

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO UNIDIMENSIONAL (1D) DE 3  
PERFILES DE SUELO UBICADOS EN LA CUENCA SUR DE LA  
CIUDAD DE QUITO

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

AUTORES:

BONILLA BOLAÑOS, JONATHAN ALEXANDER

[jonathan.bonilla@epn.edu.ec](mailto:jonathan.bonilla@epn.edu.ec)

LOPEZ ORTIZ CRISTHIAN SAUL

[cristhian.lopez@epn.edu.ec](mailto:cristhian.lopez@epn.edu.ec)

DIRECTOR: DR. RUIZ ROMERO MARIO CALIXTO

[mruiz@igepn.edu.ec](mailto:mruiz@igepn.edu.ec)

FECHA: QUITO 07, 2022

## DECLARACION

Nosotros, Cristhian Saul López Ortiz y Jonathan Alexander Bonilla Bolaños, declaramos que este trabajo de titulación es de nuestra autoría.



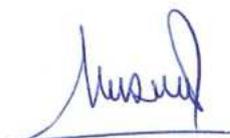
-----  
**Jonathan Alexander Bonilla Bolaños**



-----  
**Cristhian Saul López Ortiz**

## CERTIFICACIÓN

Se certifica que el trabajo fue realizado por Cristhian Saul López Ortiz y Jonathan Alexander Bonilla Bolaños, bajo mi supervisión.



-----

**Dr. Mario Calixto Ruiz Romero**

## **DEDICATORIA**

A mi familia, mi apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. A mi madre, por su amor y paciencia infinitos; a mi padre, por su sabiduría y constante motivación; y a mis hermanas, por su compañía y alegría. Sin su amor y apoyo, esta tesis no habría sido posible. Gracias por ser mi inspiración.

**JONATHAN**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi tutor Mario Calixto Ruiz Romero y Juan Gabriel Barros, por su guía, paciencia y dedicación. Gracias por compartir sus conocimientos y por ser mi mentor a lo largo de esta investigación. Agradezco especialmente su capacidad de motivarme y alentarme incluso en los momentos más difíciles. Este trabajo no habría sido posible sin su compromiso y apoyo inquebrantable.

**CRISTHIAN**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a nuestro director de tesis, Mario Calixto Ruiz Romero y Juan Gabriel Barros, por su paciencia, sabiduría, y dedicación en la supervisión de este proyecto. Sus consejos y sugerencias fueron invaluable en cada etapa del proceso y ayudaron a superar los desafíos que encontramos. También queremos agradecer a las personas que participaron en nuestra investigación Michael Toro, Diana Saquí, Stephen Hernández, Mónica Segovia, Luis Villafuerte y al Ingeniero Jorge Valverde. Sin su colaboración, no habría sido posible llevar a cabo este estudio.

Agradecemos a los profesores y compañeros de clase por su contribución en nuestra formación académica. Sus enseñanzas y discusiones enriquecedoras fueron fundamentales para el éxito de este proyecto.

Finalmente, agradecemos a Dios por todas las bendiciones y oportunidades que nos ha brindado. Su amor y guía nos han acompañado en todo momento y han sido la fuente de fortaleza y perseverancia. Este trabajo es un testimonio de su gracia y misericordia en mi vida.

**CRISTHIAN Y JONATHAN**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACION.....	I
CERTIFICACION.....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS.....	V
<b>1.        CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1.    ANTECEDENTES.....	1
1.1.1. <i>HISTORIA SÍSMICA</i> .....	1
1.1.2. <i>PROYECTOS MICROZONIFICACIÓN QUITO</i> .....	2
1.2.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
1.3.    ALCANCE Y LIMITACIONES.....	10
1.4.    OBJETIVOS.....	10
1.4.1. <i>OBJETIVO GENERAL</i> .....	10
1.4.2. <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i> .....	10
1.5.    HIPÓTESIS.....	11
<b>2.        CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>12</b>
2.1.    ESTADO DEL ARTE .....	12
2.2.    SUELO.....	13
2.2.1. <i>DEFINICIÓN DE SUELO</i> .....	13
2.2.2. <i>ORIGEN</i> .....	13
2.2.3. <i>TIPOS DE SUELO</i> .....	13
2.2.3.1.    SUELOS RESIDUALES .....	13
2.2.3.2.    SUELOS TRASPORTADOS .....	14
2.2.3.3.    SUELOS ORGANICOS O TURBAS.....	14
2.3.    MÉCANICA DE SUELOS (ESTÁTICA DE SUELOS) .....	14
2.3.1. <i>ESTRUCTURA DE SUELO</i> .....	15
2.3.2. <i>PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS SUELOS</i> .....	15
2.3.2.1.    PROPIEDADES DE LOS GRANOS DEL SUELO (PARTÍCULAS)..	15
2.3.2.2.    PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS DEL SUELO (FASES DEL	
SUELO)	16

2.3.2.2.1.	RELACIONES DE VOLUMEN .....	16
2.3.2.2.2.	RELACIONES DE PESO .....	17
2.3.2.3.	LÍMITES DE ATTERBERG.....	17
2.3.3.	<i>PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS</i> .....	18
2.3.3.1.	PERMEABILIDAD DE SUELOS.....	18
2.3.3.2.	TENSIÓN VERTICAL - ESFUERZO VERTICAL EFECTIVO .....	18
2.3.3.3.	COMPRESIBILIDAD DE SUELOS .....	20
2.3.3.4.	CONDICIONES DE ROTURA DE SUELOS.....	20
2.3.3.4.1.	ESFUERZO CORTANTE ( $\tau$ ).....	20
2.3.3.4.2.	ÁNGULO DE FRICIÓN ( $\Phi$ ).....	21
2.3.3.4.3.	COHESIÓN ( $c$ ) .....	23
2.3.4.	<i>CONSOLIDACIÓN DE SUELOS</i> .....	23
2.3.4.1.	ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN .....	24
2.3.4.1.1.	PROCESO PARA ENCONTRAR EL ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN .....	24
2.3.4.2.	GRADO DE SOBRECONSOLIDACIÓN (OCR) .....	26
2.3.4.3.	COEFICIENTE LATERAL DE PRESIÓN DE TIERRAS ( $K_0$ ).....	28
2.3.5.	<i>CLASIFICACIÓN DE SUELOS</i> .....	29
2.3.5.1.	SEGÚN LA SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) .	29
2.3.5.2.	SEGÚN LA ASSHTO (American Association of State Highway Officials)	29
2.4.	MÉCANICA DE SUELOS (DINÁMICA DE SUELOS) .....	29
2.4.1.	<i>PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO</i> .....	30
2.4.1.1.	MÓDULO DE RIGIDEZ AL CORTE (G).....	30
2.4.1.2.	RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO ( $\lambda$ ) .....	32
2.4.1.3.	CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO Y MÓDULO DE DEGRADACIÓN.....	33
2.4.1.4.	REGLAS DE MASING.....	34
2.4.2.	<i>MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS</i>	

2.5.	MODELOS DE SUELO .....	36
2.5.1.	<i>LINEAL</i> .....	36
2.5.2.	<i>ELASTOPLÁSTICO/VISCOELÁSTICO</i> .....	37
2.5.2.1.	MOHR- COULOMB .....	37
2.5.2.2.	HIPERBÓLICO .....	38
2.5.2.3.	MODELO DE DARANDELI .....	38
2.5.2.4.	MODELO DE MENQ .....	43
2.5.2.5.	MODELO CUADRÁTICO HIPERBÓLICO GENERALIZADO (GQ/H) MODELO CON CONTROL DE RESISTENCIA AL CORTE .....	45
2.5.2.6.	MODELO MODIFICADO DE KONDER Y ZELASKO (MKZ) .....	49
2.5.2.7.	ROCK (IDRISS) .....	51
2.6.	EFFECTO DE LOS SISMOS EN LOS SUELOS .....	52
2.6.1.	<i>CONCEPTOS GENERALES</i> .....	52
2.6.1.1.	PLACAS TECTÓNICAS .....	52
2.6.1.1.1.	BORDES DE PLACAS TECTONICAS .....	52
2.6.1.2.	FALLAS GEOLÓGICAS .....	53
2.6.1.2.1.	TIPO DE FALLAS GEOLÓGICAS .....	54
2.6.1.2.2.	FALLAS GEOLÓGICAS DE QUITO (FALLAS INVERSAS) .....	55
2.6.1.3.	SISMOS .....	56
2.6.1.3.1.	ORIGEN Y TIPOS .....	56
2.6.1.3.2.	MAGNITUD E INTENSIDAD .....	56
2.6.1.4.	ONDAS SÍSMICAS .....	57
2.6.1.4.1.	ONDAS DE CUERPO .....	57
2.6.1.4.2.	ONDAS SUPERFICIALES .....	58
2.6.1.4.3.	PROPAGACIÓN DE ONDAS .....	59
2.6.1.5.	SEÑALES SÍSMICAS .....	61
2.6.1.5.1.	CODA SÍSMICA .....	62
2.6.1.6.	ESPECTROS .....	63
2.6.1.7.	DENSIDAD ESPECTRAL (PSD) .....	64
2.6.1.7.1.	MÉTODO WELCH .....	65

2.6.2.	<i>EFECTOS DE SITIO</i> .....	66
2.6.2.1.	DEFINICIÓN.....	66
2.6.2.2.	TIPOS DE EFECTOS DE SITIO .....	66
2.6.2.3.	AMPLIFICACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS.....	67
2.6.2.3.1.	AMPLIFICACIÓN GEOMETRICA DE ONDAS SÍSMICAS .....	67
2.6.2.3.2.	AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DE ONDAS SÍSMICAS.....	68
2.6.3.	<i>PERFILES DE SUELO</i> .....	69
2.6.3.1.	PERFIL ESTRATIGRÁFICO .....	69
2.6.3.2.	PERFIL LITOLÓGICO.....	69
2.6.4.	<i>FUNCIÓN DE TRASFERENCIA</i> .....	69
2.6.5.	<i>NYQUIST FRECUENCIA</i> .....	70
2.6.6.	<i>CURVA mHVS</i> .....	71
2.6.7.	<i>DECONVOLUCIÓN Y CONVOLUCIÓN SÍSMICA</i> .....	71
2.6.8.	<i>MÉTODOS DE ANÁLISIS DE AMPLIFICACIÓN DE SITIO</i> .....	72
2.6.8.1.	ANÁLISIS DE SITIO 1D .....	72
2.6.8.1.1.	LINEAL .....	72
2.6.8.1.2.	LINEAL EQUIVALENTE .....	73
2.6.8.1.3.	NO LINEAL .....	73
2.6.8.2.	ANÁLISIS DE SITIO 2D .....	73
2.6.8.3.	ANÁLISIS DE SITIO EN 3D .....	74
2.6.9.	<i>TIPOS DE ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO</i> .....	75
2.6.9.1.	GEOTÉCNICOS.....	75
2.6.9.2.	GEOFÍSICOS O SISMOLÓGICOS .....	75
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO III: METODOLOGIA Y DESARROLLO</b> .....	<b>76</b>
3.1.	DESCRIPCION DEL SITIO DE ESTUDIO .....	76
3.1.1.	<i>UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA QUIB</i> .....	76
3.1.2.	<i>UBICACIÓN DE LOS POZOS DE ANÁLISIS</i> .....	77
3.2.	RECOPIACION DE DATOS .....	78
3.2.1.	<i>SEÑALES SÍSMICAS</i> .....	78
3.2.2.	<i>DATOS GEOTÉCNICOS</i> .....	80

3.3.	MODELAMIENTO .....	81
3.3.1.	<i>COLUMNA DE SUELO</i> .....	81
3.3.1.1.	DATOS CALCULADOS .....	81
3.3.1.1.1.	SUELOS FINOS .....	81
3.3.1.1.2.	SUELOS GRUESOS .....	83
3.3.1.2.	SEÑALES SÍSMICAS .....	84
3.3.2.	<i>MODELAMIENTO SÍSMICO DE LA COLUMNA DE SUELO</i> .....	85
3.3.2.1.	PARÁMETROS DE ANALISIS .....	85
3.3.2.1.1.	ANÁLISIS LINEAL .....	85
3.3.2.1.2.	ANÁLISIS LINEAL EQUIVALENTE .....	85
3.4.	FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA COLUMNA DE SUELO .....	85
3.4.1.	<i>DECONVOLUCIÓN Y CONVOLUCIÓN SÍSMICA</i> .....	85
3.4.1.1.	PROSHAKE .....	86
3.4.1.1.1.	ANÁLISIS POR EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA .....	87
3.4.1.2.	DEEPSOIL .....	88
3.4.1.2.1.	MÉTODOS DE AJUSTE DE MODELOS DE SUELO .....	89
3.4.1.2.2.	ANÁLISIS POR EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA .....	89
3.4.2.	<i>ANÁLISIS DE SEÑALES EN SUPERFICIE Y BASAMENTO ELÁSTICO</i> .....	91
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS, ANÁLISIS, CONCLUSIONES Y</b>	
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>92</b>
4.1.	FUNCIONES DE TRANSFERENCIA .....	92
4.2.	ANÁLISIS .....	96
4.2.1.	<i>COMPARACIÓN ENTRE COMPONENTES</i> .....	97
4.2.1.1.	TABLA COMPARATIVA .....	100
4.2.2.	<i>COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS</i> .....	102
4.2.2.1.	TABLA COMPARATIVA .....	105
4.2.3.	<i>COMPARACIÓN ENTRE POZOS</i> .....	106
4.2.3.1.	MEDIANAS DE LOS 3 POZOS .....	107
4.2.3.2.	COMPARACIÓN ENTRE LAS MEDIANAS DE LOS 3 POZOS .....	109
4.2.3.3.	TABLAS COMPARATIVAS .....	110

4.2.4.	COMPARACIÓN CON FUNCIONES DE TRASFERENCIAS DE OTRAS MICROZONIFICACIONES.....	111
4.2.4.1.	MICROZONIFICACIÓN 1992-1994.....	112
4.2.4.2.	ERN 2012.....	114
4.2.5.	COMPARACIÓN CON LA CURVA <i>mHVRS</i> .....	116
4.3.	CONCLUSIONES .....	120
4.4.	RECOMENDACIONES.....	123
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO V: REFERENCIAS.....</b>	<b>124</b>
<b>6.</b>	<b>CAPÍTULO VI: ANEXOS .....</b>	<b>134</b>
6.1.	DATOS COLUMNA DE SUELO .....	134
6.1.1.	POZO PCQ0012.....	134
6.1.1.1.	SUELOS FINOS.....	134
6.1.1.2.	SUELOS GRUESOS.....	135
6.1.2.	POZO PCQ0013.....	136
6.1.2.1.	SUELOS FINOS.....	136
6.1.2.2.	SUELOS GRUESOS.....	137
6.1.3.	POZO PCQ0014.....	138
6.1.3.1.	SUELOS FINOS.....	138
6.1.3.2.	SUELOS GRUESOS.....	139
6.1.4.	CALCULOS DE LOS DATOS DE LA COLUMNA DE SUELOS.....	140
6.1.4.1.	ÁNGULO DE FRICCIÓN.....	140
6.1.4.2.	GRANULOMETRIA AGREGADOS GRUESOS .....	142
6.1.4.2.1.	POZO PCQ0012.....	142
6.1.4.2.2.	POZO PCQ0013.....	146
6.1.4.2.3.	POZO PCQ0014.....	151
6.2.	GRÁFICAS DEL SUELO .....	161
6.2.1.	POZO PCQ0012.....	161
6.2.1.1.	MÉTODO LINEAL .....	161
6.2.1.2.	MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE .....	162
6.2.2.	POZO PCQ0013.....	163

6.2.2.1.	MÉTODO LINEAL .....	163
6.2.2.2.	MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE .....	164
6.2.3.	<i>POZO PCQ0014</i> .....	165
6.2.3.1.	MÉTODO LINEAL .....	165
6.2.3.2.	MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE .....	166
6.3.	GLOSARIO DE TERMINOS DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS .....	167
6.4.	MODELOS DE SUELO .....	168
6.4.1.	<i>PROSHAKE</i> .....	168
6.4.2.	<i>DEEPSOIL</i> .....	168
6.4.2.1.	NOMENCLATURA MODELOS DE SUELO .....	169
6.5.	SEÑALES, DENSIDADES ESPECTRALES Y FUNCION DE TRASFERENCIA.....	169
6.5.1.	<i>SEÑALES UTILIZADAS</i> .....	169
6.5.1.1.	COMPONENTE VERTICAL .....	170
6.5.1.2.	COMPONENTE HORIZONTAL.....	172
6.5.2.	<i>GRÁFICOS CONVOLUCION PCQ0012</i> .....	174
6.5.2.1.	MÉTODO LINEAL .....	174
6.5.2.1.1.	COMPONENTE HORIZONTAL .....	174
6.5.2.1.2.	COMPONENTE VERTICAL.....	179
6.5.2.2.	MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE .....	183
6.5.2.2.1.	COMPONENTE HORIZONTAL .....	183
6.5.2.2.2.	COMPONENTE VERTICAL.....	188
6.5.3.	<i>GRÁFICOS CONVOLUCION PCQ0013</i> .....	192
6.5.3.1.	MÉTODO LINEAL .....	192
6.5.3.1.1.	COMPONENTE HORIZONTAL .....	192
6.5.3.1.2.	COMPONENTE VERTICAL.....	197
6.5.3.2.	MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE .....	201
6.5.3.2.1.	COMPONENTE HORIZONTAL .....	201
6.5.3.2.2.	COMPONENTE VERTICAL.....	206
6.5.4.	<i>GRÁFICOS CONVOLUCION PCQ0014</i> .....	210

6.5.4.1.	MÉTODO LINEAL .....	210
6.5.4.1.1.	COMPONENTE HORIZONTAL .....	210
6.5.4.1.2.	COMPONENTE VERTICAL.....	215
6.5.4.2.	MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE .....	219
6.5.4.2.1.	COMPONENTE HORIZONTAL .....	219
6.5.4.2.2.	COMPONENTE VERTICAL.....	224

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> Microzonificación Quito 1992-1994.....	4
<b>FIGURA 2</b> Microzonificación Quito 2002.....	5
<b>FIGURA 3</b> Microzonificación Quito 2017.....	6
<b>FIGURA 4</b> (a) Suelo en estado natural; (b) Tres fases del suelo. ....	15
<b>FIGURA 5</b> Límites de Atterberg. ....	17
<b>FIGURA 6</b> Esfuerzo cortante.....	20
<b>FIGURA 7</b> a) Gráfica de $e$ vs $\log \sigma'$ que muestra las ramas de carga y descarga, b) Procedimiento gráfico para determinar la presión de preconsolidación. ....	25
<b>FIGURA 8</b> Gráfica de $e$ vs $\log \sigma'$ que representa el procedimiento gráfico para determinar la presión de preconsolidación. ....	26
<b>FIGURA 9</b> Presión de tierras en reposo.....	28
<b>FIGURA 10</b> Curva de histéresis y diferentes módulos $G$ . ....	31
<b>FIGURA 11</b> Relación de amortiguamiento mediante el ciclo histerético. ....	32
<b>FIGURA 12</b> Ciclo histerético rango lineal.....	33
<b>FIGURA 13</b> Curva de degradación del módulo de corte y curva de amortiguamiento. ....	34
<b>FIGURA 14</b> Ensayos para estimar las propiedades dinámicas del suelo mediante la deformación.....	36
<b>FIGURA 15</b> Comportamiento del suelo de acuerdo con la deformación (unidades en %). ....	36
<b>FIGURA 16</b> Modelo de suelo Lineal.....	37
<b>FIGURA 17</b> Modelo de suelo Mohr – Coulomb. ....	37
<b>FIGURA 18</b> Sección de curva que el modelo de Kondner y Zelasko es aplicable. ....	38
<b>FIGURA 19</b> Comparación del efecto de frecuencia sobre el módulo de corte y el amortiguamiento para frecuencias de amplitud baja y alta. ....	41
<b>FIGURA 20</b> Efecto del número de ciclos de carga en a) módulo de corte, b) módulo de corte normalizado y c) relación de amortiguamiento con relación a la deformación. ....	42
<b>FIGURA 21</b> Efecto de los valores de $\beta$ y $s$ en la curva esfuerzo deformación. ....	49

<b>FIGURA 22</b> Distribución global de las principales placas tectónicas. ....	52
<b>FIGURA 23</b> Tipo de límites o bordes entre las placas tectónicas.....	53
<b>FIGURA 24</b> Tipos de fallas geológicas .....	54
<b>FIGURA 25</b> Sistemas de fallas de Quito y rasgos morfológicos principales asociados a estos sistemas.....	55
<b>FIGURA 26</b> Esquemas de la propagación de las Ondas Primarias o P.....	57
<b>FIGURA 27</b> Esquema de la propagación de las Ondas Secundarias o S.....	58
<b>FIGURA 28</b> Esquema de la propagación de las ondas Rayleigh.....	59
<b>FIGURA 29</b> Esquema de la propagación de las ondas Love. ....	59
<b>FIGURA 30</b> Reflexión y refracción de una onda P al llegar a una interfase entre dos medios.....	60
<b>FIGURA 31</b> Arriba: Propagación de las ondas sísmicas por el interior de la Tierra y nomenclatura de las ondas: líneas continuas: Ondas P; líneas entrecortadas: Ondas S. Abajo: Sismorama observado a 112.5° de distancia epicentral (1° = 111.11 Km).60	
<b>FIGURA 32</b> Sismogramas (3 componentes) de un terreno registrado en Nicaragua, el 9 de octubre de 1998 en una estación a 86.5° de distancia. ....	61
<b>FIGURA 33</b> Localización de la coda sísmica en una señal acelerográfica. ....	62
<b>FIGURA 34</b> a) Señal sísmica, b) Espectro señal sísmica. ....	63
<b>FIGURA 35</b> Espectro de respuesta norma ecuatoriana.....	64
<b>FIGURA 36</b> Suelo sobre lecho rocoso. ....	67
<b>FIGURA 37</b> Convolución y Deconvolución sísmica.....	72
<b>FIGURA 38</b> Ejemplos típicos cuando es necesario un análisis de sitios en 2D. ....	74
<b>FIGURA 39</b> Equipo CMG-5T Triaxial Accelerometer. Ubicado en la estación QUIB. 76	
<b>FIGURA 40</b> Ejes transversales y longitudinales de los pozos de perforación del proyecto “ACTUALIZACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE QUITO – PRIMERA FASE” .....	77
<b>FIGURA 41</b> Sismos corticales en la cercanía de Quito periodo 2012-2018.....	78
<b>FIGURA 42</b> Perfil litológicos de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014.....	86

<b>FIGURA 43</b> Funciones de transferencia de 8 eventos sísmicos, diferentes componentes, con su mediana y percentiles al 20 y 80 por ciento; diferentes métodos; Pozo PCQ0012.....	93
<b>FIGURA 44</b> Funciones de transferencia de 8 eventos sísmicos, diferentes componentes, con su mediana y percentiles al 20 y 80 por ciento; diferentes métodos; Pozo PCQ0013.....	94
<b>FIGURA 45</b> Funciones de transferencia de 8 eventos sísmicos, diferentes componentes, con su mediana y percentiles al 20 y 80 por ciento; diferentes métodos; Pozo PCQ0014.....	95
<b>FIGURA 46</b> Comparación de las funciones de transferencias obtenidas para el pozo PCQ0012 entre la componente vertical y horizontal por el método lineal y lineal equivalente.....	97
<b>FIGURA 47</b> Comparación de las funciones de transferencias obtenidas para el pozo PCQ0013 entre la componente vertical y horizontal por el método lineal y lineal equivalente.....	98
<b>FIGURA 48</b> Comparación de las funciones de transferencias obtenidas para el pozo PCQ0014 entre la componente vertical y horizontal por el método lineal y lineal equivalente.....	99
<b>FIGURA 49</b> Comparación de las funciones de transferencias obtenidas para el pozo PCQ0012 entre el método lineal y lineal equivalente.....	102
<b>FIGURA 50</b> Comparación de las funciones de transferencias obtenidas para el pozo PCQ0013 entre el método lineal y lineal equivalente.....	103
<b>FIGURA 51</b> Comparación de las funciones de transferencias obtenidas para el pozo PCQ0014 entre el método lineal y lineal equivalente.....	104
<b>FIGURA 52</b> Mediana de todos los métodos y componentes de los diferentes pozos.....	107
<b>FIGURA 53</b> Comparación de la mediana de las funciones de transferencias de los 3 pozos.....	109
<b>FIGURA 54</b> a) Mapa de la microzonificación 1992-1994 con la ubicación encerrada en rojo de la localización del pozo PCQ0012 en microzona L1, del pozo PCQ0013 en	

microzona L1 y del pozo PCQ0014 en microzona F1; b) Función de transferencia microzona L1; c) Función de transferencia microzona F1.....	112
<b>FIGURA 55</b> a) Mapa de la microzonificación 2012 con la ubicación encerrada en rojo de la localización del pozo PCQ0012 en MSQ11, del pozo PCQ0013 en microzona MSQ11 y del pozo PCQ0014 en microzona MSQ11; b) Función de transferencia microzona MSQ11.....	114
<b>FIGURA 56</b> Curva mHVRS de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014. ....	116
<b>FIGURA 57</b> Curva mHVRS del pozo PCQ0012.....	117
<b>FIGURA 58</b> Curva mHVRS del pozo PCQ0013.....	118
<b>FIGURA 59</b> Curva mHVRS del pozo PCQ0014.....	119
<b>FIGURA 60</b> Análisis granulométrico de la abscisa 9-9.45 metros del pozo PCQ0012. ....	142
<b>FIGURA 61</b> Análisis granulométrico de la abscisa 10-10.45 metros del pozo PCQ0012.....	143
<b>FIGURA 62</b> Análisis granulométrico de la abscisa 11-11.45 metros del pozo PCQ0012.....	144
<b>FIGURA 63</b> Análisis granulométrico de la abscisa 12-12.45 metros del pozo PCQ0012.....	145
<b>FIGURA 64</b> Análisis granulométrico de la abscisa 8-8.45 metros del pozo PCQ0013. ....	146
<b>FIGURA 65</b> Análisis granulométrico de la abscisa 9-9.45 metros del pozo PCQ0013. ....	147
<b>FIGURA 66</b> Análisis granulométrico de la abscisa 10-10.45 metros del pozo PCQ0013.....	148
<b>FIGURA 67</b> Análisis granulométrico de la abscisa 11-11.45 metros del pozo PCQ0013.....	149
<b>FIGURA 68</b> Análisis granulométrico de la abscisa 12-12.45 metros del pozo PCQ0013.....	150
<b>FIGURA 69</b> Análisis granulométrico de la abscisa 14-14.45 metros del pozo PCQ0014.....	151

<b>FIGURA 70</b> Análisis granulométrico de la abscisa 15-15.45 metros del pozo PCQ0014.....	152
<b>FIGURA 71</b> Análisis granulométrico de la abscisa 16-16.45 metros del pozo PCQ0014.....	153
<b>FIGURA 72</b> Análisis granulométrico de la abscisa 17-17.45 metros del pozo PCQ0014.....	154
<b>FIGURA 73</b> Análisis granulométrico de la abscisa 18-18.45 metros del pozo PCQ0014.....	155
<b>FIGURA 74</b> Análisis granulométrico de la abscisa 19-19.45 metros del pozo PCQ0014.....	156
<b>FIGURA 75</b> Análisis granulométrico de la abscisa 20-20.45 metros del pozo PCQ0014.....	157
<b>FIGURA 76</b> Análisis granulométrico de la abscisa 21-21.45 metros del pozo PCQ0014.....	158
<b>FIGURA 77</b> Análisis granulométrico de la abscisa 22-22.45 metros del pozo PCQ0014.....	159
<b>FIGURA 78</b> Análisis granulométrico de la abscisa 23-23.45 metros del pozo PCQ0014.....	160
<b>FIGURA 79</b> Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal de los estratos de suelo del pozo PCQ0012, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato.....	161
<b>FIGURA 80</b> Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal equivalente de los estratos de suelo del pozo PCQ0012, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato.....	162
<b>FIGURA 81</b> Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal de los estratos de suelo del pozo PCQ0013, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato.....	163

<b>FIGURA 82</b> Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal equivalente de los estratos de suelo del pozo PCQ0013, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato. ....	164
<b>FIGURA 83</b> Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal de los estratos de suelo del pozo PCQ0014, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato. ....	165
<b>FIGURA 84</b> Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal equivalente de los estratos de suelo del pozo PCQ0014, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato. ....	166
<b>FIGURA 85</b> De izquierda a derecha, en orden descendente, figuras de las componentes verticales de los 8 eventos sísmicos utilizados para el presente trabajo de titulación. ....	171
<b>FIGURA 86</b> De izquierda a derecha, en orden descendente, figuras de las componentes horizontales de los 8 eventos sísmicos utilizados para el presente trabajo de titulación. ....	173
<b>FIGURA 87</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 1. ....	174
<b>FIGURA 88</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 2. ....	175
<b>FIGURA 89</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 3. ....	175

- FIGURA 90** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 4. .... 176
- FIGURA 91** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 5. .... 176
- FIGURA 92** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 6. .... 177
- FIGURA 93** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 7. .... 177
- FIGURA 94** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 8. .... 178
- FIGURA 95** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 1. .... 179
- FIGURA 96** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 2. .... 179
- FIGURA 97** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de

trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 3.....	180
<b>FIGURA 98</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 4.....	180
<b>FIGURA 99</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 5.....	181
<b>FIGURA 100</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 6.....	181
<b>FIGURA 101</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 7.....	182
<b>FIGURA 102</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 8.....	182
<b>FIGURA 103</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 1.....	183
<b>FIGURA 104</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 2.....	184

- FIGURA 105** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 3..... 184
- FIGURA 106** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 4..... 185
- FIGURA 107** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 5..... 185
- FIGURA 108** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 6..... 186
- FIGURA 109** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 7..... 186
- FIGURA 110** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 8..... 187
- FIGURA 111** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 1..... 188
- FIGURA 112** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de

trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 2.....	188
<b>FIGURA 113</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 3.....	189
<b>FIGURA 114</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 4.....	189
<b>FIGURA 115</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 5.....	190
<b>FIGURA 116</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 6.....	190
<b>FIGURA 117</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 7.....	191
<b>FIGURA 118</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 8.....	191
<b>FIGURA 119</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 1.....	192

- FIGURA 120** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 2. .... 193
- FIGURA 121** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 3. .... 193
- FIGURA 122** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 4. .... 194
- FIGURA 123** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 5. .... 194
- FIGURA 124** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 6. .... 195
- FIGURA 125** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 7. .... 195
- FIGURA 126** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 8. .... 196
- FIGURA 127** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de

trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 1.....	197
<b>FIGURA 128</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 2.....	197
<b>FIGURA 129</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 3.....	198
<b>FIGURA 130</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 4.....	198
<b>FIGURA 131</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 5.....	199
<b>FIGURA 132</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 6.....	199
<b>FIGURA 133</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 7.....	200
<b>FIGURA 134</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 8.....	200

- FIGURA 135** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 1..... 201
- FIGURA 136** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 2..... 202
- FIGURA 137** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 3..... 202
- FIGURA 138** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 4..... 203
- FIGURA 139** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 5..... 203
- FIGURA 140** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 6..... 204
- FIGURA 141** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 7..... 204
- FIGURA 142** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de

trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 8.....	205
<b>FIGURA 143</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 1.....	206
<b>FIGURA 144</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 2.....	206
<b>FIGURA 145</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 3.....	207
<b>FIGURA 146</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 4.....	207
<b>FIGURA 147</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 5.....	208
<b>FIGURA 148</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 6.....	208
<b>FIGURA 149</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 7.....	209

<b>FIGURA 150</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 8.....	209
<b>FIGURA 151</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 1.....	210
<b>FIGURA 152</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 2.....	211
<b>FIGURA 153</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 3.....	211
<b>FIGURA 154</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 4.....	212
<b>FIGURA 155</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 5.....	212
<b>FIGURA 156</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 6.....	213
<b>FIGURA 157</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de	

trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 7.....	213
<b>FIGURA 158</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 8.....	214
<b>FIGURA 159</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 1.....	215
<b>FIGURA 160</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 2.....	215
<b>FIGURA 161</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 3.....	216
<b>FIGURA 162</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 4.....	216
<b>FIGURA 163</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 5.....	217
<b>FIGURA 164</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 6.....	217

- FIGURA 165** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 7..... 218
- FIGURA 166** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 8..... 218
- FIGURA 167** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 1..... 219
- FIGURA 168** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 2..... 220
- FIGURA 169** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 3..... 220
- FIGURA 170** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 4..... 221
- FIGURA 171** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 5..... 221
- FIGURA 172** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de

trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 6.....	222
<b>FIGURA 173</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 7.....	222
<b>FIGURA 174</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 8.....	223
<b>FIGURA 175</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 1.....	224
<b>FIGURA 176</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 2.....	224
<b>FIGURA 177</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 3.....	225
<b>FIGURA 178</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 4.....	225
<b>FIGURA 179</b> Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 5.....	226

- FIGURA 180** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 6. .... 226
- FIGURA 181** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 7. .... 227
- FIGURA 182** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 8. .... 227

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Coeficientes típicos del grado de sobreconsolidación.....	27
<b>Tabla 2</b> Ensayos para estimar propiedades dinámicas de suelos. ....	35
<b>Tabla 3</b> Sismos escogidos para el análisis; Características generales.....	79
<b>Tabla 4</b> Sismos escogidos para el análisis; Horas universales.....	79
<b>Tabla 5</b> Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos finos pozo PCQ0012.....	82
<b>Tabla 6</b> Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos finos pozo PCQ0013.....	82
<b>Tabla 7</b> Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos finos pozo PCQ0014.....	82
<b>Tabla 8</b> Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos gruesos pozo PCQ0012.....	83
<b>Tabla 9</b> Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos gruesos pozo PCQ0013.....	83
<b>Tabla 10</b> Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos gruesos pozo PCQ0014.....	84
<b>Tabla 11</b> Desfase relativos entre componentes horizontal y vertical de las funciones de transferencias.....	100
<b>Tabla 12.</b> Desfase relativo entre métodos lineal y lineal equivalente de las funciones de transferencias.....	105
<b>Tabla 13</b> Valores pico de amplificación de la mediana de las funciones de transferencia de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014, con la frecuencia en donde se encuentran.....	110
<b>Tabla 14</b> Desfase relativo entre las funciones de transferencia de los pozos y la mediana de los pozos. ....	110
<b>Tabla 15</b> Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0012, sección fina. ....	134
<b>Tabla 16</b> Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0012, sección gruesa. ....	135
<b>Tabla 17</b> Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0013, sección fina. ....	136
<b>Tabla 18</b> Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0013, sección gruesa. ....	137

<b>Tabla 19</b> Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0014, sección fina. ....	138
<b>Tabla 20</b> Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0014, sección gruesa. ....	139
<b>Tabla 21</b> Ángulo de fricción de los diferentes estratos del pozo PCQ0012. ....	140
<b>Tabla 22</b> Ángulo de fricción de los diferentes estratos del pozo PCQ0013. ....	140
<b>Tabla 23</b> Ángulo de fricción de los diferentes estratos del pozo PCQ0014. ....	141
<b>Tabla 24</b> Glosario de términos que utilizan los programas Deepsoil y Proshake...	167
<b>Tabla 25</b> Tipos de suelo del programa Proshake.....	168
<b>Tabla 26</b> Tipos de suelo del programa Deepsoil.....	168
<b>Tabla 27</b> Nomenclatura de los modelos de suelo del programa Deepsoil. ....	169
<b>Tabla 28.</b> Inicio de onda P, S y Coda sísmica en las señales utilizadas.....	169

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un análisis de sitio de 3 perfiles de suelo correspondientes al proyecto de “actualización de la Microzonificación Sísmica de Quito Fase 1”, proceso que se realizó con la ayuda del software DEEPSOIL versión 7.0. y MATLAB 2015 b.

Para lo cual nos proporcionó el “Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional”, 8 señales sísmicas que cumplen con las características de ser sismos corticales que tienen una magnitud ( $M_L$ ) superior a 3.7 y un PGA superior a  $1 \text{ cm/s}^2$  de la estación QUIB, ubicada en el sur de Quito. Para el análisis únicamente se lo efectuó con la sección correspondiente a las ondas S y a la coda sísmica. Se trabajó tanto con las señales horizontales y verticales.

Se procedió a modelar la columna de suelo, utilizando el modelo GQ/H ajustado con el modelo de (Darendeli, 2001) para suelos finos y el modelo MKZ ajustado con el modelo de (Menq, 2003) para suelos gruesos, calculando las curvas de amortiguamiento, módulo de degradación y curva de esfuerzo-deformación cortante. Se realiza un análisis lineal al igual que un análisis lineal-equivalente.

Se procede realizó la deconvolución sísmica en el pozo PCQ0013 generando señales sintéticas en la base de los sedimentos superficiales, con las cuales se realizó la convolución sísmica para los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014. Obteniendo la densidad espectral (PSD), posteriormente se realiza la división espectral entre las densidades espectrales de sitios vs. las densidades espectrales de referencia obteniendo de esta manera las funciones de transferencia.

**Palabras clave:** análisis de sitio, amplificación dinámica, señal sísmica, convolución, deconvolución, función de transferencia

## ABSTRACT

In the present work, a site analysis of 3 soil profiles corresponding to the project of "updating the Seismic Microzoning of Quito Phase 1" was carried out, a process that was carried out with the help of the DEEPSOIL software version 7.0. and MATLAB 2015b.

For which the "Geophysical Institute of the National Polytechnic School" provided us with 8 seismic signals that meet the characteristics of being crustal earthquakes that have a magnitude (MLv) greater than 3.7 and a PGA greater than  $1 \text{ [cm/s]}^2$  of the QUIB station, located in the south of Quito. For the analysis, it was only carried out with the section corresponding to the S waves and the seismic coda. It works with both horizontal and vertical signals.

The soil column was modeled, using the GQ/H model adjusted with the model of (Darendeli, 2001) for fine soils and the MKZ model adjusted with the model of (Menq, 2003) for coarse soils, calculating the curves of damping, degradation modulus and shear stress-strain curve. A linear analysis is performed just like a linear-equivalent analysis.

Seismic deconvolution is carried out in well PCQ0013, discovering synthetic signals at the base of the superficial sediments, with which seismic convolution was carried out for wells PCQ0012, PCQ0013 and PCQ0014. Obtaining the spectral density (PSD), then the spectral division between the spectral densities of sites vs. the reference spectral densities thus obtaining the transfer functions.

**KEY WORDS:** site analysis, dynamic amplification, seismic signal, convolution, deconvolution, transfer function.

# 1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

### 1.1.1. HISTORIA SÍSMICA

Los fenómenos sísmicos datan de hace miles de años, cronistas Griegos y Romanos hablan de la destrucción provocada por los mismos. En China se data de escritos de 3000 años que describen los movimientos telúricos y sus impactos; en Japón y Europa Oriental hay registros de 1600 años de antigüedad, todos dando míticas explicaciones para estos fenómenos. Se dice que el inicio de la sismología moderna es partir del: “terremoto de Lisboa el 1 de noviembre de 1755”, dicho evento dio paso a teorías como propagación de ondas elásticas (Cauchy, Poisson, Stokes, Rayleigh, y otros, 1800), la hipótesis de la deriva continental (Alfred Wegener, 1910) en 1935 la escala logarítmica de Richter y para el año 1965 el término “tectónica de placa” por el geofísico canadiense Tuzo Wilson (Ben-Menahem, 1995).

- **Ecuador**

“El potencial sísmico siempre ha sido un problema para los habitantes del Ecuador y su coexistencia con la actividad sísmica ha llegado a ser parte de la cultura Ecuatoriana” (Hall, 2000).

A lo largo de la historia sísmica, ciudades completas han sido destruidas Atuntaqui, Ambato, Riobamba, Pelileo, Otavalo e Ibarra por violentos eventos sísmicos causados por la interacción e interrelación de las masas continentales, lo cual se explica claramente con la teoría Tectónica de Placas (Del Pino & Yepes, 1990).

La primera vez que se mencionó un sismo en el Ecuador fue en el año 1541, dando como inicio la historia sísmica documentada en el país, desde el año 1541 a 1999 han ocurrido más de 400 sismos con un total de 37 terremotos destructivos dando un periodo de recurrencia de un sismo destructivo cada 12.37 años, esto siendo una aproximación matemática puesto que los terremotos pueden ocurrir indistintamente en cualquier región y lugar (Rivadeneira , y otros, 2007).

El mayor evento telúrico en el Ecuador, sucedió el 31 de Enero de 1906 llegando a estar entre los 10 mayores sismos a nivel mundial el cual tuvo una “magnitud de Ondas Superficiales (Ms) de 8.6” (CERESIS, 1985) o de “8.7 de Magnitud en la escala de Richter” (Espinoza, 1992), pero el valor más aceptado es de 8.6 en Magnitud Momento (Mw), además de generar tsunamis que afectaron la costa Ecuatoriana (The United States Geological Survey, 2021), también se ha tenido sismos representativos como son: Riobamba (1797), Ibarra (1868), Ambato (1949), Napo (1982) (Rivadeneira , y otros, 2007), los cuales han marcado hitos importantes en la historia sísmica ecuatoriana.

- **Quito**

En la historia sísmica desde el año 1541, Quito ha sufrido 98 sismos que han sobrepasado la intensidad de 7 en la escala Medvédev-Sponheuer-Kárník (MSK), de los cuales 14 sismos se han generado en un diámetro de 100 km alrededor de la ciudad de Quito, pero apenas 5 tienen su epicentro en Quito, los cuales ocurrieron en 1587, 1662, 1755, 1859 y 1922 (Del Pino & Yepes, 1990).

#### 1.1.2. PROYECTOS MICROZONIFICACIÓN QUITO

- **1979**

Se realizó el primer aporte por parte de una tesis de la “Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional”, donde se definen 26 zonas para Quito usando el concepto de capacidad de carga admisible (Acosta & Fábian, 1979) .

- **1987**

Nuevamente por parte de una tesis de la “Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional”, utilizando 619 estudios de suelo, combinando criterios de Geología, existencia de quebradas, drenajes y parámetros dinámicos del suelo se definen 23 zonas para Quito (Lecaro Ribadeneira, León Coronel, & Moyano Aguiar, 1987) .

- **1990**

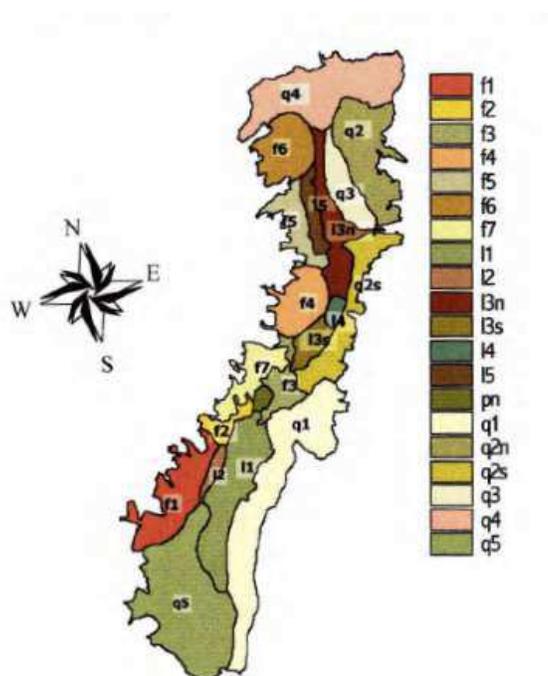
La tesis “Estudio de la respuesta dinámica de un perfil de subsuelo de la ciudad de Quito” estableció la metodología para: “la evaluación de la respuesta dinámica en depósitos de suelo estratificados horizontalmente”. Se utilizó en específico datos del subsuelo del parque la Carolina para los análisis que se realizaron en el programa SHAKE y QUAD4 (Torres Galarraga, 1990).

- **1992**

Se usó ensayos de Cross Hole que miden velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ), además conociendo la profundidad y mediante siete métodos de cálculo se estima periodos entre 0.1 y 0.3 segundos, corrigiendo de tal manera la propuesta de Lecaro, Coronel y Moyano para la microzonificación de Quito (Aguinaga Barragán, 1992) .

- **1992-1994**

Desde el 25 de Julio de 1992 hasta el 3 de marzo de 1994 se realizó el proyecto: “The Quito, Ecuador, Earthquake Risk Management Project: An overview”, empleando un equipo multidisciplinario internacional de más de 40 profesionales de Ecuador, Canadá, Francia, Japón y Estados Unidos de las ramas de sismología, geología, ingenieros de suelo, ingenieros estructurales y planificadores urbanos, se divide a la ciudad en 20 microzonas, como se ve en la figura 1, basándose en más de 2000 datos de perforaciones, características topográficas, geotécnicas y geología superficial además de toda la información recopilada en estudios anteriores, estableciendo una columna de suelo de 20 metros, la cual no alcanzó el estrato rocoso (Escuela Politécnica Nacional, GeoHazards International, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, ORSTOM, OYO Corporation, 1994).



**FIGURA 1** Microzonificación Quito 1992-1994.

FUENTE: (Escuela Politécnica Nacional, GeoHazards International, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, ORSTOM, OYO Corporation, 1994).

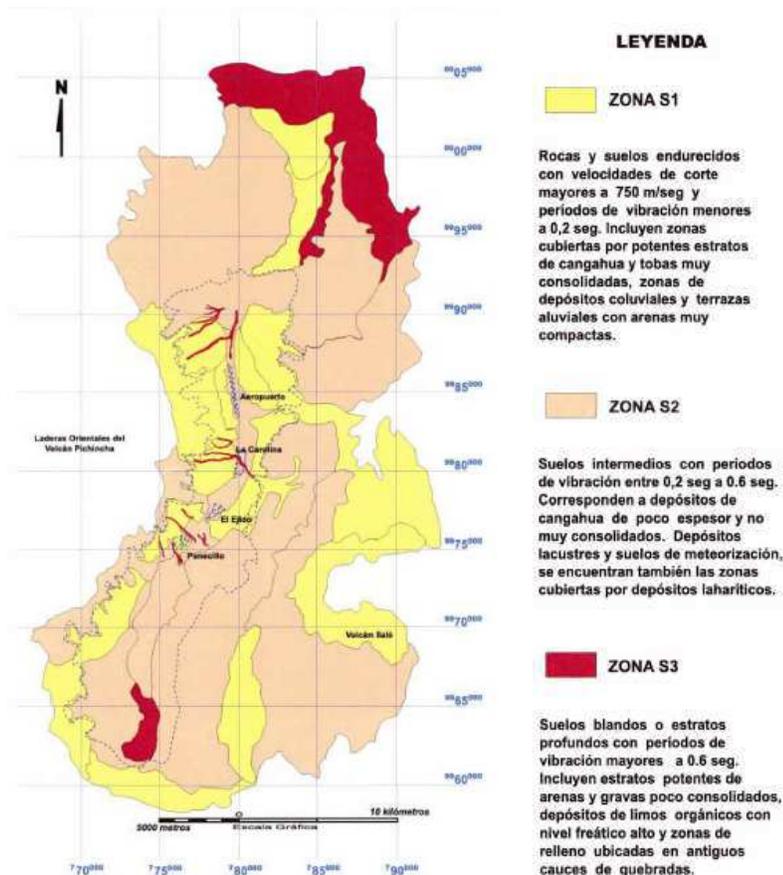
- **1997**

Tomando como base las 20 microzonas del estudio realizado entre 1992 y 1994 se estudia los efectos de sitio de las mismas mediante 3 métodos: “relaciones espectrales tradicionales, H/V ruido de fondo y H/V sismos (o funciones receptoras)” definiendo amplificaciones máximas y frecuencia fundamental para cada microzona además se menciona efectos de resonancia por contrastes de impedancia entre sedimento y substrato los cuales solo se analizan para quebradas rellenas (Guéguen, 1997).

