



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Título**

Caracterización Geofísica del subsuelo de las estaciones acelerográficas de la red nacional de acelerógrafos (RENAC) ubicadas en Chimborazo y Bolívar.

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil**

**Autores:**

Jhon Patricio Abarca Zavala  
Pablo Andrés Jácome Barrionuevo

**Tutor:**

Mgs. Andrea Natali Zarate Villacrés

**Riobamba, Ecuador 2023**

## DERECHOS DE AUTORÍA

Nosotros, **Jhon Patricio Abarca Zavala**, con cédula de ciudadanía **0603967142** y **Pablo Andrés Jácome Barrionuevo** con cédula de ciudadanía **1803365145**, autores del trabajo de investigación titulado “**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO DE LAS ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS DE LA RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS (RENAC) UBICADAS EN CHIMBORAZO Y BOLÍVAR**”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedemos a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 17 de marzo de 2023.



Jhon Patricio Abarca Zavala

**C.I. 0603967142**



Pablo Andrés Jácome Barrionuevo

**C.I. 1803365145**

## **DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL**

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO DE LAS ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS DE LA RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS (RENAC) UBICADAS EN CHIMBORAZO Y BOLÍVAR**”. **Jhon Patricio Abarca Zavala**, con cédula de ciudadanía **0603967142** y **Pablo Andrés Jácome Barrionuevo** con cédula de ciudadanía **1803365145**, certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba, 24 de marzo del 2023.

Ing. Oscar Alfredo Cevallos Velázquez, PhD

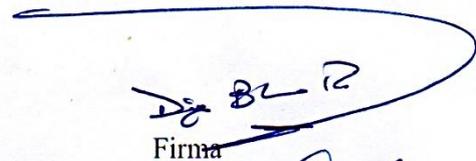
**PRESIDENTE DE TRIBUNAL DE GRADO**



Firma

Ing. Diego Javier Barahona Rivadeneira, Mgs

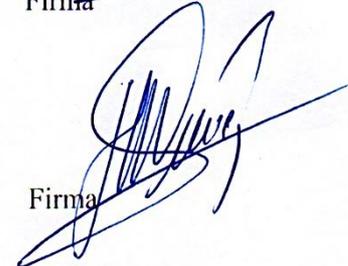
**MIEMRBO DE TRIBUNAL DE GRADO**



Firma

Ing. Jorge Eugenio Núñez Vivar, Mgs

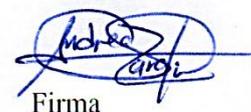
**MIEMBRO DE TRIBUNAL DE GRADO**



Firma

Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés, Mgs

**TUTOR**



Firma

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO DE LAS ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS DE LA RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS (RENAC) UBICADAS EN CHIMBORAZO Y BOLÍVAR**” presentado por **Jhon Patricio Abarca Zavala**, con cédula de ciudadanía **0603967142** y **Pablo Andrés Jácome Barrionuevo** con cédula de ciudadanía **1803365145**, bajo la tutoría de la Ing. Andrea Natali Villacrés, Mgs; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba, 24 de marzo del 2023.

Ing. Oscar Alfredo Cevallos Velázquez, PhD

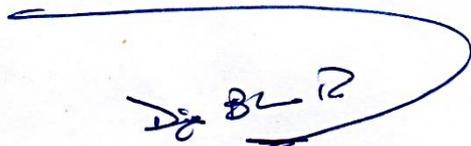
**PRESIDENTE DE TRIBUNAL DE GRADO**



Firma

Ing. Diego Javier Barahona Rivadeneira, Mgs

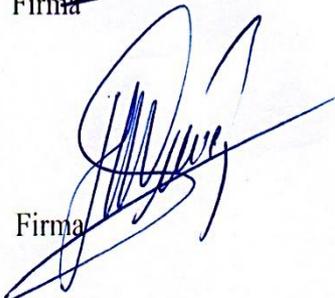
**MIEMRBO DE TRIBUNAL DE GRADO**



Firma

Ing. Jorge Eugenio Núñez Vivar, Mgs

**MIEMBRO DE TRIBUNAL DE GRADO**



Firma



Dirección  
Académica  
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-02.20  
VERSIÓN 02: 06-09-2021

## CERTIFICACIÓN ANTIPLAGIO

Que, **ABARCA ZAVALA JHON PATRICIO** con CC: **060396714-2** y **JACOME BARRIONUEVO PABLO ANDRES** con CC: **1803365145**, estudiante de la carrera de **INGENIERIA CIVIL, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO DE LAS ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS DE LA RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS (RENAC) UBICADAS EN CHIMBORAZO Y BOLÍVAR**", cumple con el 1 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 20 de marzo de 2023

Mgs. Andrea Natali Zarate

**TUTOR(A) TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

## **DEDICATORIA**

Para aquellos que me cambiaron la vida entera; a ti mi Abba Padre, mi Reina Blanca Zavala, mi Reina Alejandra Abarca y a mi hermano Santiago Abarca. Los amo mucho.

Jhon Patricio Abarca Zavala

A Dios y la virgencita que me han acompañado en todo este camino.

A mis padres Misael y Victoria por su apoyo incondicional, a motivarme a cumplir con mis sueños, nunca darme por vencido y formarme como una persona de bien. A mi hermano José por ser un ejemplo de superación y firmeza siempre creyente a sus principios.

A Vinicio, Patricia y Mateo por el cariño al recibirme en su hogar y siempre contar con su apoyo.

A Dayana gracias, amor por el apoyo, paciencia y cariño para siempre seguir adelante.

A mis tíos, primos, amigos y vecinos por siempre estar pendientes y recibir su apoyo para poder culminar con la carrera.

Para Dolores, Pablo, Pedro, Rosario, Narcisa, Yolanda, Raúl, Rosario que se encuentran en el cielo, los extraño mucho gracias por sus bendiciones y ayudar a culminar esta etapa en mi vida.

Pablo Andrés Jácome Barrionuevo

## **AGRADECIMIENTO**

Mientras conversábamos en la biblioteca; concordamos en la misma frase: “Dar honra al que merece honra”. Queremos darle un Dios le pague de corazón al Ing. Juan Gabriel Barros por dirigirnos en la tesis el 90%, gracias por enseñarnos cómo realizar los ensayos geofísicos, gracias por enseñarnos a realizar un trabajo honesto y verdadero, gracias porque nos enseñó a preguntarnos el porqué de las cosas, y sobre todo gracias por tener un buen corazón.

Al ing. Cristian Viracucha mil gracias por su apoyo constante en los ensayos geofísicos y platicarnos su experiencia con las estaciones sísmicas, al Ing. Luis Villafuerte quien se dio el tiempo para adquirir los equipos geotécnicos y por su compañía in situ. Y por último a la Ing. Andrea Zárate quien supo coordinar a la perfección la parte administrativa para la defensa de nuestra investigación.

Esta tesis es la primera de toda la carrera de Ing. Civil en realizar un convenio con la Escuela Politécnica Nacional y el Instituto Geofísico de Quito. Tanto profesionales como Instituciones agradecemos por haber colaborado en esta investigación que se llevó a cabo.

Jhon y Pablo

## ÍNDICE GENERAL

<b>DERECHOS DE AUTORÍA .....</b>	<b>.....</b>
<b>DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL .....</b>	<b>.....</b>
<b>CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL.....</b>	<b>.....</b>
<b>CERTIFICACIÓN ANTIPLAGIO.....</b>	<b>.....</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>.....</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>.....</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>.....</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>.....</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>16</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
1.1 Antecedentes .....	16
1.2 Planteamiento del Problema .....	18
1.3 Justificación .....	19
1.4 Objetivos .....	19
1.4.1 General .....	19
1.4.2 Específicos .....	19
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>20</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
2.1 Estado del arte.....	20
2.2 Contexto Geodinámico .....	21
2.2.1 Origen de los Sismos .....	22
2.2.2 Ondas Sísmicas.....	25
2.2.3 Definiciones Sísmicas .....	26
2.3 Red Nacional de Acelerógrafos. ....	28
2.4 Caracterización de Sitio .....	29
2.4.1 Geotecnia.....	29
2.4.2 Geofísica.....	31
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>37</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>37</b>
3.1 Proceso Metodológico .....	37
3.2 Equipos e Instrumentación.....	38

3.2.1	<i>Equipos Geotécnicos</i> .....	38
3.2.2	<i>Equipos Geofísicos</i> .....	38
3.3	Alcance de Investigación .....	39
3.4	Técnicas de Recolección de Datos.....	40
3.5	Población de Estudio y Tamaño de Muestra .....	40
3.6	Hipótesis .....	41
3.7	Procesamiento y análisis de datos.....	41
3.7.1	<i>Procesamiento y análisis de datos para la caracterización del suelo por métodos geotécnicos</i> .....	41
3.7.2	<i>Procesamiento y análisis de datos para ensayos de laboratorio.</i> .....	41
3.7.3	<i>Procedimiento y análisis de datos para la caracterización del suelo por métodos geofísicos.</i> .....	42
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>51</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>51</b>
4.1	Análisis Geotécnico de los Perfiles Estratigráficos Obtenidos Mediante el Ensayo de SPT en Campo y Ensayos de Laboratorio.....	51
4.2	Análisis de los Resultados Obtenidos Mediante Ensayos de Sísmica Activa (MASW) y Sísmica Pasiva (RSA). .....	55
4.3	Discusión de Resultados Geofísicos y Geotécnicos .....	61
4.3.1	<i>Guamote</i> .....	61
4.3.2	<i>Alausí</i> .....	64
4.3.3	<i>Guaranda</i> .....	67
4.3.4	<i>Riobamba</i> .....	70
<b>CAPÍTULO V .....</b>		<b>73</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>		<b>73</b>
<b>6. RECOMENDACIONES .....</b>		<b>75</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>77</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>		<b>81</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Cronología de los eventos sísmicos más importantes del Ecuador clasificados como los más destructivos para las edificaciones (Singuacho, 2009).....	23
<b>Tabla 2.</b> Sismicidad histórica de la provincia de Chimborazo .....	24
<b>Tabla 3.</b> Fórmulas de velocidad de onda de corte para geotecnia propuestas por varios autores en diferentes años.....	36
<b>Tabla 4.</b> Equipo utilizado para ensayo de Registro de ruido sísmico ambiental .....	38
<b>Tabla 5.</b> Equipo utilizado para ensayo de Registro de ruido sísmico ambiental .....	39
<b>Tabla 6.</b> Equipo utilizado para ensayo de MASW análisis multicanal de ondas superficiales.....	39
<b>Tabla 7.</b> Duración de grabación recomendada .....	46
<b>Tabla 8.</b> Diferenciación de las vibraciones ambientales según el SESAME. ....	49
<b>Tabla 9.</b> Resultados de ensayos de humedad para muestras de suelo por profundidades en cada ciudad aplicando la norma ASTM D2216. ....	51
<b>Tabla 10.</b> Resultados de ensayos de granulometría por vía seca con clasificación según SUCS en cada ciudad aplicando la norma ASTM C136. ....	52
<b>Tabla 11.</b> Resultados de los ensayos de límites de Atterberg con su respectivo límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad en cada ciudad aplicando la norma ASTM D4318.....	52
<b>Tabla 12.</b> Resultados de los ensayos de relaciones volumétricas y gravimétricas (método de parafina) con muestras de suelo pertenecientes a las calicatas extraídas en los 4 puntos de estudio aplicando la norma ASTM D7263-09.....	53
<b>Tabla 13.</b> Resumen de los ensayos geofísicos que se obtuvieron en las 4 ciudades. ....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Capas de la tierra relacionadas con las ondas de cuerpo (ondas S y P) .....	25
<b>Figura 2.</b> Acelerogramas del sismo de las 18h58 (TL) del 16 de abril del 2016 ordenados con respecto a la distancia epicentral. Se han considerado las componentes con la máxima aceleración (PGA), la cual está indicada a la derecha de la señal. El tiempo de origen (0 s) corresponde al momento de ocurrencia del evento menos 20 s. Se utiliza en todos los casos la misma escala vertical.....	28
<b>Figura 3.</b> Efecto en la curva de dispersión a través del método MASW, al realizar variaciones en el peso de la fuente activa y el tipo placa .....	32
<b>Figura 4.</b> Velocidad de fase con distintas longitudes de ondas ( $\lambda$ ) en un semi espacio homogéneo (izquierda) y en un medio estratificado (derecha) (p.12).....	32

<b>Figura 5.</b> Definición de la razón espectral H/V (mHVSR).....	33
<b>Figura 6.</b> Esquema a partir del cual se deduce la técnica de Nakamura.....	33
<b>Figura 7.</b> Esquema metodológico de trabajo .....	37
<b>Figura 8.</b> Gráfico de límites teóricos para la curva de dispersión. ....	44
<b>Figura 9.</b> Suavizado de Konno Ohmachi con distintos valores .....	48
<b>Figura 10.</b> El gráfico central indica una fuente de energía natural. Sin embargo, el gráfico derecho muestra una concentración de energía entre 40° y 120° lo cual es causado por una fuente externa. ....	50
<b>Figura 11.</b> Perfiles estratigráficos de suelo correspondientes a las ciudades de Guamote (a), Alausí (b), Guaranda (c) y Riobamba (d) respectivamente; además del número de golpes del ensayo de SPT hasta obtener rechazo (e) según los criterios de la norma ASTM D1586.....	54
<b>Figura 12.</b> Curvas de dispersión (CD) resultantes de la línea sísmica en cada ciudad en estudio. Línea verde CD de Guamote, línea azul CD de Alausí, línea roja CD de Riobamba.....	55
<b>Figura 13.</b> Curvas H/V provenientes de sensores de la grabación de registro de ruido sísmico ambiental. Línea verde Curva H/V (mHVSR) Guamote, línea azul Curva H/V (mHVSR) Alausí, línea negra Curva H/V (mHVSR) Guaranda. ....	56
<b>Figura 14.</b> a) Modelo de inversión con curva dato mHVSR, b) Modelo de inversión con curva dato de dispersión, c) Perfil de velocidad de onda de corte obtenido de la inversión de la curva de dispersión CD más la curva mHVSR, d) Velocidad de onda de corte a los 30m y hasta el semiespacio en la ciudad de Guamote.....	57
<b>Figura 15.</b> a) Modelo de inversión con curva dato mHVSR, b) Modelo de inversión con curva dato de dispersión, c) Perfil de velocidad de onda de corte obtenido de la inversión de la curva de dispersión CD más la curva mHVSR, d) Velocidad de onda de corte a los 30m y hasta el semiespacio en la ciudad de Alausí. ....	58
<b>Figura 16.</b> a) Modelo de inversión con curva dato mHVSR, b) Perfil de velocidad de onda de corte obtenido de la inversión de la curva mHVSR, c) Velocidades de onda de corte a los 30m hasta el semiespacio con dos posibles soluciones en la ciudad de Guaranda. ....	59
<b>Figura 17.</b> a) Modelo de inversión con curva dato de dispersión, b) Perfil de velocidad de onda de corte obtenido de la inversión de la curva de dispersión CD, c) Velocidad de onda de corte a los 30m y hasta el semiespacio en la ciudad de Riobamba.....	60

## RESUMEN

El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) cuenta con una red nacional de acelerógrafos (RENAC), la cual es la encargada del registro máximo de los eventos sísmicos en todo el país. Es por eso que la presente investigación tiene como objetivo caracterizar el subsuelo de las estaciones acelerográficas ubicadas en las provincias de Chimborazo y Bolívar.

Metodológicamente hablando, en la Geofísica se utilizó la grabación del RSA (Ruido Sísmico Ambiental) para obtener la curva H/V (mHVSR) mediante el software Geopsy y Dinver; y en relación con el método MASW que utiliza fuentes activas para la generación de ondas superficiales que son captadas por sensores colocados a lo largo de una línea sísmica, su procesamiento y análisis de datos se realizó en los mismos softwares obteniendo las curvas de dispersión (CD) en la ciudad de Guamote, Alausí, Guaranda y Riobamba.

Con todos los análisis Geofísicos y Geotécnico realizados para la estación acelerográfica de Guamote, se genera una columna de suelo tipo “D” con un  $V_{s30}$  de 360 m/s y una frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de 7.5 hz. En cambio, para la estación acelerográfica de Alausí se tiene una columna de suelo tipo “F” con un  $V_{s30}$  de 400 m/s y una frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de 2.05 hz. Por el contrario, para la estación acelerográfica de Guaranda se obtuvo una columna de suelo tipo “F” con un rango de  $V_{s30}$  de 130 m/s a 240 m/s al no contar con el ensayo de MASW, además de una frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de 1.06 hz. Por último, en la ciudad de Riobamba se determinó una columna de suelo tipo “F” y un  $V_{s30}$  de 400 m/s; además se menciona que no se pudo determinar la frecuencia fundamental por falta de confiabilidad en la curva mHVSR. Dado los límites de cada uno de los ensayos realizados, el análisis concluye con una variación de resultados Geofísicos y Geotécnicos para cada ciudad, por lo que es importante ahondar en un futuro en este estudio con técnicas más

precisas para lograr una mejor caracterización de la columna de suelo de las estaciones acelerográficas.

**Palabras claves:** Caracterización Geofísica, Ruido Sísmico Ambiental, Frecuencia Fundamental del suelo, Velocidad de onda de corte, curva de dispersión.

## ABSTRACT

The Geophysical Institute of the National Polytechnic School (IG-EPN) has a national network of accelerographs (RENAC), which is responsible for the maximum recording of seismic events throughout the country. Therefore, this research aims to characterize the subsurface of accelerographic stations located in the provinces of Chimborazo and Bolívar.

Methodologically speaking, in Geophysics, the recording of Ambient Seismic Noise (RSA) was used to obtain the H/V curve (mHVSR) using the Geopsy and Dinver software. In relation to the MASW method, which uses active sources to generate surface waves that are captured by sensors placed along a seismic line, their processing and data analysis were carried out in the same software to obtain dispersion curves (DC) in the cities of Guamote, Alausí, Guaranda, and Riobamba.

With all the geophysical and geotechnical analyses carried out for the accelerograph station in Guamote, a soil column type "D" was generated with a  $V_{s30}$  of 360 m/s and a fundamental frequency ( $f_0$ ) of 7.5 Hz. On the other hand, for the accelerograph station in Alausí, a soil column type "F" was obtained with a  $V_{s30}$  of 400 m/s and a fundamental frequency ( $f_0$ ) of 2.05 Hz. Conversely, for the accelerograph station in Guaranda, a soil column type "F" was obtained with a range of  $V_{s30}$  from 130 m/s to 240 m/s, as the MASW test was not available, in addition to a fundamental frequency ( $f_0$ ) of 1.06 Hz. Finally, in the city of Riobamba, a soil column type "F" and a  $V_{s30}$  of 400 m/s were determined. It is also mentioned that the fundamental frequency could not be determined due to lack of reliability in the mHVSR curve. Given the limitations of each of the tests carried out, the analysis concludes with a variation of geophysical and geotechnical results for each city. Therefore,

it is important to delve into this study in the future with more precise techniques to achieve a better characterization of the soil column of the accelerographic stations.

**Keywords:** Geophysical Characterization, Environmental Seismic Noise, Fundamental Frequency of the ground, Shear wave velocity, dispersion curve.



Reviewed by:

Lcdo. Jhon Inca Guerrero.  
**ENGLISH PROFESSOR**  
C.C. 0604136572

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Antecedentes

La predicción del movimiento del suelo causado por los sismos que pueden afectar a una cierta ubicación es uno de los retos que se plantean actualmente en el campo de la sismología y que presenta, a su vez, gran interés en el ámbito de la ingeniería sísmica (Benito & Cabañas, 2015). Uno de los parámetros más empleados para este fin es la aceleración pico PGA, que constituye la aceleración pico del terreno siendo una medida de intensidad sísmica utilizada para modelar fenómenos sísmicos (Benito & Cabañas, 2015). Referente a todo esto, la aceleración sísmica es utilizada en movimientos telúricos para medir de manera directa las aceleraciones que soporta la superficie del suelo. Por otro lado, en ingeniería, la aceleración sísmica es la medida de un sismo más utilizado y, por lo tanto, sus valores son considerados para la elaboración de las normas sísmicas y mapas de zonificación sísmica (Laurendeau et al., 2017).

A diferencia de otras escalas que cuantifican el tamaño de los sismos, como la escala de magnitud; no es una medida de energía total liberada del movimiento telúrico; por lo tanto, es una medida de intensidad de sacudimiento del suelo, pudiendo ser fácilmente correlacionada con escalas como la magnitud del momento sísmico ( $M_w$ ) que describe el daño y efectos producidos por el sismo en la superficie. Del mismo modo, cuando ocurre un sismo, el daño en los edificios y las infraestructuras está relacionado directamente con la velocidad y la aceleración sísmica, y no con la magnitud del sismo, he ahí la importancia de esta información para los estudios e investigaciones en ingeniería (Alvarado et al., 2016). No obstante, los registros de los eventos obtenidos son procesados y analizados, determinando los valores de aceleración máxima y la escala de intensidad, estos datos son

útiles para entender el comportamiento al que puede ser sometida las estructuras durante un sismo destructivo (Laurendeau et al., 2017).

El primer acelerógrafo se instaló en el distrito Metropolitano de Quito y con la red nacional de acelerógrafos (RENAC) que cubre las 3 regiones: Costa, Sierra y Oriente en las principales ciudades, se ha ido recopilando valiosa información para el estudio del movimiento del suelo y registro de aceleraciones máximas PGA (Laurendeau et al., 2017). Con la importancia descrita, el Ecuador se encuentra ubicado en una zona de subducción entre la placa de nazca deslizándose bajo el margen occidental de la placa sudamericana a la velocidad de 56 mm/año con una dirección N83°E (Nocquet et al., 2014), responsable de la alta sismicidad presente en el país.

En el Ecuador, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional constituye el principal centro de investigación y es el encargado del diagnóstico y vigilancia de peligros sísmicos y volcánicos. El país cuenta con una red acelerográfica permanente (RENAC), la cual permite la obtención de registros acelerográficos a nivel nacional. Y es precisamente que dichas estaciones ubicadas en Riobamba (ARIO), Guamote (AGMT), Alausí (ALAH) y Guaranda (AGRD) no cuentan en la actualidad con una caracterización de columnas de suelo para estudiar el comportamiento de este. La pregunta de investigación es: ¿Cuál es el modelo de columna unidimensional del suelo en las estaciones acelerográficas de las provincias de Chimborazo y Bolívar? En base a lo expuesto y a raíz del problema planteado, se formula la siguiente hipótesis: Las estaciones acelerográficas de las provincias de Chimborazo y Bolívar se encuentran en un medio estratificado. El objetivo principal de esta investigación se centra en caracterizar geofísicamente el subsuelo de las estaciones acelerográficas de Riobamba (ARIO), Guamote (AGMT), Alausí (ALAH) y Guaranda (AGRD).

## 1.2 Planteamiento del Problema

Las zonas de subducción en Ecuador, donde una placa tectónica se desliza bajo otra en un contexto de convergencia relativa, son la fuente de generación de los sismos más grandes. Estos sismos ocurren cerca de la superficie en la zona de contacto interplaca, cuando el roce es suficiente para restringir el movimiento relativo y permite la acumulación en el tiempo de energía elástica (Nocquet et al., 2014).

Es necesario realizar un estudio y caracterización de las estaciones acelerográficas de la red nacional de acelerógrafos (RENAC) en Chimborazo y Bolívar. Todas estas redes de monitoreo de sismos requieren de una extensa información acerca del periodo fundamental de vibración del suelo, perfil de onda de corte ( $V_s$ ) además de determinar los parámetros físicos y geotécnicos del subsuelo de estas estaciones ubicadas en las provincias ya mencionadas, todo esto se va a llevar a cabo mediante la aplicación de métodos geofísicos con equipos proporcionados por el Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional mediante métodos de sismica activa MASW y sismica pasiva (Registro de ruido sísmico ambiental); a su vez se realizará métodos geotécnicos como el ensayo SPT, calicatas, humedad, granulometría, entre otros. Con esto se pretende realizar un aporte al instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional para las condiciones del suelo en las cuales se registran los movimientos de la tierra. En el caso de una red de movimiento fuerte, identificar el tipo de suelo utilizando las técnicas aplicadas de forma sistemática es esencial para validar los registros grabados (Schmidt, 2016). En contraste, las estaciones acelerográficas que pertenecen a este estudio los cuales se encuentran en Riobamba, Guamote, Alausí y Guaranda, no poseen una caracterización de suelos como tal.

Ahora bien, no se debe esperar a que ocurran sismos en el centro del país tal como pasó en 2016 cerca de las costas ecuatorianas para estudiar y caracterizar los suelos que forman parte de la red RENAC. Y en efecto, aunque se tiene un historial sísmico en cada

una de las estaciones, lo ideal es que dichos registros puedan ser aún más precisos conociendo a detalle el suelo en donde están asentados, y a partir de esta caracterización, determinar los objetivos descritos posteriormente en esta investigación.

### **1.3 Justificación**

La presente investigación tiene como finalidad realizar la caracterización de los subsuelos de las estaciones aerográficas ubicadas en las provincias de Chimborazo y Bolívar, con esto se contribuiría con la red nacional de acelerógrafos (RENAC) que actualmente se encuentra realizando la misma labor para todas las estaciones del país. Los datos obtenidos de este trabajo investigativo serán de gran utilidad para el estudio del peligro sísmico en las ciudades de Guamote, Alausí, Guaranda y Riobamba.

### **1.4 Objetivos**

#### ***1.4.1 General***

- Caracterizar geofísicamente el subsuelo de las estaciones acelerográficas de Guamote (AGMT), Alausí (ALAH), Guaranda (AGRD) y Riobamba (ARIO).

#### ***1.4.2 Específicos***

- Estimar el periodo fundamental de vibración del suelo.
- Encontrar el perfil de onda de corte ( $V_s$ ) hasta mínimo 30 metros.
- Determinar parámetros físicos geotécnicos del subsuelo de las estaciones acelerográficas en Chimborazo y Bolívar.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Estado del arte

En el país existen varios estudios sobre caracterización geotécnica y geofísica del subsuelo; algunas investigaciones realizadas se describen de esta forma: Aguiar & Rivas (2018), con la aplicación del método de Nakamura se halló los periodos de vibración en 9 sitios en la ciudad de Ambato con valores entre 0.2 y 0.4 seg, lo que significa que son suelos muy resistentes a acciones sísmicas; por otro lado, en dos sitios analizados se obtuvo periodos de vibración baja, estos datos no fueron considerados al ser casos puntuales. Se concluyó que los suelos de Ambato tienen velocidades de onda de corte  $V_{s30}$  mayores a 360 m/s y los suelos restantes tienen resultados ligeramente inferiores a esa cantidad, de tal forma se confirma que los suelos de Ambato son sísmicamente muy buenos. No obstante, con la caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito se pretendió actualizar la microzonificación sísmica de esta ciudad identificando zonas específicas según sus propiedades mecánicas estáticas y dinámicas para establecer un modelo geotécnico; por otro lado la caracterización geofísica se basó en el  $V_{s30}$  y en frecuencias de vibración natural del suelo, esto permitió estimar el espesor de sedimentos de la subcuenca Machángara con un espesor aproximado de 1 a 1.5km (Barros et al., 2018).

La pontificia Universidad Católica del Ecuador participó e impulsó el proyecto de actualizar la microzonificación sísmica que permite conocer el tipo de material y la posibilidad de obtener muestras que categoricen el sector elegido; se emplearon 5 tipos de ensayos como son la perforación típica continua, perforación SPT, perforación CPT, perforación SMDT (Diámetro sísmico de Marchetti), perforación para extracción de muestras inalteradas. En otro estudio para la caracterización geológica y geofísica del subsuelo a orillas del río Guayas en Durán, se recopiló información de campo

correspondientes a 12 perforaciones con SPT y 7 con CPT-u, además de un ensayo MASW y MAN, colaboración hecha por la empresa GEOESTUDIOS S.A. Dicha caracterización determinó un relleno de 70cm observando intercalaciones de limos, seguidamente se obtuvo materiales granulares y al reconocer el área se pudo dar soluciones ingenieriles de construcción según la NEC (Aspiazu, 2017).

Tanto en Chimborazo como en Guaranda se evidenció que existe muy poca información disponible para su análisis y comparación de resultados. Es por ello que existe la necesidad de caracterizar geotecnia y geofísicamente el subsuelo de las estaciones acelerográficas de Guamote (AGMT), Alausí (ALAH), Guaranda (AGRD) y Riobamba (ARIO), conociendo periodos fundamentales, perfil de onda de corte, etc., necesarios para evidenciar la amplificación sísmica del suelo.

