03231403.009	05291257.013	07071209.003	06261425.014	09181331.006
03141138.005	03231456.011	05291400.015	07071409.003	06271043.018	09191010.001
03141215.006	03281500.008	05301426.009	07101420.006	07031345.003	11211214.005
03141243.007	03281534.009	05301453.010	07101505.007	07031433.004	11231030.001
03141316.008	03291104.003	05311346.018	07101532.008	07131445.005	11231105.002
03141347.009	04111319.004	05311450.019	07111034.001	07131519.006	11241234.003
03141416.010	04141424.022	05311520.020	07111344.004	07141118.001	11301222.004
03141443.011	04251507.008	06061427.006	06221520.006	07141229.003	
03151016.002	04261254.006	06071226.004	06231109.008	08301125.003	

Familia 2: Se observa en las estaciones DELA, MAST (Figura 6.4) en conjunto con las estaciones de la campaña del año 2000 (Tabla 6.2) en la cuales se puede ver que exhiben un pico alrededor de 1 Hz y de amplitud un poco más de 2 (Anexo II).

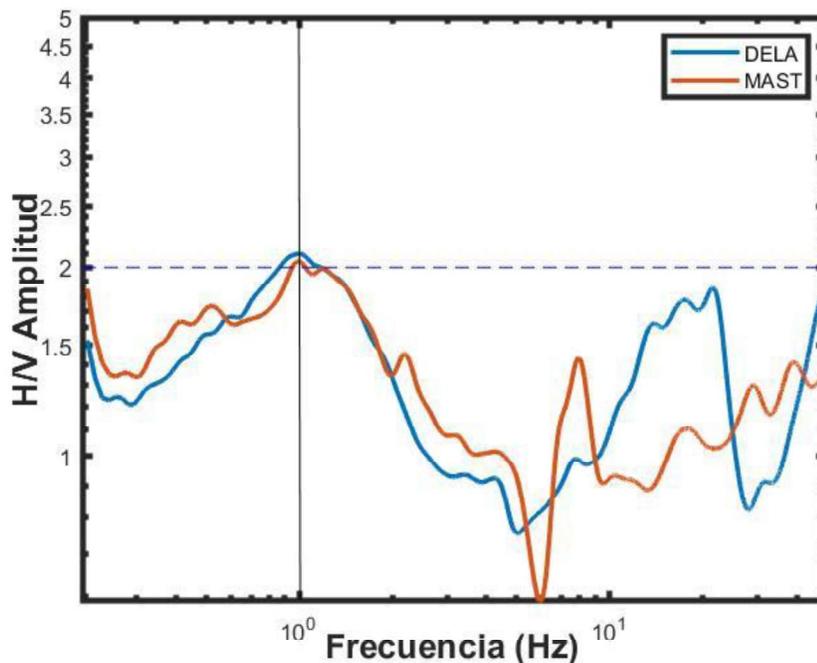


Figura 6.4 Curvas H/V con un pico a 1 Hz de amplitud mayor un poco más de 2.

Tabla 6.2 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 2, familia 2.

Estaciones del año 2000			
3171021.001	3221115.003	6131133.009	6161007.001
3171142.004	3221509.008	6131247.011	6201122.002
3201425.011	3231012.001	6131315.012	4171307.008
3211013.001	3231040.002	6131346.013	4171357.010
3211039.002	3231118.003	6131445.014	4171509.012
3211111.003	3231257.006	6141243.004	4181049.014
3211202.005	3231456.011	6141347.005	4181236.017
3211322.008	3271430.012	6151101.008	4191209.003
3211418.010	6121130.002	6151142.009	4191252.004
3211455.011	6121216.003	6151218.010	4241056.009
3211527.012	6121343.004	6151414.012	4241123.010
3221018.001	6121416.005	6151441.013	4241146.011
4.241.211.012	6.161.118.002	6.201.223.003	7041222.004

Familia 3: Las curvas H/V de esta familia muestran un pico claro alrededor de 1.37 Hz y de amplitud mayor a 2.5, en este grupo se encuentran las estaciones del año 2000 (Tabla 6.3) y HCAL (Anexo II).

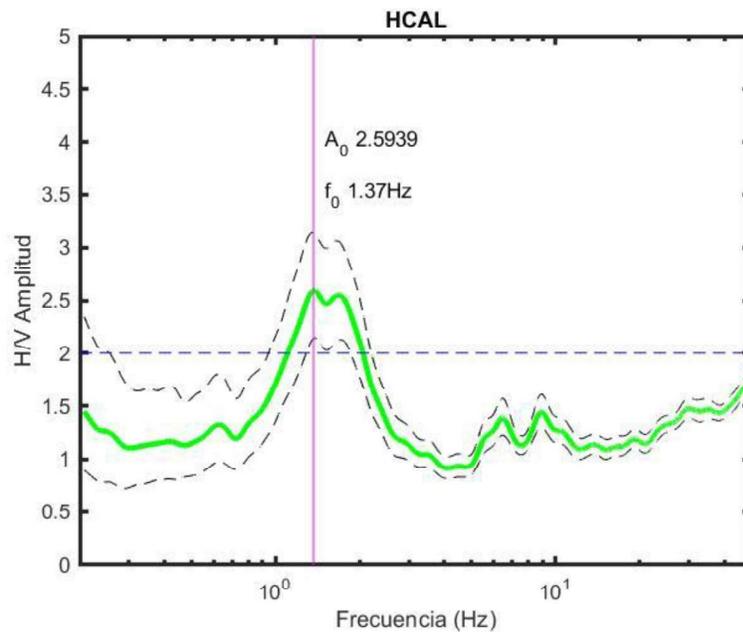


Figura 6.5 Estación HCAL con un pico claro a 1.37 Hz y de amplitud mayor a 2.5

Tabla 6.3 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 2, familia 3.

Estaciones del año 2000	
04121250.005	04271337.015
04130959.001	06011006.001
04251014.001	06131315.012
04251359.006	06141101.002
04251507.008	06141201.003
04261036.002	06141347.005
04261149.004	06151014.007
04261216.005	06151414.012
04261254.006	06161118.002
04261334.007	06161324.005
04261401.008	

Zona 3: Caracterizada por picos anchos a frecuencias entre 0.48 a 1.37 Hz, se las ha dividido en dos familias de acuerdo con su forma y valor de la frecuencia del pico H/V (Anexo II).

Familia 1: Curvas H/V con picos anchos entre 0.5 a 1.2 Hz de amplitud mayor a 2, en esta familia se encuentran las estaciones PRAM, INCA, 24MA, BELL, AEPN (Figura 6.6) y las estaciones del año 2000 (Tabla 6.4), se puede apreciar que pese a la limitación de los registros del año 2000 las curvas guardan una forma similar a las estaciones usadas como referencia para la comparación (Anexo II).

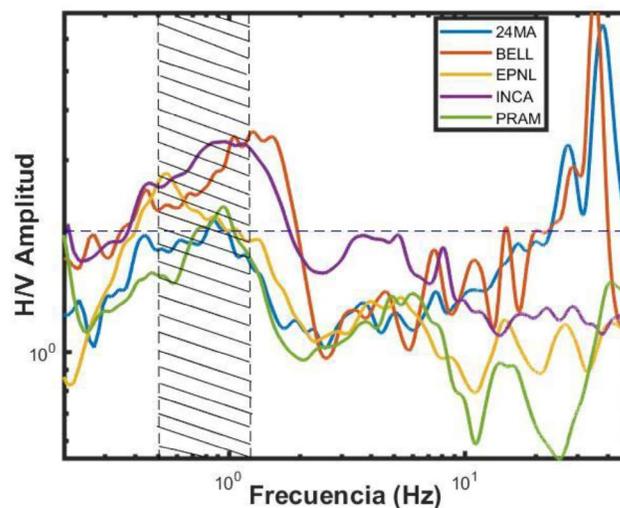


Figura 6.6 Curvas H/V con picos anchos entre 0.5 a 1.2 Hz de amplitud mayor a 2.

Tabla 6.4 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 3, familia 1.

Estaciones del año 2000	
03131014.003	05291201.011
03131202.006	05291224.012
03131225.007	05291321.014
03131250.008	05241515.016
03131316.009	04101026.002
03131410.011	04101049.003
05241049.008	04131200.005
05241113.009	03101117.005
05241234.012	03101230.007
05251422.006	03101252.008
05291049.009	03101322.009
05291133.010	

Familia 2: Curvas con picos anchos entre 0.48 a 1 Hz de amplitud mayor a 2, las estaciones que exhiben picos a estas frecuencias son: FENY, IESS, CMEA, CIRC, IRDE, SANF, COSF (Figura 6.7) en conjunto con las curvas H/V del año 2000 (Tabla 6.5). Además, en las estaciones CIRC y CMEA se observa un pico alrededor de 4 Hz de amplitud mayor 2, estos picos también son observados por Guéguen et al. (2000), Alfonso-Naya et al. (2012); Laurendeau et al. (2017) (Anexo II).

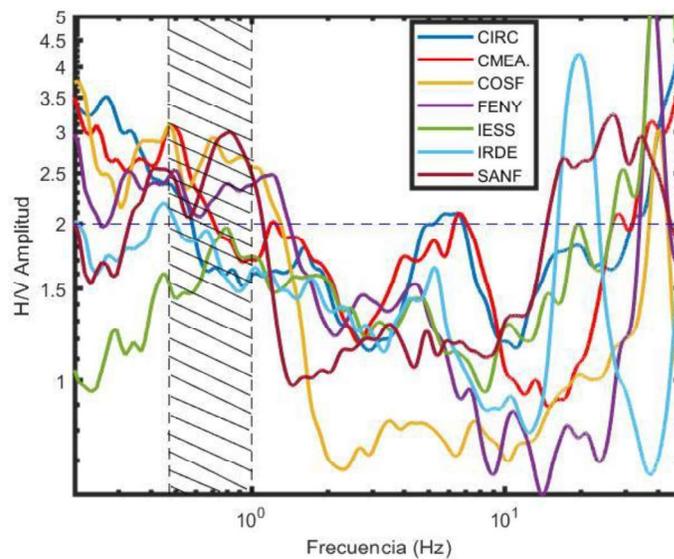


Figura 6.7 Curvas H/V con picos anchos entre 0.48 a 1 Hz de amplitud mayor a 2.

Tabla 6.5 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 3, familia 2.

Estaciones del año 2000		
03131014.003	05291201.011	03161233.008
03131202.006	05291224.012	03161341.010
03131225.007	05291321.014	03161416.011
03131250.008	05241515.016	03161443.012
03131316.009	04101026.002	03171043.002
03131410.011	04101049.003	04060942.001
05241049.008	04131200.005	04101449.010
05241113.009	03101117.005	04131108.003
05241234.012	03101230.007	04131129.004
05251422.006	03101252.008	04131200.005
05291049.009	03101322.009	04131319.008
05291133.010	03161204.007	

Zona 4: Curvas H/V con picos anchos

Familia 1: caracterizada por curvas con picos anchos a frecuencias entre 1.75 a 4 Hz, las estaciones que muestran estos picos son JBPC e INAQ (Figura 6.8) y las curvas H/V de 2000 (Tabla 6.6) (Anexo II).

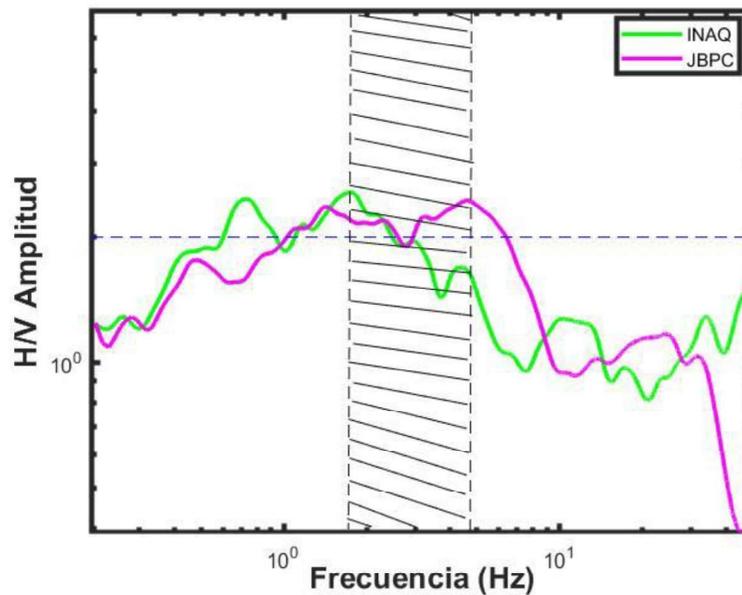


Figura 6.8 Curvas H/V con pico ancho entre 0.2 a 10 Hz de amplitud un poco más de 2.

Tabla 6.6 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 4, familia 1.

Estaciones del año 2000
04130959.001
04131038.002
04131345.009
04131416.010
04131518.012
04131542.013
04141101.014
04141308.019
04141350.021
04141424.022

Zona 5: Caracterizada por curvas H/V con picos a frecuencias menores a 0.5 Hz de amplitud mayor a 2.5. Las estaciones que pertenecen a esta zona son VILF, ZALD, LILI, ARGE, QUIB, QUIT y HLUZ (Figura 6.9) ubicadas al sur de la cuenca de Quito. Estas curvas muestran un segundo pico en el rango de frecuencias entre 3 y 16 Hz. Las curvas H/V del año 2000 (Tabla 6.9) a baja frecuencia muestran picos no claros, sin embargo, los picos a frecuencias mayores a 1 Hz de estas estaciones son muy similares a las curvas H/V de los datos nuevos (Anexo II).

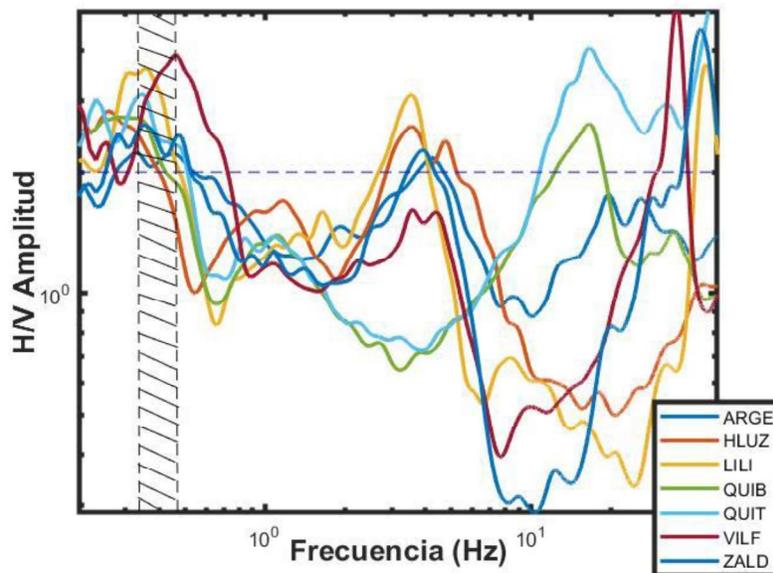


Figura 6.9 Familia 1, curvas H/V con más de un pico, cuyo primer pico H/V es menor a 0.5 Hz y de amplitud mayor a 2.5.

Tabla 6.7 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 5, familia 1.

Estaciones del año 2000						
7191026.001	8141516.007	9011150.003	9121219.003	7241447.005	8141250.004	12121157.003
7311306.005	8141601.008	9061101.002	9121335.005	7251309.004	8141400.005	12131230.002
7311344.006	8161407.007	9061200.003	9121435.007	7251400.005	8151029.001	12131309.003
7311432.007	12131230.002	9061248.004	9131432.009	7251502.006	8151115.002	12141020.004
8011219.002	8211254.005	9061327.005	9181110.002	7261118.001	8151219.003	12141114.005
8021324.004	8211341.006	9071113.001	9181225.004	7261254.003	8151333.005	7041431.006
8021422.005	8221149.003	9071155.002	9191155.003	7261549.007	8151429.006	7121139.003
8091452.003	8221245.004	9071230.003	11211000.001	7311049.001	8161312.006	7181533.007
8101210.006	8221407.006	9071302.004	11211030.002	7311231.004	8161407.007	7201213.002
8111103.001	8221440.007	9071410.006	11231245.004	8011400.004	8161446.008	7201503.006
8111126.002	8231000.008	9111046.002	11241048.001	8011430.005	9131222.005	7211106.001
8111227.004	8231147.010	9111125.003	11241140.002	8021324.004	9181110.002	7211229.003
8111415.006	8241400.004	9111155.004	7211514.007	8101210.006	9191155.003	7241447.005
8111455.007	8301052.002	9111225.005	7241127.001	8111415.006	12111358.006	7241519.006
8141125.002	8301430.007	9111300.006	7241207.002	8141125.002	12121030.001	7251115.001
8141439.006	9011115.002	9121130.002	7241328.003	8141217.003	12121109.002	8011523.006

Zona 6: Familia 1: caracterizada por picos claros alrededor de 3.5 Hz de amplitud mayor a 3, consistentes con la geología del sitio (faldas de CVP) en donde se encuentran las estaciones de 2000 (Tabla 6.8) y RUMP y ROQE (Figura 6.10) (Anexo II).

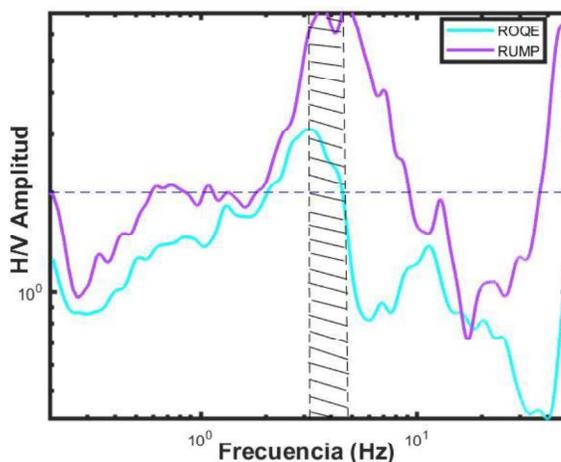


Figura 6.10 Familia 1 zona 6, curvas H/V con pico claro a 3.5 Hz de amplitud mayor a 3.

Tabla 6.8 Muestra las estaciones de la campaña del año 2000 que tienen una forma similar a las estaciones de la zona 6, familia 1.

Estaciones del año 2000
05311038.013
05311112.014
05311238.016
05311309.017
06011211.004

Los valores de frecuencia fundamental (f_0) obtenidos para la cuenca de Quito indican capas sedimentarias de espesores considerables sobre un basamento. Para el sur los contrastes de impedancia son más fuertes que en el norte. En el sur f_0 promedio es alrededor de 0.46 Hz y en el norte de la cuenca el f_0 promedio es 1.047 Hz; con estos valores se obtuvo un espesor promedio de la profundidad a la que se encuentra el basamento utilizando el valor de velocidad de onda de corte (V_s) calculado del modelo de velocidades para la onda P obtenido por Guerra, (2019) (Tabla 6.9).

Tabla 6.9 Modelo de velocidades para la onda P (V_p), tomado de Guerra, (2019).

Modelo de Velocidades				
Capa	Velocidad (V_p km/s)	Profundidad	Espesor	V_p/V_s
1	3.92	0	2	1.66
2	4.71	2	2	1.66
3	4.81	4	2	1.66
4	5	6	9	1.66
5	6.08	15	15	1.66
6	6.11	30	2	1.66
7	6.17	32	1	1.66
8	6.25	33	1	1.66
9	6.33	34	1	1.66
10	6.41	35	1	1.66
11	6.49	36	1	1.66
12	6.58	37	1	1.66
13	6.66	38	1	1.66
14	6.75	39	1	1.66
15	6.83	40	1	1.66
16	6.92	41	1	1.66
17	7.01	42	1	1.66
18	7.1	43	1	1.66
19	7.2	44	1	1.66
20	7.34	45	1000	1.66

Para el cálculo de V_s , se ha utilizado la V_p de la primera capa puesto que Pacheco et al., (2019) mediante diferentes análisis a los datos de ruido sísmico ambiente de las estaciones temporales, ha encontrado que el basamento en el sur de la cuenca de Quito se encuentra alrededor de 1500 m y en el norte a 700 m. Entonces mediante la relación:

$$f_0 = \frac{V_s}{4H}$$

Se ha estimado un valor promedio de la profundidad con los valores promedios de la frecuencia fundamental (f_0) tanto en el norte como el sur de la cuenca de Quito (Tabla 6.10)

Tabla 6.10 Calculo de la profundidad promedio del basamento para el norte y sur de la cuenca de Quito.

Ubicación	f_0	$V_s = V_p / 1.66$ (Km/s)	$H = 1000 * V_s / 4f_0$ (m)	Pacheco et al., (2019) (m)
Zona Norte	1.047	2.36	563.86	700
Zona Sur	0.46		1283.39	1500

Los valores de la frecuencia fundamental (f_0) y el espesor indican que existe un comportamiento diferente entre el norte y sur de la cuenca además de que el suelo en el sur de la cuenca se encuentra compuesto de materiales más blandos que son los que más amplifican el movimiento en la superficie y serían los que causarían mayores daños en las estructuras debido a un efecto de resonancia. Entonces si la frecuencia de la estructura (casas, edificios, hospitales, etc.), la frecuencia del movimiento y la frecuencia natural del suelo están en el mismo rango, el daño a causa del sismo aumenta notablemente.

6.2. Distribución de la segunda frecuencia en la cuenca de Quito

Un pico HVSR posiblemente asociado con un modo más alto de f_0 , ocurre aproximadamente entre los intervalos de frecuencias de 2 a 7.7 Hz, 7.71 a 16.8 Hz y 16.81 a 26.69 Hz tanto en las estaciones de la campaña del año 2000 como también en los datos de ruido sísmico ambiente de 2012 (PRAM, FENY, CIRC, CMEA, SANF, COSF, VILF, ZALD, LILI) y en los registros de las estaciones temporales (HSUR, OBSA, SVAC, INCA, ARGE, HLUZ) (Figura 6.11), estos valores estarían relacionados a un contraste de impedancia más superficiales o efectos 2D y 3D de la cuenca. Los valores y distribución de la segunda frecuencia son

similares a los obtenidos por Guéguen et al., (2000), Naya-Alfonso et al., (2012) y Laurendeau et al., (2017). Los valores de la segunda frecuencia parecen ajustarse bien con la geología cuaternaria en las estaciones que se encuentran en el interior de la cuenca, esto se ha podido observar en pozos que se encuentran cerca a algunas estaciones (menos de 200 m), en los cuales se puede ver capas blandas de la Fm. Cangahua (retrabajadas) sobre capas de Cangahua o sobre los volcánicos basales de la Fm. Machángara, que son rocas un poco más rígidas que las anteriores (Anexo II). En los bordes de la cuenca también se observa estaciones con dos picos H/V los cuales podrían estar relacionados con la presencia de varias capas de alto contraste de impedancia en profundidad, o pueden deberse a efectos 2D y 3D de la cuenca, pero no se tiene información suficiente para definir la razón de estos dos picos. Los picos entre 16.81 a 26.7 Hz estarían relacionados a contrastes de impedancia más someros o a picos industriales originados por la actividad antrópica, sin embargo esto se descartó mediante un análisis realizado en el programa GEOPSY: para que un pico tenga un origen industrial este debe ser agudo en las tres componentes aun cuando se aplique un suavizado (Damping); debido a que este efecto no fue observado, se descarta que sean de origen industrial (ANEXO III). Las curvas H/V con un pico claro a frecuencia entre 16.81 y 26.7 Hz se ubican en los bordes de la cuenca y de manera similar tanto en el norte como en el sur (ANEXO IV). Los picos a frecuencias mayores a 30 Hz, no se utilizaron puesto que es sabido que no son confiables.

La presencia de dos picos claros en la relación espectral H/V significa dos importantes contrastes de impedancia entre capas. Por lo tanto, se puede esperar una amplificación significativa de las ondas sísmicas debida a por contrastes en estos lugares. Además, los picos secundarios a frecuencias mayores a 1 Hz pueden tener un impacto notable cuando las construcciones de baja altura son predominantes, debido a que éstas son más sensibles a las altas frecuencias. La distribución de los picos secundarios debe incluirse en los estudios de los suelos, ya que la zonificación de la frecuencia fundamental del suelo en muchas ocasiones no se ajusta a las frecuencias a las que vibran las estructuras del sitio de estudio, como se ha observado en algunos casos (p.e. Guéguen et al. 1998).

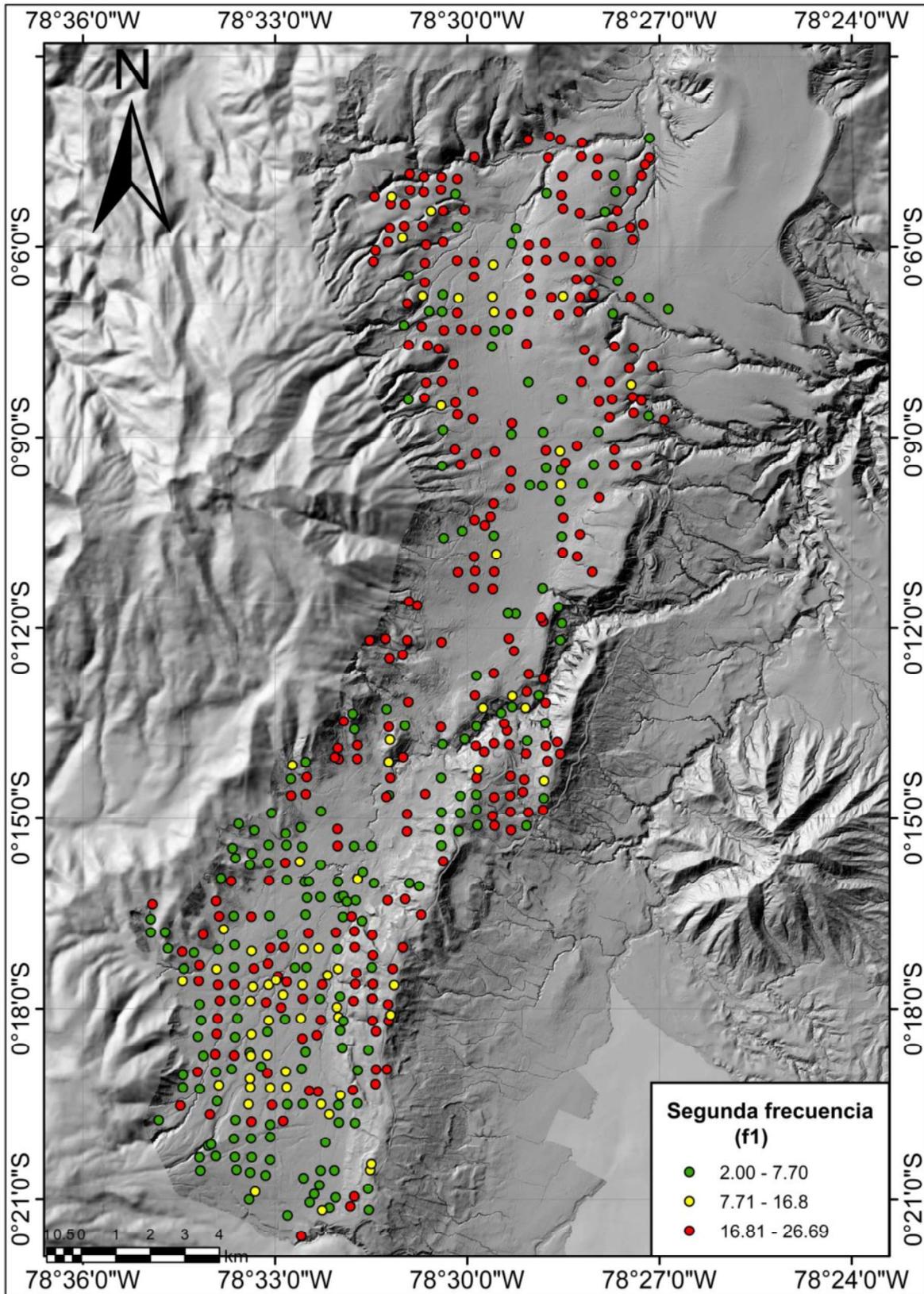


Figura 6.11 Mapa de distribución de la segunda frecuencia en la cuenca de Quito.