- **2002**

Se usa para el desarrollo del “capítulo 1 del Código Ecuatoriano de la Construcción”: “Peligro Sísmico, espectros de Diseño y Requisitos de Cálculo para Diseño Sismorresistente” (CEC-2000), simplificando las microzonas a 3 (S1, S2 y S3),

además se amplió el área geográfica de estudio, como se ve en la figura 2 (Valverde, Fernández, Jiménez, Vaca, & Alarcón, 2002).



**FIGURA 2** Microzonificación Quito 2002.

FUENTE: (Valverde, Fernández, Jiménez, Vaca, & Alarcón, 2002).

- **2012**

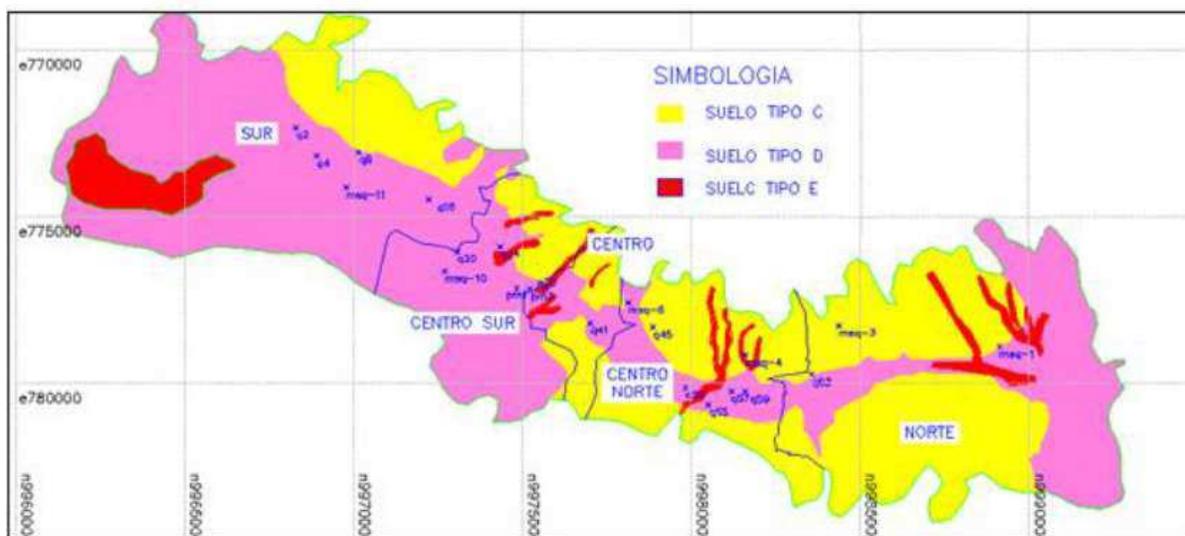
Teniendo como base los estudios de microzonificación anteriores y los estudios para el metro de Quito, un grupo de consultores ERN-2012 (Evaluación de riesgos naturales de Colombia) realizan ensayos en 17 pozos concluyen que “el basamento rocoso en los puntos estudiados está sobre los 100 metros de profundidad” además que la mayoría de los suelos son tipo “D” según la NEC-11 (ERN-2012, 2012).

- **2013**

Se crea la primera versión del programa MIZOQUIQ (“Microzonificación Sísmica de Quito”) en la plataforma Visual Basic de Excel, la cual divide a Quito en 72 barrios y por cada uno nos da: espectros de diseño elástico de aceleración (gráficos y tablas),  $V_{s30}$  y el periodo de vibración del suelo, los cuales se basan en los estudios realizados en 1994 y 2002, la segunda versión incorporó los estudios de 1997 y 2012. (Aguiar Falconí, 2013).

- **2017**

Se desarrolla a partir del sismo del 16 de abril del 2016 y basado en los tipos de suelos de la NEC-15, se analiza el  $V_{s30}$  de 29 puntos dando solo suelos tipo C, D y E, para los cuales se analizó los espectros máximos probables correspondientes a sismos localizados en las fallas de Quito para las diferentes zonas, como se ve en la figura 3 (Aguiar Falconi, 2017).



**FIGURA 3** Microzonificación Quito 2017.

FUENTE: (Aguiar Falconi, 2017).

- **2018**

El Municipio de Quito con el apoyo de la “Escuela Politécnica Nacional” y la “Pontificia Universidad Católica del Ecuador” lanzan el proyecto para actualizar la microzonificación sísmica de Quito, el cual en la actualidad acabo su primera fase, la cual se delimita en el “sur de Quito desde la Av. Ajaví (sector Solanda) hasta la nueva Terminal de la Ecovía (sector San Juan de Turubamba) y por las estribaciones montañosas al Occidente y Oriente de la urbe, con una superficie cercana a las 2500 Ha (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020).

La información se lo obtuvo mediante 21 sondeos, además se complementó con información de pozos existente, definiendo perfiles litológicos, la caracterización de la geofísica se basó principalmente en 2 parámetros: “la velocidad de onda de corte a los 30 metros y la frecuencia de vibración natural del terreno”, para lo cual se realizó los siguientes trabajos:

- “Registro de ruido sísmico ambiental y de ondas superficiales inducidas para aplicar diferentes metodologías o técnicas geofísicas.”
- “Perforación de pozos, descripción litológica y ensayos geotécnicos in situ y en laboratorio de los testigos”
- “Trabajos geológicos de campo y escritorio”

Dando como resultado caracterizaciones geológicas, geotécnicas y geofísicas (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020).

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Ecuador se ubica en una zona de convergencia entre las placas Nazca y Sudamericana, las cuales se encuentran en un continuo proceso de subducción. Este proceso de subducción controla los procesos geodinámicos en continente, los cuales producen sismos que afectan a las ciudades más pobladas del país (Gutscher, Malavieille, Lallemand, & Collot, 1999).

El Ecuador se encuentra atravesado por varias fallas geológicas, al igual que la ciudad de Quito, la misma que contiene un sistema de fallas que la atraviesa en su totalidad comenzando desde la parroquia de Tambillo hasta la parroquia de “San Antonio de Pichincha” con una longitud aproximada de 47 a 50 kilómetros (Rivadeneira , y otros, 2007), posteriormente se comprueba que Quito está afectada por un sistema de fallas que se prolongan alrededor de 60 kilómetros y se conecta con un segundo “sistema de fallas, llamado sistema de fallas de Guayllabamba” (Alvarado, y otros, 2014). En la historia sísmica documentada desde el año 1541, Quito ha sido directamente afectada por 5 eventos sísmicos los cuales han tenido una intensidad igual o mayor a 7 en los años 1587, 1755, 1797, 1868 y 1949 (Del Pino & Yepes, 1990), considerando la magnitud de daños que provocaron también se debe considerar los sismos de 1859 y 1987 este último ocurrido el 5 de marzo del año en cuestión (Escuela Politécnica Nacional, GeoHazards International, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, ORSTOM, OYO Corporation, 1995) el cual tuvo 2 terremotos de magnitud de ondas superficiales de 6.1 y 6.9 con epicentro a la “provincia de Napo” aproximadamente a 100 kilómetros de Quito (Hall, 2000).

El evento sísmico más relevante sucedió el 22 de marzo de 1859 bajo la ciudad de Quito el cual, según José Egred A. llegó a tener una intensidad MSK de 8 y magnitud mínima de 6.3 (Singaicho Armas, 2009), posteriormente se define la magnitud momento de este evento sísmico a 7.2 (Beauval, y otros, 2010). Los daños por este evento sísmico fueron en algunas iglesias como la de San Francisco y San Juan, también provocó el colapso de las casas de 1 piso con altura no mayor a 3 metros con paredes de adobe de pequeño espesor, este evento fue un sismo profundo o del slab (placa) bajo la ciudad. Sin embargo, “Un sismo de magnitud 6 asociado a las fallas ciegas de Quito va a causar más daño que el sismo de 1859, porque será un sismo superficial y una gran cantidad de construcciones se encuentran sobre la falla” (Aguar Falconí, 2013).

Se estima que se producirá un sismo probable en el “sistema de fallas de Quito de 6.8 de magnitud momento en área de ruptura potencial” (Alvarado, y otros, 2014).

Según estudios de paleosismología ya ocurrió un sismo en el sistema de fallas de Quito de magnitud momento de 7 hace 500 a 1000 años (Hibsch, Alvarado, Yepes, Sébrier, & Pérez, 1997)).

Para el año 1994 se realizó la primera clasificación de suelos de Quito en un proyecto llamado “Manejo del Riesgo Sísmico para Quito-Ecuador” llevado a cabo en la “Escuela Politécnica Nacional” (EPN), la cual se basó en estudios previos del año 1979; para el año 2002 en el trabajo realizado por el Ing. Jorge Valverde llamado "Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de la ciudad de Quito " aparece el término suelo blando para los perfiles de suelo S3 (Valverde, Fernández, Jiménez, Vaca, & Alarcón, 2002), siendo estos mencionados por primera vez para estratos de suelos en el “Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000” (Altamirano Cuásquer & Martínez Mesa, 2015).

En el año 2018 se firmó el convenio para “el proyecto de actualización de la Microzonificación Sísmica de Quito el 23 de julio” dando como resultados de la primera fase, altos contrastes de impedancia para diferentes zonas del sur de Quito (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020). El contraste de impedancia se amplifica cuando existen materiales jóvenes y poco consolidados en contacto con materiales más consolidados, esto provoca una amplificación de la señal sísmica e incluso podría provocar un entrampamiento de las ondas sísmicas en los niveles de baja velocidad (Rodríguez Segurado, 2007) provocando efectos de resonancia principalmente donde existe sedimento y sustrato. Estos fenómenos de amplificación de la señal sísmica pueden provocar un aumento de magnitud de más de 2 o 3 grados en escala Mercalli Modificada (MM) o Medvédev-Sponheuer-Kárník (MSK) (Guéguen, 1997).

Según la: “NEC-SE-DS (Norma Ecuatoriana de la Construcción Peligro Sísmico)” suelos con “contraste de impedancia ( $\alpha$ ) ocurriendo dentro de los primeros 30 metros son clasificados como tipo F5”, para los cuales se necesita un análisis de respuesta

dinámica de sitio y un análisis de licuefacción de suelos (Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS), 2015).

### 1.3. ALCANCE Y LIMITACIONES

- Se realizará únicamente un análisis de amplificación de sitio geotécnico en una dimensión (1D).
- La modelación de los perfiles de suelo se realizará únicamente con 2 softwares los cuales son: PROSHAKE 2.0 versión educativa y DEEPSOIL versión 7.0.
- Únicamente se modelará hasta la base de los sedimentos superficiales.
- Se realizará únicamente un análisis lineal y lineal equivalente a los perfiles de suelo, no se realizará análisis no lineal.
- Únicamente se analizará en las funciones de transferencia de 10 a 25 Hertz, que pertenece a la amplificación somera.

### 1.4. OBJETIVOS

#### 1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Conocer la respuesta sísmica de sitio en los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014 en la cuenca sur de la ciudad de Quito, obtenidos en el proyecto de actualización de la Microzonificación Sísmica de Quito, mediante un análisis de convolución y deconvolución con datos acelerográficos de la estación QUIB pertenecientes a la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) del Instituto Geofísico.

#### 1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener el resultado de la modelación matemática de los perfiles de suelo de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014 obtenidos en el proyecto de “actualización de la Microzonificación Sísmica de Quito Fase 1”, mediante el uso del programa PROSHAKE 2.0 versión educativa y DEEPSOIL versión 7.0.

- Determinar las funciones de transferencia teóricas en los perfiles de suelo de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014.
- Comparar las funciones de transferencia teóricas obtenidas con las curvas H/V (mHVSR) en los sitios de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014 obtenidas en el proyecto de “actualización de la Microzonificación Sísmica de Quito Fase 1” (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020).

### 1.5. HIPÓTESIS

Los perfiles de suelos encontrados en la cuenca sur de la ciudad de Quito amplifican el movimiento sísmico.

## **2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

### **2.1. ESTADO DEL ARTE**

El estudio del suelo ha sido un tema de vital importancia desde las antiguas civilizaciones para entender el comportamiento de este y como va a influir en las estructuras que se construyen sobre él. Se dice que los estudios formales de la ingeniería geotécnica comienzan a principios del siglo XVIII. Según Skempton (1985) se divide la historia en 4 periodos anteriores a la mecánica de suelos utilizada hoy en día:

- Periodo Preclásico (1700 a 1776)
- Mecánica de suelos: periodo Clásico-Fase I (1776 a 1856)
- Mecánica de suelos: periodo Clásico-Fase II (1856 a 1910)
- Mecánica de suelos moderna (1910 a 1927) (Skempton, 1985).

Después de este periodo grandes científicos como: Albert Mauritz Atterberg, Arthur Langley Bell, Charles Augustin Coulomb, Osborne Reynolds, Karl Terzaghi, entre otros sentaron la base de todo lo que hoy en día conocemos como: “Mecánica de Suelos”, para la década de 1950 a la par del crecimiento computacional surgen soluciones a partir de diferencias finitas y elementos finitos (Braja, 2015).

Los sismos de Michoacán 1985 y California 1989, dan un hito importante para el análisis de los efectos de sitio, mostrando las aterradoras consecuencias que estos pueden provocar, enfatizando de esta manera su estudio (Chávez Garcia, Sánchez Sesma, Campillo, & Yves Bard, 1994). Hoy en día universidades de todo el mundo al igual que empresas privadas estudian los efectos de sitio, los mismos que apoyados en herramientas informáticas pueden analizar la columna de suelo en el rango lineal, como en el no lineal.

## 2.2. SUELO

### 2.2.1. DEFINICIÓN DE SUELO

El suelo tiene diferentes definiciones según las distintas ramas que lo estudian, la definición que se usará es basada a una interpretación ingenieril, la cual considera suelo a todos los materiales orgánicos e inorgánicos que se encuentre en la zona que recubre la corteza rocosa del planeta (Taylor, 1948).

Otra definición de suelo mediante la mecánica de suelos es: “el suelo es un agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas” (Braja, 2000).

### 2.2.2. ORIGEN

Según (Braja, 2015), existen 3 tipos de roca con base a su origen las cuales dan paso a la formación de los suelos:

- Ígneas: son formadas cuando el magma se enfría y solidifica en la superficie terrestre.
- Sedimentarias: son formadas por la meteorización (“descomposición de las rocas por procesos mecánicos y químicos en fragmentos más pequeños”) de las rocas ígneas.
- Metamórficas: son formadas cuando por efectos de presión y calor las rocas sedimentarias se transforman en nuevos minerales (Braja, 2015).

### 2.2.3. TIPOS DE SUELO

#### 2.2.3.1. SUELOS RESIDUALES

Son suelos que después de la meteorización permanecen en el mismo sitio generalmente esto pasa en regiones cálidas y húmedas normalmente ubicadas en los trópicos (Braja, 2015).

### 2.2.3.2. SUELOS TRASPORTADOS

Son suelos que después de la meteorización son transportados y luego depositados por los siguientes agentes naturales:

- Glaciales: Son depositados y transportados por los glaciales.
- Aluviales: Son depositados a lo largo de los arroyos y transportados por corrientes de agua.
- Lacustres-Palustres: Son formados por deposición en los lagos.
- Marinos: Son formados por deposición en los mares.
- Eólicos: Son depositados y transportados por el viento (Braja, 2015).

### 2.2.3.3. SUELOS ORGANICOS O TURBAS

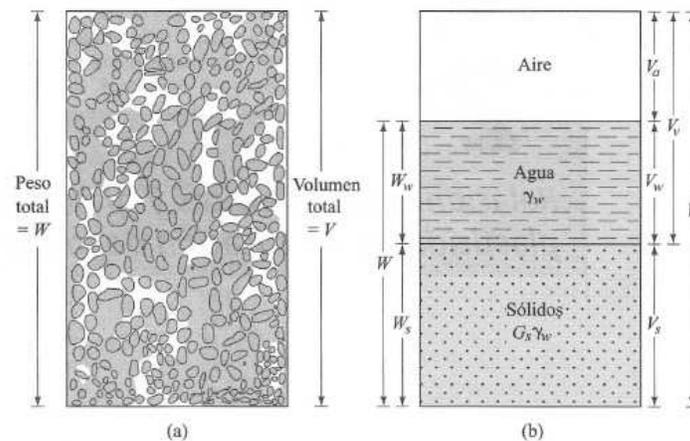
Son suelos que se dan por acción de la descomposición de la materia orgánica, con niveles freáticos muy altos, altamente comprensibles y dan paso a grandes asentamientos por consolidación. (Terzaghi & Peck, 1955).

## 2.3. MÉCANICA DE SUELOS (ESTÁTICA DE SUELOS)

Para el año 1925 Karl Terzaghi da origen a la “mecánica de suelos moderna”, siendo esta “una rama de la ciencia que estudia las propiedades físicas y el comportamiento de las masas de suelo sometidas a varios tipos de fuerzas” (Braja, 2000).

### 2.3.1. ESTRUCTURA DE SUELO

El suelo está dividido en 3 fases como se muestra en la siguiente figura:



**FIGURA 4** (a) Suelo en estado natural; (b) Tres fases del suelo.

FUENTE: (Braja, 2015)

- Fase sólida: Todo lo correspondiente al sólido.
- Fase líquida: Todo lo correspondiente al agua.
- Fase gaseosa: Todo lo correspondiente al aire (Taylor, 1948).

### 2.3.2. PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS SUELOS

Uno de los primeros propósitos en la “Mecánica de Suelos” es la distinción de diferentes tipos de suelos, su clasificación y caracterización, para esto se tiene las llamadas propiedades de índice para lograr establecerlas es necesario que se realicen los llamados ensayos de clasificación (Terzaghi & Peck, 1955).

#### 2.3.2.1. PROPIEDADES DE LOS GRANOS DEL SUELO (PARTÍCULAS)

- Forma: Son sumamente importantes, pero no se prestan demasiada atención por la dificultad de medir las partículas de suelo, algunas clasificaciones son: angular, subangular, subredondeadas, redondeadas.

- Tamaño: Se clasifican en 2 grandes grupos la fracción gruesa (granular) y la fracción fina (cohesiva), los cuales tienen la frontera en el diámetro de partícula en 0.075 mm.
  - Fracción gruesa (granular): se clasifica en gravas (“partículas entre 76.2 y 2 mm”) y arena (“partículas entre 2 y 0.075 mm”).
  - Fracción fina (cohesiva): se clasifica en limos (“partículas entre 0.075 y 0.002 mm”) y arcillas (“partículas menores a 0.002 mm”).
- Mineralogía: El tipo de mineral del cual se trata.
- Gravedad específica (Gs): Es dependiente a su composición mineralógica, siendo “la relación de masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas, a la misma temperatura” o a su vez utilizando el peso específico es “la relación entre el peso específico de sólidos a una temperatura dada y el peso específico del agua destilada y libre de gas a la misma temperatura” (Terzaghi & Peck, 1955).

#### 2.3.2.2. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS DEL SUELO (FASES DEL SUELO)

- Granulometría: Es la medición de las partículas de la fase sólida y cálculo de su abundancia por medio de tamizado e hidrometría, dándonos una curva de distribución del tamaño de la partícula (Braja, 2000).

##### 2.3.2.2.1. RELACIONES DE VOLUMEN

- Relación de vacíos (e): “Es la razón del volumen de vacíos al volumen de sólidos”.
- Porosidad (n): “Es la razón entre el volumen de vacíos y el volumen total”.
- Grado de saturación (S): “Es la razón del volumen de agua al volumen de vacíos” (Taylor, 1948).

### 2.3.2.2.2. RELACIONES DE PESO

- Contenido de humedad ( $W$ ): “Es la razón del peso del agua al peso de sólidos”.
- Peso específico ( $\gamma$ ): “Es la razón del peso del suelo por unidad de volumen”.
- Densidad ( $\rho$ ): “Es la razón de la masa del suelo por unidad de volumen” (Taylor, 1948).

### 2.3.2.3. LÍMITES DE ATTERBERG

Estos existen solo si hay fracción fina o cohesiva, siendo estos suelos los que tiene la capacidad entre sus partículas de adherirse entre sí, en específico si existen arcillas o limos, estas permiten que una porción del suelo se pueda remover bajo presencia de humedad sin que esta se desintegre, pasando de un estado de un sólido quebradizo hasta fluir como un líquido dividiendo de esta manera en 4 estados básicos como se muestran en la figura 5.



**FIGURA 5** Límites de Atterberg.

FUENTE: (Braja, 2015)

- Límite líquido (LL)

“Es el contenido de humedad donde el suelo deja de comportarse como plástico y pasa a comportarse como líquido”.

- Límite plástico (LP)

“Es el contenido de humedad donde el suelo deja de comportarse como semisólido y pasa a comportarse como plástico”.

- Índice de plasticidad (IP)

“Es el valor que resulta de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico”.

- Límite de contracción (LC)

“Es el contenido de humedad donde el suelo deja de comportarse como sólido y pasa a comportarse como semi-sólido”, a medida que pierda humedad ya no tendrá cambio volumétrico (Braja, 2000).

### 2.3.3. PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS

#### 2.3.3.1. PERMEABILIDAD DE SUELOS

Un suelo es permeable cuando la disposición de sus partículas genera vacíos continuos, provocando que el agua pueda circular a través del suelo; un suelo compacto o una roca se dice impermeable cuando el agua no pasa a través de él o el porcentaje que atraviesa no es representativo. Esta circulación de agua se denomina filtración, correlacionándose entre la porosidad y la relación de vacíos, dando problemas en las obras de ingeniería, para las cuales tenemos que considerar el coeficiente de permeabilidad de cada suelo y la ley de Darcy (Terzaghi & Peck, 1955).

#### 2.3.3.2. TENSIÓN VERTICAL - ESFUERZO VERTICAL EFECTIVO

Esta tensión se relaciona con la presión que cada partícula ejerce entre las otras partículas de un volumen de suelo, para determinarla debemos abordar los siguientes conceptos:

- Tensión vertical total: Es la presión que ejerce el suelo

$$\sigma_v = \gamma_{sat}Z \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Siendo

$\gamma_{sat}$  = *Peso específico saturado*

$Z$  = *altura*

- Presión de poros: Es la presión que ejerce el agua contenida en los poros, llamada también tensión neutral ya que contrarresta la presión de suelo.

$$\mu = \gamma_w Z \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Siendo

$\gamma_w$  = *Peso específico del agua*

$Z$  = *altura*

- Tensión vertical efectiva: Es la presión real a la que está sometido el suelo.

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu \quad (\text{Ec. 2.3})$$

En caso de que el suelo no disponga de agua (suelo seco) solo existirá la tensión vertical total con un  $\gamma$  seco (Braja, 2000).

- El programa Deepsoil calcula esta propiedad en el centro de la capa.

### 2.3.3.3. COMPRESIBILIDAD DE SUELOS

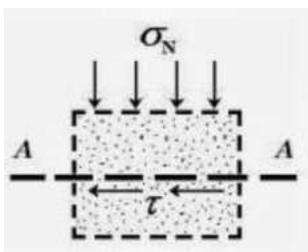
Es la pérdida de resistencia del suelo, provocada por un reacomodo entre sus partículas, lo que ocasiona una disminución en su volumen; esta propiedad es representativa cuando existen estratos de arcilla confinados (Terzaghi & Peck, 1955).

### 2.3.3.4. CONDICIONES DE ROTURA DE SUELOS

Los suelos al ser un material sólido, sufre rotura tanto por tracción o corte, siendo el más crítico las fallas de rotura por acción de fuerzas de corte o cizalladura, la cual es provocada cuando se llega a una combinación crítica entre “la tensión normal y la tensión de corte”, para diferentes sollicitaciones se utiliza el diagrama de Mohr para la representación de estas, el cual se consigue mediante ensayos triaxiales (Braja, 2000).

#### 2.3.3.4.1. ESFUERZO CORTANTE ( $\tau$ )

Es la fuerza interna de respuesta tangencial a la superficie en la cual se aplica la fuerza externa lo podemos ver con más detalle en la siguiente figura:



**FIGURA 6** Esfuerzo cortante

FUENTE: (Braja, 2000)

Su primera definición la realiza Coulomb en el año de 1773 siendo corregida por Terzaghi en 1925 quedando de la siguiente manera:

$$\tau = c + (\sigma_v - \mu) \tan(\phi)$$

(Ec. 2.4)

Siendo

$c$  = cohesión

$\phi$  = *Angulo de fricción del suelo*

(Braja, 2000).

- El programa Deepsoil calcula este esfuerzo con la siguiente ecuación:

$$\tau = \rho V_s^2 \frac{G}{G_o} \gamma \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Siendo

$\rho$  = *Densidad del solido*

$V_s$  = *Velocidad de onda de corte*

$G$  = *Módulo de corte*

$G_o$  = *Módulo de corte al 0% del esfuerzo de corte*

$\gamma$  = *Deformación cortante*

(Hashash Y., y otros, 2020)

#### 2.3.3.4.2. ÁNGULO DE FRICCIÓN ( $\Phi$ )

Es una propiedad de los suelos granulares, esta depende de la forma de las partículas, su grosor y granulometría siendo el ángulo que forma entre los esfuerzos normales (cortantes) y la tangente de la envolvente del diagrama de Mohr, que representa el ángulo de rotura del suelo (Terzaghi & Peck, 1955).

- El programa Deepsoil calcula este Angulo con la siguiente ecuación:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_{max}}{\sigma'_v}\right) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Siendo

$\tau_{max}$  = Esfuerzo cortante máximo calculado

$\sigma'_v$  = Tensión vertical efectiva

(Hashash Y., y otros, 2020)

En el año 1948, Terzaghi y Peck fueron los primeros en proponer una ecuación que correlaciona el Angulo de fricción con el ensayo SPT.

$$\phi = 28.5 + 0.25N_{60} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Siendo

$N_{60}$  = número de golpes del ensayo SPT correguido

(Terzaghi & Peck, 1948)

Para el año 1953 (Peck, Hanson, & Thornburn, 1953), se propuso la siguiente ecuación:

$$\phi = 26.25 * (2 - e^{-\frac{N_{60}}{62}}) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

En el año 1969 (Kishida, 1969), la siguiente ecuación:

$$\phi = 15 + \sqrt[2]{20N_{60}} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

En el año 1975 (Schmertmann, 1975), la siguiente ecuación:

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \left( \frac{N_{60}}{32.5} \right)^{0.34} \right] \quad (\text{Ec. 2.10})$$

En el año 1984 (Japan Road Bureau, 1984), la siguiente ecuación:

$$\phi = 15 + \sqrt[2]{9.375N_{60}} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

En el año 1996 (Hatanaka & Uchida, 1996), la siguiente ecuación:

$$\phi = \sqrt[2]{20N_{60}} + 20 \quad (\text{Ec. 2.12})$$

En el año 1999 (Japan National Railway, 1999), la siguiente ecuación:

$$\phi = 37 + 0.3N_{60} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

En el año 2014 (Montenegro, 2014), la siguiente ecuación:

$$\phi = 12.79 + \sqrt[2]{25.86N_{60}} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

#### 2.3.3.4.3. COHESIÓN (c)

Es la atracción entre partículas, la cual es originada por las fuerzas intermoleculares de las partículas de agua, siendo mayor en suelos finos y prácticamente nula en suelos granulares (Terzaghi & Peck, 1955).

#### 2.3.4. CONSOLIDACIÓN DE SUELOS

La consolidación es un aumento del esfuerzo del suelo por efectos de las cargas que comprimen los diferentes estratos del suelo provocando una compresión al mismo, los cuales pueden ser causados por:

- Deformación de partículas del suelo.
- Reacomodo de partículas.
- Eliminación de aire o agua en los vacíos.

Este asentamiento puede ser:

- Inmediato: Estos son ocasionados por la deformación elástica de los suelos, sin pérdida de agua.
- Consolidación primaria: Particularmente de los suelos cohesivos saturados, siendo el resultado de la eliminación de agua de los vacíos.
- Consolidación secundaria: Igualmente es una propiedad de los suelos cohesivos saturados, siendo el resultado de un ajuste plástico entre la estructura que provoca las cargas y el suelo, es el asentamiento de consolidación primaria bajo un esfuerzo efectivo constante (Braja, 2015).

#### 2.3.4.1. ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN

Generalmente sucede en arcillas cuando a lo largo de su historia geológica fueron sometidas a alguna presión efectiva para provocar una consolidación; esta presión puede ser mayor o igual que la presión de sobrecarga actual, en la figura 7.a) podemos ver cómo influye esta presión en la relación de vacíos ( $e$ ) en procesos de carga y descarga, teniendo de esta manera 2 definiciones:

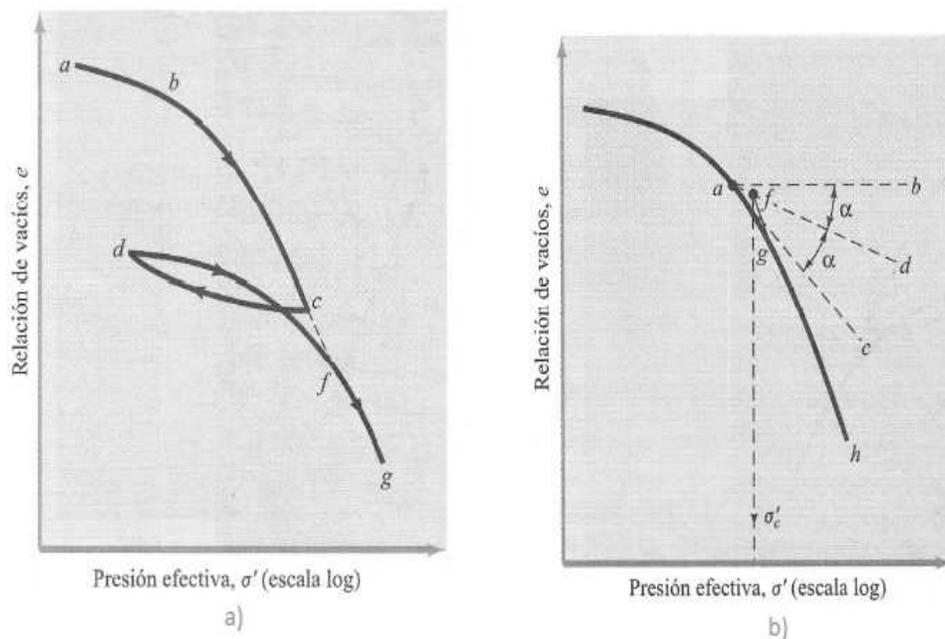
- Suelo normalmente consolidado: Es cuando la presión de sobrecarga es igual a la presión efectiva aplicada en el pasado.
- Suelo preconsolidado: Ocurre si la presión de sobrecarga es inferior a la presión efectiva aplicada en el pasado, esta presión efectiva aplicada en su pasado geológico se llama esfuerzo de preconsolidación (Braja, 2015).

##### 2.3.4.1.1. PROCESO PARA ENCONTRAR EL ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN

- Casagrande

Para conocer el esfuerzo de preconsolidación se realiza lo siguiente:

- Se ubica el punto de la curva el cual representa el punto de curvatura máximo, el punto de inflexión (Punto a) y se traza una línea tangente al (Punto c) (Línea A-C).
- Se traza una línea horizontal desde el punto a, al punto b (Línea A-B).
- Se traza una línea desde el punto a al punto d (Línea A-D) que forma una bisectriz del Angulo CAB.
- Se define la línea de consolidación primaria desde el punto h (Línea H-G) y se la interseca con la línea A-D (Punto f).
- Se mide el valor de preconsolidación en el punto g (Casagrande, 1936).



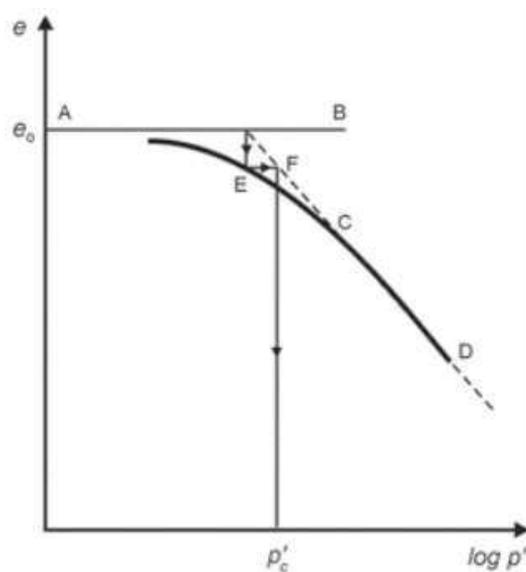
**FIGURA 7** a) Gráfica de  $e$  vs  $\log \sigma'$  que muestra las ramas de carga y descarga, b) Procedimiento gráfico para determinar la presión de preconsolidación.

FUENTE: (Braja, 2015)

- Pacheco Silva

Para conocer el esfuerzo de preconsolidación se realiza los siguientes pasos y se lo puede observar en la figura 8:

- Se traza una línea vertical en  $e_0$  (Presión de poro inicial) (línea A-B).
- Se define la línea de consolidación primaria y se prolonga (línea C-D).
- En el punto de intersección de las líneas se baja una vertical hasta la curva (punto E).
- Desde el punto de intersección se traza una línea horizontal hasta la línea C-D (Punto F).
- Se mide el valor de preconsolidación en el Punto F (Pacheco Silva, 1970).



**FIGURA 8** Gráfica de  $e$  vs  $\log \sigma'$  que representa el procedimiento gráfico para determinar la presión de preconsolidación.

FUENTE: (Pacheco Silva, 1970)

#### 2.3.4.2. GRADO DE SOBRECONSOLIDACIÓN (OCR)

Es la relación que se tiene entre “el esfuerzo de preconsolidación y el esfuerzo actual”, se la define como:

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_v} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Siendo

$\sigma'_c =$  Esfuerzo de preconsolidación

$\sigma'_v =$  Esfuerzo vertical efectivo

(Braja, 2015)

Teniendo los siguientes valores de OCR:

Coeficientes típicos del grado de sobreconsolidación	
OCR=1	Normalmente consolidado
OCR>1	Preconsolidado

**Tabla 1** Coeficientes típicos del grado de sobreconsolidación.

FUENTE: (Braja, 2015)

Una manera indirecta para sacar este valor es con la relación de  $N_{60}$  del SPT y el esfuerzo vertical efectivo mediante la siguiente ecuación:

$$OCR = 0.193 \left( \frac{N_{60}}{\sigma'_v} \right)^{0.689} \quad \text{Ec. 2.16}$$

Siendo

$N_{60} =$  número de golpes del ensayo SPT corregido

$\sigma'_v =$  Esfuerzo vertical efectivo en MPa

(Mayne & Kemper, 1988).

### 2.3.4.3. COEFICIENTE LATERAL DE PRESIÓN DE TIERRAS ( $K_0$ )

Es un estado de esfuerzos de un suelo no alterado, que asume que una porción de suelo está en estado de equilibrio elástico además no sufre deformaciones laterales. En un equilibrio estático (deformación horizontal=0) se estima el coeficiente lateral de presión de tierras como: “la relación de esfuerzo normal horizontal neto sobre el esfuerzo normal vertical neto”, como se lo ve en la siguiente ecuación:

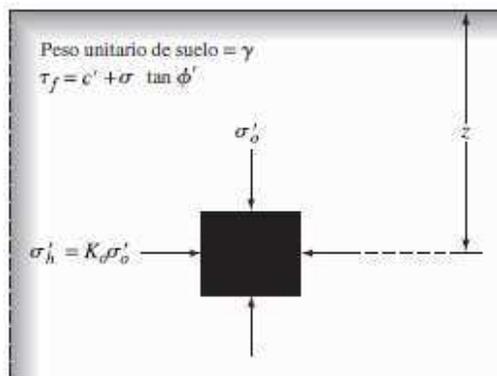
$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Siendo

$\sigma'_h =$  presión horizontal

$\sigma'_v = \sigma'_o =$  presión vertical

(Braja, 2015)



**FIGURA 9** Presión de tierras en reposo.

FUENTE: (Braja, 2015)

También se la puede estimar mediante el ángulo de fricción y el OCR teniendo para la fracción gruesa con la siguiente ecuación:

$$K_o = 1 - \sin(\phi) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Para la fracción fina con la siguiente ecuación:

$$K_o = (1 - \sin(\phi))OCR^{\sin(\phi)} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

(Braja, 2000)

### 2.3.5. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

#### 2.3.5.1. SEGÚN LA SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)

Esta propuesta fue planteada por “Casagrande” en 1942, basándose en parámetros tales como: límites de consistencia, composición granulométrica y cantidad de materia orgánica (Alvarado Alcívar, 2017).

Se utiliza la Norma ASTM D-2487-17 (American Society for Testing and Materials, 2017).

#### 2.3.5.2. SEGÚN LA ASSHTO (American Association of State Highway Officials)

Se utiliza la Norma ASTM D-3282-15 mediante el método AASHTO M145 (American Society for Testing and Materials, 2015).

## 2.4. MÉCANICA DE SUELOS (DINÁMICA DE SUELOS)

Es una rama de la mecánica de suelos que trata sobre las propiedades dinámicas del suelo, su comportamiento ante esfuerzos dinámicos y la respuesta de este ante cargas cíclicas (Bran Sánchez, González Cruz, & Ortiz Landaverde, 2009).

## 2.4.1. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO

### 2.4.1.1. MÓDULO DE RIGIDEZ AL CORTE (G)

Como conocemos la deformabilidad del suelo se da por los movimientos relativos de las partículas, por esta razón este módulo de rigidez dinámico no puede englobar la totalidad de la masa de suelo y mejor se lo llama módulo esfuerzo deformación dinámica del suelo el cual solo se ve sujeto al esfuerzo aplicado y las deformaciones resultantes.

Matemáticamente se lo define por la relación:

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}$$

(Ec. 2.20)

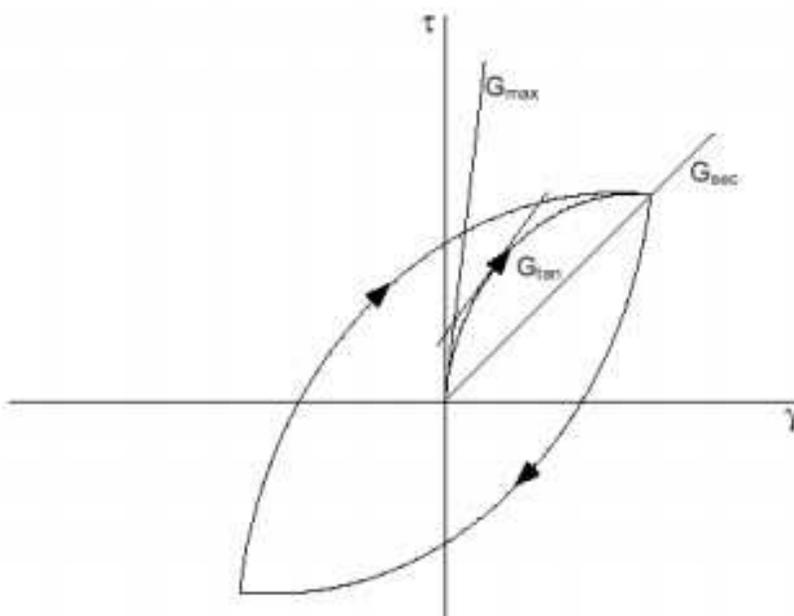
Donde:

$\Delta\tau$  = Esfuerzo cortante unitario

$\Delta\gamma$  = Deformación cortante

(Lecaro Ribadeneira, León Coronel, & Moyano Aguiar, 1987)

La interacción entre el esfuerzo y la deformación es no lineal en procesos de carga y descarga, como lo podemos ver en el siguiente grafico:



**FIGURA 10** Curva de histéresis y diferentes módulos  $G$ .

FUENTE: (Kramer, 1996)

Donde podemos definir lo siguiente:

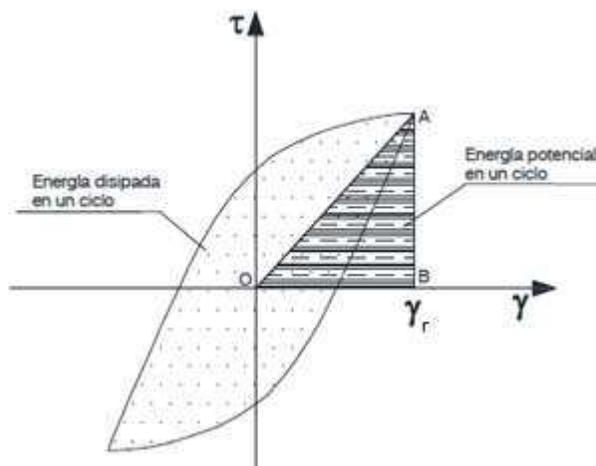
- Módulo de corte máximo ( $G_{max}$ ): es el valor de la pendiente de la recta tangente en el punto de inicio de la gráfica y es correspondiente a deformaciones pequeñas se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (\text{Ec. 2.21})$$

- Módulo de corte secante ( $G_{sec}$ ): es el valor de la pendiente de la recta trazada desde el inicio hasta la deformación máxima, cuando  $G_{max} = G_{sec}$  estamos en el rango lineal para deformaciones pequeñas.
- Módulo de corte tangente ( $G_{tan}$ ): es el valor de pendiente de la recta en un punto dado, siendo un valor variable para toda la curva, es por eso el valor real del módulo de rigidez (Kramer, 1996).

### 2.4.1.2. RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO ( $\lambda$ )

“Es la capacidad que tiene el suelo para disipar energía” bajo la acción de una carga cíclica, siendo la relación entre la energía disipada y la energía almacenada en el proceso histórico (Lucero Solís, 2017).



**FIGURA 11** Relación de amortiguamiento mediante el ciclo histérico.

FUENTE: (Lucero Solís, 2017)

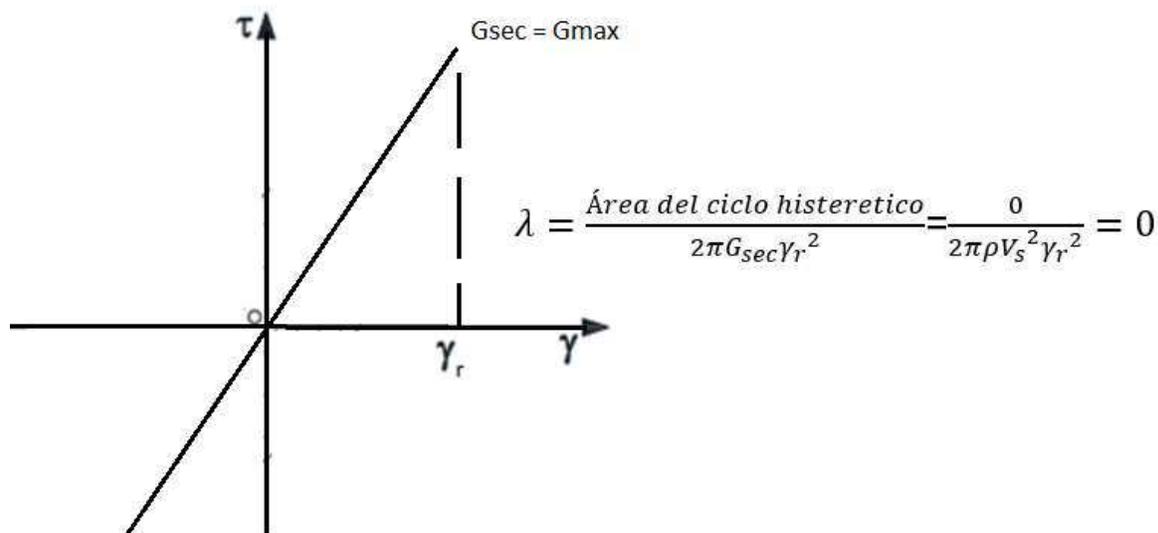
Se la calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{\text{Área del ciclo histeretico}}{4 \pi(\text{área } OAB)} = \frac{\text{Área del ciclo histeretico}}{2\pi G_{sec} \gamma_r^2} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

(Lucero Solís, 2017)

Se tiene los siguientes casos:

- Cuando el suelo solo se encuentra en el rango lineal perfecto.



**FIGURA 12** Ciclo histérico rango lineal.

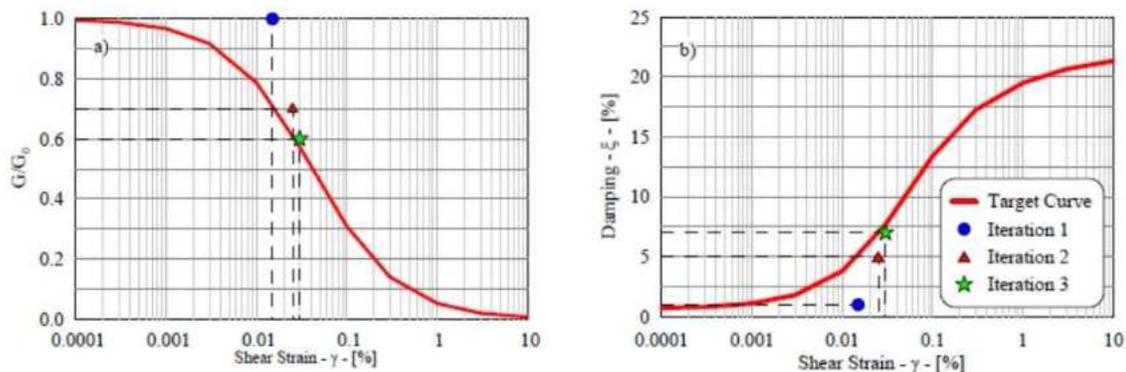
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

- Cuando el suelo no tiene ciclo histérico perfecto

El amortiguamiento variaría mediante cada proceso de carga y descarga, en el subcapítulo de modelos de suelos (2.5) se describirá este apartado.

#### 2.4.1.3. CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO Y MÓDULO DE DEGRADACIÓN

Para lograr un acercamiento al comportamiento dinámico del suelo, varios autores, requirieron datos experimentales que son obtenidos mediante ciclos histéricos los cuales dan curvas de esfuerzo-deformación  $\tau = f(\gamma)$  en ciclos de carga y descarga. Estos datos son: “el módulo de corte (G) y el amortiguamiento ( $\lambda$ )” (Kramer, 1996), el módulo de corte nos sirve para calibrar el modelo del suelo mediante la gráfica  $G/G_{max}$  y la gráfica de amortiguamiento nos sirve para el análisis dinámico en procesos no lineales. La forma típica de estas curvas es la siguiente:



**FIGURA 13** Curva de degradación del módulo de corte y curva de amortiguamiento.

FUENTE: (Hashash & Park, 2001)

#### 2.4.1.4. REGLAS DE MASING

Cuando se modela las propiedades dinámicas del suelo, se considera una ley constitutiva para el comportamiento elástico (deformaciones menores a  $10^{-5}\%$ ) y comportamiento elastoplástico (deformaciones mayores a  $10^{-5}\%$ ), esto lo hace la regla de Masing (Ishihara, 1996), las cuales definen el modelamiento de los ciclos históricos (procesos de carga y descarga) aplicando 2 reglas generales y 2 reglas extendidas:

- El módulo de corte de cada carga reversible asume un valor igual al módulo tangente inicial de la curva de carga inicial.
- La forma de la curva de descarga y recarga es la misma que la de la curva inicial con una escala doble.
- Las curvas de descarga y recarga deberían seguir a la curva inicial cuando la amplitud de deformación de corte es excedida.
- Si las actuales curvas de recarga o descarga intersecan las curvas descritas por una curva de recarga o descarga previa la relación tensión deformación sigue a la curva previa (Masing, 1926).