## **2.2 Contexto Geodinámico**

En todo el planeta existen alrededor de 15 placas tectónicas principales y 43 placas secundarias interactuando entre sí. Una forma de interacción entre placas es la subducción y se define como el deslizamiento de una placa más densa sobre el margen de otra (Barros, 2016). Como es evidente, el Ecuador se localiza en una zona de subducción entre la placa oceánica de Nazca deslizándose debajo del margen occidental de la placa sudamericana a la velocidad de 56 mm/año con una dirección N83°E (Nocquet et al., 2014), esta interacción produce una acumulación de esfuerzos tanto en la zona de contacto como en la parte interna de las placas continental y oceánica. Este proceso ocurre cerca del territorio ecuatoriano a una distancia aproximada de 100 a 200 kilómetros de sus costas.

El Ecuador se encuentra ubicado sobre la línea ecuatorial en América del Sur, con una extensión de 256.370 kilómetros cuadrados donde se encuentra atravesado por 2 hemisferios dividiéndose específicamente en cuatro regiones las mismas que se distribuyen en 24 provincias. Su ubicación señala que se encuentra cerca de la placa de Nazca y la

Sudamericana, generando diferentes eventos telúricos como el de sismo del 16 de abril de 2016 (Martínez, 2016).

La razón principal por la cual se producen los sismos es la liberación de esfuerzos acumulados en la zona de subducción o en las fallas tectónicas, sin embargo, existen otras causas por las cuales se producen los eventos sísmicos en el Ecuador como por ejemplo las de origen volcánico (Laurendeau et al., 2017).

### **2.2.1 Origen de los Sismos**

Los sismos pueden clasificarse según su origen, formas de onda, intensidad o magnitud. No obstante, se clasificará los sismos por sus diferentes tipos para estudiar la profundidad de los movimientos de las placas tectónica:

**Sismos Interplaca o sismos de subducción** (> 40km, < 60 km de profundidad), se producen por acumulación esfuerzos en donde una placa de menor densidad se hunde bajo otra (Alvarado et al., 2016).

**Sismos Intraplaca de profundidad media y elevada** (> 50 km, < 250 km de profundidad), son poco recurrentes porque se producen en el interior de una placa y no en los límites entre ellas (Alvarado et al., 2016).

**Sismos superficiales o Corticales** (< 60 km de profundidad), se producen en fallas al interior de la corteza a una profundidad muy baja (Perez, 2016).

**Sismos Intraplaca oceánica o de Outer – Rise** (< 30 km de profundidad), producidas en la placa oceánica como resultado de esfuerzos con deformaciones a las que se encuentra sometida (Alvarado et al., 2016)..

**Sismos por fallas geológicas**, este tipo de fallas cubren en gran parte al Ecuador, existiendo fallas que provocan mayor cantidad de sismos, además el sistema de fallas Chingual - Casanga, Pallatanga – Puná, la cual produce un mayor acortamiento continental y la deformación por deslizamiento. (Alvarado et al., 2016).

**Sistema de Fallas Chingual**, ubicada en el norte del Ecuador, recorre a lo largo de la cordillera oriental hacia el noreste conectándose con las fallas de la Sofía y río Cofanes, en donde la tasa de deslizamiento en la falla de Chingual varía entre 7 a 10 mm/año (Perez, 2016).

**Sistema de Fallas de Pallatanga**, siendo la extensión de la falla de Pujilí, atraviesa la cordillera occidental extendiéndose al este del Golfo de Guayaquil y a unos 200 km a través del valle interandino, siguiendo el valle del río Pangor hasta el pie del volcán Chimborazo con una tasa de deslizamiento propuesta por (Baize et al., 2015) de 2.5 a 4.6 mm/año. Donde se presentará la cronología de eventos sísmicos más importantes en el Ecuador y la sismicidad histórica en la provincia de Chimborazo (Alvarado et al., 2016).

**Tabla 1.** Cronología de los eventos sísmicos más importantes del Ecuador clasificados como los más destructivos para las edificaciones (Singuacho, 2009)

N° Evento	Año	Epicentro		M	Provincia	Int. Máx.
		Latitud	Longitud			
<b>1</b>	1587	0.00	-78.40	6.3	Pichincha	8
<b>2</b>	1645	-1.68	-78.55	7.0	Chimborazo	9
<b>3</b>	1674	-1.70	-78.80	6.3	Bolívar	8
<b>4</b>	1687	-1.10	-78.30	6.3	Tungurahua	8
<b>5</b>	1698	-1.45	-78.30	7.7	Tungurahua	9
<b>6</b>	1736	-0.80	-78.80	6.3	Pichincha	8
<b>7</b>	1749	-4.00	-79.20	6.3	Loja	8
<b>8</b>	1755	-0.21	-78.48	6.3	Pichincha	8
<b>9</b>	1757	-1.00	-78.60	7.0	Cotopaxi	8
<b>10</b>	1786	-1.65	-78.70	6.3	Chimborazo	8
<b>11</b>	<u>1797</u>	<u>-1.43</u>	<u>-78.55</u>	<u>8.3</u>	<u>Chimborazo</u>	<u>11</u>
<b>12</b>	1859	0.20	-78.50	6.3	Pichincha	8
<b>13</b>	1868	0.30	-78.20	7.0	Imbabura	9
<b>14</b>	1868	0.60	-78.00	6.3	Carchi	8
<b>15</b>	1896	-0.50	-80.45	7.0	Manabí	9
<b>16</b>	1906	1.00	-81.30	8.1	Esmeraldas	8
<b>17</b>	1911	-1.70	-78.70		Chimborazo	8
<b>18</b>	1913	-3.80	-79.40	6.3	Loja	8
<b>19</b>	1914	-0.50	-78.50	7.0	Pichincha	8
<b>20</b>	1923	-0.50	-78.50	6.3	Pichincha	8
<b>21</b>	1926	0.80	-77.90	6.5	Carchi	8
<b>22</b>	1929	-0.40	-78.55	6.3	Pichincha	8
<b>23</b>	1938	-0.30	-78.40	6.3	Pichincha	8
<b>24</b>	1942	0.01	-80.12	7.7	Manabí	9

<b>25</b>	1949	-1.25	-78.37	6.7	Tungurahua	10
<b>26</b>	1953	-3.40	-80.60	7.3	Loja	8
<b>27</b>	1958	1.22	-79.39	7.3	Esmeraldas	8
<b>28</b>	1961	-2.20	-78.90	6.1	Chimborazo	8
<b>29</b>	1964	-0.84	-80.29	5.7	Manabí	8
<b>30</b>	1970	-3.79	-80.66	6.3	Loja	8
<b>31</b>	1976	0.85	-79.63	6.0	Esmeraldas	8
<b>32</b>	1987	-0.09	-77.81	6.4	Napo	9
<b>33</b>	1995	-2.81	-77.95	6.9	Morona Santiago	8
<b>34</b>	1996	-1.05	-78.71	5.7	Cotopaxi	8
<b>35</b>	1998	-0.55	-80.53	6.2	Manabí	8

*Nota:* Las intensidades especificadas en la tabla pertenecen a la intensidad MSK (Medvedev Karnik) y la magnitud M es calculada por Egred en su investigación.

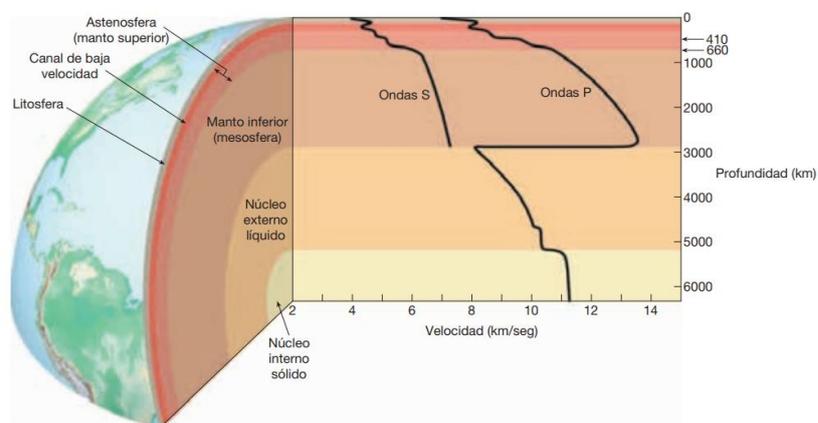
**Tabla 2.** Sismicidad histórica de la provincia de Chimborazo

Fecha		Epicentro		Referencia	IMM		
Año	Mes	Día	Hora			Latitud	Longitud
<b>1557</b>	Febrero	-	-	1.50 S	78.5 W	-	VI
<b>1645</b>	Marzo	15	-	1.68 S	78.55 W	-	VI
<b>1674</b>	Agosto	29	-	2.20 S	78.83 W	-	VII
<b>1687</b>	Noviembre	22	-	1.10 S	78.25 W	-	VII
<b>1698</b>	Junio	20	6H00	1.45 S	78.25 W	-	VIII
<b>1744</b>	-	-	-	1.5 S	78.60 W	-	VI
<b>1745</b>	-	-	-	1.4 S	78.40 W	-	VI
<b>1786</b>	Mayo	10	15H00	1.70 S	78.70 W	-	VII
<b>1786</b>	Junio	23	02H30	1.70 S	78.70 W	-	IV
<b>1797</b>	Febrero	04	07H45	1.43 S	78.55 W	-	IX

*Nota:* es importante resaltar que la mayoría de los eventos sísmicos ocurrieron en la antigua Riobamba, es decir Sicalpa. La intensidad está dada por la escala de Mercalli Modificada.

### 2.2.2 Ondas Sísmicas

En las capas de la tierra se generan variaciones de velocidad de las Ondas P y S con la profundidad en km. Se cree que estas variaciones de velocidad de las ondas P y S son causadas por los minerales existentes en cada capa de la tierra antes que su composición. En este sentido, las velocidades de ambas ondas cambian constantemente en cada capa, produciéndose zonas de sombra, en donde no llegan las señales de las ondas y por ende no son captadas por las estaciones sísmicas (Tarbuck et al., 2005).



**Figura 1.** Capas de la tierra relacionadas con las ondas de cuerpo (ondas S y P)

**Fuente:** (Tarbuck et al., 2005)

Las velocidades de onda dependen de las características del medio que pueden atravesar. Esto por su parte, puede estudiarse observando el tiempo que recorre la onda y cuánto se está amplificando. Existen las ondas de cuerpo que se conforman por las ondas P y S, además de las ondas superficiales que se conforman por ondas Rayleigh y Love.

**Ondas P:** se las identifica por ser ondas compresivas o primarias, que vibran hacia atrás y hacia delante en la dirección del movimiento, a su vez son capaces de propagarse por medio de líquidos, así como de sólidos volviendo a su forma original cuando la onda atravesó el suelo en cuestión (Tarbuck & Lutgens, 2005).

**Ondas S:** son ondas secundarias, transversales o de corte, donde se identifica una vibración en ángulo recto con respecto a su dirección de desplazamiento y no se propagan a través de líquidos (Tarbuck & Lutgens, 2005).

**Ondas Rayleigh:** se desplazan cerca de la superficie incluyendo movimientos longitudinales y transversales cuya amplitud disminuye a medida que aumenta su profundidad, pueden azotar una misma partícula en 4 direcciones diferentes en un movimiento de vaivén, volviéndolas altamente peligrosas para las edificaciones. Las ondas al llegar a la superficie son más lentas que las Ondas S, sin embargo, tienen una amplitud mayor causando más daño (Jimenez & Espíndola , 1994).

**Ondas Love:** se propagan con movimientos horizontales perpendiculares a la dirección de propagación que causan desplazamientos laterales. Las ondas Love tienen la particularidad de que su amplitud decrece a medida que aumenta la profundidad (Jimenez & Espíndola , 1994).

### **2.2.3 Definiciones Sísmicas**

**Intensidad sísmica:** se relaciona con el potencial de destrucción de sismos, en las cuales existen diversas escalas de intensidad sísmicas, algunas siendo objetivas y otras subjetivas (Barbat, 1983).

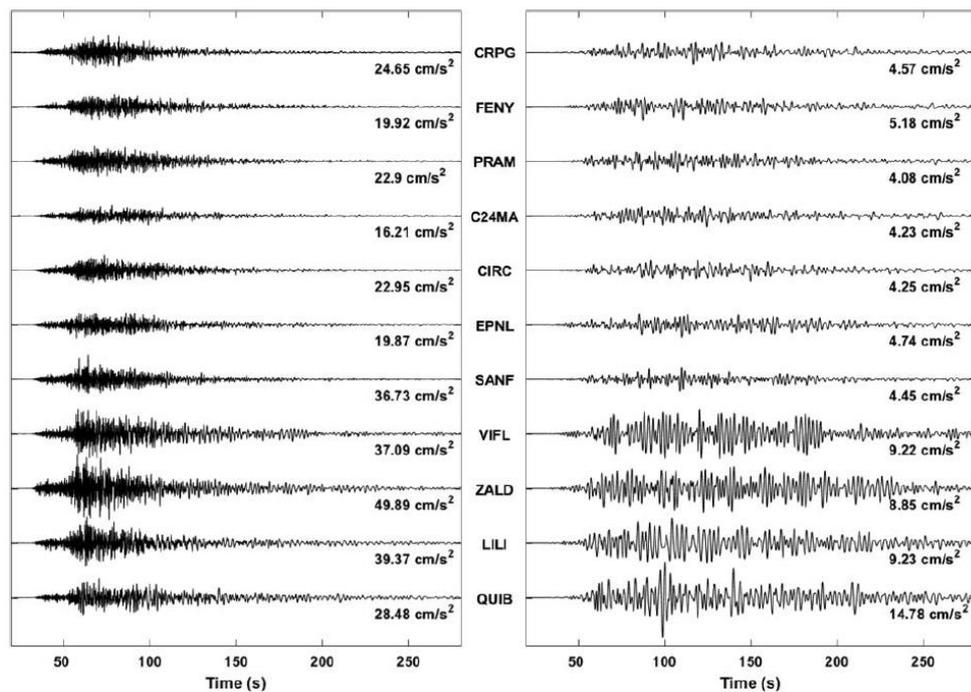
**Magnitud sísmica:** es la cantidad de energía potencial elástica de deformación liberada al romperse los materiales rocosos y representa la energía mediante las ondas sísmicas (García, 2014).

**Aceleración sísmica:** es una medida utilizada en movimientos telúricos para medir de manera directa las aceleraciones que soporta la superficie del suelo siendo su unidad de medida la intensidad del campo gravitatorio; es decir,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , sus valores son considerados para la elaboración de las normas y mapas de zonificación sísmica (Ritta et al., 2012).

**Aceleración pico del suelo (PGA):** representa la máxima aceleración del suelo durante un sismo en un sitio determinado siendo un parámetro para estimar la intensidad del sismo diseñando estructuras resistentes (Cabañas & Benito, 1999)

Uno de los acontecimientos relacionados al PGA en Ecuador, fue el sismo del 16 de abril del 2016 en Pedernales (Manabí), el cual fue registrado por 21 estaciones acelerográficas de la red nacional de acelerógrafos RENAC (AAM2, ACH1, ACHN, ACUE, AES2, AGYE, AIB1, AIB2, ALAT, ALIB, ALJ1, ALOR, AMIL, AMNT, AOTA, APED, APO1, ASDO, ATUL, APENL, PRAM) repartidas en todo el territorio del país.

Para comprender de mejor forma la aceleración pico del terreno en este evento sísmico, se presenta el mapa de intensidades registradas por el sismo estudiado en las costas ecuatorianas.



**Figura 2.** Acelerogramas del sismo de las 18h58 (TL) del 16 de abril del 2016 ordenados con respecto a la distancia epicentral. Se han considerado las componentes con la máxima aceleración (PGA), la cual está indicada a la derecha de la señal. El tiempo de origen (0 s) corresponde al momento de ocurrencia del evento menos 20 s. Se utiliza en todos los casos la misma escala vertical.

**Fuente:** (Laurendeau et al., 2017)

Ahora bien, la estación de Pedernales llamada APED, registró un valor de 13.803 m/s<sup>2</sup>; es decir que se obtiene un valor de 1.407g. Sin embargo, para la ciudad de Riobamba, el acelerógrafo registró un valor inferior de 0.2427 m/s<sup>2</sup> de PGA, es decir que la aceleración de la ciudad fue casi 13 veces menor a la que sufrió Pedernales en el mismo día a las 18H58 (Laurendeau et al., 2017)

### **2.3 Red Nacional de Acelerógrafos.**

Entre los años 2008 al 2012 el Ecuador mediante el proyecto “Fortalecimiento del Instituto Geofísico Ampliación y Modernización del Servicio Nacional de Sismología y Vulcanología” financiado por la SENESCYT, logra cubrir todo el territorio nacional con acelerógrafos de alta calidad y tecnología en las 3 regiones: Costa, Sierra y Oriente en las principales ciudades, recopilando información para el estudio del movimiento del suelo y el cálculo de aceleraciones definiéndose como “Un modelo matemático que predice la aceleración que se produce a una distancia determinada desde el epicentro, esta distancia se mide hasta la ubicación de la estructura que se busca diseñar” (Moncayo et al., 2017), importante para el análisis de la amenaza sísmica y el estudio del movimiento sísmico.

**Acelerógrafos en Ecuador:** El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional cuenta con 61 estaciones sísmicas y 80 estaciones acelerográficas realizando un monitoreo las 24 horas, detectando sismos y enviando datos en tiempo real a los técnicos del centro de tierras.

## 2.4 Caracterización de Sitio

Para realizar la caracterización de las estaciones acelerográficas ubicadas en Chimborazo y Bolívar se utilizará métodos geofísicos y geotécnicos las cuales son:

### 2.4.1 Geotecnia

La norma ecuatoriana de la construcción menciona que los métodos geotécnicos forman una serie de actividades que comprenden el reconocimiento de campo, investigación y el análisis del suelo con el fin de determinar las propiedades de resistencia del suelo (NEC, 2015). A continuación, se describen los ensayos geotécnicos realizados donde se ubican las 4 estaciones acelerográficas:

**Ensayo de penetración estándar (SPT):** el ensayo de penetración estándar consiste en realizar perforaciones mecánicas del suelo en el sitio que requiere realizar una investigación. En la perforación se ejecuta el ensayo SPT que cuenta el número de golpes (N) para ir introduciendo la cuchara partida, dentro de un estrato (ASTM 1586). Este ensayo se utiliza para depósitos de suelos granulares y arcillas de consistencia rígida (NEC, 2015). El valor obtenido de N en un ensayo de penetración es inversamente proporcional a la energía transferida al muestreador (Schmertmann & Palacios, 1979). El SPT quizá es el ensayo más utilizado en la caracterización geotécnica. Los criterios de rechazo según la norma ASTM D1586 para el SPT son:

- Cuando se obtienen 50 golpes consecutivos en un tramo de 15cm de suelo.
- Cuando se aplica un total de 100 golpes.
- Cuando no se observa ningún tipo de penetración en 10 golpes seguidos.

**Humedad:** según la norma ASTM D2216, un espécimen de suelo se seca mediante un horno a  $T^\circ$  de  $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 horas. La pérdida respectiva de dicha masa indica que es la masa de agua. Posteriormente se calcula el porcentaje de humedad usando el suelo seco y la masa de agua.

**Clasificación de suelos (Granulometría):** consiste en la clasificación por tamaños de las partículas de un árido, mediante una serie de tamices donde son separados y pesados. La granulometría se realiza mediante un análisis mecánico que determina el rango de tamaño de suelo el cual se expresa como un porcentaje de peso seco total. La norma ecuatoriana de la construcción ha considerado como válido el sistema SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) el mismo que es utilizado para definir y analizar las series estratigráficas que conforman el subsuelo (NEC, 2015).

**Límite líquido (LL):** el contenido de agua, que se expresa en porcentaje, en comparación al peso del suelo en el límite definido arbitrariamente entre los estados líquido y plástico de un suelo remodelado o amasado (Barros et al., 2018).

**Límite plástico (LP):** el límite líquido es el contenido de agua expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, que define el límite entre los estados plástico y semisólido, luego se determina el índice de plasticidad que será la diferencia entre ambos ( $IP=LL-LP$ ), y este representa el intervalo de humedad desde el estado semisólido y semilíquido.

**Extracción de calicatas:** consiste en la extracción de una muestra de suelo a diferentes profundidades, donde se realiza una excavación de forma mecánica o manual, la muestra debe ser sellada con un material aislante conservando la humedad natural (NEC, 2015).

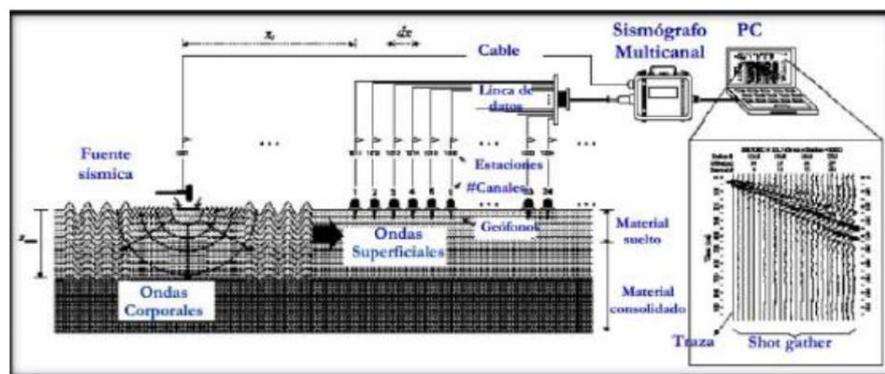
**Relaciones volumétricas y gravimétricas:** es la relación que existe entre la masa del suelo (elemento unitario que equivale a la suma de la masa del sólido más la masa del agua) y el volumen del suelo en estado natural (volumen de sólidos más el volumen de vacíos) descrito en la norma ASTM D7263 (Barros et al., 2018).

## 2.4.2 Geofísica

La geofísica se encarga del estudio del interior de la tierra, desde la superficie terrestre hasta el interior de esta. Dentro de los fenómenos que estudia la tierra se encuentra la propagación de ondas sísmicas, el cual la sismica (métodos pasivos) se encarga del estudio de los terremotos y ondas producidas por fuentes naturales. Por su parte la sismología (métodos activos) se ocupa de generar ondas mediante fuentes artificiales en la superficie, para recibir las señales después que han viajado por el interior del subsuelo y su posterior análisis (Scivetti et al., 2021). Los ensayos geofísicos son:

**MASW:** es un método de prospección geofísica que emplea fuentes activas en donde el principio de esta técnica asocia la dispersión de ondas Rayleigh que tienen una longitud de profundidad y onda de penetración diferentes a las ondas de cuerpo propagándose con una velocidad diferente; al evaluar las ondas superficiales se puede conseguir un perfil de velocidad cercano a la superficie (Park, Miller & Xia 1999, citado por Cárdenas, 2019).

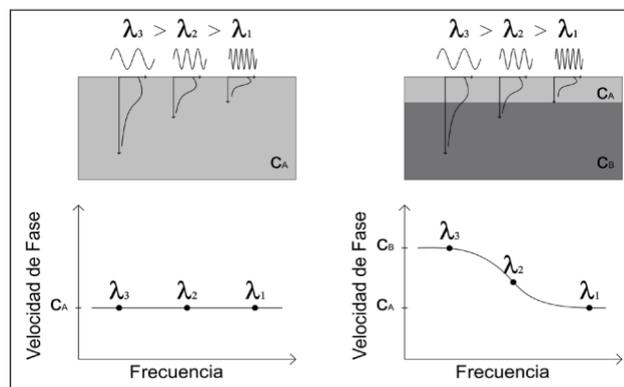
Este método consiste en utilizar arreglos de geófonos de 4.5 hz de frecuencia de corte colocados en una línea de aproximadamente 100 m de longitud y una separación entre 2 a 5 m que registra la onda producida por el golpe de un martillo de 9 kg sobre una placa de metal ubicada en diversos lugares del arreglo. Mediante una doble transformada de Fourier en tiempo y espacio (FK transformer) se analizarán los datos obtenidos por los geófonos, obteniendo la curva de dispersión de las ondas Rayleigh (Barros et al., 2018).



**Figura 3.** Efecto en la curva de dispersión a través del método MASW, al realizar variaciones en el peso de la fuente activa y el tipo placa

**Fuente:** (Rivas, 2016).

Para el fenómeno de dispersión de ondas se necesita entender que en un semi espacio homogéneo, la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh será la misma siempre, mientras que un medio heterogéneo (subsuelo) la velocidad de fase es dependiente de la frecuencia o la longitud de onda, este tipo de análisis es usada para caracterizar los suelos (Tukimatsu 1997, citado por Humire et al., 2015).



**Figura 4.** Velocidad de fase con distintas longitudes de ondas ( $\lambda$ ) en un semi espacio homogéneo (izquierda) y en un medio estratificado (derecha) (p.12)

**Fuente:** (Humire et al., 2015, adaptado de Strobbia 2003).

Cuando las ondas Rayleigh atraviesan o penetran estos diferentes medios; existe una variabilidad de velocidad y frecuencia de propagación. Esto quiere decir que, en medios estratificados, puede existir una velocidad baja con frecuencia alta y viceversa. Al evaluar este tipo de ondas es posible saber qué tipo de perfiles de suelo existen en la capa superficial de la tierra.

**Ruido sísmico Ambiental (RSA):** se define como la vibración constante de la superficie terrestre, causada por la combinación de fenómenos naturales de baja frecuencia denominado microsismo (menos de 1 hz) producida por viento, mareas, ríos, lluvia,

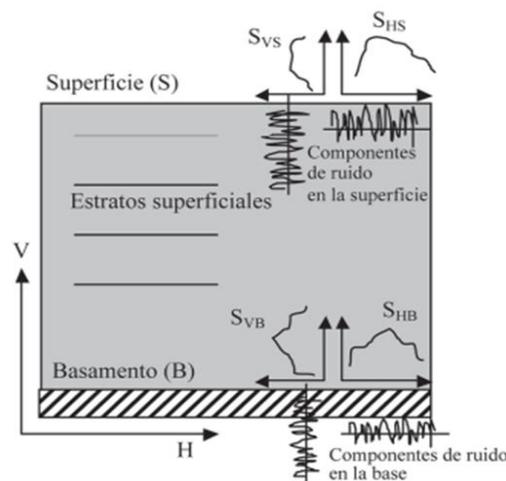
variaciones de presión etc., y alta frecuencia o microsismo (superior a 1 hz) por actividades humanas como tráfico, maquinaria y peatones (Molnar et al. 2018).

**mHVSR:** es la relación espectral de las componentes horizontal a vertical (mHVSR) de un registro de ruido sísmico ambiental que se aplica para estimar el periodo de sitio o frecuencia fundamental (Molnar et al. 2018). La técnica de Nakamura (1989) o razones espectrales H/V (mHVSR), permite determinar la frecuencia de resonancia natural de un sitio a través de medidas de ruido sísmico ambiente. La base de esta técnica mHVSR 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 ( $f_0$ ). 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 (Nakamura, 1989; Bonilla et al. 1997).

$$S_T = \frac{H_S}{H_B} \Rightarrow E_R = \frac{V_S}{V_B} \Rightarrow S_M = \frac{S_T}{E_R} = \frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}} \Rightarrow \frac{H_B}{V_B} = 1 \Rightarrow S_M = \frac{H_S}{V_S}$$

**Figura 5.** Definición de la razón espectral H/V (mHVSR)

**Fuente:** Nakamura (2000).



**Figura 6.** Esquema a partir del cual se deduce la técnica de Nakamura

**Fuente:** (Schmidt, 2012).

La transformada de Fourier es una operación que convierte cualquier señal en diferentes frecuencias que la forman. Cooley & Tukey (1965), desarrollaron una ecuación que expresa la Transformada rápida de Fourier (Párraga, 2020):

$$F(\omega_n) = |A(\omega)| * e^{i\varphi(\omega)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) * e^{-i\omega t} dt$$

Mediante el espectro de amplitud de Fourier se puede saber el contenido de frecuencia de un movimiento sísmico, analizar la amplificación local de ondas, situar efectos topográficos, estudiar la interacción suelo-estructura y estimar el periodo fundamental del suelo  $f_0$  (Párraga, 2020).

**Frecuencia natural del suelo:** la vibración natural del suelo con mayor amplitud se denomina frecuencia predominante. Los rangos de frecuencia que interesa en este estudio dentro de la geofísica son de 0.2 a 20 hz ya que estos rangos son necesarios para su análisis (Ritta et al., 2012). La ecuación de la frecuencia fundamental de un suelo es:

$$f_n = \frac{(2n+1)*V_s}{4H}$$

Donde ( $V_s$ ) es la velocidad de corte, ( $H$ ) es el espesor del estrato, ( $n$ ) es el número de modos (0, 1, 2, 3).