En resumen, se puede indicar que los resultados obtenidos indican un diferente comportamiento entre el norte y sur de la ciudad. Los resultados de este estudio son similares a los obtenidos por Guéguen et al., (2000), Naya- Alfonso et al., (2012) y Laurendeau et al., (2017). Así, en el norte de la ciudad de Quito la frecuencia fundamental (f_0) se encuentra entre 1 a 1.37 Hz, en sur de la cuenca las frecuencias predominantes se encuentran entre 0.3 a 0.45 Hz en la parte central hacia los bordes es de 0.6 a 0.8 Hz mientras que, en las faldas del CVP las frecuencias son mayores a 3.5 Hz.

Mediante análisis de las curvas H/V se puede concluir que la técnica de Nakamura o razones espectrales H/V brinda una información confiable de la frecuencia fundamental, pero no de los valores de amplificación del sitio de estudio. Además, el uso de vibraciones ambientales es una herramienta muy simple y económica, la cual se puede aplicar en cualquier momento y no requiere esperar, como en otras técnicas, la ocurrencia de un evento sísmico.

6.3. Recomendaciones

Para una mejor interpretación de las curvas H/V, es necesario contar con datos geológicos y geofísicos, por ejemplo; perforaciones con descripciones litológicas o perfiles de velocidad de onda cortante (V_s) son especialmente necesarios para explicar mejor la presencia de más de un pico en la relación H/V y entender mejor la estructura en profundidad del suelo.

Puesto que las curvas H/V en este estudio presentan más de un pico y la geología cuaternaria de la cuenca de Quito muestra que la estructura en profundidad es compleja, se recomienda aplicaciones de otros métodos de exploración junto a la aplicación de la técnica H/V.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Aki, K., (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors.
- ✓ Aki, K., (1965). A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust, *Geophysics* 30, 665-666.
- ✓ Aki, K., B. Chouet, (1975), Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects, *J. Geophys. Res.* 80, 3322.
- ✓ Alvarado, A. (1996). Evolución geológica cuaternaria y paleosismicidad de la Cuenca de Quito (Ecuador). Tesis de grado, EPN, Quito, Ecuador, 320p.
- ✓ Alvarado, A. (2012) Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur. Thèse de Doctorat. Université de Grenoble: 259pp.
- ✓ Alvarado, A., Audin L., Nocquet, J. M., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., Lamarque, G., Yepes, H., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrín, P., and Quidelleur, X. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*, 33(2), 67-83. doi:10.1002/2012tc003224
- ✓ Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J-M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., Segovia, M., Rolandone, F., Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the northern Andes subduction zone: migration history and present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador, *Tectonics*, DOI: 10.1002/2016TC004117.
- ✓ Andrade, D. (2002) Estudio geovolcanológico del Complejo Volcánico Pululahua. Tesis de Ingeniería. Escuela Politécnica Nacional- Quito: 177pp.
- ✓ Aspden, J., Litherland, M., (1992) The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics* 205: 187-204.
- ✓ Audin, L., G. Hérail, R. Riquelme, J. Darrozes, J. Martinod, and E. Font (2003), Geomorphological markers of faulting and neotectonic activity along the western Andean margin, northern Chile, *J. Quat. Sci.*, 18(8), 681– 694.
- ✓ Audemard, F., and F. Audemard (2002), Structure of the Mérida Andes, Venezuela: Relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction, *Tectonophysics*, 345, 299– 327.

- ✓ Barberi, F., Coltelli M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J., Santacroce, R. (1988). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador., *Geol. Mug.* 125, 1, pp. 1-14.
- ✓ Barberi, F., Bernardi, A., Figuera, I., Ghigliotti, M. & Rosi, M., (1989). Mapa geológico 1:50,000 del volcán Guagua Pichincha, Instituto Geográfico Militar, Quito, Ecuador.
- ✓ Bard, P.-Y., (1982). Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies. *Geophysical Journal International* 71 (3), 731-760.
- ✓ Bard, P.-Y., and Bouchon, M. (1980). The seismic response of sediment-filled valleys. Part 2. The case of incident P and SV waves, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 70, no. 5, 1921–1941.
- ✓ Bard, P.-Y., and Bouchon M. (1985). The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 75, no. 2, 519–541.
- ✓ Bard, P.-Y., Campillo, M. Chavez-Garcia, F. J. and Sanchez-Sesma, F. (1988). The Mexico earthquake of September 19, 1985—A theoretical investigation of large- and small-scale amplification effects in the Mexico City Valley.
- ✓ Bard, P.-Y., (1999), Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? in *The Effects of Surface Geology on seismic Motion*, K. Irikura, K. Kudo, H. Okada and T. Sasatani (Editors), Balkema, Rotterdam, 1251-1279.
- ✓ Benítez, S. (1995), Evolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé supérieur-Tertiaire, *Géologie Alpine*, Université Joseph Fourier (Grenoble) France, 71, 3–163.
- ✓ Beauval, C., H. Yepes, W. Bakun, J. Egred, A. Alvarado, and J. C. Singaicho (2010), Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1586–1996), *Geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04569.x.
- ✓ Bernard, B., Andrade, D. (2011). Volcanes cuaternarios del Ecuador Continental. Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional.
- ✓ Bindi, D., S. Parolai, Cara, F., Di Giulio, G., Ferretti, G., Luzi, L., Monachesi, G., Pacor, F., and Rovelli, A. (2009). Site Amplifications Observed in the Gubbio Basin, Central Italy: Hints for Lateral Propagation Effects, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 741 - 760.
- ✓ Boland, M., Pilatasig, L. F., Ibandango, C., McCourt, W., Aspden, J. A., Hughes, R. A., & Beate, B. (2000). Geology of the Western Cordillera between 0-1°N, Proyecto

de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información cartográfica y Geológica, Informe No. 10. CODIGEM-BGS, Quito, Ecuador, 72 p.

- ✓ Bonilla, L.F., Pérez, V. H., Sánchez, A., Ruiz, M., Yepes, H., & Chatelain, J. L., (1992)-
Análisis preliminar de la microsismicidad de la Zona de Quito (Ecuador), periodo
1988-1992. Segundas Jornadas de Ciencias de la Tierra.
- ✓ Bonilla, L.F., Steidl, Jamison H., Lindley, Grant T., Tumarkin, Alexei G., and Archuleta,
Ralph J., (1997). Site amplification in the San Fernando Valley, California; variability
of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods, Bull. Seism. Soc.
Am. 87, 3, 710-730.
- ✓ Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.-Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J. & Fäh,
D., (2006a). H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise
simulations, Geophys. J. Int., 167, 827–837.
- ✓ Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F. & Bard, P.-Y., (2006b). The nature of noise wavefield
and its applications for site effects studies. A literature review, Earth.-Sci. Rev., 79,
205–227.
- ✓ Bonnefoy-Claudet, S., Köhler, A., Cornou, C., Wathelet, M. & Bard, P.-Y., (2008).
Effects of Love waves on microtremor H/V ratio, Bull. seism. Soc. Am., 98, 288–300.
- ✓ Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L. F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos,
J., Volant, P. & Verdugo, R. (2009) Site effect evaluation in the basin of Santiago de
Chile using ambient noise measurements. Geophysical Journal International
176(3):925-937.
- ✓ Chávez, M. (1987) Análisis de riesgo sísmico en varios sitios de la bahía de
Campeche, Instituto de Ingeniería, UNAM, Marzo.
- ✓ Chávez-García J., Sánchez R., & Hatzfeld D. (1996). Topographic site effects and
HVSR. A comparison between observations and theory. Bull. Seism. Soc. Am. 86,
1559-1573.
- ✓ Chávez-García, F. J. & Cuenca, J. (1998). Site effects and microzonation in Acapulco.
Earthquake Spectra, 14(1): 75-93.
- ✓ Chávez-García, F. J., & Montalva, G. A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros
Geotécnicos, estudio del valle Parkway. Obras y proyectos, (16), 6-30.

- ✓ Chiaradia, M., Fontboté, L., (2001). Radiogenic Lead Signature in Au-Rich Volcanic-Hosted Massive Sulfides Ores and Associated Volcanic Rocks of the Early Tertiary Macuchi Island Arc (Western Cordillera of Ecuador). *Economic Geol* 96: 1361 - 1378.
- ✓ Chlieh M., Mothes, P., Nocquet, J.-M., Jarrin, P., Charvis, P., Cisneros, D., Font, Y., Collot, J.-Y., Villegas, J.-C., Rolandone, F., Vallée, M., Regnier, M., Segovia, M., Martin, X., Yepes, H., 661 (2014). Distribution of discrete seismic asperities and aseismic slip along the Ecuadorian 662 megathrust, *Earth Planet. Sci Lett.*, 400, 292-301. 663 <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.05.027>
- ✓ Claperton C., y Vera R. (1986). The Quaternary glacial sequence in Ecuador: a reinterpretation of the work of the Walter Sauer. *Journal of Quaternary Science*. 1, pp. 45-56.
- ✓ Dal Moro, G. (2015). Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. *J. Appl. Geophys.*, 114 (2015), pp. 66-70.
- ✓ Del Pino, L., Yepes, H., (1990). Apuntes para una Historia Sísmica de Quito. Centro Histórico de Quito: Problemática y Perspectivas, Serie Quito. L Municipio de Quito y Junta de Andalucía, Min. de Asuntos Exteriores de España, Quito, 67- IOOp.
- ✓ DGGM, (1982). Hoja geológica San Antonio. Escala 1:25000
- ✓ Ego F, Sebrier M, Lavenu A, Yepes H, Egüez A (1993) Quaternary state of stress in the northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. Second ISAG, Oxford (UK), extended abstract, pp 89-92.
- ✓ Ego F., Sebrier M., Lavenu A., Yepes H., Egüez A (1995). Quaternary state of stress in the northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics* 259, pp.100-117.
- ✓ Ego F., Sebrier M. (1996). The Ecuadorian Inter-Andean Valley: a major and complex restraining bend and compressive graben since Late Miocene Time. *Annales Tectonicae*, Vol X No. 12. pp. 30-60.
- ✓ Egüez, A., (1986). Evolution Cénozoïque de la Cordillere Occidentale Septentrionale d'Equateur (0°15'S - 1°10'S), les Minéralisations Associeés. Tesis Doctoral. UPMC - Paris: 116pp.

- ✓ Egüez, A., Aspden, J. (1993). The mesozoic cenozoic evolution of the Ecuadorian Andes. Second ISAG, Oxford (UK), 21-23/9/1993.
- ✓ Egüez A., Alvarado A. (1994). Consideraciones Geológicas sobre el Área Metropolitana de Quito: Apéndice III. The Quito, Ecuador, Earthquake risk management Project. An Overview Geohazard International Publication, San Francisco. Pp. 182-190.
- ✓ Estrella M. (1986), Estudio geológico de la zona de deslizamientos de San Miguel del Común. Tesis de Grado, EPN, Quito, Ecuador. P. 150-158.
- ✓ Faccioli E., Vanini M. and Frassiné L., (2002), "Complex" Site Effects in Earthquake Ground Motion, including Topography. 12th European Conference on Earthquake Engineering, Barbican Centre, London, UK.
- ✓ Fäh, D., F. Kind, and D. Giardini (2001). A theoretical investigation of average H/V ratios, *Geophys. J. Int.* 145, 535–549.
- ✓ Feininger T. and Bristow C.R. (1980). Cretaceous and Palaeogene geologic history of Coastal Ecuador: *Geologische Rundschau*, v. 69, p. 40-44.
- ✓ Field, E.H. and Jacob, K., (1993). The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. *Geophys. Res. Lett.* 20-24, 2925-2928.
- ✓ Field. E.H. and K.H. Jacob (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent, *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 1127-1143.
- ✓ Guéguen, E., Doglioni, C., Fernandez, M., (1998). On the post-25 Corsica–Provencal domain and the Northern Apennines. *Ma geodynamic evolution of the western Mediterranean. Terra Nova* 7, 128–137. *Tectonophysics* 298, 259–269.
- ✓ Guéguen, P. Chatelain, J.-L. Guillier, B. Yepes, H. (2000). An indication of the soil topmost layer response in Quito (Ecuador) using noise H/V spectral ratio. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 127–133. Escuela Politécnica Nacional, Ilustre Municipio de Quito, ORSTOM, OYO Corp. (1994). The Quito, Ecuador, earthquake risk management project: an overview. *GeoHazards International*, San Francisco: *GeoHazards International Publication*.

- ✓ Guéguen P, Michel C, Le Corre L (2006) A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to Grenoble (France). *Bull Earthq Eng* 5(3): 437–490.
- ✓ Guerra, J. (2019). Definición de la geometría del segmento norte (bellavista-catequilla) del sistema de fallas de Quito por medio de relocalizaciones de sismos ocurridos en agosto 2014 (Tesis pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito
- ✓ Gutscher, M, Malavieille J, Lallemand S, Collot J (1999) Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letter* 168: 255 - 270.
- ✓ Hall M., (1977) – El volcanismo en el Ecuador. Publicación del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Sección Nacional del Ecuador, Quito, 120 pp.
- ✓ Hall, M., Mothes P (2008) The Chacana Caldera Complex in Ecuador. Collapse Calderas Workshop. IOP Conf Series. Earth and Environmental Science 3: doi:10.1088/1755-1307/3/1/012004.
- ✓ Hall, M., Beate, B., (1991) El volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador. El paisaje volcánico de la Sierra Ecuatoriana - Estudios de Geografía. Corporación Editora Nacional, Quito - Ecuador: 6 - 16.
- ✓ Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J., Johnson, J., (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 16. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012.
- ✓ Hidalgo, S. (2006). Les interactions entre magmas calco-alcalins “classiques” et adakitiques: exemple du complexe volcanique atacazo-ninahuilca (equateur). Université Blaise pascal. France. 249 pp.
- ✓ Hidalgo, S., Monzier, M., Almeida, E., Chazot, G., Eissen, J.P., Van der Plicht, J., & Hall, M. (2008). Late Pleistocene and Holocene activity of Atacazo-Ninahuilca Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, pp. 16-26. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.05.017.
- ✓ Hoffstetter, R., (1986)-High andean mammalian faunas during the Plio-Pleistocene. In: High altitude tropical biogeography (Vuilleumier F. & Monasterio N. eds.):218-245, New York: Oxford Univ. Press.

- ✓ Huang H.-C. and Chiu H.-C. (1998). "Canyon effects on ground motion at Feitsui Damsite." *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 18, pp. 87-99.
- ✓ Hughes, R., Pilatasig, L., (2002) Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Ecuador Andes. *Tectonophysics* 345: 29-48.
- ✓ Jackson, J., R. Norris, and J. Youngson (1996), The structural evolution of active fault and fold systems in central Otago, New Zealand: Evidence revealed by drainage patterns, *J. Struct. Geol.*, 18 (2/3), 217– 234.
- ✓ Jaillard, E., Ordóñez, M., Berrones, G., Bengtson, P., Bonhomme, M., Jiménez, N., I. Zambrano. (1996). Sedimentary and tectonic evolution of the arc zone of southwestern Ecuador during late cretaceous and early tertiary times. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 9, Nos 1/2. Great Britain.
- ✓ Jaillard, E., Lapierre, H., Ordóñez, M., Toro, J., Amortegui, A., Vanmelle, J., (2009) Accreted oceanic terranes in Ecuador: southern edge of Caribbean Plate? *Geol Soc London Special Pub* 328: 469-485.
- ✓ Jaya, D. (2009). Origen de los depósitos volcánicos de la cuenca de Quito: Implicación de la evolución del complejo Pichincha y del sistema de fallas de Quito. Quito: EPN.
- ✓ Jiménez E., Alvarado, A. (2001). Geología del cuaternario de las áreas urbanas del distrito metropolitano de Quito. Convenio EPN-Municipio Distrito Metropolitano de Quito. Quito, 24 p.
- ✓ Kellogg J. N., Bonini W. E. (1985). Reply of a comment of C. Schubert on "Subduction of Caribbean Plate and basement uplift in the overriding South America Plate" by Kellogg & Bonini, *Tectonics*, 1(3); pp. 251-276.
- ✓ Kellogg, J. and Vega, V., (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity. *Special Paper Geological Society of America* 295, 75-90.
- ✓ Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R.J., Brooks, B., Vargas, R.B., Lauría, E., and Fortes, L.P.S. (2003). The Nazca-South America Euler Vector and its Rate of Change. *Journal of South American Earth Sciences* 16: 125-131.
- ✓ Kerr, A., Aspden, J., Tarney, J., Pilatasig, L., (2002) The nature and provenience of accreted oceanic terranes in western Ecuador: geochemical and tectonic constraints. *J. Geol Soc London* 159: 577 - 594.

- ✓ Konno, K., and Ohmachi, T. (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 228-241. Kramer, S. L. (1996) *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- ✓ Lachet, C., Bard, P.-Y. (1994). "Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique" *Journal of Physics of the Earth* 42 (4): pp. 377–397.
- ✓ Lachet, C., Hazfeld, D., Bard, P.-Y., Theodulidis, N., Papaioannou, C., and Savvaidis, A. (1996), Site Effects and Microzonation in the City of Thessaloniki (Greece) Comparison of Different Approaches, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86, 1692-1703.
- ✓ Laurendeau A., Bonilla L.F., Mercerat D., Courboux F., Alvarado A., Singaicho J.C., Viracucha C., Guéguen P., Bertrand E. (2017), SEISMIC RESPONSE OF THE BASIN OF QUITO FROM CONTINUOUS ACCELEROMETRIC RECORDS OF RENAC-QUITO. 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017 Santiago Chile, January 9th to 13th 2017, Paper N° 4937 Registration Code: S-I1464476619.
- ✓ Laurendeau A., Courboux F., Bonilla L.F., Alvarado A., Naya V., Guéguen P., Mercerat D., Singaicho J., Bertrand E., Perrault M., Barros J., Ruiz M. (2017), Low-Frequency Seismic Amplification in the Quito Basin (Ecuador) Revealed by Accelerometric Recordings of the RENAC Network. *Bulletin of the Seismological Society of America* (2017) 107 (6): 2917-2926. doi.org/10.1785/0120170134.
- ✓ Lavenu, A., Noblet, C., Bonhomme, M., Egüez, A., Dugas, F., (1992). New K/Ar age dates of Neogene and Quaternary volcanic rocks from the Ecuadorian Andes: Implications for the relationship between sedimentation, volcanism and tectonics. *Journal of South American Sciences* 5 (3/4): 309 - 320.
- ✓ Lavenu A., Winter T., Dávila F. (1995). A Pliocene Quaternary compressional basin in the Interandean Depression, Central Ecuador. *Geophys. Journal. Int.* 121, 279 300.
- ✓ Lavenu A., Baudino R., Ego F. (1996). Stratigraphie des dépôts Tertiaires et Quaternaires de la Depression Interandine d'Equateur (entre 0° et 2°15S). *Bull Brit Geol Survey, Overseas Mem* 11: 147pp.
- ✓ Lermo, J.F. y F.J. ChávezGarcía (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 1574-1594.

- ✓ Lermo, J., and Chávez-García, F. J. (1994). Are microtremors useful in the site response evaluation? Bull. Seism. Soc. Am. 84, 1350-1364.
- ✓ Linares, G. (2005). Introducción y aplicación del método de sismica de microtremores en áreas urbanas. Tesis para optar al título de Ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas. Obtenido de <http://159.90.80.55/tesis/000130597.pdf>
- ✓ Litherland, M., Aspden, J., (1992). Terrane-boundary reactivation: a control on the evolution of the Northern Andes. Journal South Am Earth Sci 5: 71 - 76.
- ✓ Litherland, M., and Zamora, A., (1993). A terrane configuration for the Northern Andes. Comunicaciones (Santiago) 42, 122-126.
- ✓ Litherland, M., Aspden, J., Jemielita, R., (1994). The metamorphic belts of Ecuador. Brit Geol Survey, Overseas Mem 11: 147pp.
- ✓ Lonsdale, P., (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. Tectonophysics 404 (3-4), 237-264.
- ✓ Mothes, P., Hall, M.L., Andrade, D., Samaniego, P., Pierson, T.C., Ruiz, A.G., Yepes, H., (2004). Character, stratigraphy and magnitude of Historical lahars of Cotopaxi volcano (Ecuador). Acta Vulcanológica 16, 85–108.
- ✓ Mulas, J. (2009). “Consideraciones del efecto de sitio en las cartografías de microzonificación sísmica realizadas por el IGME. Una metodología cambiante”. Instituto Geológico Minero de España. Escuela Nacional de protección Civil, España 2009.
- ✓ Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface. QR of RTRI, 1; 30:25–33.
- ✓ Nakamura, Y. (2000) Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura’s Technique and its Applications, Procc.12WCEE 2000.
- ✓ Naya-Alfonso V., Courboux F., Bonilla F., Ruiz M., Vallée M., Yépes H. (2012). A Large Earthquake in Quito (Ecuador): Ground Motion Simulations and Site Effects. 15WCEE, Lisboa 2012.
- ✓ Nocquet, J., Mothes, P., Alvarado, A., (2009). Geodesia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador. Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador: desde la costa continental hasta las Islas Galápagos - Guayaquil: 83 95.

- ✓ Nocquet, J., Villegas-Lanza, J., Chlieh, M., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrin, P., Yepes, H., (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*, 7(4), 287-291. doi:10.1038/ngeo2099
- ✓ Nogoshi, M. and Igarashi, T. (1971), "On the Amplitude Characteristics of Microtremor", *Jour. Seism. Soc. Japan*, 24, 26-40.
- ✓ Ohsaki, Y., Japanese microzonation methods, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 49:161-182, 1972.
- ✓ OLADE-INECEL, (1980). Informe geo-vulcanológico: proyecto de investigación geotérmica de la República del Ecuador. Organización Latinoamericana de Energía, Quito p. 54.
- ✓ Pacheco, D., Laurendeau A., Courboulex F., Mercerat D., Alvarado A. (2019). Imaging the Quito Basin using seismic noise (ISAG, 2019).
- ✓ Papale, P. & Rosi, M. (1993). A case of no-wind plinian fallout at Pululahua caldera (Ecuador): implications for models of clast dispersal. *Bulletin of Volcanology*, 55, 523-535.
- ✓ Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record: technical program with biographies. 68th SEG Ann. Mtg. Exp., 1377 – 1380.
- ✓ Parolai, S., Bormann, P. & Milkreith, C., (2002). New relationships between V_s , thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio seismic noise for the Cologne area (Germany), *Bull. seism. Soc. Am.*, 92, 2521–2527.
- ✓ Pennington, W., (1981). Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), 10753-10770. doi: 10.1029/jb086ib11p10753.
- ✓ Pischituta M., Cultrera G., Caserta A., Luzi L. and Rovelli A., (2010). Topographic effects on the hill of Nocera Umbra, central Italy, *Geophysical Journal International*, Vol. 182, 2, 977–987.
- ✓ Reynaud, C., Jaillard, E., Lapierre, H., Mamberti, M., Mascle, G., (1999). Oceanic plateau and island arcs of south-western Ecuador: their place in the geodynamic evolution of north-western South America. *Tectonophysics* 307, 235 – 254.

- ✓ Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca S. y Yepes, H. (2007): Los terremotos en el Ecuador. Corporación Editora Nacional, Quito, 106 p.
- ✓ RIEPL, J., BARD, P. Y., HATZFELD, D., PAPAIOANNOU, C. & NECHSTEIN, S., (1998): Detailed evaluation of site response estimation methods across and along the sedimentary valley of Volvi (EURO-SEISTEST). Bull. Seismol.
- ✓ Robin, C., Samaniego, P., Le Penneç, J-L., Mothes, P., van der Plicht, J. (2008). Late Holocene phases of dome growth and Plinian activity at Guagua Pichincha volcano (Ecuador). J Volcanol Geotherm Res 176: 7 –15. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.10.008.
- ✓ Robin C, Samaniego P, Le Penneç JL, Fornari M, Mothes P, et al. (2010) New radiometric and petrological constraints on the evolution of the Pichincha volcanic complex (Ecuador). Bulletin of Volcanology Online Fir: doi: 10.1007/s00445-010-0389-0
- ✓ Samaniego P. (1994). Estudio estratigráfico y tectónico de la cuenca de Guayllabamba: Inédito, EPN, Quito. 25 p.
- ✓ Sauer, W., (1965). Geología del Ecuador, Ministerio de Educación, Quito, Ecuador.
- ✓ Semblat, J.F., Kham, M., Parara, E., Bard, P.Y., Pitilakis, K., Makra, K., Raptakis, D., (2004). Site effects: basin geometry vs soil layering. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25 (7–10), 529–538.
- ✓ SESAME. (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation.
- ✓ Shearer P. M., Prieto, G, and E. Hauksson (2009). Comprehensive analysis of earthquake source spectra in southern California, J. Geophys. Res., 111, doi: 10.1029/2005JB003979.
- ✓ Soulas, J.-P., Egüez, A., (1994). Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. Bol Geol Ecuat 2, 3-11Desarrollador editor.softonic.com/.
- ✓ Soulas, J.-P., Egüez, A., Yepes, H., Pérez, H., (1991), Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia, Bol. Geol. Ecuat., 2(1), 3 11.