Con el paso de los años diferentes autores han verificado o descartado la validez de estas reglas, llegando a que estas reglas son satisfactorias en las primeras etapas de carga y descarga, para los demás estados se requiere una modificación a la curva inicial, introduciendo el concepto de curva de degradación (Galindo Aires, 2010), modificando y adaptando estas reglas según cada autor.

## 2.4.2. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS

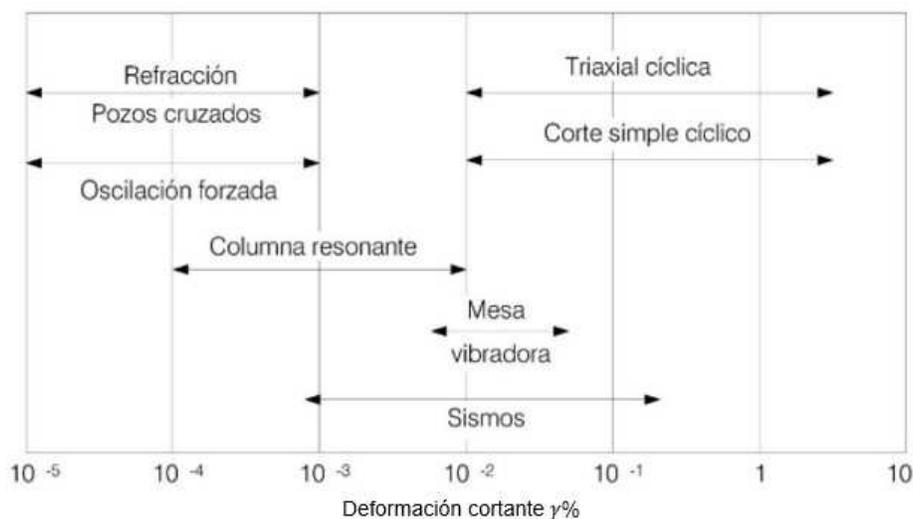
Para poder realizar un análisis dinámico de suelos es necesario determinar sus propiedades mediante ensayos que pueden ser de campo o de laboratorio. En la siguiente tabla se puede encontrar un listado:

Ensayo		Propiedades dinámicas estimadas
Laboratorio	Pulsos ultrasónicos	$G_{max}$
	Columna resonante	$G$ y $\lambda$
	Vibración torsional libre	$G$ y $\lambda$
	Triaxial cíclico	$G$ , $\lambda$ y ciclos de histéresis
	Corte simple cíclico	$G$ , $\lambda$ y ciclos de histéresis
	Columna torsionante	$G$ y $\lambda$
	Elementos laminares	$G_{max}$
Campo	Sísmica de refracción y análisis de ondas superficiales	$V_p$ y $V_s$
	Cross-hole	$V_p$ y $V_s$
	Down-hole	$V_p$ y $V_s$
	Up-hole	$V_p$ y $V_s$
	Sonda suspendida	$V_p$ y $V_s$

**Tabla 2** Ensayos para estimar propiedades dinámicas de suelos.

FUENTE: (Lucero Solís, 2017)

También se define el tipo de ensayo a utilizar mediante la deformación esperada



**FIGURA 14** Ensayos para estimar las propiedades dinámicas del suelo mediante la deformación.

FUENTE: (Lucero Solís, 2017)

## 2.5. MODELOS DE SUELO

Los suelos tienen un comportamiento cíclico correlacionando parámetros como esfuerzo y deformación cortante, para una correcta modelación de los suelos tenemos que considera que para deformaciones que sean menores al  $10^{-4}\%$  el suelo representa un comportamiento lineal elástico, para deformaciones entre  $10^{-4}\%$  y  $10^{-2}\%$  el suelo se considera viscoelástico y para deformaciones mayores a  $10^{-2}\%$  el suelo cambia considerablemente requiriendo un modelo paso a paso, como se lo puede ver en la figura 15 (Ishihara, 1996).

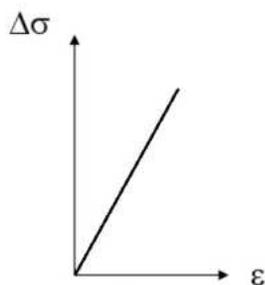
Shear strain	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
	Small strain	Medium strain	Large strain	Failure strain		
Elastic	■					
Elasto-plastic			■			
Failure						■
Effect of load repetition				■		
Effect of loading rate				■		
Model	Linear elastic model		Visco-elastic model		Load history tracing type model	
Method of response analysis	Linear method		Equivalent linear method		Step – by – step Integration method	

**FIGURA 15** Comportamiento del suelo de acuerdo con la deformación (unidades en %).

FUENTE: (Ishihara, 1996)

### 2.5.1. LINEAL

Es un modelo que considera al suelo como un material elástico y su deformación es lineal perfecta (Duncan & Chan, 1970).



**FIGURA 16** Modelo de suelo Lineal

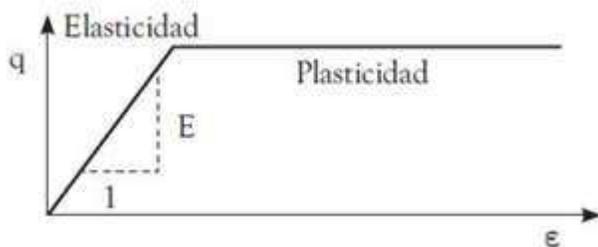
FUENTE: (Duncan & Chan, 1970)

### 2.5.2. ELASTOPLÁSTICO/VISCOELÁSTICO

Es un modelo de suelo que trata la no linealidad del comportamiento del suelo, teniendo los siguientes tipos:

#### 2.5.2.1. MOHR- COULOMB

Este modelo correlaciona: “la ley de Hooke y el criterio de falla Mohr-Coulomb”. Es característico para suelos granulares sueltos o finos normalmente consolidados, el modelo se divide en 2 partes, la primera parte considera al suelo como un material lineal y la segunda como un material plástico perfecto (con deformaciones irreversibles), ignora un comportamiento elástico plástico progresivo (Nieto Leal, Camacho Tauta, & Ruiz Blanco, 2009).

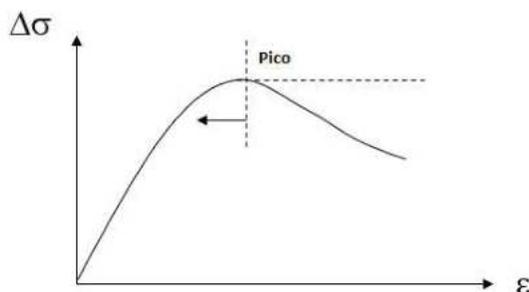


**FIGURA 17** Modelo de suelo Mohr – Coulomb.

FUENTE: (Nieto Leal, Camacho Tauta, & Ruiz Blanco, 2009).

### 2.5.2.2. HIPERBÓLICO

Modelo propuesto originalmente por Konder y Zelasko en 1963, el cual solo cuenta con una sección plástica que se podría definir como elástica progresiva, este modelo no puede ser aplicado para casos donde el suelo no fue drenado, sirviendo únicamente hasta el pico de la curva de esfuerzo (Duncan & Chan, 1970).



**FIGURA 18** Sección de curva que el modelo de Konder y Zelasko es aplicable.

FUENTE: (Duncan & Chan, 1970)

### 2.5.2.3. MODELO DE DARANDELI

Basándose en el modelo original de (“Hardin y Drnevich, 1972”) y en el estudio en arcillas, Mehmet Darendeli se da cuenta que en grandes deformaciones el amortiguamiento disminuye, esto debido al índice de plasticidad y a medida que este índice aumenta la linealidad decrece, además cuando se tiene un valor alto del grado de sobreconsolidación (OCR) la curva de degradación aumenta al igual que la rigidez, planteando su modelo en las siguientes ecuaciones:

- Para el esfuerzo cortante

$$\tau = \frac{\gamma}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} G_{m\acute{a}x} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2(IP * OCR^{\phi_3}))\sigma_0'^{\phi_4} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

$$\phi_5 = a \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Siendo

$a =$  Parámetros de ajuste de la curva

$\gamma_r =$  deformación cortante de referencia

$\phi_1 - \phi_5 =$  Parámetros del modelo

$IP =$  Índice de plasticidad

$OCR =$  Grado de sobreconsolidación

$\sigma_0' =$  Presión media efectiva de confinamiento

- Para la grafica  $G/G_{m\acute{a}x}$

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

- Para la relación de amortiguamiento

$$\lambda = b \left(\frac{G}{G_{m\acute{a}x}}\right)^{0.1} \lambda_{Masing} + \lambda_{min} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

$$b = \phi_{11} + \phi_{12} * \ln(N) \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Siendo

$N =$  número de ciclos de carga (bucle de histéresis)

$\phi_{11}, \phi_{12} =$  Parámetros del modelo

$\lambda_{min} =$  Relación de amortiguamiento para deformaciones pequeñas

$\lambda_{Masi} =$  Relación amortiguamiento por la regla de Masing

$$\lambda_{min} = (\phi_6 + \phi_7 * IP * OCR^{\phi_8}) \sigma_0^{\phi_9} * [1 + \phi_{10} * \ln(Fr)] \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Siendo

$Fr = \text{Frecuencia}$

$\phi_6 - \phi_{10} = \text{Parámetros del modelo}$

$$\lambda_{Masing} = c1 + \lambda_{Masing,a=1} + c2\lambda_{Masing,a=1}^2 + c3\lambda_{Masing,a=1}^3 \quad (\text{Ec. 2.30})$$

$$c1 = -1.1143a^2 + 1.8618a + 0.2523 \quad (\text{Ec. 2.31})$$

$$c2 = 0.0805a^2 - 0.0710a - 0.0095 \quad (\text{Ec. 2.32})$$

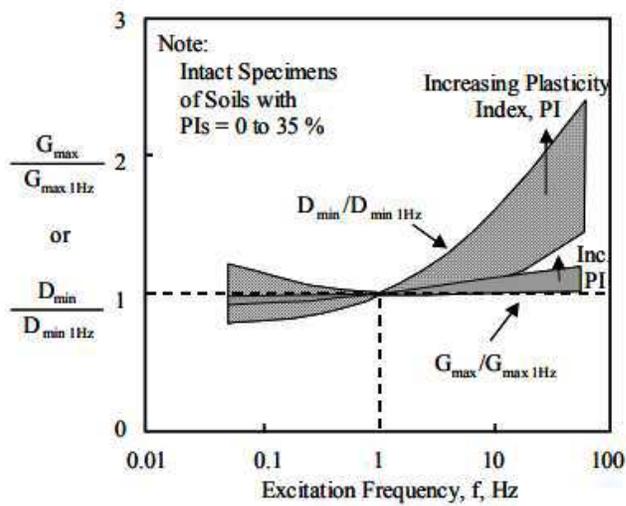
$$c3 = -0.0005a^2 + 0.0002a + 0.0003 \quad (\text{Ec. 2.33})$$

$$\lambda_{Masing,a=1} = \frac{100}{\pi} \left[ 4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} - 2 \right] \quad (\text{Ec. 2.34})$$

Los coeficientes  $\phi_1 - \phi_{10}$ , se los determina con un análisis estadístico mediante el método Bayesiano de primer orden y segundo momento.

Para el efecto de la frecuencia se analizó su afectación en las gráficas  $G_{m\acute{a}x}/G_{m\acute{a}x1HZ}$  y  $D_{min}/D_{min1HZ}$  para frecuencias que van desde 1 Hz a 100 Hz, dando como resultado, que este efecto se normaliza al valor de 1 Hz, el cual es el valor recomendable para utilizar.

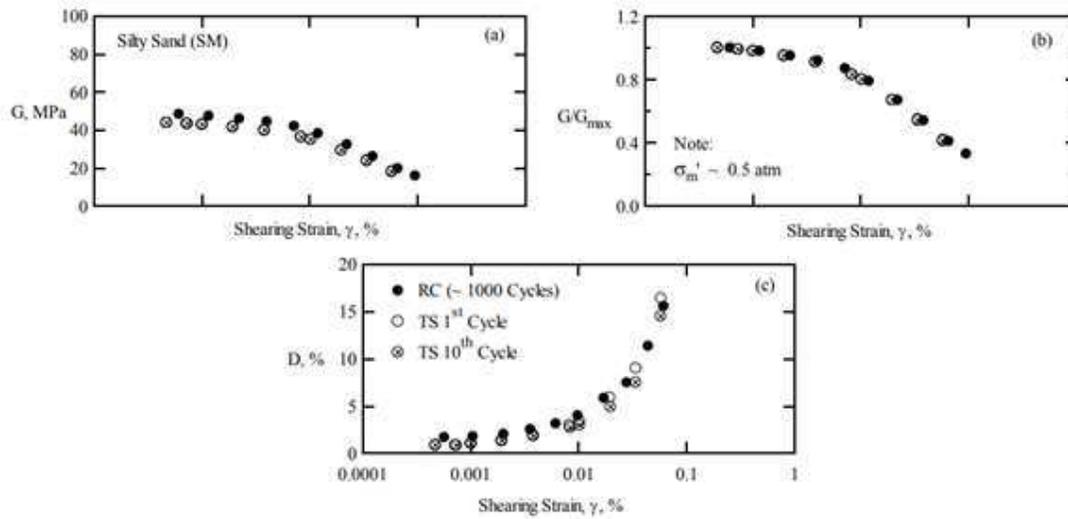
(Darendeli, 2001)



**FIGURA 19** Comparación del efecto de frecuencia sobre el módulo de corte y el amortiguamiento para frecuencias de amplitud baja y alta.

FUENTE: (Darendeli, 2001)

Para el efecto del número de ciclos se analizó su afectación entre  $N=1$  a  $N=100$ , dando como resultado, que  $N$  no tiene efecto sobre  $G$  hasta el umbral cíclico (0.01 % a 0.1 %) y para valores superiores varía en función de  $G$ ,  $\lambda$  y  $N$ , hasta que el efecto sobre  $G$  se vuelve constante a medida que se aumenta  $N$  para altos valores, recomendando utilizar el valor de  $N=10$  (Darendeli, 2001).



**FIGURA 20** Efecto del número de ciclos de carga en a) módulo de corte, b) módulo de corte normalizado y c) relación de amortiguamiento con relación a la deformación.

FUENTE: (Darendeli, 2001)

- El programa Deepsoil y Prosake utiliza estas mismas ecuaciones calculando la presión media efectiva de confinamiento de la siguiente manera:

$$\sigma'_0 = \frac{\sigma'_h}{K_0}$$

(Ec. 2.35)

Siendo

$K_0$  = Coeficiente de presión de tierra en reposo

#### 2.5.2.4. MODELO DE MENQ

Modelo de suelo desarrollado para suelos con alto contenido de arena y grava que mediante “medidas de resonancia torsional, longitudinal y ondas de compresión restringidas de llegada directa, nos permiten hacer mediciones lineales y no lineales del módulo de rigidez al corte (G) y la relación de amortiguamiento ( $\lambda$ )” dando una relación directa entre el diámetro máximo de partículas en la fracción que contiene el 50% más fino del suelo (D50), que su aumento produce que el esfuerzo cortante aumente para pequeñas deformaciones y disminuya la relación de amortiguamiento teniendo las siguientes ecuaciones (Menq, 2003):

- Para el esfuerzo cortante utiliza el modelo de (Darendeli, 2001)

$$\tau = \frac{\gamma}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} G_{m\acute{a}x} \quad (\text{Ec. 2.36})$$

con las siguientes modificaciones:

$$a = 0.86 + 0.1 \log_{10} \left( \frac{\sigma'_0}{P_a} \right) \quad (\text{Ec. 2.37})$$

$$G_{m\acute{a}x} = C_{G3} C_u^{b1} e^x \left( \frac{\sigma'_0}{P_a} \right)^{n_G} \quad (\text{Ec. 2.38})$$

$$C_{G3} = 67.1 [MPa]; 1400 [ksf] \quad (\text{Ec. 2.39})$$

$$b1 = -0.20 \quad (\text{Ec. 2.40})$$

$$x = -1 - \left( \frac{D_{50}}{20} \right)^{0.75} \quad (\text{Ec. 2.41})$$

$$n_G = 0.48Cu^{0.09} \quad (\text{Ec. 2.42})$$

Siendo

$Cu$  = Coeficiente de uniformidad

$\sigma_0'$  = Presión media efectiva de confinamiento

$P_a$  = Presión atmosférica

$e$  = relación de vacíos

$D_{50}$  =

Diámetro máximo de partículas en la fracción que contine el 50% más fino del suelo

$$\gamma_r = 0.12Cu^{-0.6} \left( \frac{\sigma_0'}{P_a} \right)^{0.5Cu^{-0.15}} \quad (\text{Ec. 2.43})$$

- Para la gráfica  $G/G_{m\acute{a}x}$  se utiliza el modelo de Darendeli (2001).

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^a} \quad (\text{Ec. 2.44})$$

- Para la relación de amortiguamiento utiliza el modelo de Darendeli (2001).

$$\lambda = b \left( \frac{G}{G_{m\acute{a}x}} \right)^{0.1} \lambda_{Masing} + \lambda_{min} \quad (\text{Ec. 2.45})$$

con las siguientes modificaciones:

$$\lambda_{min} = 0.55Cu^{0.1}D_{50}^{-0.3} \left( \frac{\sigma'_0}{P_a} \right)^{-0.08}$$

(Ec. 2.46)

(Menq, 2003)

#### 2.5.2.5. MODELO CUADRÁTICO HIPERBÓLICO GENERALIZADO (GQ/H) MODELO CON CONTROL DE RESISTENCIA AL CORTE

Utilizando como base la ecuación de Darendeli (2001) y para solucionar el problema en la extrapolación de datos para el esfuerzo cortante en grandes deformaciones se utiliza un modelo hiperbólico que parte de una ecuación cuadrática bivariada que incluye: “1) un módulo de corte inicial a una deformación cero, 2) un esfuerzo de corte limitante a grandes deformaciones y 3) un control flexible del comportamiento no lineal entre esas condiciones límite, controlado por un ajuste de curvas dependientes del esfuerzo cortante” (Groholski, Hasash, Kim, & Musgroe, 2016).

El programa Deepsoil utiliza este modelo de la siguiente manera:

- Para el esfuerzo cortante

$$\tau = \tau_{max} \left[ \frac{1}{\theta_\tau} \left\{ 1 + \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right) - \sqrt{\left\{ A + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right\}^2 - 4\theta_\tau \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)} \right\} \right] \quad (\text{Ec. 2.47})$$

$$\theta_\tau = \theta_1 + \theta_2 \frac{\theta_4 \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{\theta_5}}{\theta_3 \theta_5 + \theta_4 \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{\theta_5}} \leq 1 \quad (\text{Ec. 2.48})$$

$$\gamma_r = \tau_{max} / G_o \quad (\text{Ec. 2.49})$$

Siendo

$\theta_\tau, \theta_1 - \theta_5, A =$  Parámetros de ajuste de la curva

$\gamma_r =$  deformación cortante de referencia

$\tau_{max} =$  Esfuerzo de corte a grandes deformaciones

$G_o =$  Módulo de corte al 0% del esfuerzo de corte

(Ec. 2.50)

$$\tau_{max} = \sigma'_v(\tan(\phi)) + \rho V_s^2 \frac{G}{G_o} \gamma$$

Siendo

$c =$  cohesión

$\phi =$  Angulo de fricción del suelo

$\sigma'_v =$  Tensión vertical efectiva

(Hashash Y., y otros, 2020)

Según Harmon, Musgrove, Hashash, & Rathje (2017) asume que  $G/G_o$  es 0.8 a una  $\gamma$  de 0.1%, expresando la ecuación de la siguiente manera:

$$\tau_{max} = \sigma'_v(\tan(\phi)) + \rho V_s^2 (0.8)(0.001)$$

(Ec. 2.51)

- Para la gráfica  $G/G_{m\acute{a}x}$

$$\frac{G}{\delta_G G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{\delta_G \gamma / \delta_T \gamma_r} \left[ \frac{1 + \frac{\delta_G \gamma}{\delta_T \gamma_r} - \sqrt{\left\{1 + \frac{\delta_G \gamma}{\delta_T \gamma_r}\right\}^2 - 4 \delta_T \theta_\tau \frac{\delta_G \gamma}{\delta_T \gamma_r}}}{2 \delta_T \theta_\tau} \right]$$

(Ec. 2.52)

$$\delta_G = \sqrt{1 - u}$$

(Ec. 2.53)

$$\delta_T = 1 - u^v$$

(Ec. 2.54)

Siendo

$\delta_G =$  función de degradación del módulo de corte

$\delta_T =$  función de degradación del esfuerzo cortante

$u =$  presión de poro

$v =$  parámetro del modelo

- Para la relación de amortiguamiento

$$\lambda = \left( \frac{G}{G_{m\acute{a}x}} \right) \frac{\delta_G \gamma}{\delta_T \gamma_r} \quad (\text{Ec. 2.55})$$

(Groholski, Hasash, Kim, & Musgroe, 2016)

- Ajuste de curva mediante reglas de Masing

Se utiliza cuando el usuario desea ajustar las curvas del suelo (“degradación del módulo de corte y amortiguamiento”), de curvas definidas de otros modelos a la curva del modelo (GQ/H), el programa da las siguientes opciones:

- MR: Procedimiento para encontrar los parámetros que proporcionan el mejor ajuste para la curva de degradación del módulo de corte con un desajuste potencialmente significativo de la curva de amortiguamiento.
- MRD: Procedimiento para encontrar los parámetros que proporcionan el mejor ajuste tanto para la curva de degradación del módulo de corte y la curva de amortiguamiento.
- DC: Procedimiento para encontrar los parámetros que establecen el mejor ajuste para la curva de amortiguamiento con un desajuste potencialmente significativo de la curva degradación del módulo de corte (Hashash Y., y otros, 2020).

- Ajuste de la curva sin reglas de Masing

Este modelo se implementa como un factor de reducción que altera significativamente las reglas de Masing, al introducir este factor, las curvas de degradación del módulo de corte y el amortiguamiento se ajustan simultáneamente, el comportamiento del amortiguamiento se modifica mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_{MasingHysteretic} = F(\gamma_{m\acute{a}x})\lambda_{Masing} \quad (\text{Ec. 2.56})$$

Donde

$$F(\gamma_{m\acute{a}x}) = F(\gamma_m) =$$

*Es el factor de reducción calculado a partir de la deformación cortante máxima*

*$\lambda_{Masing}$  = amortiguamiento histéretico calculado según reglas de Masing*

(Hashash Y., y otros, 2020)

- MRDF-UIUC

El factor de reducción se lo define como:

$$F(\gamma_m) = P1 - P2 \left( 1 - \frac{G(\gamma_m)}{G_0} \right)^{P3} \quad (\text{Ec. 2.57})$$

Donde

*$P1, P2, P3$  = son parámetros del modelo*

(Phillips & Hashash, 2009)

- MRDF-Darandeli

(Darendeli, 2001) también propone un modelo hiperbólico modificando la base empírica para predecir las respuestas dinámicas no lineales de diferentes tipos de suelos, definiendo el factor de reducción como:

$$F(\gamma_m) = P1 \left( \frac{G(\gamma_m)}{G_0} \right)^{P2} \quad (\text{Ec. 2.58})$$

Donde

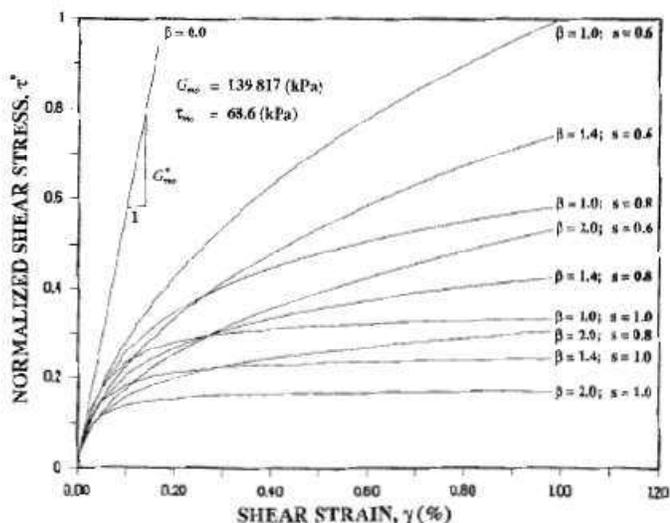
$P1, P2 =$  son parámetros del modelo

#### 2.5.2.6. MODELO MODIFICADO DE KONDER Y ZELASKO (MKZ)

Sirve para la caracterización de arenas licuables, es un modelo hiperbólico basado en (Konder & Zelasko, 1963), corregido por (Matosovic & Vucetic, 1993), agregando 2 parámetros adicionales: Beta ( $\beta$ ) y ( $s$ ) que ajustan la curva de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta \left( \frac{G_0}{\gamma_r} \gamma \right)^s} \quad (\text{Ec. 2.59})$$

El modelo original hiperbólico tendría valores de  $\beta = s = 1$ , con estos parámetros modificables se tiene un mejor ajuste al comportamiento de diversos tipos de suelo, como se puede ver en la siguiente ilustración:



**FIGURA 21** Efecto de los valores de  $\beta$  y  $s$  en la curva esfuerzo deformación.

FUENTE: (Matosovic & Vucetic, 1993)

- Para la grafica  $G/G_{m\acute{a}x}$

$$\frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + \beta \left(\frac{G_o}{\gamma_r} \gamma\right)^s} \quad (\text{Ec. 2.60})$$

$$\gamma_r = \tau_{max}/G_o \quad (\text{Ec. 2.61})$$

- Para la relación de amortiguamiento

$$\lambda = \left(1 - \frac{G}{G_o}\right) + \lambda_{min} \quad (\text{Ec. 2.62})$$

$$\lambda_{min} = \frac{4}{\pi} \frac{\int_0^{\gamma_r} f(\gamma) d\gamma}{f(\gamma_r) \gamma_r} - \frac{2}{\pi} \quad (\text{Ec. 2.63})$$

(Matosovic & Vucetic, 1993)

- El programa Deepsoil utiliza este modelo de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{G_o \gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s} \quad (\text{Ec. 2.64})$$

Siendo

$G_o =$  Módulo de corte al 0% del esfuerzo de corte

$\beta, \gamma_r, s =$  Son parámetros del modelo

Además, amplía el modelo según Hashash & Park (2001) para generar una relación con la presión de poro, mediante la tensión vertical efectiva de la siguiente manera:

$$\gamma_r = \gamma_r \left(\frac{\sigma'_v}{\lambda_r}\right)^b \quad (\text{Ec. 2.65})$$

Por otro lado, este modelo es prácticamente lineal para pequeñas deformaciones, dando un amortiguamiento histórico cero, igualmente (Hashash & Park, 2001) corrige esto definiendo este amortiguamiento de la siguiente manera:

$$\lambda_{min} = \lambda_{min} \left( \frac{1}{\sigma'_v} \right)^d \quad (\text{Ec. 2.66})$$

En caso de no necesitar que el modelo sea dependiente de la presión de poro los coeficientes b y d serían 0.

(Hashash Y., y otros, 2020)

- Ajuste de curva mediante reglas de Masing y sin reglas de Masing

Es el mismo efectuado para el modelo (GQ/H)

#### 2.5.2.7. ROCK (IDRISS)

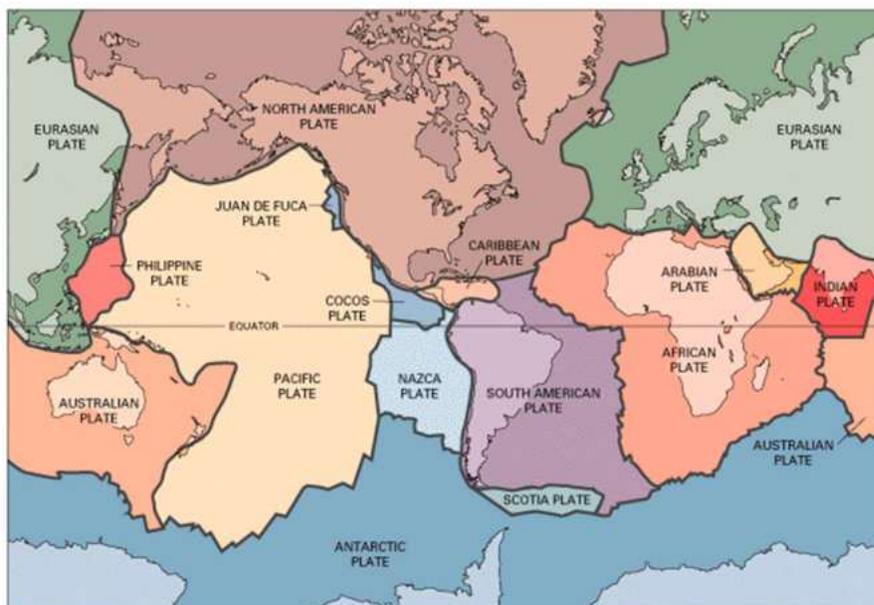
Modelo precargado únicamente en el software Proshake, donde se incluyen curvas de amortiguamiento y degradación de corte, los cuales están en bloques de datos que se localizan en el programa SHAKE original (Schnabel, Lysmer, & Seed, 1972).

## 2.6. EFECTO DE LOS SISMOS EN LOS SUELOS

### 2.6.1. CONCEPTOS GENERALES

#### 2.6.1.1. PLACAS TECTÓNICAS

La capa más externa del planeta, conocida como corteza, tiene un espesor variable, desde 5 a 10 km de espesor para las de origen oceánico, y en algunos lugares puede llegar a los 100 kilómetros, para el caso de las continentales. Su comportamiento es rígido, y flota en el manto terrestre moviéndose por la diferencia de temperatura que existe desde el núcleo. Este movimiento provoca que la corteza no sea uniforme, sino que se segmente, dando lugar a las placas tectónicas que son porciones de corteza terrestre fragmentada (Giner & Molina, 2001).



**FIGURA 22** Distribución global de las principales placas tectónicas.

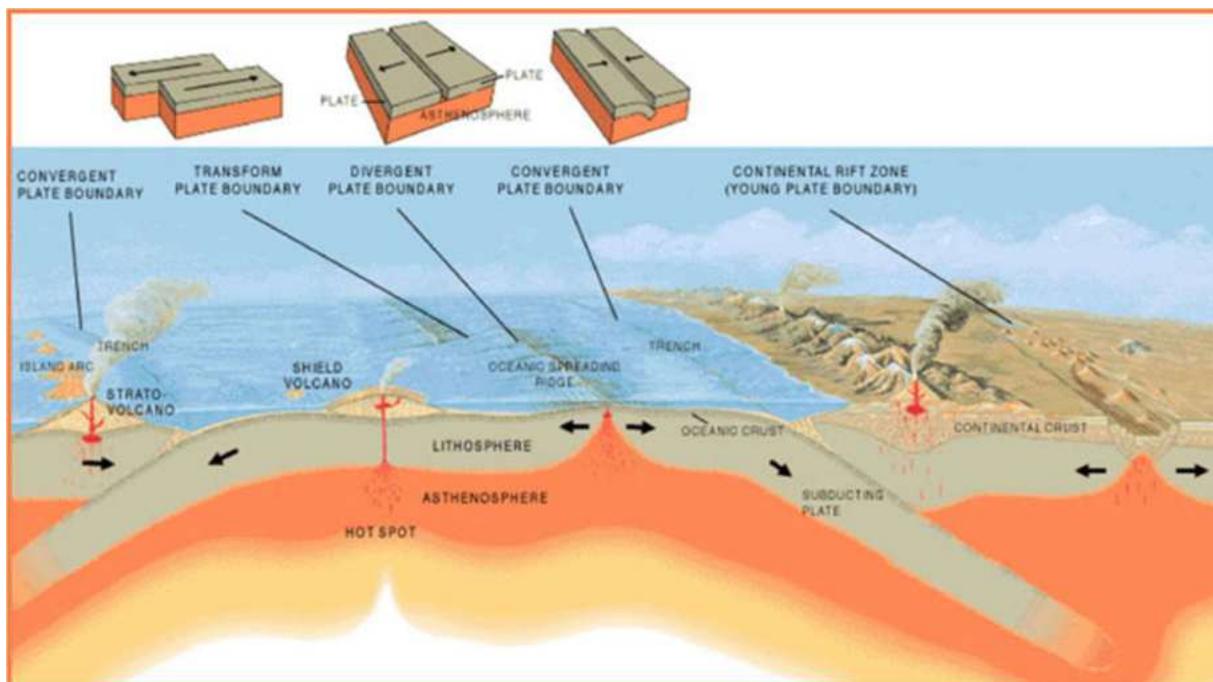
FUENTE: (Earthquake Science Center, 2022)

##### 2.6.1.1.1. BORDES DE PLACAS TECTONICAS

- **Convergentes:** Cuando existe aproximación de placas, el borde de una placa ingresa bajo el borde de otra.

- Divergentes: Cuando existe separación de placas, provocando una ascensión del manto para crear nuevo suelo.
- Transformantes: Cuando existe un deslizamiento de una placa respecto a otra.

(Rodríguez, 2005)



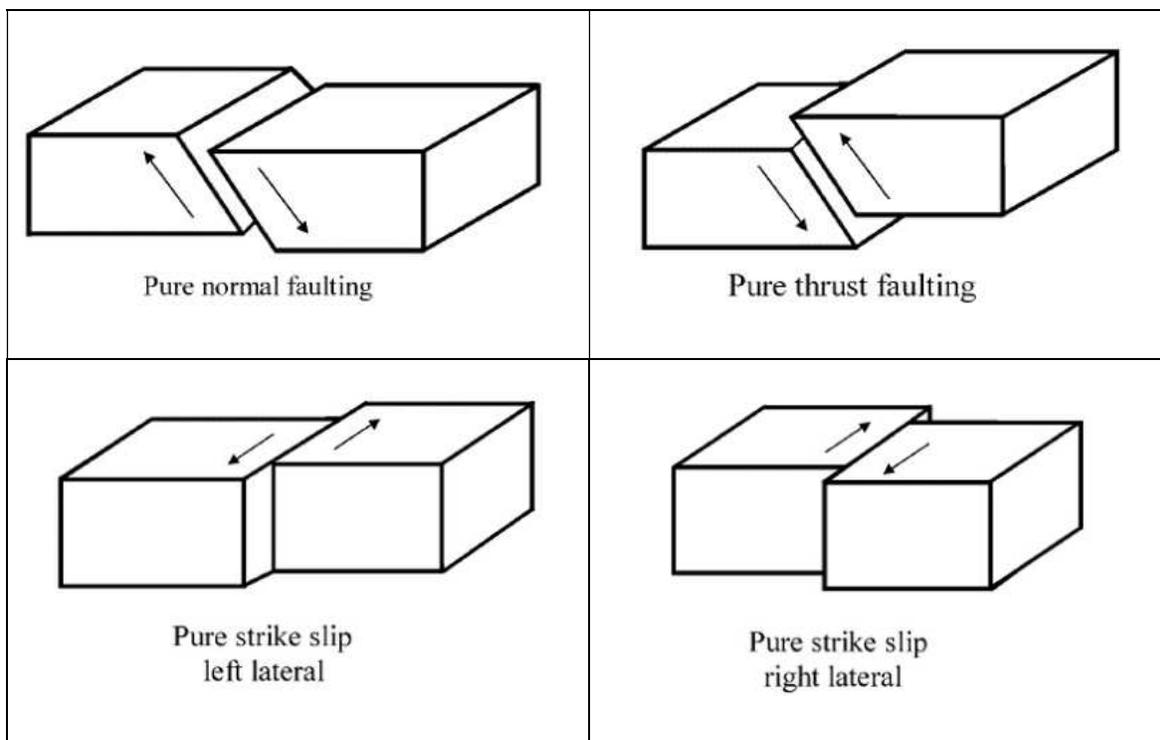
**FIGURA 23** Tipo de límites o bordes entre las placas tectónicas

FUENTE: (Ocean Exploration, 2022)

#### 2.6.1.2. FALLAS GEOLÓGICAS

Falla geológica se dice a la fractura de la corteza terrestre, la cual delimita los diferentes bloques (RSN, 2022).

### 2.6.1.2.1. TIPO DE FALLAS GEOLÓGICAS



**FIGURA 24** Tipos de fallas geológicas

FUENTE: (Bormann, 2002)

- Fallas de rumbo (strike slip faults)

Normalmente llamadas fallas horizontales pueden ser: fallas dextrales (right lateral), cuando el bloque de la derecha se acerca al espectador o fallas sinestrales (left lateral), cuando el bloque de la derecha se aleja del espectador, estas fallas están asociadas a esfuerzos horizontales oblicuos, provocando este desplazamiento lateral. A nivel de las placas tectónicas, este tipo de fallas se denominan transformantes (RSN, 2022).

- Fallas inversas (thrust faults)

Es cuando un bloque de roca se desplaza de forma ascendente sobre otro formando elevaciones importantes, normalmente tienen ángulos menores a 45 grados, cuando

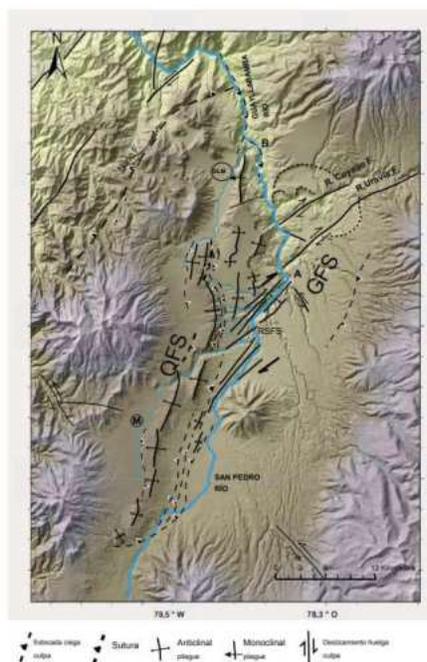
este ángulo es menor a 20 grados estas fallas son denominadas estructuras de cabalgamiento. Morfológicamente estas fallas forman pliegues en el terreno o escarpes. A nivel de la placa tectónica, este tipo de fallas se encuentran en los bordes convergentes y se conocen como zonas de subducción (Alvarado, y otros, 2014).

- Fallas normales (normal faults)

Este tipo de fallas están asociadas a fuerzas de tensión, que provoca el deslizamiento de un bloque de roca hacia abajo, estas fallas se provocan con ángulos mayores a 60 grados (Alvarado A. , 2012).

#### 2.6.1.2.2. FALLAS GEOLÓGICAS DE QUITO (FALLAS INVERSAS)

En la ciudad de Quito se encuentran 2 sistemas de fallas inversas: “sistema de fallas de Quito (QFS) y el sistema de fallas de Guayllabamba (GFS)” (Alvarado, y otros, 2014).



**FIGURA 25** Sistemas de fallas de Quito y rasgos morfológicos principales asociados a estos sistemas

FUENTE: (Alvarado, y otros, 2014).

### 2.6.1.3. SISMOS

#### 2.6.1.3.1. ORIGEN Y TIPOS

Los sismos son fenómenos que se sienten en la superficie como un sacudimiento o vibración y son ondas elásticas que se propagan desde el interior y por la superficie de la Tierra (Shearer, 2009). Estas ondas se pueden generar por diferentes mecanismos: los sismos tectónicos se generan por una dislocación o movimiento al interior de la Tierra, los volcanes, por el choque de meteoritos o incluso por actividad antrópica (minería, pruebas nucleares, entre otras) (Rivadeneira , y otros, 2007).

Los sismos pueden involucrar placas tectónicas o solo ocurrir dentro de una placa tectónica (corticales).

En el primer caso están los sismos de subducción denominados también sismos interplaca, son sismos con componente inversa que ocurren por el movimiento relativo de las dos placas tectónicas en contacto, cuando la presión gana a la resistencia mecánica, en la zona de subducción (Giner & Molina, 2001).

El segundo caso, son sismos producidos en la corteza terrestre a poca profundidad. Estos eventos son producto de las deformaciones y esfuerzos que ocasionan la convergencia de las placas (Giner & Molina, 2001).

#### 2.6.1.3.2. MAGNITUD E INTENSIDAD

La forma más conocida para caracterizar el tamaño de un sismo es la magnitud. Este concepto fue desarrollado en 1935 por Richter y se basa en la amplitud más grande que se observa en el registro de un sismo o sismograma medido en un tipo de sensor específico. Otros tipos de magnitud se basan en la amplitud de tipos específicos de ondas como las ondas superficiales (Ms) y ondas de cuerpo (Mb). Discrepancias observadas con estos tipos de magnitudes llevaron a establecer otro tipo de magnitud basada en el momento sísmico o energía que se libera al mover la falla, denominada magnitud momento (Mw) (Shearer, 2009).

La intensidad describe la fuerza del sacudimiento en función de la percepción humana, daños a las estructuras y cambios en el ambiente y depende de la distancia a la fuente y de las condiciones del suelo. Para su determinación se han propuesto varias escalas a lo largo de la historia: Rossi-Forel (1883); Sieberg (1912,1923); Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS); Medvedev, Sponheuer & Karnik (MSK, 1964); European Macroseismic Scale (EMS) y la Japanese Meteorological Agency (JMA) (Bormann, 2002).

#### 2.6.1.4. ONDAS SÍSMICAS

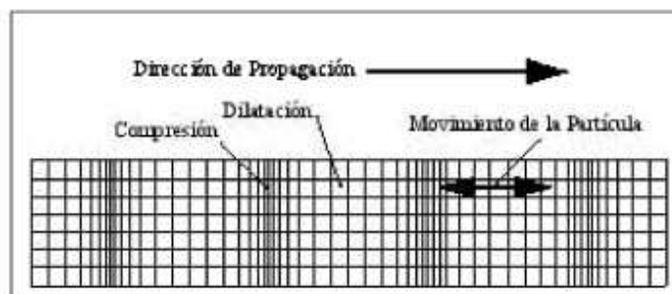
La liberación de energía que ocasiona un sismo se envía a la corteza terrestre mediante ondas elásticas que viajan deformando su medio (Martínez, 2005). Los principales tipos de onda son:

##### 2.6.1.4.1. ONDAS DE CUERPO

Se propagan por el interior del planeta

- Ondas primarias (P)

Son ondas que producen un movimiento del medio en sentido longitudinal a la propagación de la onda, de esta manera comprime y dilata el suelo (Giner & Molina, 2001).

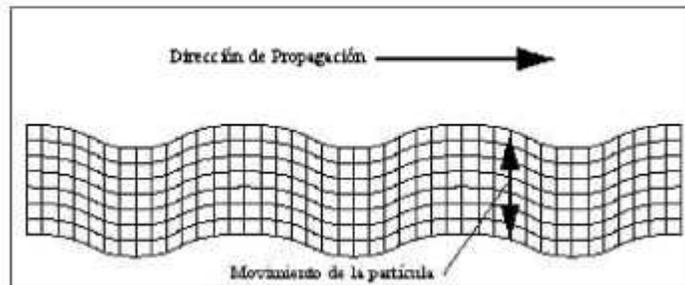


**FIGURA 26** Esquemas de la propagación de las Ondas Primarias o P.

FUENTE: (Giner & Molina, 2001)

- Ondas secundarias (S)

Son ondas que producen un movimiento del suelo en sentido perpendicular a la dirección de propagación (cizalla). Las ondas S, al incidir casi verticalmente en la superficie de la Tierra, produce un movimiento horizontal del suelo. La velocidad de las ondas S es menor a las ondas (P) y no se pueden propagar en medio acuoso, por tal motivo no se propagan por lagos, océanos ni por el núcleo externo del planeta (Giner & Molina, 2001).



**FIGURA 27** Esquema de la propagación de las Ondas Secundarias o S.

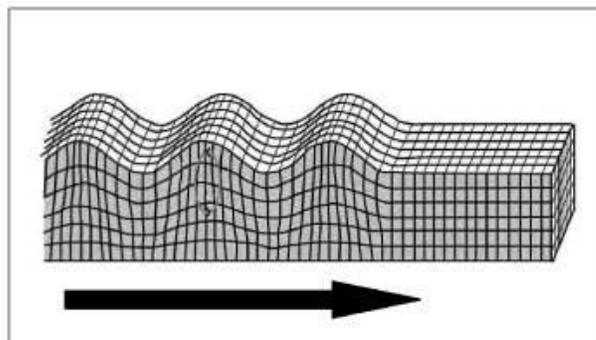
FUENTE: (Giner & Molina, 2001)

#### 2.6.1.4.2. ONDAS SUPERFICIALES

Se propagan por cualquier superficie libre

- Ondas Rayleigh

Son ondas que producen un movimiento del suelo en dirección horizontal y vertical, describiendo un movimiento elíptico y retrógrado confinado en el plano vertical y tienen una velocidad menor a las ondas (S) (Giner & Molina, 2001).

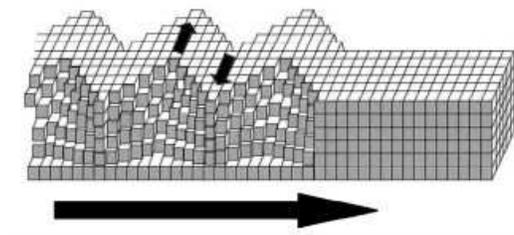


**FIGURA 28** Esquema de la propagación de las ondas Rayleigh.

FUENTE: (Giner & Molina, 2001)

- Ondas Love

Son ondas que producen un movimiento transversal (perpendicular) a la dirección de propagación, causando un movimiento horizontal del suelo, siendo de esta manera las ondas con mayor poder destructivo, junto con las ondas S (Giner & Molina, 2001).