**Impedancia:** se dice que es la resistencia al cambio del movimiento de un suelo; y es el fenómeno más importante en la amplificación de sitio. La fórmula para determinar la impedancia de un suelo es:

$$\iota = p * V_s \left[ \left( \frac{kg}{m^3} \right) * \left( \frac{m}{s} \right) = \frac{kg}{(m^2 * s)} \right]$$

En donde ( $p$ ) es la densidad del estrato y ( $V_s$ ) la velocidad de onda de corte del estrato (Magallanes, 2022).

**Contraste de impedancia:** el cociente entre el estrato superior y el semi espacio se denomina contraste de impedancia, es conocida por la amplificación sísmica que ocurre entre estos dos materiales. Si el cociente de esta división es igual o menor que 0.5 se dirá que se tiene un contraste de impedancia; y si esto ocurre dentro de los 30 metros de profundidad se considerara como un suelo tipo F (NEC, 2015). El semi espacio es un tipo de sedimento con características de mayor resistencia asemejándose al basamento rocoso. El semi espacio puede conocerse su inicio, pero no se conoce su final. Por lo cual este espesor es necesario para el estudio de H/V. En cambio, un estrato de suelo que está sobre el semi espacio se requiere saber espesor. Los sitios con mayor contraste de impedancia se relacionan con frecuencia fundamentales más bajas el cual a su vez se relaciona con espesores de sedimentos más grandes (Ulloa, 2018). La fórmula del contraste de impedancia según la norma NEC15 es la división entre 2 impedancias de dos estratos, uno encima de otro:

$$\alpha = \frac{P_s * V_s}{P_o * V_o}$$

En donde (Vs) es la velocidad de onda del estrato superior, (Ps) es densidad de estrato superior, (Po) densidad del semi espacio, (Vo) es la velocidad de onda del estrato del semi espacio.

**Vs30:** hace referencia al valor promedio de la velocidad de onda de corte desde la superficie hasta los 30 metros de profundidad. Este valor se da ya que el suelo a esta profundidad afecta el comportamiento de las edificaciones que edifiquen sobre el suelo (Schmidt, 2012). La fórmula de velocidad de onda cortante (Vs30) según la NEC15 es:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{n=1}^n di}{\sum_{n=1}^n \frac{di}{V_{si}}}$$

En donde  $V_{si}$  es la velocidad media de la onda cortante del suelo del estrato (i) medida en campo en (m/s) y  $d_i$  es el espesor del estrato (i), localizado dentro de los 30m superiores del perfil.

**Tabla 3.** Fórmulas de velocidad de onda de corte para geotecnia propuestas por varios autores en diferentes años.

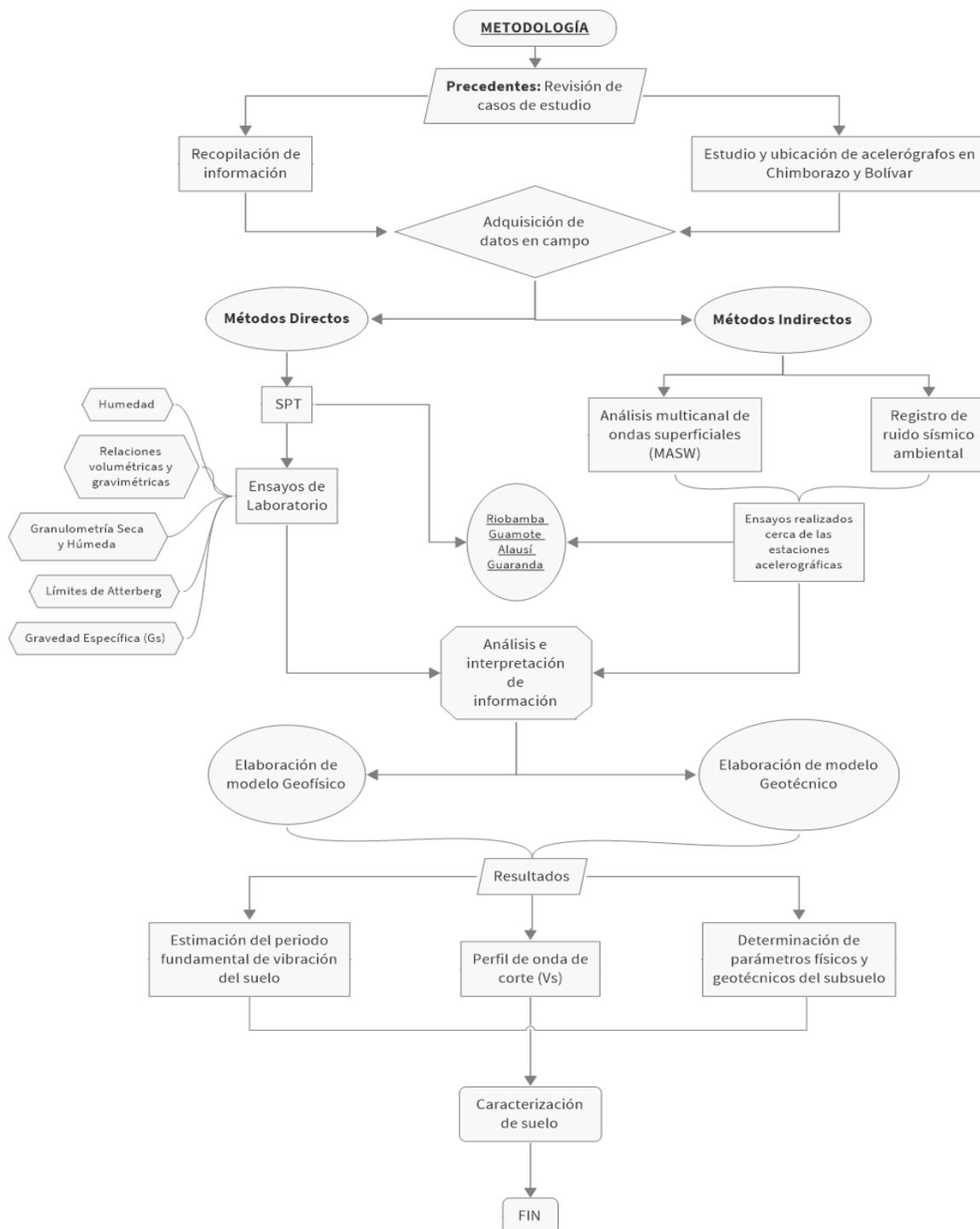
No.	Autor	Todos los suelos
1	Kanai (1966)	$V_s = 19 * N^{0.6}$
2	Ohba y Toriumi (1970)	$V_s = 84 * N^{0.31}$
3	Imai y Yoshimura (1970)	$V_s = 76 * N^{0.33}$
4	Fujiwara (1972)	$V_s = 92.1 * N^{0.337}$
5	Ohsaki y Iwasaki (1973)	$V_s = 82 * N^{0.39}$
6	Imai y Yoshimura (1975)	$V_s = 92 * N^{0.329}$
7	Imai (1977)	$V_s = 91 * N^{0.337}$
8	Ohta y Goto (1978)	$V_s = 85.35 * N^{0.348}$
9	Seed y Idriss (1981)	$V_s = 61 * N^{0.5}$
10	Imai y Tonouchi (1982)	$V_s = 97 * N^{0.314}$
11	Jinan (1987)	$V_s = 116.1 * (N + 0.3185)^{0.202}$
12	Sisman (1995)	$V_s = 32.8 * N^{0.51}$
13	Athanasopoulos (1995)	$V_s = 107.6 * N^{0.36}$
14	Iyisamn (1996)	$V_s = 51.5 * N^{0.516}$
15	Jafari (1997)	$V_s = 22 * N^{0.85}$
16	Kiku (2001)	$V_s = 68.3 * N^{0.292}$
17	Hasancebi y Ulusay (2007)	$V_s = 90 * N^{0.308}$
18	Maheshwari (2010)	$V_s = 95.64 * N^{0.301}$
19	Tsiambaos and Sabatakakis (2011)	$V_s = 105.7 * N^{0.327}$
20	Anbazhagan (2012)	$V_s = 68.96 * N^{0.51}$

**Fuente:** (Vera, 2019)

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA.

#### 3.1 Proceso Metodológico



**Figura 7.** Esquema metodológico de trabajo

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023).

## 3.2 Equipos e Instrumentación

### 3.2.1 Equipos Geotécnicos

Para el ensayo SPT se tienen los siguientes equipos necesarios para el ensamble los cuales son: martillo de golpeo, cuchara partida, motor, polea, castillo, cabo, tuberías, espátula. Por otro lado, los elementos utilizados para extraer la muestra de suelo inalterada son los siguientes: Pala, Pico, Barra, Machete, Cinta de embalaje, plásticos.

### 3.2.2 Equipos Geofísicos

Los equipos usados en el ensayo de ruido sísmico ambiental pertenecen al Instituto Geofísico IG-EPN y son los siguientes: Sismómetro Trillium compact 20s, Digitalizador de banda Ancha REFTEK RT-130, GPS de tiempo, Batería 12 voltios, cables especiales de conexión, iPhone 6. De igual forma, con el ensayo de MASW (análisis multicanal de ondas superficiales) los equipos pertenecen al mismo instituto y son: geófonos 4,5 hz (geospace), sismógrafo geode (geometrics), laptop, martillo de 15 kg, placa de acero, batería de 12 voltios, cables especiales de conexión.

**Tabla 4.** Equipo utilizado para ensayo de Registro de ruido sísmico ambiental

<b>Sismómetro Trillium compact 20s</b>	
<b>Dimensiones</b>	Diámetro 90mm, altura puerto y conector 113mm
<b>Peso</b>	1.2 kg
<b>Periodo Propio</b>	20s
<b>Frecuencia de esquina superior</b>	100hz
<b>Factor de transducción</b>	750 vs/m/s (diferencial)
<b>Tolerancia de inclinación</b>	10°
<b>Señal de salida</b>	3 voltajes analógicos Max±7v
<b>Consumo de Energía</b>	180 mW
<b>Dimensiones</b>	97 mm de diámetro, 118 mm de altura (solo cuerpo)
<b>Rango de temperatura</b>	-40 a +60°C
<b>Rango Dinámico</b>	>152dB a 1 Hz



**Fuente:** (Nanometrics, 2001)

**Tabla 5.** Equipo utilizado para ensayo de Registro de ruido símico ambiental

<b>Digitalizador de banda Ancha REFTEK RT-130</b>	
<b>Canales de entrada</b>	3 canales
<b>Tamaño físico</b>	16 cm x 17,5 cm x 33,3 cm
<b>Fuente de alimentación</b>	10-16 V, 1,0 W
<b>Tasa de muestro</b>	1 a 1000 <del>sps</del>
<b>Almacenamiento</b>	Hasta 8 Gb
<b>Rango de Temperatura</b>	-20 a+ 70°C
<b>Gama Dinámica</b>	>138 dB



**Fuente:** (pascal, 2022)

**Tabla 6.** Equipo utilizado para ensayo de MASW análisis multicanal de ondas superficiales

<b>Registrador sísmico multipropósito Geode (Geometrics)+ Geofono 4,5 hz</b>	
<b>Peso</b>	3.6 kg
<b>Capacidad</b>	3 a canales por modulo, expandible hasta canales
<b>Ancho de banda</b>	1.75 Hz a 20 kHz
<b>Muestro</b>	de 8 a 0.02 ms
<b>Distorsión</b>	0,0005% a 2 ms, de 1,75 a 208 Hz.
<b>Rango dinámico</b>	144 dB (sistema), 110 dB (instantánea a media) a 2 ms, 24 dB
<b>Diafonía</b>	-125 dB a 23,5 Hz, 24 dB, 2 ms
<b>precisión de disparador de apilamiento</b>	1/32 del intervalo de muestra
<b>Señal de entrada máxima</b>	2,8 V PP, 0 dB
<b>Señal de entrada</b>	20kOhm, 0.02 uF
<b>Formato de datos</b>	SEG-2, SEG-D y SEG-Y
<b>Sistema Operativo</b>	Windows XP/7/10



**Fuente:** (Nanometrics, 2001)

### 3.3 Alcance de Investigación

El siguiente estudio posee un alcance de investigación de modelo cuantitativo, dividiéndose en descriptiva y correlacional. A continuación, se manifiesta cada una de ellas:

**Cuantitativa**, la información obtenida en campo se obtiene gracias a los 3 ensayos en cada una de las ciudades ya mencionadas. Los datos informativos se evalúan con un enfoque matemático-estadístico para ser presentados en gráficas, tablas y matrices.

**Descriptiva**, al tener más de 35 metros de profundidad total en perforaciones en todas las 4 ciudades, se detalla de manera específica cada metro mediante 4 ensayos hechos en laboratorio especificando el tipo de suelo existente en cada estrato. De la misma manera

con los ensayos no invasivos se determina la frecuencia fundamental del subsuelo, curva de dispersión de las ondas Rayleigh y el perfil de velocidad de la onda S (onda de corte).

**Correlacional**, una vez procesados todos los datos obtenidos en campo, se fija una comparación existente entre los ensayos invasivos y no invasivos con el objetivo de hallar similitudes sobre la caracterización de los estratos de las estaciones acelerográficas ubicadas en Riobamba, Guamote, Alausí y Guaranda.

### **3.4 Técnicas de Recolección de Datos**

Para la recolección de datos durante todo el estudio investigativo, especialmente en campo; se realizó ensayos geotécnicos y geofísicos con sus diferentes equipos, herramientas e instrumentación requerida para generar los primeros datos crudos a ser analizados e interpretados. Posteriormente y mediante la técnica de observación con formularios y matrices, se anotaron los primeros datos crudos obtenidos en campo para su análisis en laboratorio y su procesamiento de cálculos en Microsoft Excel según normas establecidas. Por último y no menos importante, en todo el proceso se mantuvo un Focus Group en línea con profesionales de la UNACH y del IG-EPN procesando los datos en el ámbito de la geofísica.

### **3.5 Población de Estudio y Tamaño de Muestra**

Para el cálculo del muestreo se obtendrá la siguiente fórmula de población finita, el cual habla cuando se tiene conocimiento del total de unidades que están integradas. Para la fórmula se opta por escoger un error del 5% y confiabilidad del 95% con un valor Z de 1.96 (Aguilar, 2005):

$$n = \frac{Z^2 * p * q * N}{e^2 * (N - 1) * Z^2 * p * q}$$

En donde (N) es el tamaño de la población, (Z) es nivel de confianza al 95% cuyo valor será de 1.96, (p) es la proporción esperada cuyo valor será de 50%, (q) es el

complemento de p, donde: q: 1-p, (e) es error aceptable estimado al 5%. Para el muestreo de este estudio se utilizan los siguientes datos pertinentes calculados por cada provincia:

$$\text{Chimborazo } (n) = \frac{(1.96)^2 * 0.5 * 0.5 * 3}{(0.05)^2 * (3 - 1) + (1.96)^2 * 0.5 * 0.5} = 3$$

$$\text{Bolívar } (n) = \frac{(1.96)^2 * 0.5 * 0.5 * 1}{(0.05)^2 * (1 - 1) + (1.96)^2 * 0.5 * 0.5} = 1$$

Evidentemente al tener una población finita y muy reducida, los cálculos arrojaron que la población será igual que la muestra, comprobando la fórmula propuesta por Aguilar.

### **3.6 Hipótesis**

Con todo lo referente a lo establecido hasta el momento, se formula la siguiente hipótesis: Las estaciones acelerográficas de las provincias de Chimborazo y Bolívar se encuentran en un medio estratificado.

### **3.7 Procesamiento y análisis de datos**

#### ***3.7.1 Procesamiento y análisis de datos para la caracterización del suelo por métodos geotécnicos***

Se utilizó el ensayo de SPT realizados en Guamote, Alausí, Guaranda y Riobamba, lugares donde el Instituto Geofísico tiene instalado estaciones acelerográficas (*ver anexo #19 al #23 de mapas*). La tabulación de datos obtenidos se ha realizado mediante el Software Microsoft Excel, que permite representar la profundidad, ubicación, coordenadas, N del SPT y en este caso debe ser completada con los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio que serán explicados a continuación.

#### ***3.7.2 Procesamiento y análisis de datos para ensayos de laboratorio.***

Con el análisis a muestras alteradas (SPT) e inalteradas (Calicatas) en los laboratorios de Ingeniería Civil, los cuales permitieron obtener humedades, granulometría, límites de

Atterberg, además de relaciones volumétricas y gravimétricas. La tabulación de datos se realizó mediante el software Microsoft Excel, permitiendo encontrar el tipo de suelo en cada una de las estaciones mediante la clasificación SUCS y Vs30 en las muestras alteradas.

### ***3.7.3 Procedimiento y análisis de datos para la caracterización del suelo por métodos geofísicos.***

**MASW (Análisis multicanal de ondas superficiales):** se efectuó un ensayo de campo colocando 24 geófonos de 4,5 Hz de frecuencia de corte a lo largo de una línea de aproximadamente 60 metros con espaciamiento de 2.5 metros que registran ondas especialmente de tipo Rayleigh producidas al golpear una placa metálica con un martillo de 9 kg, estas son captadas por un sismógrafo de exploración de geodas instalado junto a una computadora (Barros et al., 2018). La tabulación de los datos se realizó mediante el software Geopsy con una doble transformada de Fourier en tiempo y espacio, para obtener la curva de dispersión de las ondas Rayleigh. Posteriormente con un modelo de inversión de la curva de dispersión se obtiene el perfil de velocidad de onda S (onda de corte). Con el manejo del software del Geopsy para el método MASW se requiere tener interpretación de las pestañas del programa, dichos conceptos son los siguientes:

**Frecuencia de muestreo:** es igual al número de muestras (estaciones), por unidad de distancia o de tiempo (Bertran, 2006).

**Normalización:** es la estandarización de señales cuando las amplitudes que captan los sensores son muy altas en comparación con otras. De esta forma se puede normalizar un conjunto de señales por la máxima amplitud registrada, o a su vez, se normaliza cada señal con su máxima amplitud de manera individual (Humire et al., 2015).

**Stacking:** también llamado “apilamiento”, es la combinación de señales para reducir la vibración ambiental. Generalmente las señales registradas en los ensayos activos tienen presencia de ruido ambiental dependiendo el lugar del ensayo, puede ser urbano o rural, etc.

Por lo que para mejorar la calidad de los resultados se combinan las señales “stacking” disminuyendo el ruido presente en la señal detectada. Esta técnica puede ser efectuada tanto en tiempo como en frecuencia (Humire et al., 2015)

**Procesamiento F-K activo y configuración de parámetros:** la conversión de datos  $x_t$  al dominio F-K permite la identificación de la velocidad de fase a través de la relación  $v=f/k$ , con la velocidad de fase ( $v$ ) asociada a la frecuencia ( $f$ ) y al número de onda ( $k$ ). La determinación del espectro de velocidad se puede realizar a través de la transformada Tau-p que consiste en sumar todas las amplitudes contenidas a lo largo de varios rayos ( $p$ ) y luego aplicar una transformada de Fourier en la dirección (Tau) para obtener la frecuencia asociada con la velocidad (Gómez et al., 2022). La integral de la técnica Tau-p es:

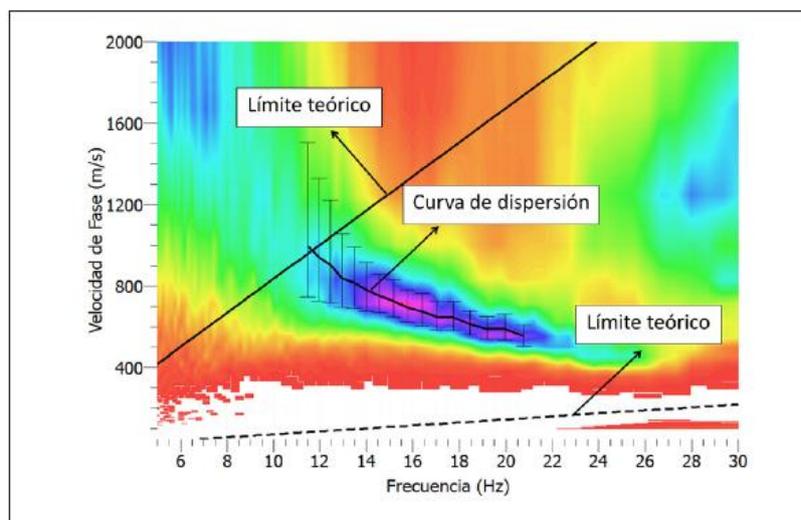
$$\Psi (p, \tau) = \int_{-}^{+\infty} \varphi * (X, \tau + px) dx$$

**Curvas de dispersión:** Humire et al., (2015) afirma que la “curva que describe la variación de la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh (velocidad de fase) en función de la frecuencia (o longitud de onda)” (p.11).

**Límites teóricos de la curva dispersión:** definido por las características del arreglo de geófonos utilizado. Dicha curva de dispersión solo puede encontrarse dentro de los límites teóricos (Humire et al., 2015), dichos límites teóricos están determinados por el tamaño del arreglo y el espaciamiento entre geófonos los cuales definen si la información obtenida es confiable. Estos límites dependen de la longitud del arreglo ( $D_{max}$ ) y distancia entre geófonos ( $d_{min}$ ) los cuales definen la longitud máxima ( $\lambda_{max}$ ) y mínima ( $\lambda_{min}$ ) (Haumire et al., 2015a). Park (1999) propone una simplificación para arreglos lineales:

$$(\lambda_{min}) = 2 (d_{min})$$

$$(\lambda_{máx}) = 2 (D_{máx})$$



**Figura 8.** Gráfico de límites teóricos para la curva de dispersión.

**Fuente:** (Humire et al., 2015).

**Normalización (Beam Power normalization):** es útil para reducir la contribución en el procesamiento  $fk$  de señales de gran amplitud cerca del punto de origen. La normalización puede depender del desplazamiento de distancia a lo largo del perfil y del contenido de energía de la señal (Wathelet et al., 2020).

**Beam Power:** sin ninguna normalización (beam power) la curva de dispersión puede no ser claramente visible en todo el ancho de banda debido a los cortes de frecuencia en geófonos y tierra. (Geopsy, 2007).

**Spectrum power:** el espectro de estructura es una herramienta avanzada de procesamiento de señales que tiene como objetivo estimar la función de transferencia de un sistema mediante el cálculo de la relación espectral entre las señales de entrada y salida (Geopsy, 2021).

**Maximun Beam Power:** el valor máximo de la potencia del haz en función de la frecuencia está controlado principalmente por la energía disponible a una frecuencia dada y por la cantidad de energía que viaja efectivamente a una velocidad definida (Geopsy, 2007).

**Ruido Sísmico Ambiental (RSA):** se colocó un sismómetro Trillium compact 20s y un digitalizador de banda ancha REFTEK RT-130 el cual va conectado a un GPS de tiempo y una batería de 12 voltios. Dicho sistema de conexión utilizado para el registro del Ruido Sísmico Ambiental fue instalado en puntos estratégicos en cada ciudad de estudio. En las ciudades de Guamote, Alausí y Guaranda se realizó una grabación de 12 horas consecutivas, sin embargo, en la ciudad de Riobamba la grabación tuvo una duración de 4 días consecutivos.

**H/V (mHVSR):** con los datos grabados del RSA se procesaron las señales en el software Geopsy ocupando un ventaneo mínimo de 200 segundos, el cual aplicando una serie de filtros se calcula los espectros de las componentes horizontales para luego obtener el promedio cuadrático y finalmente ser dividido para el espectro de la componente vertical; este proceso se realiza para cada una de las ventanas. Con esto se logra obtener la frecuencia fundamental del suelo realizando la comparación de cual sitio va a tener una mayor amplificación. Para el manejo del Geopsy sobre el método H/V (mHVSR) se requiere tener interpretación de las pestañas del programa, dichos conceptos son los siguientes:

**Waverform:** con esta herramienta se puede utilizar para aplicar varias opciones de procesamiento a un gran conjunto de señales al mismo tiempo (Geopsy, 2010).

**Subtract Value:** se define como “restar valores” y es una opción del menú Waverform que elimina su desplazamiento y lleva a toda la señal al eje cero ya que generalmente las señales se encuentran desplazadas del eje causado por el cambio de temperatura que llegan a afectar a los sensores (Castillo & Urrutia, 2017).

**Removed Trend:** significa “remover tendencias”. Tendencia es el aumento o disminución de una serie a lo largo del tiempo, dicha tendencia hace desviar la señal de su recorrido original. Por ende, al remover la tendencia, esta función endereza y corrige la señal evitando desviarse de la línea cero (Geopsy, 2010).

**Longitud de ventana:** aunque el SESAME permite una longitud de ventana de 50 segundos y duración de grabación de 30 min, aquí se requiere analizar la frecuencia de corte mínima del sensor calculando la longitud de ventana que en este caso es de 200 segundos. Para garantizar dicha medida el SESAME recomienda cumplir con la siguiente condición:

$$l_w > \frac{10}{f_0}$$

Donde ( $l_w$ ) es la longitud de la ventana, ( $f_0$ ) es la frecuencia fundamental, (10) el número de ciclos significativos. Se usará la frecuencia de corte del sismógrafo Trillium compact 20s= 0.05s

$$l_w > \frac{10}{0.05} \quad l_w > 200s$$

**Tabla 7.** Duración de grabación recomendada

f0 (hz)an	Valor mínimo para lw (seg)	Número mínimo significativo de ciclos (nc)	Mínimo número de ventanas	Mínimo útil de duración de la señal (seg)	Recomendado registro mínimo de duración
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

**Fuente:** (SESAME, 2004)

**Threshold:** significa “umbral de muestras incorrectas”, esta opción elimina eficazmente las ventanas demasiado ruidosas (Bundesanstalt, 2014) y erradas el cual los valores no deseados entorpecen el análisis y llevan a interpretaciones falsas de la curva H/V (Bonifaz, 2022), de esta forma se busca solo ventanas utilizables. Para esto se ingresa el valor en porcentaje deseado de muestreo de ventanas correctas para su respectivo estudio. El software elige el pico más alto de la señal y lo relaciona con el porcentaje ingresado en esta opción para escoger un ventaneo con un criterio de señales (Geopsy, 2013).

**Trigering (Tla/Sta):** este algoritmo nos ayuda a determinar las frecuencias naturales, descartando señales artificiales que son producidas por maquinarias, personas, etc producidas muy cerca del sensor (Parra & Sarango, 2016).

**High Pass Filter:** llamado “filtro de paso alto” es una herramienta que filtra las señales por debajo de un valor establecido al momento de procesado, es decir que elimina frecuencias extremadamente bajas. El valor digitado debe corresponder a la frecuencia mínima del sismómetro, en este caso el sismógrafo tiene una frecuencia mínima es de  $1/20 = 0.05$  hz. El valor erróneo insertado puede distorsionar la gráfica (Geopsy, 2013). El periodo propio de este sismómetro significa que el aparato tarda 20 segundos en oscilar naturalmente cuando es perturbado por una vibración. Su frecuencia mínima es de  $1/20 = 0.05$  hz, y su máxima es de 100hz.

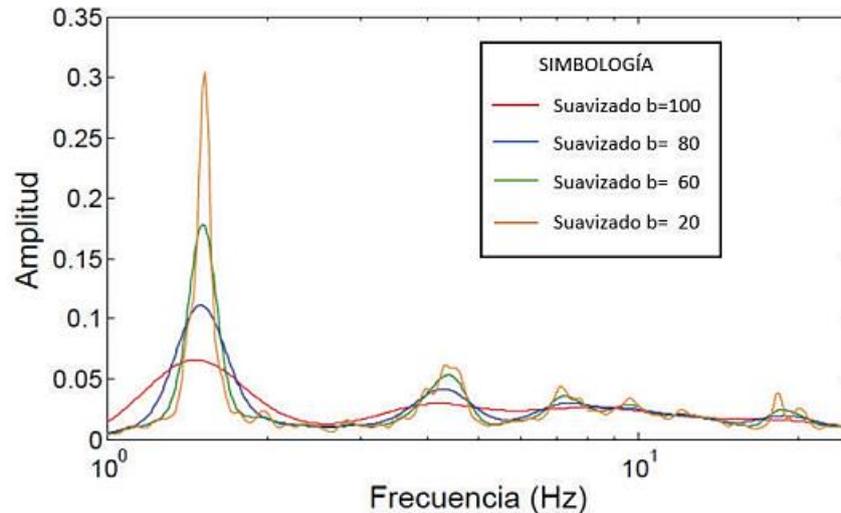
**Taper:** consiste en multiplicar una ventana de señales en el tiempo, por una función suave y nula en los extremos. El forzar una señal cero en los extremos evita la aparición de altas frecuencias producidas por el corte abrupto de la señal inicial y al final, considerando una señal periódica. Realizamos un “Taper” de 5% a cada ventana, al inicio y al final de cada una de ellas para minimizar la distorsión de la transformada rápida de Fourier (Parra & Sarango, 2016).