- ✓ Spikings, R., Winkler, W., Hughes, R., Handler, R., and (2005) Thermochronology of allochthonous terranes in Ecuador: Unraveling the accretionary and postaccretionary history of Northern Andes. *Tectonophysics* 339: 195 - 220.
- ✓ Stein, S. and Wysession (2003). *Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*, Oxford: Blackwell. Semblat J.F, Kham M. and Bard P. Y., 2004: Seismic-Wave Propagation in Alluvial Basins and Influence of Site-City Interaction. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98, no. 6, pp. 2665-2678.
- ✓ Taga, N. (1993): «Measurement of microtremors in Earthquake Ground Motion and Ground Condition», edited by The Architectural Institute of Japan.
- ✓ Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymueller, J., Mora, H., (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal South America Earth Science* 15: 157 - 171.
- ✓ Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. México: Prentice Hall. Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=_2HCio8aZiQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false
- ✓ Vaca, S., Vallée, M., Nocquet, J. M., Alvarado, A. (2019). Active deformation in Ecuador enlightened by a new waveform-based catalog of earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*. Volume 93, August 2019, Pages 449-461. doi.org/10.1016/j.jsames.2019.05.017.
- ✓ Vallejo, C., (2007). *Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous-Paleogene)*. PhD thesis. Institute of Geology, ETH Zurich: 208pp.
- ✓ Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R., Luzieux, L, Heller, F., Busy, F., (2009). Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. *Geol Soc Am Mem* 204: doi: 10.1130/2009.12.04 (09).
- ✓ Vásconez, F., (2015). *Mapa Geológico del Complejo Volcánico Pululahua (CVP)*. Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional.
- ✓ Vera R. (1983a). Características petrográficas y paleogeográficas del conglomerado de Chiche en los alrededores d Ilaló. EPN, Quito.p.4.

- ✓ Villagómez, D., (2003). Evolución Plio-Cuaternaria del Valle Interandino Central en Ecuador (zona Quito - Guayllabamba - San Antonio de Pichincha). Tesis de ingeniería. Escuela Politécnica Nacional - Quito: 130pp.
- ✓ Villagómez, D., Egüéz, A., Winkler, W., Spikings, R., (2002). Plio-Quaternary sediments and tectonic evolution of the Central Inter-Andean Valley in Ecuador. Fourth ISAG, Toulouse-France: 689 - 692.
- ✓ Villegas-Lanza, J.-C., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., Nocquet, J.-M., (2016). Active tectonics of Peru: heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *J. Geophys. Res.* 121, 7371–7394. <https://doi.org/10.1002/2016JB013080>.
- ✓ Winkler, W., Spikings, R.A., Villagómez, D., Egüéz, A., Abegglen, P., Tobler, S., (2002). The Chota basin and its significance for the formation of the inter-Andean valley in Ecuador, Fifth International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG), September 16–18, 2002, Toulouse, France 2002 pp. 705–708.
- ✓ Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., Tobler, S., Egüéz, A., (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal South Am Earth Sci* 19: 5 -19.
- ✓ Woolery, E.W. & Street, R., 2002. 3D near-surface soil response from H/V ambient-noise ratios, *Soil. Dyn. Earthq. Eng.*, 22, 865–876.

ANEXOS

ANEXO I: Características de los instrumentos utilizados en la toma de medidas de ruido sísmico ambiente.

DIGITALIZADOR REF-TEK 130

Es un digitalizador portátil de banda ancha con un rango dinámico mayor a 138 dB, sirve para digitalizar registros sísmicos de diferentes tipos de sensores externos como, por ejemplo: sismómetros, acelerómetros, entre otros. Cuenta con 32 GB de memoria, distribuidas en dos unidades extraíbles de 16 GB cada una (Figura). Tiene cinco conectores (conexión a la batería de 12V, conexión a la red, conexión al sismómetro, conexión al dispositivo de control, conexión al receptor GPS) dos ranuras (para tarjetas de memoria extraíble) y una pantalla LED.



Digitalizador REF TEK 130B (www.reftek.com).

DIGITALIZADOR GURALP CMG-CD24

Es un digitalizador compacto, eficiente y multi-propósito. Posee tres entradas diferenciales de 24 bits y 8 entradas de baja velocidad. Características:

- Convertidores análogos-digital 24-bit sigma-delta
- Bajo poder: < 1W de 10V-28V DC
- Bajo peso y a prueba de agua
- Múltiples y configurables razones de salida



Digitalizador GURALP CMG-CD24 (www.guralp.com/documents/MAN-C24-0001.pdf)

DIGITALIZADOR KEPHREN

Es un digitalizador multipropósito y de bajo consumo de energía, muestra un amplio rango de capacidades y la extremadamente flexible parametrización lo hacen útil para aplicaciones como:

- Estudio sísmico de alta resolución basado en la transmisión de datos en tiempo real
- Monitoreo de obras de ingeniería (plantas, edificaciones, etc.)
- Mediciones de ruido en lugares urbanos.
- Estaciones de monitoreo permanente de observatorios volcánicos y sismológicos



Digitalizador Kephren (agecodagis.free.fr/WebData/Documentation/Commercial/Kephren/Kephren.pdf)

GPS GARMIN

Es un receptor GPS de alta sensibilidad de excelente recepción de satélites, con altímetro barométrico, una brújula electrónica y carcasa resistente al agua, mapa atlántico base y pantalla a color. Permite establecer la ubicación exacta de cada estación de adquisición de datos.



Características de los Sismógrafos utilizados

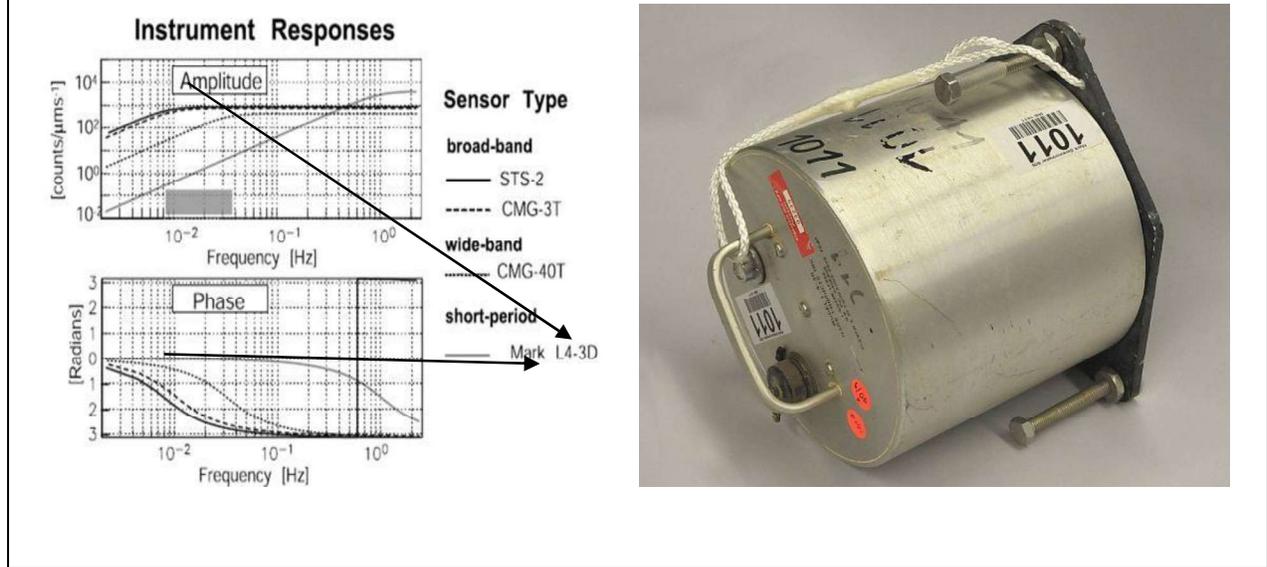
Campaña 2000

Para el registro de ruidos sísmico del año 2000, se utilizaron sismógrafos L4-3D, cuyas características se describen en la siguiente tabla. Además, se muestra el número de registros realizados y el tiempo de duración de las medidas.

Muestra las características del sensor utilizado en la campaña del año 2000, tipo de metodología utilizada, tiempo de duración en la toma de datos y número de sitios donde se realizaron las medidas.

Tipo de Sensor utilizado en esta campaña	L4-3D
Frecuencia de corte (Hz)	1-100 Hz
Frecuencia de Muestreo	100 Hz
Experimento	Medidas de Ruido 2000
Metodología	mHVSR
Duración de la Medida	15 min
Número de Sitios	759

Respuesta del Sensor

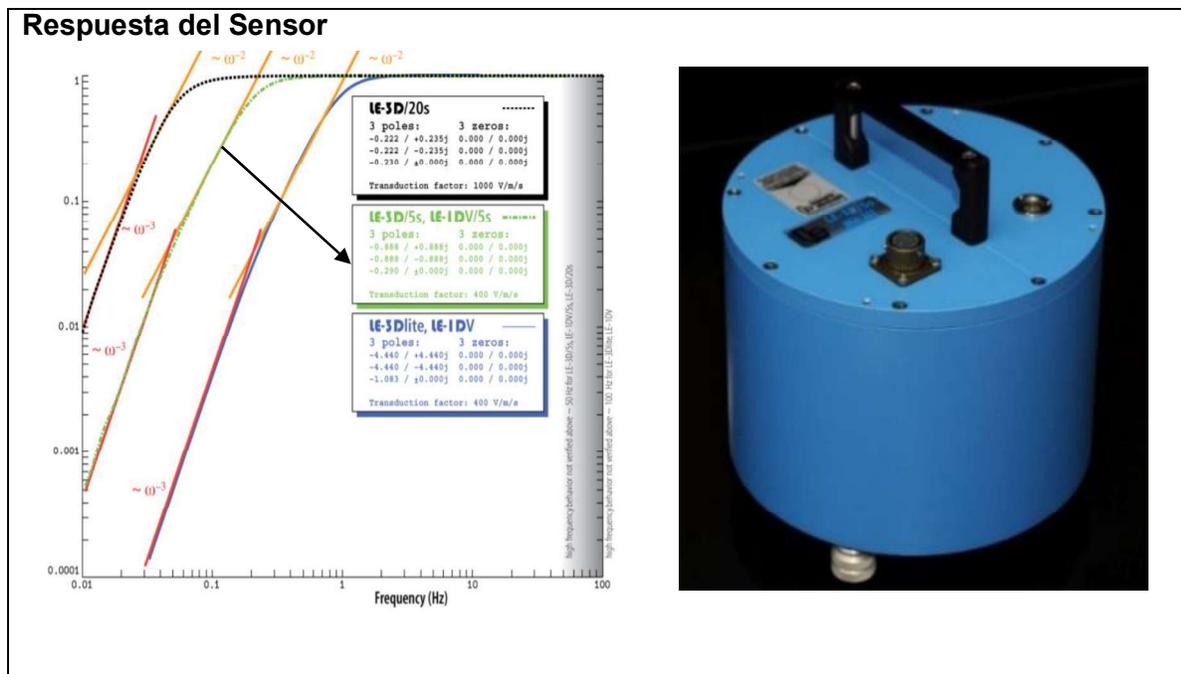


Campaña Alfonso-Naya et al., (2012)

Para el registro de ruidos sísmico del año 2012, se utilizaron sismógrafos Lennartz 5 s, cuyas características se describen en la siguiente tabla. Además, se muestra el número de registros realizados y el tiempo de duración de las medidas.

Muestra las características del sensor utilizado en las medidas de ruido de 2012, tipo de metodología utilizada, tiempo de duración en la toma de datos y número de sitios donde se realizaron las medidas.

Tipo de Sensor utilizado en esta campaña	Lennartz 5s
Frecuencia de corte (Hz)	0.2-50 Hz
Frecuencia de Muestreo	100 Hz
Experimento	Medidas de ruido ambiente (Naya)
Metodología	mHVSr
Duración de la Medida	20 a 60 min
Número de Sitios	16



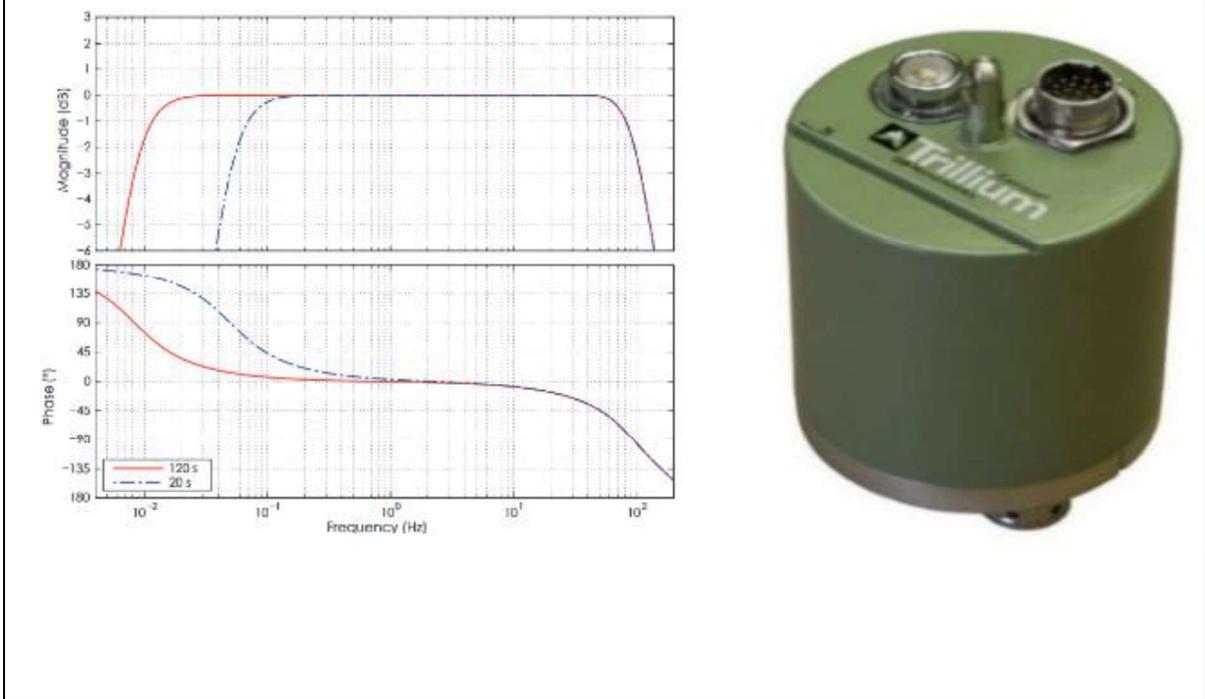
Campaña 2016

Esta campaña se realizó en el año 2016, consta de 63 registros de 3 componentes con una duración entre 1 a 2 horas. Las medidas fueron registradas con sismógrafo Trillum 20 s con cuyas características se describen en la siguiente tabla. Además, se muestra el número de registros realizados y el tiempo de duración de las medidas.

Muestra las características del sensor utilizado en la campaña 2016, tipo de metodología utilizada, tiempo de duración en la toma de datos y número de sitios donde se realizaron las medidas.

Tipo de Sensor utilizado en esta campaña	Trillum 20s
Frecuencias de corte del Sensor	0.05 -100 Hz
Frecuencia de Muestreo	100 Hz
Experimento	Nueva microzonificación de Quito, medidas puntuales de ruido ambiente.
Metodología	mHVSr
Duración de la Medida	1h-2h
Número de Sitios	63
Acoplamiento Suelo-Sensor	

Respuesta del Sensor



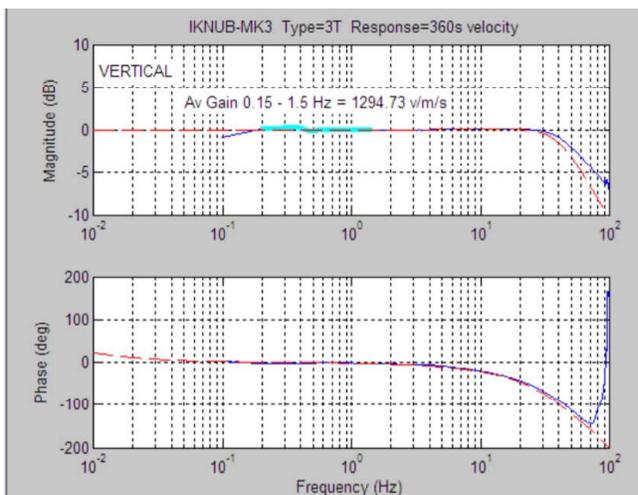
Campaña 2016-2018

Esta campaña se realizó en los años 2016-2018, consta de 20 estaciones temporales con registros de 3 componentes para medir el ruido en la ciudad en la cual se utilizó dos tipos de sensores CMG-40T, Trillium 120 s cuyas características se describen en las siguientes tablas.

Muestra las características del sensor utilizado en las estaciones temporales 2017, tipo de metodología utilizada, tiempo de duración en la toma de datos y número de sitios donde se realizaron las medidas.

Tipo de Sensor utilizado en las estaciones temporales	CMG-40T
Frecuencias de corte del sensor	0.2-100 Hz
Frecuencia de Muestreo	200 Hz
Experimento	Estaciones Temporales 2017
Metodología	mHVSR
Duración de la Medida	Continua
Número de Sitios	16

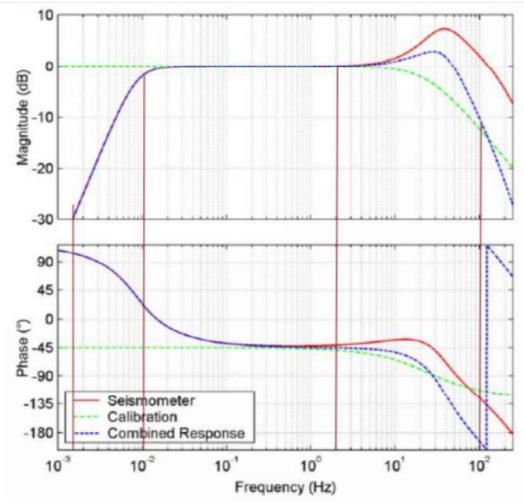
Respuesta del Sensor



Muestra las características del sensor utilizado en las estaciones temporales 2017, tipo de metodología utilizada, tiempo de duración en la toma de datos y número de sitios donde se realizaron las medidas.

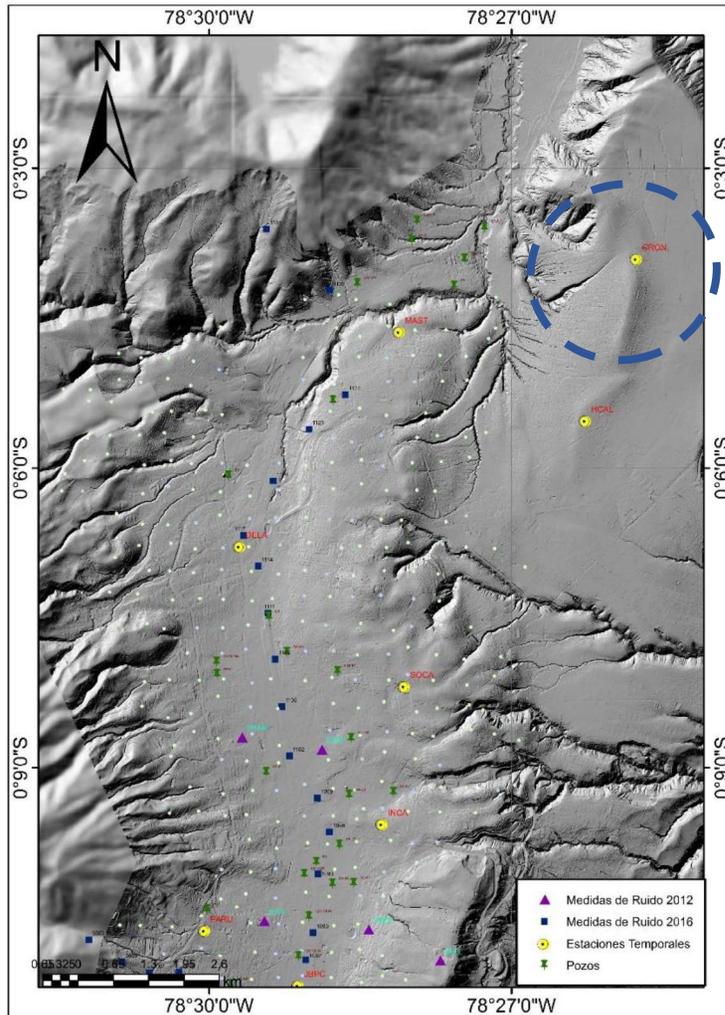
Tipo de Sensor utilizado en las estaciones temporales	Trillium 120 s
Frecuencias de corte del sensor	0.0083 HZ -100 Hz
Frecuencia de Muestreo	100 Hz
Experimento	Estaciones Temporales 2017
Metodología	mHVSR
Duración de la Medida	Continua
Número de Sitios	4 (GARO, SOCA, SVAC y PARU)

Respuesta del Sensor

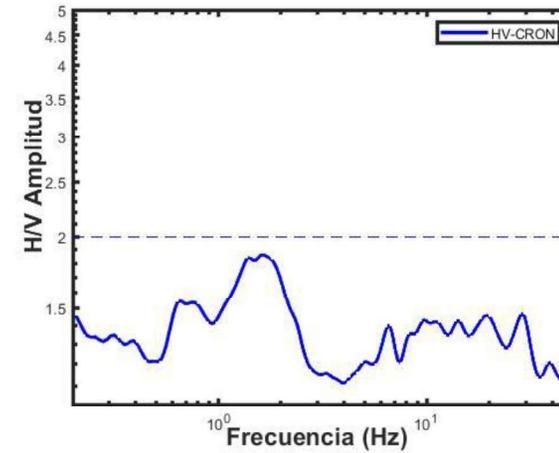


ANEXO II. Comparación entre las curvas de las diferentes campañas de ruido sísmico ambiente para establecer zonas con un mismo comportamiento.

ZONA 1

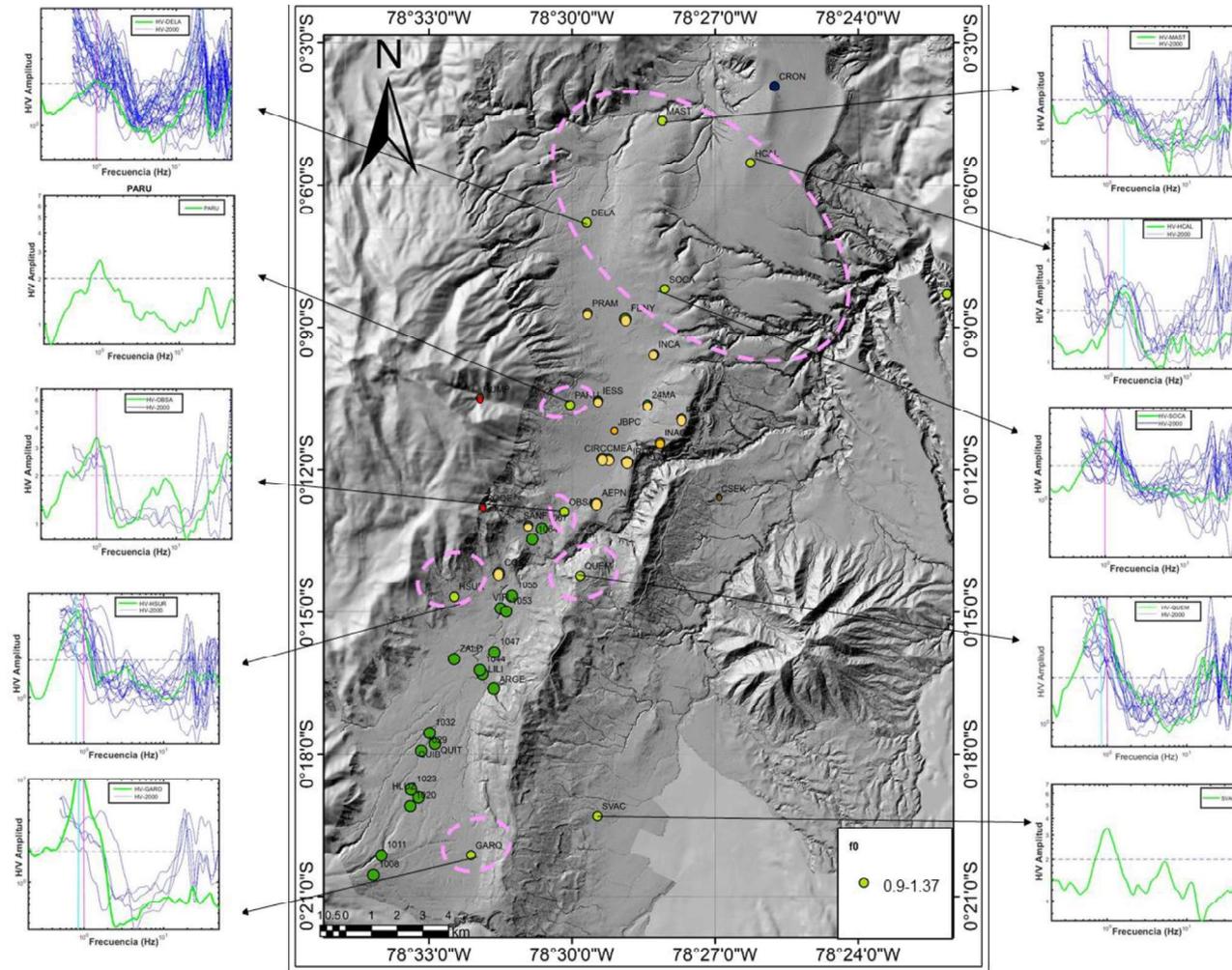


CRON



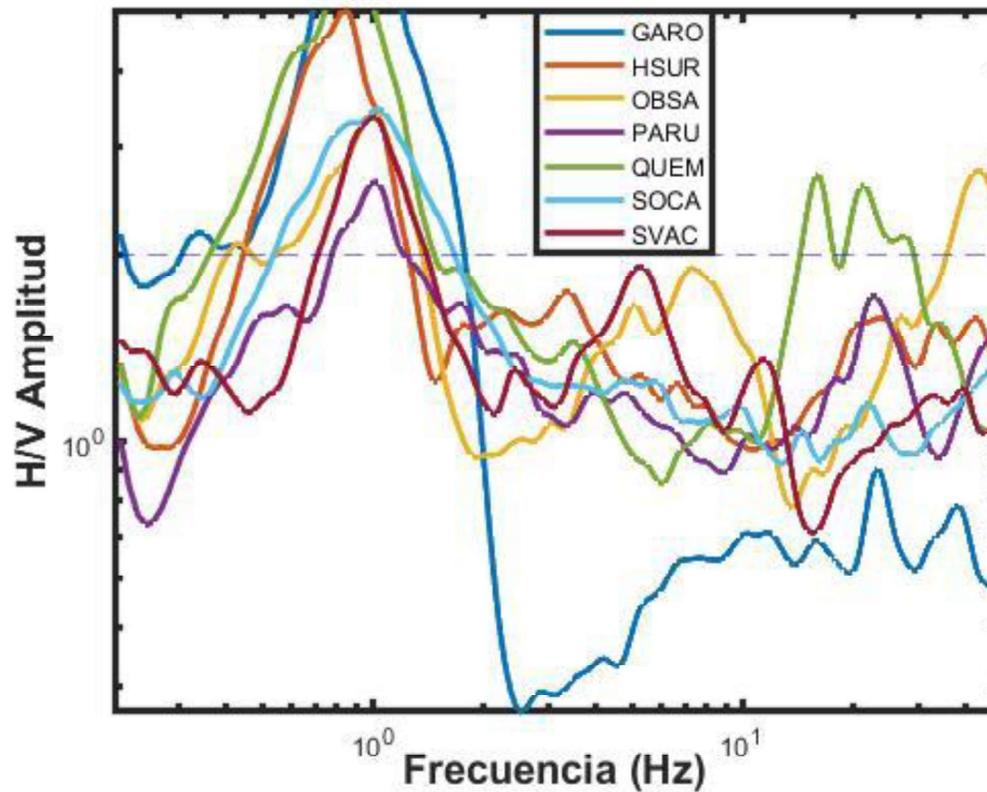
La estación CRON, se encuentra al noreste de la ciudad de Quito como se puede ver en el mapa, la curva H/V de este registro muestra una curva plana lo que indicaría que el sitio está compuesto de una roca rígida o poco meteorizada, pero de acuerdo a los parámetros que brinda el proyecto SESAME (2004), se debe realizar más medidas, además de tener datos sobre la geología del sitio para su interpretación.