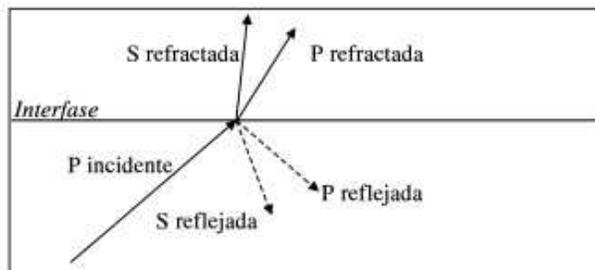


**FIGURA 29** Esquema de la propagación de las ondas Love.

FUENTE: (Giner & Molina, 2001)

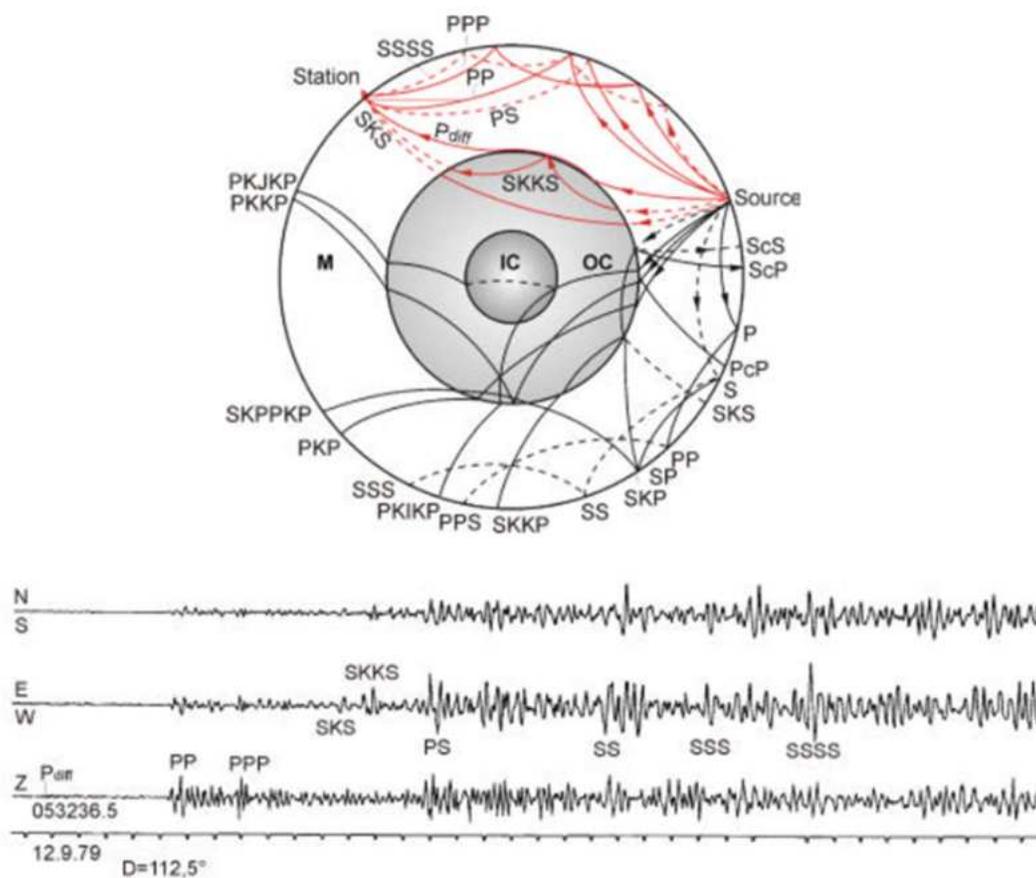
#### 2.6.1.4.3. PROPAGACIÓN DE ONDAS

Como se vio en la sección anterior las ondas de cuerpo viajan deformando el medio y su propagación es por el interior del planeta mediante efectos de refracción y reflexión de ondas, esto ocurre cuando estas ondas pasan a medios con diferentes características adquiriendo diferentes velocidades, además cuando ocurre este fenómeno, parte de esta energía da lugar a nuevas ondas (Giner & Molina, 2001).



**FIGURA 30** Reflexión y refracción de una onda P al llegar a una interfase entre dos medios.

FUENTE: (Giner & Molina, 2001)



**FIGURA 31** Arriba: Propagación de las ondas sísmicas por el interior de la Tierra y nomenclatura de las ondas: líneas continuas: Ondas P; líneas entrecortadas: Ondas S. Abajo: Sismograma observado a 112.5° de distancia epicentral (1° = 111.11 Km).

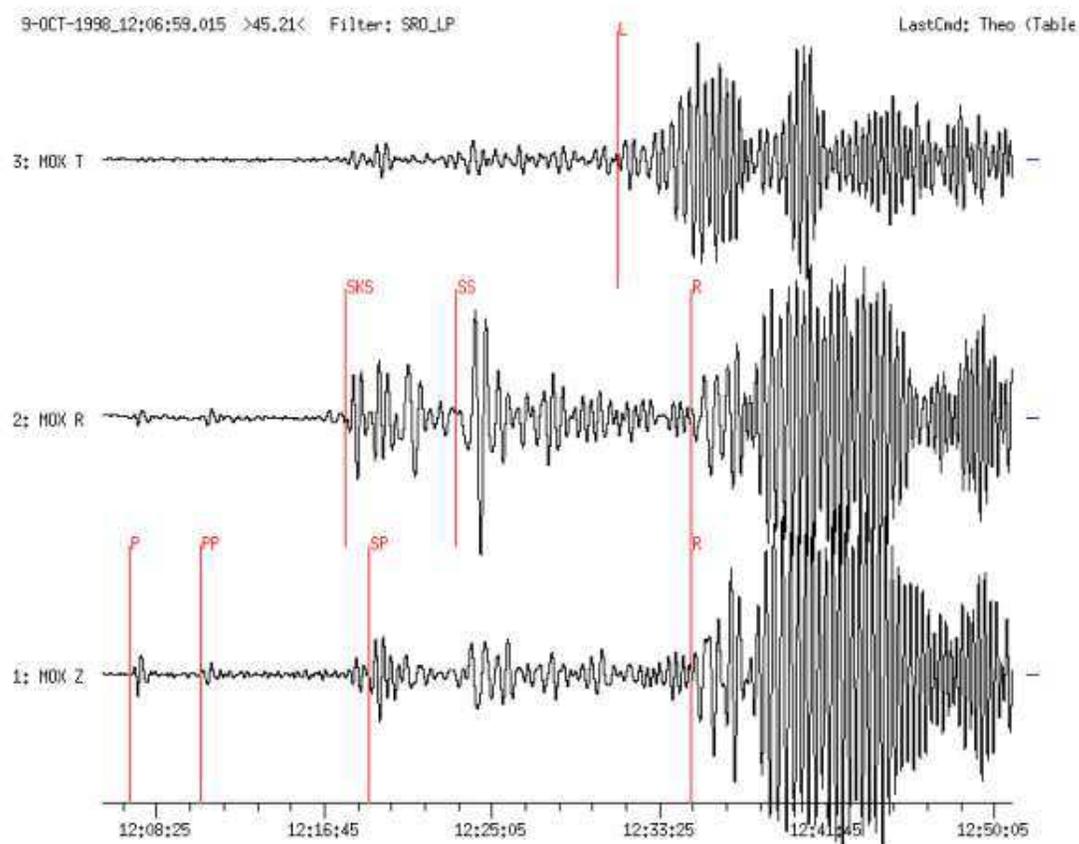
FUENTE: (Bormann, 2002)

Estos fenómenos dependen exclusivamente de las características mecánicas de los estratos de suelo. En el presente proyecto de titulación se estudiará el efecto de amplificación sísmica descrito en el capítulo 2.6.2.3.

#### 2.6.1.5. SEÑALES SÍSMICAS

Una señal sísmica se puede describir estadísticamente como: “un proceso aleatorio no estacionario” (Benbrahim, Daoudi, Bjelloun, & Ibenbrahim, 2005).

Además, es el registro continuo de las ondas de un evento sísmico, el cual se caracteriza por un contenido frecuencial y de energía específicos (Florez & Lozano, 2007). A este registro se conoce como sismograma.



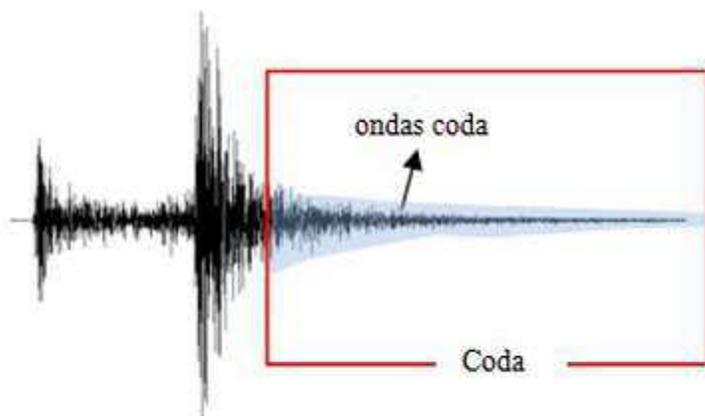
**FIGURA 32** Sismogramas (3 componentes) de un terreno registrado en Nicaragua, el 9 de octubre de 1998 en una estación a  $86.5^\circ$  de distancia.

FUENTE: (Bormann, 2002)

Los datos que se extrae de una señal sísmica corresponden, en forma general a la información de la fuente (ondas P), del camino (ondas S) y del sitio (ondas superficiales) (Vargas Jiménez, 2004).

#### 2.6.1.5.1. CODA SÍSMICA

Corresponden a las señales localizadas al final de una señal sísmica, las cuales comienzan después de la llegada de las ondas de mayor amplitud (P y S), componiéndose principalmente de ondas de superficie, llegando hacer aproximadamente el 60% del registro acelerográfico (Vargas Jiménez, 2004).



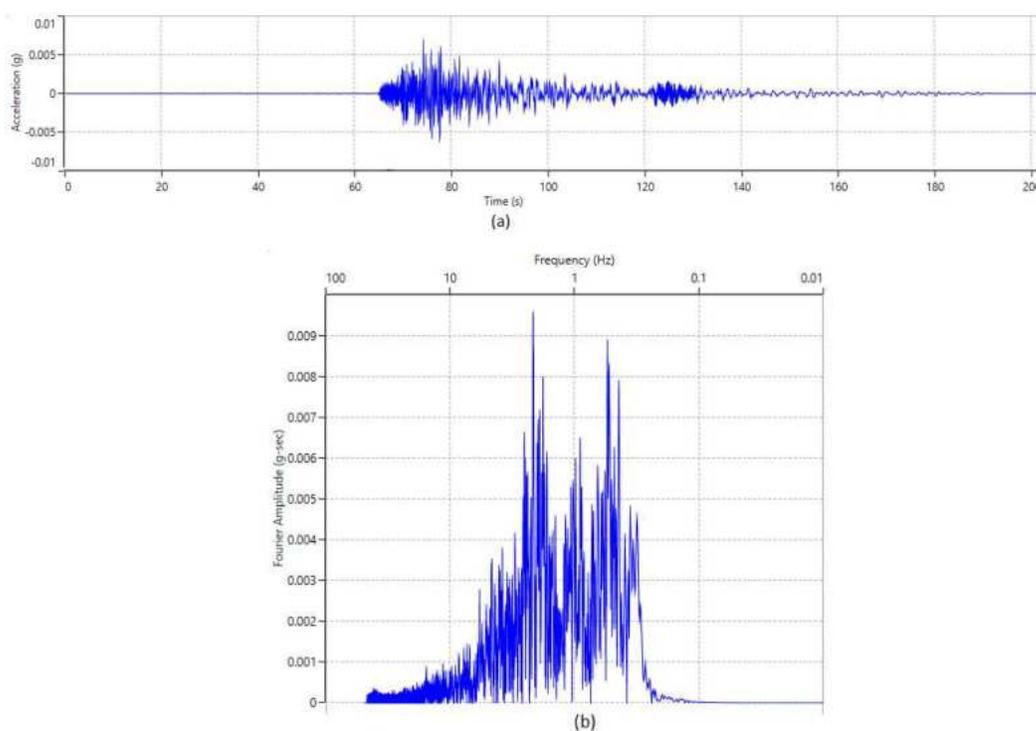
**FIGURA 33** Localización de la coda sísmica en una señal acelerográfica.

FUENTE: (Vargas Jiménez, 2004)

### 2.6.1.6. ESPECTROS

- De Fourier

“Es la transformación de la señal sísmica que se encuentra en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia”, distribuyendo las amplitudes a sus frecuencias correspondientes, permitiéndonos de este modo las componentes frecuenciales presentes en la señal sísmica o fenómeno ondulatorio (Carrillo González, 2003).



**FIGURA 34** a) Señal sísmica, b) Espectro señal sísmica.

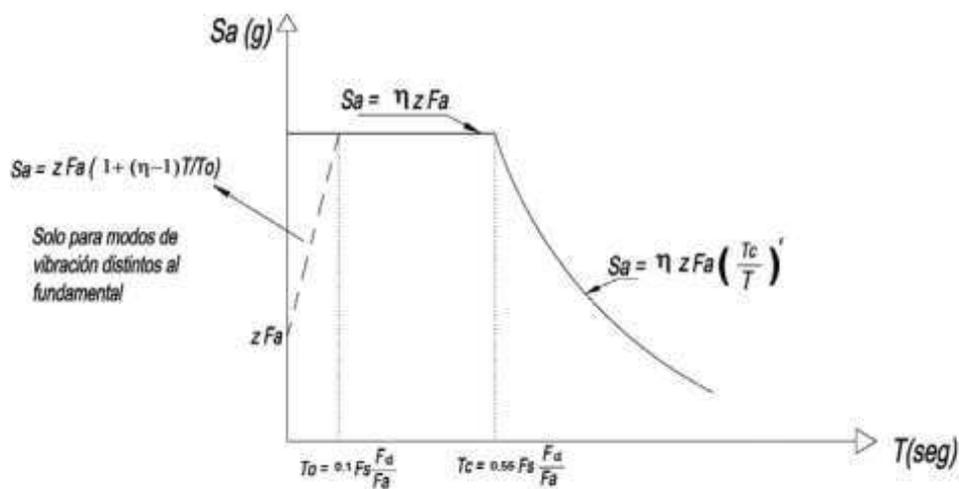
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

- De respuesta

Es una caracterización todos los posibles movimientos del terreno y los posibles efectos que podrían tener sobre las estructuras, concepto iniciado por (Biot, 1932), convirtiéndose en el concepto central de la ingeniería sísmica, este espectro resume “la respuesta máxima de todos los posibles sistemas lineales” correspondientes a un

grado de libertad correspondiente a un movimiento telúrico, proporcionando de esta manera un enfoque práctico para las normas y códigos de construcción. El valor máximo está en función del periodo de vibración natural del sistema, estas gráficas no consideran un amortiguamiento definido, por lo que es necesario varias gráficas con varios amortiguamientos para cubrir este parámetro en estructuras reales (Chopra, 2014).

La norma ecuatoriana de la construcción lo define este espectro con una fracción del amortiguamiento crítico del 5%, para su utilización en diseño (Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS), 2015).



**FIGURA 35** Espectro de respuesta norma ecuatoriana.

FUENTE: (Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS), 2015)

#### 2.6.1.7. DENSIDAD ESPECTRAL (PSD)

Es el valor cuadrático promedio del espectro normalizada a un ancho de banda de 1HZ, las unidades serian  $g^2/Hz$  (Welch, 1967).

### 2.6.1.7.1. MÉTODO WELCH

Para el cálculo de la densidad espectral, Peter D. Welch propone lo siguiente:

- Dividir la señal en diferentes segmentos, los cuales se superpondrán hasta un 50%.
- Estos segmentos superpuestos se los coloca en una ventana.

Generando así periodogramas enventanados (“periodograma: es una estimación de la densidad espectral de la señal” (Schuster, 1898)) para cada segmento, cada periodograma se calculará con la transformada discreta de Fourier, para posteriormente promediar los periodogramas individuales, llamando a este método del periodograma enventanado, segmentado y promediado (Welch, 1967).

- Función Welch Matlab

$$[p_{xx}, f] = pwelch(x, window, noverlap, nfft, fs)$$

Donde

*p<sub>xx</sub>* = vector de densidad espectral

*f* = vector de frecuencias

*x* = señal a analizar

*window* = número de datos correspondiente a la ventana,

*noverlap* = número de datos correspondientes a la superposición

*nfft* = número de datos para la integración positiva

*fs* = unidad de muestreo de la señal

Los parámetros que vienen cargados por defecto son:

- 8 ventanas
- 50% de superposición

(MathWorks, 2022)

## 2.6.2. EFECTOS DE SITIO

### 2.6.2.1. DEFINICIÓN

Es la respuesta del suelo ante un evento sísmico, el cual se ve afectado por las condiciones topográficas y geológicas del área en cuestión, esta afectación es única para cada sitio (Robles Mendoza & Jimenez Velasquez, 2017).

### 2.6.2.2. TIPOS DE EFECTOS DE SITIO

El suelo se puede comportar de diversas maneras ante cargas o sollicitaciones dinámicas como son:

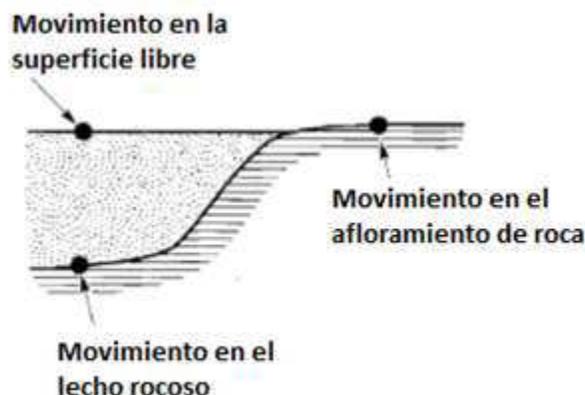
- Licuefacción: Es la pérdida de la capacidad portante del suelo por efecto de presiones de agua que provocan deformaciones por cortante.
- Densificación: Cuando el suelo tiene cambios de volúmenes.
- Alteración en los estados de esfuerzos en las masas de suelo.
- Amplificación de ondas sísmicas.
- Resonancia en suelos blandos.

(Bran Sánchez, González Cruz, & Ortiz Landaverde, 2009)

En el presente trabajo de titulación solo vamos a analizar el tema amplificación de ondas sísmicas en específico amplificación dinámica.

Se define los siguientes puntos que se usan para describir los movimientos del suelo y se los referencia en la figura 35.

- Superficie libre: superficie sobre el depósito de suelo.
- Lecho rocoso: base del depósito de suelo o la parte superior de la roca, este se estimó para el año 2012 a más de 100 metros de profundidad para la ciudad de Quito (ERN-2012, 2012).
- Afloramiento de roca: Porción de roca que se encuentra expuesta en la superficie del suelo (Kramer, 1996).



**FIGURA 36** Suelo sobre lecho rocoso.

FUENTE: (Kramer, 1996)

- Basamento rocoso: por definición es el lecho rocoso, para el presente trabajo de titulación y por temas de modelación de columna del suelo este sitio estará ubicado en la base de los sedimentos superficiales.

### 2.6.2.3. AMPLIFICACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS

#### 2.6.2.3.1. AMPLIFICACIÓN GEOMETRICA DE ONDAS SÍSMICAS

Únicamente corresponde a los efectos de amplificación producidos por la impedancia entre estratos.

- Impedancia

Como se vio en el capítulo 2.6.1.4.3 propagación de ondas sísmicas, estas ondas tienen fenómenos de reflexión entre sus diferentes estratos, con cada reflexión cambia la amplitud de la onda de retorno, la propiedad que controla este cambio que produce la interfase entre varios estratos es conocida como contraste de impedancia, siendo definida matemáticamente como:

$$I_c = \frac{\rho_b V_b}{\rho_s V_s} \quad (\text{Ec. 2.67})$$

Donde

$\rho, V =$  densidad, velocidad

los subíndices  $b$  se refiere al estrato rocoso y los subíndices  $s$  al nivel sedimentario

Este valor es alto para materiales jóvenes y con poca consolidación, provocando niveles altos de amplificación, otro problema radica en el atrapamiento de las ondas en niveles de baja impedancia que provoca la amplificación de frecuencias naturales bajas (Rodríguez Gómez, 2015).

“Si el amortiguamiento de un suelo es muy reducido cercano a cero, la amplificación máxima es únicamente función del contraste de impedancia” (Guéguen, 1997).

#### 2.6.2.3.2. AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DE ONDAS SÍSMICAS

Es el efecto de resonancia, siendo “la diferencia entre la frecuencia de las ondas sísmicas y la frecuencia natural del suelo, si la frecuencia de la onda sísmica es aproximadamente igual a la frecuencia natural del terreno se produce amplificación en las señales sísmicas” (Rodríguez Gómez, 2015).

El suelo al ser un cuerpo de gran magnitud puede estar vibrando a varias frecuencias dependiendo la disposición y propiedades de sus estratos estas frecuencias se determinan mediante la siguiente fórmula propuesta por (Haskell, 1960):

$$f_n = (2n + 1) \frac{V_s}{4H} \quad (\text{Ec. 2.68})$$

Donde

$n =$  Número de frecuencia natural siendo 0 a dominante

$V_s =$  Velocidad de onda del estrato

$H =$  Altura del estrato

Si queremos el periodo fundamental dominante en el suelo  $n=0$  por lo tanto la ecuación es la siguiente:

$$f_o = \frac{V_s}{4H} \quad (\text{Ec. 2.69})$$

### 2.6.3. PERFILES DE SUELO

#### 2.6.3.1. PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Se dice a la representación gráfica que sirve para describir una sección vertical del suelo, en el cual se realizó una perforación o sondeo, donde se detallan capas específicas que comparten: espesor, propiedades geotécnicas y sucesión de los estratos (Cárdenas, 2005).

#### 2.6.3.2. PERFIL LITOLÓGICO

Es la representación gráfica del perfil estratigráfico donde se representa los estratos más antiguos desde abajo hacia los más jóvenes hacia arriba, donde se representa la resistencia que tienen contra la meteorización, es un perfil basado en la geología de los estratos estratigráficos (Griem, 2022).

### 2.6.4. FUNCIÓN DE TRASFERENCIA

Para hacer un análisis de la respuesta del suelo se necesita el uso de las funciones de transferencia las cuales pueden ser usadas para expresar varios datos de respuesta del suelo tales como: “desplazamiento, velocidad, aceleración, esfuerzo cortante y deformación a corte”, a partir de un factor de entrada que es la aceleración del lecho rocoso este análisis se lo realiza mediante la transformada de Fourier en el dominio de las frecuencias respectivas, siendo una de sus ventajas la simplicidad y facilidad del cálculo para patrones de carga complicados (Kramer, 1996).

La función de transferencia es “la división compleja entre el espectro de amplitudes de Fourier en la superficie para el espectro de Fourier en roca”.

$$H(\theta) = \frac{X(\theta)}{F(\theta)} \quad (\text{Ec. 2.70})$$

Teniendo de la siguiente manera una representación continua mediante la Transformada de Fourier:

$$F(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\theta t} dt \quad (\text{Ec. 2.71})$$

$$X(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\theta t} dt \quad (\text{Ec. 2.72})$$

Siendo:

$f(t)$  = excitación sísmica en roca

$x(t)$  = excitación sísmica en superficie

$\theta$  = la frecuencia de excitación

(Valverde, Fernández, Jiménez, Vaca, & Alarcón, 2002)

Propiedad únicamente en el dominio de la frecuencia.

- En la presente tesis se obtendrá este parámetro haciendo la división compleja de las densidades espectrales.

#### 2.6.5. NYQUIST FRECUENCIA

“Es la frecuencia más alta que puede ser representada matemáticamente mediante el análisis de Fourier” y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$NyF = \frac{1}{2\Delta t} \quad (\text{Ec. 2.73})$$

(EduPro Civil Systems, Inc., 2017).

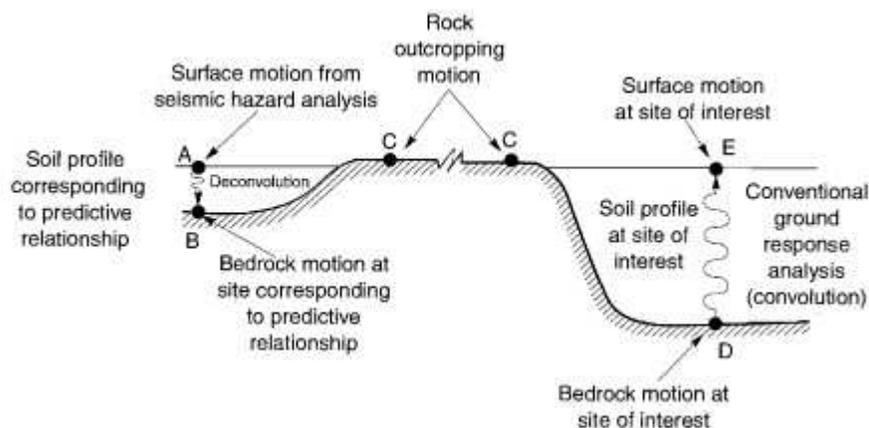
#### 2.6.6. CURVA mHVSR

Esta curva se obtiene dividiendo la relación espectral horizontal sobre la relación espectral vertical idea propuesta originalmente por (Nakamura & Saito, 1983) publicación totalmente en Japonés, la cual tuvo gran acogida por la comunidad científica y sacando una publicación en inglés para el año 1989, utilizado en un principio como un sistema de alerta temprana (movimiento inicial ondas P), por lo que se espera que la curva mHVSR sea grande durante la llegada de ondas P y pequeña en la llegada de ondas S, reconociéndolas de una manera simple, al ser analizada en suelos blandos versus suelos duros provocando picos en la curva, esto se puede explicar por un cambio de velocidades o un fuerte contraste de impedancia (Nakamura, 1989).

#### 2.6.7. DECONVOLUCIÓN Y CONVOLUCIÓN SÍSMICA

Los sismos internos de la roca (movimiento del lecho rocoso) y los sismos en el afloramiento de roca no son los mismos en superficie libre, esto se debe a los efectos de sitio, la razón es “que los sismos de superficie libre son el doble de la amplitud de la onda sísmica incidente consecuencia de la reflexión total, mientras que los sismos internos son la suma de las ondas de propagación ascendentes y descendentes de las capas superpuestas” (Kramer, 1996).

La deconvolución sísmica es el paso de una señal de superficie a una señal de basamento rocoso mediante una función de transferencia y la convolución es el proceso opuesto como se lo puede ver en el siguiente grafico:



**FIGURA 37** Convolución y Deconvolución sísmica.

FUENTE: (Kramer, 1996)

La casi nula existencia de registros acelerográficos en el lecho rocoso es la razón para aplicar la convolución sísmica.

## 2.6.8. METÓDOS DE ANÁLISIS DE AMPLIFICACIÓN DE SITIO

### 2.6.8.1. ANÁLISIS DE SITIO 1D

El análisis de amplificación de sitio en una dimensión (1D) se basa a las siguientes hipótesis:

- Todos los límites del área de estudio son horizontales.
- Las ondas sísmicas se transmiten verticalmente desde el lecho rocoso al área de suelo de estudio y viceversa.
- Tanto el suelo como el lecho rocoso se extienden infinitamente en horizontal (Kramer, 1996).

#### 2.6.8.1.1. LINEAL

Se utiliza la función de transferencia en el análisis lineal por el motivo que esta función se basa al principio de superposición, considerando al suelo isotrópico, uniforme y elástico lineal (Kramer, 1996).

Se considera una rigidez máxima y un amortiguamiento constante del suelo durante todo su análisis (Hashash Y., y otros, 2020).

#### 2.6.8.1.2. LINEAL EQUIVALENTE

Es una aproximación de un análisis no lineal, siendo un método de análisis iterativo en el cual se suministra estimaciones iniciales tanto de módulo de corte ( $G$ ) y de amortiguamiento ( $\lambda$ ) para cada capa de suelo, a partir de estas propiedades inalterables en el tiempo, se realiza un análisis dinámico lineal de esta manera evaluando la respuesta en la columna de suelo. La deformación cortante se obtiene a partir de estos resultados y los picos de deformación cortante son evaluados para cada capa de suelo, además las deformaciones cortante efectivas son consideradas como una fracción de los picos de esta deformación, la deformación a corte efectiva es usada para evaluar apropiadamente el equivalente módulo de corte ( $G$ ) y la equivalente relación de amortiguamiento viscoso, el cual se representa por bucles de tensión -deformación elípticos. Este proceso es repetido hasta que las propiedades compatibles con la deformación sean consistentes con las propiedades usadas para el análisis de respuesta dinámica (Nitish, Ashwani, Piyush, & Subhamoy, 2018).

#### 2.6.8.1.3. NO LINEAL

No linealidad del suelo es cuando el módulo de corte del suelo cambia constantemente, esto quiere decir que, en ciclos de carga y descarga, el suelo no se descarga por el mismo camino que se carga, disipando energía en los puntos de contactos de las partículas (Hashash Y., y otros, 2020).

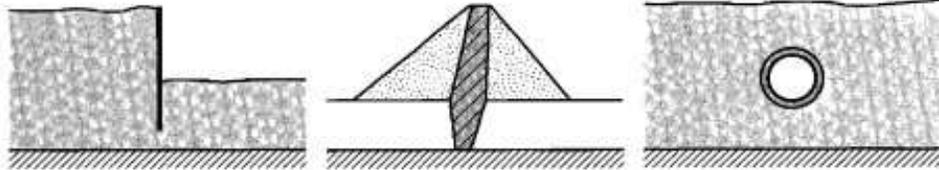
#### 2.6.8.2. ANÁLISIS DE SITIO 2D

Los métodos de análisis en 1D son limitantes para sitios con pendientes leves o nulas y límites de estratos paralelos, estas condiciones no son las reales puesto que las superficies de terreno son inclinadas e irregulares con presencia de diversas

estructuras, para estos casos se necesita un análisis bidimensional, para lo cual tenemos los siguientes métodos:

- Análisis dinámico de elementos finitos
- Análisis lineal equivalente
- Análisis no lineal
- Enfoque de viga de corte
- Viga de corte inelástica en capas

(Kramer, 1996)



**FIGURA 38** Ejemplos típicos cuando es necesario un análisis de sitios en 2D.

FUENTE: (Kramer, 1996)

### 2.6.8.3. ANÁLISIS DE SITIO EN 3D

Se utilizan cuando existe una importante variación en el tercer eje  $p$  cuando se necesita un análisis completo de cuencas, se los trata de la misma manera que en la resolución de problemas bidimensionales, toca hacer énfasis en los problemas de interacción suelo – estructura (Kramer, 1996).

## 2.6.9. TIPOS DE ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO

### 2.6.9.1. GEOTÉCNICOS

- Modelación de columnas de suelo, mediante propiedades geotécnicas con proceso de convolución o deconvolución.

Este método se está usando en la presente tesis.

### 2.6.9.2. GEOFÍSICOS O SISMOLÓGICOS

- Las relaciones espectrales tradicionales.
- Relaciones espectrales mHVSR ruido de fondo.
- Relaciones espectrales eHVSR – sismos (o funciones receptoras).

(Guéguen, 1997)

### 3. CAPÍTULO III: METODOLOGIA Y DESARROLLO

En el presente capítulo se describirá el proceso metodológico que se siguió para realizar el análisis de sitio con datos reales de 3 pozos ubicados en la cuenca sur de Quito. Se describen los siguientes procesos: adquisición de datos, modelamiento de las columnas de suelo.

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

La ciudad de Quito se encuentra ubicada en el valle interandino, entre las laderas de las cordilleras Occidental y Real (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020).

##### 3.1.1. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA QUIB

La estación acelerográfica QUIB está ubicada en la parte sur de la ciudad de Quito, en la parroquia de Quitumbe. El equipo instalado es: “CMG-5T Triaxial Accelerometer”.

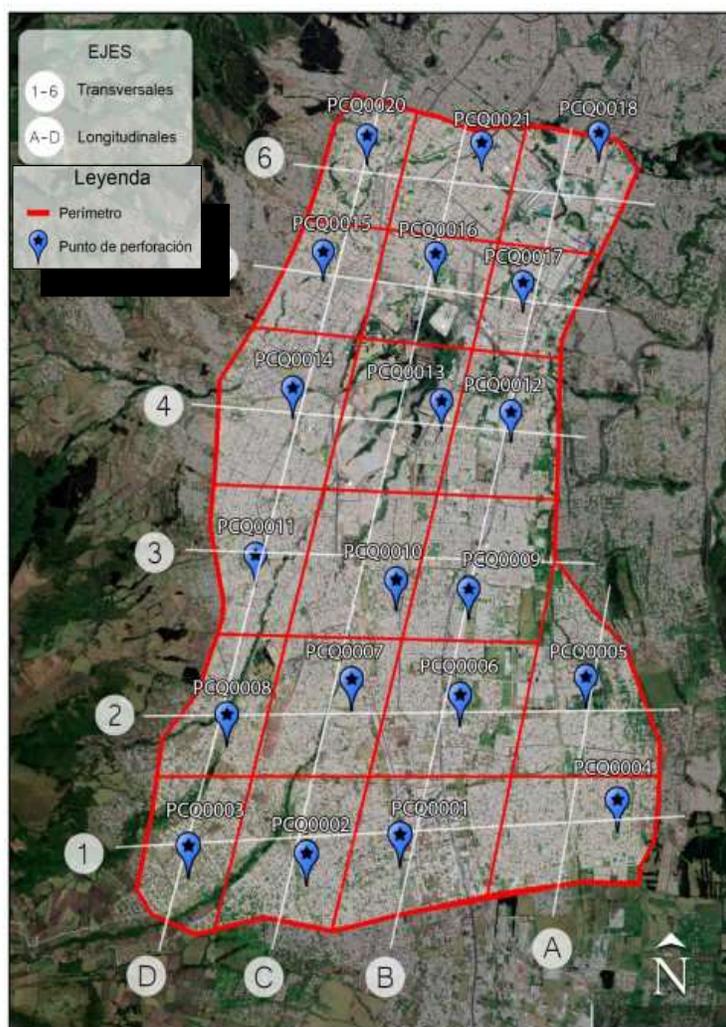


**FIGURA 39** Equipo CMG-5T Triaxial Accelerometer. Ubicado en la estación QUIB.

FUENTE: (GURALP SYSTEMS, 2009).

### 3.1.2. UBICACIÓN DE LOS POZOS DE ANÁLISIS

Se estudiarán los pozos ubicados en el perfil transversal número 4, que se encuentran en la parte central de la zona sur de la ciudad de Quito (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020).



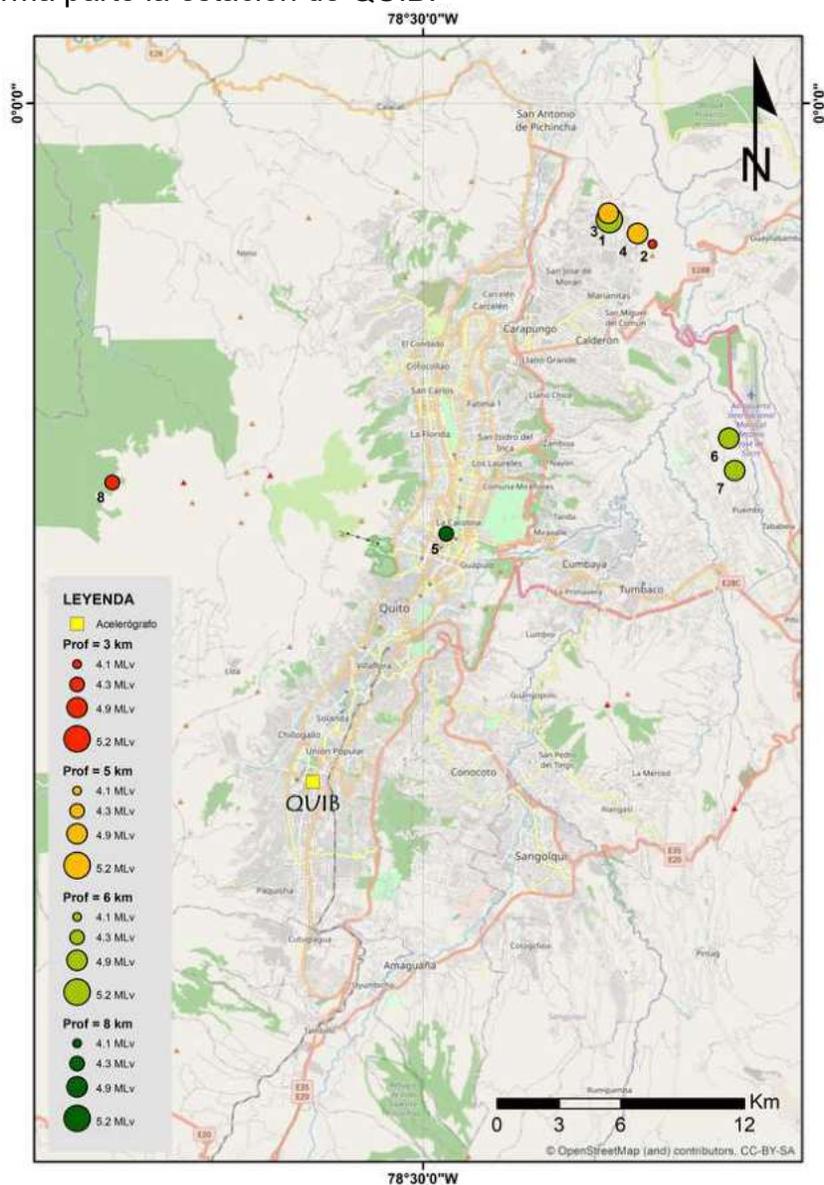
**FIGURA 40** Ejes transversales y longitudinales de los pozos de perforación del proyecto “ACTUALIZACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE QUITO – PRIMERA FASE”

FUENTE: Modificado: (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020)

## 3.2. RECOPIACION DE DATOS

### 3.2.1. SEÑALES SÍSMICAS

Las señales sísmicas fueron proporcionadas por el “Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional”, quién mantiene la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC), de la cual forma parte la estación de QUIB.



**FIGURA 41** Sismos corticales en la cercanía de Quito periodo 2012-2018.

FUENTE: (Instituto Geofísico,2022)

Los sismos que se muestran en la figura 41, fueron seleccionados por las siguientes características: sismos corticales que tenían una magnitud (MLv) superior a 3.7 y un PGA superior a  $1 \text{ cm/s}^2$ , dando como resultado 8 registros sísmicos.

Evento	Código	Magnitud (MLv)	Prof. (km)	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	PGD (cm)
1	igepn2014psys	5.2	6	6.38	0.61	0.19
2	igepn2014psyv	4.1	3	1.57	0.05	0.01
3	igepn2014pzxe	4.6	5	3.83	0.23	0.05
4	igepn2014qbj	4.9	5	1.37	0.10	0.02
5	igepn2016fgfa	4.3	8	4.12	0.11	0.01
6	igepn2016pocw	4.7	6	12.75	0.57	0.06
7	igepn2016rldl	4.7	6	15.70	0.91	0.10
8	igepn2018gmes	4.2	3	4.81	0.33	0.24

**Tabla 3** Sismos escogidos para el análisis; Características generales.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Evento	Hora universal del evento sísmico hh:mm:ss	Hora universal llegada onda S hh:mm:ss.s	Tiempo de viaje onda S ss.ss	Tiempo S-P ss.ss	Hora universal inicio Coda hh:mm:ss.s
1	19:57:58	19:58:09:5	11.58	4.80	19:58:21:1
2	20:02:21	20:02:32:4	11.40	4.75	20:02:43:8
3	15:08:21	15:08:36:8	15.87	4.60	15:08:52:7
4	16:30:30	16:30:40:7	10.78	7.90	16:30:51:5
5	13:02:09	13:02:17:0	8.02	3.05	13:02:25:0
6	4:23:35	4:23:45:1	10.18	4.25	4:23:55:2
7	0:22:57	0:23:08:2	11.22	7.90	0:23:19:4
8	1:15:22	1:15:30:7	8.71	7.50	1:15:39:4

**Tabla 4** Sismos escogidos para el análisis; Horas universales.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Se tuvo las siguientes consideraciones:

- Se escogió para el análisis la componente vertical y la componente horizontal con mayor PGA.
- Se trabajó únicamente con la sección de registro sísmico de las ondas S más las ondas de la coda sísmica.

Las señales se encuentran en el anexo 5.

### 3.2.2. DATOS GEOTÉCNICOS

Se obtuvo la clasificación geotécnica y litológica de los 3 pozos (PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014), del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1, que se llevó a cabo por el laboratorio de suelos de la “Pontificia Universidad Católica del Ecuador” y el “Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional” (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020).

Las propiedades dinámicas tabuladas son: peso específico, velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), N60 (Ensayo SPT), curvas granulométricas, índice de plasticidad, esfuerzo de preconsolidación.

Se obtuvo además los siguientes materiales que conforman los perfiles estratigráficos de los 3 pozos:

- Suelo: “Se dice a los suelos que contienen materia orgánica y raíces o restos de ellas, incluyendo el Andisol (suelo andino), depósitos lacustres y palustres. El tamaño de grano varía desde limo hasta arena media y sus colores están en rangos negros a grises oscuros con tonalidades cafés” (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020).
- Cangahua: “Contiene material volcánico de color caqui a anaranjado; generalmente se encuentra bien compactado. Contiene fragmentos de pómez de tamaño variado. El tamaño del grano varía desde limo a arena gruesa. En

general es una mezcla entre limo y arena de diferente grosor” (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020).

- Palustres: explicados en el capítulo 2.2.3.2
- Aluviales: explicados en el capítulo 2.2.3.2

### 3.3. MODELAMIENTO

#### 3.3.1. COLUMNA DE SUELO

##### 3.3.1.1. DATOS CALCULADOS

Se procedió a normalizar estos datos, mediante su clasificación litológica y separarlos en 2 grandes grupos: suelos finos y gruesos, mediante la clasificación ASSTHO.

Además, se dividió el material cangahua en 2 grupos:

- Cangahua fina: cangahua donde predomina material fino.
- Cangahua gruesa: cangahua donde predomina material grueso.

##### 3.3.1.1.1. SUELOS FINOS

Para el modelamiento de suelos finos se necesitó las propiedades de: peso específico, velocidad de onda de corte, índice de plasticidad y esfuerzo de preconsolidación, normalizados a la clasificación litológica. Se calculó: el esfuerzo vertical efectivo, el coeficiente de presión lateral de tierra ( $K_0$ ), el grado de sobreconsolidación (OCR) y el ángulo de fricción mediante correlaciones con el ensayo SPT, teniendo las siguientes tablas resúmenes por pozo, las tablas completas se encuentran en el anexo 1.

Espesor	Clasificación litológica	Peso **	Vs **	índice *	OCR***	Ko***
(m)		Específico	(m/s)	plasticidad		
		(kN/m3)		(%)	-	-
1.5	Suelo	15.15	250	39	5.740	1.191
4.5	Palustre	14.49	310	42	2.356	0.788

\* Datos obtenidos del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1

\*\* Datos normalizados para su respectivo análisis

\*\*\* Datos calculados mediante formulación correspondiente

**Tabla 5** Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos finos pozo PCQ0012.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Espesor	Clasificación litológica	Peso **	Vs *	Índice **	OCR***	Ko***
(m)		Específico	(m/s)	plasticidad		
		(kN/m3)		(%)	-	-
3	Suelo	13.54	145	17	10.810	1.627
5	Cangahua fina	13.54	400	9	21.596	2.582

\* Datos obtenidos del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1

\*\* Datos normalizados para su respectivo análisis

\*\*\* Datos calculados mediante formulación correspondiente

**Tabla 6** Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos finos pozo PCQ0013.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

En el pozo PCQ0013, no existen ensayos de esfuerzo de preconsolidación, por ende, se calculó el OCR con correlaciones con el ensayo SPT.

Espesor	Clasificación litológica	Peso **	Vs **	índice *	OCR***	Ko***
(m)		Específico	(m/s)	plasticidad		
		(kN/m3)		(%)	-	-
2.3	Suelo	17.76	160	11	7.295	1.350
11.7	Cangahua fina	17.27	500	8	1.848	0.613

**Tabla 7** Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos finos pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 3.3.1.1.2. SUELOS GRUESOS

Para el modelamiento de suelos gruesos se necesitó las propiedades de: peso específico, velocidad de onda de corte, coeficiente de uniformidad y D50 normalizados a la clasificación litológica. Se calculo: el coeficiente de presión lateral de tierra ( $K_0$ ), el corte máximo ( $\tau_{max}$ ) y el ángulo de fricción mediante correlaciones con el ensayo SPT, teniendo las siguientes tablas resúmenes por pozo, las tablas completas se encuentran en el anexo 1.

Espesor	Clasificación litológica	Peso ** Específico	Vs **	Coeficiente de ** uniformidad	D50 **	Ko***	$\tau_{max}$ ***
(m)		(kN/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(%)	-	-	-
-	Cangahua y Aluviales	16.11	600	-	-	-	-

\* Datos obtenidos del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1

\*\* Datos normalizados para su respectivo análisis

\*\*\* Datos calculados mediante formulación correspondiente

**Tabla 8** Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos gruesos pozo PCQ0012.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Espesor	Clasificación litológica	Peso ** Específico	Vs **	Coeficiente de ** uniformidad	D50 **	Ko***	$\tau_{max}$ ***
(m)		(kN/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(%)	-	-	-
-	Cangahua gruesa y Aluviales	15.71	550	-	-	-	-

\* Datos obtenidos del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1

\*\* Datos normalizados para su respectivo análisis

\*\*\* Datos calculados mediante formulación correspondiente

**Tabla 9** Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos gruesos pozo PCQ0013.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Espesor	Clasificación litológica	Peso ** Específico	Vs **	Coeficiente de ** uniformidad	D50 **	Ko***	$\tau_{max}$ ***
(m)		(kN/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(%)	-	-	-
-	Cangahua Gruesa y Aluviales	17.66	620	-	-	-	-

\* Datos obtenidos del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1

\*\* Datos normalizados para su respectivo análisis

\*\*\* Datos calculados mediante formulación correspondiente

**Tabla 10** Perfil estratigráfico, litológico y datos geotécnicos para suelos gruesos pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

A partir de estos datos se calcularán las siguientes gráficas por cada estrato de suelo:

- Curvas de amortiguamiento.
- Curvas del módulo de degradación.
- Curva esfuerzo – deformación cortante.

Las cuales se podrán ver en el anexo 2.

### 3.3.1.2. SEÑALES SÍSMICAS

Para la correcta lectura de la señal sísmica en el respectivo software se realizó la corrección de línea base mediante la función existente en el programa Deepsoil. Este programa usa una adaptación de la rutina de corrección de línea base incluido en el programa BAP (basic strong-motion accelerogram) de procesamiento de movimientos (USGS Open File Report 92-296A), la cual sigue los siguientes parámetros:

- Cortar ambos extremos de movimiento, utilizando el primer y último cruce como límites.
- Rellenar el movimiento con ceros en ambos extremos.

- Se procesa el movimiento con un filtro “high-pass” con una frecuencia de corte de 0.1 Hz a partir de la opción “Butterworth” con convolución en ambas direcciones en el dominio del tiempo.
- Corta el nuevo movimiento usando como límite el último cruce por cero (Hashash Y., y otros, 2020).

### 3.3.2. MODELAMIENTO SÍSMICO DE LA COLUMNA DE SUELO

#### 3.3.2.1. PARÁMETROS DE ANALISIS

##### 3.3.2.1.1. ANÁLISIS LINEAL

- El amortiguamiento de todos los estratos y del basamento elástico será cero, por lo expuesto en la figura 12.