**Tukey:** Esta función es utilizada para reducir las discontinuidades en los bordes de la señal y suavizar la transición entre la señal y ruido de fondo.

**Smoothing:** la función de Konno-Ohmachi (1998) que forma parte de la herramienta Smoothing de la técnica H/V del software Geopsy, se usa con el objetivo de suavizar y aclarar el aspecto de las curvas, este método es de tipo trigonométrico logarítmico y se representa de la siguiente manera:

$$WB(f, fi) = \left( \frac{\sin(b * \log_{10}(\frac{f}{f_c}))}{b * \log_{10}(\frac{f}{f_c})} \right)^4$$

En donde (f) es la frecuencia, ( $f_c$ ) es la frecuencia central y (b) es el coeficiente de ancho de banda. El suavizado de esta herramienta es controlado por porcentajes que va de 0 a 100%; si se ubica un suavizado muy bajo las gráficas pueden distorsionarse y viceversa, generalmente se toma un valor de entre 20% a 40% (Parra & Sarango, 2016).



**Figura 9.** Suavizado de Konno Ohmachi con distintos valores

**Fuente:** (Parra & Sarango, 2016).

**Rangos de Frecuencia:** el rango de frecuencias de medición para el H/V será ajustado según la preferencia del usuario (Wathelet et al., 2020). Una frecuencia de 50hz es suficiente ya que la frecuencia máxima de interés en este estudio para ingeniería no supera los 25hz, aunque las frecuencias más altas no influyen en los resultados de la curva H/V. Para frecuencias bajas menores a 1hz, el origen es netamente natural con énfasis en las olas del mar cuya energía máxima está a los 0.2hz. Para frecuencias altas mayores a 1hz, el origen es antropogénico con actividades de tráfico y maquinaria. Pero como se mencionó anteriormente, este valor puede darse entre los 20 a 25hz, y no varía en resultados si se toman valores superiores (SESAME, 2004). El proyecto SESAME 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,

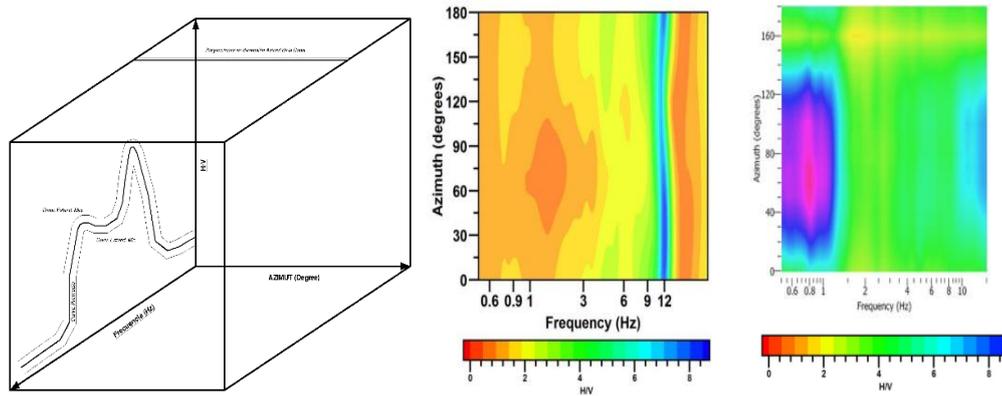
en el cual se detallan los procedimientos a tomar en cuenta para el registro de datos en el lugar de estudio (SESAME, 2004).

**Tabla 8.** Diferenciación de las vibraciones ambientales según el SESAME.

<b>Origen de las vibraciones Nombre</b>	<b>Natural Microsismos</b>	<b>Humano Microtremores (microtemblores)</b>
Frecuencia que predomina en la vibración aproximada a la fuente	0.1 hz a 1 hz (baja frecuencia)	1 hz a 10 hz (alta frecuencia)
Onda incidente	Oceánico y condiciones atmosféricas (frecuencias muy bajas) Ondas superficiales (fuentes lejanas)	Tráfico e industrias Ondas superficiales + ondas internas (fuente cercana)
Variación en amplitud Rayleigh y Love	Relacionada con ondas oceánicas y predominantes Rayleigh	Día, noche, semana y fin de semana Amplitud comparable. Love con un poco más de energía
Modo fundamental y modos superiores	Principalmente fundamental	Posibilidad de modos más altos en frecuencias altas (al menos en el caso de dos capas)

**Fuente:** (SESAME, 2004).

**H/V Rotado:** el análisis de H/V rotado es la representación del gráfico H/V en el plano horizontal de la frecuencia en función del Azimut rotando cada 10 grados (SESAME, 2004). Esta herramienta es muy útil para comprobar la dirección de la máxima liberación de energía (Ali & Mostafa, 2020), y garantizar que los picos del gráfico H/V sean de origen natural o artificial. El rango de rotación se da de 0 a 180° de manera horizontal girando hacia las agujas del reloj de Norte a Sur. Si la energía captada oscila entre los valores de 0° a 180°, indica que el sensor capta valores en todas las direcciones pero si sucede lo contrario se hablaría de que dicha energía procede de una fuente concentrada o fuente antropogénica (Alam et al., 2013).



**Figura 10.** El gráfico central indica una fuente de energía natural. Sin embargo, el gráfico derecho muestra una concentración de energía entre 40° y 120° lo cual es causado por una fuente externa.

**Fuente:** (Alam et al., 2013).

**Espectro Rotado:** sabiendo que espectro es la dispersión de un conjunto de datos de amplitud a lo largo de la frecuencia. Esta dispersión puede variar según las condiciones existentes. Por lo tanto, un espectro rotado es la representación del promedio aritmético de espectros de la amplitud de Fourier de las componentes horizontales en función del Azimut y se calculan de 0° a 180° rotando cada 10° para representar y encontrar la amplitud espectral máxima por parte de los microsismos en todas las direcciones (Puzzilli et al., 2021) identificando si es de una fuente natural o no (Degli et al., 2014).

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Análisis Geotécnico de los Perfiles Estratigráficos Obtenidos Mediante el Ensayo de SPT en Campo y Ensayos de Laboratorio.

En el siguiente apartado se mostrará los resultados de los especímenes de suelo realizados con el ensayo de SPT en Guamote, Alausí, Guaranda y Riobamba. Cada una de las muestras han sido analizadas en laboratorio mediante los ensayos de humedad, granulometría seca y límites de Atterberg. Referente al ensayo de relaciones volumétricas y gravimétricas se ejecutó con especímenes de muestras de las calicatas de cada punto en estudio.

**Tabla 9.** Resultados de ensayos de humedad para muestras de suelo por profundidades en cada ciudad aplicando la norma ASTM D2216.

<b>Prof. (m)</b>	<b>Pto. 1 “Guamote”</b>	<b>Pto. 2 “Alausí”</b>	<b>Pto. 3 “Guaranda”</b>	<b>Pto. 4 “Riobamba”</b>
1 a 1.5 m	21%	10%	45%	6%
2 a 2.5 m	-	12%	52%	11%
3 a 3.5 m	11%	15%	59%	6%
4 a 4.5 m	12%	16%	94%	5%
5 a 5.5 m	19%	17%	92%	12%
6 a 6.5 m	13%	-	58%	17%
7 a 7.5 m	18%	-	44%	10%
8 a 8.5 m	-	-	39%	7%
9 a 9.5 m	-	-	27%	-
10 a 10.5 m	-	-	31%	-
11 a 11.5 m	-	-	34%	-
12 a 12.5 m	-	-	28%	-

**Tabla 10.** Resultados de ensayos de granulometría por vía seca con clasificación según SUCS en cada ciudad aplicando la norma ASTM C136.

Prof. (m)	Pto. 1	Pto. 2	Pto. 3 “Guaranda”	Pto. 4
	“Guamote”	“Alausí”		“Riobamba”
1 a 1.5 m	Arena mal graduada con Limo (SP – SM)	Arena Bien Graduada con Limo y Grava (SW – SM)	Arena mal graduada con Limo (SP – SM)	Arena Limosa (SM)
2 a 2.5 m	-	Arena Bien Graduada con Limo y Grava (SW – SM)	Arena Limosa (SM)	Arena Limosa (SM)
3 a 3.5 m	Limo Arenoso (ML)	Arena Bien Graduada con Limo y Grava (SW – SM)	Arena Limosa Arcillosa (SC – SM)	Arena Limosa (SM)
4 a 4.5 m	Arcilla Limosa (CL – ML)	Arena bien graduada con Arcilla y Grava (SP – SC)	Arena Limosa (SM)	Arena Limosa (SM)
5 a 5.5 m	Arena Limosa (SM)	Arena Bien Graduada con Limo y Grava (SW – SM)	Arena Limosa (SM)	Arena Limosa (SM)
6 a 6.5 m	Arena Limosa (SM)	-	Arena Limosa (SM)	Arena Limosa (SM)
7 a 7.5 m	Arena Limosa Arcillosa (SC – SM)	-	Arena Limosa (SM)	Arena Limosa (SM)
8 a 8.5 m	-	-	Arena Limosa (SM)	Arena Limosa (SM)
9 a 9.5 m	-	-	Arena mal graduada con Limo (SP – SM)	-
10 a 10.5 m	-	-	Arena Limosa (SM)	-
11 a 11.5 m	-	-	Arena Limosa (SM)	-
12 a 12.5 m	-	-	Grava mal graduada con Limo (SP – SM)	-

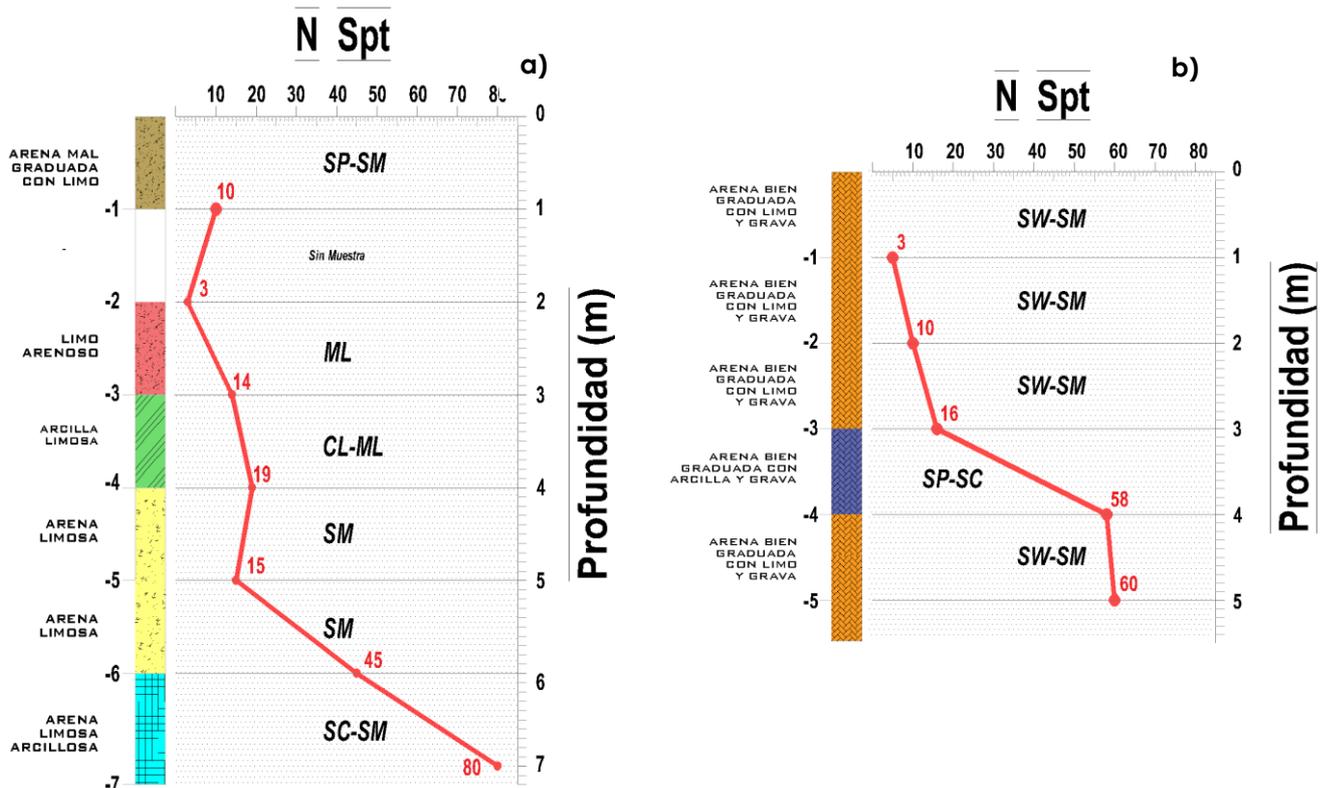
**Tabla 11.** Resultados de los ensayos de límites de Atterberg con su respectivo límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad en cada ciudad aplicando la norma ASTM D4318.

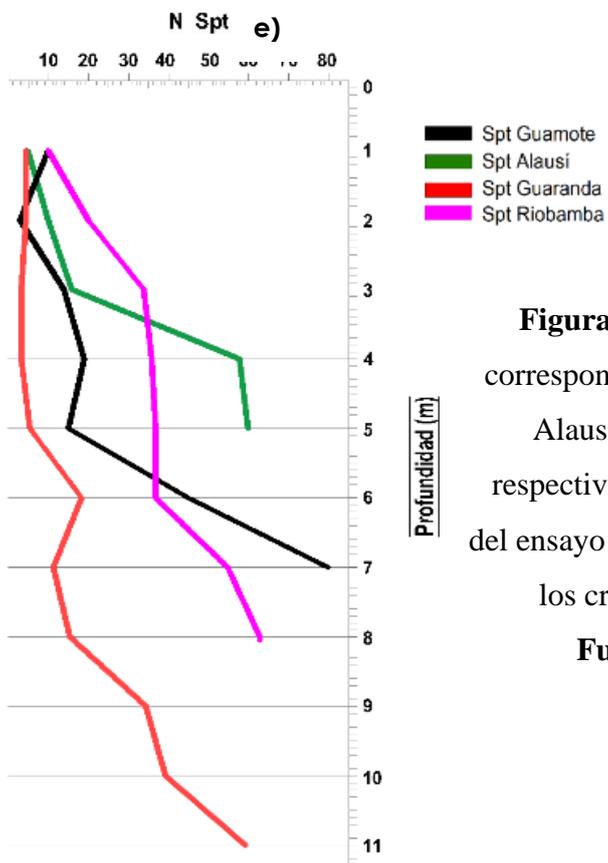
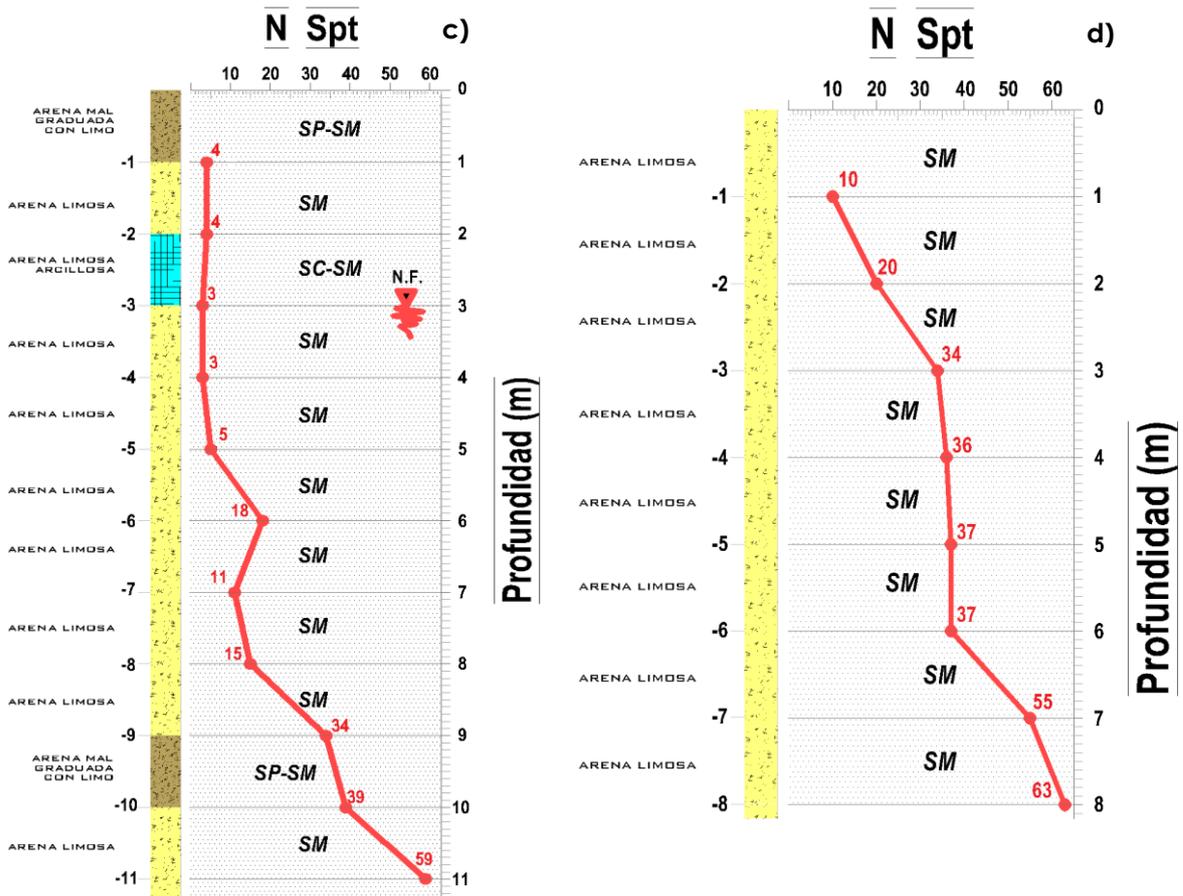
Prof. (m)	Pto. 1 “Guamote”			Pto. 2 “Alausí”			Pto. 3 “Guaranda”			Pto. 4 “Riobamba”		
	%LL	%LP	%IP	%LL	%LP	%IP	%LL	%LP	%IP	%LL	%LP	%IP
1 a 1.5 m	21.0	17.8	3.2	30.0	28.2	1.8	45.1	41.7	3.4	23.0	-	-
2 a 2.5 m	-	-	-	29.5	27.0	2.5	45.1	42.4	2.7	24.0	NP	-

3 a 3.5 m	12.9	11.4	1.5	29.0	NP	-	44.2	39.8	4.4	20.0	NP	-
4 a 4.5 m	25.5	20.4	5.1	29.4	24.8	4.6	29.0	25.5	3.5	21.0	NP	-
5 a 5.5 m	23.1	19.2	3.9	28.0	26.7	1.3	48.8	45.8	3.0	23.1	20.8	2.3
6 a 6.5 m	25.0	21.7	3.3	-	-	-	52.9	47.7	5.2	23.7	20.5	3.2
7 a 7.5 m	27.2	23.1	4.1	-	-	-	25.0	NP	-	20.7	NP	-
8 a 8.5 m	-	-	-	-	-	-	28.0	NP	-	21.2	NP	-
9 a 9.5 m	-	-	-	-	-	-	26.0	NP	-	17.8	NP	-
10 a 10.5 m	-	-	-	-	-	-	26.9	NP	-	-	-	-
11 a 11.5 m	-	-	-	-	-	-	27.5	NP	-	-	-	-
12 a 12.5 m	-	-	-	-	-	-	27.1	NP	-	-	-	-

**Tabla 12.** Resultados de los ensayos de relaciones volumétricas y gravimétricas (método de parafina) con muestras de suelo pertenecientes a las calicatas extraídas en los 4 puntos de estudio aplicando la norma ASTM D7263-09.

Prof. (m)	Pto. 1 “Guamote”	Pto. 2 “Alausí”	Pto. 3 “Guaranda”	Pto. 4 “Riobamba”
Calicata (1.2m)	1.20 gr/cm <sup>3</sup>	1.09 gr/cm <sup>3</sup>	1.16 gr/cm <sup>3</sup>	1.18 gr/cm <sup>3</sup>



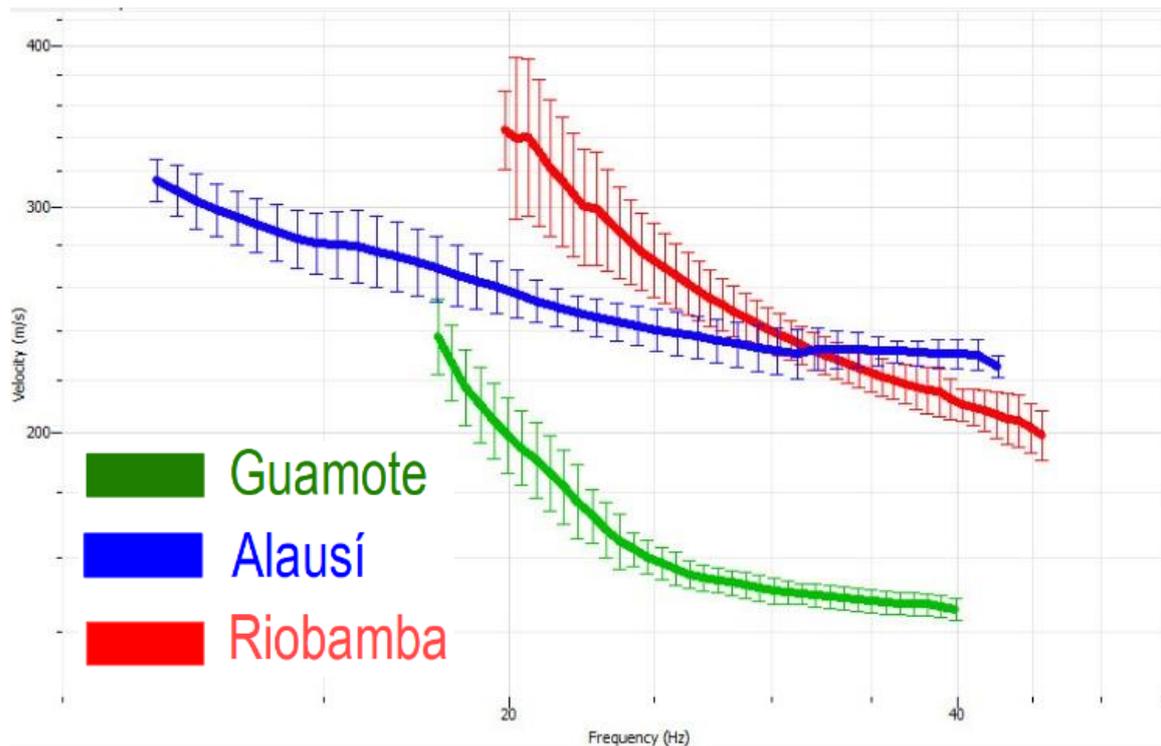


**Figura 11.** Perfiles estratigráficos de suelo correspondientes a las ciudades de Guamote (a), Alausí (b), Guaranda (c) y Riobamba (d) respectivamente; además del número de golpes del ensayo de SPT hasta obtener rechazo (e) según los criterios de la norma ASTM D1586.

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

## 4.2 Análisis de los Resultados Obtenidos Mediante Ensayos de Sísmica Activa (MASW) y Sísmica Pasiva (RSA).

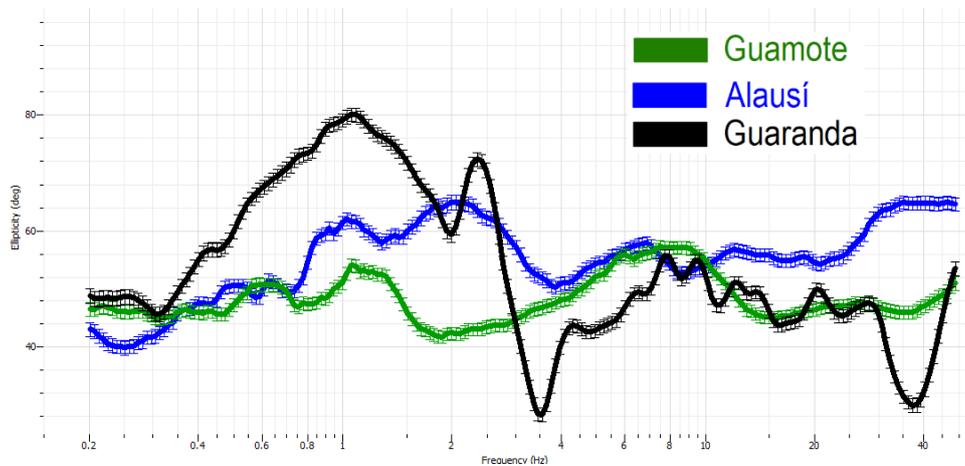
Del Análisis de las ondas superficiales de las líneas sísmicas colocadas en cada una de las 4 ciudades se obtuvieron 3 curvas de dispersión (CD) de las ondas Rayleigh (superficiales).



**Figura 12.** Curvas de dispersión (CD) resultantes de la línea sísmica en cada ciudad en estudio. Línea verde CD de Guamote, línea azul CD de Alausí, línea roja CD de Riobamba.

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

Del análisis de la grabación de ruido sísmico ambiental, en las 4 ciudades en estudio se obtuvieron 3 curvas (mHVSr o HV), como se muestra a continuación:



**Figura 13.** Curvas H/V provenientes de sensores de la grabación de registro de ruido sísmico ambiental. Línea verde Curva H/V (mHVSr) Guamote, línea azul Curva H/V (mHVSr) Alausí, línea negra Curva H/V (mHVSr) Guaranda.

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

Con las curvas de dispersión (CD) y las relaciones espectrales (mHVSr), se procedió a realizar una inversión conjunta en las ciudades donde fue posible, para obtener el perfil de velocidad de onda S.

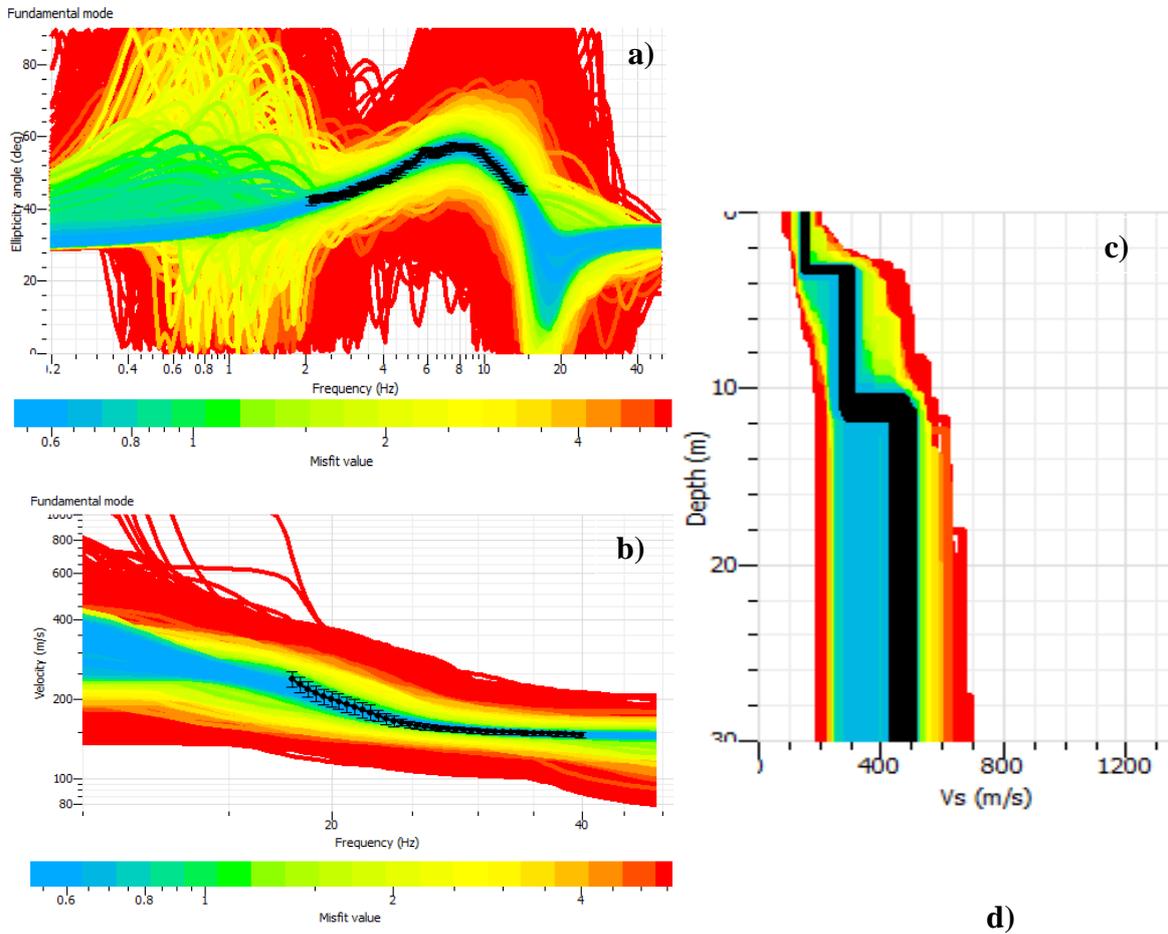
**Tabla 13.** Resumen de los ensayos geofísicos que se obtuvieron en las 4 ciudades.