ZONA 2

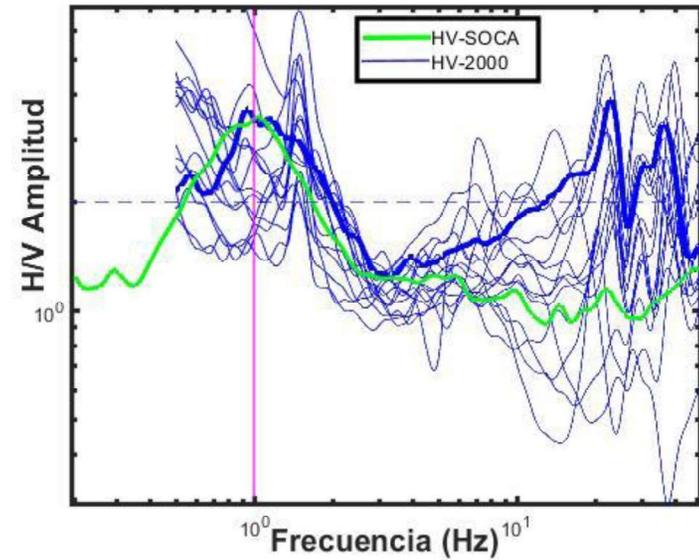
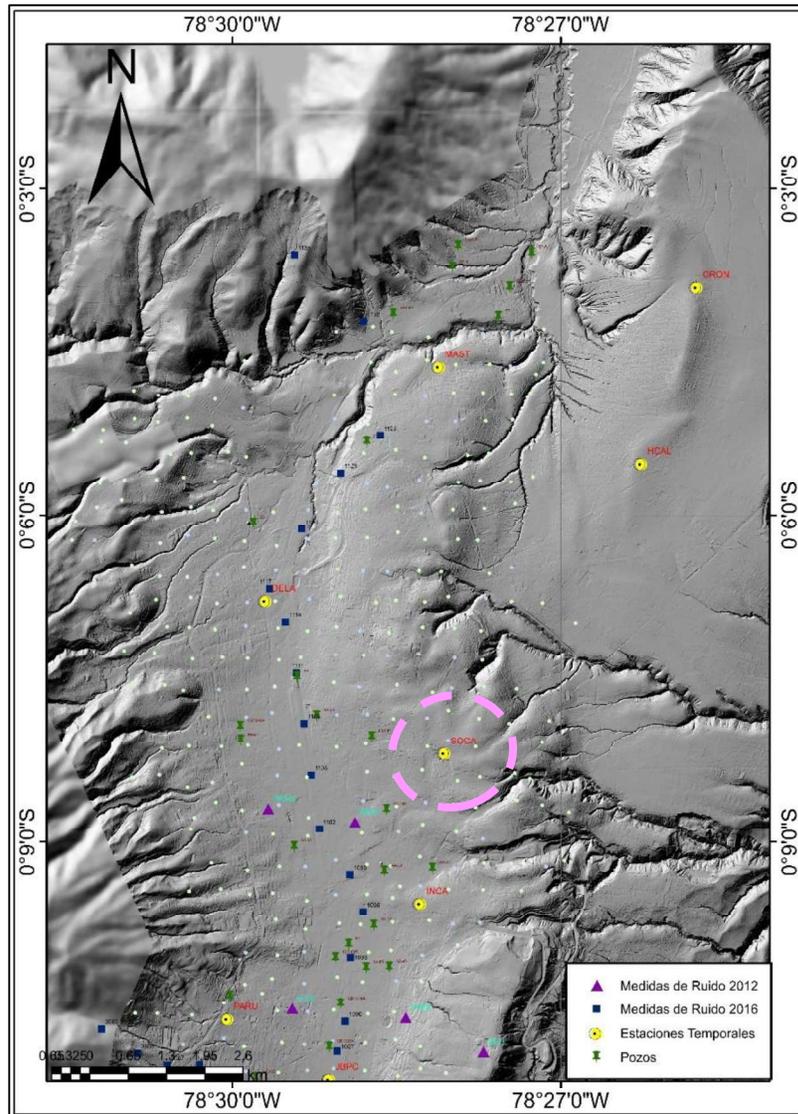


En esta zona se puede observar curvas con picos H/V entre 0.9 a 1.37 Hz, las líneas azules representan las estaciones del año 2000 y las líneas verdes representan las estaciones del año 2012 y las estaciones temporales. Se ha clasificado en tres familias de acuerdo a su forma y frecuencia del pico, las cuales serán descritas a continuación.

Familia 1: Un pico claro de amplitud mayor a 3 a frecuencias entre 0.85 a 1.37 Hz, con excepción de OBSA y QUEM que presentan más de un pico claro debido a su ubicación.

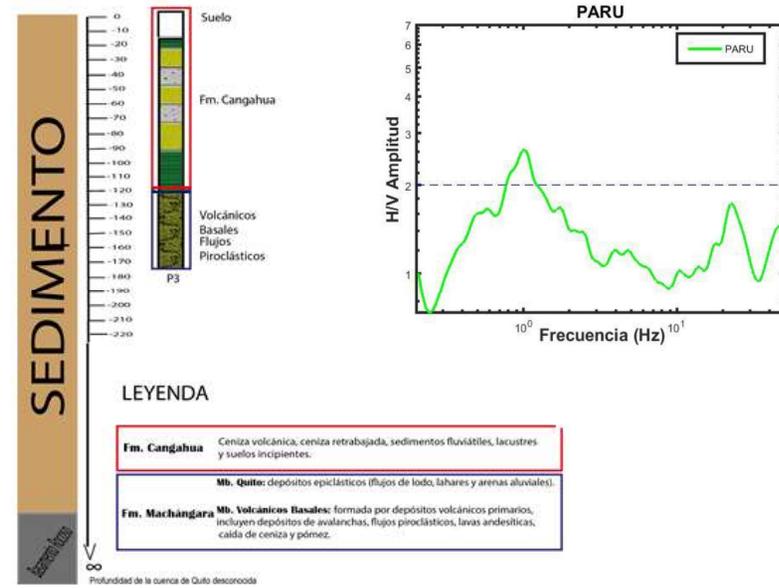
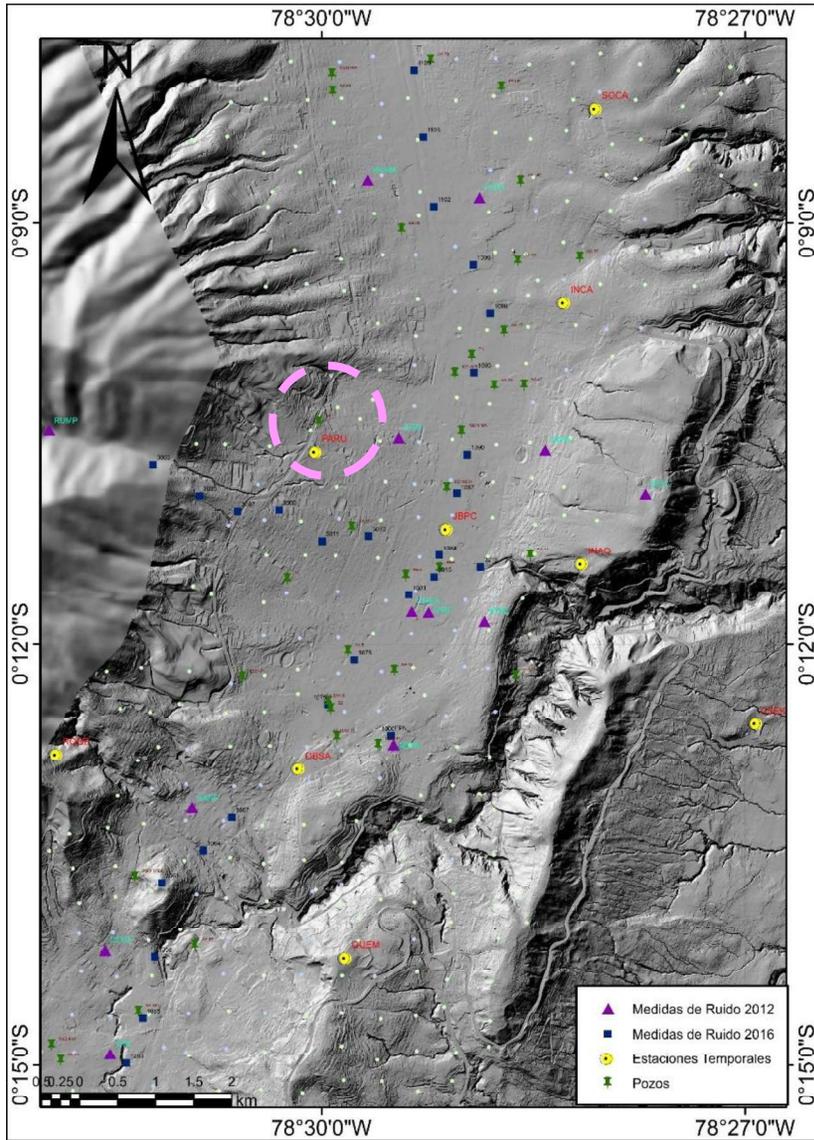


SOCA



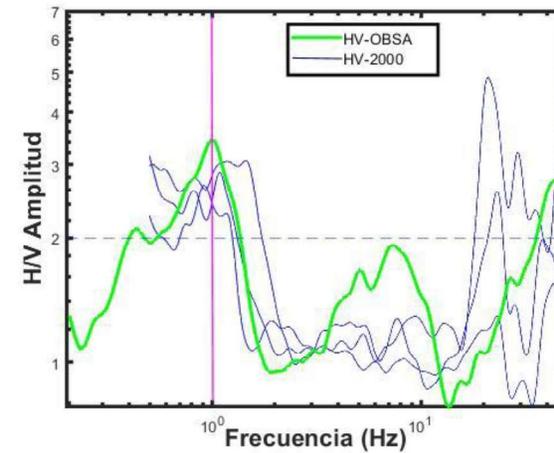
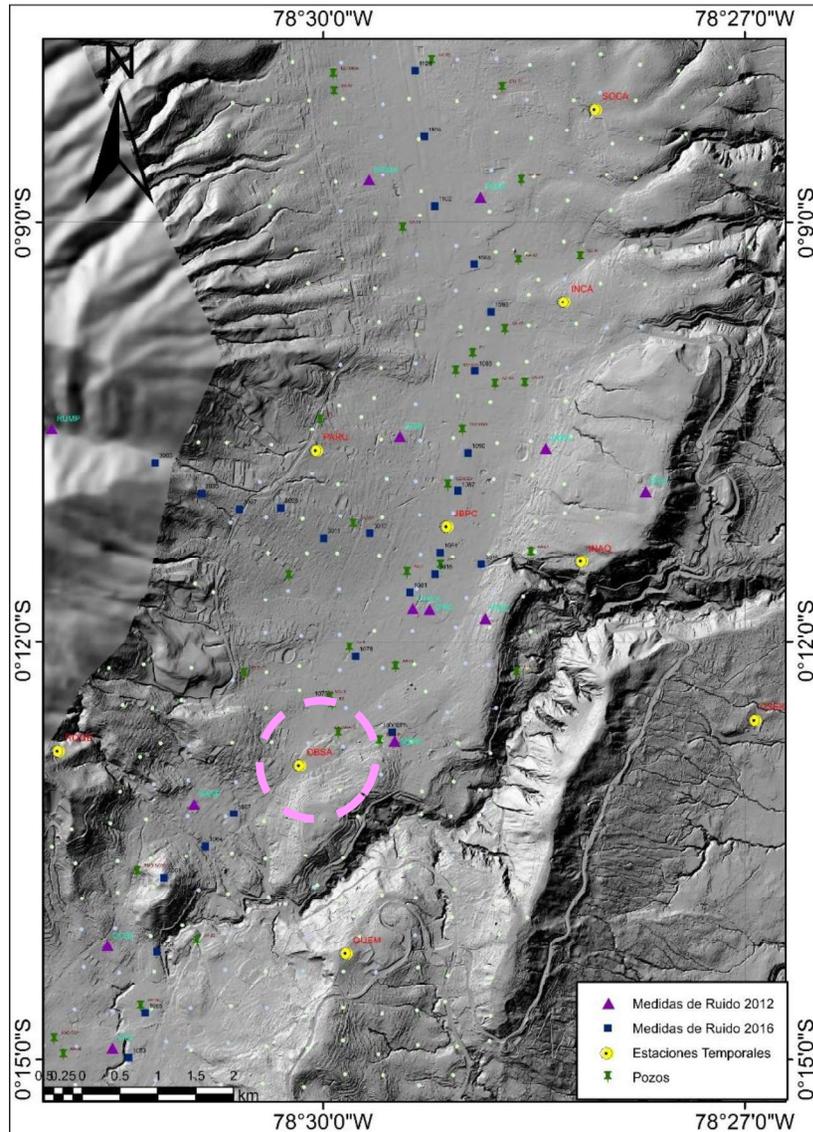
La estación SOCA se encuentra al noreste de la cuenca de Quito, esta exhibe un pico claro alrededor de 1 Hz este pico se puede ver solo en una de las estaciones de 2000 (línea azul más gruesa), ya que esta se encuentra a 70 metros de SOCA. Las otras estaciones están a más de 100 m y muestran un pico alrededor de 1.37 Hz, que estas dentro del rango de frecuencias en el norte de la ciudad, este cambio en el valor de la frecuencia puede deberse a que los sedimentos cuaternarios varían a cotas distancias. Un segundo pico H/V alrededor de 8 Hz se puede observar en las estaciones del año 2000, este estaría relacionado a contrastes de impedancia entre capas más superficiales o la estructura 2D y 3D de la cuenca.

PARU



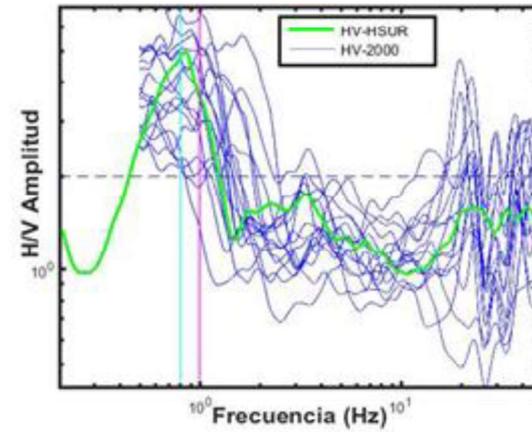
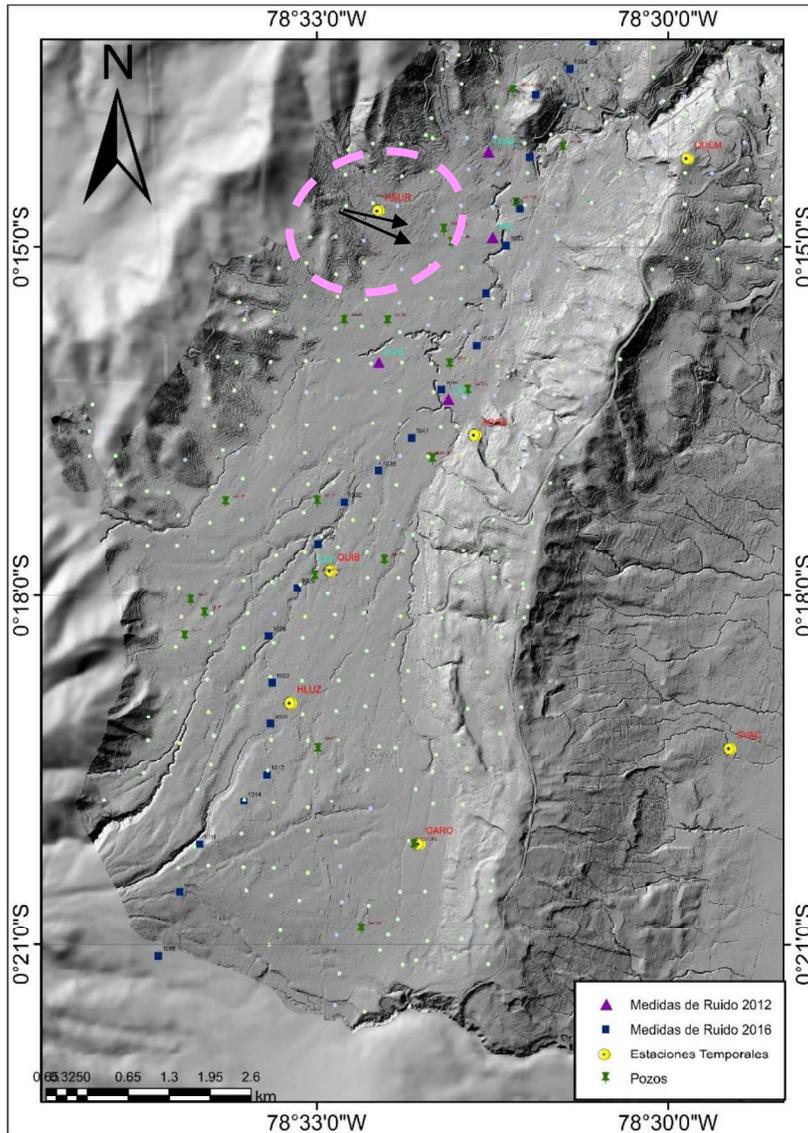
La estación PARU se encuentra al noroeste de la ciudad de Quito como se puede observar en el mapa. La curva H/V exhibe un pico alrededor a 1 Hz. En cuanto a los registros del año 2000 no se identificaron curvas similares a esta estación. A una distancia de 150 metros se encuentra el pozo P3, que a manera de ejemplo va a servir para interpretar el pico a 1 Hz. El pozo tiene una profundidad de 175 m en el cual se puede observar 120 m de sedimentos fluviales de la Fm. Cangahua sobre 55 m de flujos piroclásticos los cuales aparentemente serían más rígidos que los fluviales, esto ocasionaría un constante de impedancia entre las dos capas, para asegurar esta se necesitaría conocer la velocidad de onda S, de cada capa.

OBSA



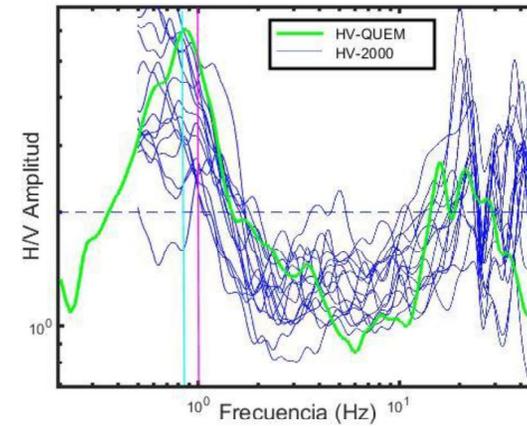
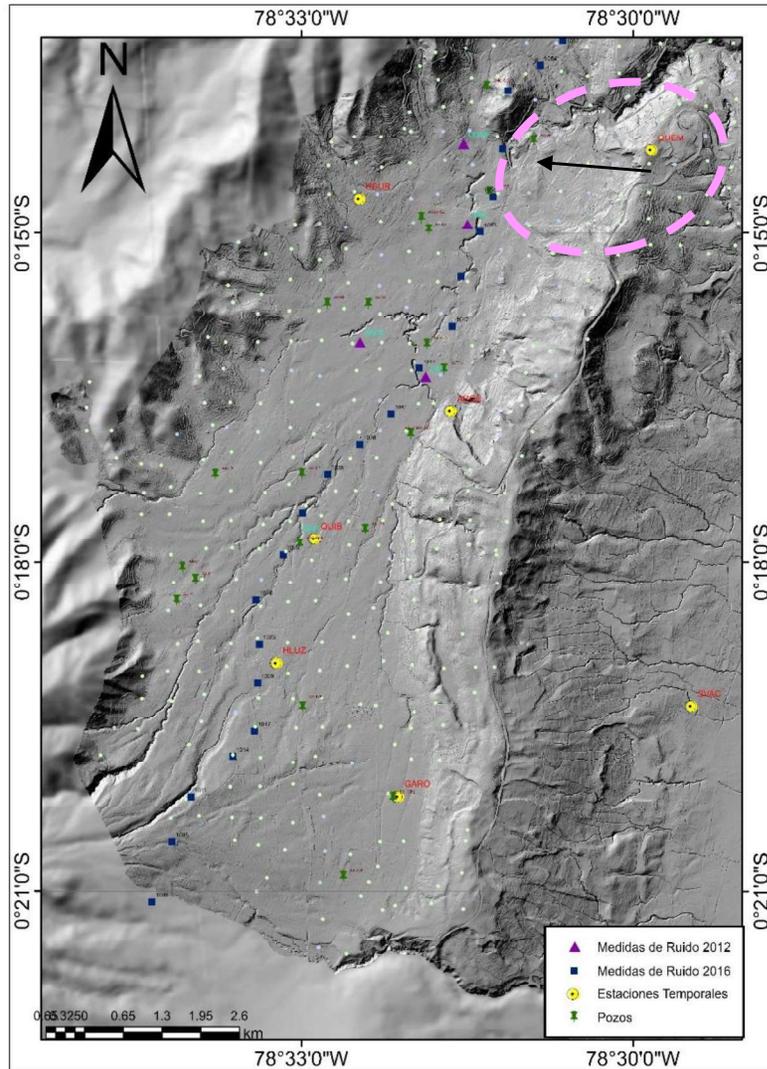
La estación OBSA se encuentra en el centro de la cuenca de Quito, como se puede ver en el mapa. La estación exhibe un pico H/V a 1 Hz, este pico también se lo puede ver en las estaciones del año 2000 las curvas H/V que rodean a esta estación son muy similares. Este pico 1 Hz estaría relacionado a con un fuerte contraste de impedancia entre las Fms. Cangahua y Machángara. De acuerdo con la información de pozos que se encuentran en esta zona es espesor de la de la Fm. Cangahua serías mayor a los 350 m lo que ocasionaría un fuerte contraste de impedancia entre las capas de las Fms. Cangahua y Machángara.

HSUR



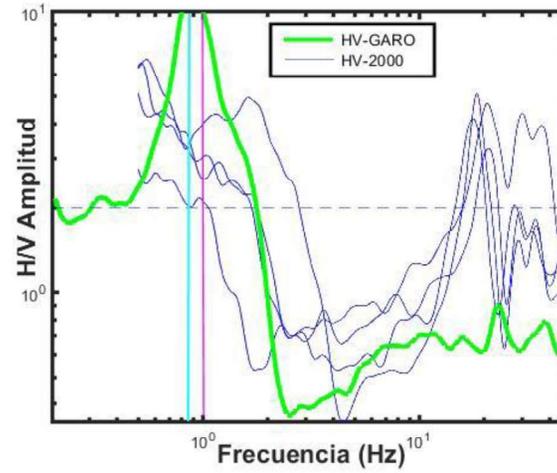
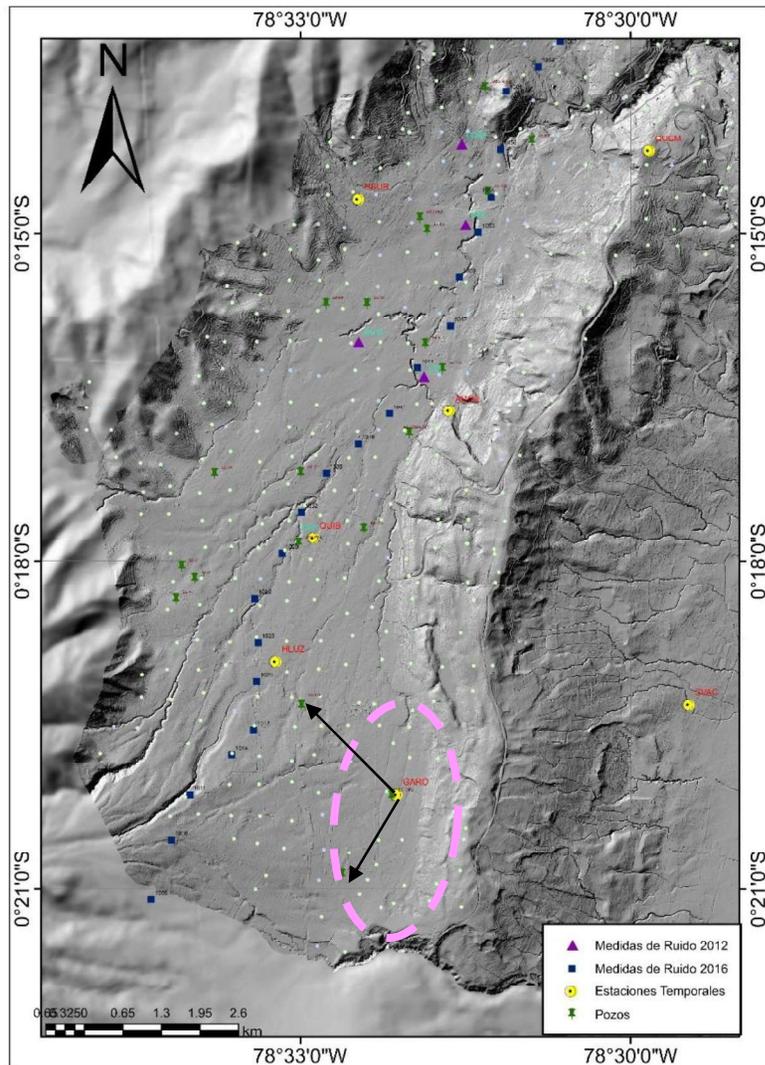
La estación HSUR se ubica en el borde suroeste de la cuenca de Quito, esta exhibe un pico claro a 0.84 Hz. En las curvas del año 2000 todas muestran una respuesta similar tanto en amplitud y frecuencia. El pico a 0.84 Hz indica un contraste de impedancia fuerte además de que las capas son más blandas y más potentes, y por eso se genera valores más bajos de frecuencia.