##### 3.3.2.1.2. ANÁLISIS LINEAL EQUIVALENTE

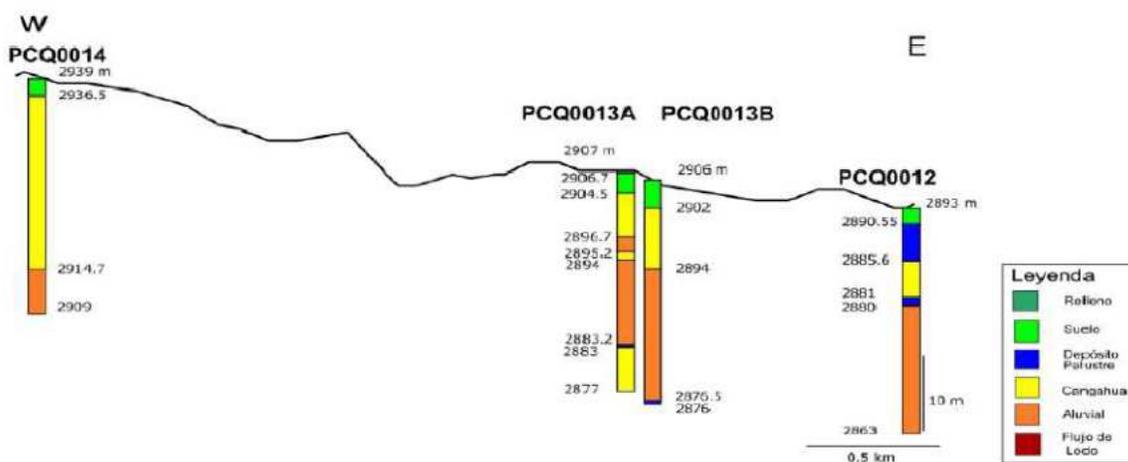
- Para el programa Deepsoil se procederá a utilizar el modelo GQ/H ajustado con el modelo de (Darendeli, 2001) para suelos finos.
- Para el programa Deepsoil se procederá a utilizar el modelo MKZ ajustado con el modelo de (Menq, 2003) para suelos gruesos.
- Para el programa Proshake se procederá a utilizar el modelo de (Darendeli, 2001) para suelos finos.
- Para el programa Proshake se procederá a utilizar el modelo de (Menq, 2003) para suelos gruesos.
- El amortiguamiento del basamento rocoso será cero.

### 3.4. FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA COLUMNA DE SUELO

#### 3.4.1. DECONVOLUCIÓN Y CONVOLUCIÓN SÍSMICA

Los pozos (PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014), comparten un sustrato entre ellos, que viene a ser la base de los sedimentos más recientes, además se encuentran a una

distancia menor a 2 kilómetros uno del otro, por lo que, la incidencia del rayo sísmico se puede considerar igual en los 3 pozos.



**FIGURA 42** Perfil litológicos de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014.

FUENTE: (IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito, 2020).

Se procedió a realizar la deconvolución sísmica de los 8 eventos escogidos para el pozo PCQ0013, tanto en su componente horizontal como vertical, generando señales sintéticas en la base de los sedimentos superficiales, con las cuales se procedió a realizar la convolución sísmica para los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014.

Este proceso se lo realizó mediante los softwares descritos a continuación:

Para un mejor entendimiento de los softwares se deja un glosario de términos utilizados por los mismos en el anexo 3.

#### 3.4.1.1. PROSHAKE

El programa Proshake es una herramienta la cual nos permite realizar análisis de respuesta de suelo unidimensional, tanto de la forma lineal y lineal equivalente, el

programa incluye curvas de degradación precargadas al igual que acelerogramas tipo (EduPro Civil Systems, Inc., 2017).

Este programa cuenta con una limitación en su versión estudiantil (gratuita), la cual solo permite trabajar con los sismos precargados del programa, evitando que cargue nuevos sismos, para desbloquear tal opción se tendría que comprar la licencia pago del programa.

El programa trabaja con varios modelos de suelos los cuales están descritos en el anexo 4.

#### 3.4.1.1.1. ANÁLISIS POR EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

El programa únicamente nos permite analizar en el dominio de la frecuencia, para lo cual nos pide los siguientes requerimientos:

- Deformación de corte efectiva

“Es la relación entre la deformación efectiva y la deformación máxima” la cual está establecida en 0.65 por defecto y es el valor recomendado.

- Tolerancia de error

Es la diferencia máxima en porcentaje entre el módulo de corte y la relación de amortiguamiento, tolerancias más bajas darán resultados más precisos, pero se necesitará un mayor número de interacciones se establece en 1% por defecto y es el valor recomendado.

- Máximas interacciones

Número máximo de interacción que se permiten hasta realizar la convergencia, una vez realizada la convergencia el programa se detiene, en caso de no llegar a converger y llega al número máximo, de igual manera el programa se detiene, este valor se establece como 50 por defecto y es el valor recomendado.

- Números de los términos de la serie de Fourier

Es el parámetro de cuantos números se utilizará para representar la serie de Fourier para el movimiento de entrada, por defecto se establece que será la siguiente potencia de 2 sobre el número de valores de aceleración del movimiento de entrada, si se desea una zona silenciosa más grande, se debe aumentar este valor.

- Frecuencia de corte

Es la mayor frecuencia que se considerara en el análisis, siendo por defecto la frecuencia Nyquist.

- PGA

Este campo será cambiado cuando se desee escalar el movimiento, este valor se utilizará como un factor de escala que afectará a todo el movimiento.

- Pasos del tiempo

Este valor se puede cambiar cuando se asume que el movimiento tiene un diferente valor, no se recomienda hacerlo puesto que afectará el contenido de frecuencia y duración del movimiento.

(EduPro Civil Systems, Inc., 2017).

#### 3.4.1.2. DEEPSOIL

Programa de licencia gratuita desarrollado en la “University of Illinois at Urbana-Champaign” desde el año 1998. Es una herramienta para el análisis de sitio, accesible tanto para estudiantes como profesionales, pasando por varias versiones hasta llegar la versión 7.0 (Hashash Y., y otros, 2020) la cual se utilizará en el presente trabajo de titulación.

El programa trabaja con varios modelos de suelos los cuales están descritos en el anexo 4.

#### 3.4.1.2.1. MÉTODOS DE AJUSTE DE MODELOS DE SUELO

Para los modelos GQ/H y MKZ los parámetros no siempre se los puede conseguir, el programa ofrece la opción de poder ajustar la curva mediante otra curva ya conocida, se definió utilizar el modelo de (Darendeli, 2001) para los suelos con clasificación fina y el modelo (Menq, 2003) para los suelos con clasificación gruesa.

#### 3.4.1.2.2. ANÁLISIS POR EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

El programa nos permite analizar en el dominio del tiempo y la frecuencia, en el presente trabajo de titulación únicamente se analizó por el dominio de la frecuencia, para lo cual nos pide los siguientes requerimientos:

- Número de interacciones

Únicamente para el análisis lineal equivalente, es el número de interacciones a realizar para que converja en una única solución, se debe verificar si este número es el adecuado en los resultados (Hashash Y., y otros, 2020).

- Deformación de corte efectiva

Se la define como: “un porcentaje de la deformación máxima”, para poder obtener nuevas estimaciones del módulo de corte y la relación de amortiguamiento, se aconseja un valor de 0.65 (65%), también se puede calcular utilizando la magnitud del terremoto con la siguiente ecuación:

$$SSR = \frac{M - 1}{10} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde

$M =$  es la magnitud del terremoto

$SRR =$  Deformación de corte efectiva

(Hashash Y., y otros, 2020)

- Formulación de módulo de corte

Se puede elegir entre 3 diferentes formulaciones que son:

- Independiente de la frecuencia (Kramer, 1996)

Da como resultado un amortiguamiento independiente de la frecuencia, es el recomendado para el análisis tanto por el programa Deepsoil y SHAKE91

$$G^* = G(1 + i2\lambda) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

- Dependiente de la frecuencia (Udaka, 1975)

Da como resultado un amortiguamiento dependiente de la frecuencia, su utilización debe realizarse bajo precaución

$$G^* = G(1 - \lambda^2 + i2\lambda\sqrt{1 - \lambda^2}) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

- Simplificado (Kramer, 1996)

Forma simplificada del análisis independiente de la frecuencia

$$G^* = G(1 - \lambda^2 + i2\lambda) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

### 3.4.2. ANÁLISIS DE SEÑALES EN SUPERFICIE Y BASAMENTO ELÁSTICO

Para la obtención de la función de transferencias es necesario obtener las densidades espectrales (PSD) las cuales se obtuvieron mediante el software Matlab, para lo cual se utilizaron las siguientes ventanas de datos de 20 segundos, traslape de 50%, número de datos 8192 y frecuencia de toma de muestras 100 muestras por segundo.

Se procedió a suavizar las curvas de densidad espectral mediante la función smooth de Matlab y realizar la división espectral de las densidades suavizadas, entre las densidades espectrales de sitio vs. las densidades espectrales de referencia, obteniendo de esta manera la función de transferencia.

Este proceso se realizó con la señal deconvolucionada en el pozo PCQ0013, de los 8 eventos sísmicos con su componente en vertical y horizontal con mayor PGA, con las señales convolucionadas de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014, por los métodos lineal y lineal equivalente.

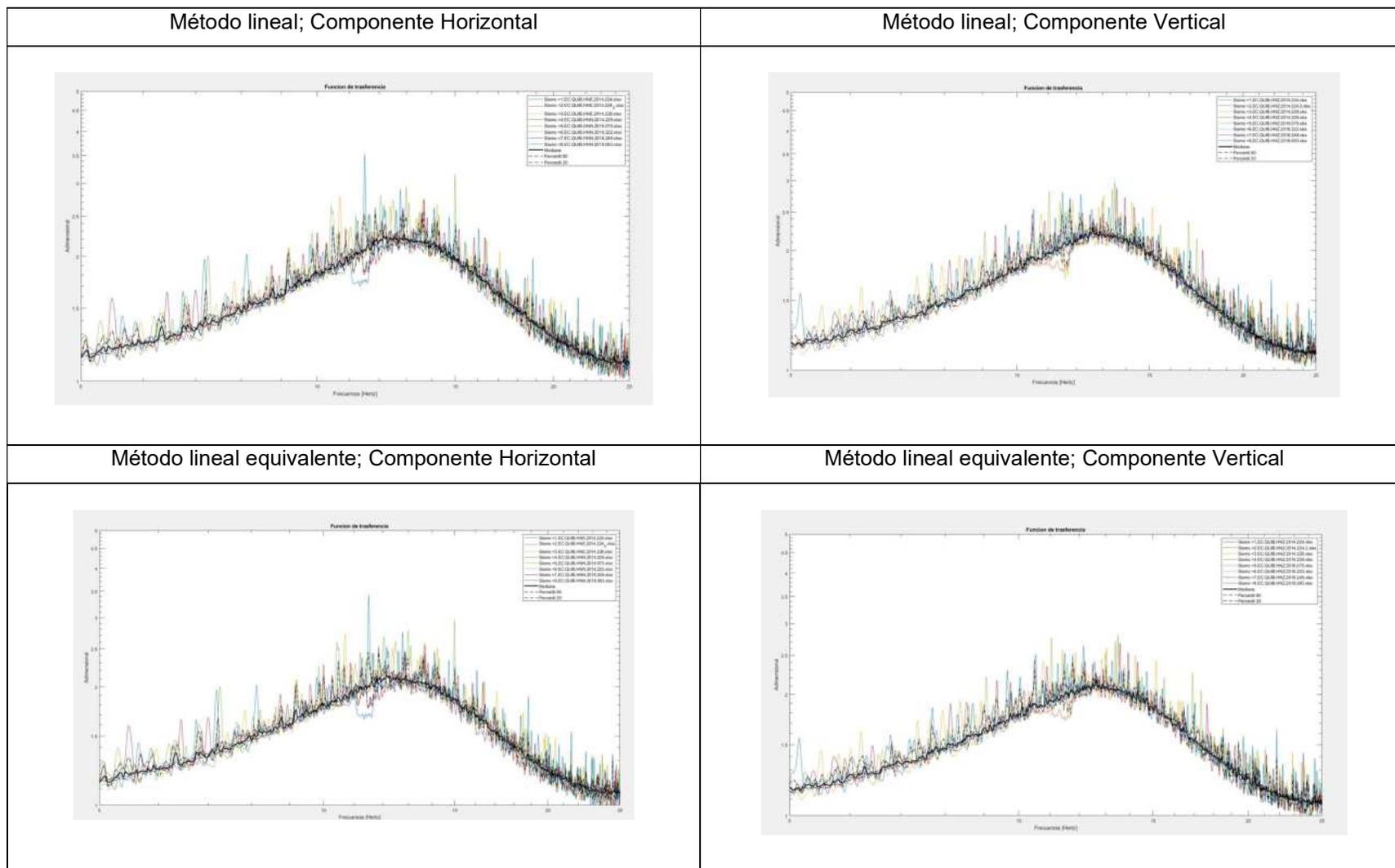
Las señales utilizadas al igual que las densidades espectrales y las funciones de transferencia se encuentran en el anexo 5.

## **4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS, ANÁLISIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En el pozo PCQ0013 procede a realizar la deconvolución sísmica, generando señales sintéticas en la base de los sedimentos superficiales, con las cuales se procedió a realizar la convolución sísmica para los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014. Con estas señales se obtienen la densidad espectral (PSD) de las mismas, posteriormente se realiza la división espectral entre las densidades espectrales de sitios vs. las densidades espectrales de referencia obteniendo de esta manera las funciones de transferencia.

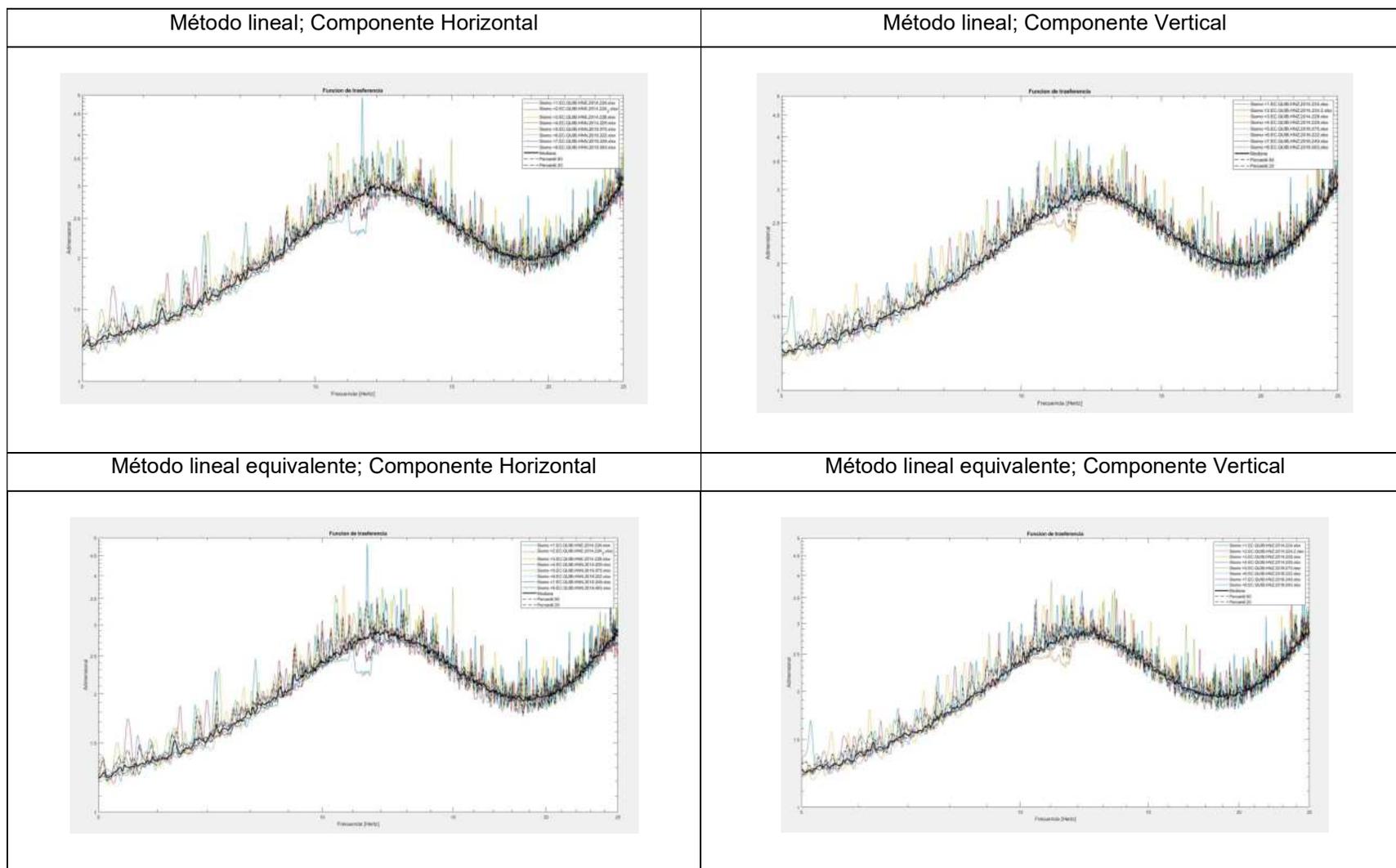
A continuación, se presentan las funciones de transferencia encontradas en los 3 pozos, por los métodos lineal y lineal equivalente con las componentes horizontal y vertical.

### **4.1. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA**

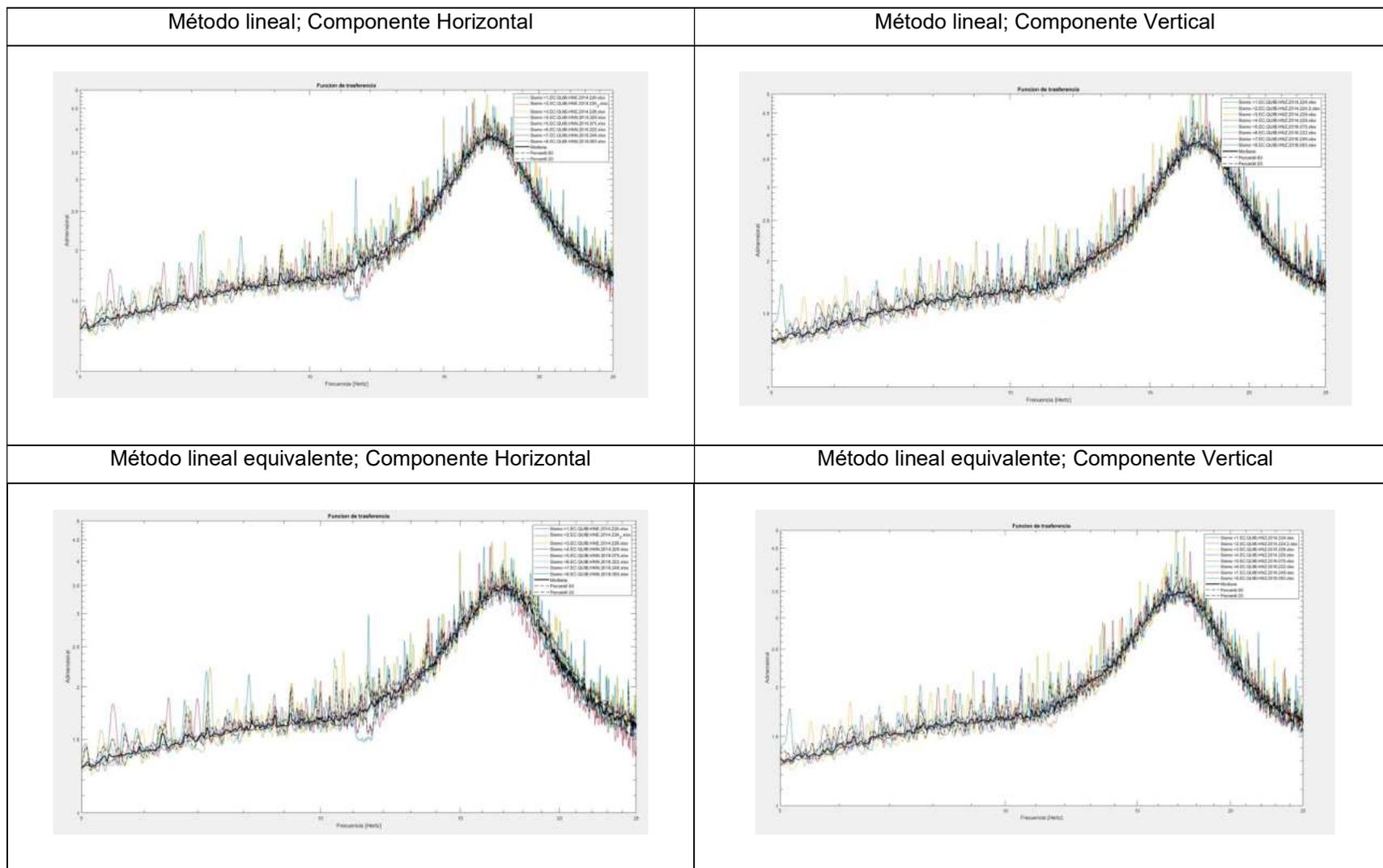


**FIGURA 43** Funciones de trasferencia de 8 eventos sísmicos, diferentes componentes, con su mediana y percentiles al 20 y 80 por ciento; diferentes métodos; Pozo PCQ0012.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 44** Funciones de transferencia de 8 eventos sísmicos, diferentes componentes, con su mediana y percentiles al 20 y 80 por ciento; diferentes métodos; Pozo PCQ0013.  
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 45** Funciones de transferencia de 8 eventos sísmicos, diferentes componentes, con su mediana y percentiles al 20 y 80 por ciento; diferentes métodos; Pozo PCQ0014.

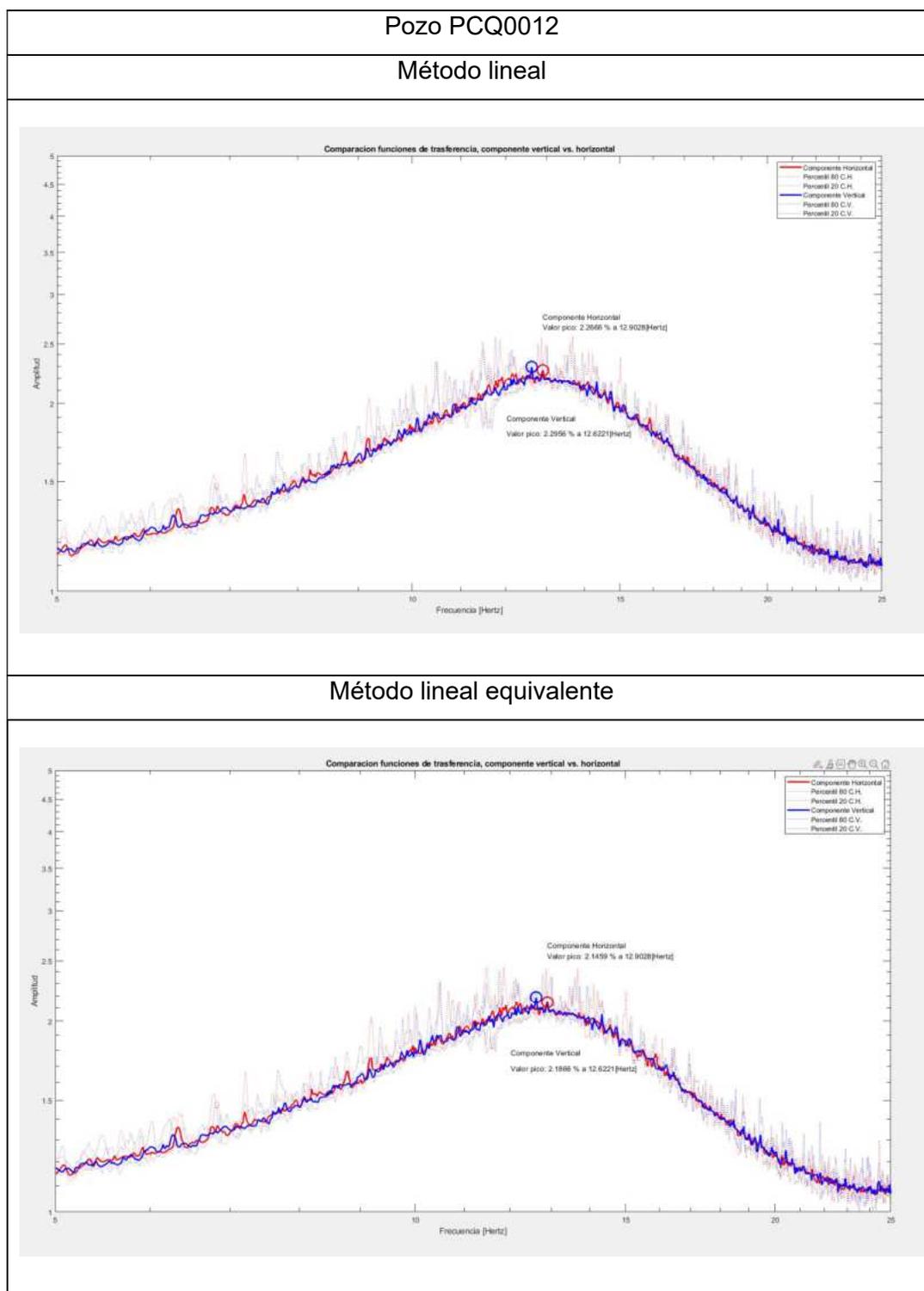
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 4.2. ANÁLISIS

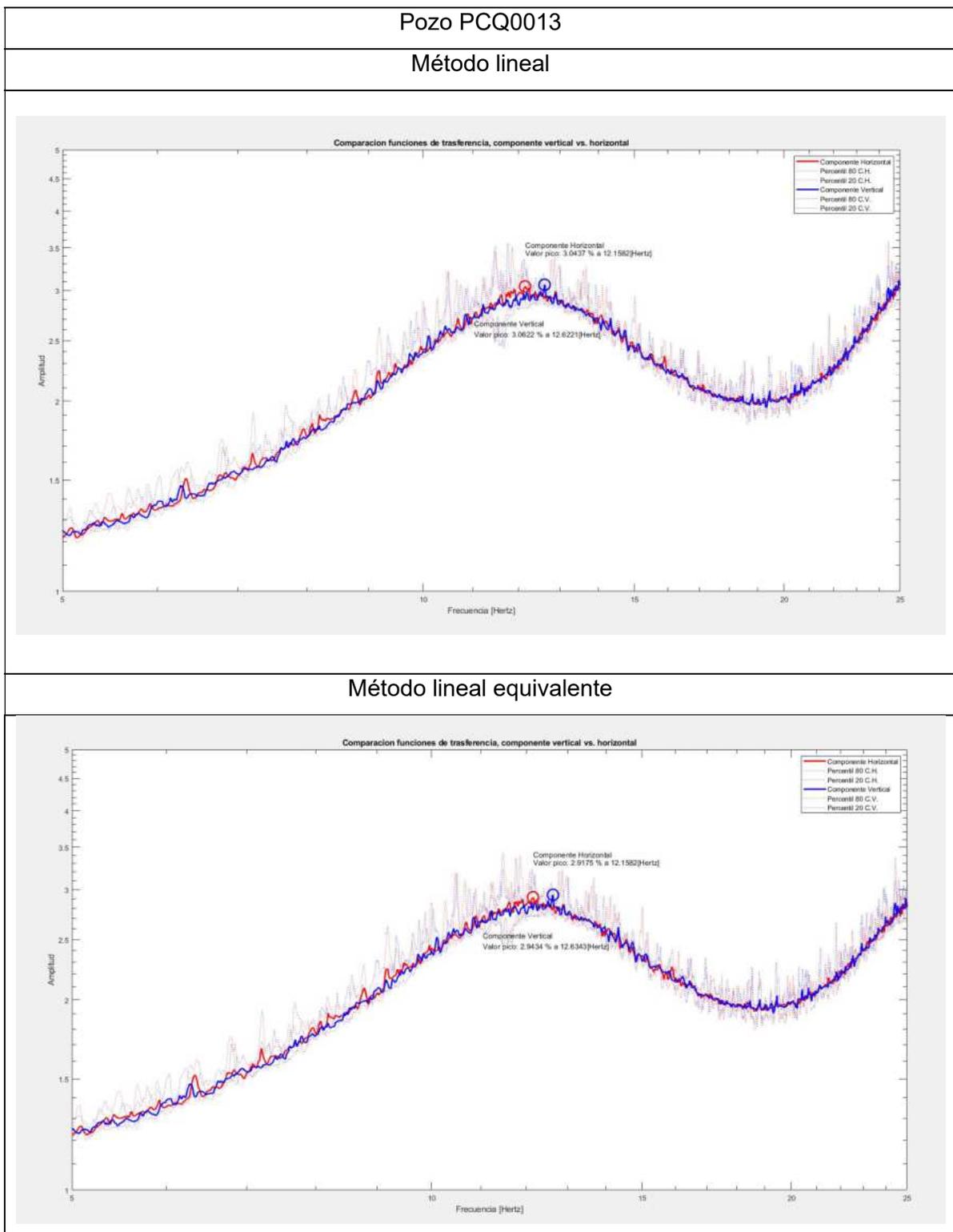
A continuación, se presentan el análisis realizado entre las 12 funciones de transferencias obtenidas del proceso de convolución del pozo PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014, se comparará de la siguiente manera:

- Por componente vertical y horizontal
- Por método lineal y lineal equivalente
- Entre pozos

## 4.2.1. COMPARACIÓN ENTRE COMPONENTES

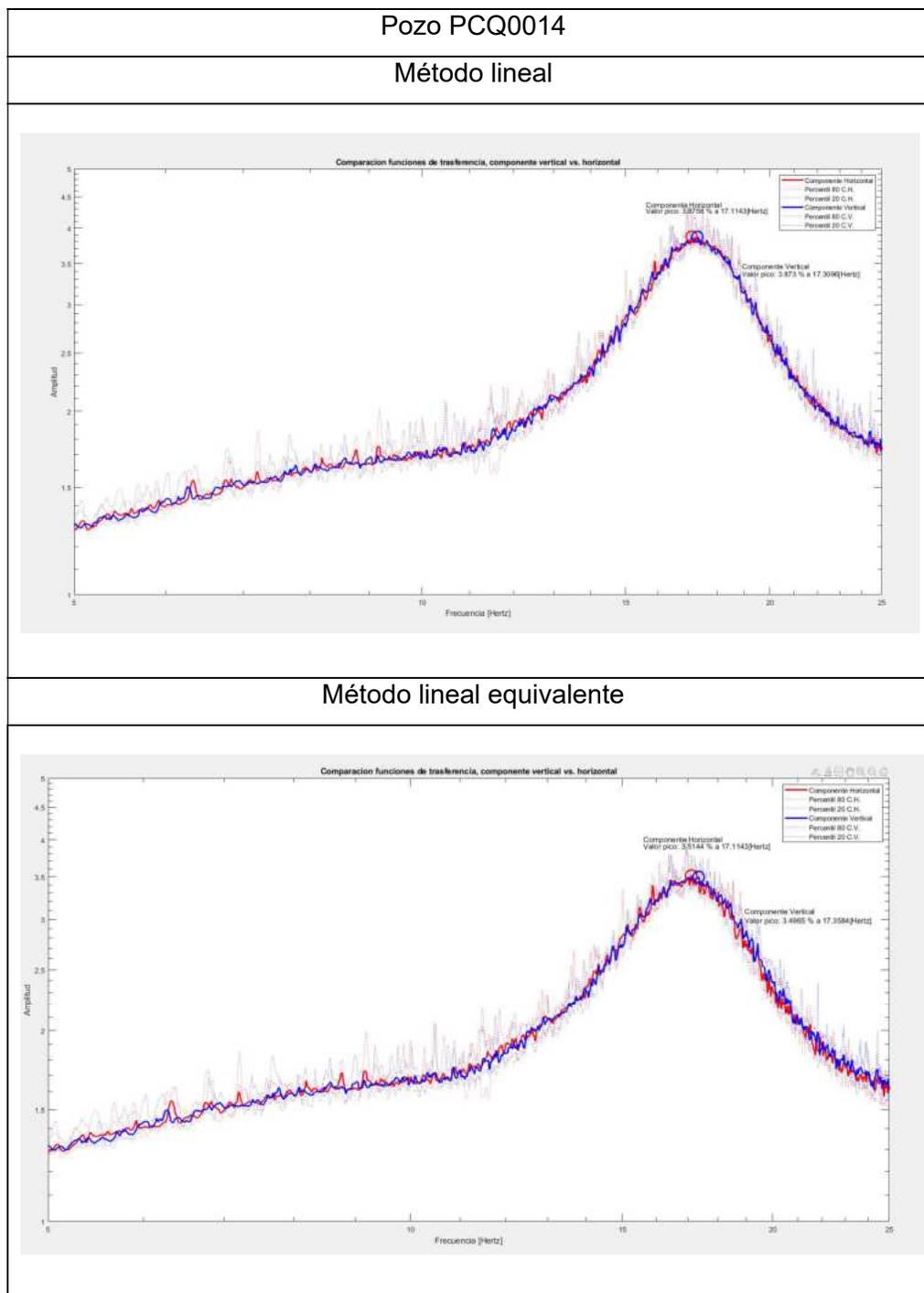


**FIGURA 46** Comparación de las funciones de trasferencias obtenidas para el pozo PCQ0012 entre la componente vertical y horizontal por el método lineal y lineal equivalente  
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 47** Comparación de las funciones de transferencias obtenidas para el pozo PCQ0013 entre la componente vertical y horizontal por el método lineal y lineal equivalente.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 48** Comparación de las funciones de transferencias obtenidas para el pozo PCQ0014 entre la componente vertical y horizontal por el método lineal y lineal equivalente.  
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 4.2.1.1. TABLA COMPARATIVA

Se presenta la siguiente tabla la cual se compara el desfase relativo entre las componentes horizontal y vertical:

Función de transferencia					Desfase relativo entre componentes		Promedio	
Pozo	Método	Componente	Amplificación	Frecuencia	Amplificación	Frecuencias	Amplificación	Frecuencias
12	Lineal	Horizontal	2.2666	12.9028	1.26%	-2.22%	1.56%	-2.22%
		Vertical	2.2956	12.6221				
	Lineal equivalente	Horizontal	2.1459	12.9028	1.86%	-2.22%		
		Vertical	2.1866	12.6221				
13	Lineal	Horizontal	3.0437	12.1582	0.60%	3.68%	0.74%	3.72%
		Vertical	3.0622	12.6221				
	Lineal equivalente	Horizontal	2.9175	12.1582	0.88%	3.77%		
		Vertical	2.9434	12.6343				
14	Lineal	Horizontal	3.8758	17.1143	-0.07%	1.13%	-0.29%	1.27%
		Vertical	3.873	17.3096				
	Lineal equivalente	Horizontal	3.5144	17.1143	-0.51%	1.41%		
		Vertical	3.4965	17.3584				

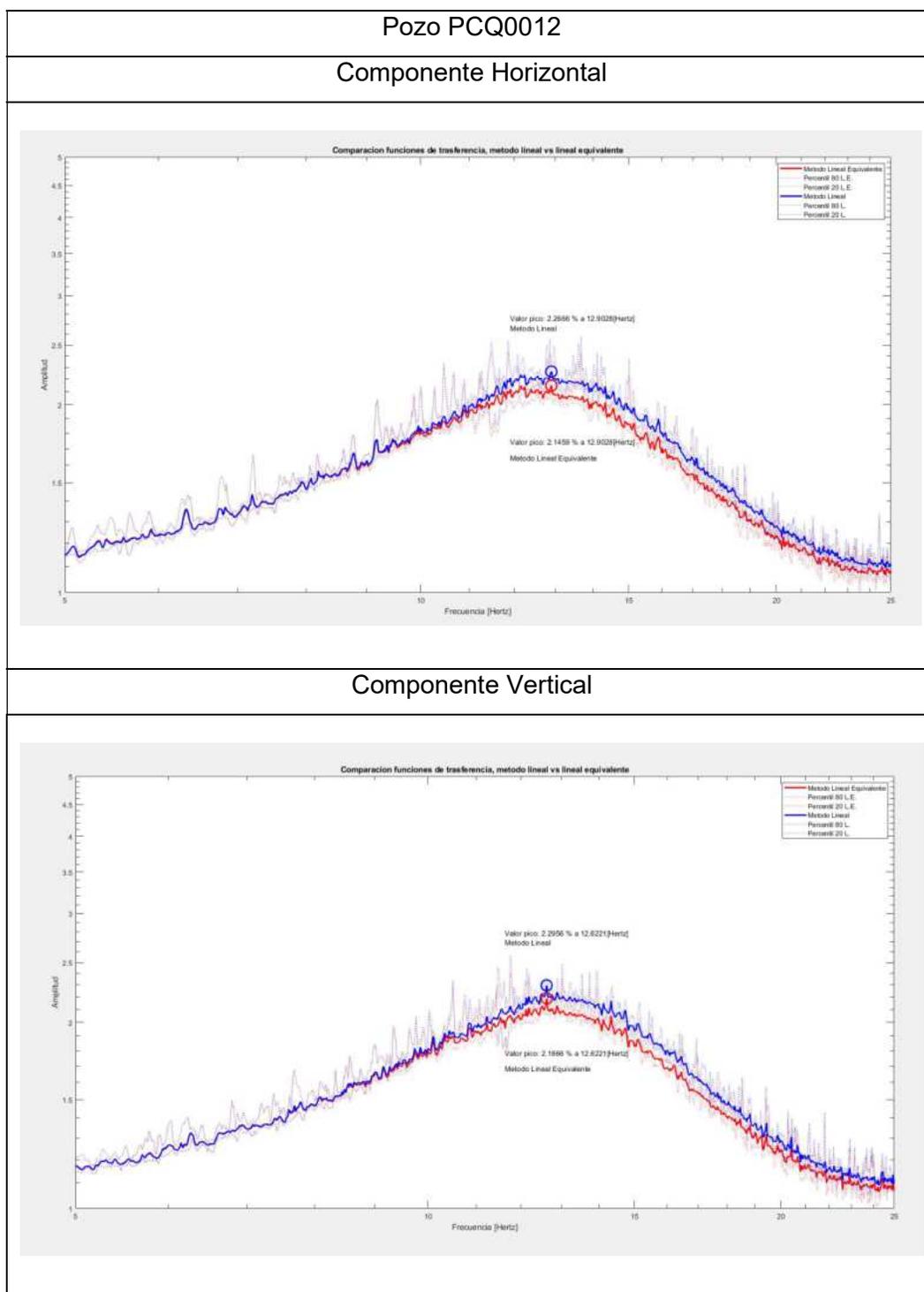
**Tabla 11** Desfase relativos entre componentes horizontal y vertical de las funciones de transferencias.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

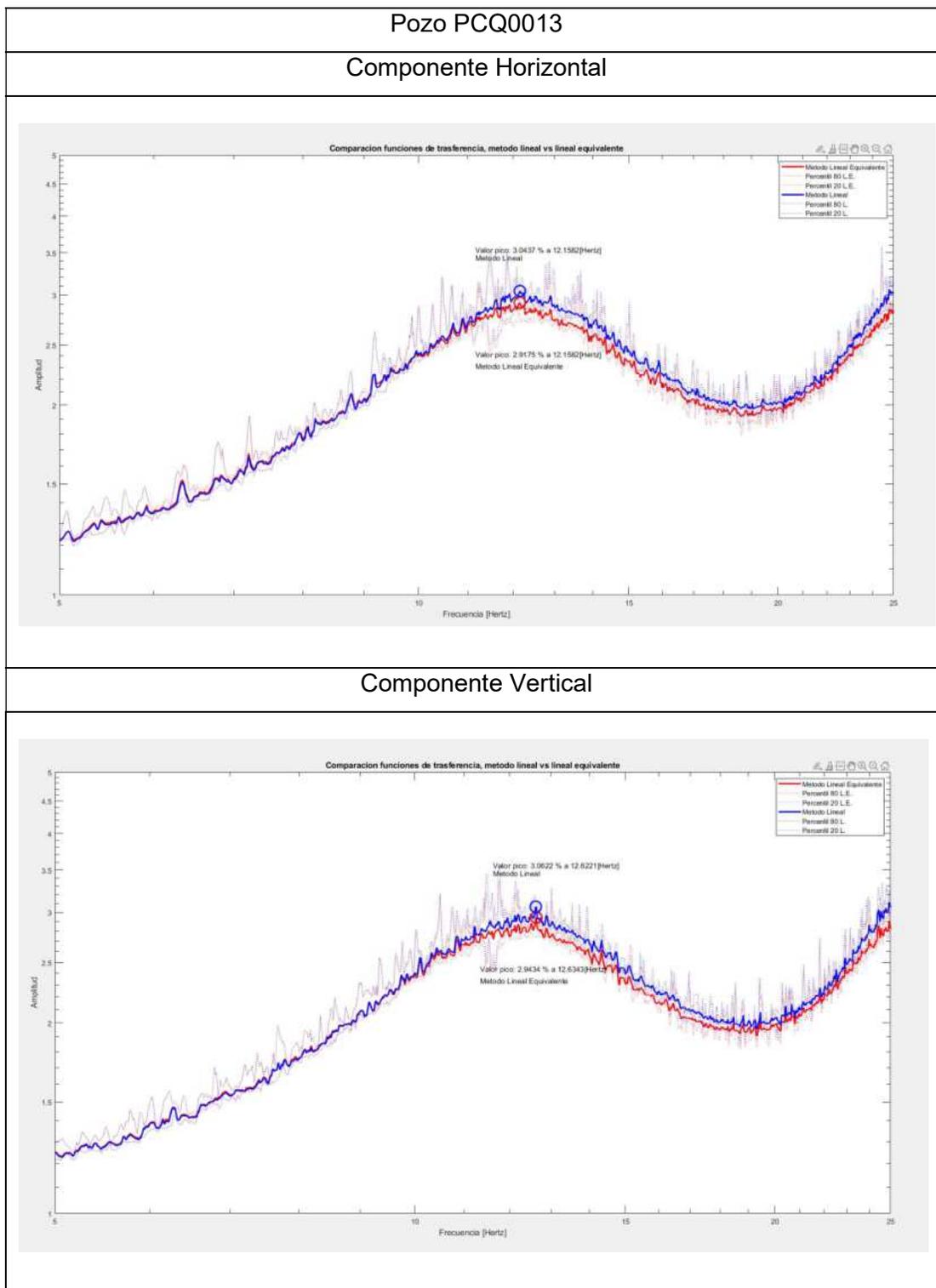
Como se describe en la tabla 11 los promedios del desfase relativo entre componentes son bajos en los 3 pozos, en el pozo PCQ0012 se puede notar un desfase mayor en amplificación que en los pozos PCQ0013 y PCQ0014 y en el pozo PCQ0013 se puede un desfase mayor en frecuencia que en los pozos PCQ0012 y PCQ0014, siendo estos valores máximos 1.56% y 3.72% respectivamente, por estas consideraciones se asume que no existe diferencia entre las funciones de transferencia de las componentes verticales y horizontales.

Además, podemos notar que el promedio del desfase relativo del pozo 12 entre método lineal y lineal equivalente es el mismo, esto se verá a mayor detalle en la comparación entre métodos.

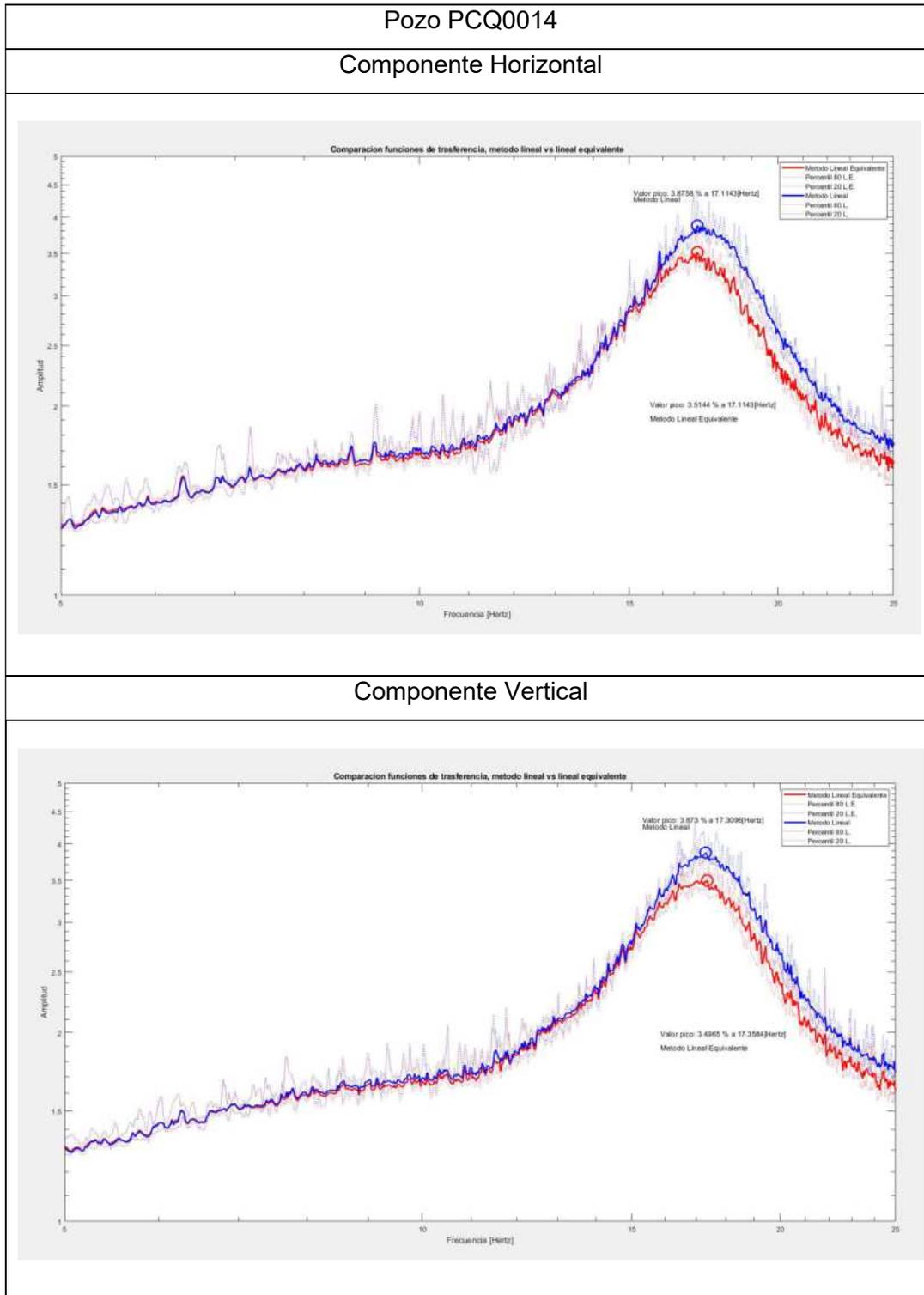
## 4.2.2. COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS



**FIGURA 49** Comparación de las funciones de trasferencias obtenidas para el pozo PCQ0012 entre el método lineal y lineal equivalente  
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 50** Comparación de las funciones de trasferencias obtenidas para el pozo PCQ0013 entre el método lineal y lineal equivalente  
 ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 51** Comparación de las funciones de trasferencias obtenidas para el pozo PCQ0014 entre el método lineal y lineal equivalente  
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 4.2.2.1. TABLA COMPARATIVA

Se presenta la siguiente tabla la cual se compara el desfase relativo entre los métodos lineal y lineal equivalente:

Función de transferencia					Desfase relativo entre métodos		Promedio	
Pozo	Método	Componente	Amplificación	Frecuencia	Amplificación	Frecuencias	Amplificación	Frecuencias
12	Lineal	Horizontal	2.2666	12.9028	-5.62%	0.00%	-5.30%	0.00%
	Lineal equivalente		2.1459	12.9028				
	Lineal	Vertical	2.2956	12.6221	-4.98%	0.00%		
	Lineal equivalente		2.1866	12.6221				
13	Lineal	Horizontal	3.0437	12.1582	-4.33%	0.00%	-4.18%	0.05%
	Lineal equivalente		2.9175	12.1582				
	Lineal	Vertical	3.0622	12.6221	-4.04%	0.10%		
	Lineal equivalente		2.9434	12.6343				
14	Lineal	Horizontal	3.8758	17.1143	-10.28%	0.00%	-10.53%	0.14%
	Lineal equivalente		3.5144	17.1143				
	Lineal	Vertical	3.873	17.3096	-10.77%	0.28%		
	Lineal equivalente		3.4965	17.3584				

**Tabla 12.** Desfase relativo entre métodos lineal y lineal equivalente de las funciones de transferencias.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Como se describe en la tabla 12 los promedios del desfase relativo entre métodos son significativos para amplificación pero nulos para frecuencias, se tiene que el pozo PCQ0014 tiene el mayor desfase relativo que los pozos PCQ0012 y PCQ0013, siendo este valor máximo del -10.53%, lo que nos dice que en el método lineal equivalente tenemos por tendencia una disminución de la amplificación, esto se debe a las curvas de degradación del amortiguamiento que presenta este método en la modelación de cada estrato de suelo a diferencia que el amortiguamiento del suelo en el método lineal es del 0%.