<b>Resultados obtenidos de ensayos por métodos geofísicos</b>		
<b>Ciudad</b>	<b>Curva de dispersión</b>	<b>Curva mHVSr</b>
Riobamba	✓	X
Alausí	✓	✓
Guamote	✓	✓
Guaranda	X	✓

**Nota:** No se pudo obtener la Curva de dispersión (CD) en la ciudad de Guaranda y la curva H/V (mHVSr) en la ciudad Riobamba no es confiable.

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

Los resultados obtenidos de la inversión de la curva de dispersión (CD) y Curva mHVSr en la ciudad de Guamote se muestran a continuación:

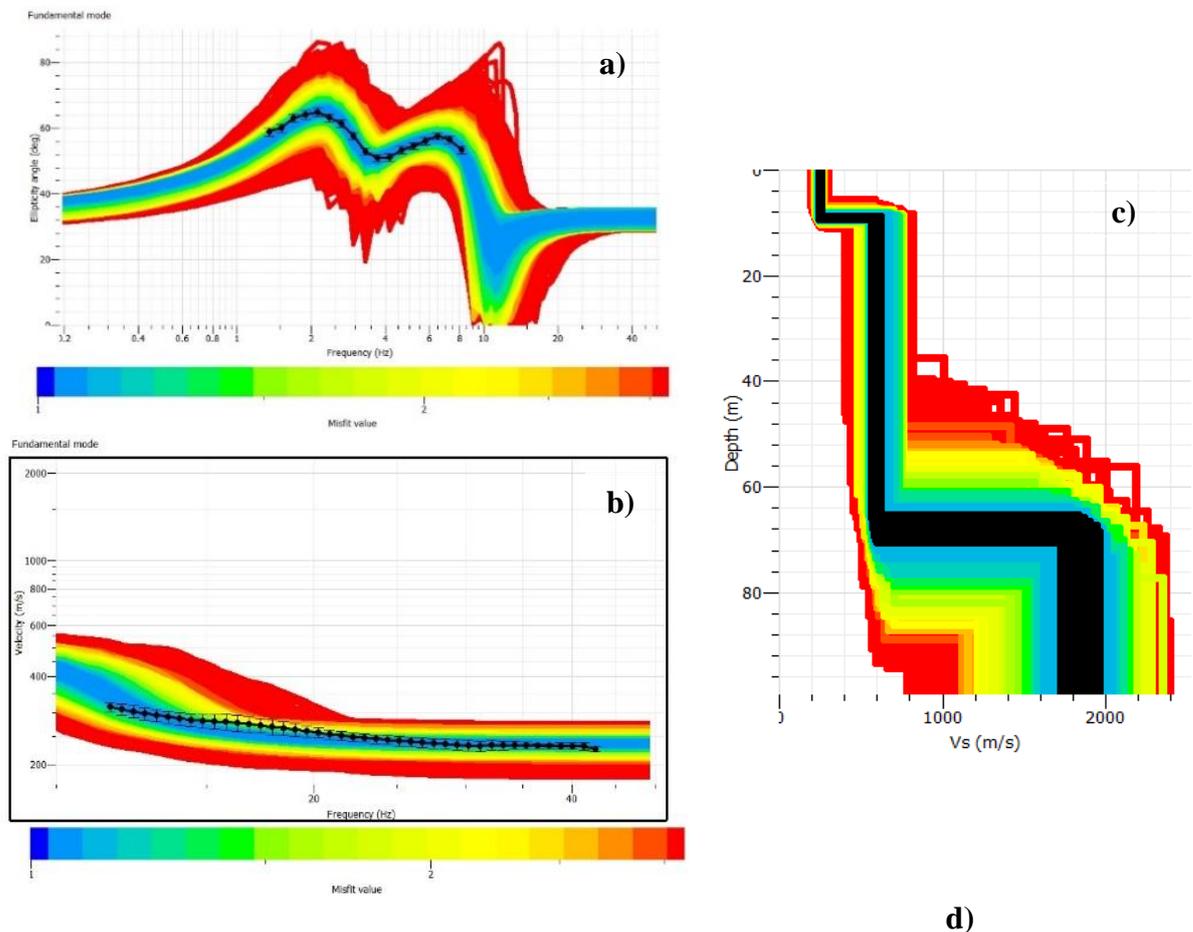


Guamote					
Velocidad de onda de corte del suelo que sobreyace al semiespacio			Velocidad de onda de corte hasta los 30m		
# Capa	Prof. Aprox. (m)	Vs (m/s)	# Capa	Espesor de Capa (m)	Vs (m/s)
Capa 1	hasta 2 - 3	130 - 180	Capa 1	2,5	155
Capa 2	hasta 10 - 11	270 - 310	Capa 2	8	290
Capa 3	En adelante	420 - 520	Capa 3	19,5	485
<b>Vs30 =</b>					<b>360</b>

**Figura 14.** a) Modelo de inversión con curva dato mHVSr, b) Modelo de inversión con curva dato de dispersión, c) Perfil de velocidad de onda de corte obtenido de la inversión de la curva de dispersión CD más la curva mHVSr, d) Velocidad de onda de corte a los 30m y hasta el semiespacio en la ciudad de Guamote

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

Los resultados obtenidos de la inversión de la curva de dispersión (CD) y Curva (mHVSR) en la ciudad de Alausí se muestra a continuación:

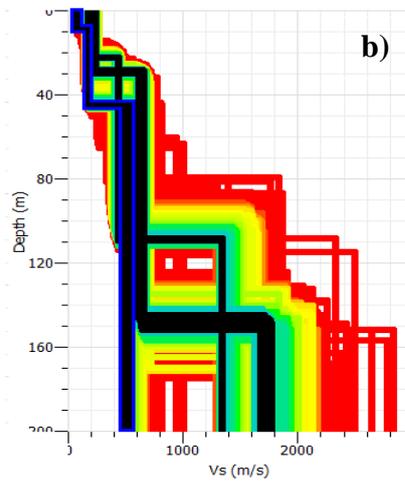
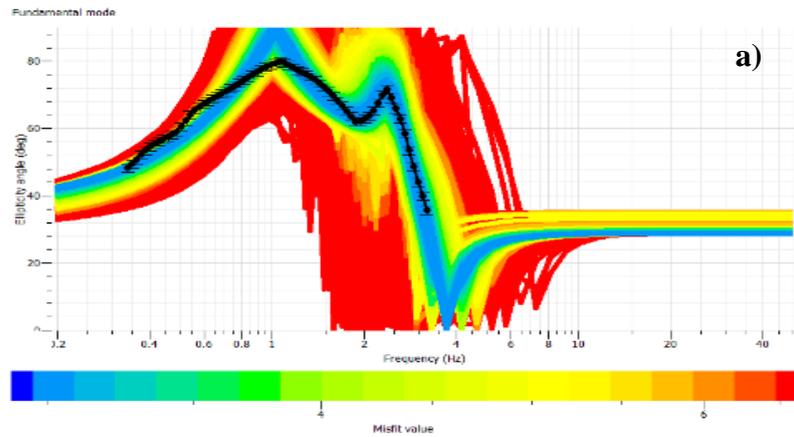


Alausí						
Velocidad de onda de corte del suelo que sobreyace al semiespacio			Velocidad de onda de corte hasta los 30m			
# Capa	Prof. Aprox. (m)	Vs (m/s)	# Capa	Espesor de Capa (m)	Vs (m/s)	
Capa 1	hasta 8 - 10	210 - 250	Capa 1	9	230	
Capa 2	hasta 65 - 78	560 - 620	Capa 2	21	590	
Capa 3	En adelante	1650 - 1980	Capa 3	-	-	
					<b>Vs30 = 400</b>	

**Figura 15.** a) Modelo de inversión con curva dato mHVSR, b) Modelo de inversión con curva dato de dispersión, c) Perfil de velocidad de onda de corte obtenido de la inversión de la curva de dispersión CD más la curva mHVSR, d) Velocidad de onda de corte a los 30m y hasta el semiespacio en la ciudad de Alausí.

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

Los resultados obtenidos de la inversión de la Curva mHVSr en la ciudad de Guaranda se muestran a continuación:



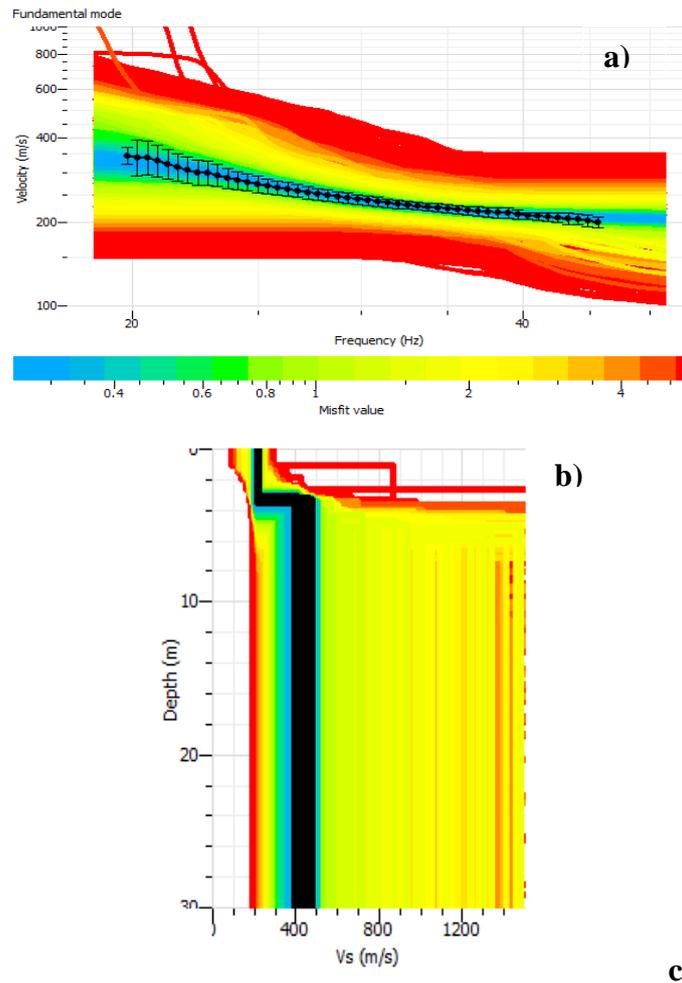
**c)**

<b>Guaranda</b>						
<b>Velocidad de onda de corte del suelo que sobreyace al semiespacio</b>			<b>Velocidad de onda de corte hasta los 30m</b>			
Solución 1	# Capa	Prof. Aprox. (m)	Vs (m/s)	# Capa	Esesor de Capa (m)	Vs (m/s)
		Capa 1	hasta 9 - 10	80 - 100	Capa 1	9,5
	Capa 2	hasta 42 - 44	140 - 180	Capa 2	20,5	160
	Capa 3	En adelante	420 - 480	<b>Vs30 =</b>		<b>130</b>
Solución 2	Capa 1	hasta 26 - 27	210 - 230	Capa 1	26.5	220
	Capa 2	hasta 150 - 160	620 - 650	Capa 2	3.5	635
	Capa 3	En adelante	1700 - 1740	<b>Vs30 =</b>		<b>130</b>

**Figura 16.** a) Modelo de inversión con curva dato mHVSr, b) Perfil de velocidad de onda de corte obtenido de la inversión de la curva mHVSr, c) Velocidades de onda de corte a los 30m hasta el semiespacio con dos posibles soluciones en la ciudad de Guaranda.

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

Los resultados obtenidos de la inversión de la curva de dispersión (CD) en la ciudad de Riobamba se muestra a continuación:



Riobamba					
Velocidad de onda de corte del suelo que sobreyace al semiespacio			Velocidad de onda de corte hasta los 30m		
# Capa	Prof. Aprox. (m)	Vs (m/s)	# Capa	Espesor de Capa (m)	Vs (m/s)
Capa 1	hasta 3 - 4	200 - 220	Capa 1	3,5	210
Capa 2	En adelante	400 - 500	Capa 2	26,5	450
<b>Vs30 =</b>					<b>400</b>

**Figura 17.** a) Modelo de inversión con curva dato de dispersión, b) Perfil de velocidad de onda de corte obtenido de la inversión de la curva de dispersión CD, c) Velocidad de onda de corte a los 30m y hasta el semiespacio en la ciudad de Riobamba.

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

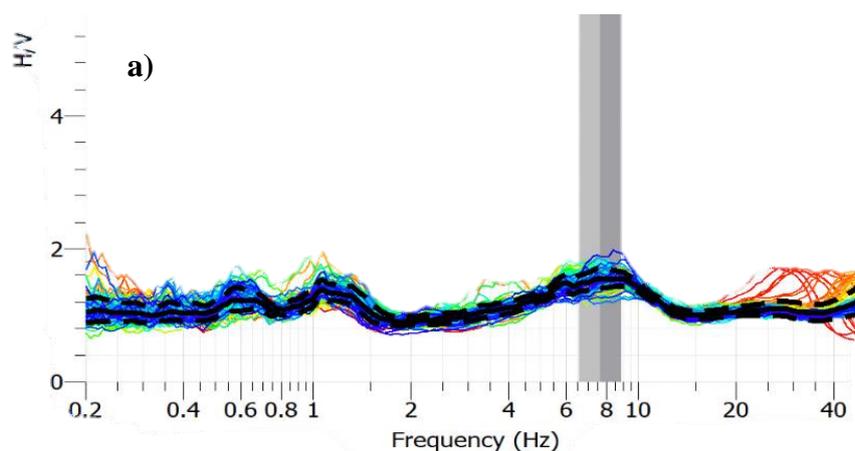
### 4.3 Discusión de Resultados Geofísicos y Geotécnicos

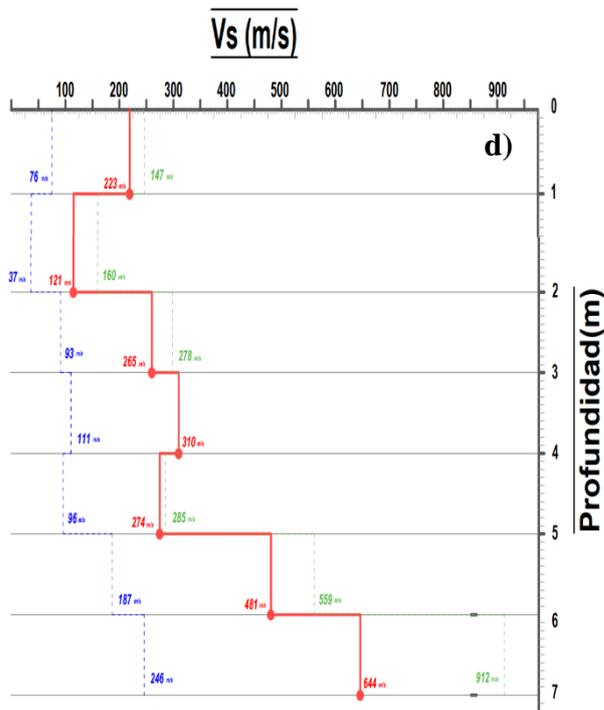
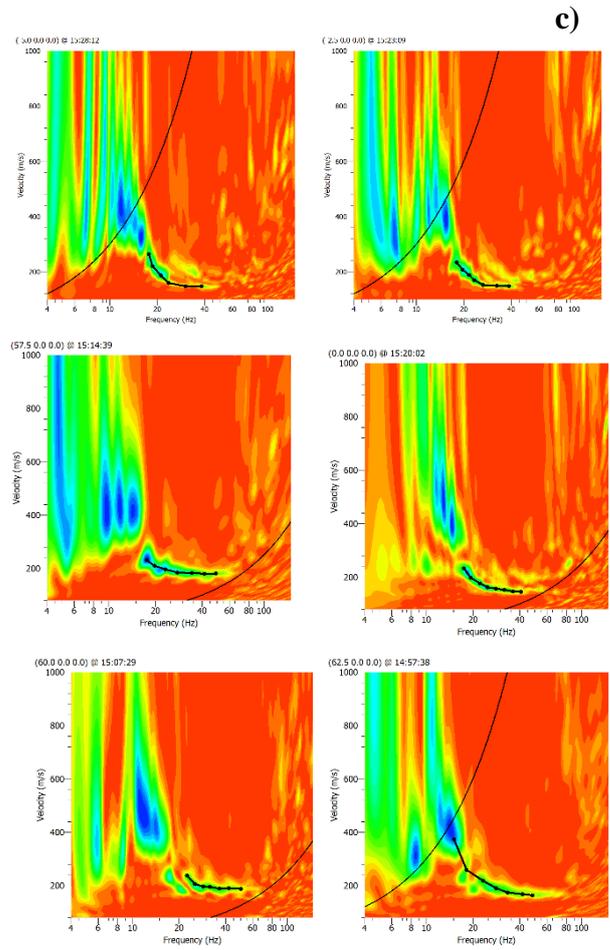
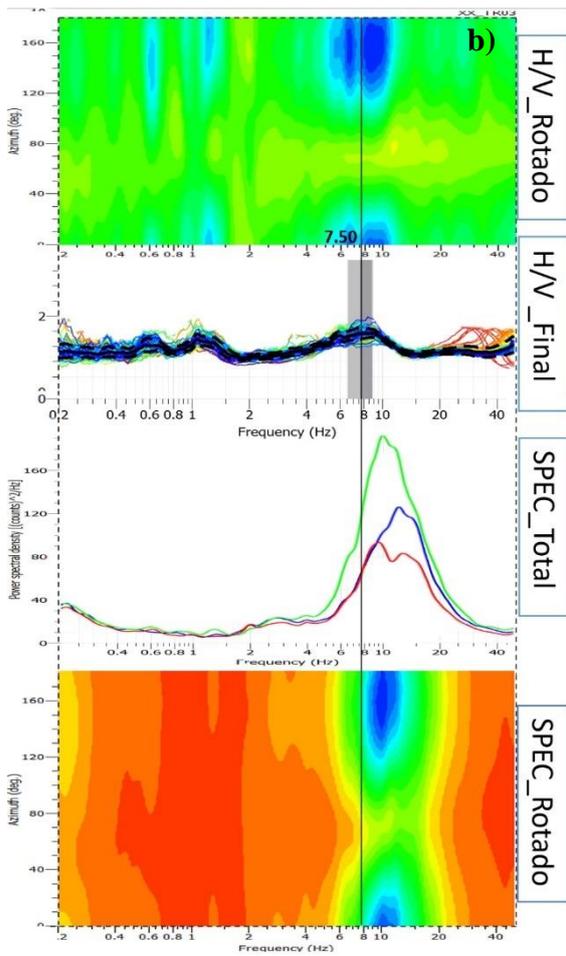
#### 4.3.1 *Guamote*

La caracterización Geotécnica del suelo de la estación acelerográfica de Guamote (AGMT) señala según los análisis de los ensayos realizados, una columna estratigráfica con mezcla entre Arena Limosa SM y Limo Arenoso ML. Juntamente con el ensayo de SPT hasta una profundidad de 7m y una velocidad media de onda de corte ( $V_{s30}$ ) de 549m/s en los primeros 30m tal y como lo indica la norma NEC15, se evidencia un perfil de suelo tipo “C”.

No obstante, se presentan limitaciones del ensayo SPT al momento de calcular el  $V_{s30}$  por la aplicación de fórmulas empíricas propuestas por varios autores y también porque se asumieron valores desde el rechazo del N del SPT hasta los 30m. Sin embargo, dentro del estudio Geofísico, se obtuvo una velocidad de onda de corte ( $V_{s30}$ ) de 360m/s, por lo que el perfil de suelo es catalogado como tipo “D” además de presentar una frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de 7.5hz sin generar contrastes de impedancia hasta los 30m.

Como se puede apreciar, existe una variación de resultados muy amplios por lo que la Geotecnia y la Geofísica en este caso, no coinciden en ningún punto de estudio.





**Figura 18.** *a) Curva H/V para la ciudad de Guamote, b) Comprobación del análisis de frecuencia fundamental de la curva H/V generada en el software Geopsy, c) Curvas de dispersión (CD) para MASW, d) Perfil de velocidad de onda de corte vs profundidad con desviación estándar obtenido con la Geotecnia.*

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

En el gráfico a) se muestra el pico de la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) con un valor de 7.5hz representado con un rectángulo color gris. Ahora bien, para saber si dicho pico proviene por vibración natural del suelo se requiere realizar un estudio más específico. En esta instancia se muestra el gráfico b) en donde se estudia el ( $f_0$ ) mediante el HV\_ROTADO que es un gráfico representado por el plano horizontal de la frecuencia en función del azimut. Se puede observar que aparentemente el pico solo proviene en el sentido Norte – Sur intuyendo que pueda tratarse de un pico artificial. Sin embargo, con el análisis del ESPECTRO\_TOTAL y ESPECTRO\_ROTADO, es evidente que su energía se muestra en el sentido Norte – Sur.

La razón puede darse por ubicación de la Panamericana Sur, no obstante, siendo más específicos en este análisis, existe una energía leve que indica la existencia del ruido natural del suelo.

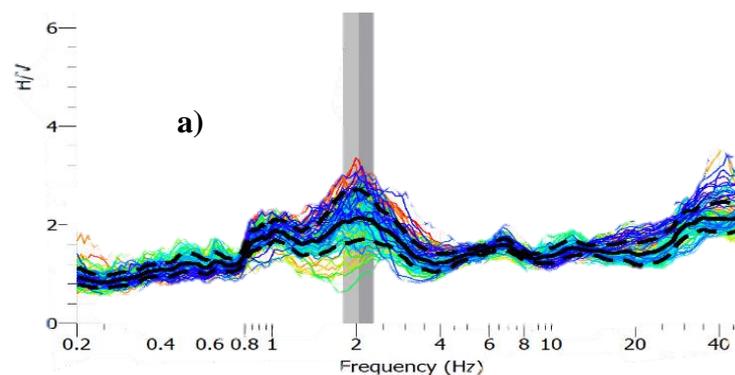
Hablando del gráfico c), se observan los gráficos de dispersión el cual contienen las curvas de dispersión (CD) de ondas superficiales generadas por golpes mediante el ensayo de MASW. Estas 6 curvas al ser unidas en el software Dinver y realizando un average o promedio, se genera la curva de dispersión del sitio en estudio, dicha curva total se encuentra en la gráfica 12.

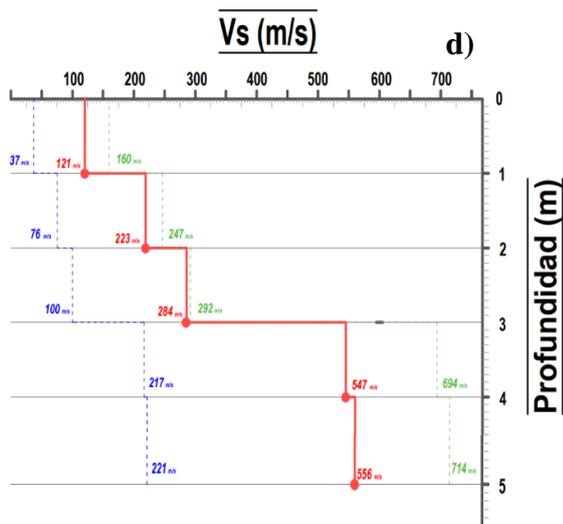
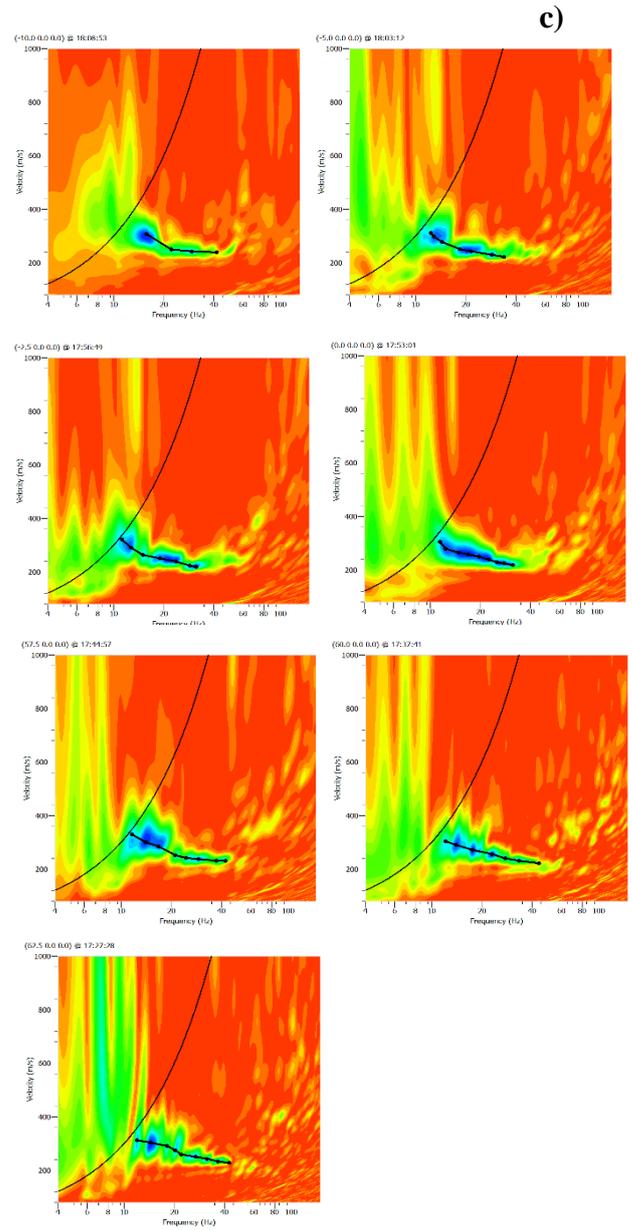
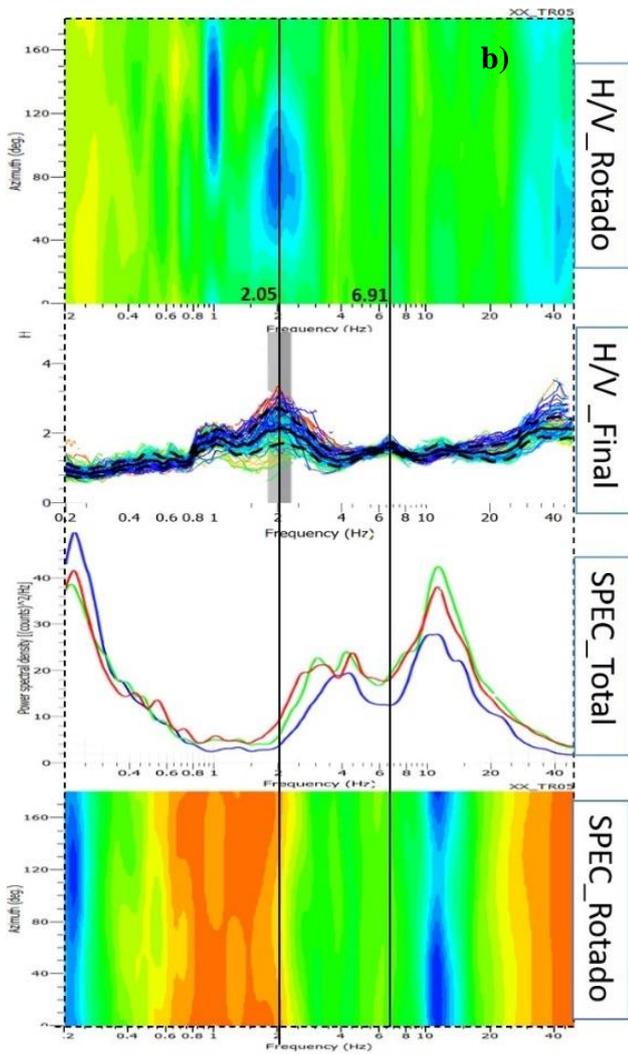
Por último y no menos importante, en el gráfico d) se muestra la ilustración de la velocidad de onda de corte hasta los 7m de profundidad en donde el ensayo de SPT dio rechazo. Esta curva está generada a partir de fórmulas empíricas propuestas por varios autores en donde influye el N del SPT. Por lo tanto, al ser fórmulas empíricas se ha previsto realizar una desviación estándar con desviación mínima (color azul) y desviación máxima (color verde).