QUEM



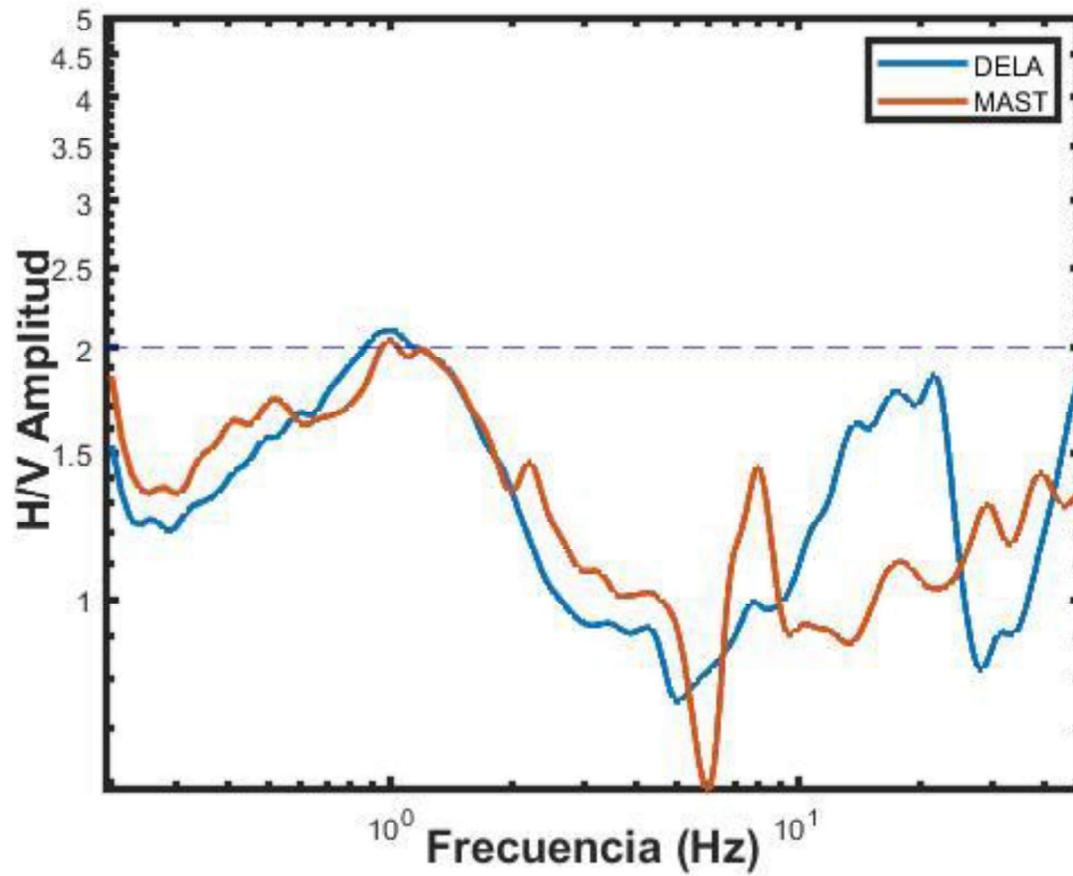
La estación QUEM, se encuentra al borde sureste de la cuenca de Quito, como se puede ver en el mapa. Esta estación muestra un pico claro a 0.87 Hz, las estaciones del año 2000 muestran bastante similitud con esta estación, tanto en frecuencia como en amplitud. Este valor indica que existe un fuerte contraste de impedancia entre los sedimentos de la cuenca y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado a 20 Hz, el cual estaría relacionado con a contrastes de impedancia más someros o la estructura 2D y 3D de la cuenca.

GARO

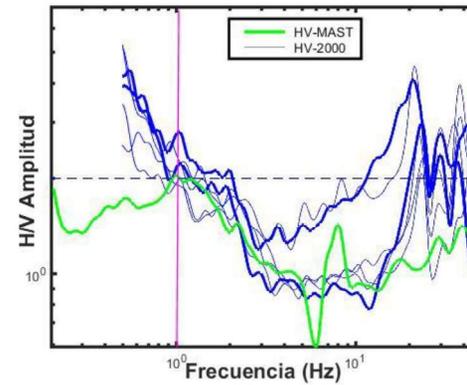
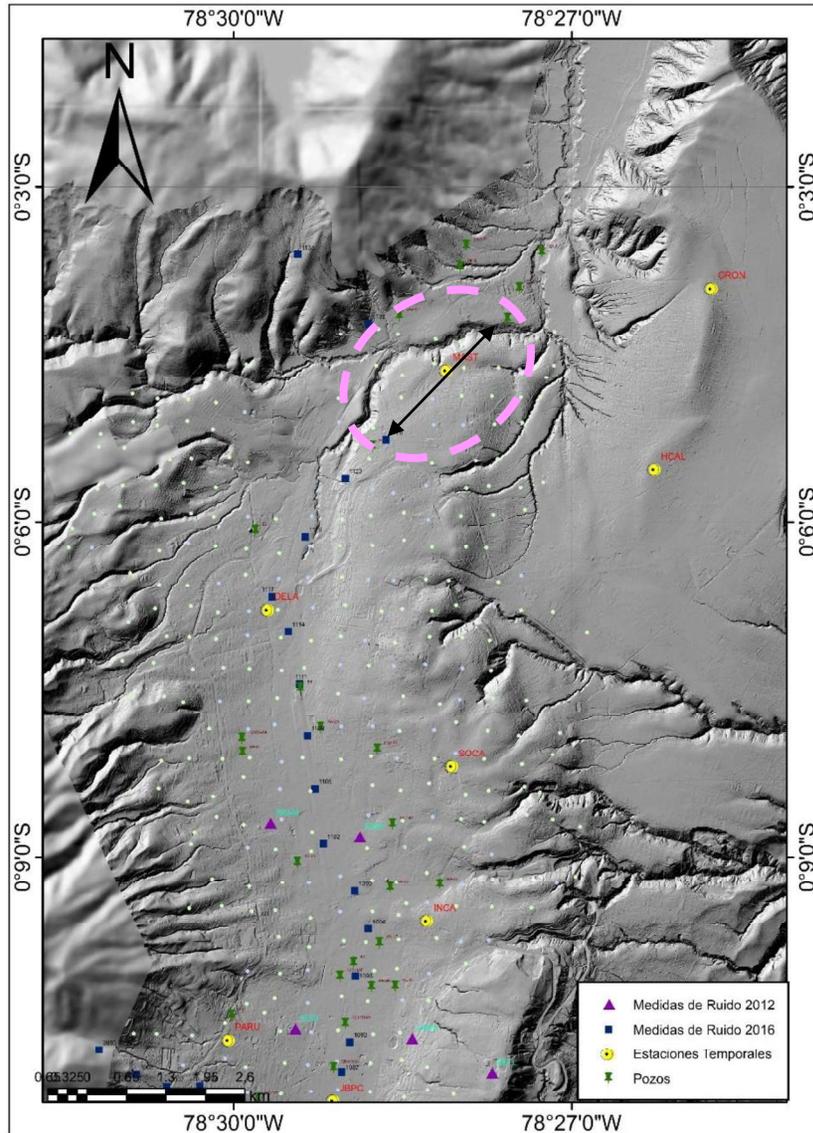


La estación GARO, presenta un pico claro, muy marcado a 0.89 Hz, la curvas del 2000, muestran una respuesta similar a frecuencia alrededor de 0.9 a 2 Hz. Las frecuencias más debajo de 1 Hz indican que existen potentes capas de sedimentos sobre rocas rígidas. Un segundo pico es observado en las estaciones del 2000 alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 3, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos.

Familia 2: Curvas H/V con un pico de amplitud igual a 2 a una frecuencia de 1 Hz.

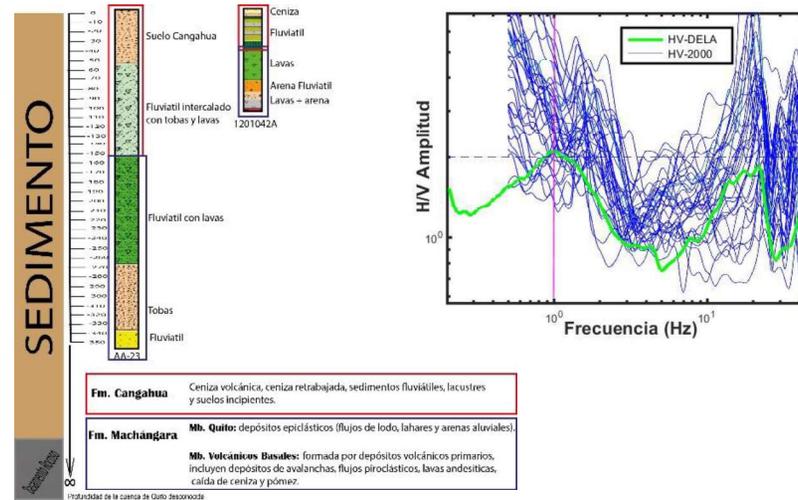
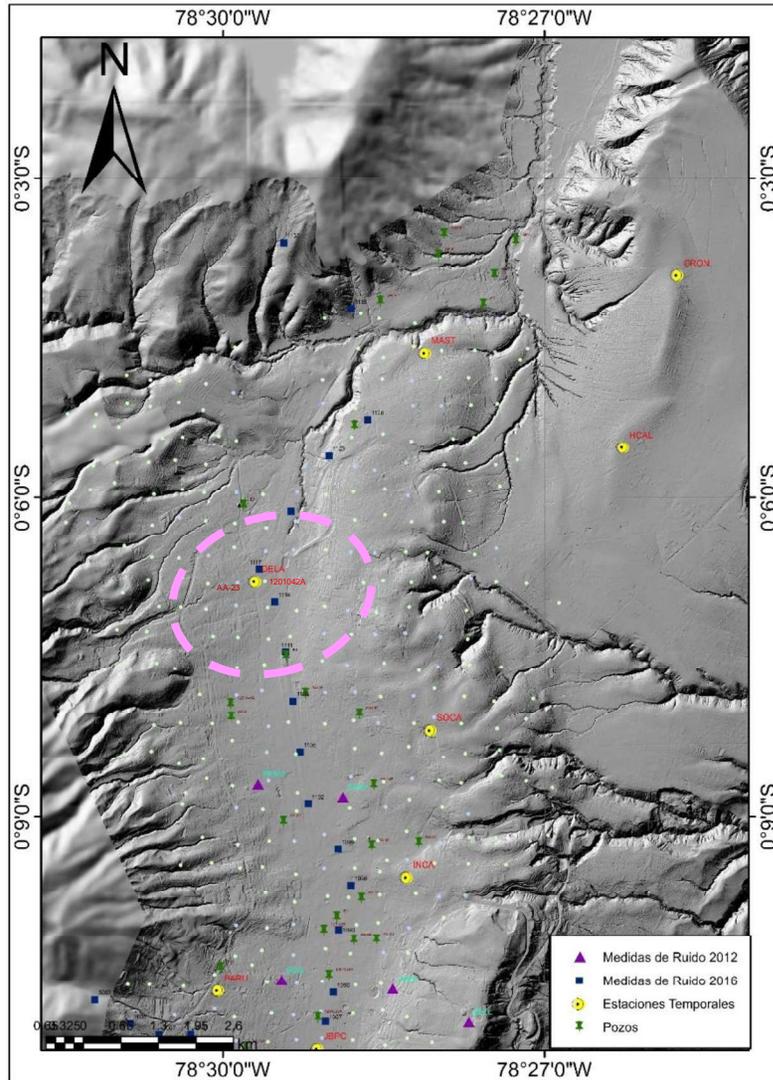


MAST



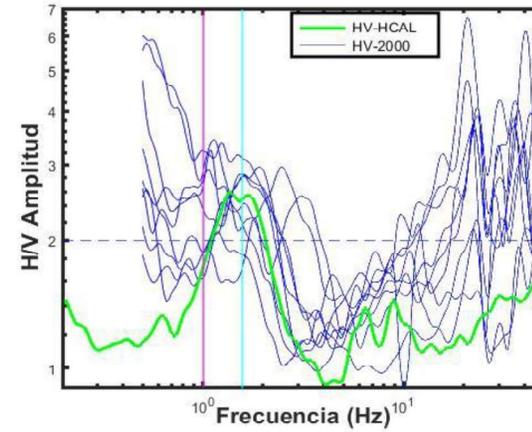
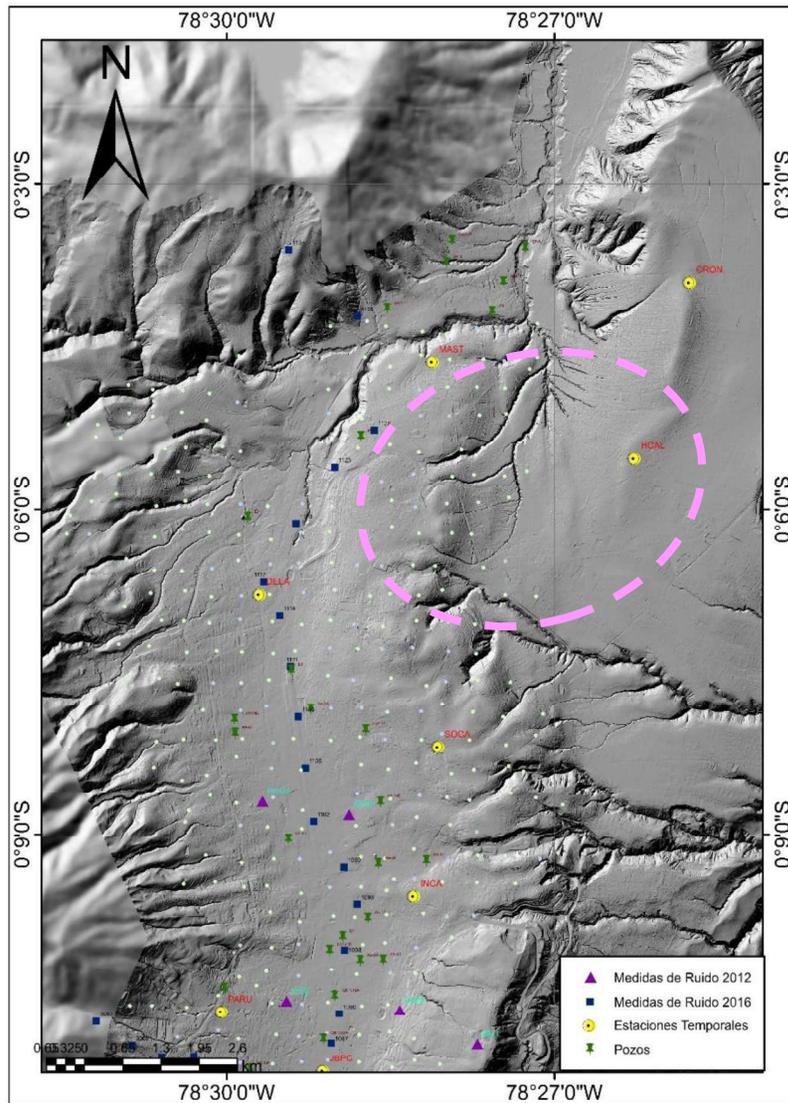
La estación MAST, no muestra un pico claro, exhibe un ancho de amplitud alrededor de 2 a 1 Hz. Entre las estaciones del año 2000 las curvas más similares son que se encuentran a una distancia de 60 m (líneas azules gruesas), las cuales tienen una amplitud mayor un poco más de 2 a 1 Hz de frecuencia. A un segundo pico H/V alrededor de 20 Hz se observa en las estaciones del año 2000.

DELA



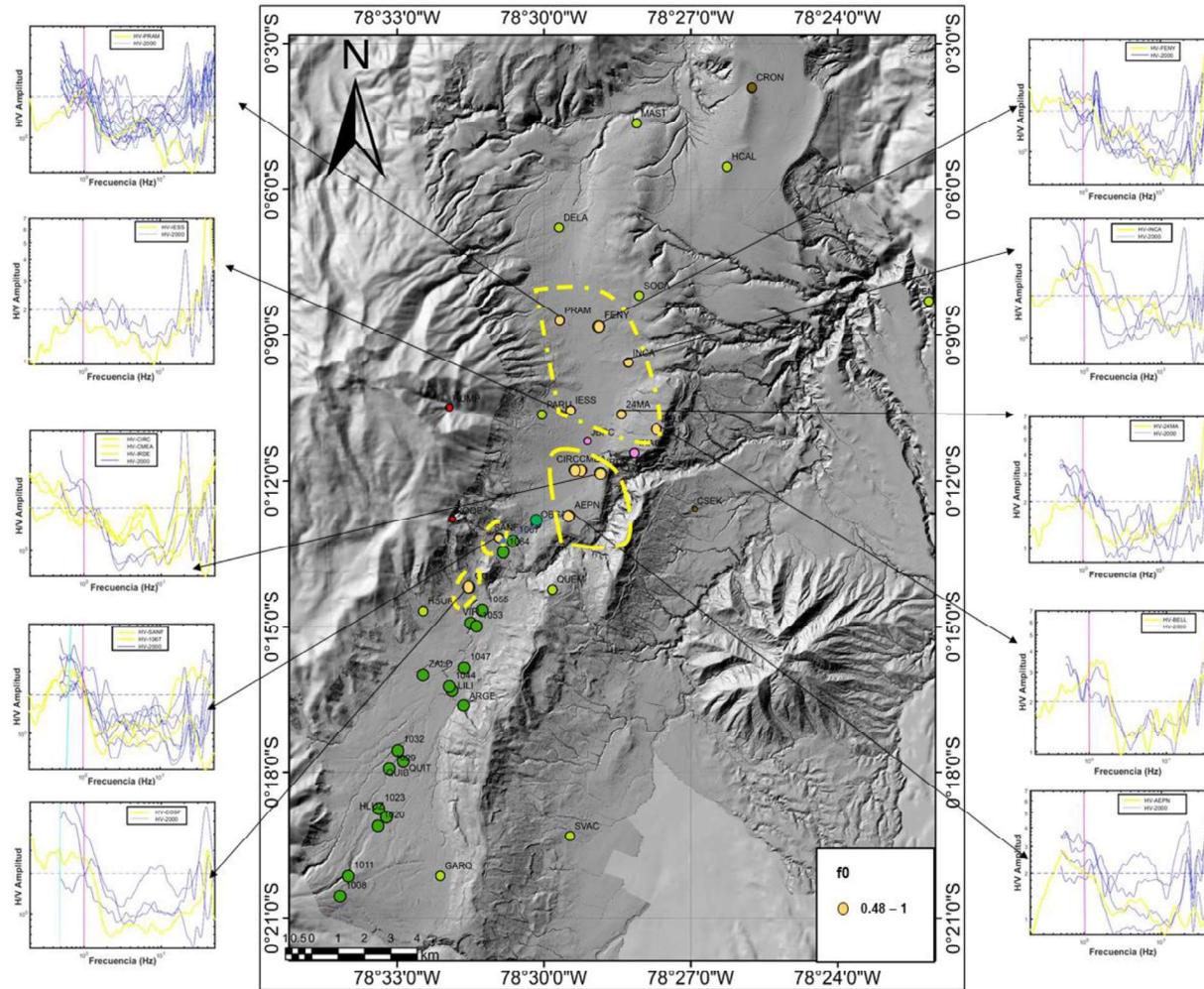
La estación DELA, muestra un pico claro de amplitud 2 a 1 Hz de frecuencia, las estaciones del 2000 muestran una respuesta similar estos puntos muestran amplitudes mayores a 3 a frecuencias entre 1 y 2 Hz. Un segundo pico alrededor de 20 Hz se observa en todas las estaciones. A manera de ejemplo se muestra la estratigrafía los cuales permiten una interpretación entre la geología del sitio y las curvas H/V de los puntos cerca. Los pozos AA-23 y 1201042 A se encuentran a una distancia de 70 y 10 m respectivamente de la estación DELA, en los cuales se observa cómo varían los sedimentos a cortas distancias de un sitio a otro además el pico a 1 Hz podría estar relacionado con un contraste de impedancia entre las Fms. Cangahua y Machángara, esto se puede observar en el pozo AA-23 en el cual se ve un cambio de formaciones a 150 m. El segundo pico estaría relacionado a un contraste de impedancia más somero entre las capas de la Fm. Cangahua o por la estructura 2D y 3D de la cuenca.

Familia 3: HCAL, Un pico claro a 1.37 Hz.



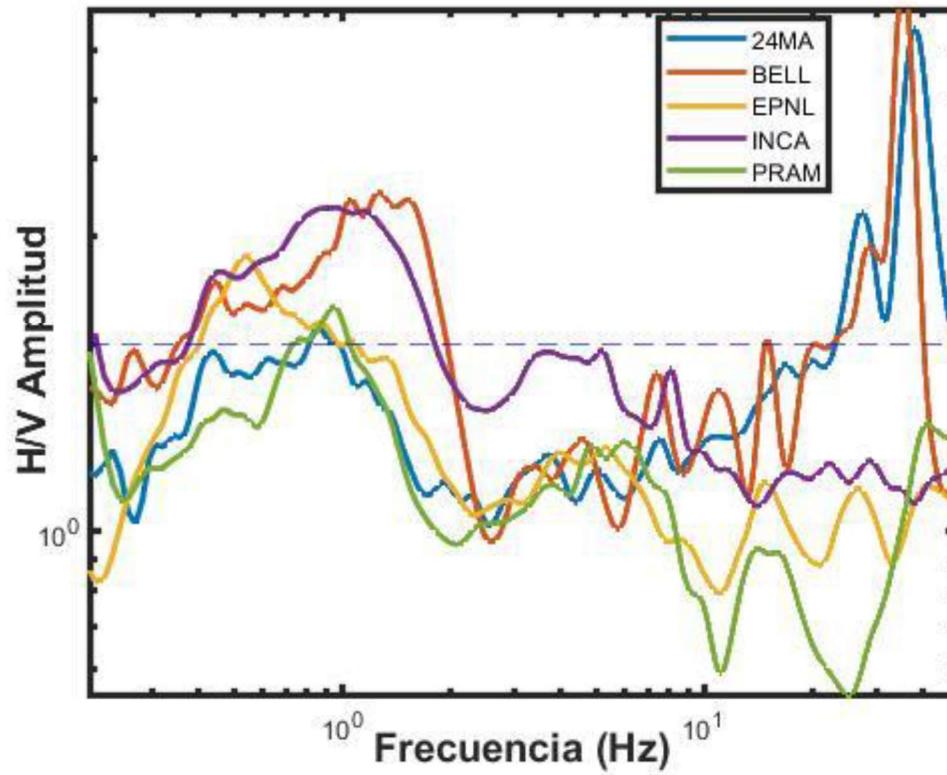
La estación HCAL, exhibe un pico claro a 1.37 Hz de amplitud mayor a 2, las estaciones de 2000 muestran una forma similar con picos H/V mayores a 2 entre 1.37 a 2 Hz. Cabe señalar que las estaciones del año 2000 se encuentran a una distancia de 3 Km de la estación HCAL. Un segundo pico es observado en las estaciones del 2000 alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 5, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos.

ZONA 3

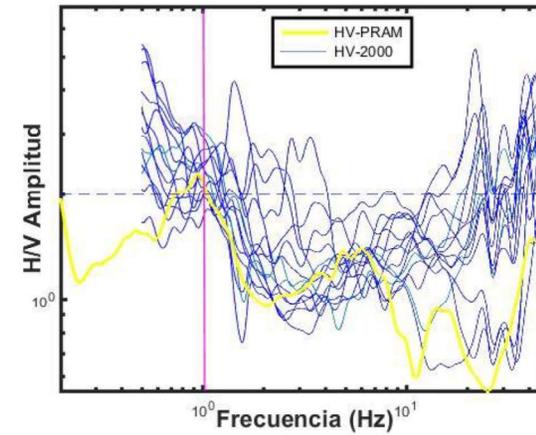
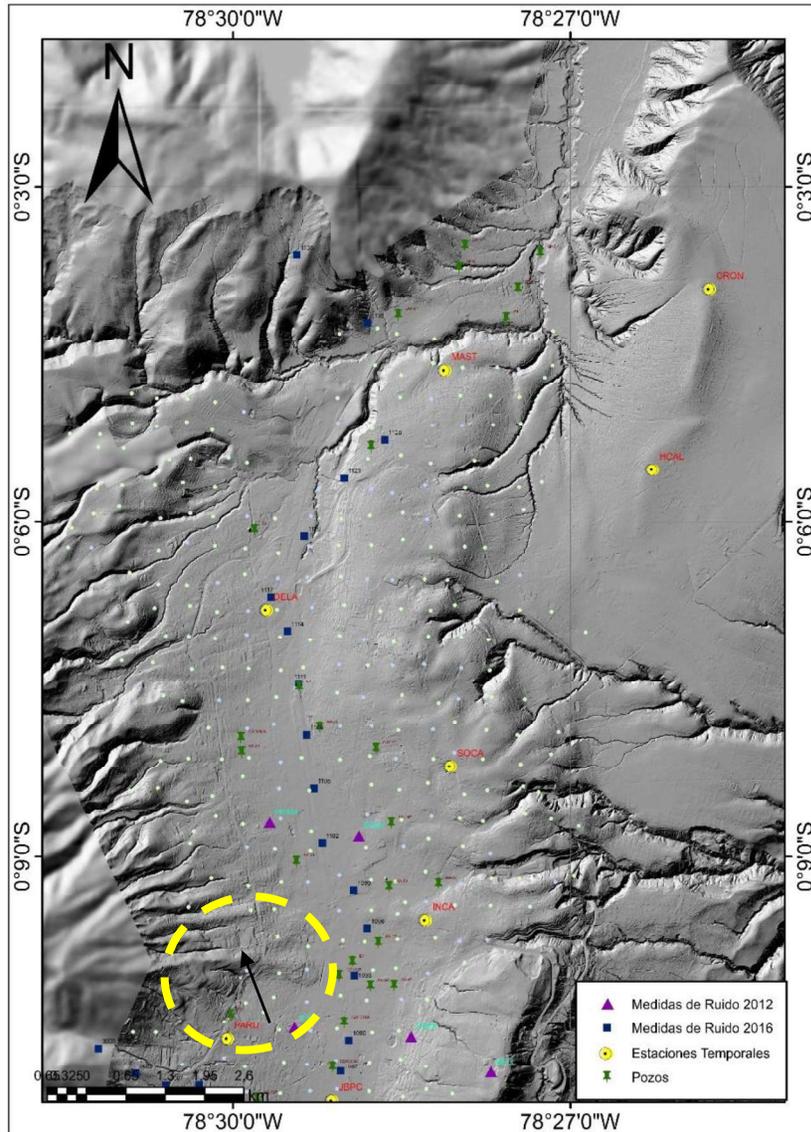


En esta zona se encuentran las curvas H/V que exhiben picos anchos entre 0.48 a 1.2 Hz. Las curvas azules representan las estaciones del año 2000 y las líneas amarillas representan las estaciones del año 2012 y estaciones temporales.