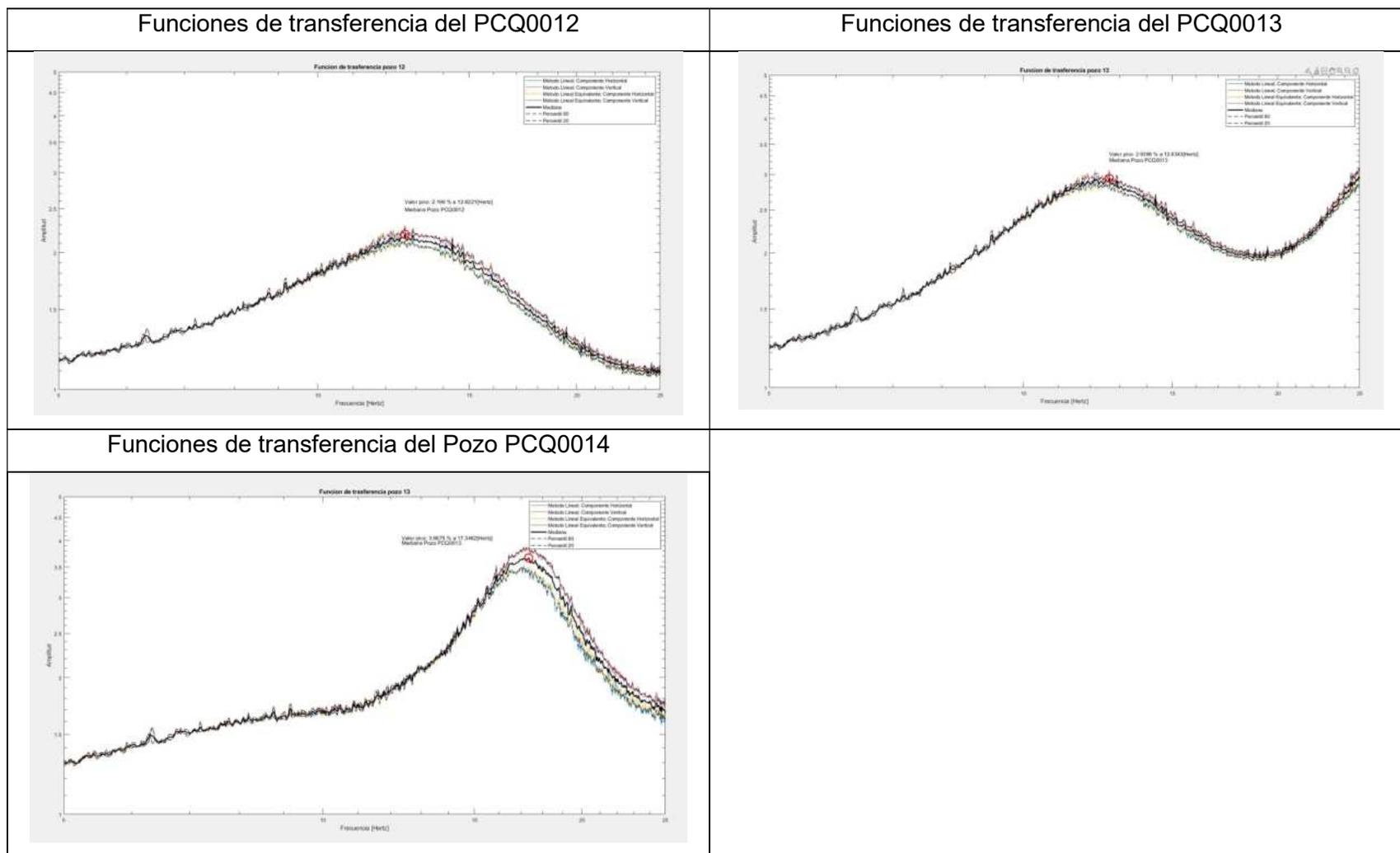
También se describe que la diferencia en frecuencias de todas las componentes horizontales en 0%, solo existiendo para las componentes verticales estos porcentajes de diferencia que son bajos que vuelve a tener en el pozo PCQ0014 el mayor porcentaje el cual es del 0.14%.

Además, se puede observar que tanto para la componente vertical y horizontal los picos de amplificación ocurren en la misma frecuencia por eso su desfase relativo es 0%.

#### 4.2.3. COMPARACIÓN ENTRE POZOS

A continuación, se procede a sacar una media de las funciones de transferencia de las componentes horizontales y verticales por los métodos lineal y lineal equivalente para cada pozo, teniendo una única función de transferencia por pozo.

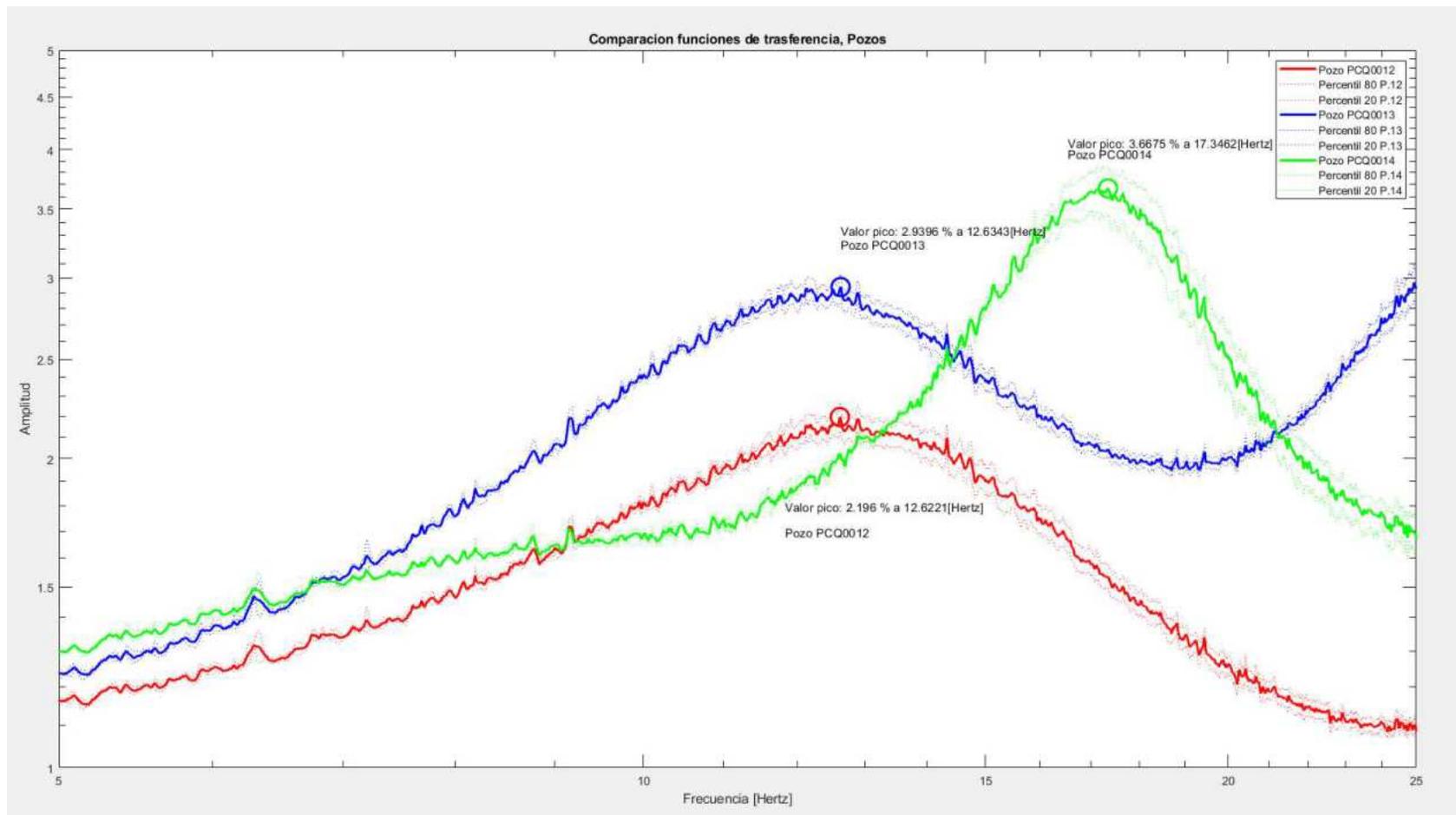
## 4.2.3.1. MEDIANAS DE LOS 3 POZOS



**FIGURA 52** Mediana de todos los métodos y componentes de los diferentes pozos  
 ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Se procederá a comparar las 3 medianas resultantes de comparar todas las funciones de transferencia de todos los métodos y componentes de los pozos: PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014, en un único gráfico, con sus respectivos percentiles, mostrado en la figura 53.

#### 4.2.3.2. COMPARACIÓN ENTRE LAS MEDIANAS DE LOS 3 POZOS



**FIGURA 53** Comparación de la mediana de las funciones de trasferencias de los 3 pozos.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 4.2.3.3. TABLAS COMPARATIVAS

Función de trasferencia		
Pozo	Amplificación	Frecuencia
12	2.1960	12.6221
13	2.9396	12.6343
14	3.6675	17.3462

**Tabla 13** Valores pico de amplificación de la mediana de las funciones de trasferencia de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014, con la frecuencia en donde se encuentran.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Funcion de trasferencia					Desfase relativo entre las diferentes funciones de trasferencia y la mediana		Promedio	
Pozo	Metodo	Componente	Amplificacion	Frecuencia	Amplificacion	Frecuencia	Amplificaciór	Frecuencias
12	Lineal	Horizontal	2.2666	12.9028	-3.21%	-2.22%	-1.26%	-1.11%
	Lineal	Vertical	2.2956	12.6221	-4.54%	0.00%		
	Lineal equivalente	Horizontal	2.1459	12.9028	2.28%	-2.22%		
	Lineal equivalente	Vertical	2.1866	12.6221	0.43%	0.00%		
13	Lineal	Horizontal	3.0437	12.1582	-3.54%	3.77%	-1.77%	1.91%
	Lineal	Vertical	3.0622	12.6221	-4.17%	0.10%		
	Lineal equivalente	Horizontal	2.9175	12.1582	0.75%	3.77%		
	Lineal equivalente	Vertical	2.9434	12.6343	-0.13%	0.00%		
14	Lineal	Horizontal	3.8758	17.1143	-5.68%	1.34%	-0.61%	0.70%
	Lineal	Vertical	3.873	17.3096	-5.60%	0.21%		
	Lineal equivalente	Horizontal	3.5144	17.1143	4.17%	1.34%		
	Lineal equivalente	Vertical	3.4965	17.3584	4.66%	-0.07%		

**Tabla 14** Desfase relativo entre las funciones de trasferencia de los pozos y la mediana de los pozos.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Como se describe en la tabla 14, el desfase relativo las diferentes funciones de transferencias y la mediana es bajo, siendo su mayor valor en el pozo PCQ0013, tanto en amplificación como en frecuencia siendo estos valores  $-1.77\%$  y  $1.91\%$  respectivamente, por lo que se puede utilizar la mediana como función única de los 3 pozos, teniendo para la figura 70 una comparación de estas 3 funciones de transferencia.

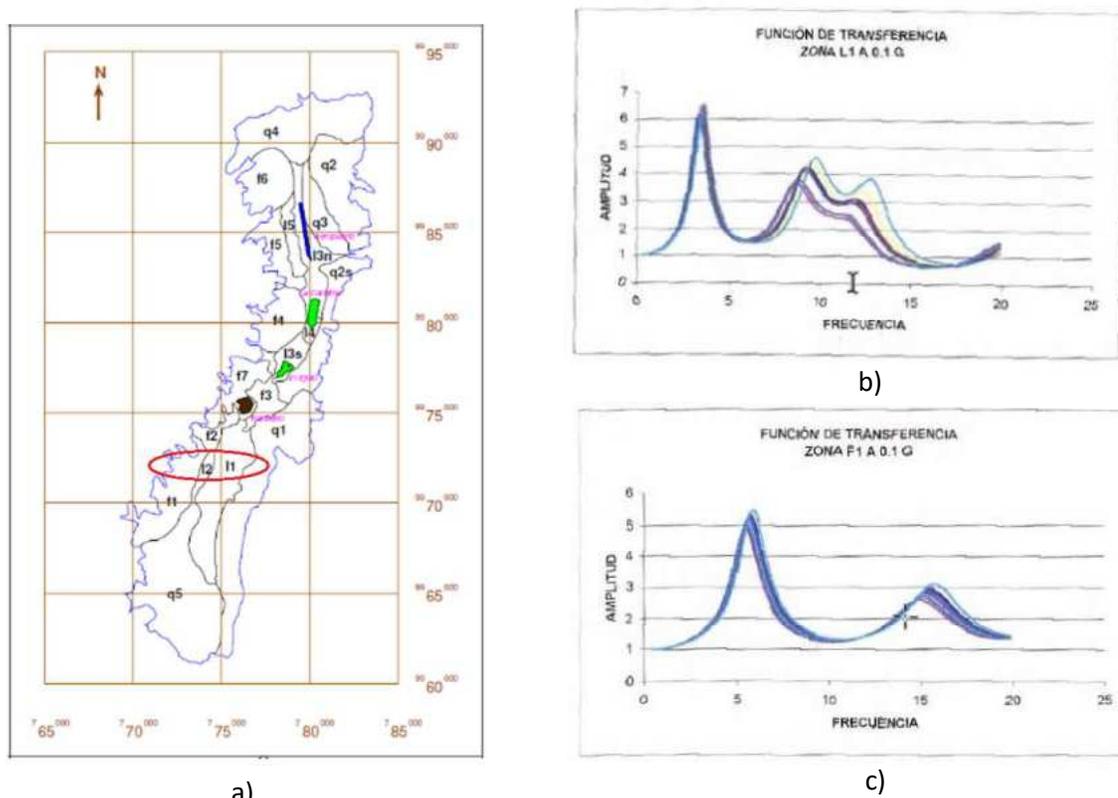
Además, se puede ver en la tabla 13 una tendencia de creciente en los valores de amplificación desde el pozo PCQ0012 al PCQ0014 y que las funciones de transferencias del pozo PCQ0012 y PCQ0013 se parecen en tendencia, pero la función PCQ0014 es diferente.

#### 4.2.4. COMPARACIÓN CON FUNCIONES DE TRASFERENCIAS DE OTRAS MICROZONIFICACIONES

En este apartado se comparará las funciones de transferencias calculadas con las funciones de transferencias obtenidas de microzonificaciones anteriores, mediante los siguientes parámetros:

- Las frecuencias de análisis serán de 10 a 25 Hertz, por el motivo que nuestros estratos no son profundos, por lo que no se analizará en frecuencias menores a 10 Hertz, únicamente se busca analizar amplificación somera como se describió en alcances y limitaciones.
- Los valores de PGA de nuestros 8 eventos sísmicos no sobrepasan el 0.1G, por lo tanto, se procederá a comparar con las curvas de 0.1G, para todas las funciones de transferencia.

## 4.2.4.1. MICROZONIFICACIÓN 1992-1994



**FIGURA 54** a) Mapa de la microzonificación 1992-1994 con la ubicación encerrada en rojo de la localización del pozo PCQ0012 en microzona L1, del pozo PCQ0013 en microzona L1 y del pozo PCQ0014 en microzona F1; b) Función de transferencia microzona L1; c) Función de transferencia microzona F1.

FUENTE: (Escuela Politécnica Nacional, GeoHazards International, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, ORSTOM, OYO Corporation, 1994).

- Pozo PCQ0012

Como se muestra en la tabla 13, el valor de amplificación para el pozo PCQ0012 es 2.1960 ubicado en 12.6221 Hertz, se puede notar que para la microzona L1 se tiene un pico alrededor de 10 a 15 Hertz con una amplificación promedio de 3, por lo tanto, la función de transferencia se parece en forma, pero en amplificación la microzona L1 es mayor.

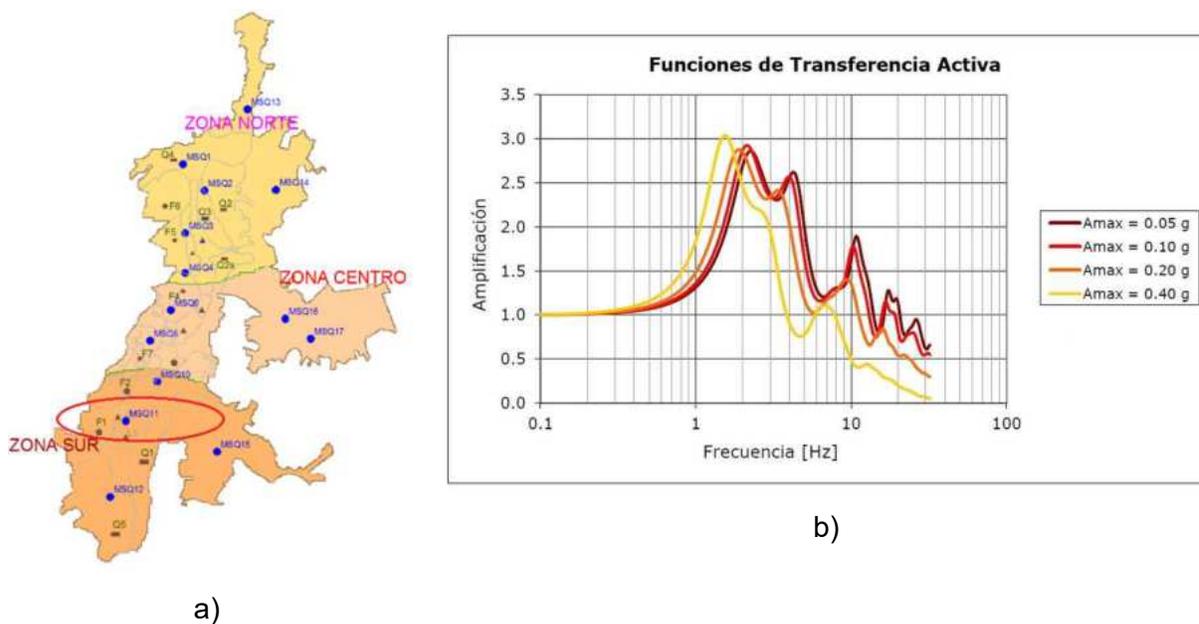
- Pozo PCQ0013

Como se muestra en la tabla 13, el valor de amplificación para el pozo PCQ0013 es 2.9396 ubicado en 12.6343 Hertz, se puede notar que para la microzona L1 se tiene un pico alrededor de 10 a 15 Hertz con una amplificación promedio de 3, por lo tanto, la función de transferencia se parece en forma y en amplificación.

- Pozo PCQ0014

Como se muestra en la tabla 13, el valor de amplificación para el pozo PCQ0014 es 3.6675 ubicado en 17.3462 Hertz, se puede notar que para la microzona F1 se tiene un pico alrededor de 15 a 20 Hertz, con una amplificación promedio de 2.7, por lo tanto, la función de transferencia se parece en forma, pero en amplificación la microzona F1 es menor.

## 4.2.4.2. ERN 2012



**FIGURA 55** a) Mapa de la microzonificación 2012 con la ubicación encerrada en rojo de la localización del pozo PCQ0012 en MSQ11, del pozo PCQ0013 en microzona MSQ11 y del pozo PCQ0014 en microzona MSQ11; b) Función de transferencia microzona MSQ11.

FUENTE: (ERN-2012, 2012)

- Pozo PCQ0012

Como se muestra en la tabla 13, el valor de amplificación para el pozo PCQ0012 es 2.1960 ubicado en 12.6221 Hertz, se puede notar que la función de transferencia perteneciente a la microzona del sur de Quito perteneciente a la perforación MSQ11, tiene 2 picos en 10 a 20 Hertz, con amplificaciones 2.8 y 1.2 respectivamente, por lo tanto, no se parece ni en tendencia ni en amplificación.

- Pozo PCQ0013

Como se muestra en la tabla 13, el valor de amplificación para el pozo PCQ0013 es 2.9396 ubicado en 12.6343 Hertz, se puede notar que la función de transferencia perteneciente a la microzona del sur de Quito perteneciente a la perforación MSQ11,

tiene 2 picos en 10 a 20 Hertz, con amplificaciones 2.8 y 1.2 respectivamente, por lo tanto, no se parece ni en tendencia ni en amplificación.

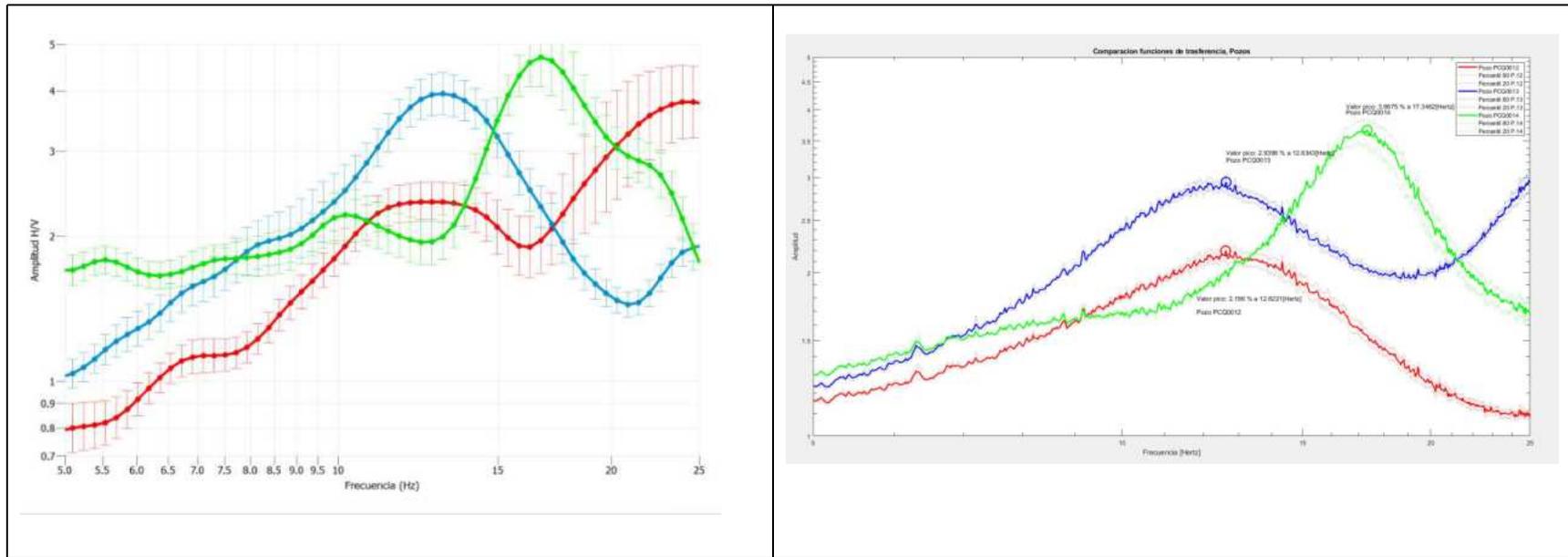
- Pozo PCQ0014

Como se muestra en la tabla 13, el valor de amplificación para el pozo PCQ0014 es 3.6675 ubicado en 17.3462 Hertz, se puede notar que la función de transferencia perteneciente a la microzona del sur de Quito perteneciente a la perforación MSQ11, tiene 2 picos en 10 a 20 Hertz, con amplificaciones 2.8 y 1.2 respectivamente, por lo tanto, no se parece ni en tendencia ni en amplificación.

- Comparación entre los 3 pozos

Asumiendo que se separará la función de transferencia de la microzonificación del ERN, para cada pico y se lo compare asumiendo que los pozos PCQ0012 y PCQ0013 son correspondientes al primer pico y que el pozo PCQ0014 es correspondiente al segundo pico, podemos notar que se parecen en tendencia, pero únicamente se parecería en amplificación el pozo PCQ0013.

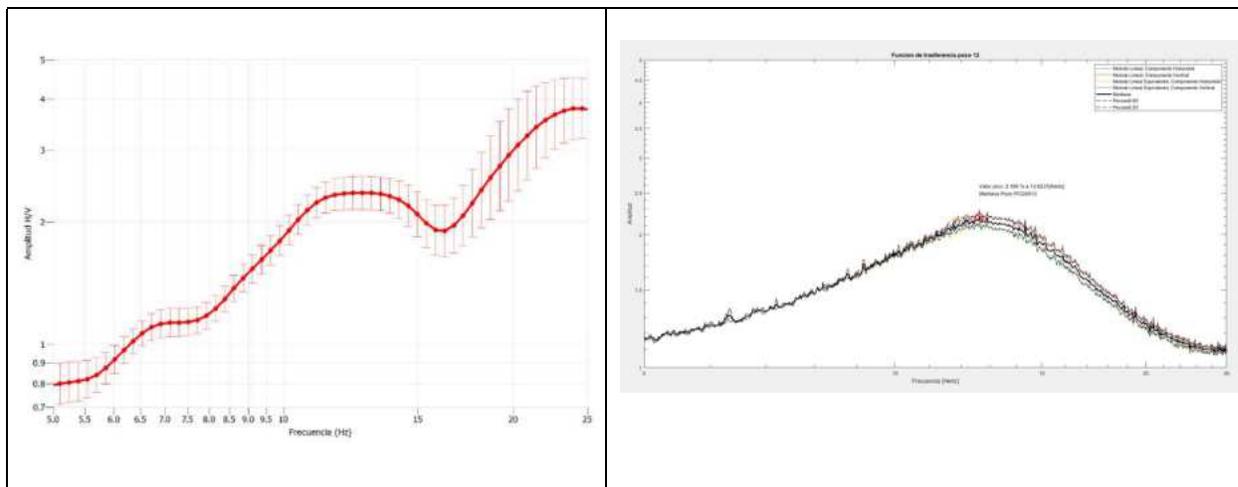
#### 4.2.5. COMPARACIÓN CON LA CURVA mHVRS



**FIGURA 56** A la izquierda curva mHVRS de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014, a la derecha funciones de transferencia de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014.

FUENTE: (Instituto Geofísico,2022); (Bonilla & López, 2022)

- Pozo PCQ0012

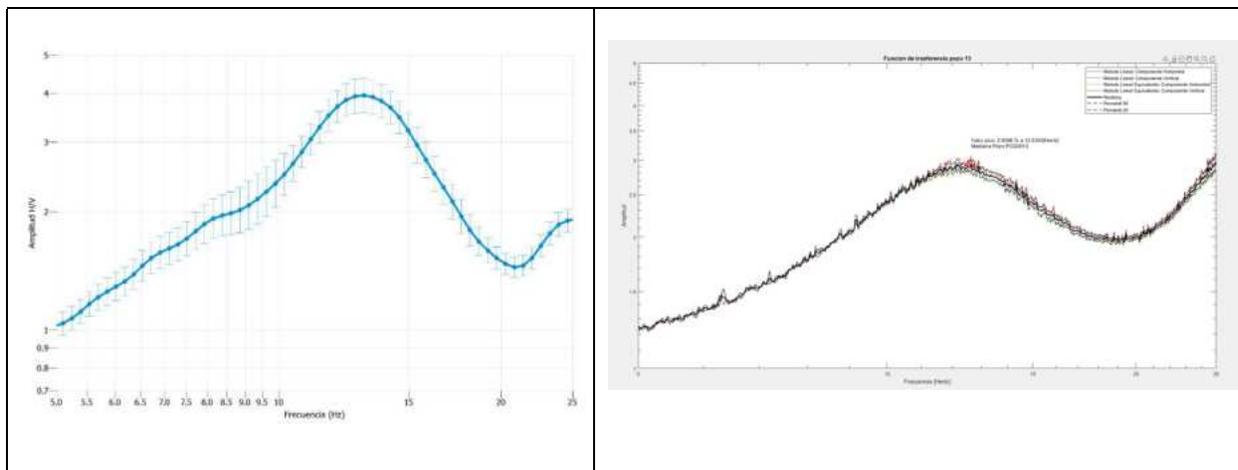


**FIGURA 57** A la izquierda curva mHVRS del pozo PCQ0012, a la derecha función de transferencia del pozo PCQ0012

FUENTE: (Instituto Geofísico,2022)

Como se muestra en la tabla 13, el valor de amplificación para el pozo PCQ0012 es 2.1960 ubicado en 12.6221 Hertz, se puede notar en la curva mHVRS que tiene un pico de 10 a 15 Hertz con una amplificación de 2.5, por lo tanto, se parecen en tendencia, pero en amplificación la curva mHVRS es mayor.

- Pozo PCQ0013

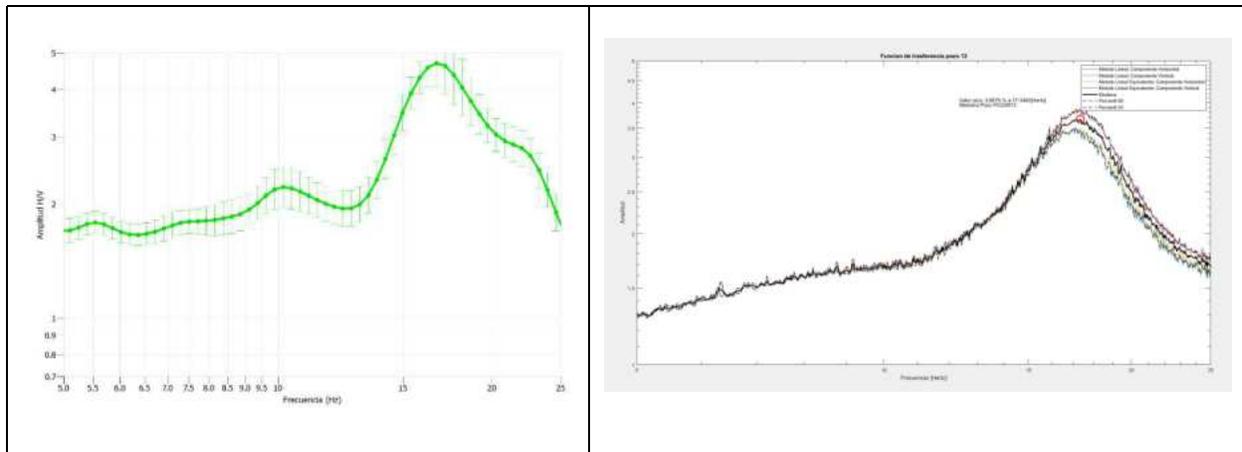


**FIGURA 58** A la izquierda curva mHVRS del pozo PCQ0013, a la derecha función de transferencia pozo PCQ0013.

FUENTE: (Instituto Geofísico,2022)

Como se muestra en la tabla 13, el valor de amplificación para el pozo PCQ0013 es 2.9396 ubicado en 12.6343 Hertz, se puede notar en la curva mHVRS que tiene un pico de 10 a 15 Hertz con una amplificación de 4, por lo tanto, se parecen en tendencia, pero en amplificación la curva mHVRS es mayor.

- Pozo PCQ0014



**FIGURA 59** A la izquierda curva mHVRS del pozo PCQ0014, a la derecha función de tranferencia pozo PCQ0014.

FUENTE: (Instituto Geofísico,2022)

Como se muestra en la tabla 13, el valor de amplificación para el pozo PCQ0014 es 3.6675 ubicado en 17.3462 Hertz, se puede notar en la curva mHVRS que tiene un pico de 15 a 20 Hertz con una amplificación de 5, por lo tanto, se parecen en tendencia, pero en amplificación la curva mHVRS es mayor.

### 4.3. CONCLUSIONES

- El software Proshake en su versión educativa es limitante, razón por la cual no se realizó una comparación entre los datos de ambos programas, a diferencia que el Deepsoil que no tiene limitaciones en su versión gratuita, lo que se puede observar es que el primero es desarrollado por una empresa (EduPro Civil Systems) y el segundo es desarrollado por la universidad de Illinois, además el Proshake únicamente puede realizar la convolución o deconvolución de señales sísmicas en el dominio de la frecuencia al igual que solo puede realizar análisis lineales y lineales equivalentes a diferencia que el Deepsoil que puede trabajar tanto en el dominio de la frecuencia y el tiempo, permitiendo de esta manera: análisis lineal, lineales equivalentes y no lineales (incluyendo efectos de licuefacción), por lo tanto se concluye que el software Deepsoil es más equipado que el software Proshake.
- Para la modelación de columna de suelo, los datos que se necesitaron, no se pudieron obtener en su totalidad, por lo que se tuvo que normalizar y rellenar datos faltantes, además de realizar correlaciones con otras propiedades, la dificultad de conseguir estos datos tanto por la complejidad de los ensayos al igual que los costos monetarios de los mismos, también se debe considerar, el rango de error en los cálculos por traslados de muestras de sitio a laboratorio, por lo expuesto anteriormente se concluye que los datos expuestos en el presente trabajo de titulación deben ser utilizados como referenciales mas no como reales.
- Como se puede ver en la tabla 11, el desfase relativo que tiene cada comparación entre componentes verticales y horizontales es menor al 1.60 en amplificación y 3.75% en la frecuencia, concluyendo que estos valores son bajos, de esta manera se dice que tanto la función de transferencia del componente horizontal como de la componente vertical son válidas y similares.

- Como se puede ver en la tabla 12, el desfase relativo que tiene cada comparación entre métodos lineal y lineal equivalente es mayor a 10% en valor absoluto para amplificación y menor a 0.14% en frecuencia, concluyendo que estos valores son altos en amplificación y bajos en frecuencia, de esta manera se dice que tanto la función de transferencia del método lineal y lineal equivalente son similares en forma, pero diferentes en amplificación, esto se debe al porcentaje de amortiguamiento que tiene cada método, método lineal 0% por ciento de amortiguamiento y método lineal equivalente amortiguamiento correspondiente a una curva de degradación, por lo tanto se concluye que ambos métodos son válidos, pero diferentes en amplificación, dando un diseño más conservador el análisis lineal.
- Como se puede observar en la tabla 11 y 12 de desfase relativos, cuando comparamos componentes tenemos un desfase entre amplificación máxima y frecuencia que la contiene, en un porcentaje similar, pero cuando comparamos métodos vemos que este desfase únicamente es correspondiente a la magnitud de la amplificación, por lo tanto se concluye que la diferencia entre desfases relativos en la comparación de componentes se debe a la diversidad de contenido frecuencial de las diferentes componentes y la diferencia entre desfases relativos en la comparación de métodos se debe únicamente a la amplitud, la cual se ve disminuida en un porcentaje representativo en el método lineal equivalente, esto se debe que el método lineal equivalente maneja un mayor amortiguamiento, las figuras del amortiguamiento se encuentran en el anexo 2.
- Se observa en el gráfico 70, que los valores de amplificación van aumentando del pozo PCQ0012 al PCQ0014 progresivamente, además los pozos PCQ0012 y PCQ0013 se parecen en forma, pero el PCQ0014 es diferente, se concluye que los pozos PCQ0012 y PCQ0013, podrían pertenecer a una microzona y el PCQ0014 a otra microzona como lo dijo la microzonificación de 1992-1994 y lo ratificó en el proyecto de actualización de la Microzonificación Sísmica de Quito (2018).

- Como se expuso en las conclusiones anteriores y basados en las tablas 11 y 12 se concluye que los rangos de desplazamientos relativos únicamente tienen un valor representativo en cuanto a amplificación por la comparación entre métodos, por lo se utilizó como función de trasferencias de los pozos PCQ0012, PCQ0013 y PCQ0014, la mediana de todas las funciones de trasferencias por pozo, teniendo que las figuras 67, 68 y 69 corresponde a las funciones de cada pozo respectivamente, y comparando con la tabla 14, nos damos cuenta que el desplazamiento relativo con la mediana es menor al -1.80% en amplificación y menor al 2.00% en frecuencia, concluyendo que para estos tipos de columnas de suelos, se puede utilizar cualquier método o componente, sin tener una alteración en la respuesta de manera significativa.
- En la comparación de las funciones de trasferencias de la microzonificación anterior (1992-1994) con las funciones de transferencia calculadas en el presente trabajo de titulación, se puede concluir que para el pozo PCQ0012, las amplitudes máximas de las funciones de trasferencias calculadas son menores a las del informe de microzonificación, para el pozo PCQ0013 son iguales y para el pozo PCQ0014 las funciones calculadas son mayores que las del informe de microzonificación, por lo tanto se puede decir que la microzonificación (1992-1994) en dirección Este-Oeste (PCQ0012- PCQ0014) tiene una tendencia decreciente en los valores pico de amplificación de 10 a 20 Hertz, al contrario que los picos de las funciones de transferencia calculadas que tienen una tendencia creciente, igualándose en el pozo PCQ0013.
- En la comparación de las funciones de transferencia de la microzonificación anterior (ERN 2012) con las funciones de transferencia calculadas en el presente trabajo de titulación, se puede concluir que no existe correlación entre las funciones de trasferencias de la microzonificación con las funciones de transferencia calculadas ni en amplitud ni en tendencia, solo compartiendo en los pozos PCQ0012 y PCQ0013 una tendencia en la formación del pico de amplificación de 10 a 20 Hertz.

- En la comparación de las funciones de transferencia calculadas con las curvas mHVRS se puede dar cuenta que en tendencia son parecidas de 10 a 25 Hertz, y comparten la tendencia creciente en dirección Este-Oeste (PCQ0012-PCQ0014), los valores de amplificación de las curvas mHVRS, son superiores a los de las funciones de transferencia calculadas, por lo tanto, se concluye que las curvas mHVRS son comparables en forma mas no en valores de amplificación.
- Comparando las funciones de transferencia calculadas con las curvas mHVRS de forma cualitativa, nos damos cuenta de que existe una tendencia creciente en amplificación como lo podemos ver en la figura 70, la misma tendencia que tienen las curvas mHVRS como lo podemos ver en las figuras 73,74 y 75, por lo tanto, se concluye que las curvas mHVRS son comparables cualitativamente, mas no cuantitativamente.

#### 4.4. RECOMENDACIONES

- Se recomienda modelar las columnas de suelo a profundidades superiores a los 30 metros, con interpolaciones de datos geotécnicos y con velocidades de onda de corte propuestas por (Pacheco, 2021) ya que se sabe que el verdadero basamento rocoso se encuentra aproximadamente por los 800 metros.
- Se recomienda realizar ensayos de sitio para la adquisición de las propiedades dinámicas del suelo, antes que ensayos de laboratorio, para disminuir el rango de error en los cálculos.
- Ver la influencia de los diferentes tipos de ajuste en las gráficas de: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs. Deformación cortante en la adquisición de las funciones de transferencia.

## 5. CAPÍTULO V: REFERENCIAS

- Acosta , R., & Fábian, A. (1979). *Aporte a la zonificación de los suelos de Quito (tesis pregrado)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Aguiar Falconí, R. (2013). *Microzonificación Sísmica de Quito (1ra ed.)*. Quito: Centro de Investigaciones Científicas. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.
- Aguiar Falconi, R. (2017). *Microzonificación Sísmica de Quito (2da ed.)*. Quito: Departamento de Ciencias de la tierra y la Construcción Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Aguinaga Barragán, G. F. (1992). *Estimación del período de vibración en función de las condiciones locales del suelo (tesis pregrado)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Altamirano Cuásquer, F. H., & Martínez Mesa, D. O. (2015). *Identificación de sectores vulnerables pos acción sísmica y elaboración del mapa de respuesta máximas estructurales de la zona centro del DMQ (tesis pregrado)*. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Alvarado Alcívar, K. G. (2017). *Mapa de microzonificación Geotécnico y modelo Geológico-Geotécnico 3D de la ciudad de Portoviejo (tesis pregrado)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Alvarado, A. (2012). *Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur (tesis doctorado)*. Français: Université de Grenoble.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Lagreulet, S., Segovia, M., Front, Y., . . . Quidelleur, X. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *AGU PUBLICATIONS*, 67-83.

- American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM D-3282-15 Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. Washington: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM D-2487-17 Standard Practice For Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Washington: ASTM International.
- Beauval, C., Yepez, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., & Singaicho, J. C. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the sierra of Ecuador (1587-1996). *Geophysical Journal International*, 1613-1633.
- Benbrahim, M., Daoudi, A., Bjelloun, K., & Ibenbrahim, A. (2005). Discrimination of Seismic Signals Using Artificial Neural Networks. *Transactions On Engineering, Computing And Technology*.
- Ben-Menahem, A. (August de 1995). A Concise History of Mainstream Seismology: Origins, Legacy, and Perspectives. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85, 1202-1225.
- Bormann, P. (2002). Aim and Scope of the IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice. En A. (. addresses), *New Manual of Seismological Observatory Practice NMSOP* (pág. Chapter 1). Heidelberg: Deutschen GeoForschungsZentrums - GFZ.
- Brady, E., & Brow, E. T. (1985). *Rock Mechanics for Underground Mining* . Londres: George Allen & Unwin .
- Braja, M. D. (2000). *Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica* (Primera ed.). Mexico: Thomson Editores S.A.
- Braja, M. D. (2015). *Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica* (Cuarta ed.). Mexico: Cengage Learning Editores, S.A.
- Bran Sanchez, J. G., Gonzalez Cruz, R. A., & Ortiz Landaverde, H. A. (2009). *Métodos de ensayos para la deteminación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de el Salvador (tesis pregrado)*. San Salvador: Universidad de el Salvador.

- Cardenas, F. A. (2005). *Sistema de información para representar y generar estratigrafía y propiedades del suelo (tesis posgrado)*. Bogota: Universidad de los Andes.
- Carrillo González, C. J. (2003). *Fundamentos del Análisis de Fourier*. Vigo: Universidad de Vigo.
- Casagrande, A. (1936). The determination of the preconsolidation load and its practical significance. *Proc., First International conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 60-64.
- CERESIS. (1985). *Catálogo de Terremotos para América del Sur. Datos de Hipocentros e Intensidades (Vol. 6)*. Ecuador.
- Chavez Garcia, F., Sanchez Sesma, F., Campillo, M., & Yves Bard, P. (1994). El terremoto de Michoacán de septiembre de 1985: efectos de fuente, trayecto y sitio. *Física de la Tierra*, 157-200.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de estructuras*. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación de México.
- Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves (Dissertation Doctor Of Philosophy)*. Texas: The University of Texas at Austin .
- Del Pino, I., & Yepes, H. (1990). Apuntes para una historia sísmica de Quito. *Centro Histórico de Quito: Problemáticas y Perspectivas*, 67-100.
- Duncan, J., & Chan, Y. (1970). Non linear analysis of stress and strain in soil. *American society of Civil Engineers, J. of Soil Mech and Foundations*, 1629-1653.
- Earthquake Science Center. (27 de Junio de 2022). *Tectonic Plates of the Earth*. Obtenido de USGS (science for a changing world): <https://www.usgs.gov/media/images/tectonic-plates-earth>
- EduPro Civil Systems, Inc. (2017). *ProShake; Ground Response Analysis Program; Version 2.0; User's Manual*. Wahington: EduPro Civil Systems, Inc.

- ERN-2012. (2012). *Microzonificación sísmica del Distrito Metropolitano de Quito: Estudio de la amenaza sísmica de nivel local*. Quito: Programa para la reducción de riesgos urbanos.
- Escuela Politécnica Nacional, GeoHazards International, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, ORSTOM, OYO Corporation. (1994). *The Quito, Ecuador, Earthquake Risk Management Project: An Overview*. San Francisco: GeoHazards International.
- Escuela Politécnica Nacional, GeoHazards International, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, ORSTOM, OYO Corporation. (1995). *Síntesis General del Proyecto para manejo del riesgo sísmico de Quito*. Quito: Colección Quito Metropolitano.
- Espinoza, J. (1 de 7 de 1992). Terremotos Tsunamigenicos en el Ecuador. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 21-28.
- Florez, C. H., & Lozano, C. F. (2007). Análisis y tratamiento de señales de fuentes sísmogénicas de campo cercano a San José de Cúcuta. *Conferencia internacional en Ingeniería sísmica* (págs. 1-9). Lima: CISMID.
- Galindo Aires, R. A. (2010). *Análisis, modelización e implementación numérica del comportamiento de suelos blandos ante la combinación de tensiones tangenciales estáticas y cíclicas (tesis doctoral)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Giner, J., & Molina, S. (2001). *Sismicidad y riesgo sísmico en la C.A.V. España*: Editorial Club Universitario.
- Griem, W. (2 de 24 de 2022). *Geología virtual*. Obtenido de Apuntes de geología general :  
<https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap10c.htm#:~:text=Un%20perfil%20litol%C3%B3gico%20o%20columna,la%20resistencia%20contra%20la%20meteorizaci%C3%B3n>.
- Groholski, D., Hasash, Y., Kim, B., & Musgrove, M. (2016). Simplified Model for Small-Strain Nonlinearity and Strength in 1D Seismic Site Response Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142, 1-14.