### 4.3.2 Alausí

Correspondiente a la ciudad de Alausí, su columna estratigráfica de la estación acelerográfica (ALAH) posee una Arena bien graduada con Limo y Grava SW - SM con un contenido de humedad regular. Al tener una densidad baja, se pone en duda las características mecánicas del lugar, la razón más coherente es que al finalizar el ensayo SPT se evidenció que el sitio de perforación correspondía a un relleno entre 4 y 6m, por ende, no se confiará del todo en el tipo de suelo de la estación acelerográfica analizado para la ciudad de Alausí. Asimismo, con el ensayo de SPT hasta una profundidad de 5m y una velocidad media de onda de corte ( $V_{s30}$ ) de 323m/s hasta los 30m superiores tal y como lo indica la norma NEC15, se evidencia un perfil de suelo tipo “D”.

Aquí también se presentan limitaciones del ensayo SPT al momento de calcular el  $V_{s30}$  por la aplicación de fórmulas empíricas propuestas por varios autores asumiendo valores desde el rechazo del N del SPT hasta los 30m. Ahora bien, dentro del estudio Geofísico, se obtuvo una velocidad de onda de corte ( $V_{s30}$ ) de 400m/s y una frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de 2.05hz además de un segundo pico ( $f_1$ ) de 6.91hz generando un contraste de impedancia en los primeros 30m con variaciones bruscas de velocidad de onda de corte, por lo que según la norma NEC15, el perfil de suelo es de tipo “F” catalogándolo como un suelo que requiere estudios específicos por la Geotecnia para un análisis de respuesta dinámica del sitio. Dado todo esto, los resultados de la Geotecnia y la Geofísica generan valores cercanos del  $V_{s30}$ .





**Figura 19.** a) Curva H/V para la ciudad de Alausí, b) Comprobación del análisis de frecuencia fundamental de la curva H/V generada en el software Geopsy, c) Curvas de dispersión (CD) para MASW, d) Perfil de velocidad de onda de corte vs profundidad con desviación estándar obtenido con la Geotecnia.

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

En Alausí se obtuvo una frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de 2.05hz representado por el rectángulo gris tal y como lo indica el gráfico a). La comprobación de este valor se lo realiza mediante el gráfico b) el cual contiene el H/V\_ROTADO, ESPECTRO\_TOTAL y ESPECTRO\_ROTADO. En primera instancia el pico de 2.05hz según el H/V\_ROTADO indica una acumulación de energía en  $90^\circ$  intuyéndose como una energía artificial. Pero al analizar el ESPECTRO\_ TOTAL y ESPECTRO\_ROTADO se obtiene una respuesta favorable de que evidentemente existe vibración natural a los  $360^\circ$  del sensor sísmico.

Por otra parte, el gráfico b) contiene 7 gráficos de dispersión con sus respectivas curvas de ondas superficiales realizadas con el ensayo de MASW. El promedio de todas las 7 curvas de dispersión (CD) se lo generó en el Dinver tal y como se muestra en la figura 12. En esta instancia se puede apreciar que existe un leve aumento de velocidad manteniéndose una curva uniforme.

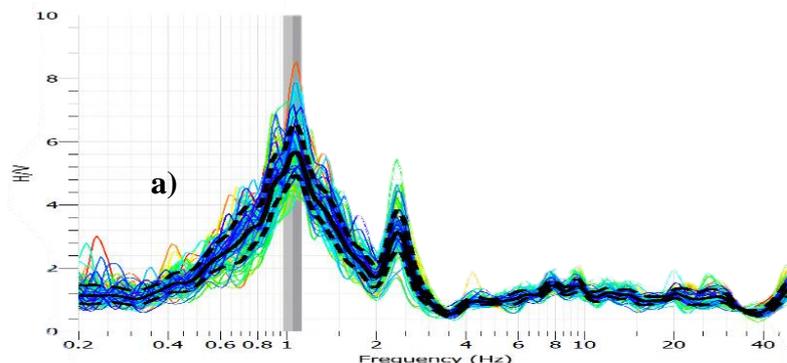
Hablando del gráfico c), se ha generado un perfil de velocidad de onda de corte hasta los 5m; profundidad al que llegó el ensayo del SPT. De igual manera, la línea continua roja contiene desviaciones estándar mínimas (color azul) y máximas (color verde). Lo peculiar de este perfil de velocidad es el aumento brusco de velocidad a los 3m de profundidad intuyéndose de esta forma que podría haber un contraste de impedancia, aunque no es del todo confiable.

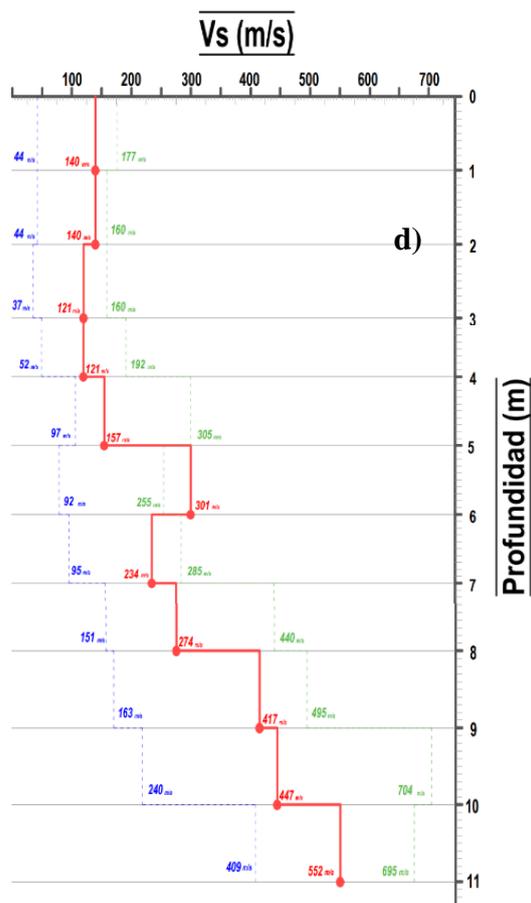
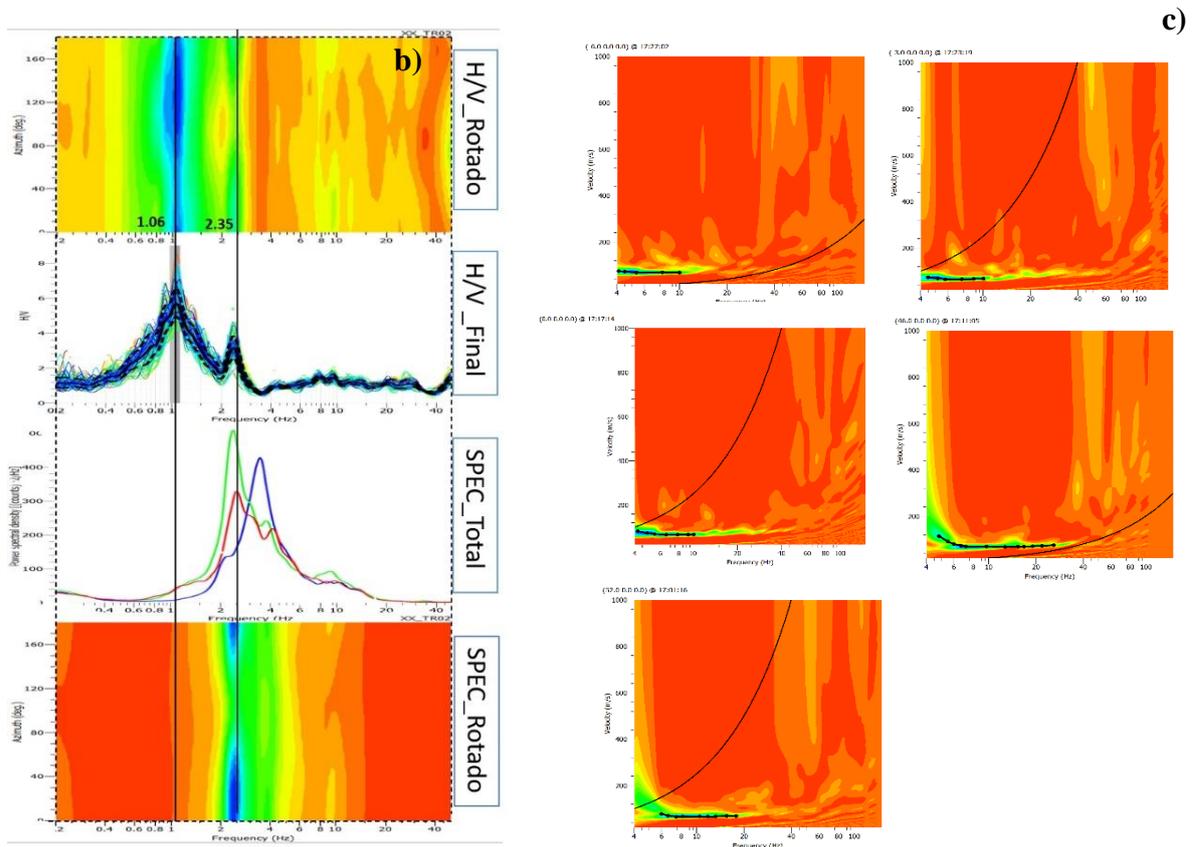
### 4.3.3 Guaranda

Por otro lado, para la estación acelerográfica de la ciudad de Guaranda (AGRD) se ha evidenciado un suelo formado por Arena Limosa SM y Arena mal graduada con Limo SP - SM. Además de esto se reflejó un alto contenido de humedad, especialmente entre los 3 y 5m de profundidad, que podría ser un factor determinante para la reducción de la resistencia del suelo. Con el ensayo de SPT hasta una profundidad de 11m y una velocidad media de onda de corte ( $V_{s30}$ ) de 307m/s hasta los 30m superiores tal y como lo indica la norma NEC15, se evidencia un perfil de suelo tipo “D”. Se encontró ciertas limitaciones al momento de calcular el  $V_{s30}$  ya que la aplicación de fórmulas empíricas propuestas por diversos autores se asumió valores desde el sitio de rechazo del N del SPT hasta los 30m.

Por otra parte, dentro del estudio Geofísico solo se realizó la inversión de la curva mHVSr, por tal razón se obtuvo varias soluciones de perfiles de velocidad de onda de corte ( $V_{s30}$ ) encontrándose en un rango de 130 m/s a 240 m/s, además de una frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de 1.06hz y un segundo pico ( $f_1$ ) de 2.35hz generando un contraste de impedancia en los primeros 30m con variaciones bruscas de velocidad de onda de corte, por lo que según la NEC15, el perfil del suelo es de tipo “F” el cual requiere una evaluación para un análisis por la Geotecnia de respuesta dinámica del sitio y potencial licuefacción.

Además de esto se puede ver que los resultados de la Geotecnia y Geofísica no coinciden en ningún punto de estudio al existir diversas limitaciones descritas en este apartado.





**Figura 20.** a) Curva H/V para la ciudad de Guaranda, (b) Comprobación del análisis de frecuencia fundamental de la curva H/V generada en el software Geopsy, c) Curvas de dispersión (CD) para MASW, d) Perfil de velocidad de onda de corte vs profundidad con desviación estándar obtenido con la Geotecnia.

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

Para el caso de Guaranda, el gráfico a) tiene un caso interesante puesto que se presentan 2 picos muy bien formados, gobernados por la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de 1.06hz. En el gráfico b) se analiza a mayor profundidad ambos picos de frecuencia para saber si son generados de manera natural o de manera antropogénica. En esta situación, dicho análisis genera un resultado positivo. Con el segundo pico se puede decir que existe un contraste de impedancia en un segundo estrato ayudando a la amplificación de sitio en dicha área de estudio el cual es un gran problema.

A más de esto, en el gráfico c) se evidencian gráficos de dispersión con curvas muy bajas siendo casi lineales con velocidades extremadamente bajas y poco visibles, por dicha razón no se obtuvo una curva de dispersión promedio (CD) del punto estudiado.

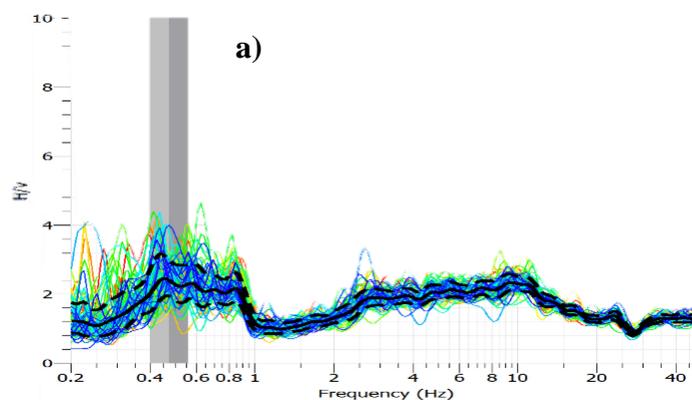
Por otro lado, el perfil de velocidad de onda de corte generado a partir del ensayo SPT mediante fórmulas empíricas, muestran velocidades extremadamente bajas hasta casi los 5m de profundidad, y en algunos casos existe incluso inversión de velocidad de onda de corte. De forma clara se especifica que el suelo de la estación acelerográfica de Guaranda tiene problemas con una mayor probabilidad de amplificación de sitio, lo cual es muy grave. EL suelo presenta un nivel freático entre los 3 y 4m de profundidad el cual también es un problema para las edificaciones adyacentes al lugar.

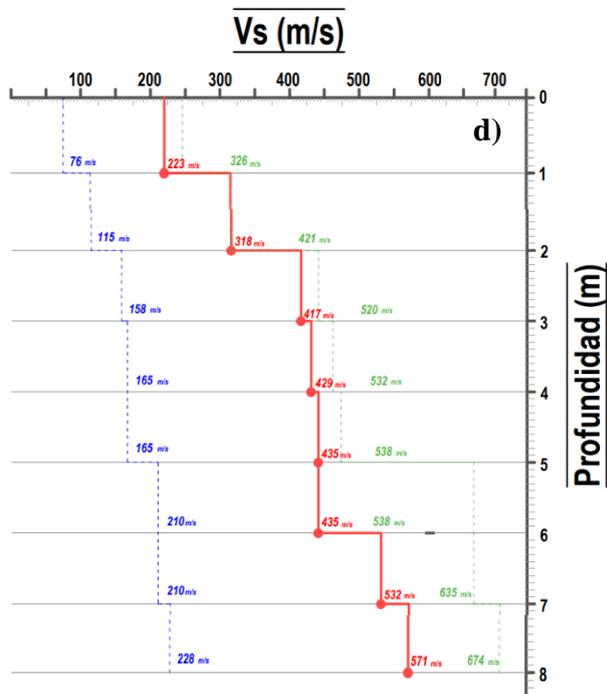
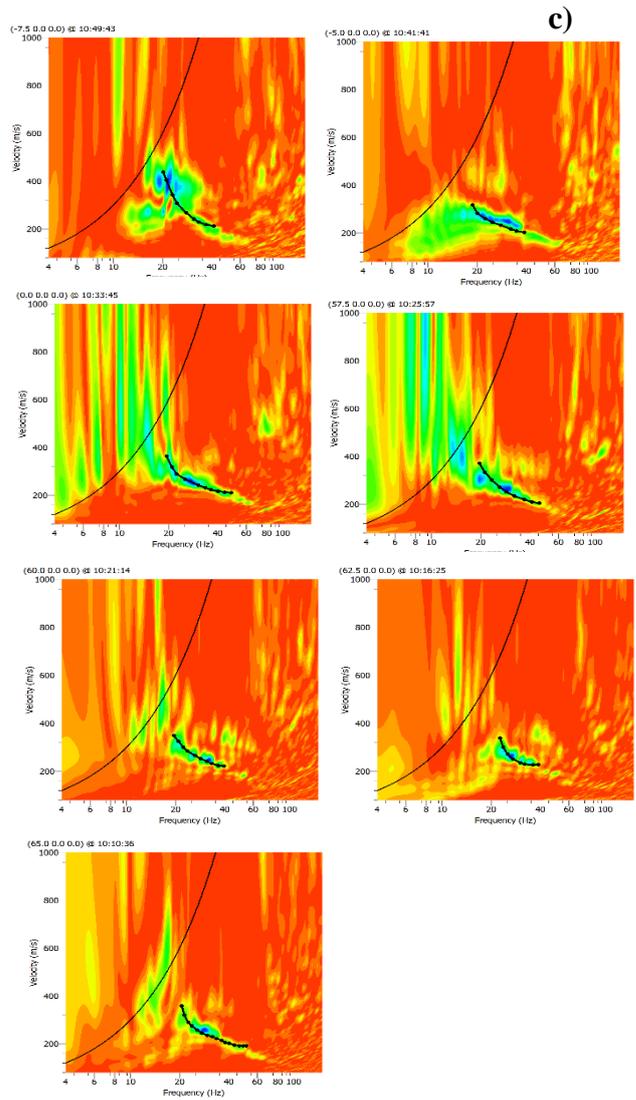
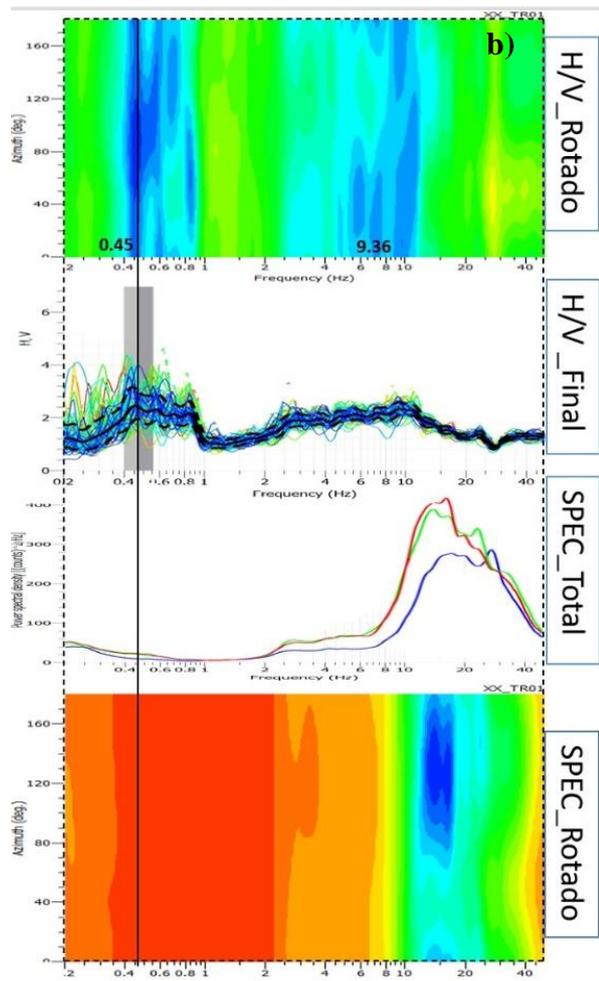
#### 4.3.4 Riobamba

Finalmente, para la estación acelerográfica de la ciudad de Riobamba (ARIO), el suelo se encuentra formado por Arena Limosa SM, además de la evidencia de un porcentaje mínimo de humedad. De esta manera, con el ensayo de SPT hasta una profundidad de 8m y una velocidad media de onda de corte ( $V_{s30}$ ) de 249m/s hasta los 30m superiores que es mencionado por la norma NEC15, en donde se evidencia un perfil de suelo tipo “D”. Existieron ciertas limitaciones al momento de calcular el  $V_{s30}$  ya que la aplicación de fórmulas empíricas propuestas por diversos autores, se asumió valores desde el lugar de rechazo del N del SPT hasta los 30m superiores.

En cuanto al estudio geofísico solo se realizó la inversión de la curva de dispersión (CD), puesto que la curva H/V poseía una extrema contaminación antropogénica, dificultando y confundiendo su análisis por lo que se tomó la decisión de descartarlo para el avance de esta investigación. Por tal razón se obtuvo una solución con un amplio margen para el perfil de velocidad de onda de corte ( $V_{s30}$ ) con un valor de 400 m/s y generando un contraste de impedancia en los primeros 30m con variaciones bruscas de velocidad de onda de corte, por lo que según la NEC15 el perfil del suelo es de tipo “F” el cual requiere una evaluación por la Geotecnia para un análisis de respuesta dinámica del sitio.

Además de esto podemos ver que los resultados de la Geotecnia y Geofísica no coinciden en ningún punto de estudio al existir diversas limitaciones.





**Figura 21.** a) Curva H/V para la ciudad de Riobamba, b) Comprobación del análisis de frecuencia fundamental de la curva H/V generada en el software Geopsy, c) Curvas de dispersión (CD) para MASW, d) Perfil de velocidad de onda de corte vs profundidad con desviación estándar obtenido con la Geotecnia.

**Fuente:** (Abarca y Jácome, 2023)

El caso de Riobamba tiene un problema con la gráfica H/V del inciso a), como se puede apreciar, aparentemente la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) es muy baja dando un valor de 0.45hz. Sin embargo, es necesario resaltar que el pico de esta gráfica tiene una forma inusual y como se había explicado anteriormente, este fenómeno se da al exceso de contaminación antropogénica en el lugar. Por dicha razón no se puede confiar al 100% el  $f_0$  para este punto de estudio. Aunque el gráfico b) dice lo contrario, se ha tomado la decisión de no analizar ni ahondar en el gráfico de H/V\_FINAL ya que la frecuencia fundamental del suelo se mezcla en gran parte con el ruido antropogénico dificultando en gran manera su análisis y correlación.

Hablando del inciso c), se tienen 7 gráficos de dispersión con un buen desarrollo de velocidad y al unirlos para obtener un promedio de ellas, es evidente su aumento de velocidad al disminuir su frecuencia tal y como se lo indica en la gráfica 12. Por último, en el inciso d), se obtiene un perfil de velocidad de onda de corte hasta los 8m teniendo un aumento gradual de su velocidad a medida que incrementa la profundidad. No obstante, este gráfico solo sirve de referencia para el estudio Geofísico.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES

Realizado el análisis y estudio del subsuelo de manera Geotécnica (ensayos en campo y laboratorio) y Geofísica (MASW y mHVSr) de las estaciones acelerográficas ubicadas en las provincias de Chimborazo y Bolívar teniendo como ciudades Guamote, Alausí, Guaranda y Riobamba; se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Para el suelo de la estación acelerográfica en la ciudad de Guamote (AGMT) se obtuvo una frecuencia fundamental ( $f_0$ ) relativamente alta con un valor de 7.5 hz. El perfil de velocidad de onda de corte en los 30m superiores del subsuelo ( $V_{s30}$ ) tal y como lo indica la NEC15 por parte de la Geofísica, se obtuvo un valor de 360 m/s clasificando a la ciudad de Guamote como un perfil de suelo tipo “D”. No obstante, por parte de la Geotecnia, para el perfil de velocidad de onda de corte en los 30 metros superiores ( $V_{s30}$ ) es de 549 m/s clasificando a esta ciudad como un perfil de suelo tipo “C”, con una columna estratigráfica de mezcla entre Arena Limosa SM y Limo Arenoso ML.
- En el suelo de la estación acelerográfica de la ciudad de Alausí (ALAH) se determinó una frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de 2.05 hz y un segundo pico ( $f_1$ ) de 6.91hz generando contraste de impedancia en los primeros 30m. El perfil de velocidad de onda de corte en los primeros 30m ( $V_{s30}$ ) señalado por la norma NEC15 obtenido por métodos Geofísicos se obtuvo un valor de 400 m/s, no obstante, al tener un contraste de impedancia en los primeros 30m de suelo, la NEC15 lo clasifica como un perfil de suelo tipo “F” el cual requiere investigaciones Geotécnicas específicas para conocer y modelar su comportamiento dinámico. Sin embargo, por métodos Geotécnicos, para el perfil de velocidad de onda de corte ( $V_{s30}$ ) en los primeros 30 metros se tiene un valor de 323 m/s catalogando a esta ciudad con un perfil de suelo

tipo “D”, con una columna estratigráfica conformada por Arena bien graduada con Limo y Grava SW – SM.

- De igual forma, para el suelo de la estación acelerográfica ubicada en la ciudad de Guaranda (AGRD) se determinó una frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de 1.06hz y un segundo pico ( $f_1$ ) de 2.35hz generándose un contraste de impedancia en los primeros 30m. En lo que corresponde al perfil ( $V_{s30}$ ) se generó un rango de velocidades entre 130m/s a 240m/s. Por lo que al tener todas estas consideraciones y señalando lo que menciona la NEC15, se considera un perfil de suelo tipo “F”. En lo que respecta a los métodos Geotécnicos se obtuvo un ( $V_{s30}$ ) de 307m/s evidenciando un perfil de suelo tipo “D” con una estratigrafía formada por Arena Limosa SM y Arena mal graduada con Limo SP - SM.
- En el suelo de la estación acelerográfica de la ciudad de Riobamba (ARIO) donde no se pudo determinar la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) por existir contaminación antropogénica producida por la carretera E35, por lo que el perfil de velocidad de onda de corte en los 30 metros superiores del subsuelo ( $V_{s30}$ ) señalado por la norma NEC15 obtenido por métodos Geofísicos, se obtuvo un valor de 400 m/s generando un contraste de impedancia dentro de los primeros 30 m de profundidad, por dicha razón la NEC15 lo clasifica como un perfil de tipo “F” el cual requiere estudios específicos realizados por un Geotecnista para conocer y modelar su comportamiento dinámico. En cuanto a los métodos Geotécnicos, para el perfil de velocidad de onda de corte ( $V_{s30}$ ) en los primeros 30 metros se obtuvo un valor de 249 m/s catalogando a esta ciudad con un perfil de suelo tipo “D”, con una columna estratigráfica Arena Limosa SM.
- A pesar de haber realizado el ensayo de SPT en cada punto de estudio, la recuperación de especímenes fue muy pobre limitando los diferentes ensayos de

laboratorio. Adicional a esto, al asumir una gran cantidad de valores en las fórmulas empíricas para el cálculo de  $V_{s30}$ , generó mucha dispersión de resultados que pueden ser catalogados como poco confiables. Asimismo, el ensayo de MASW al ser una de las técnicas más usadas, tiene un limitado rango de sondeo de estudio, incluso el exceso de contaminación antropogénica captada por el ensayo de RSA dificultaron un correcto análisis de los datos. Por todos estos problemas descritos, los resultados han sido afectados al coincidir de manera muy tenue en la Geofísica y Geotecnia.

## **6. RECOMENDACIONES**

Tomando en cuenta los resultados obtenidos tanto en Geotecnia como en Geofísica y sus respectivas conclusiones, se considerará los siguientes apartados para futuras investigaciones:

- En cuanto al estudio Geotécnico de cada una de las ciudades, es recomendable poder realizar por lo menos 3 perforaciones de SPT lo más cercano a las estaciones acelerográficas de cada ciudad para lograr obtener una muestra representativa del subsuelo reduciendo de esta forma la incertidumbre de los resultados en los ensayos de laboratorio. Además, será necesario el apoyo de otros tipos de ensayos con recuperación de testigos para un correcto análisis Geológico realizada en esta investigación.
- En lo que respecta a los ensayos Geofísicos, el MASW (análisis multicanal de ondas superficiales) al ser una técnica económica, estudia el subsuelo a profundidades limitadas. Por dicha razón se recomienda en futuras investigaciones complementar el estudio de MASW con otras técnicas como la refracción sísmica o tomografías, con el fin de poseer más información del subsuelo de las estaciones acelerográficas para su correcto análisis.