Familia 1: Curvas con picos anchos entre 0.5 a 2 Hz.

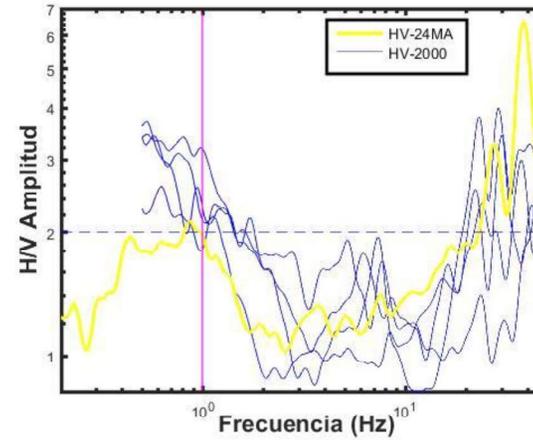
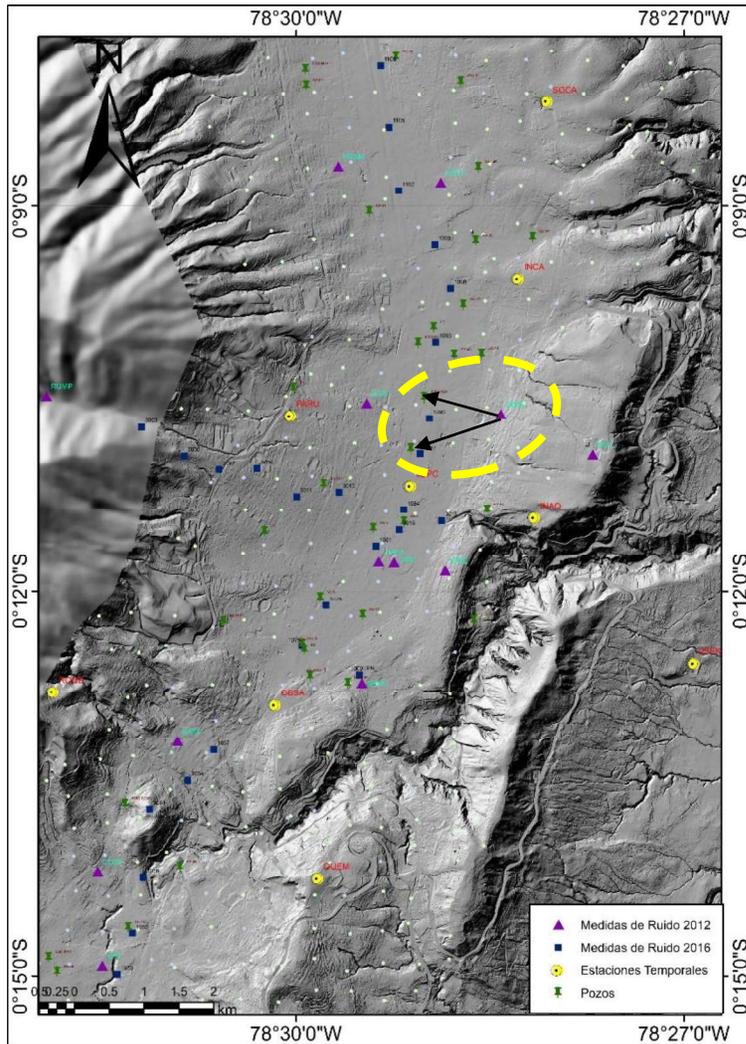


PRAM



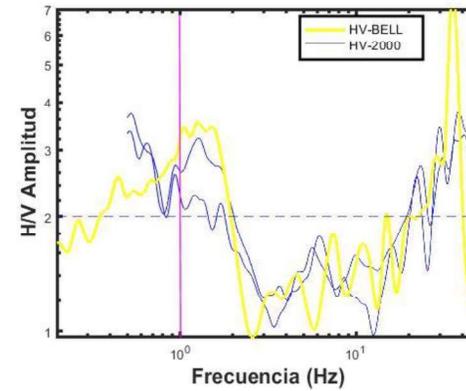
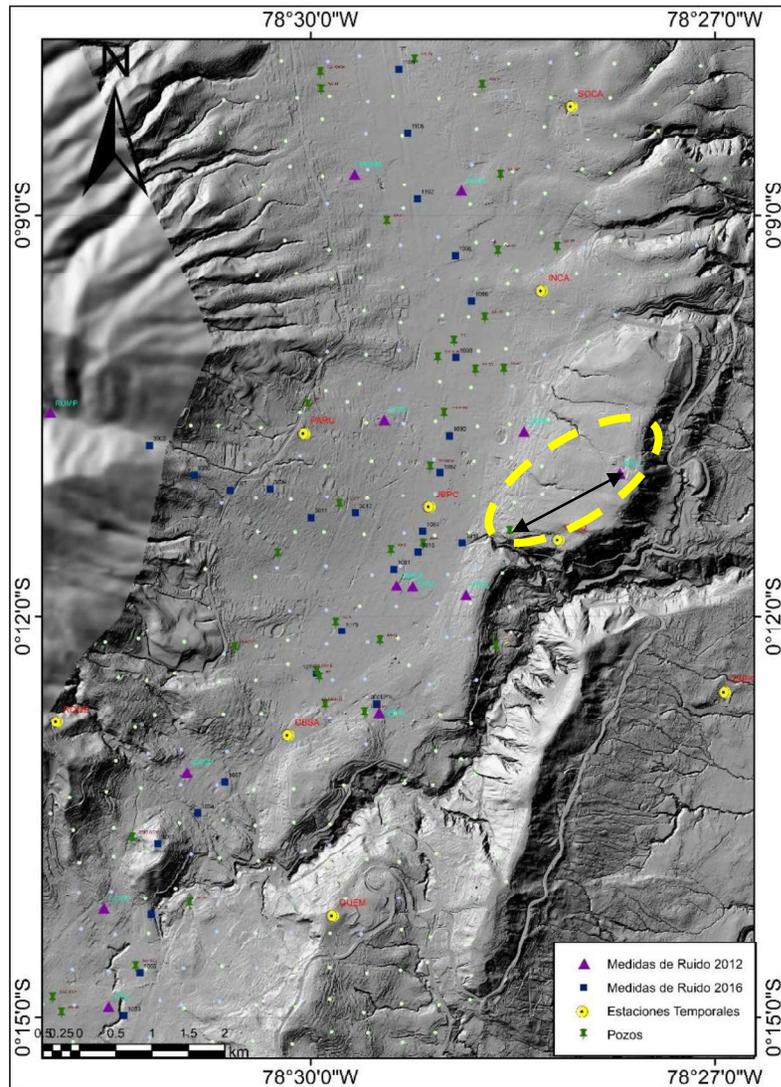
La estación PRAM, exhibe un pico ancho a 1 Hz de amplitud mayor a 2, las estaciones de 2000 muestran una forma similar con picos H/V mayores a 2 entre 1 a 2 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en las estaciones del 2000 alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 3, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos.

24MA



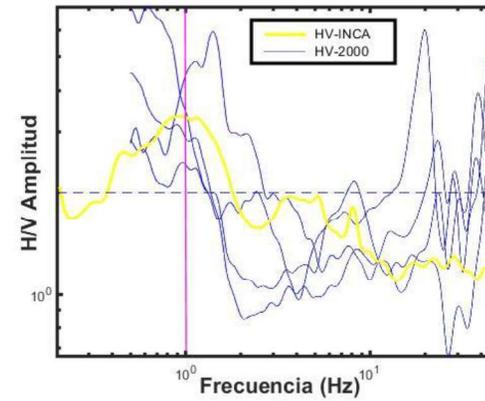
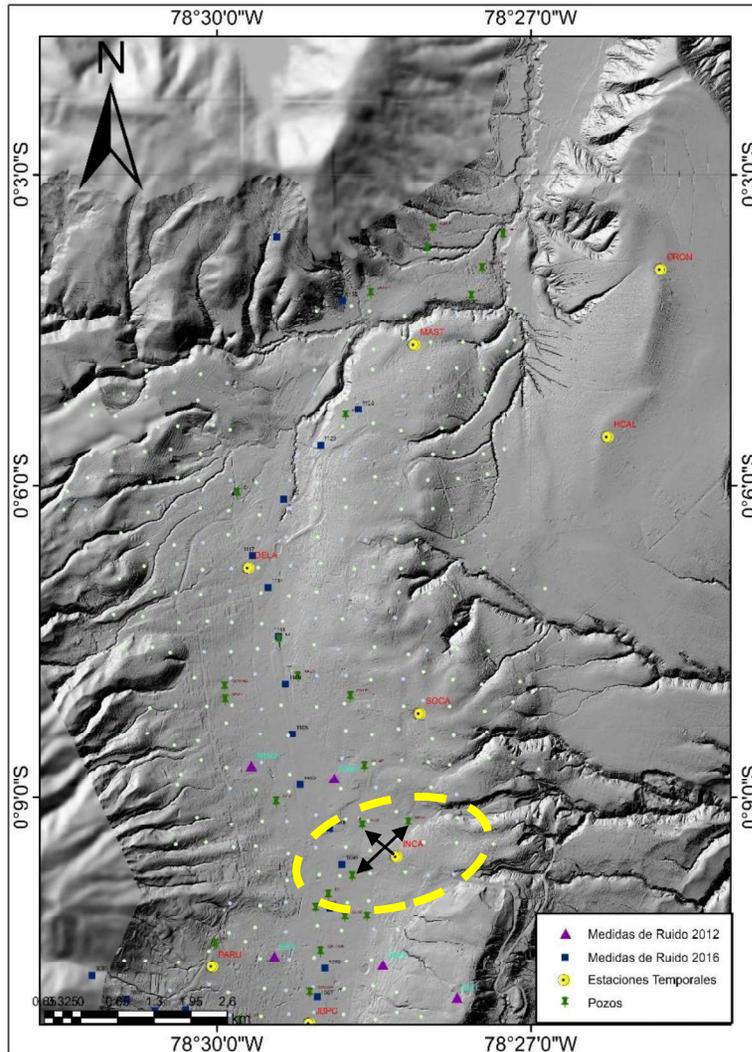
La estación 24MA, exhibe un pico ancho entre 0.2 a 1Hz obteniendo la mayor amplitud a 0.85 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar con picos H/V mayores a 2 entre 0.5 a 2 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en todas las estaciones alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 3, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos.

BELL



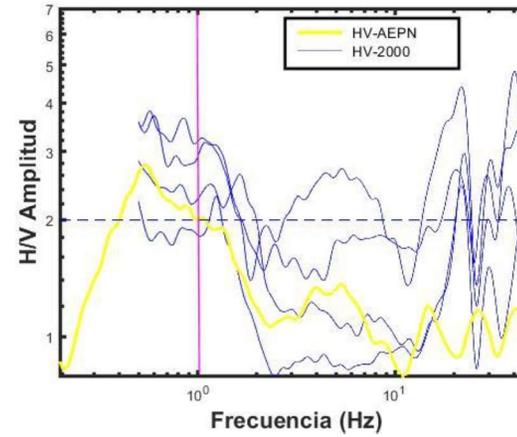
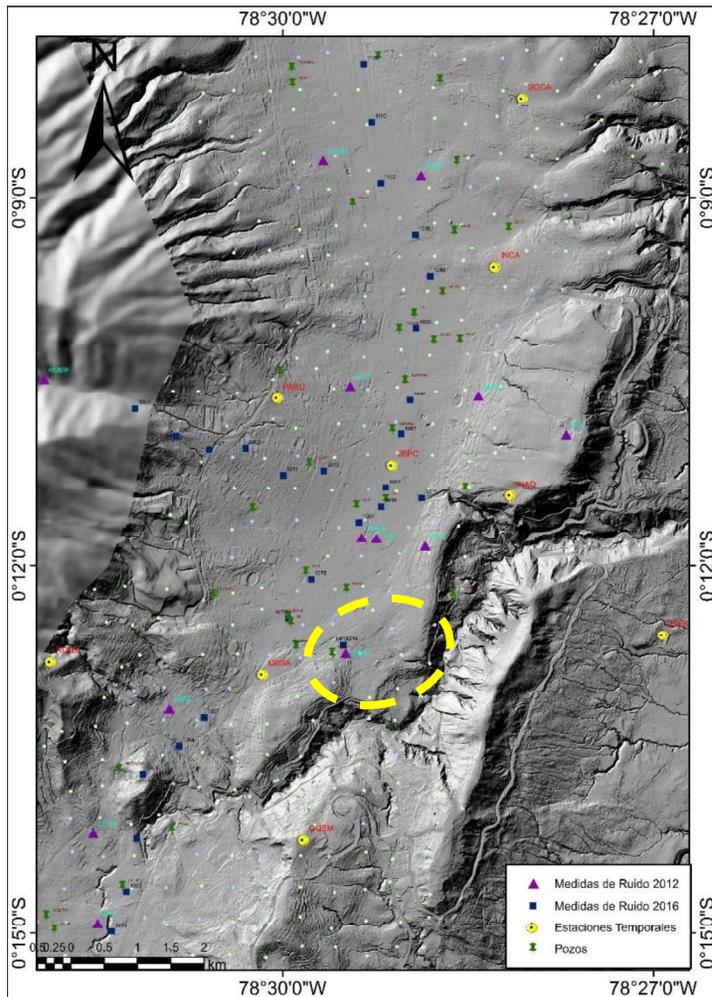
La estación BELL, exhibe un pico ancho entre 0.2 a 2 Hz obteniendo la mayor amplitud a 1.26 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar con picos H/V mayores a 2 entre 0.8 a 2 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en todas las estaciones alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 3, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos.

INCA



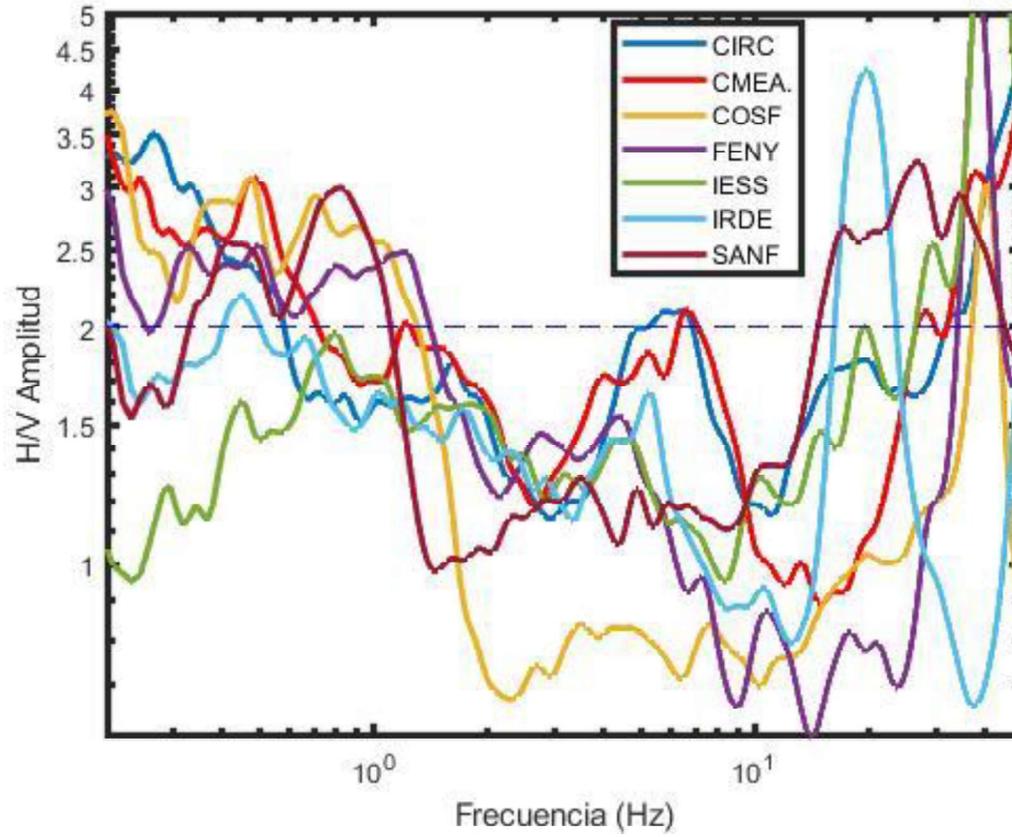
La estación INCA, exhibe un pico ancho entre 0.2 a 2Hz obteniendo la mayor amplitud a 1 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar con picos H/V mayores a 2 entre 0.8 a 2 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en todas las estaciones del 2000 alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 3, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos.

AEPN

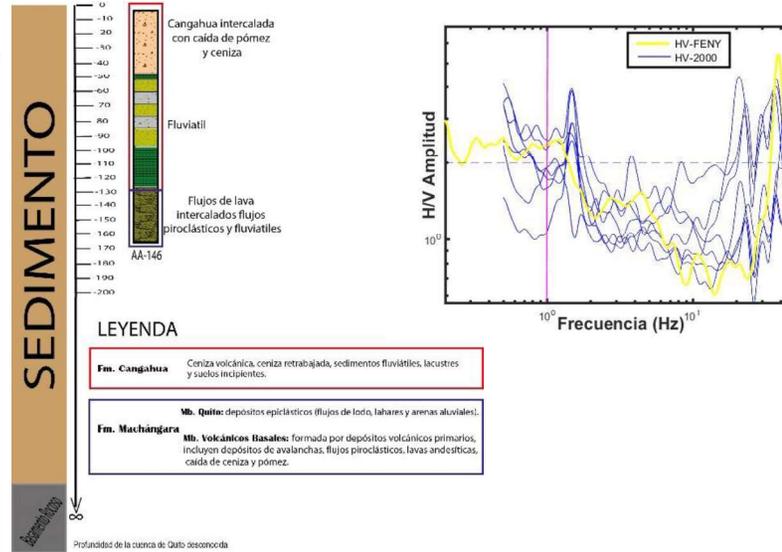
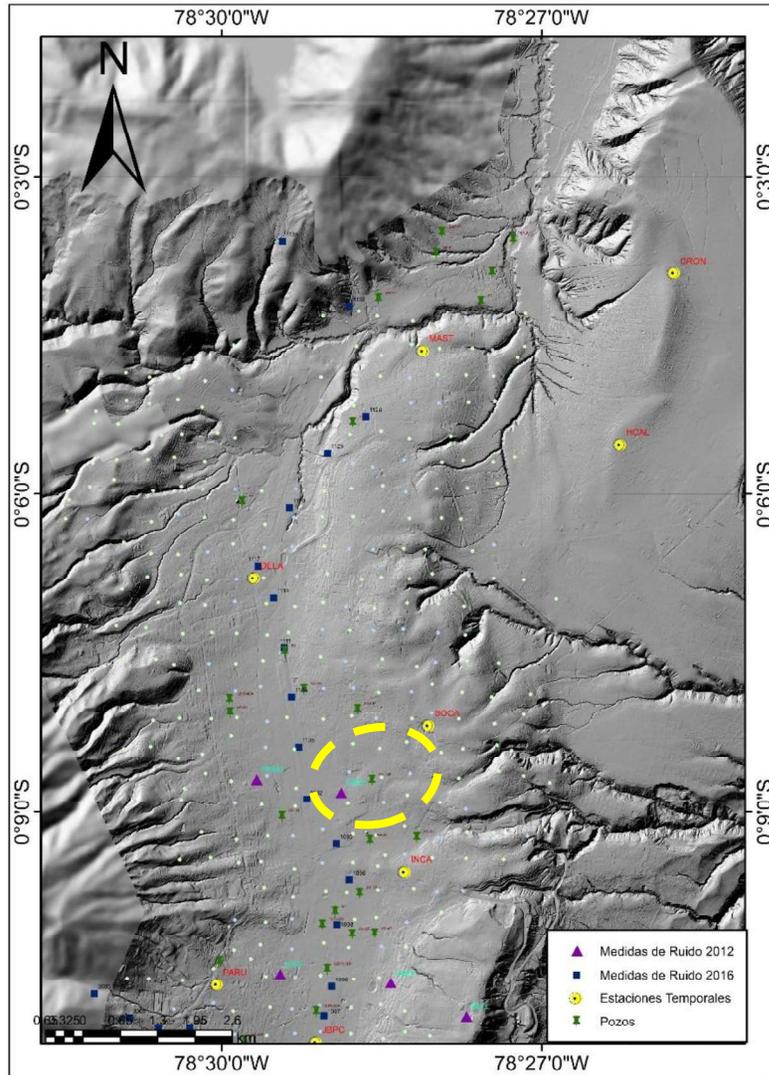


La estación AEPN, exhibe un pico ancho entre 0.2 a 2Hz obteniendo la mayor amplitud a 0.54 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar con picos H/V mayores a 2 entre 0.5 a 2 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en todas las estaciones alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 2, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos.

Familia 2: Curvas con picos anchos entre 0.26 a 1 Hz.

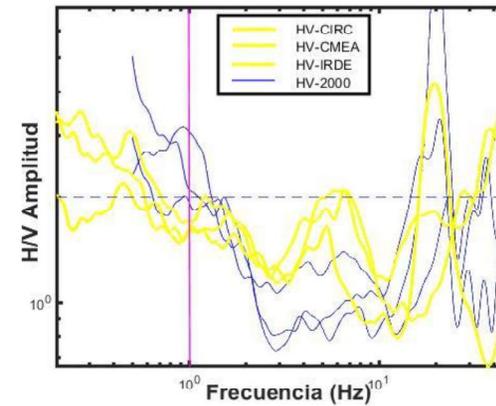
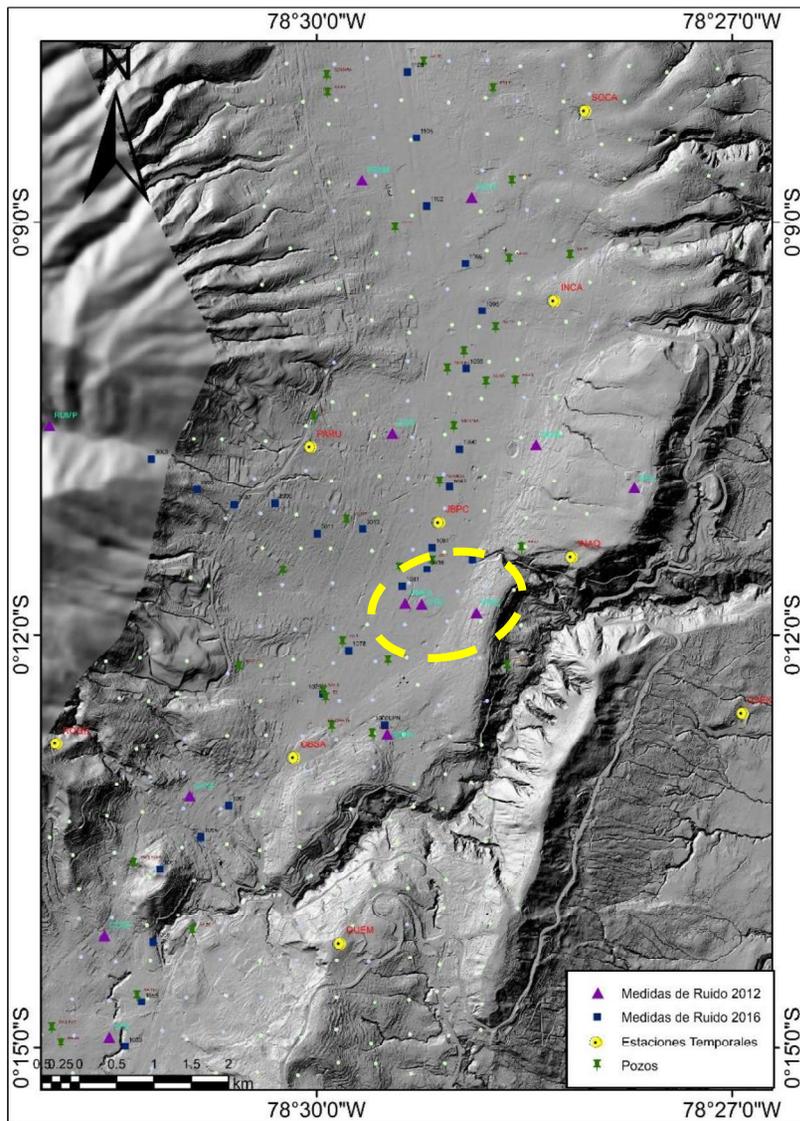


FENY



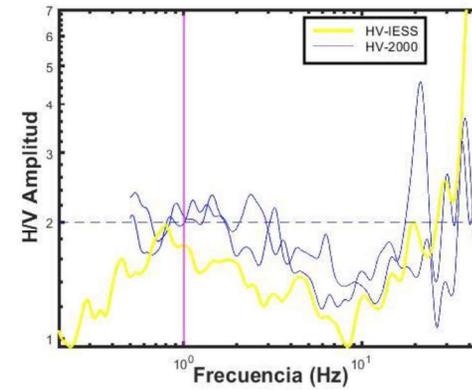
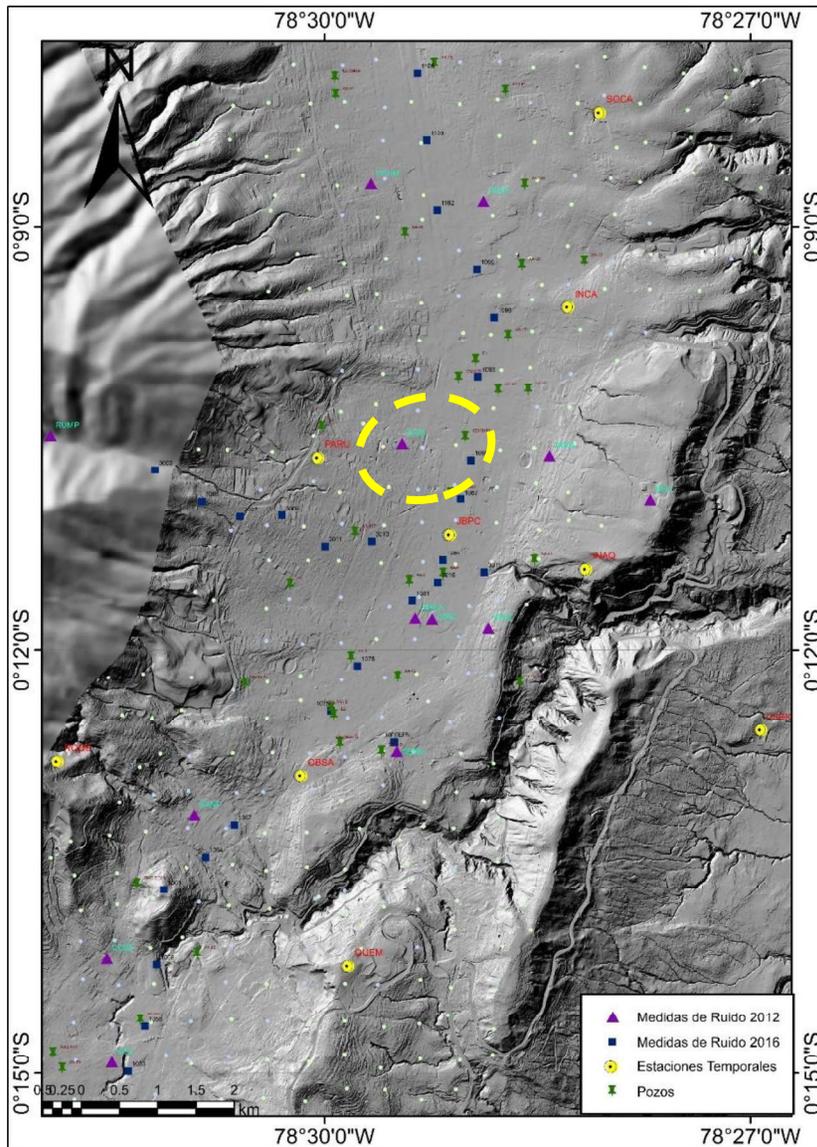
La estación FENY, exhibe un pico ancho entre 0.2 a 1 Hz obteniendo la mayor amplitud a 0.5 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma un poco similar con picos H/V mayores a 2 entre 0.5 a 1.4 Hz obteniendo su mayor amplitud a 1.37 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en todas las estaciones alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 2, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos.