- Guéguen, P. (1997). *Microzonificación de Quito (Ecuador)*. Quito: ORSTOM.
- GURALP SYSTEMS. (2009). *CMG-5T; Operator's guide*. England: Güralp Systems Limited.
- Gutscher, M. A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters* 168, 255-270.
- Hall, M. (2000). *Los Terremotos del Ecuador del 5 de marzo de 1987*. Quito: Corporacion Editora Nacional.
- Harmon, J., Musgrove, M., Hashash, Y., & Rathje, E. (2017). Evaluation of the DEEPSOIL Software on the DesignSafe Cyberinfrastructure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143-152.
- Hashash Y., M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., . . . Park, D. (2020). *DEEPSOIL V7.0, User Manual*. Urbana IL: Board of Trustees of University of Illinois at Urbana- Champaign.
- Hashash, Y., & Park, D. (2001). Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment. *Engineering Geology*, 185-206.
- Haskell, N. A. (1960). Crustal reflection of SH waves. *Journal of Geophysical Research*, 4147-4150.
- Hatanaka, M., & Uchida, A. (1996). Empirical Correlation between Penetration Resistance and Internal Friction Angle of Sandy Soils. *Soils Found*, 1-9.
- Hibsch, C., Alvarado, A., Yepes, H., Sébrier, M., & Pérez, V. H. (1997). Holocene seismicity and tectonic activity of the Quito fault (Ecuador): a paleoseismic history recorded in lacustrine sediments. *Journal Geodynamics*, 259-280.
- Howell, B. (1962). *Introducción a la Geofísica*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Hoyos Patiño, F. (2001). *Geotecnia; Diccionario Básico*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- IG-EPN. (07 de 23 de 2021). *Instituto Geofísico*. Obtenido de Preguntas mas frecuentes: Sismos:  
<https://www.igeqpn.edu.ec/component/fsf/?view=faq&catid=2>

- IG-EPN, PUCE & Municipio de Quito. (2020). *Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M. Fase 1 (Informe 4)*: Quito, Ecuador.
- IRIS. (05 de 17 de 2022). *National Science Foundation* . Obtenido de Incorporated Research Institutions for Seismology:  
[https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/1component\\_seismogram\\_building\\_responds\\_to\\_p\\_s\\_surface\\_waves](https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/1component_seismogram_building_responds_to_p_s_surface_waves)
- Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. New York: Oxford University Press.
- Japan National Railway. (1999). *Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structures in Japan*. Tokio: Japanese Society of Civil Engineers.
- Japan Road Bureau. (1984). *Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structures in Japan*. Tokyo: Japanese Society of Civil Engineers.
- Kishida, H. (1969). Characteristics of liquefied sands during Mino-Owari, Tohankai and Fukui earthquakes. *Soils Found*, 75-92.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Washington: Prentice-Hall International Series.
- Lecaro Ribadeneira, M. E., León Coronel, F. E., & Moyano Aguiar, C. A. (1987). *Zonificación de los suelos de Quito y correlación de ensayos de penetración estandar con parametros dinámicos (tesis pregrado)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Lucero Solis, Y. (2017). *Propiedades y modelos dinámicos para las arcillas del ex lago Texcoco (Tesis pos-grado)*. Mexico: Universidad autónoma de México.
- Martinez, J. (2005). ¿QUÉ NOS CUENTAN LAS ONDAS SÍSMICAS? *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20-36.
- Masing, V. (1926). Eigenspannungen und verfestigung beim messin. *Self stretching and hardening for brass* (págs. 332-335). German: Proceedings of the Second International Congress for Applied Mechanics, Zurich, Switzerland, 1926,.
- MathWorks. (18 de 05 de 2022). *MathWorks*. Obtenido de Help Center:  
<https://la.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>

- Matosovic, N., & Vucetic, M. (1993). Cyclic characterization of liquefiable sands. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1805-1822.
- Mayne, P., & Kemper, J. (1988). Profiling OCR in Stiff Clays by CPT and SPT. *Geotechnical Testing Journal*, 139-147.
- Menq, F. Y. (2003). *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils (Dissertation Doctor of Philosophy)*. Texas: The university of Texas at Austin.
- Ministerio del Ambiente. (2002). *División hidrográfica del Ecuador; Memoria Técnica*. Quito: Consejo Nacional de Recursos Hídricos.
- Montenegro, L. (2014). *Calibración del método de parámetros de resistencia con SPT en suelos de la región llanera colombiana (Tesis posgrado)*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimations of subsurface. *Railway Tech. Res. Inst. Q. Rep.*, 25-33.
- Nakamura, Y., & Saito, A. (1983). Estimations of seismic response characteristics and maximum acceleration of surface ground using strong motion records. *Proc. of the 17th JSCE Earthquake Engineering Symposium 1983*, 25-28.
- Nieto Leal, A., Camacho Tauta, J. F., & Ruiz Blanco, E. F. (2009). Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos MOHR-COULOMB y HARDENING SOIL en suelos arcillosos. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*, 75-91.
- Nitish, P., Ashwani, J., Piyush, M., & Subhamoy, B. (2018). Earthquake Response Analisis of Sites in State of Haryana using DEEPSOIL Software. *ScienceDirect*, 357-366.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS). (2015). *Peligro sísmico. Diseño sismo resistente*. Quito: MIDUVI.
- Ocean Exploration. (27 de Junio de 2022). *(NORA) Ocean Exploration*. Obtenido de <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/plate-boundaries.html>
- Oyanguren, P. R., & Monge, L. A. (2004). *Mecánica de Rocas; Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid: University of Vigo.

- Pacheco Silva, F. (1970). A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample. *Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (págs. 225-232). Rio de Janeiro.
- Peck, R., Hanson, W., & Thornburn, T. (1953). *Foundation Engineering*. New York: John Wiley and Sons.
- Phillips, C., & Hashash, Y. (2009). Damping formulation for non-linear 1D site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 1143-1158.
- Rivadeneira, F., Yepes, H., Segovia, M., Egred, J., Troncoso, L., & Vaca, S. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador*. Quito: Corporación Editora Nacional.
- Robles Mendoza, A., & Jimenez Velasquez, J. C. (2017). *METODOLOGÍA PARA REALIZAR ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA*. Mexico: CENAPRED.
- Rodríguez Gómez, D. (2015). *Caracterización sísmica de un emplazamiento (tesis de posgrado)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez Segurado, M. (2007). *Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos. Aplicación a la ciudad de Barcelona*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rodríguez, M. (2005). Tectónica de placas. En C. Werlinger, *Biología marina y oceanografía: Conceptos y procesos* (págs. 117-134). Concepción: Departamento de Oceanografía Universidad de Concepción.
- RSN. (15 de 02 de 2022). *Universidad de Costa Rica*. Obtenido de RSN: <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/geologia/244-que-es-una-falla>
- Schmertmann, J. (1975). Measurement of In-situ Shear Strength. *Conf. on In situ Measurement of oil Properties*. ASCE.
- Schnabel, P., Lysmer, J., & Seed, H. (1972). *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*. Berkeley: Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering, University of California.

- Schuster, A. (1898). Sobre la investigación de periodicidades ocultas con aplicación a un supuesto período de 26 días de fenómenos meteorológicos. *Magnetismo terrestre*, 13-41.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. *Earthquake engineering research center*, 1-41.
- Shearer, P. (2009). *Introduction to Seismology* (2da ed.). Reino Unido: Cambridge Press.
- Singaucho Armas, J. C. (2009). *Mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador. Criterios estructurales para mejorar la estimación de intensidades (tesis pregrado)*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- Skempton, A. W. (1985). A History of Soil Properties 117-1927. *XI International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering* (págs. 95-121). San Francisco: Golden Jubilee.
- Taylor, D. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. New York: Massachusetts Institute of Technology.
- Terzaghi, K., & Peck, S. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley and Sons.
- Terzahi, K., & Peck, R. B. (1955). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica* (Primera ed.). New York: Wiley y Sons Inc.
- The United States Geological Survey. (17 de 5 de 2021). *USGS*. Obtenido de Earthquake Hazards Program:  
[https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official19060131153610\\_30/executive](https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official19060131153610_30/executive)
- Torres Galarraga, L. P. (1990). *Estudio de la respuesta dinámica de un perfil de subsuelo de la ciudad de Quito (tesis pregrado)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Udaka, T. (1975). *Analysis of Response of Large Embankments to Traveling Base Motions*. Berkeley: University of California.

- Valverde, J., Fernandez, J., Jimenez, E., Vaca, T., & Alarcon, F. (2002).  
*Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de Quito.*  
Quito.
- Vargas Jiménez, C. A. (2004). *Propagación de ondas sísmicas y atenuación de ondas de coda en el territorio Colombiano.* Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Viessman, W., Harbaugh, T. E., & Kuapp, J. W. (1972). *Intorduction to hydrology.*  
New York: Intext Educational Publication.
- Welch, P. (1967). The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms.  
*IEEE Trans. Audio Electroacoust*, 70-73.

## 6. CAPÍTULO VI: ANEXOS

### 6.1. DATOS COLUMNA DE SUELO

#### 6.1.1. POZO PCQ0012

##### 6.1.1.1. SUELOS FINOS

PCQ0012 cota 2893 msnm																
Datos generales										Para suelos finos						
Profundidad		Clasificación geotécnica	Clasificación litológica	Peso *	Peso **	Vs *	Vs **	SPT*	SPT**	Indice *	Indice **	Angulo de	Esfuerzo *	Esfuerzo ***	OCR	Ko
(m)				(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(m/s)	N60	N60	(%)	(%)	Grados	KPa	KPa	-	-
0.0	0.5	MH	Suelo	SD	15.15	250	250	SD	12	36	39	31.31	65.00	11.325	5.740	1.19
0.5	1.0	MH		SD	250	SD	12	36								
1.0	1.5	MH		SD	250	SD	12	36								
1.5	2.0	MH	Paliustre Fino	SD	14.49	310	310	12	7	45	42	28.39	130.33	55.328	2.356	0.79
2.0	2.5	MH		SD		310		5		DA						
2.5	3.0	MH		SD		310		5		DA						
3.0	3.5	MH		SD		310		5		43						
3.5	4.0	MH		SD		310		5		43						
4.0	4.5	SM		SD		310		5		47						
4.5	5.0	SM		SD		310		9		47						
5.0	5.5	MH		SD		310		9		34						
5.5	6.0	MH		SD		310		9		34						
6.0	6.5	SM		SD		16.20		600		5						
6.5	7.0	SM	SD	600	5	14										
7.0	7.5	ML	SD	600	DA	DA										
7.5	8.0	ML	SD	600	DA	DA										
8.0	8.5	SM	SD	600	DA	16										
8.5	9.0	SM	SD	600	DA	16										

\* Datos obtenidos del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1  
 \*\* Datos normalizados para su respectivo análisis  
 \*\*\* Datos calculados mediante formulación correspondiente  
 SD Sin dato en el informe  
 DA Dato atípico eliminado

**Tabla 15** Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0012, sección fina.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

6.1.1.2. SUELOS GRUESOS

PCQ0012 cota 2893 msnm																
Datos generales										Para suelos gruesos						
Profundidad (m)	Clasificación geotécnica	Clasificación litológica	Peso *	Peso **	Vs *	Vs **	SPT*	SPT**	Angulo de *** fricción	K <sub>o</sub>	Coeficiente de * uniformidad	Coeficiente de ** uniformidad	D50 *	D50 **	τ <sub>max</sub> ***	
			(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(m/s)	N60	N60					mm	mm		Kpa
9.0	9.5	SM	SD		600		47									
9.5	10.0	SM	SD		600		47									
10.0	10.5	SM	SD		600		77									
10.5	11.0	SM	SD		600		77									
11.0	11.5	MH	SD		600		83									
11.5	12.0	SM	SD		600		83									
12.0	12.5	SM	SD		600		30									
12.5	13.0	SM	SD		600		30									
13.0	13.5	SM	SD		600		70									
13.5	14.0	SM	SD		600		70									
14.0	14.5	SM	16.09		600		70									
14.5	15.0	SM	16.09		600		70									
15.0	15.5	GP	16.09		600		70									
15.5	16.0	GP	16.09		600		70									
16.0	16.5	SP-SM	16.09		600		70									
16.5	17.0	SP-SM	16.09		600		70									
17.0	17.5	SP-SM	SD		600		70									
17.5	18.0	SP-SM	SD		600		70									
18.0	18.5	GP	SD		600		70									
18.5	19.0	GP	SD		600		70									
19.0	19.5	GP	SD		600		70									
19.5	20.0	GP	SD		600		70									
20.0	20.5	SP	SD		600		70									
20.5	21.0	SP	SD		600		70									
21.0	21.5	SP-SM	SD		600		70									
21.5	22.0	SP-SM	SD		600		70									
22.0	22.5	SW-SM	SD		600		70									
22.5	23.0	SW-SM	SD		600		70									
23.0	23.5	SP-SM	SD		600		70									
23.5	24.0	SP-SM	SD		600		70									
24.0	24.5	SP-SM	SD		600		70									
24.5	25.0	SP-SM	SD		600		70									
25.0	25.5	SP	SD		600		70									
25.5	26.0	SP	SD		600		70									
26.0	26.5	SP	SD		600		70									
26.5	27.0	SP	SD		600		70									
27.0	27.5	GP-GM	SD		600		70									
27.5	28.0	GP-GM	SD		600		70									
28.0	28.5	GP	SD		600		70									
28.5	29.0	GP	SD		600		70									
29.0	29.5	GP	SD		600		70									
29.5	30.0	GP	SD		600		70									

\* Datos obtenidos del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1  
 \*\* Datos normalizados para su respectivo análisis  
 \*\*\* Datos calculados mediante formulacion correspondiente  
 SD Sin dato en el informe  
 DA Dato atípico eliminado

Tabla 16 Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0012, sección gruesa.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.1.2. POZO PCQ0013

## 6.1.2.1. SUELOS FINOS

PCQ0013 cota 2906 msnm															
Datos generales:								Para suelos finos							
Profundidad	Clasificación geotécnica	Clasificación litológica	Peso * Especifico (kN/m3)	Peso ** Especifico (kN/m3)	Vs * (m/s)	Vs ** (m/s)	SPT* N60	SPT** N60	Indice * plasticidad (%)	Indice ** plasticidad (%)	Angulo de fricción *** Grados	Esfuerzo * preconsolidación KPa	Esfuerzo *** vertical efectivo KPa	OCR	Ko
(m)															
0.0	0.5	ML	SD	13.54	200	200	SD	6	11	18	27.69	SD	16.925	11.022	1.633
0.5	1.0	ML	SD		200		SD		11						
1.0	1.5	CH	SD		200		5		26						
1.5	2.0	CH	SD		200		5		26						
2.0	2.5	ML	13.54		200		9		14						
2.5	3.0	ML	13.54	13.54	400	400	9	10	14	42.35	SD	44.1075	21.772	2.600	
3.0	3.5	SM	13.54		400		36								9
3.5	4.0	SM	13.54		400		36								9
4.0	4.5	ML	13.54		400		DA								9
4.5	5.0	ML	13.54		400		DA								9
5.0	5.5	SM	13.54		400		64								9
5.5	6.0	CL	13.54		400		64								9
6.0	6.5	ML	13.54		400		58								DA
6.5	7.0	ML	13.54		400		58								DA
7.0	7.5	SM	SD		400		28								9
7.5	8.0	SM	SD	400	28	9									

\* Datos obtenidos del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1

\*\* Datos normalizados para su respectivo analisis

\*\*\* Datos calculados mediante formulacion correspondiente

SD: Sin dato en el informe

DA: Dato atipico eliminado

**Tabla 17** Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0013, sección fina.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

6.1.2.2. SUELOS GRUESOS

PCQ0013 cota 2906 msnm																
Datos generales									Para suelos gruesos							
Profundidad		Clasificación geotécnica	Clasificación litológica	Peso * Específico	Peso ** Específico	Vs *	Vs **	SPT*	SPT**	Angulo de *** fricción	Ko	Coefficiente de * uniformidad	Coefficiente de ** uniformidad	D50 *	D50 **	τ <sub>max</sub> ***
(m)				(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(m/s)	N60	N60	C	-	-	-	mm	mm	Kpa
N I V E L  F R E A T I C O	8.0	8.5	SM	SD	15.66	750	750	70	62	47.63	0.261	23.29	15.21	0.2346	0.28	734.796
	8.5	9.0	SM	SD		750		70								
	9.0	9.5	SM	15.01		750		45								
	9.5	10.0	SM	15.01		750		45								
	10.0	10.5	SM	14.12		750		70								
	10.5	11.0	SM	14.12		750		70								
	11.0	11.5	SM	15.44		750		55								
	11.5	12.0	SM	15.44		750		55								
	12.0	12.5	GP-GM	18.05		750		70								
	12.5	13.0	GP-GM	18.05		750		70								
	13.0	13.5	SW-SM	16.97		750		70								
	13.5	14.0	SW-SM	16.97		750		70								
	14.0	14.5	SP-SM	16.97		750		70								
	14.5	15.0	SP-SM	16.97	750	70										
	15.0	15.5	SP-SM	15.24	750	70										
	15.5	16.0	SP-SM	15.24	750	49										
	16.0	16.5	SM	15.24	750	49										
	16.5	17.0	SM	15.24	750	60										
	17.0	17.5	SW-SM	15.24	750	60										
	17.5	18.0	SW-SM	15.24	750	70										
	18.0	18.5	SW-SM	15.24	750	70										
	18.5	19.0	SW-SM	15.24	750	70										
	19.0	19.5	SM	15.24	750	70										
	19.5	20.0	SM	15.24	750	70										
	20.0	20.5	SP	SD	750	70										
	20.5	21.0	SP	SD	750	70										
	21.0	21.5	SP-SM	SD	750	70										
	21.5	22.0	SP-SM	SD	750	70										
	22.0	22.5	SW	SD	750	70										
22.5	23.0	SW	SD	750	70											
23.0	23.5	SM	SD	750	70											
23.5	24.0	SM	SD	750	70											
24.0	24.5	SM	SD	750	70											
24.5	25.0	SM	SD	750	70											
25.0	25.5	SM	SD	750	70											
25.5	26.0	SM	SD	750	70											
26.0	26.5	SM	SD	750	70											
26.5	27.0	SM	SD	750	70											
27.0	27.5	SM	SD	750	70											
27.5	28.0	SM	SD	750	70											
28.0	28.5	SM	SD	750	70											
28.5	29.0	SM	SD	750	70											
29.0	29.5	SM	SD	750	70											
29.5	30.0	SM	SD	750	70											

\* Datos obtenidos del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1  
 \*\* Datos normalizados para su respectivo análisis  
 \*\*\* Datos calculados mediante formulacion correspondiente  
 SD Sin dato en el informe  
 DA Dato atípico eliminado

Tabla 18 Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0013, sección gruesa.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.1.3. POZO PCQ0014

## 6.1.3.1. SUELOS FINOS

PCQ0014 cota 2939 msnm															
Datos generales									Para suelos finos						
Profundidad (m)	Clasificación geotécnica	Clasificación litológica	Peso *	Peso **	Vs *	Vs **	SPT*	SPT**	Índice *	Índice **	Ángulo de fricción***	Esfuerzo *	Esfuerzo ***	OCR	Ko
			(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(m/s)	N60	N60	(%)	(%)	Grados	KPa	KPa	-	-
0.0	0.5	CL	17.76		160		SD		8D						
0.5	1.0	CL	17.76		160		SD		SD						
1.0	1.5	CL	17.76	17.76	160	160	9	8	11	11	29.04	149	20.424	7.29533882	1.35017954
1.5	2.0	CL	17.76		160		9		11						
2.0	2.5	CL	17.76		160		6		11						
2.5	3.0	ML	17.76		500		6		11						
3.0	3.5	ML	17.76		500		21		25						
3.5	4.0	ML	17.76		500		21		25						
4.0	4.5	ML-CL	17.76		500		13		6						
4.5	5.0	ML-CL	17.76		500		13		6						
5.0	5.5	CL	17.76		500		17		5						
5.5	6.0	CL	17.76		500		17		5						
6.0	6.5	CL	17.76		500		22		9						
6.5	7.0	CL	17.76		500		22		9						
7.0	7.5	CL	17.76		500		17		8						
7.5	8.0	CL	17.76		500		17		8						
8.0	8.5	ML	17.76	17.21	500	500	26	19	10	8	34.53	310	167.7825	1.84763012	0.61348872
8.5	9.0	ML	17.76		500		26		10						
9.0	9.5	SM	17.76		500		13		9						
9.5	10.0	SM	17.76		500		13		9						
10.0	10.5	ML	15.84		500		19		4						
10.5	11.0	ML	15.84		500		19		4						
11.0	11.5	SM	15.84		500		33		4						
11.5	12.0	SM	15.84		500		33		4						
12.0	12.5	ML	15.84		500		21		4						
12.5	13.0	ML	15.84		500		21		3						
13.0	13.5	SM	15.84		500		13		3						
13.5	14.0	SM	18.56		500		13		3						

\* Datos obtenidos del informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase 1

\*\* Datos normalizados para su respectivo análisis

\*\*\* Datos calculados mediante formulación correspondiente

**Tabla 19** Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0014, sección fina.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

6.1.3.2. SUELOS GRUESOS

PCQ0014 cota 2939 msnm																							
Datos generales									Para suelos gruesos														
Profundidad		Clasificación geotécnica	Clasificación litológica	Peso *	Peso **	Vs *	Vs **	SPT*	SPT**	Angulo de ***fricción	K <sub>o</sub>	Coefficiente de *	Coefficiente de **	D50 *	D50 **	t <sub>max</sub> ***							
(m)				(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(m/s)	N60	N60			C	-	-	-	mm	mm	Kpa					
NIVEL FREÁTICO	14.0	14.5	SM	Cangahua Gruesa	18.05	620	620	62	47.63	0.2612	16.63	18.19	0.17	584.2023	0.0790								
	14.5	15.0	SM									18.56			620		26	18.51	0.1267				
	15.0	15.5	SM									18.56			620		22	16.71	0.0883				
	15.5	16.0	SM									18.56			620		22						
	16.0	16.5	SM									18.56			620		68	12.54	0.0942				
	16.5	17.0	SM									18.56			620		68						
	17.0	17.5	SM									18.56			620		67	19.45	0.1576				
	17.5	18.0	SM									18.56			620		67						
	18.0	18.5	SM									18.56			620		73	24.55	0.2738				
	18.5	19.0	SM									18.56			620		73						
	19.0	19.5	SM									18.56			620		71	18.45	0.1901				
	19.5	20.0	SM									18.56			620		71						
	20.0	20.5	SM									18.56			620		44	13.28	0.2737				
	20.5	21.0	SM									18.56			620		44						
	21.0	21.5	SP-SM									16.96			620		89	5.12	0.3159				
	21.5	22.0	SP-SM									16.96			620		89						
	22.0	22.5	SM									16.96			620		70	19.48	0.1392				
	22.5	23.0	SM									16.96			620		70						
	23.0	23.5	SM									16.96			620		86	Atuvial	16.55	620	31		
	23.5	24.0	SM									16.96			620		86						
24.0	24.5	SM	17.97	620	22																		
24.5	25.0	SM	17.97	620	22																		
25.0	25.5	SM	16.08	620	22																		
25.5	26.0	SM	16.08	620	22																		
26.0	26.5	SM	16.08	620	35																		
26.5	27.0	SM	16.08	620	35																		
27.0	27.5	GP	16.08	620	28																		
27.5	28.0	SM	16.08	620	28																		
28.0	28.5	SM	SD	620	44																		
28.5	29.0	SM	SD	620	44																		
29.0	29.5	GM	SD	620	32																		
29.5	30.0	GM	SD	620	32																		

\* Datos obtenidos del Informe 4: Caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo de Quito D.M., Fase I  
 \*\* Datos normalizados para su respectivo análisis  
 \*\*\* Datos calculados mediante formulación correspondiente

Tabla 20 Datos geotécnicos completos del pozo PCQ0014, sección gruesa.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.1.4. CALCULOS DE LOS DATOS DE LA COLUMNA DE SUELOS

## 6.1.4.1. ÁNGULO DE FRICCIÓN

- PCQ0012

PCQ0012										
Estrato	N60	Terzagui y Peck	Peck y otros	Kishida	Schmertmann	JNR	JRB	Hatanaka y Uchida	Montenegro y Gonzales	Promedio
1	12	31.50	30.87	30.49	35.48	30.60	25.61	35.49	30.41	31.31
2	7	30.25	29.05	26.83	30.68	29.10	23.10	31.83	26.24	28.39
3	5	29.75	28.28	25.00	27.89	28.50	21.85	30.00	24.16	26.93
4	69	45.75	43.87	52.15	52.25	47.70	40.43	57.15	55.03	49.29
5	30	36.00	36.32	39.49	44.22	36.00	31.77	44.49	40.64	38.62

**Tabla 21** Ángulo de fricción de los diferentes estratos del pozo PCQ0012.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

- PCQ0013

PCQ0013										
Estrato	N60	Terzagui y Peck	Peck y otros	Kishida	Schmertmann	JNR	JRB	Hatanaka y Uchida	Montenegro y Gonzales	Promedio
1	6	30.00	28.67	25.95	29.38	28.80	22.50	30.95	25.25	27.69
2	42	39.00	39.17	43.98	47.49	39.60	34.84	48.98	45.75	42.35
3	62	44.00	42.84	50.21	51.24	45.60	39.11	55.21	52.83	47.63

**Tabla 22** Ángulo de fricción de los diferentes estratos del pozo PCQ0013.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

- PCQ0014

PCQ0014										
Estrato	N60	Terzagui y Peck	Peck y otros	Kishida	Schmertmann	JNR	JRB	Hatanaka y Uchida	Montenegro y Gonzales	Promedio
1	8	30.50	29.43	27.65	31.84	29.40	23.66	32.65	27.17	29.04
2	19	33.25	33.18	34.49	39.80	32.70	28.35	39.49	34.96	34.53
3	62	44.00	42.84	50.21	51.24	45.60	39.11	55.21	52.83	47.63

**Tabla 23** Ángulo de fricción de los diferentes estratos del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.1.4.2. GRANULOMETRIA AGREGADOS GRUESOS

## 6.1.4.2.1. POZO PCQ0012

Análisis de curva granulométrica suelos grueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		9-9,45 [m]
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	100.00
4	4.75	99.90
10	2	99.30
20	0.85	96.70
40	0.425	81.50
50	0.3	64.38
100	0.15	39.90
200	0.075	25.20

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	18
Arena	56
Finos	25

D50	0.199659843
D10	0.049599583
D60	0.265008922
Cu	5.342966749

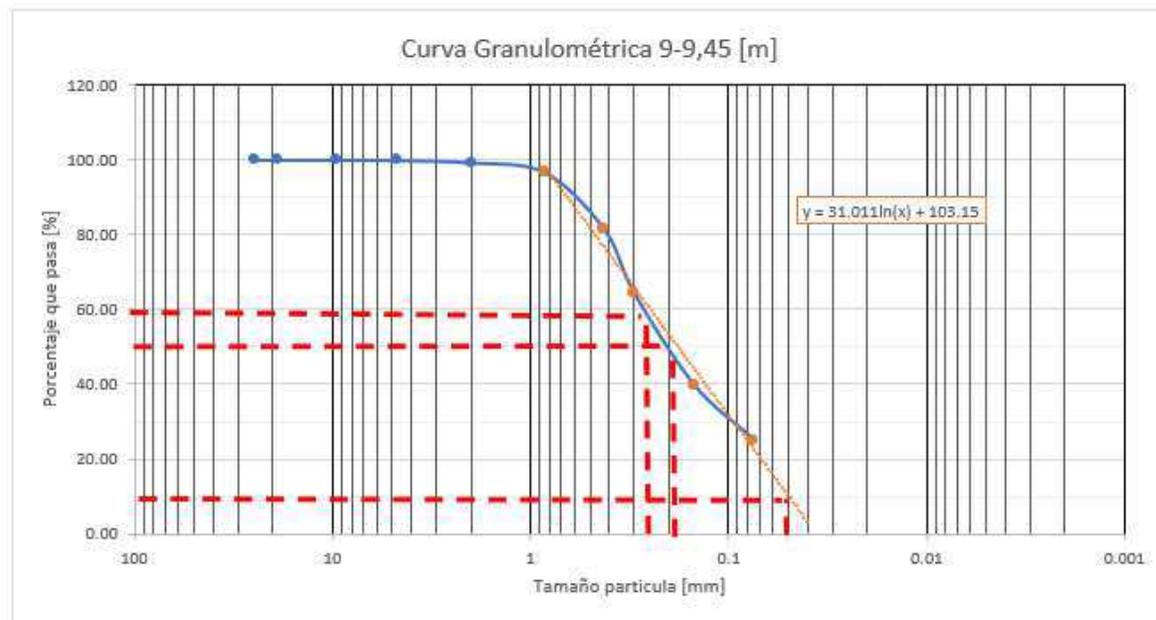


FIGURA 60 Análisis granulométrico de la abscisa 9-9.45 metros del pozo PCQ0012.

ELABORADO: (Bonilla &amp; López, 2022)

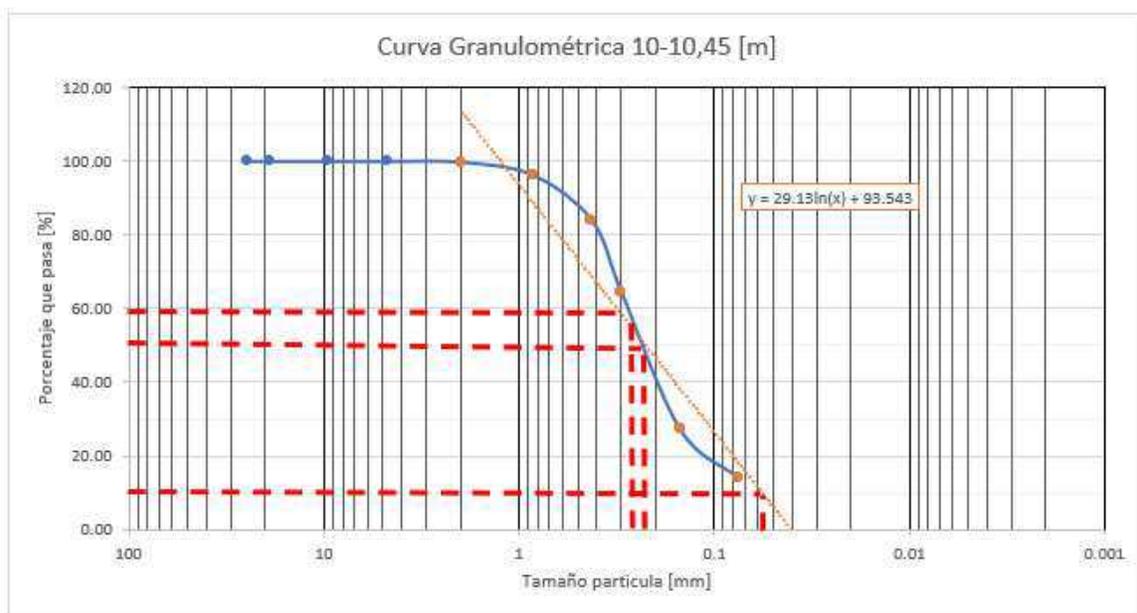
## Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		10-10,45 [m]
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	100.00
4	4.75	100.00
10	2	99.80
20	0.85	96.30
40	0.425	84.00
50	0.3	64.60
100	0.15	27.30
200	0.075	14.00

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa con grava

Grava	16
Arena	70
Finos	14

D50	0.228713510
D10	0.053046066
D60	0.275420912
Cu	5.192108173



**FIGURA 61** Análisis granulométrico de la abscisa 10-10.45 metros del pozo PCQ0012.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		11-11,45 [m]
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	100.00
4	4.75	100.00
10	2	100.00
20	0.85	99.30
40	0.425	89.00
50	0.3	73.30
100	0.15	44.00
200	0.075	30.40

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	11
Arena	59
Finos	30

D50	0.172876367
D10	0.040744196
D60	0.219016200
Cu	5.375396342

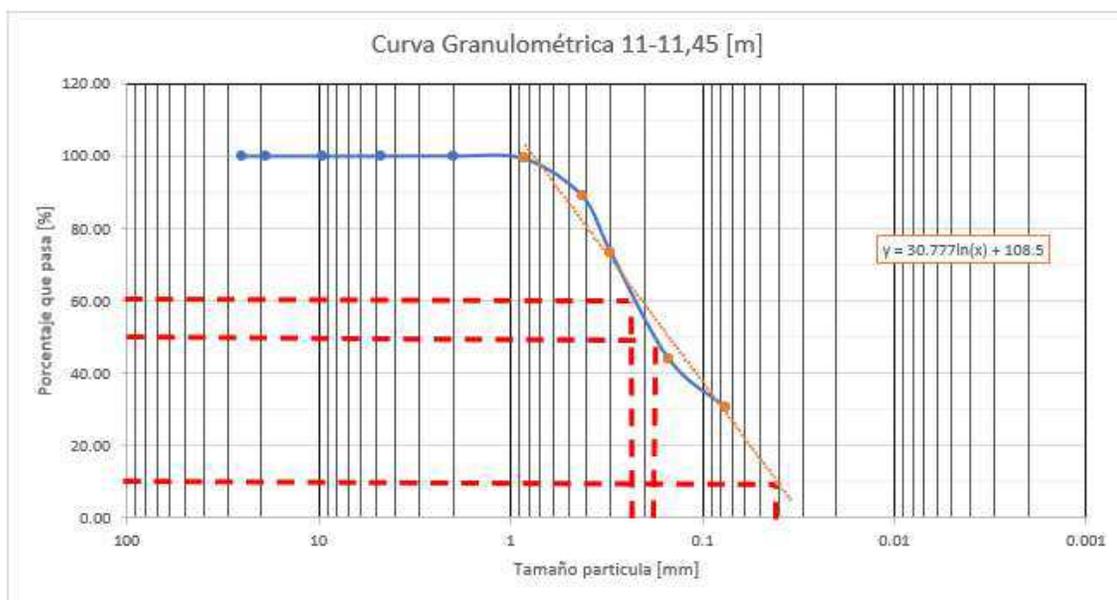


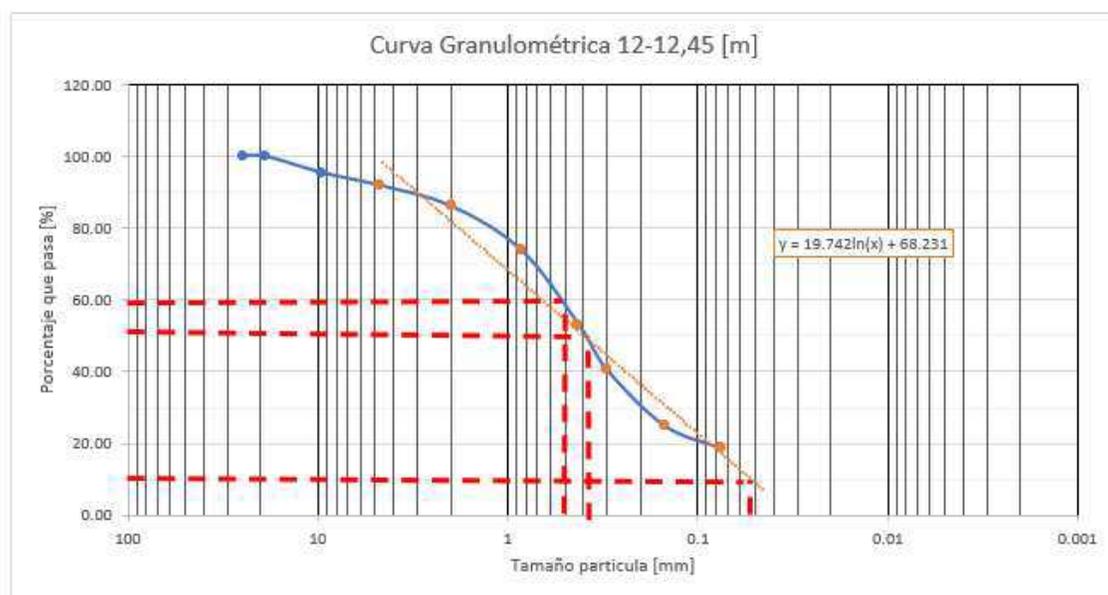
FIGURA 62 Análisis granulométrico de la abscisa 11-11.45 metros del pozo PCQ0012.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		12-12,45 [m]
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	95.40
4	4.75	91.90
10	2	86.20
20	0.85	73.90
40	0.425	53.20
50	0.3	40.50
100	0.15	25.10
200	0.075	18.80

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa con grava
Grava	47
Arena	34
Finos	19
D50	0.389290890
D10	0.052360655
D60	0.533676416
Cu	10.19231751



**FIGURA 63** Análisis granulométrico de la abscisa 12-12.45 metros del pozo PCQ0012.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.1.4.2.2. POZO PCQ0013

Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		8-8,45 [m]
3"	75	100.00
2"	50	100.00
1 1/2"	37.5	100.00
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	92.00
4	4.75	80.90
10	2	74.60
40	0.425	61.00
200	0.075	28.90

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa con grava
Grava	19
Arena	52
Finos	29
D50	0.234552066
D10	0.016281893
D60	0.379253876
Cu	23.29298405

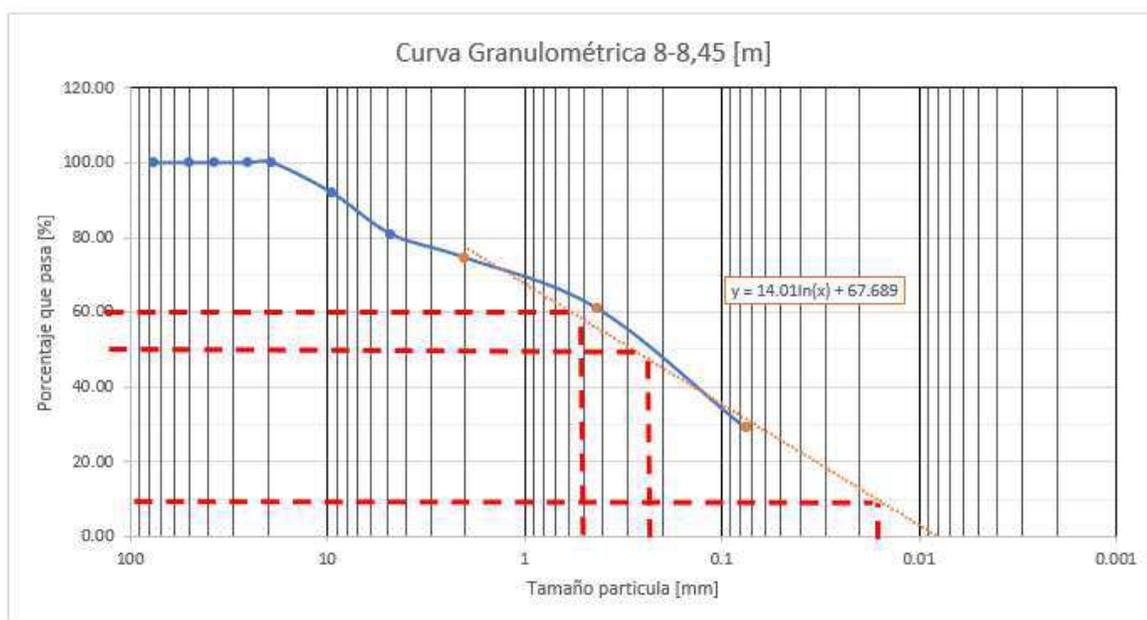


FIGURA 64 Análisis granulométrico de la abscisa 8-8.45 metros del pozo PCQ0013.

ELABORADO: (Bonilla &amp; López, 2022)

Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		9-9,45 [m]
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	100.00
4	4.75	98.70
10	2	94.10
20	0.85	89.10
40	0.425	81.40
50	0.3	74.00
100	0.15	59.60
200	0.075	45.40

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	1
Arena	53
Finos	45

D50	0.093881068
D10	0.013508384
D60	0.152916097
Cu	11.32008828

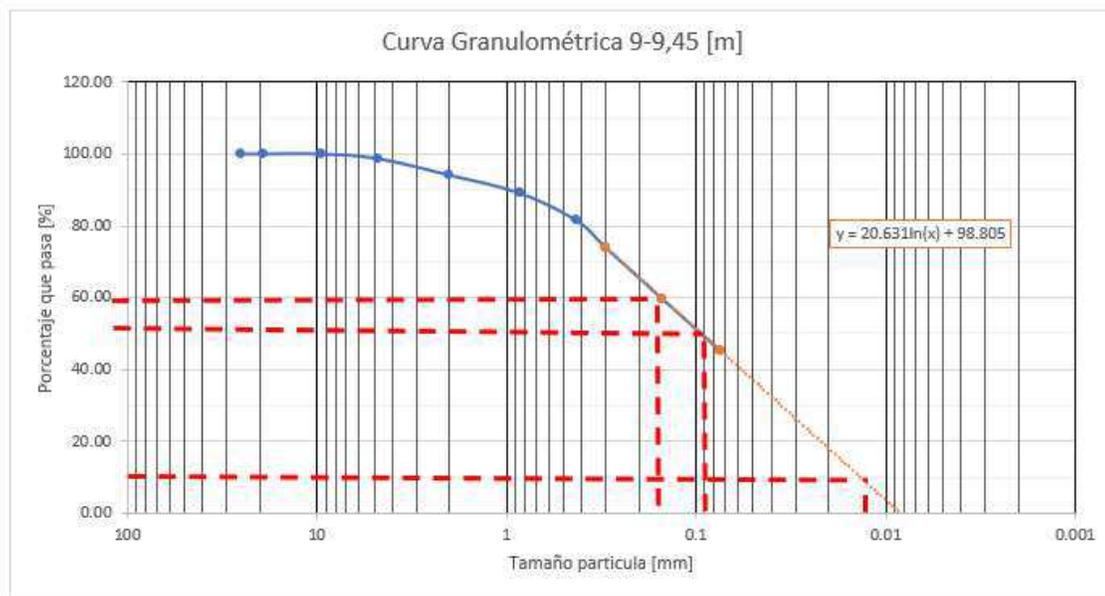


FIGURA 65 Análisis granulométrico de la abscisa 9-9.45 metros del pozo PCQ0013.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		10-10,45 [m]
3"	75	100.00
2"	50	100.00
1 1/2"	37.5	100.00
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	100.00
4	4.75	96.60
10	2	89.90
40	0.425	48.50
200	0.075	12.30

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	3
Arena	84
Finos	12

D50	0.449531349
D10	0.065461209
D60	0.653482062
Cu	9.982737481

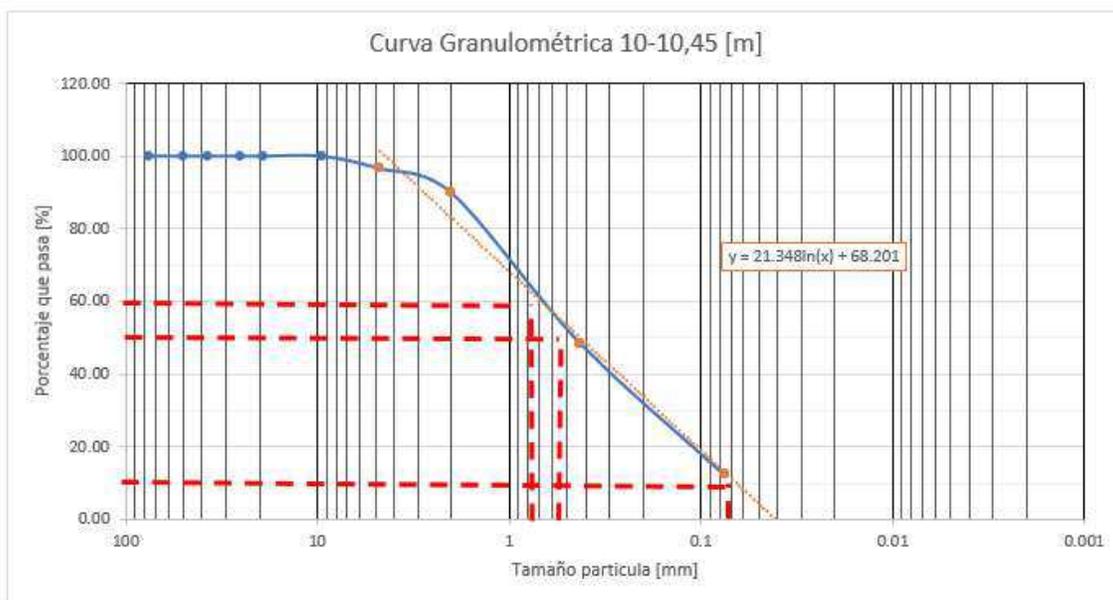


FIGURA 66 Análisis granulométrico de la abscisa 10-10.45 metros del pozo PCQ0013.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

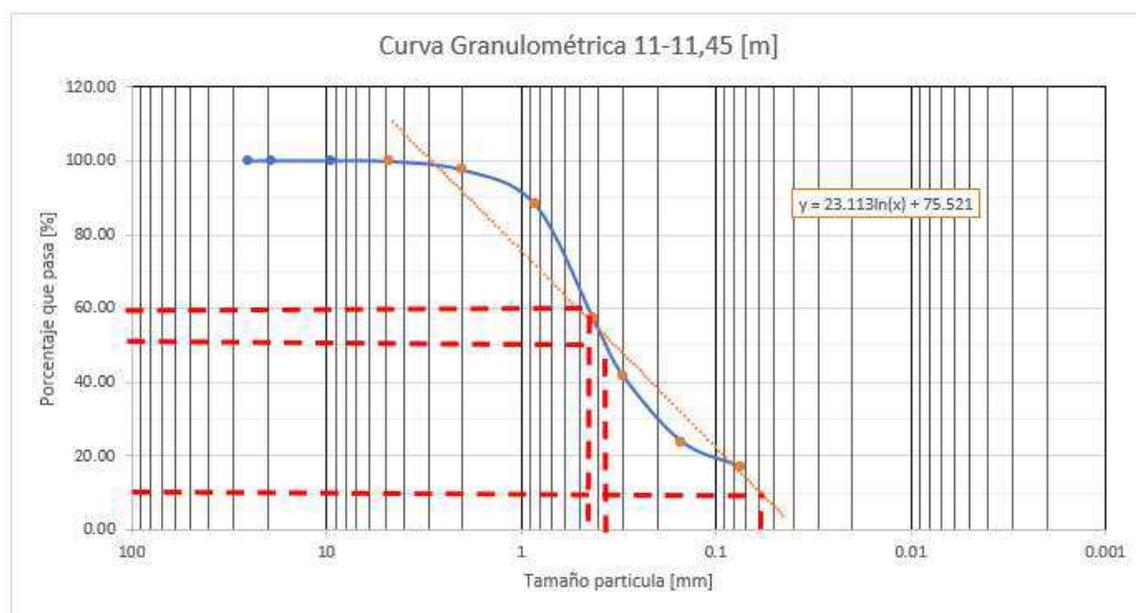
## Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		11-11,45 [m]
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	100.00
4	4.75	99.80
10	2	97.50
20	0.85	88.30
40	0.425	57.20
50	0.3	41.80
100	0.15	23.90
200	0.075	17.10

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	0
Arena	83
Finos	17

D50	0.361132339
D10	0.058729591
D60	0.452367410
Cu	7.702546603



**FIGURA 67** Análisis granulométrico de la abscisa 11-11.45 metros del pozo PCQ0013.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

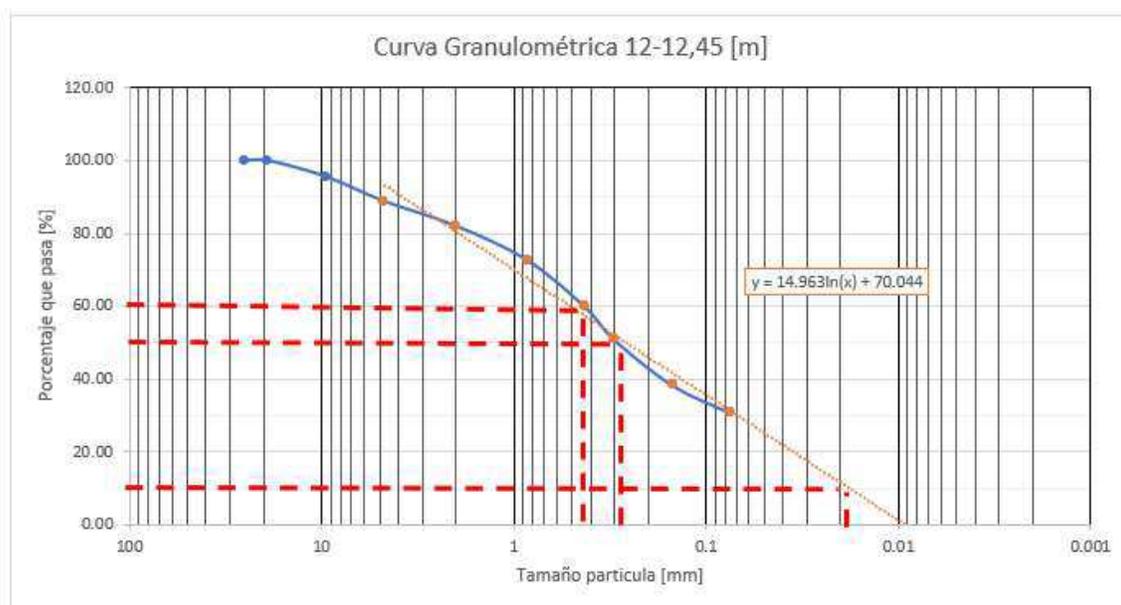
## Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		12-12,45 [m]
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	95.60
4	4.75	88.90
10	2	82.10
20	0.85	72.70
40	0.425	59.80
50	0.3	50.90
100	0.15	38.40
200	0.075	30.80