- Para la técnica mHVSr se recomendará instalar el sensor en lugares donde no exista ruido antropogénico capaz de perturbar la grabación del sensor. Se recuerda que una grabación de ruido sísmico ambiental con demasiada contaminación de ruido exterior puede generar resultados erróneos durante el análisis o dificultar el estudio en el software Geopsy y Dinver. Por tal razón, la instalación del sensor debe estar alejado de carreteras principales, fabricas, gasolineras u otros lugares que generen vibraciones no deseadas.
- En la ciudad de Riobamba se sugiere realizar un estudio más detallado de la zona para reducir la incertidumbre de la investigación generando una caracterización del subsuelo más precisa.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Aguiar, R., & Rivas, A. (2018). *MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE AMBATO*.  
[https://www.researchgate.net/profile/Roberto-](https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Aguiar/publication/327079440_Libro_Microzonificacion_Sismica_de_Ambato/links/5bcc3a78a6fdcc03c798df11/Libro-Microzonificacion-Sismica-de-Ambato.pdf)

[Aguiar/publication/327079440\\_Libro\\_Microzonificacion\\_Sismica\\_de\\_Ambato/links/5bcc3a78a6fdcc03c798df11/Libro-Microzonificacion-Sismica-de-Ambato.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Aguiar/publication/327079440_Libro_Microzonificacion_Sismica_de_Ambato/links/5bcc3a78a6fdcc03c798df11/Libro-Microzonificacion-Sismica-de-Ambato.pdf)

Aguilar, S. (2005). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48711206>. *Salud En Tabasco*, 11, 333–338.

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 the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador. *Tectonics*, 35(5), 1048–1065.  
<https://doi.org/10.1002/2016TC004117>

Aspiazu, H. (2017). Caracterización geológica y geofísica del subsuelo para la construcción de una obra civil a orillas del río Guayas en el cantón Durán. In *BMC Public Health* (Vol. 5, Issue 1).

Baize, S., Audin, L., Winter, T., Alvarado, A., Pilatasig Moreno, L., Taïpe, M., Reyes, P., Kauffmann, P., & Yepes, H. (2015). Paleoseismology and tectonic geomorphology of the Pallatanga fault (Central Ecuador), a major structure of the South-American crust. *Geomorphology*, 237, 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.030>

Barbat, A. (1983). *Cálculo sísmico de las estructuras - Alex H. Barbat - Google Libros*.  
<https://books.google.com.ec/books?id=jo9MygPvhuMC&pg=PA20&dq=intensidad+sismica&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiI8sG78Jn2AhXmQjABHbO-DzQQ6wF6BAGFEAE#v=onepage&q=intensidad%20sismica&f=false>

Barros, J. G. (2016). *CONSTRUCCIÓN DE UN NUEVO MODELO HETEROGÉNEO DE VELOCIDADES SÍSMICAS DE ONDAS P EN LA SUBDUCCIÓN ECUATORIANA*.

Barros, J. G., López, D., Gallegos, P., Arias, G., Méndez, M., Toro, L., Tipán, M., Reyes, F., Once, R., Vela, B., Jhonny, M., Lozada, A., Daniel, V., Pacheco, A., Gerardo, L., Morales, P., Diana, G., Saquí, C., Alexandra, B., ... Flores, M. (2018). *Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M. Fase 1*.

Benito, B., & Cabañas, L. (2015). *Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica*.

Bertran, E. (2006). *Procesado digital de señales : fundamentos para comunicaciones y control* (UPC). Edicions UPC.

Cabañas, L., & Benito, B. (1999). Caracterización del movimiento del suelo en ingeniería sísmica. *Física de La Tierra*, 11.

Cárdenas, P. (2019). Caracterización geotécnica de la formación Mangán, mediante métodos geofísicos. In *Ucv*.

Castillo, R., & Urrutia, B. (2017). *Microzonificación Sísmica en el Centro Histórico de la Zona Metropolitana de San Salvador, El Salvador, Centro América*.

Geopsy. (2007). *Beam power normalization in MASW*. <https://sesame.geopsy.org/forum/viewtopic.php?t=302&sid=7744a56214ad5d4f45b45a198168be07>

Geopsy. (2013). *Geopsy: Filter* - *GeopsyWiki*. [https://www.geopsy.org/wiki/index.php/Geopsy:\\_Filter](https://www.geopsy.org/wiki/index.php/Geopsy:_Filter)

Humire, F., Sáez, E., & Leyton, F. (2015). *MANUAL DE APLICACIÓN DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS BASADAS EN ONDAS DE SUPERFICIE PARA LA DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO VS30*.

Laurendeau, A., Courboux, F., Bonilla, L. F., Alvarado, A., Naya, V. A., Guéguen, P., Diego Mercerat, E., Singaicho, J. C., Bertrand, E., Perrault, M., Barros, J. G., & 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*, 107(6), 2917–2926. <https://doi.org/10.1785/0120170134>

Magallanes, T. (2022). *ANÁLISIS DEL CONTRASTE DE IMPEDANCIA EN LA PREDICCIÓN DEL MOVIMIENTO DEL SUELO*.

Moncayo, T., G, V., & J, R. (2017, February 17). *Análisis comparativo entre 13 leyes de atenuación y los registros de un sismo de grado 7.1 e n magnitud Richter ocurrido en Japón*. <https://www.redalyc.org/journal/467/46750929002/html/>

- Nakamura, Y. (1989). *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface*.
- NEC. (2015). *Guía práctica para la ejecución de estudios geotécnicos y trabajos de cimentación de conformidad con la*.
- Nocquet, J. M., Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Mothes, P. A., Rolandone, F., Jarrin, P., Cisneros, D., Alvarado, A., Audin, L., Bondoux, F., Martin, X., Font, Y., Régnier, M., Vallée, M., Tran, T., Beauval, C., Maguiña Mendoza, J. M., Martinez, W., Tavera, H., & Yepes, H. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience* 2014 7:4, 7(4), 287–291. <https://doi.org/10.1038/ngeo2099>
- Parra, K., & Sarango, J. (2016). *Análisis estadístico del periodo experimental de vibración en edificios aporticados de hormigón armado en el Distrito Metropolitano de Quito*.
- Párraga, J. (2020). *ANÁLISIS DEL ESPECTRO DE FOURIER DE REGISTROS SÍSMICOS EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ORIENTACIÓN DEL SENSOR*.
- Pérez, N. (2016). *Peligro sísmico asociado a fallas corticales : caso de estudio Falla San Ramón (33.2°-33.7° S)*. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/15637>
- Puzzilli, L. M., Bongiovanni, G., Clemente, P., Di Fiore, V., & Verrubbi, V. (2021). Effects of anthropic and ambient vibrations on archaeological sites: The case of the circus maximus in rome. In *Geosciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/geosciences11110463>
- Ritta, R. J., Suárez, L. E., Pando, M. A., Cardona, A., Kohan, P. H., Quinteros, R. D., & Storti, M. A. (2012). *DETERMINACIÓN DEL PERÍODO FUNDAMENTAL DEL SUELO USANDO VIBRACIÓN AMBIENTAL Y EL COCIENTE ESPECTRAL HORIZONTAL/VERTICAL*. <http://www.efn.uncor.edu://www.amcaonline.org.ar>
- Schmertmann, J., & Palacios, A. (1979). Energy dynamics of SPT. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 205, 909–926.
- Schmidt, V. (2016). Aplicación de la técnica H/V en distintos emplazamientos a partir de la medición de vibraciones ambientales y sismos. *Revista Geológica de América Central*, 54. <https://doi.org/10.15517/rgac.v54i0.23282>

Scivetti, N., Bahía, M., & Spagnuola, jorge. (2021). *MANUAL DE GEOFÍSICA Y MÉTODOS GEOFÍSICOS*. [www.ediuns.com.ar](http://www.ediuns.com.ar)

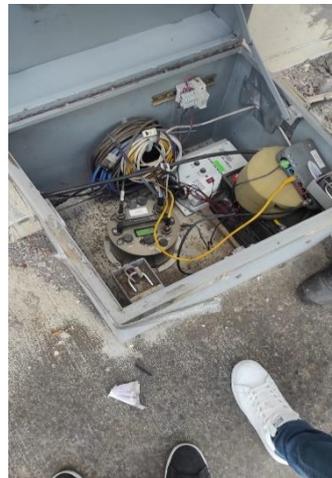
Sesame. (2004). *DIRECTRICES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE LA RELACIÓN ESPECTRAL H/V EN VIBRACIONES AMBIENTALES MEDICIONES, PROCESAMIENTO Y INTERPRETACIÓN*. <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>

Ulloa, R. (2018). *Aplicación del método de Nakamura H/V, para estudiar el riesgo sísmico en la zona comprendida por el despliegue de estaciones IMAD*.

Vera, J. (2019). *Enemérita Universidad Autónoma*. 101.

Wathelet, M., Chatelain, J. L., Cornou, C., Giulio, G. Di, Guillier, B., Ohrnberger, M., & Savvaidis, A. (2020). *Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing*. *Seismological Research Letters*, *91*(3), 1878–1889. <https://doi.org/10.1785/0220190360>

## 8. ANEXOS



**Anexo #1:** Extensión de línea sísmica para ensayo de MASW (análisis multicanal de ondas superficiales) en la ciudad de Guaranda 1



Universidad Estatal de Bolívar - Página Oficial

Hace 5 horas · 🌐

Docentes y egresados de la carrera de Ingeniería Civil UNACH y técnicos del Instituto Geofísico de la EPN, visitaron la UEB, con la finalidad de realizar un estudio complementario de los sistemas activos y pasivos geofísicos, así como la campaña de exploración con ensayo geotécnicos, clasificación del suelo e insumos; una vez obtenido los resultados, estos servirán para la investigación de los tesisistas de la UNACH.

Los profesionales que visitaron el campus matriz, compartieron experiencias con miembros de la Unidad de Riesgos UEB; para lo cual utilizaron instrumentos como sensores sísmicos, que permitieron identificar el movimiento del suelo durante toda la noche y poder registrar la actividad sísmica de la ciudad y país.

#JuntosConstruyendoLaUniversidaQueQueremos

👍 42

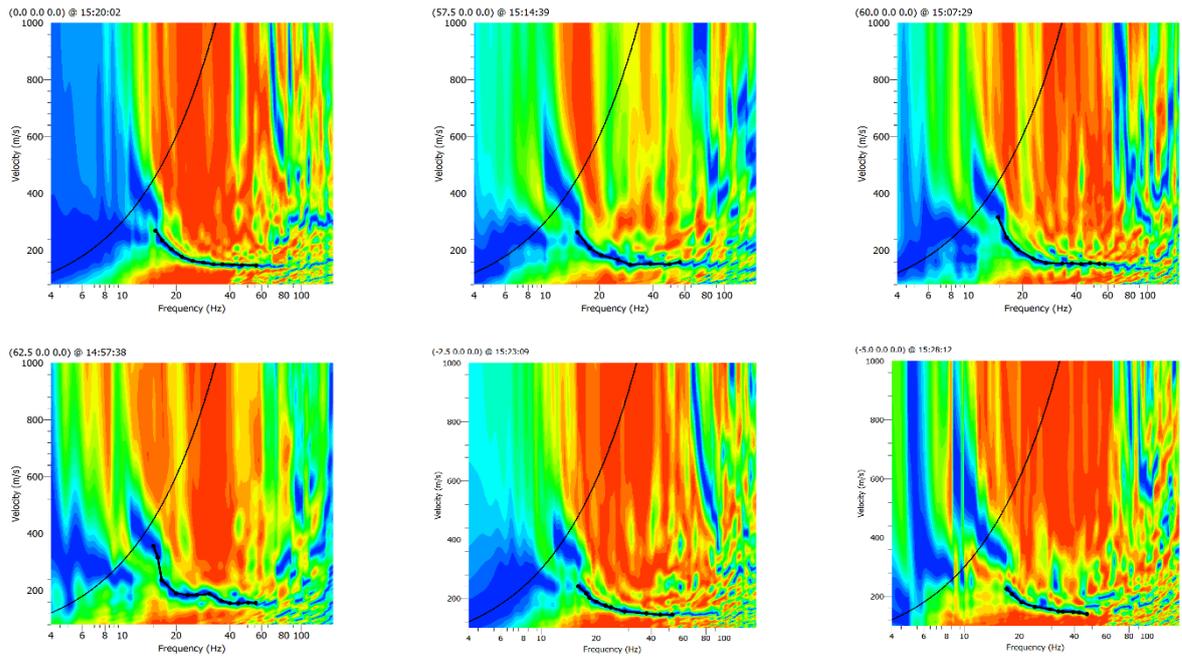
👍 Me gusta

💬 Comentar

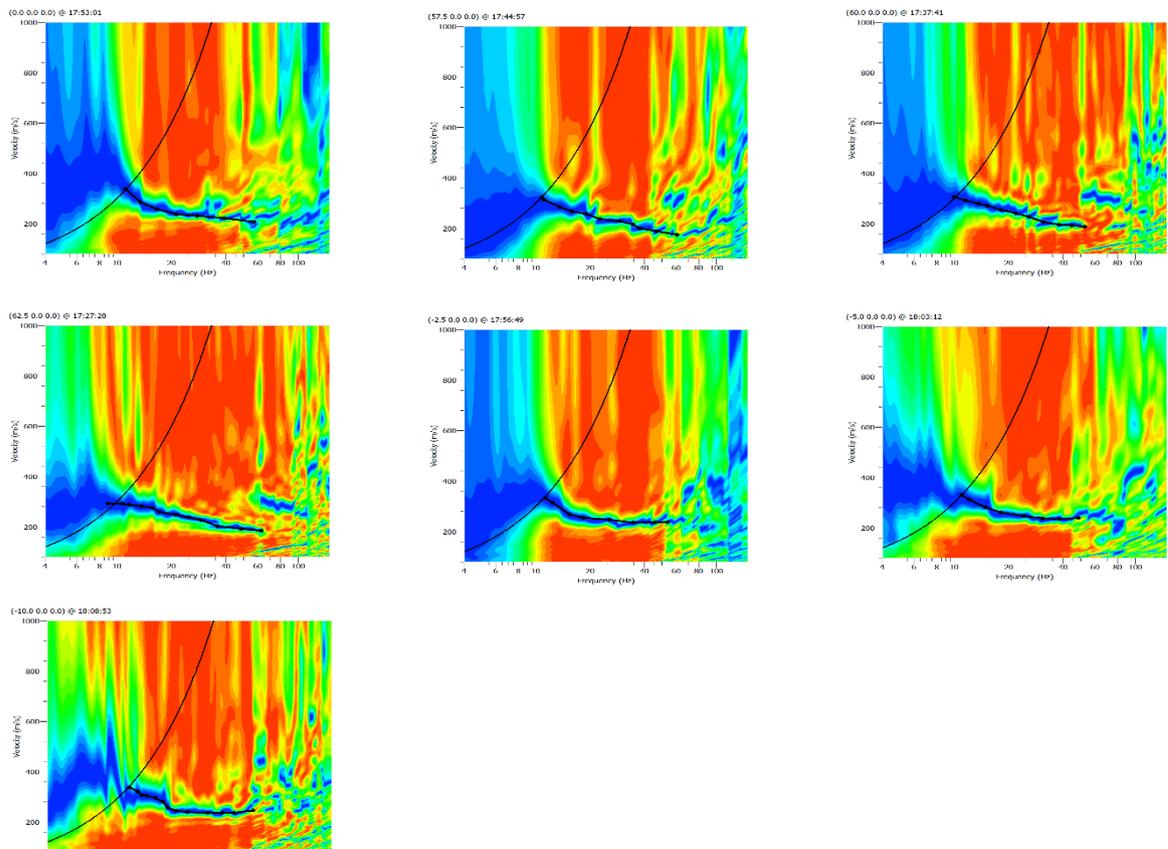
➦ Compartir



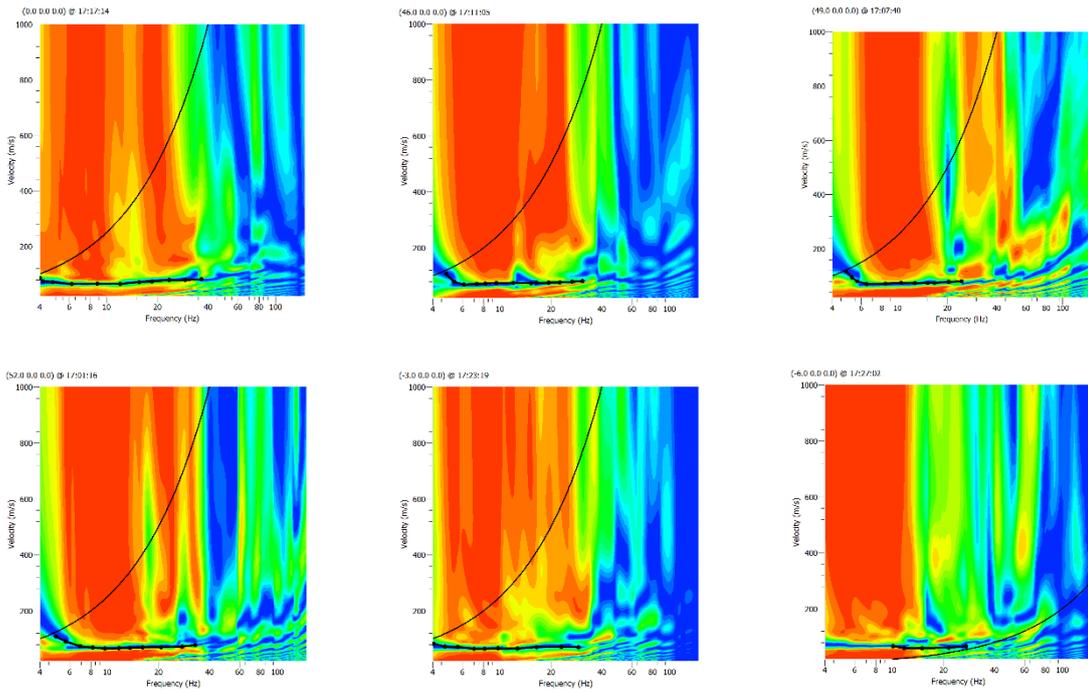
**Anexo #2:** Instalación de sensores para ensayos de MASW y RSA (ruido sísmico ambiental) en Guamote, Alausí, Guaranda y Riobamba



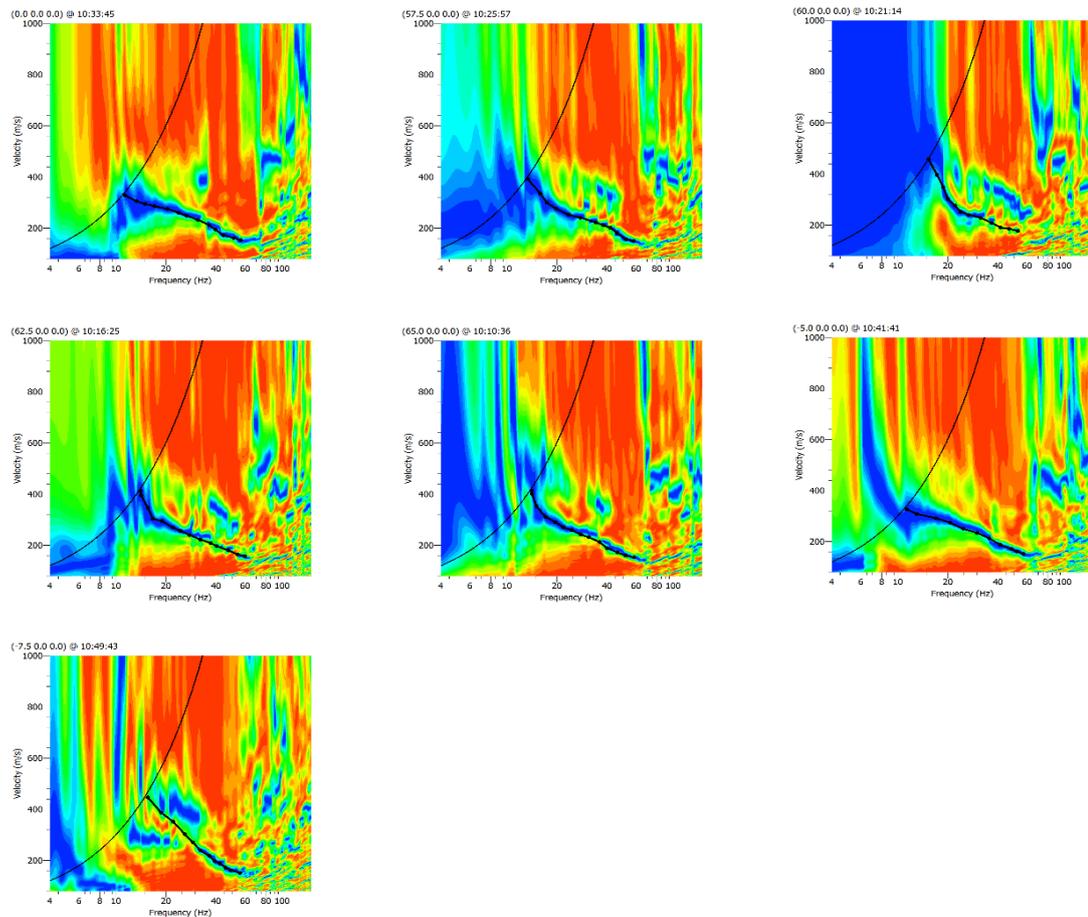
**Anexo #3:** Primer tanteo de curvas de dispersión sobre el ensayo de MASW para la ciudad de Guamote



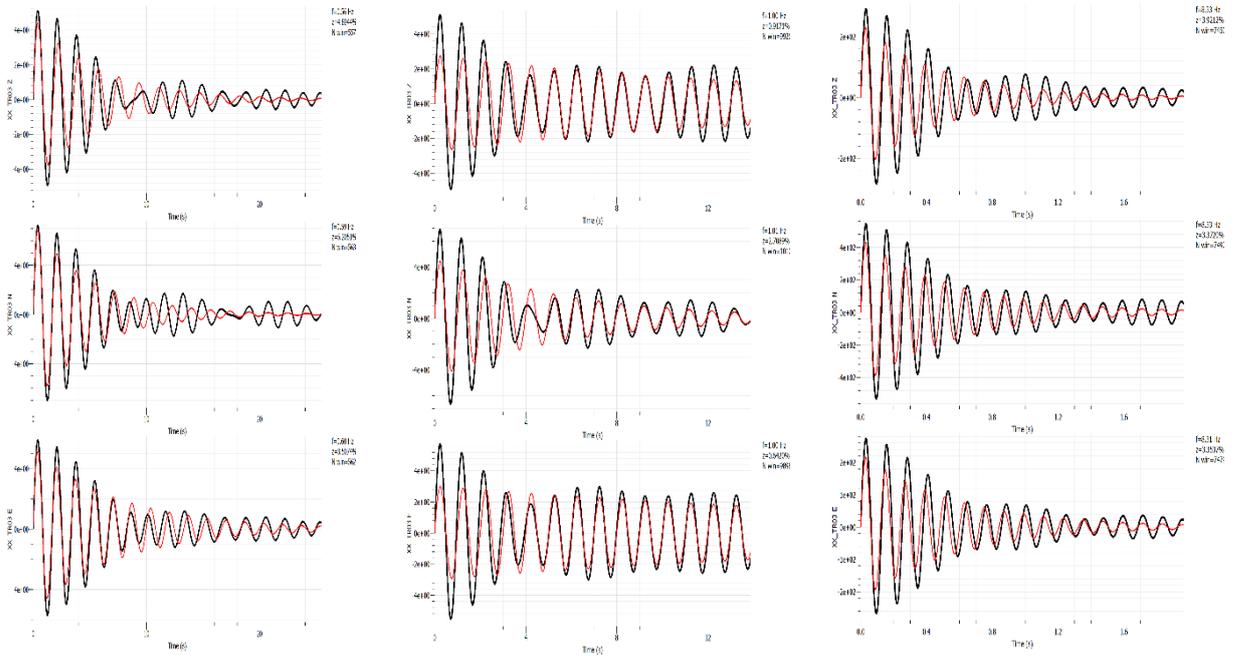
**Anexo #4:** Primer tanteo de curvas de dispersión sobre el ensayo de MASW para la ciudad de Alausí



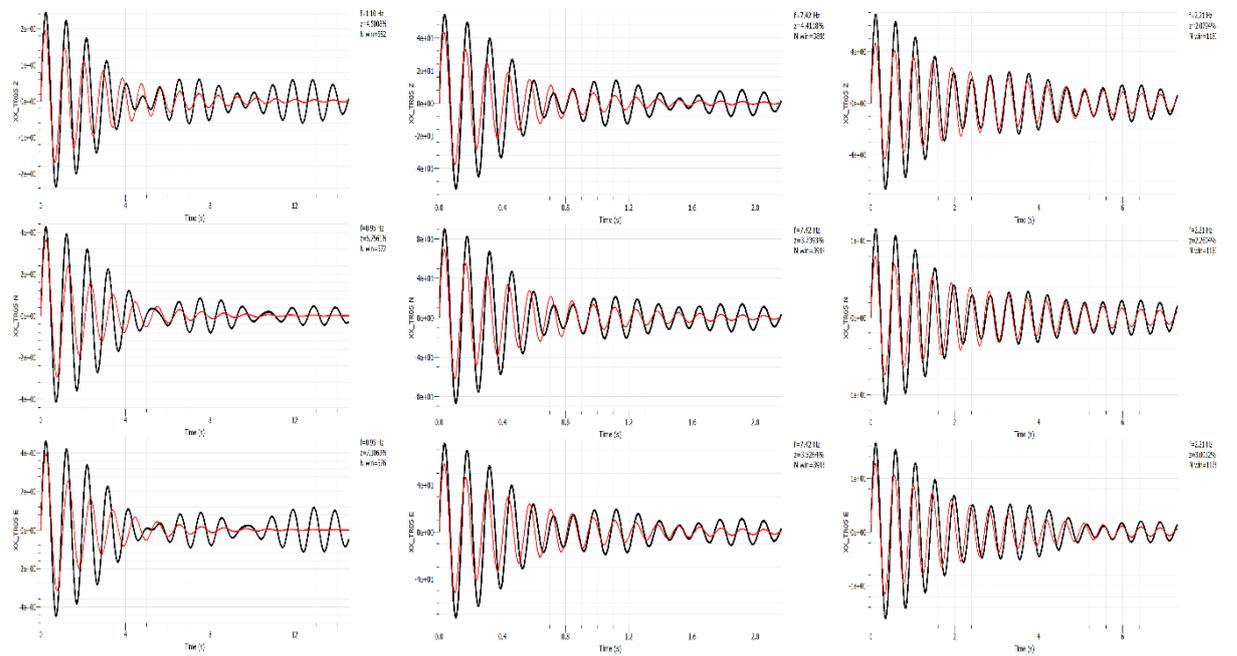
**Anexo #5:** Primer tanteo de curvas de dispersión sobre el ensayo de MASW para la ciudad de Guaranda



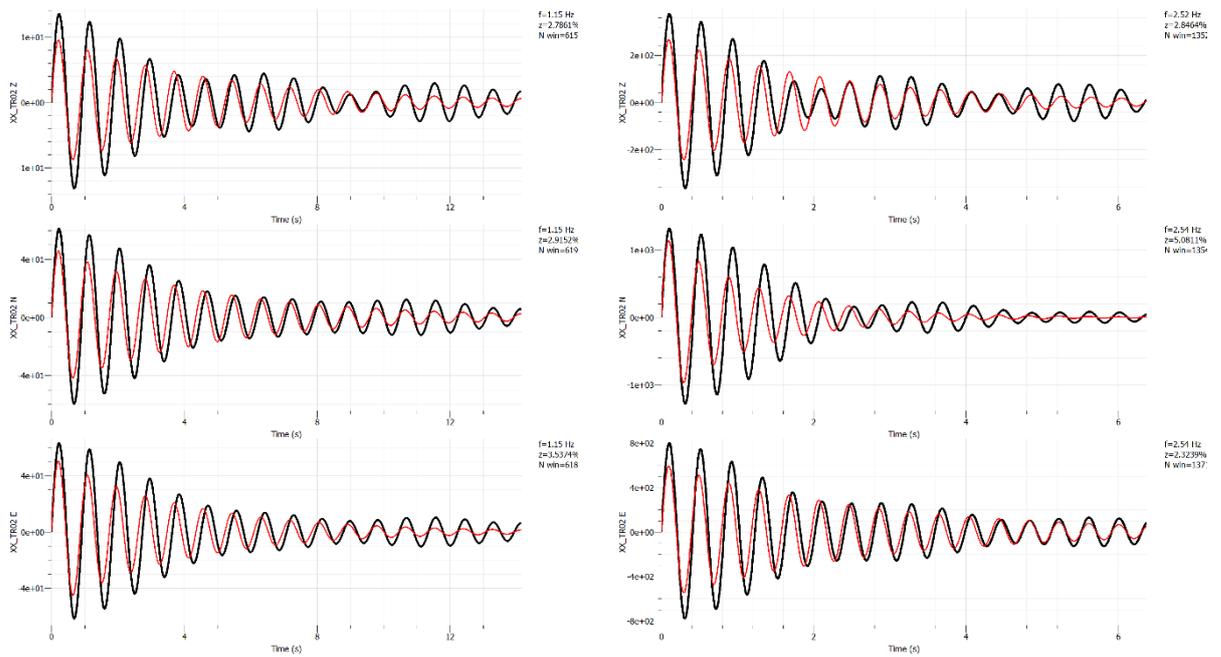
**Anexo #5:** Primer tanteo de curvas de dispersión sobre el ensayo de MASW para la ciudad de Riobamba



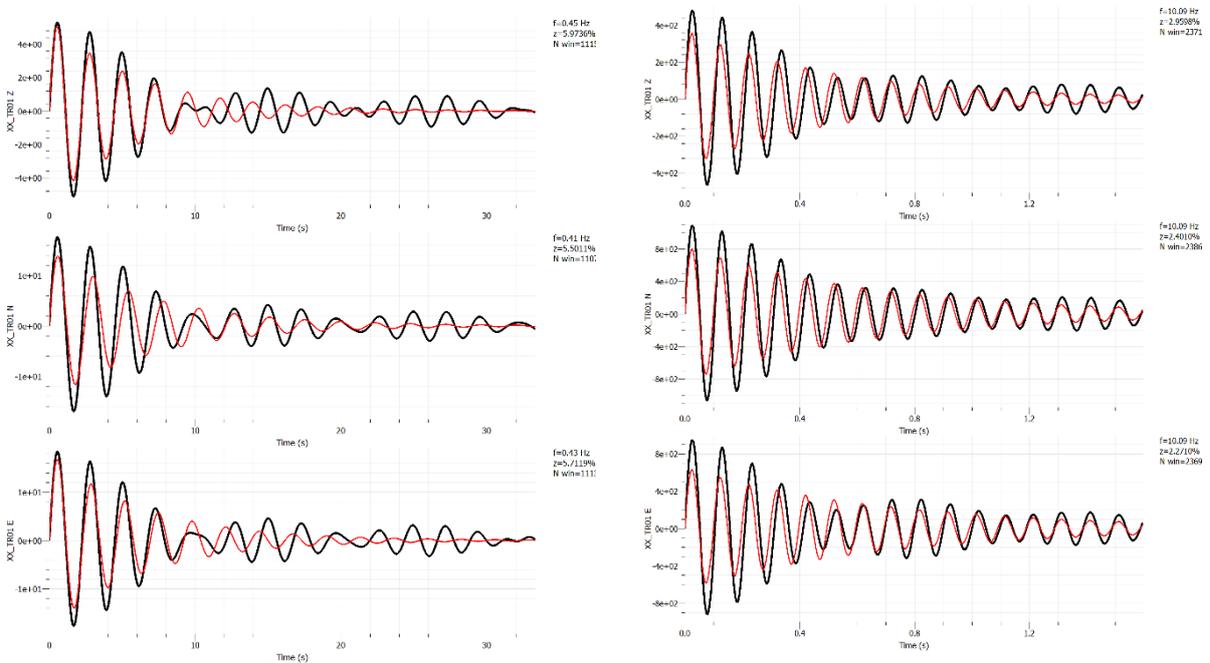
**Anexo #6:** Comprobación de amortiguamiento para la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de la ciudad de Guamote.