CIRC-CMEA-IRDE



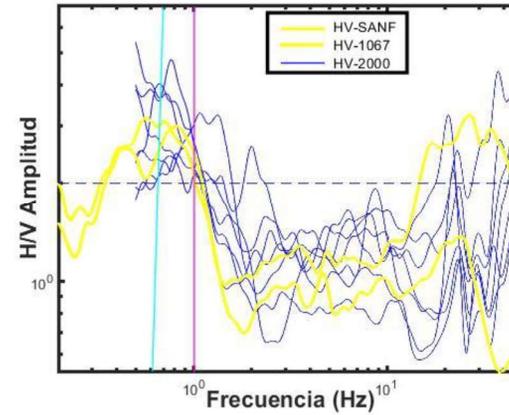
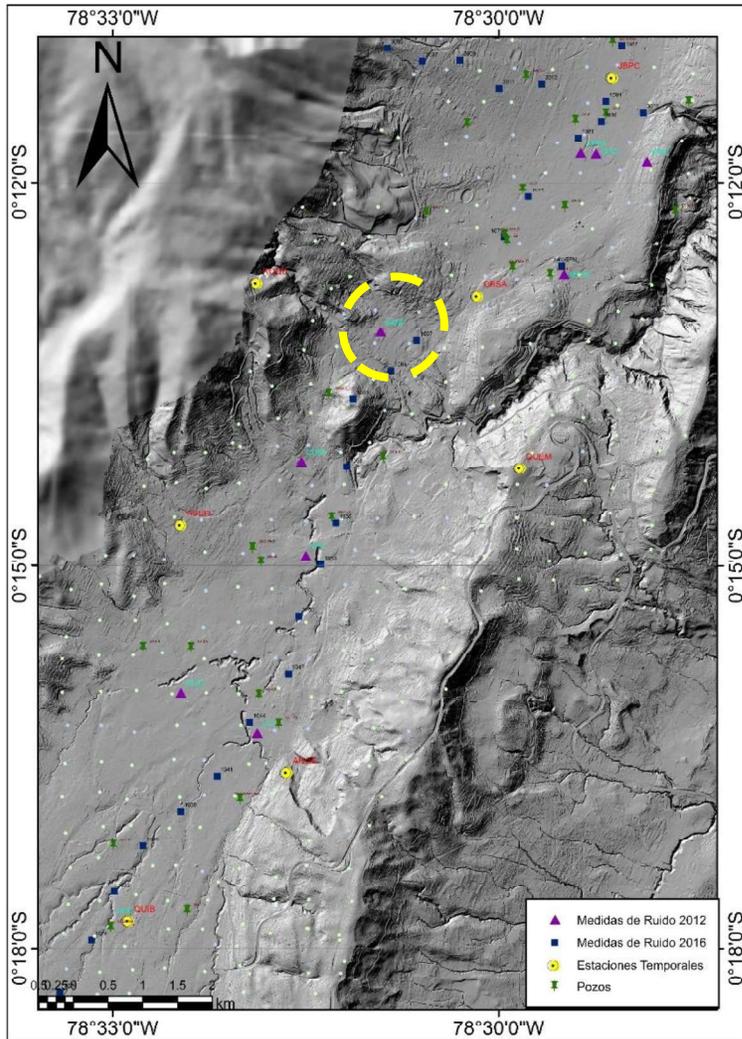
Las estaciones CIRC, CMEA e IRDE, exhibe un pico ancho entre 0.26 a 1 Hz obteniendo la mayor amplitud a para CIRC a 0.27 Hz y para CMEA e IRDE alrededor de 0.5 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma un poco similar con picos H/V mayores a 2 entre 0.5 a 1 Hz obteniendo su mayor amplitud a 1 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en las estaciones CIRC, CMEA e IRDE alrededor de 5 Hz de amplitud mayor a 2, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos al igual que el tercer pico a 20 Hz.

IESS



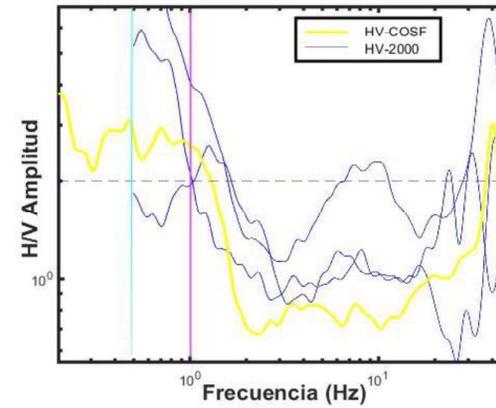
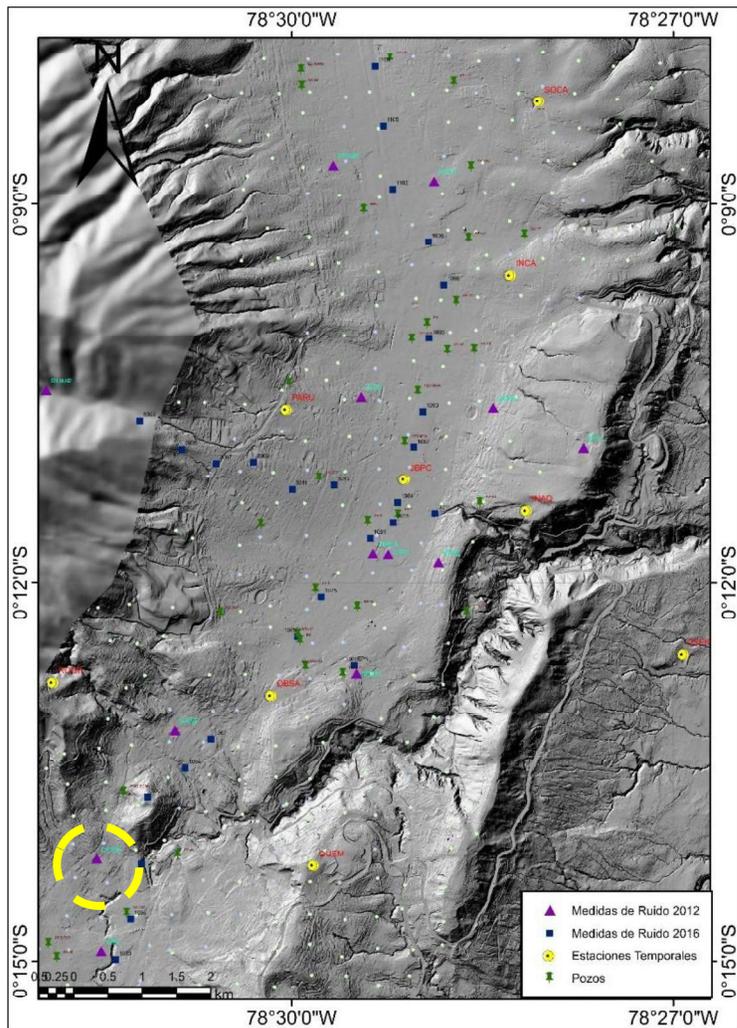
Las estaciones IESS, exhibe un pico ancho, obteniendo la mayor amplitud alrededor de 0.8 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar con picos H/V de amplitud mayor a 2 obteniendo su mayor amplitud a 1 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en todas las estaciones alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 2, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos al igual que el tercer pico a 20 Hz.

SANF



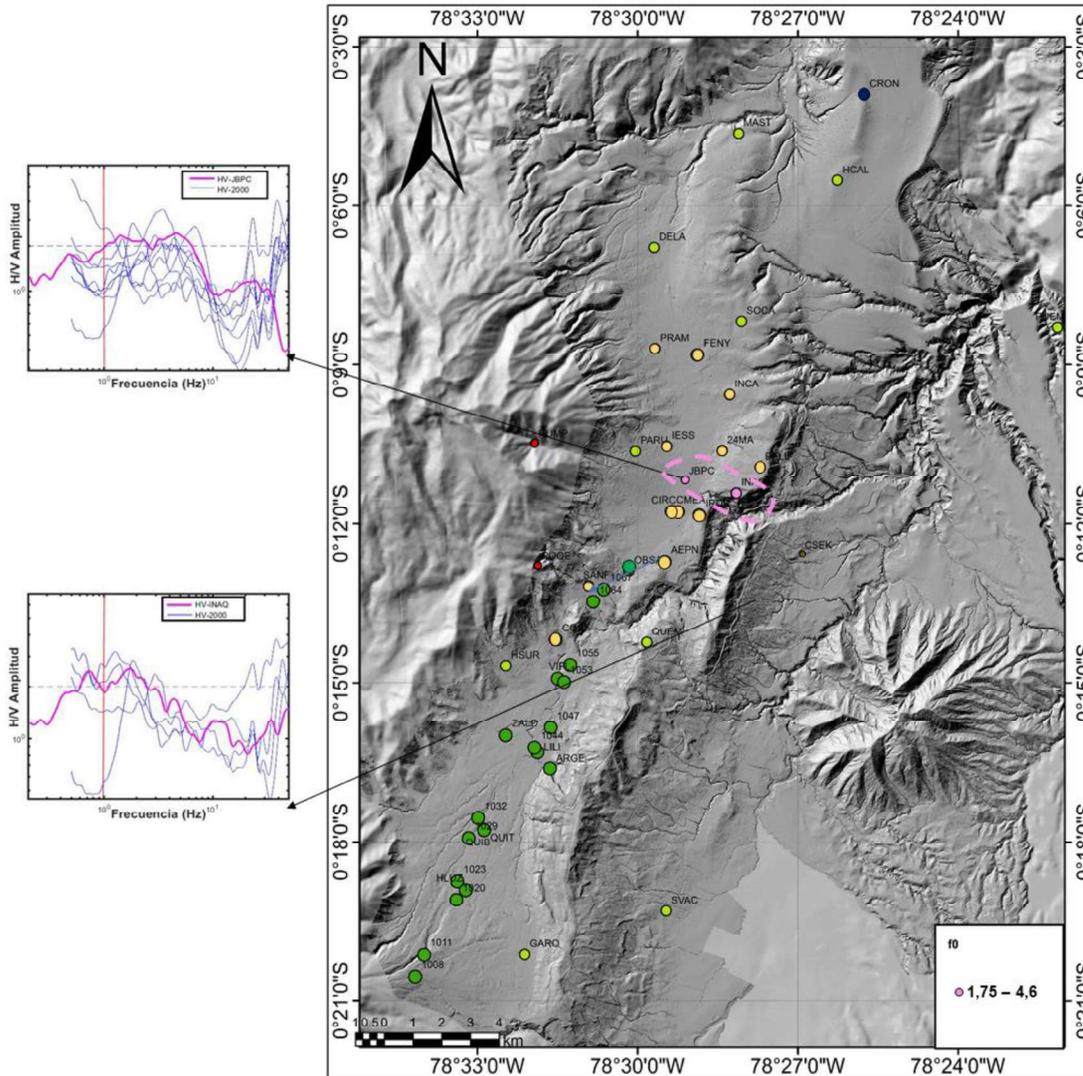
Las estaciones SANF y 1067, exhibe un pico ancho entre 0.2 a 1 Hz, obteniendo la mayor amplitud alrededor de 0.82 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar con picos H/V de amplitud mayor a 2 a frecuencias entre 0.5 a 1 Hz, obteniendo su mayor amplitud a 0.55 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en todas las estaciones alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 2, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos al igual que el tercer pico a 20 Hz.

COSF



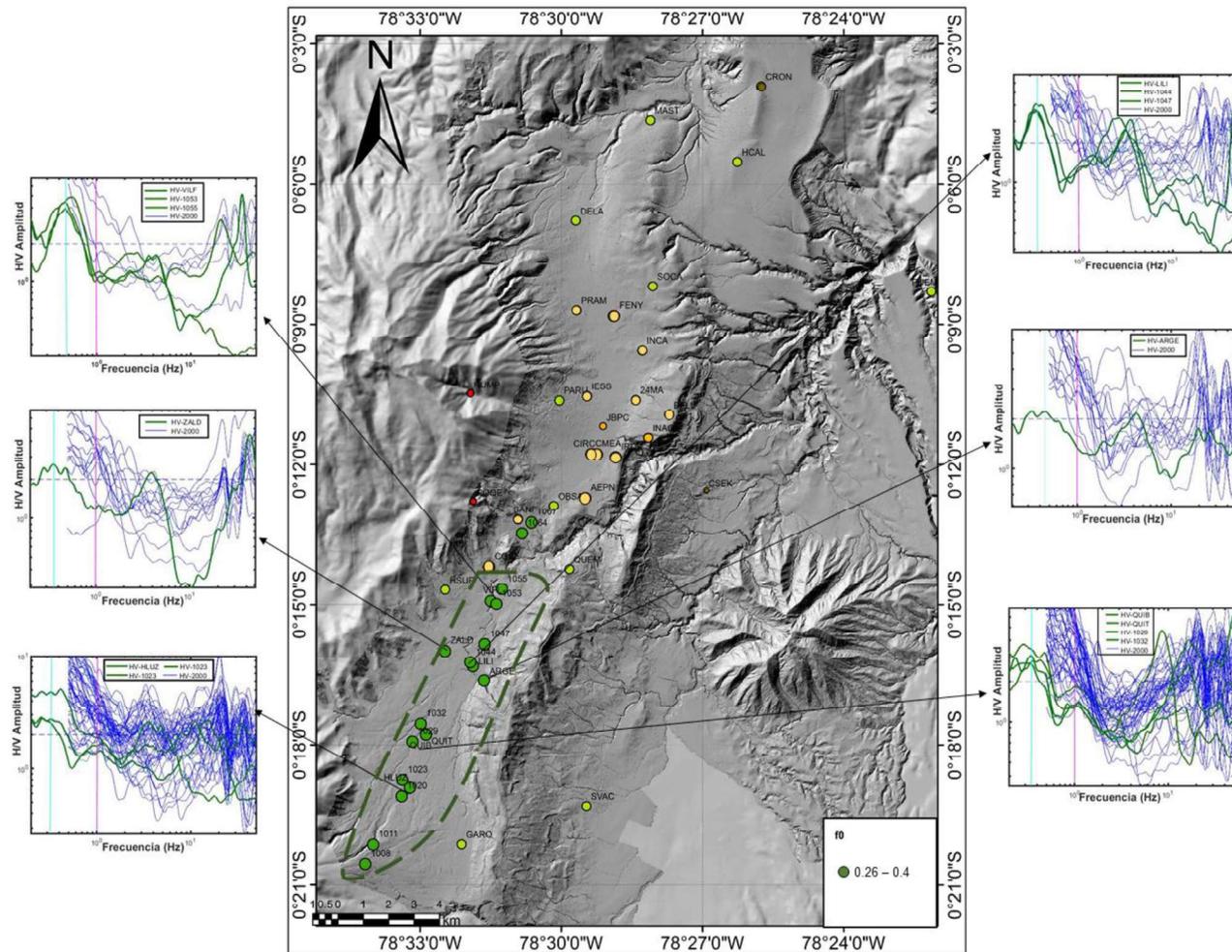
La estación COSF, exhibe un pico ancho entre 0.2 a 1 Hz, obteniendo la mayor amplitud alrededor de 0.48 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma un poco similar con picos H/V de amplitud mayor a 2 a frecuencias entre 0.5 a 2 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en todas las estaciones alrededor de 40 Hz de amplitud mayor a 2, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos.

Zona 4: Curvas con picos anchos a 1.75 a 4 Hz



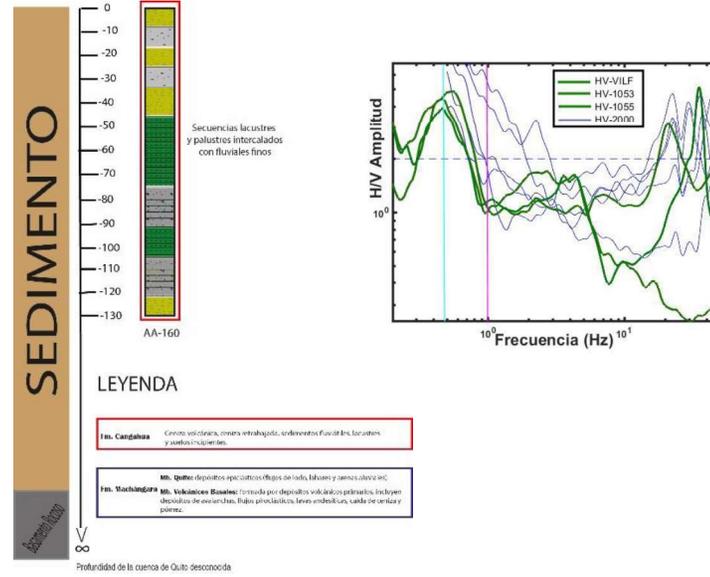
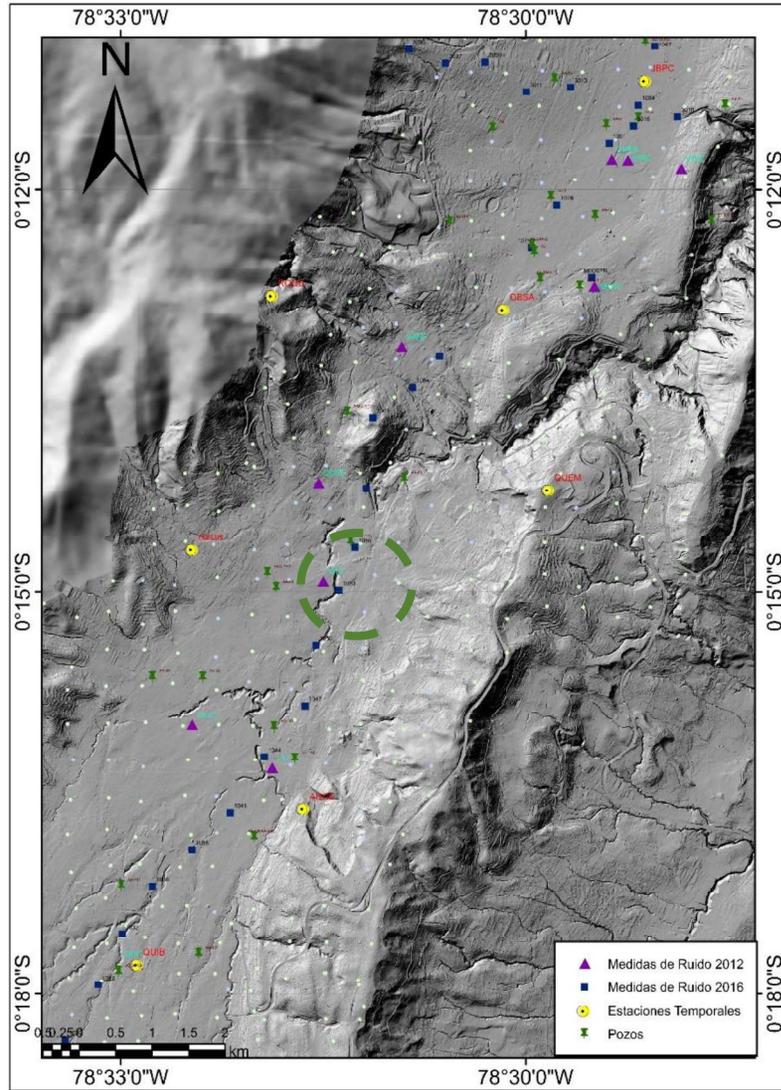
Las estaciones JBPC e INAQ, exhiben un pico ancho entre 0.2 a 10 Hz, obteniendo la mayor amplitud alrededor de 1.75 y 4 Hz, para INAQ y JBPC respectivamente. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar con picos H/V de amplitud mayor a 2 a frecuencias entre 0.8 a 10 Hz. Los cuales estarían relacionados con la estructura 2D y 3D.

ZONA 5



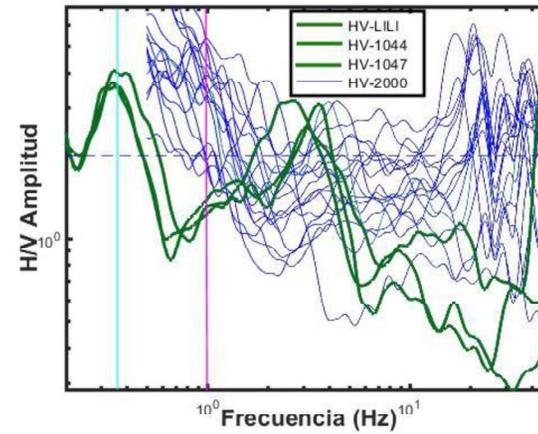
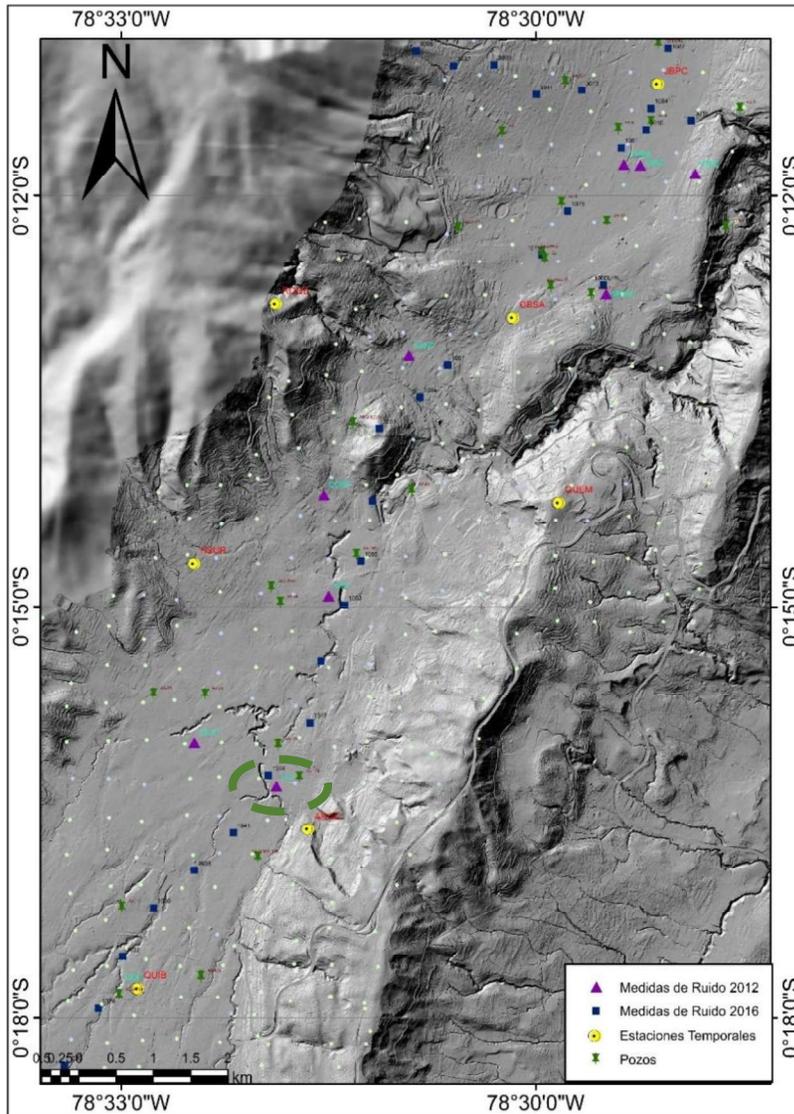
En esta zona se encuentran curvas H/V con picos a frecuencias mayores a 0,5 Hz. Las líneas azules representan las estaciones del año 2000 y las verdes oscuras representan las estaciones de los años 2012, 2016 y estaciones temporales.