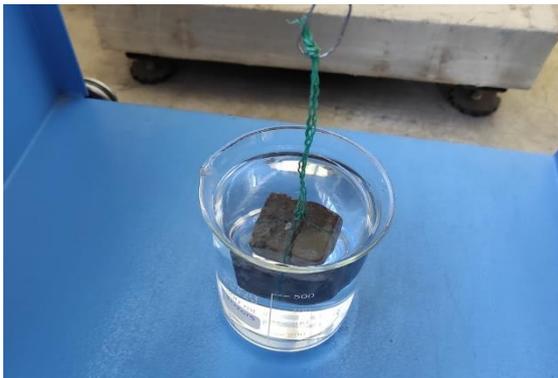
**Anexo #7:** Comprobación de amortiguamiento para la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de la ciudad de Alausí.



**Anexo #8:** Comprobación de amortiguamiento para la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de la ciudad de Guaranda.



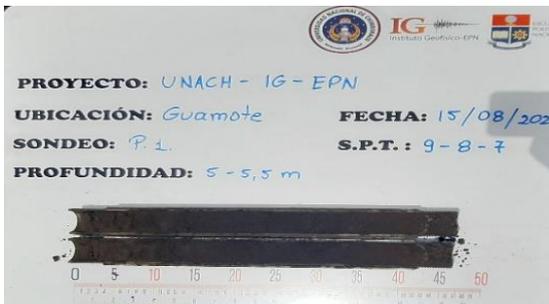
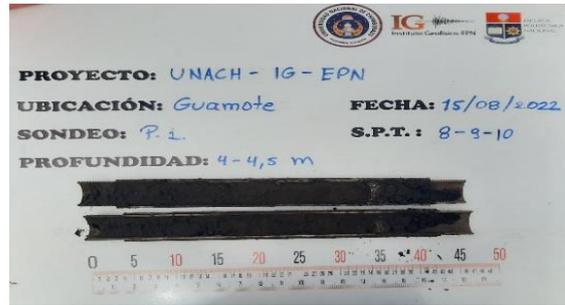
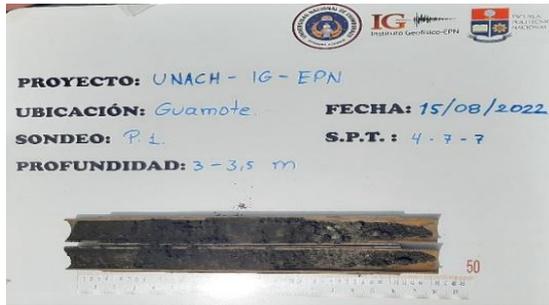
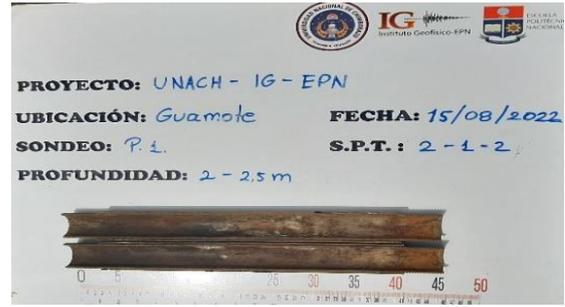
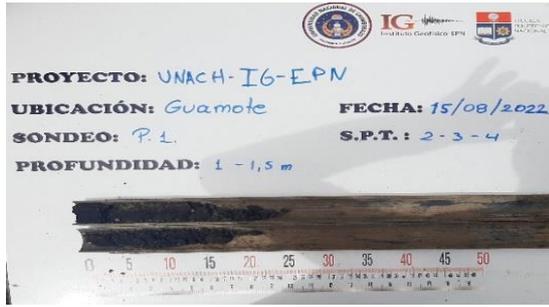
**Anexo #9:** Comprobación de amortiguamiento para la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) de la ciudad de Riobamba.



**Anexo #10: Ensayo de muestras alteradas en Laboratorio**



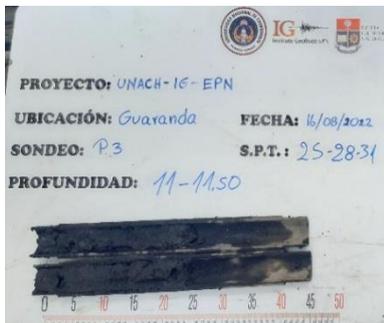
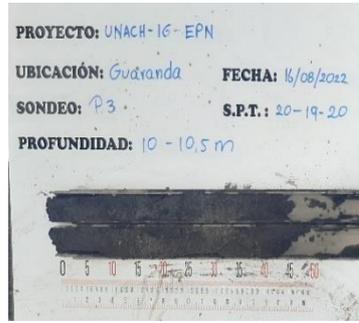
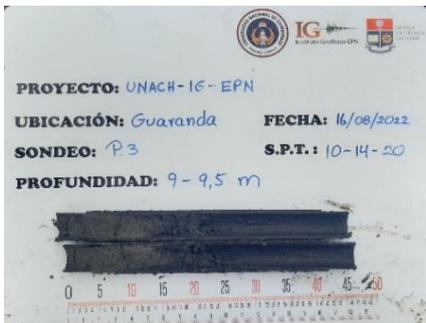
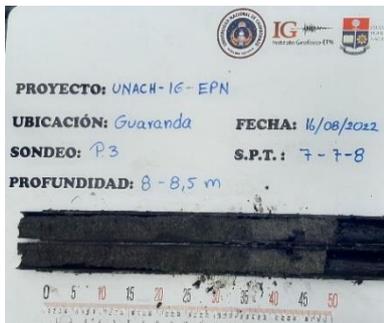
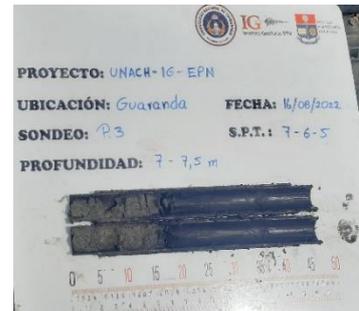
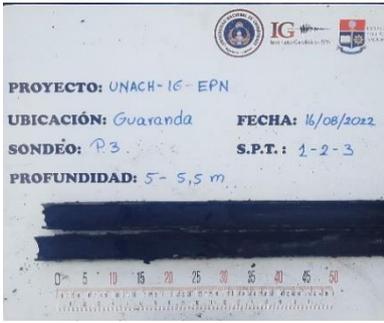
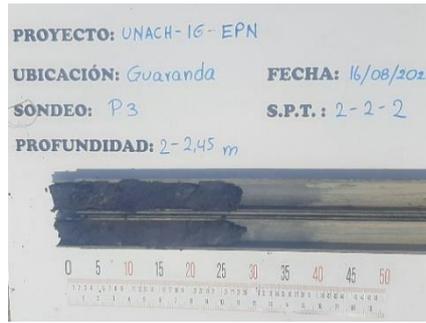
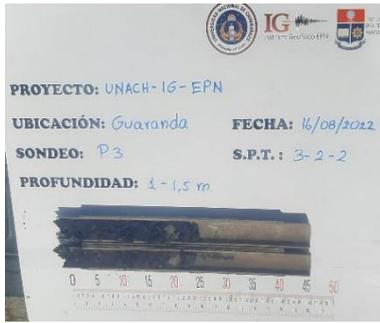
**Anexo #11: Secado, pesaje y separación de partículas de suelo en Laboratorio**



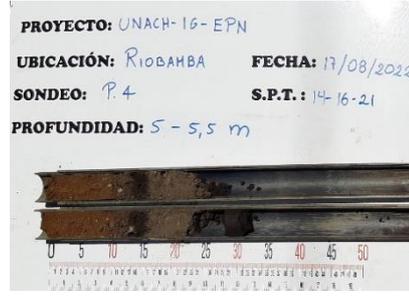
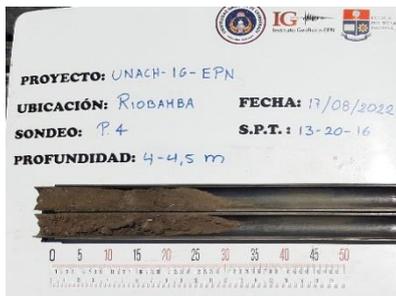
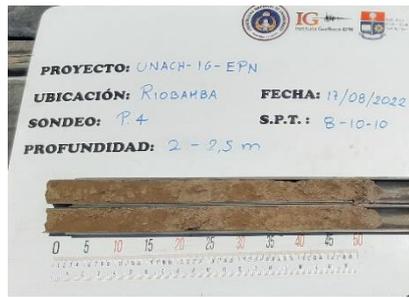
Anexo #13: Recuperación de muestras realizadas por el ensayo SPT para la ciudad de Guamote.



**Anexo #14:** Recuperación de muestras realizadas por el ensayo SPT para la ciudad de Alausí.



Anexo #15: Recuperación de muestras realizadas por el ensayo SPT para la ciudad de Guaranda.



Anexo #16: Recuperación de muestras realizadas por el ensayo SPT para la ciudad de Riobamba

CONTENIDO DE HUMEDAD PARA SUELOS			
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>MUESTRA #1 GUAMOTE (1-1.5m)</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	G2A	0	0
Peso del Recipiente (gr) =	14.8		
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	53.5		
	OK		
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	46.9		
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO - LUEGO DE 24 Hr</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	G2A	0	0
Peso del Recipiente (gr) =	14.8	0	0
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	53.5	0	0
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	46.9	0	0
Peso del Agua en la muestra (gr) =	6.6	0	0
Peso Seco de la muestra (gr) =	32.1	0	0
Humedad (W%) =	21%		
	Verificar que los resultados no varíen en un max. de 5% las 3 muestras		
Contenido de Humedad Promedio de esta Muestra (W%) =	<b>21%</b>		

CONTENIDO DE HUMEDAD PARA SUELOS			
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>MUESTRA #3 GUAMOTE (3-3.5m)</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	J1		
Peso del Recipiente (gr) =	14.2		
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	49.7		
	OK		
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	46.3		
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO - LUEGO DE 24 Hr</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	J1	0	0
Peso del Recipiente (gr) =	14.2	0	0
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	49.7	0	0
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	46.3	0	0
Peso del Agua en la muestra (gr) =	3.4	0	0
Peso Seco de la muestra (gr) =	32.1	0	0
Humedad (W%) =	11%		
	Verificar que los resultados no varíen en un max. de 5% las 3 muestras		
Contenido de Humedad Promedio de esta Muestra (W%) =	<b>11%</b>		

CONTENIDO DE HUMEDAD PARA SUELOS			
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>MUESTRA #4 GUAMOTE (4-4.5m)</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	G3J5		
Peso del Recipiente (gr) =	14.3		
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	53		
	OK		
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	48.8		
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO - LUEGO DE 24 Hr</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	G3J5	0	0
Peso del Recipiente (gr) =	14.3	0	0
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	53	0	0
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	48.8	0	0
Peso del Agua en la muestra (gr) =	4.2	0	0
Peso Seco de la muestra (gr) =	34.5	0	0
Humedad (W%) =	12%		
	Verificar que los resultados no varíen en un max. de 5% las 3 muestras		
Contenido de Humedad Promedio de esta Muestra (W%) =	<b>12%</b>		

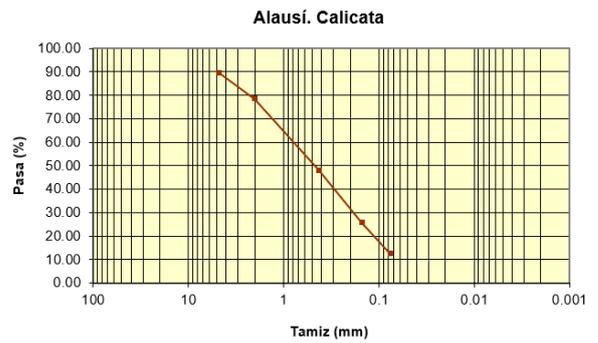
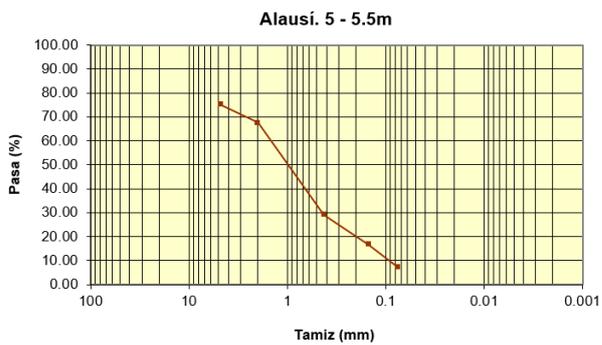
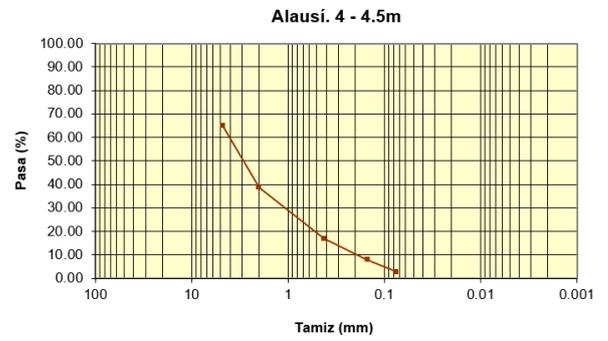
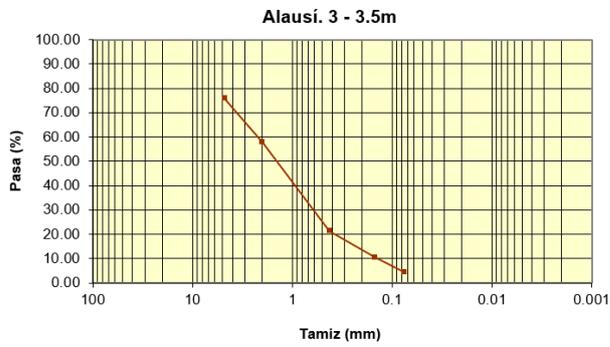
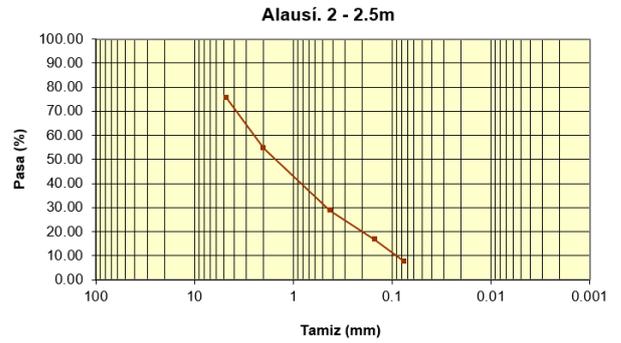
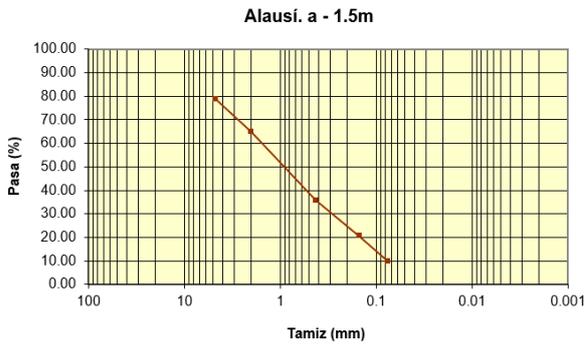
CONTENIDO DE HUMEDAD PARA SUELOS			
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>MUESTRA #5 GUAMOTE (5-5.5m)</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	5H		
Peso del Recipiente (gr) =	14.6		
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	77.9		
	OK		
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	67.7		
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO - LUEGO DE 24 Hr</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	5H	0	0
Peso del Recipiente (gr) =	14.6	0	0
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	77.9	0	0
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	67.7	0	0
Peso del Agua en la muestra (gr) =	10.2	0	0
Peso Seco de la muestra (gr) =	53.1	0	0
Humedad (W%) =	19%		
	Verificar que los resultados no varíen en un max. de 5% las 3 muestras		
Contenido de Humedad Promedio de esta Muestra (W%) =	<b>19%</b>		

CONTENIDO DE HUMEDAD PARA SUELOS			
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>MUESTRA #6 GUAMOTE (6-6.5m)</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	E8		
Peso del Recipiente (gr) =	14.2		
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	85.7		
	OK		
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	77.7		
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO - LUEGO DE 24 Hr</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	E8	0	0
Peso del Recipiente (gr) =	14.2	0	0
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	85.7	0	0
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	77.7	0	0
Peso del Agua en la muestra (gr) =	8	0	0
Peso Seco de la muestra (gr) =	63.5	0	0
Humedad (W%) =	13%		
	Verificar que los resultados no varíen en un max. de 5% las 3 muestras		
Contenido de Humedad Promedio de esta Muestra (W%) =	<b>13%</b>		

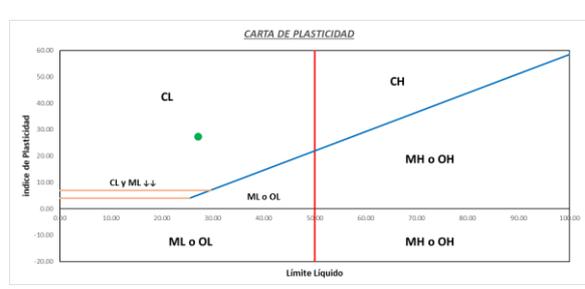
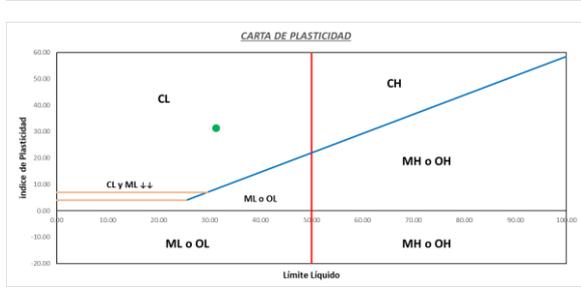
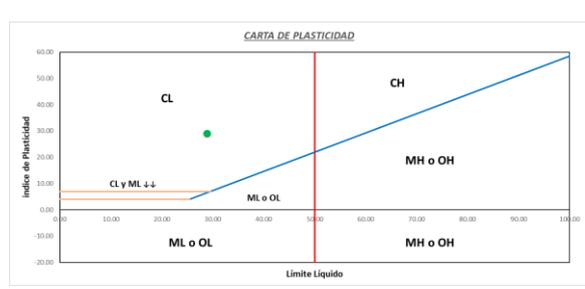
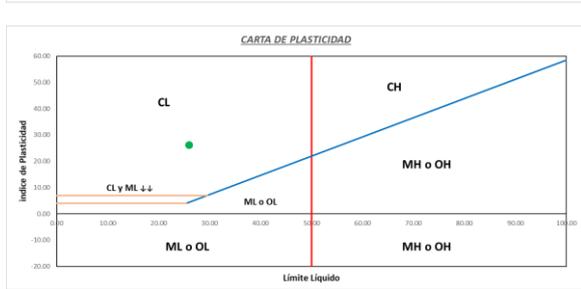
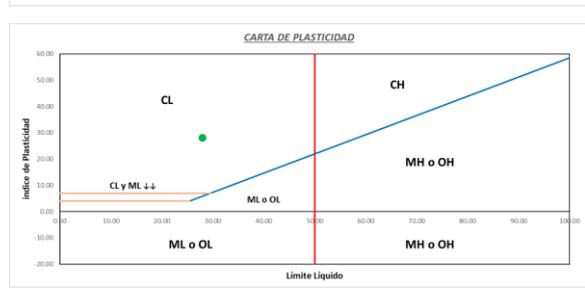
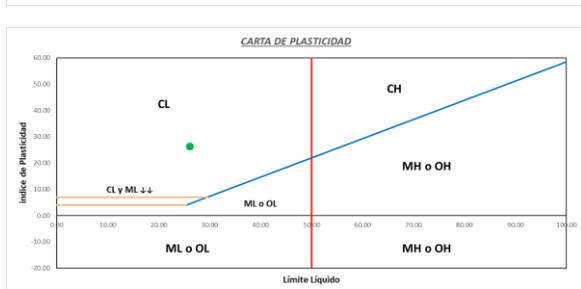
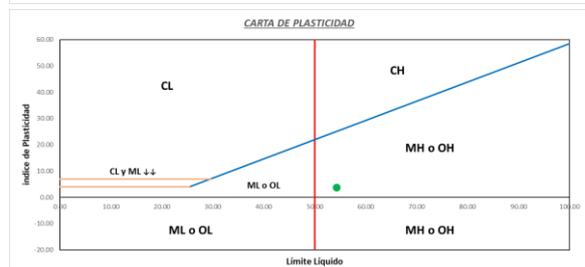
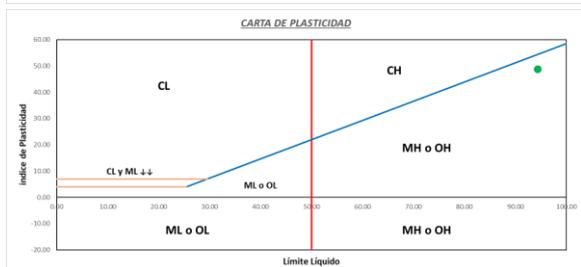
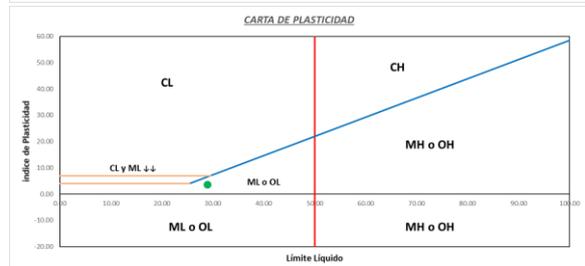
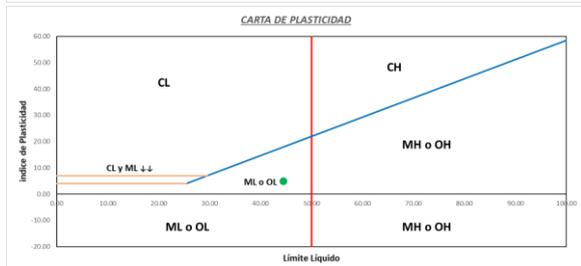
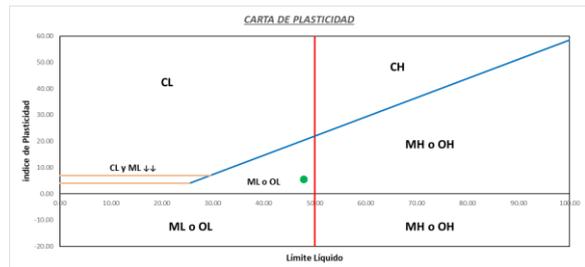
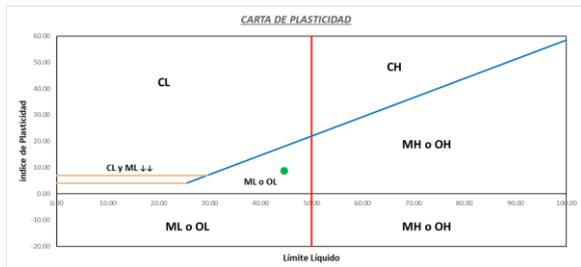
CONTENIDO DE HUMEDAD PARA SUELOS			
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>MUESTRA #7 GUAMOTE (7-7.5m)</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	P2		
Peso del Recipiente (gr) =	14.6		
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	70.8		
	OK		
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	62.2		
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO - LUEGO DE 24 Hr</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	P2	0	0
Peso del Recipiente (gr) =	14.6	0	0
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	70.8	0	0
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	62.2	0	0
Peso del Agua en la muestra (gr) =	8.6	0	0
Peso Seco de la muestra (gr) =	47.6	0	0
Humedad (W%) =	18%		
	Verificar que los resultados no varíen en un max. de 5% las 3 muestras		
Contenido de Humedad Promedio de esta Muestra (W%) =	<b>18%</b>		

DATOS GENERALES			
MUESTRA # DE CALICATA			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	G3	I6	E6
Peso del Recipiente (gr) =	14.4	18.3	18.4
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	47.1	44	44.4
	OK	OK	OK
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	41.1	39.3	39.9
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO - LUEGO DE 24 Hr</b>			
Ensayo	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Código del Recipiente =	G3	I6	E6
Peso del Recipiente (gr) =	14.4	18.3	18.4
Peso del Suelo Húmedo (gr) + Peso del recipiente (gr) =	47.1	44	44.4
Peso del Suelo Seco (gr) + Peso del recipiente (gr) =	41.1	39.3	39.9
Peso del Agua en la muestra (gr) =	6	4.7	4.5
Peso Seco de la muestra (gr) =	26.7	21	21.5
Humedad (W%) =	22%	22%	21%
	Verificar que los resultados no varíen en un max. de 5% las 3 muestras		
Contenido de Humedad Promedio de esta Muestra (W%) =	<b>22%</b>		

## Anexo #17: Cálculo del ensayo de Humedad para la ciudad de Guamote



**Anexo #18: Cálculo del ensayo de Granulometría seca para la ciudad de Alausí**



**Anexo #19:** Cálculo del ensayo de Límites de Atterberg seca para la ciudad de Guaranda.