VILF



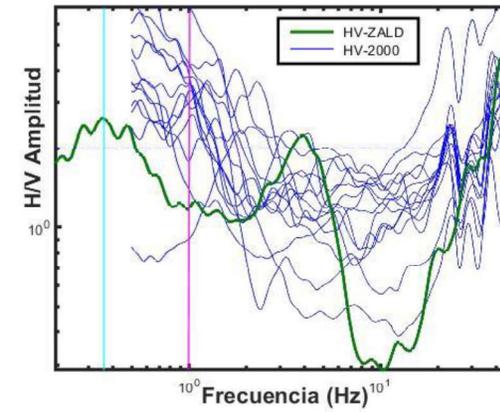
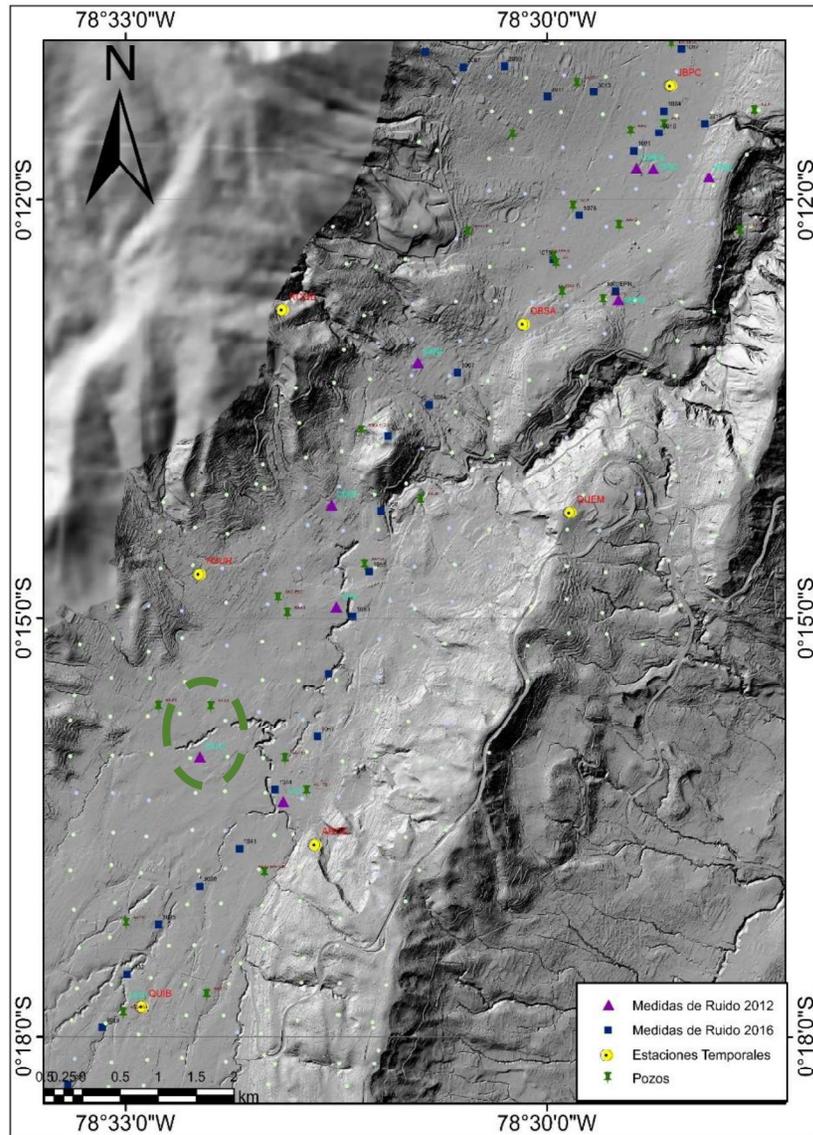
Las estaciones VILF, 1053 y 1055, exhibe un pico claro 0.48 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar con picos H/V de amplitud mayor a 2 0.5 a 0.8 Hz, los cuales indican contrastes de impedancia muy fuertes y profundos entre los sedimentos y el basamento rocoso. Un segundo pico es observado en todas las estaciones alrededor de 20 Hz de amplitud mayor a 2, este podría estar relacionado con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos.

LILI



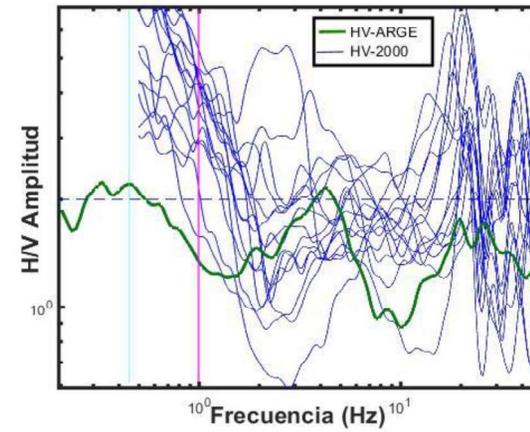
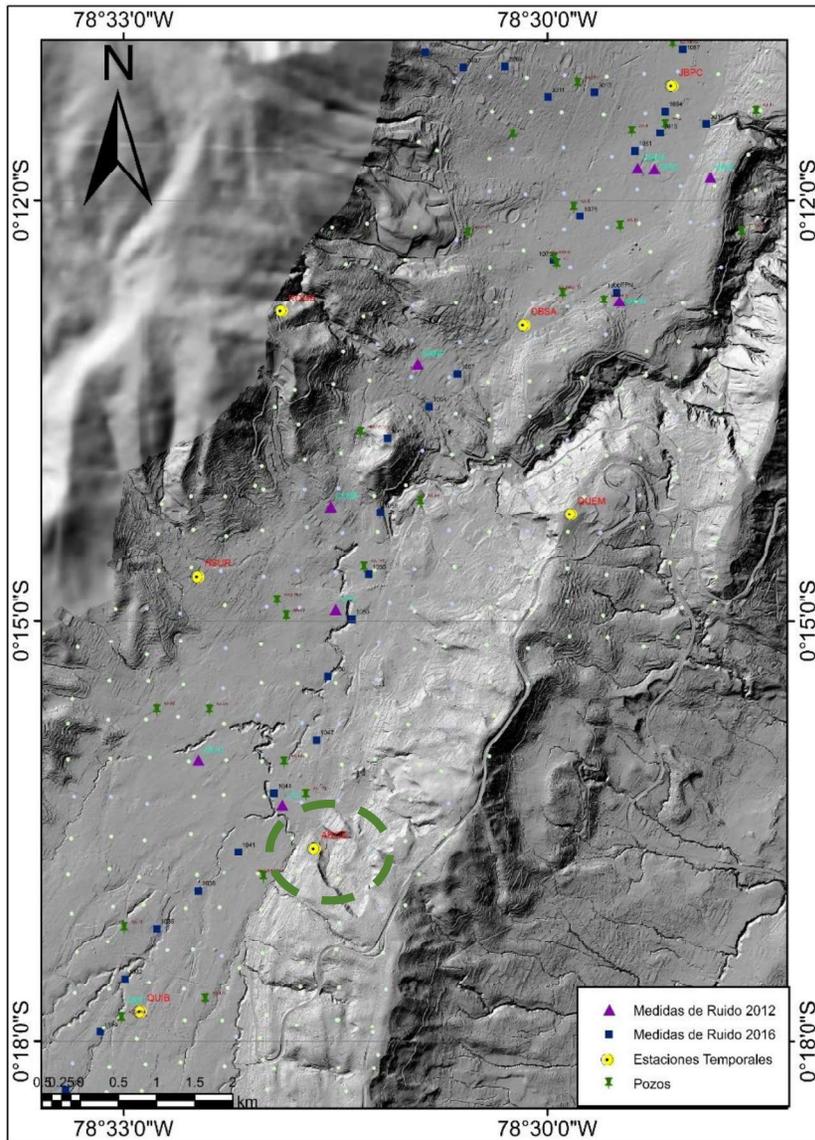
Las estaciones LILI, 1044 y 1047, exhibe un pico claro 0.35 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar, pero para los picos que se encuentran alrededor de 3 Hz de amplitud mayor a 2, los cuales podrían estar relacionados con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos al igual que el tercer pico a 20 Hz.

ZALD



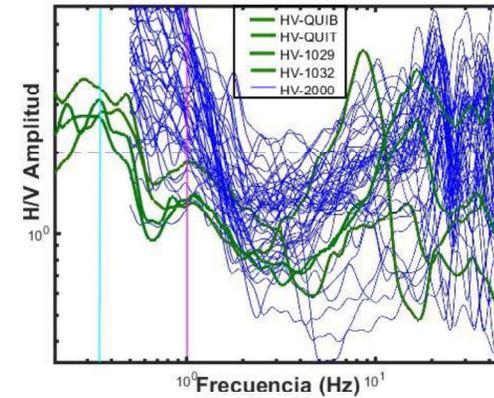
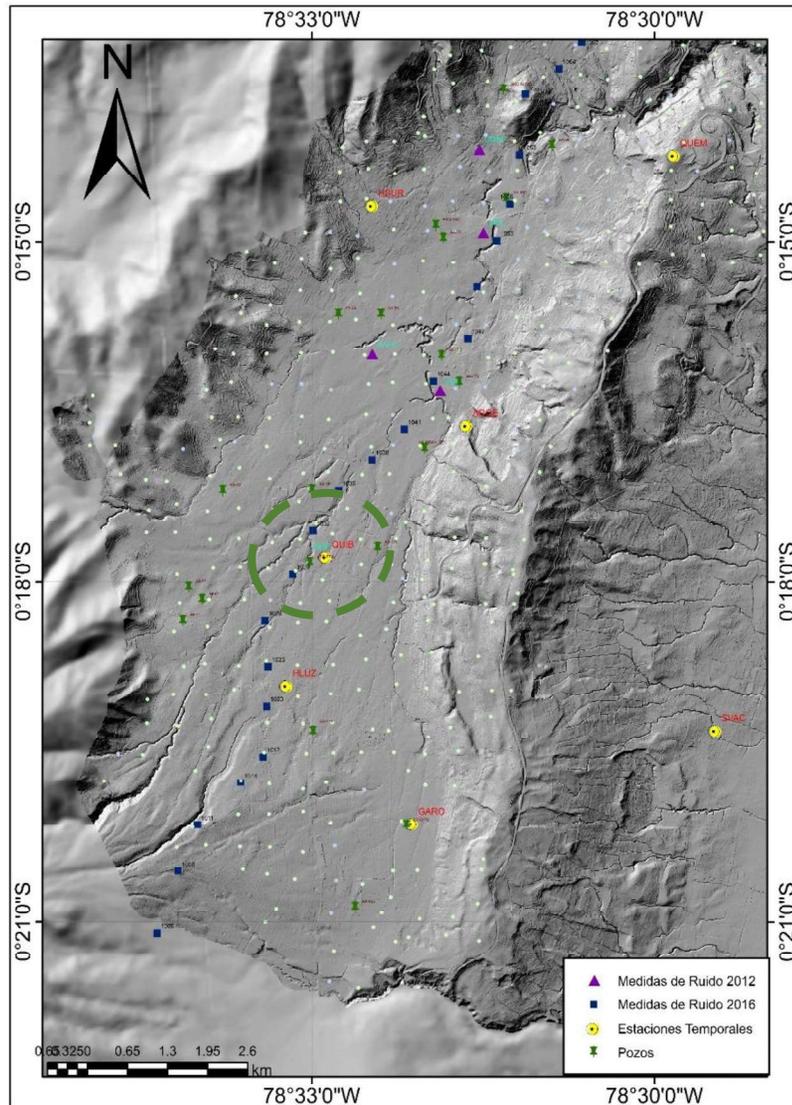
La estación ZALD exhibe un pico claro 0.35 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar, pero para el pico que se encuentran alrededor de 4 Hz de amplitud mayor a 2, los cuales podrían estar relacionados con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos al igual que el tercer pico a 20 Hz.

ARGE



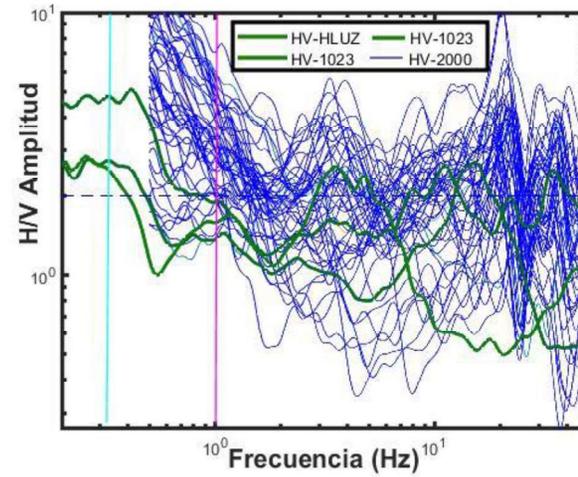
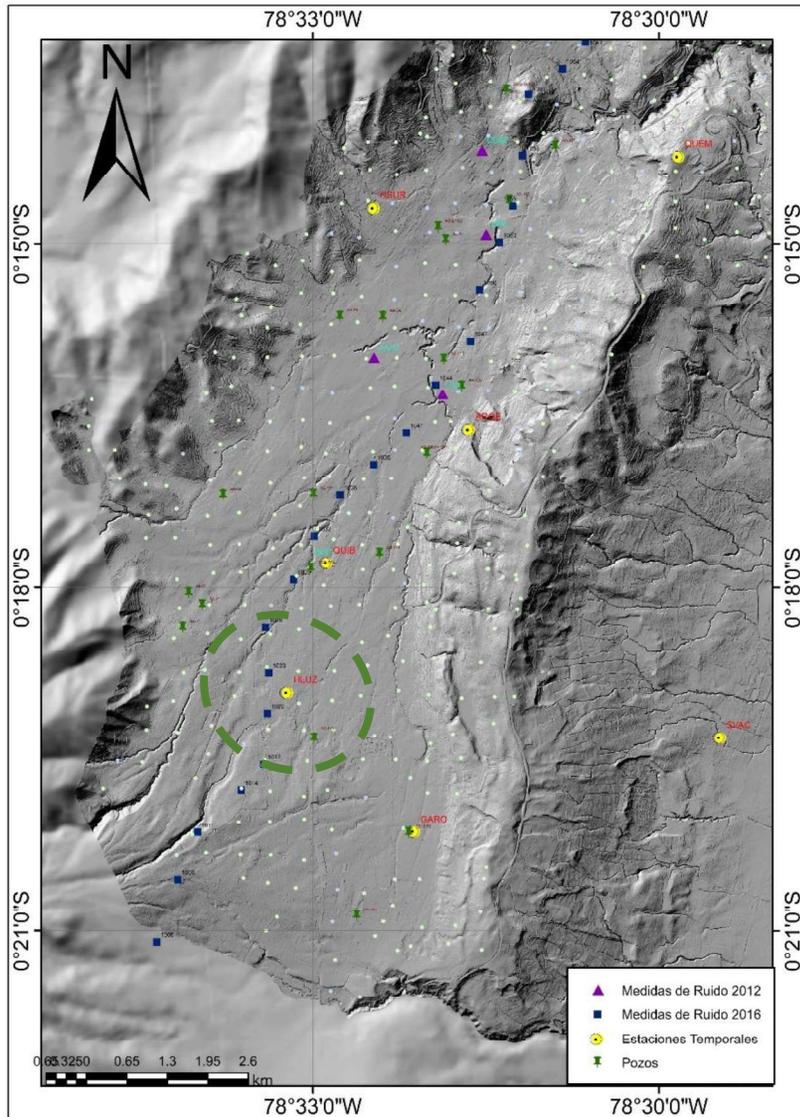
La estación ARGE, exhibe un pico claro a 0.33 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar, pero para el pico que se encuentran alrededor de 4 Hz de amplitud mayor a 2, los cuales podrían estar relacionados con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos al igual que el tercer pico a 20 Hz.

QUIB-QUIT



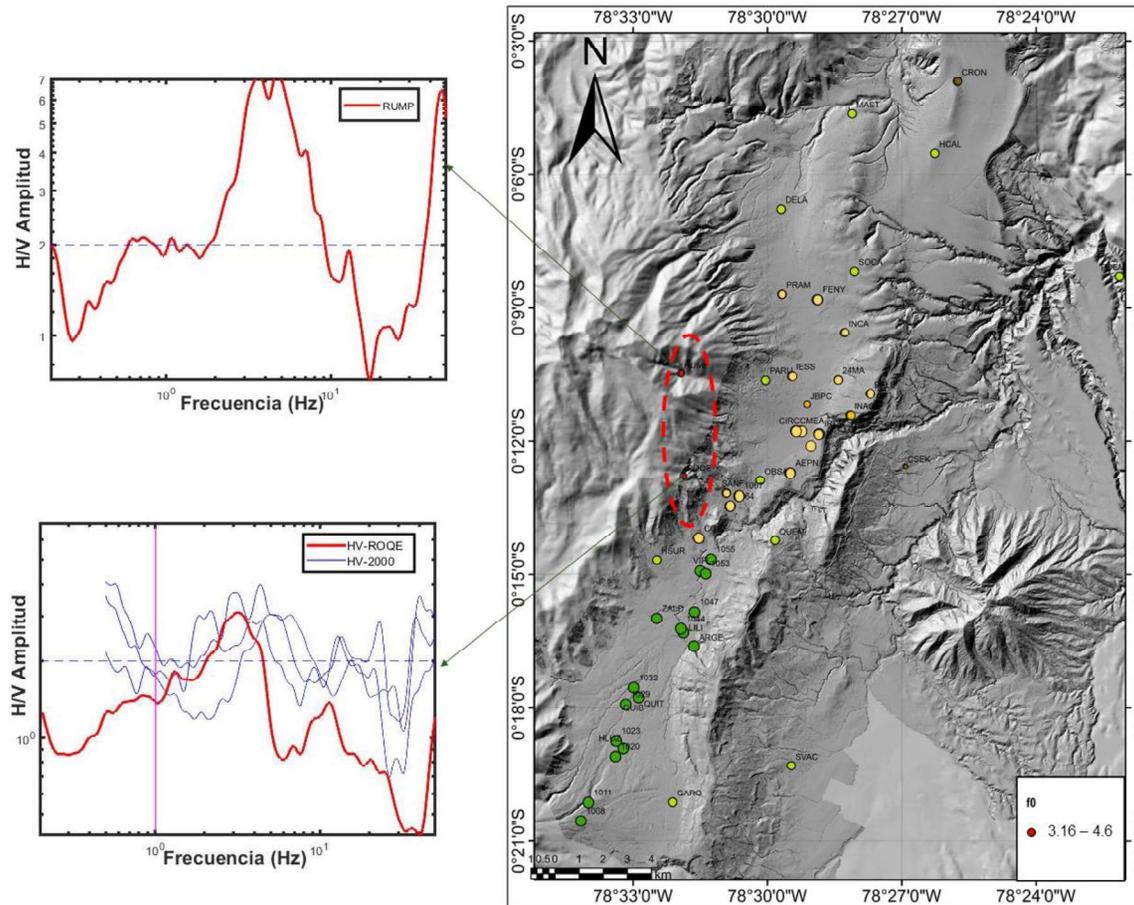
Las estaciones QUIB, QUIT, 1029 y 1032 exhibe un pico difuso a 0.28 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar a partir de 1 Hz, los picos de amplitud mayor a 2 que se encuentran alrededor de 10 Hz, muestran bastante similitud entre estas estaciones, los cuales podrían estar relacionados con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos al igual que el tercer pico a 20 Hz.

HLUZ



Las estaciones HLUZ, 1020 y 1023, exhibe un pico difuso a 0.26 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar, muestran una forma similar a partir de 1 Hz, los picos de amplitud mayor a 2 que se encuentran alrededor de 4 Hz, muestran bastante similitud entre estas estaciones, los cuales podrían estar relacionados con la estructura 2D y 3D en profundidad o con contrastes de impedancia más superficiales entre las capas de sedimentos al igual que el tercer pico a 20 Hz.

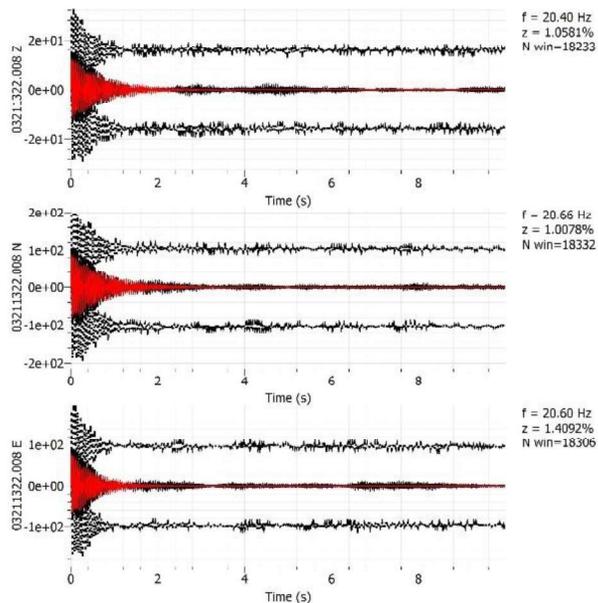
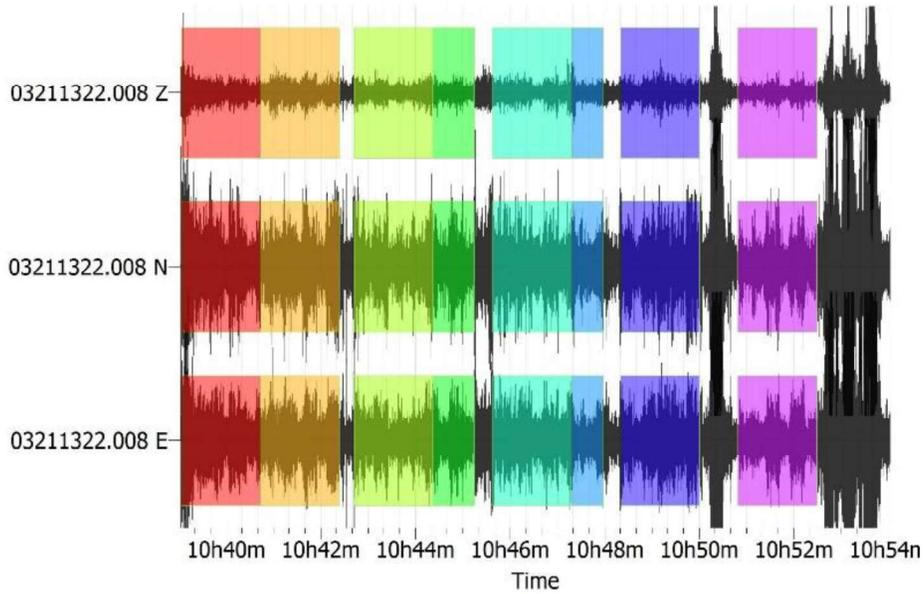
ZONA 6



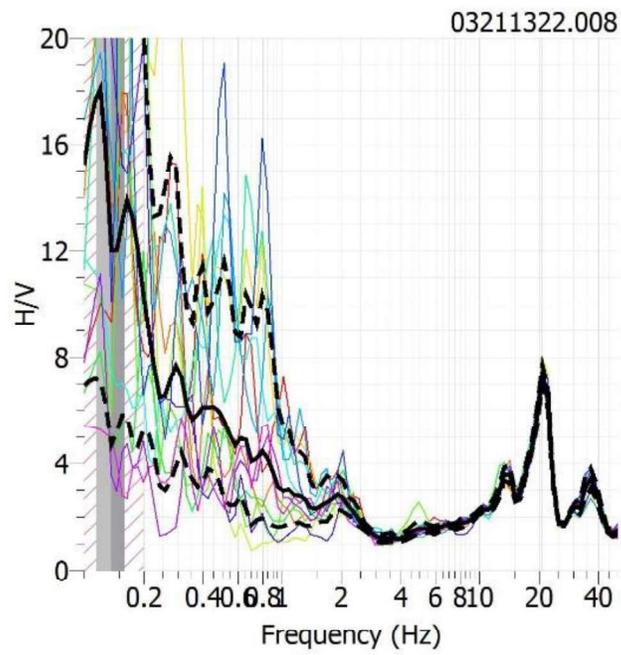
Las estaciones RUMP y ROQE, exhibe un pico claro alrededor de 3.5 Hz. Las estaciones de 2000 muestran una forma similar a la estación ROQE la presencia de este pico a esa frecuencia estaría relacionada con la geología del sitio puesto que se encuentran en las faldas del Complejo Volcánico Pichincha (CVP). Esto significa que la capa de sedimentos es menos potente.

RUMP-ROQE, Curvas con un pico claro alrededor de 3.5 Hz.

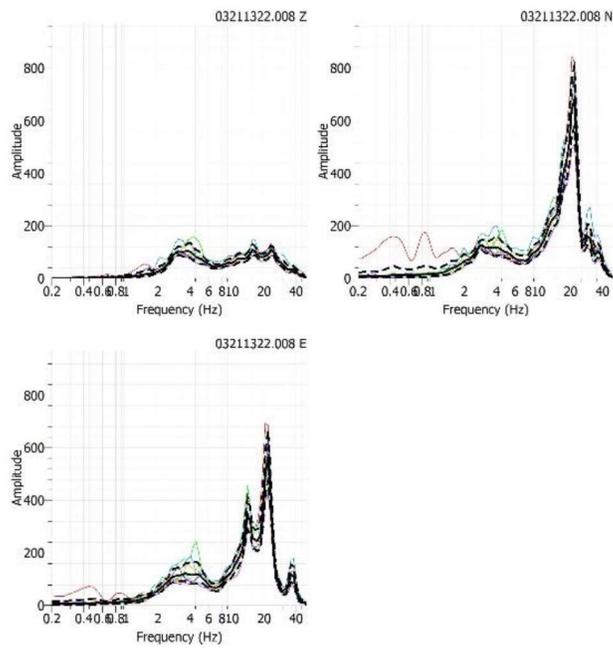
ANEXO III. Análisis de curvas H/V con picos claros mayores a 17 Hz, para demostrar que no son picos industriales.



Ventanas utilizadas para el cálculo de las curvas H/V y Damping aplicación del Filtro Band pass al pico de alta frecuencia > 15 Hz



Curvas H/V resultante



Componente Vertical, N-S y E-W

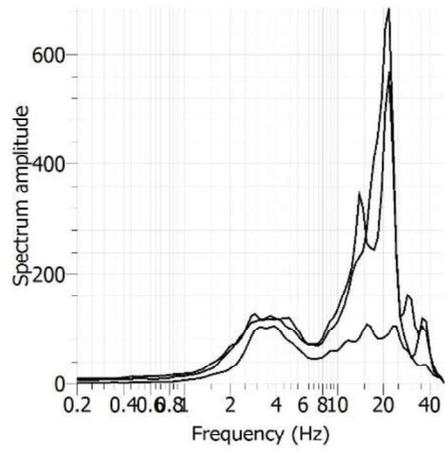
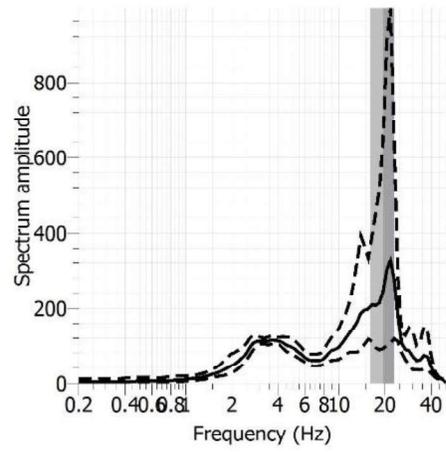


Gráfico de las tres componentes sobre puestas.



Promedio de la Curva H/V.

ANEXO IV. Mapa de distribución de las curvas que exhiben picos claros a frecuencias mayores a 20 Hz.