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	11
Arena	58
Finos	31

D50	0.285395483
D10	0.018082120
D60	0.429591878
Cu	23.75782641



**FIGURA 68** Análisis granulométrico de la abscisa 12-12.45 metros del pozo PCQ0013.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

6.1.4.2.3. POZO PCQ0014

Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		14-14,45 [m]
3"	75	100.00
2"	50	100.00
1 1/2"	37.5	100.00
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	95.50
4	4.75	92.60
10	2	90.70
40	0.425	79.00
200	0.075	49.10

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	7
Arena	43
Finos	49

D50	0.079019937
D10	0.007760752
D60	0.141151576
Cu	18.18787462

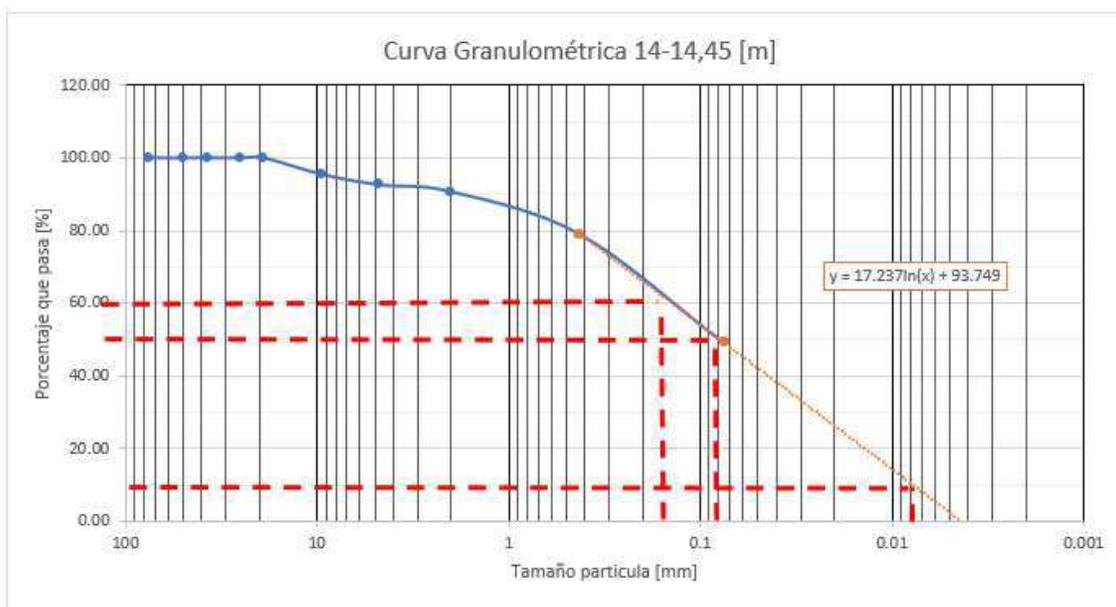


FIGURA 69 Análisis granulométrico de la abscisa 14-14.45 metros del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		15-15,45 [m]
3"	75	100.00
2"	50	100.00
1 1/2"	37.5	100.00
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	99.00
4	4.75	96.90
10	2	94.80
40	0.425	73.10
200	0.075	40.00

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	3
Arena	57
Finos	40

D50	0.126663856
D10	0.011557860
D60	0.213916431
Cu	18.50830743

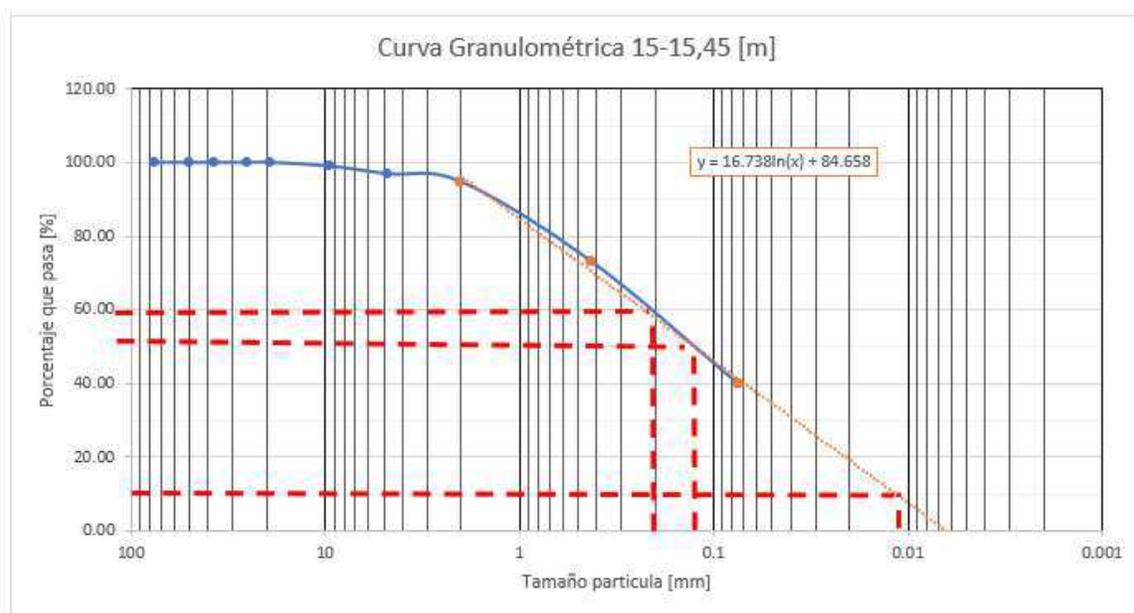


FIGURA 70 Análisis granulométrico de la abscisa 15-15.45 metros del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

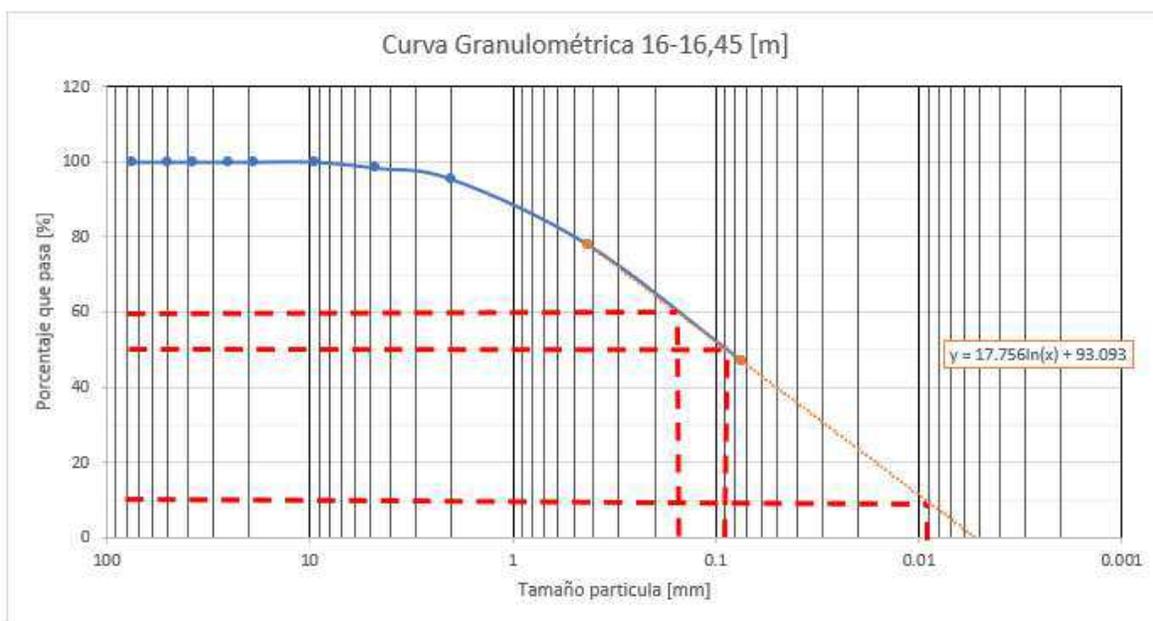
## Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		16-16,45 [m]
3"	75	100
2"	50	100
1 1/2"	37.5	100
1"	25	100
3/4"	19	100
3/8"	9.5	100
4	4.75	98.4
10	2	95.4
40	0.425	77.9
200	0.075	47.1

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	2
Arena	51
Finos	47

D50	0.088306255
D10	0.009281669
D60	0.155088063
Cu	16.7090706



**FIGURA 71** Análisis granulométrico de la abscisa 16-16.45 metros del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

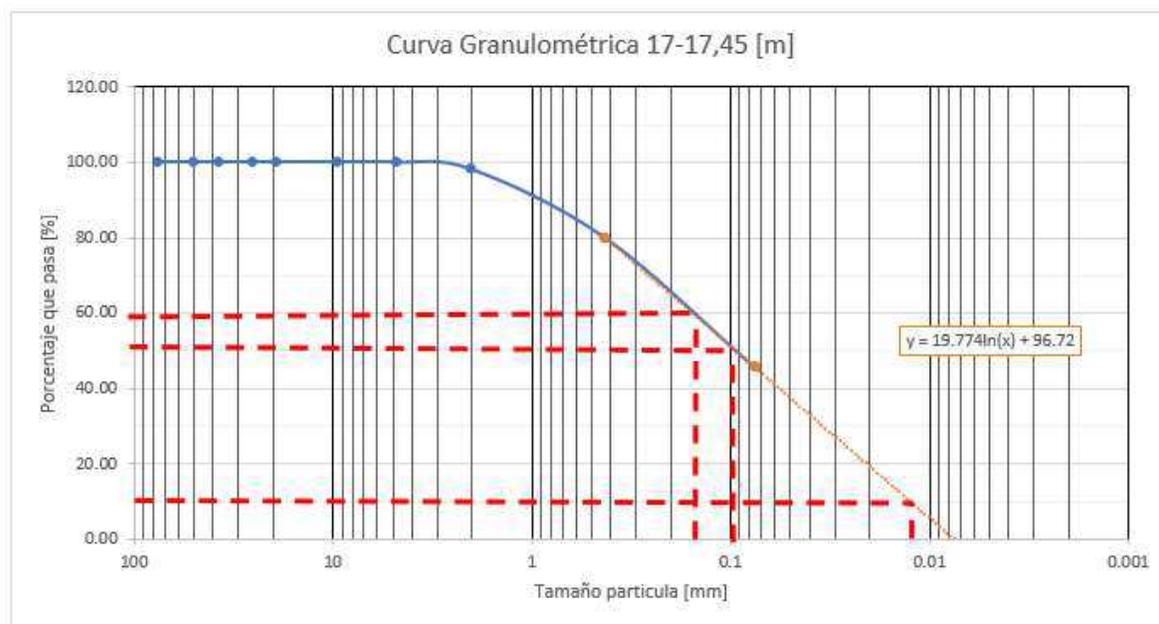
## Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		17-17,45 [m]
3"	75	100.00
2"	50	100.00
1 1/2"	37.5	100.00
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	100.00
4	4.75	99.90
10	2	98.00
40	0.425	79.80
200	0.075	45.50

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	0
Arena	54
Finos	46

D50	0.094166047
D10	0.012455951
D60	0.156143315
Cu	12.53563999



**FIGURA 72** Análisis granulométrico de la abscisa 17-17.45 metros del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		18-18,45 [m]
3"	75	100.00
2"	50	100.00
1 1/2"	37.5	100.00
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	93.30
4	4.75	92.60
10	2	90.50
40	0.425	67.90
200	0.075	36.60

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	7
Arena	56
Finos	37

D50	0.157605783
D10	0.014101265
D60	0.274316490
Cu	19.45332473

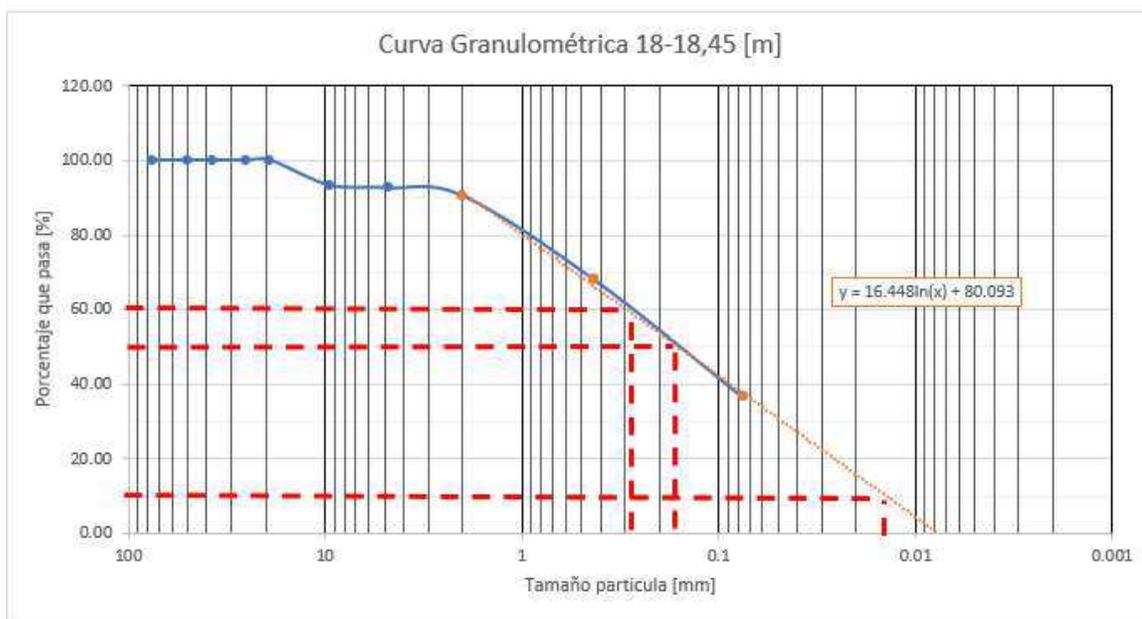


FIGURA 73 Análisis granulométrico de la abscisa 18-18.45 metros del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		19-19,45 [m]
3"	75	100.00
2"	50	100.00
1 1/2"	37.5	100.00
1"	25	100.00
3/4"	19	87.80
3/8"	9.5	83.70
4	4.75	81.40
10	2	77.70
40	0.425	57.40
200	0.075	28.20

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa con grava

Grava	19
Arena	53
Finos	28

D50	0.273827540
D10	0.021109113
D60	0.518250825
Cu	24.55104678

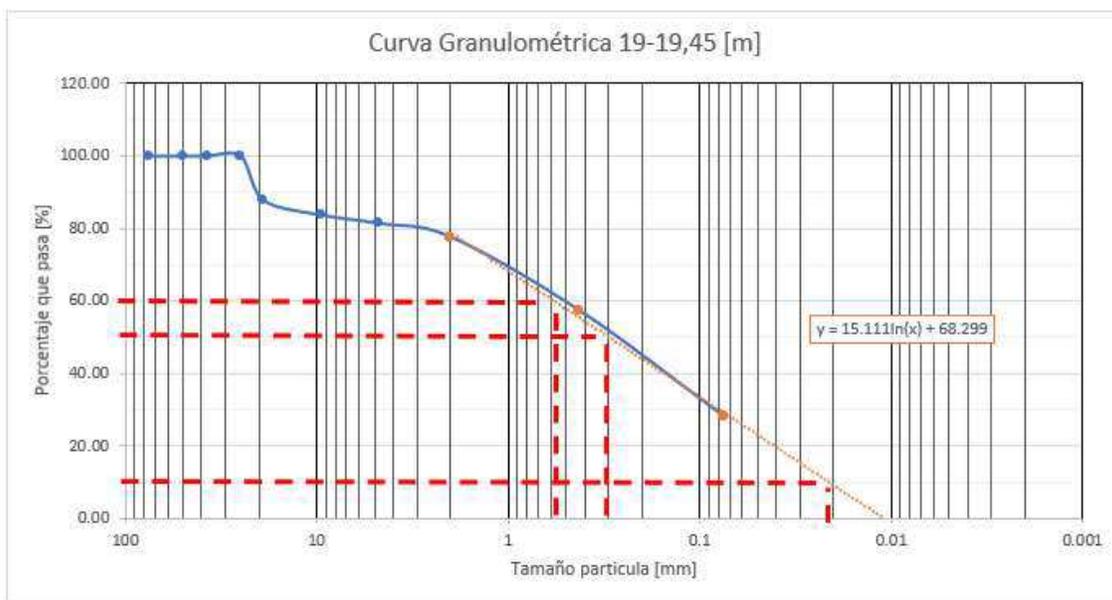


FIGURA 74 Análisis granulométrico de la abscisa 19-19.45 metros del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

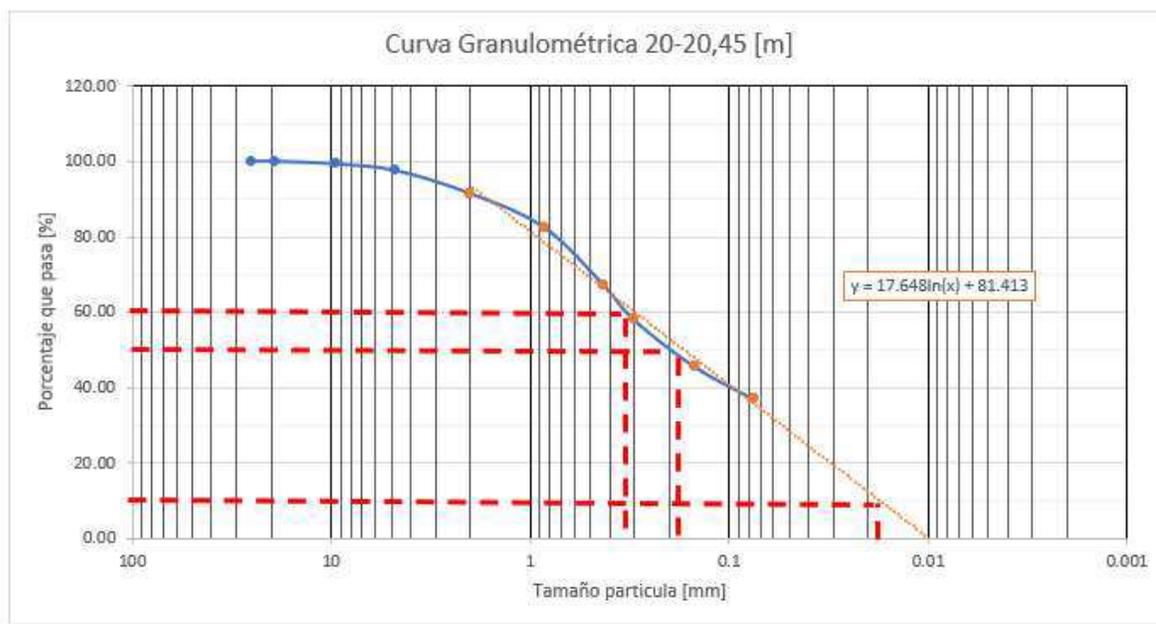
## Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		20-20,45 [m]
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	99.30
4	4.75	97.60
10	2	91.50
20	0.85	82.60
40	0.425	67.20
50	0.3	58.10
100	0.15	45.80
200	0.075	37.10

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa con grava

Grava	33
Arena	30
Finos	37

D50	0.190056177
D10	0.017483095
D60	0.322629901
Cu	18.45382053



**FIGURA 75** Análisis granulométrico de la abscisa 20-20.45 metros del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

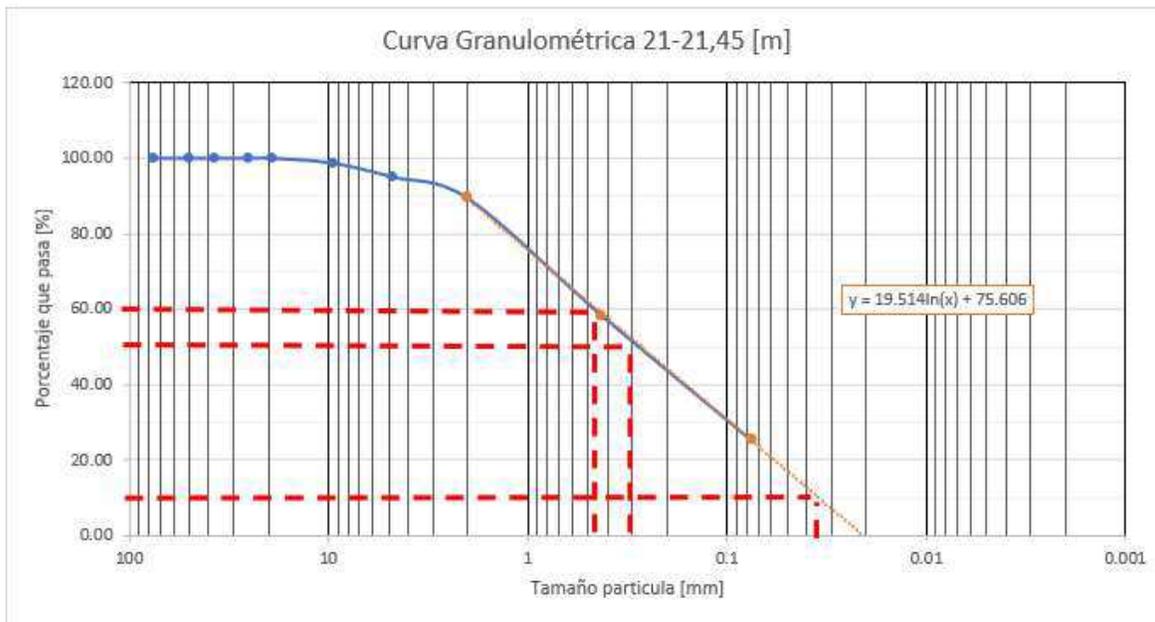
## Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		21-21,45 [m]
3"	75	100.00
2"	50	100.00
1 1/2"	37.5	100.00
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	98.70
4	4.75	95.00
10	2	89.40
40	0.425	58.40
200	0.075	25.30

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	5
Arena	70
Finos	25

D50	0.273660503
D10	0.034665979
D60	0.460368806
Cu	13.28013296



**FIGURA 76** Análisis granulométrico de la abscisa 21-21.45 metros del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

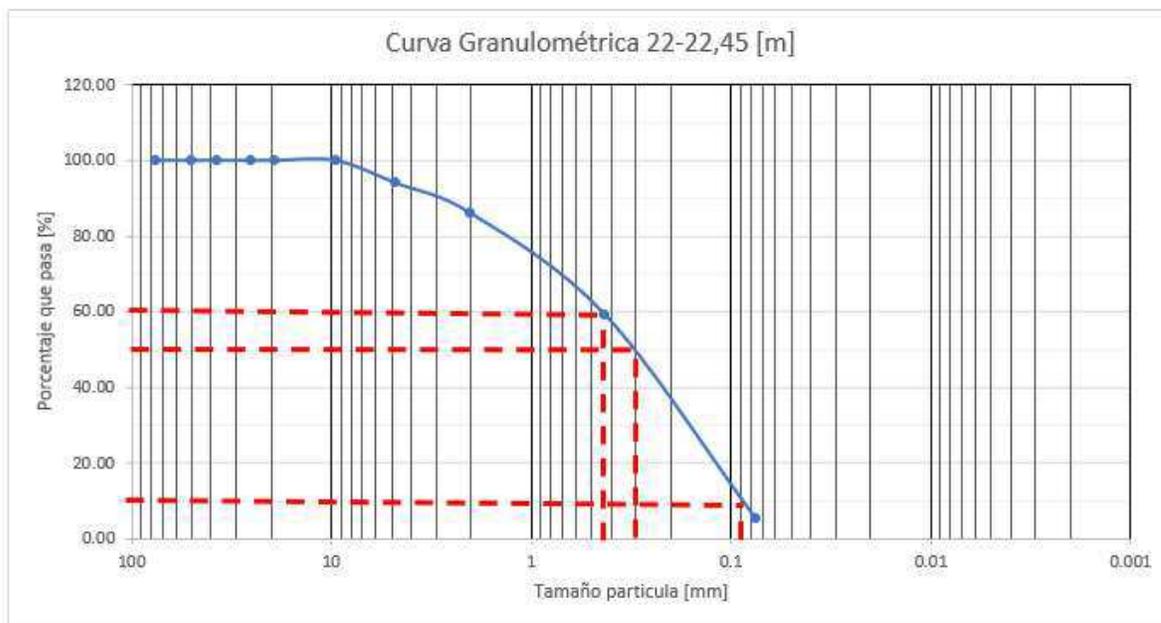
## Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		22-22,45 [m]
3"	75	100.00
2"	50	100.00
1 1/2"	37.5	100.00
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	100.00
4	4.75	94.00
10	2	86.00
40	0.425	59.20
200	0.075	5.40

Clasificación	SP-SM
Nombre típico	Arena mal graduada con Limo

Grava	6
Arena	89
Finos	5

D50	0.315912710
D10	0.086990571
D60	0.445110427
Cu	5.116766382



**FIGURA 77** Análisis granulométrico de la abscisa 22-22.45 metros del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

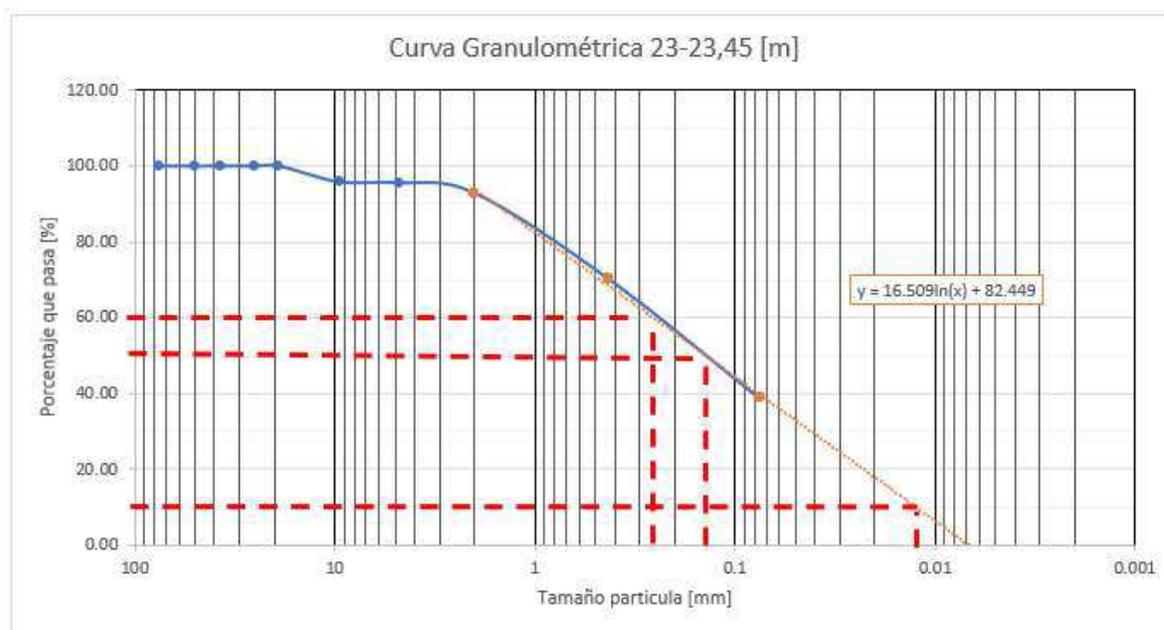
Análisis de curva granulométrica suelos gueso

Abertura tamizes	Abertura [mm]	Profundidad
		23-23,45 [m]
3"	75	100.00
2"	50	100.00
1 1/2"	37.5	100.00
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
3/8"	9.5	95.80
4	4.75	95.60
10	2	92.90
40	0.425	70.20
200	0.075	38.80

Clasificación	SM
Nombre típico	Arena Limosa

Grava	4
Arena	57
Finos	39

D50	0.139240036
D10	0.012419906
D60	0.241923131
Cu	19.47866063



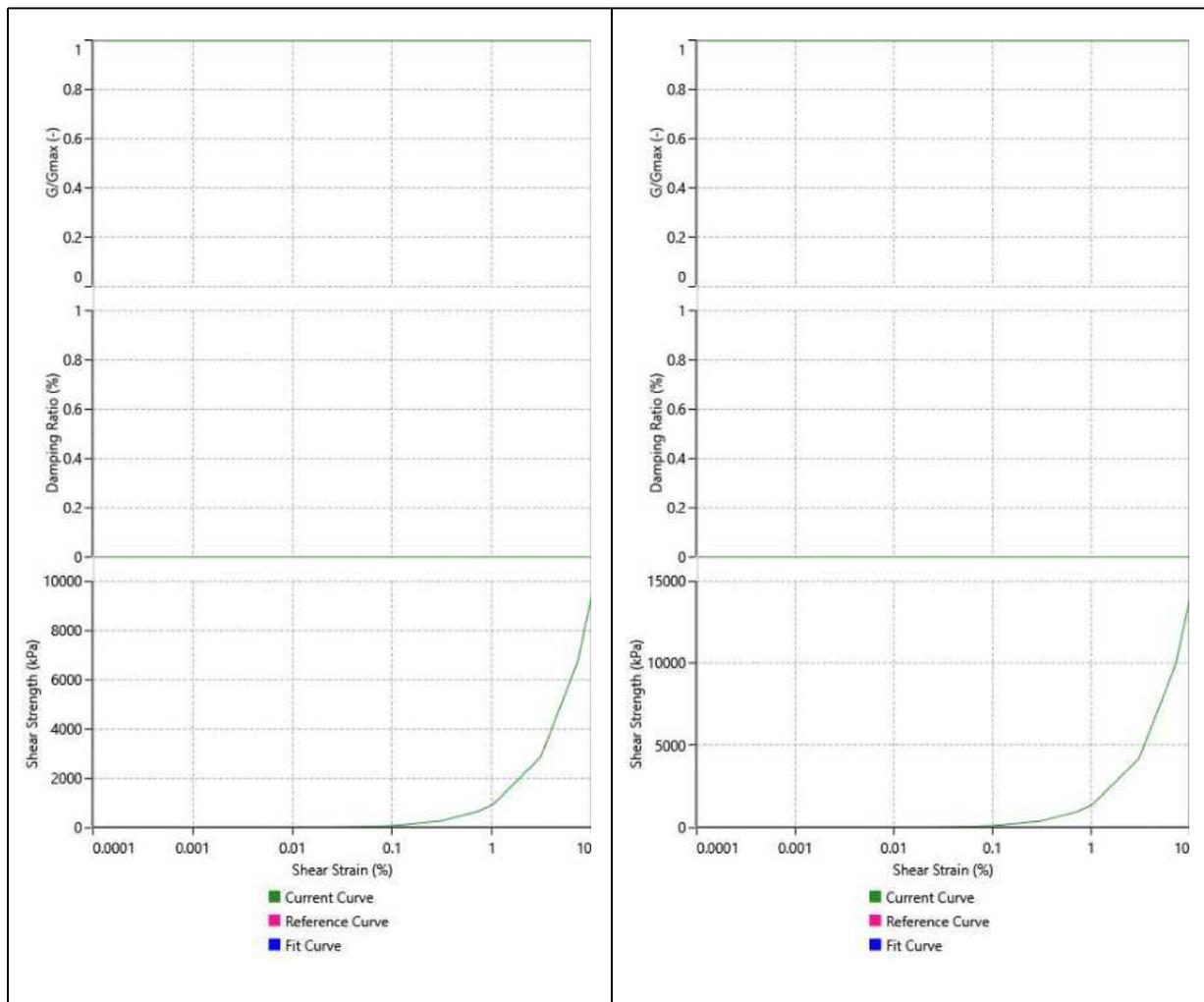
**FIGURA 78** Análisis granulométrico de la abscisa 23-23.45 metros del pozo PCQ0014.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.2. GRÁFICAS DEL SUELO

### 6.2.1. POZO PCQ0012

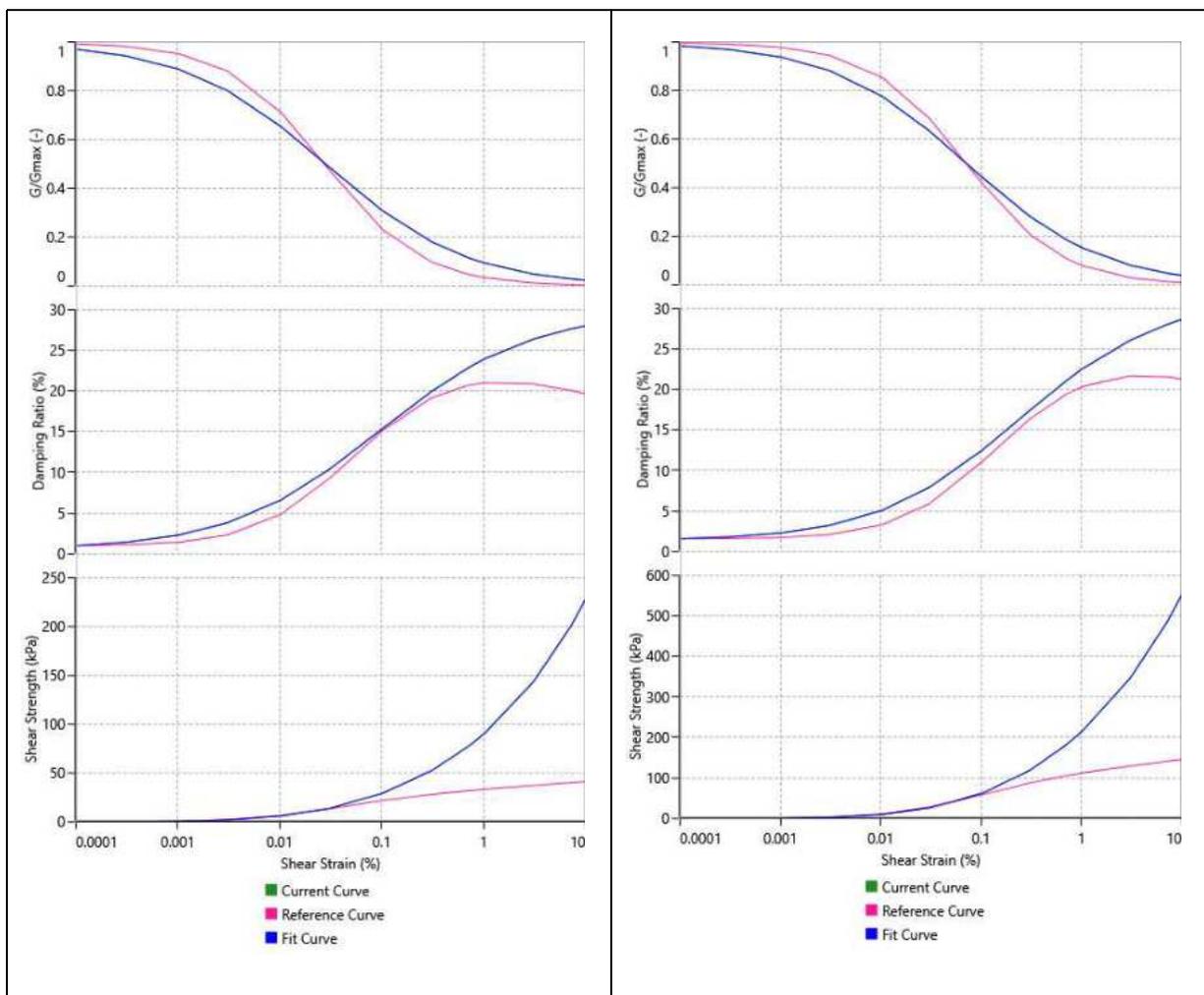
#### 6.2.1.1. MÉTODO LINEAL



**FIGURA 79** Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal de los estratos de suelo del pozo PCQ0012, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.2.1.2. MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE

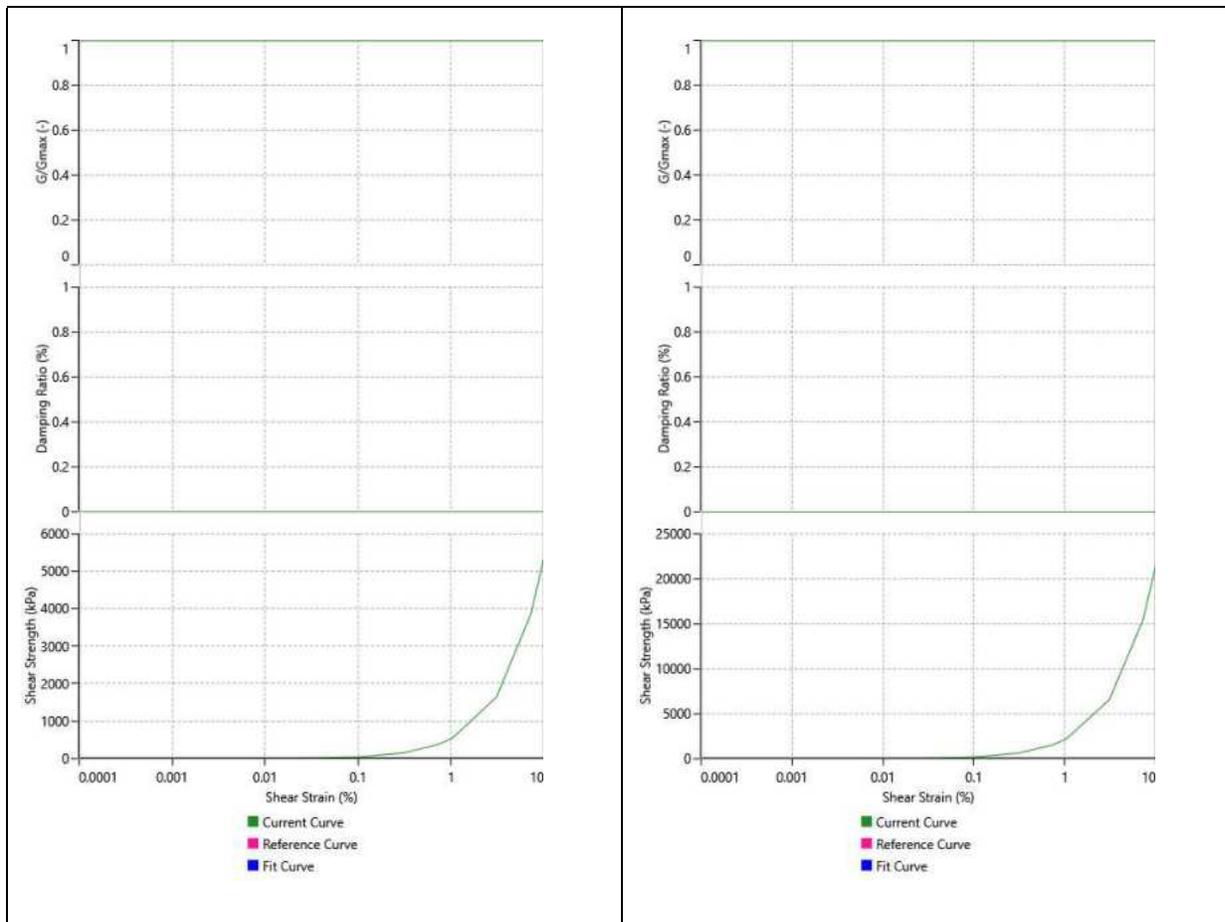


**FIGURA 80** Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal equivalente de los estratos de suelo del pozo PCQ0012, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.2.2. POZO PCQ0013

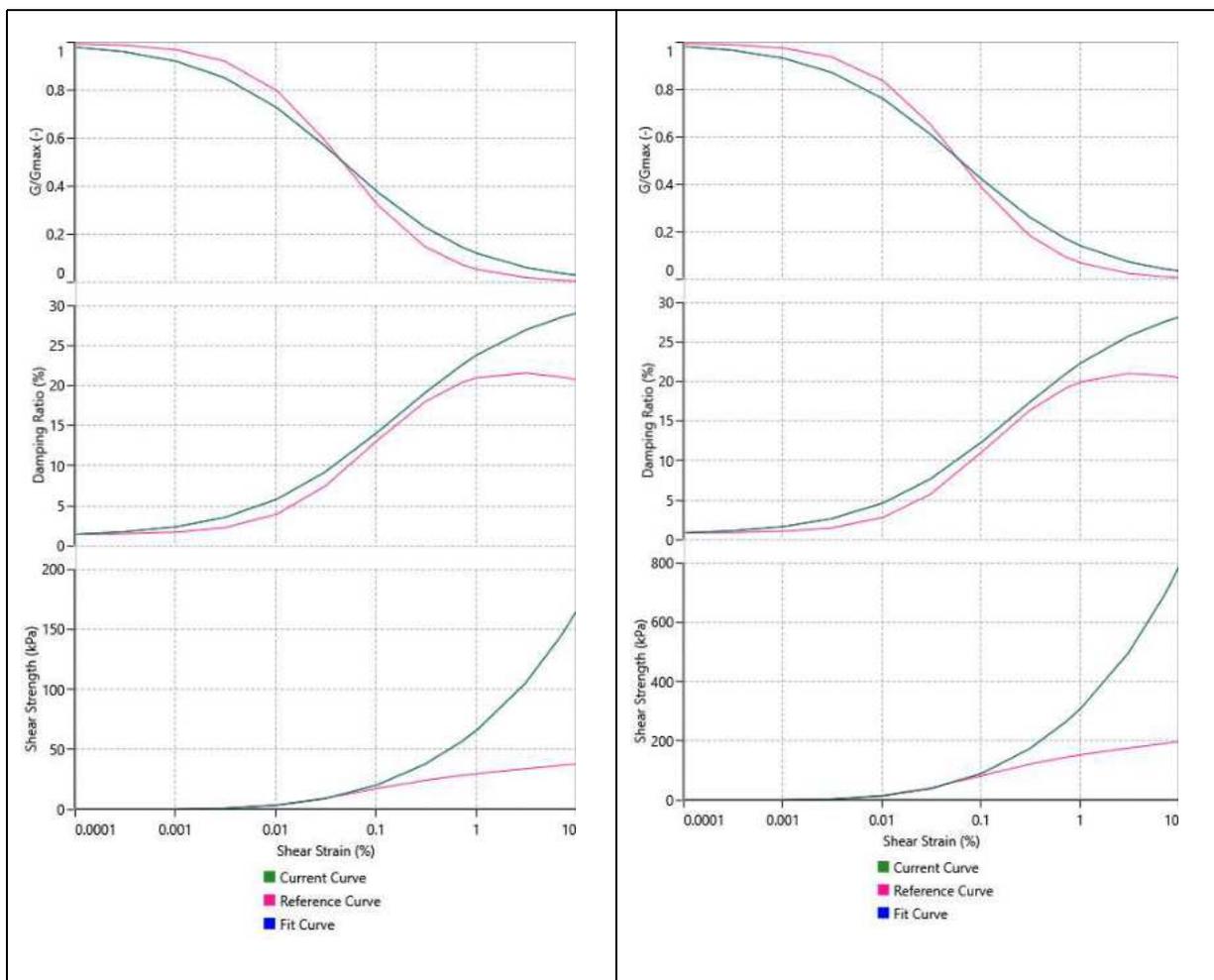
## 6.2.2.1. MÉTODO LINEAL



**FIGURA 81** Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal de los estratos de suelo del pozo PCQ0013, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.2.2.2. MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE

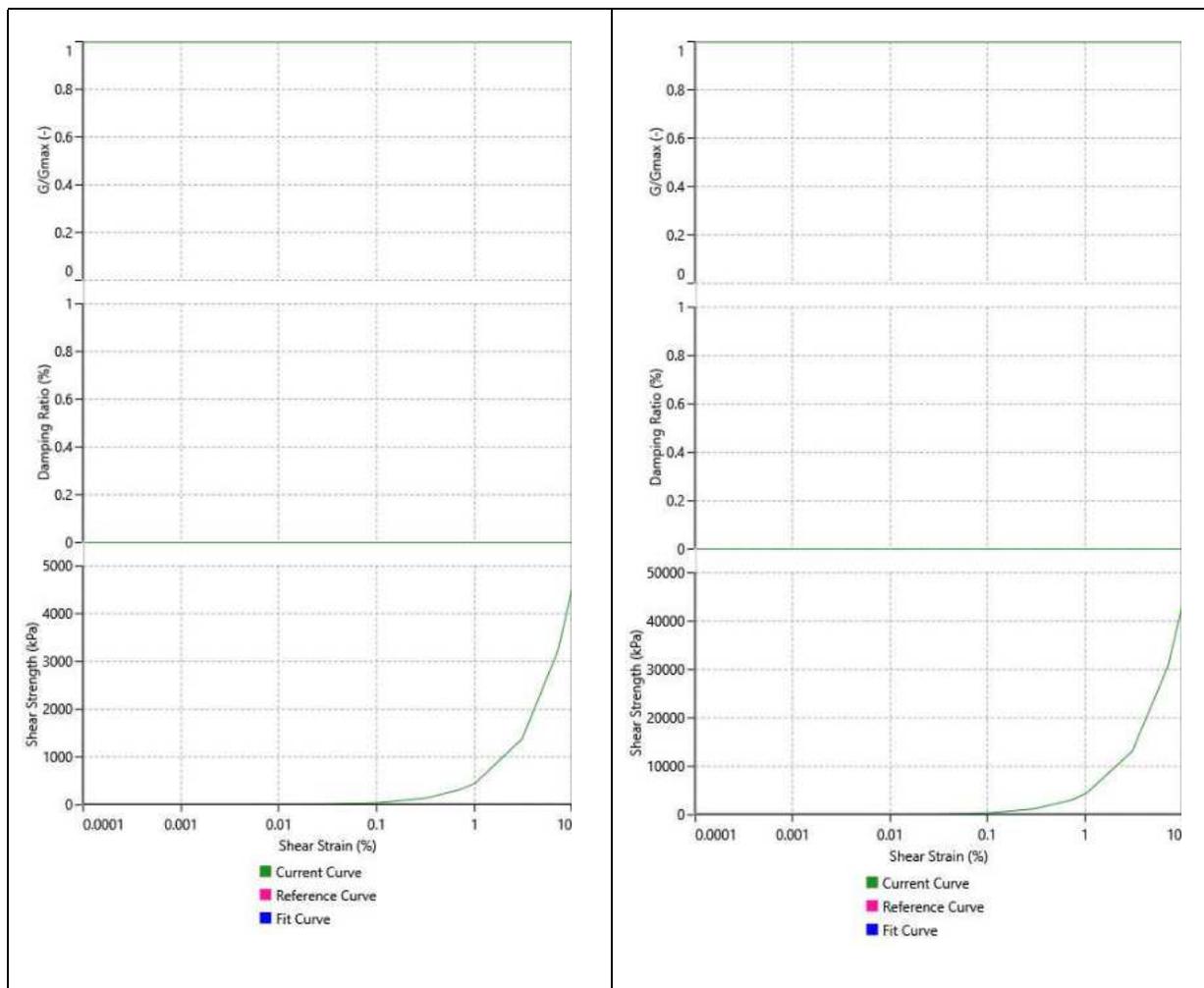


**FIGURA 82** Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal equivalente de los estratos de suelo del pozo PCQ0013, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.2.3. POZO PCQ0014

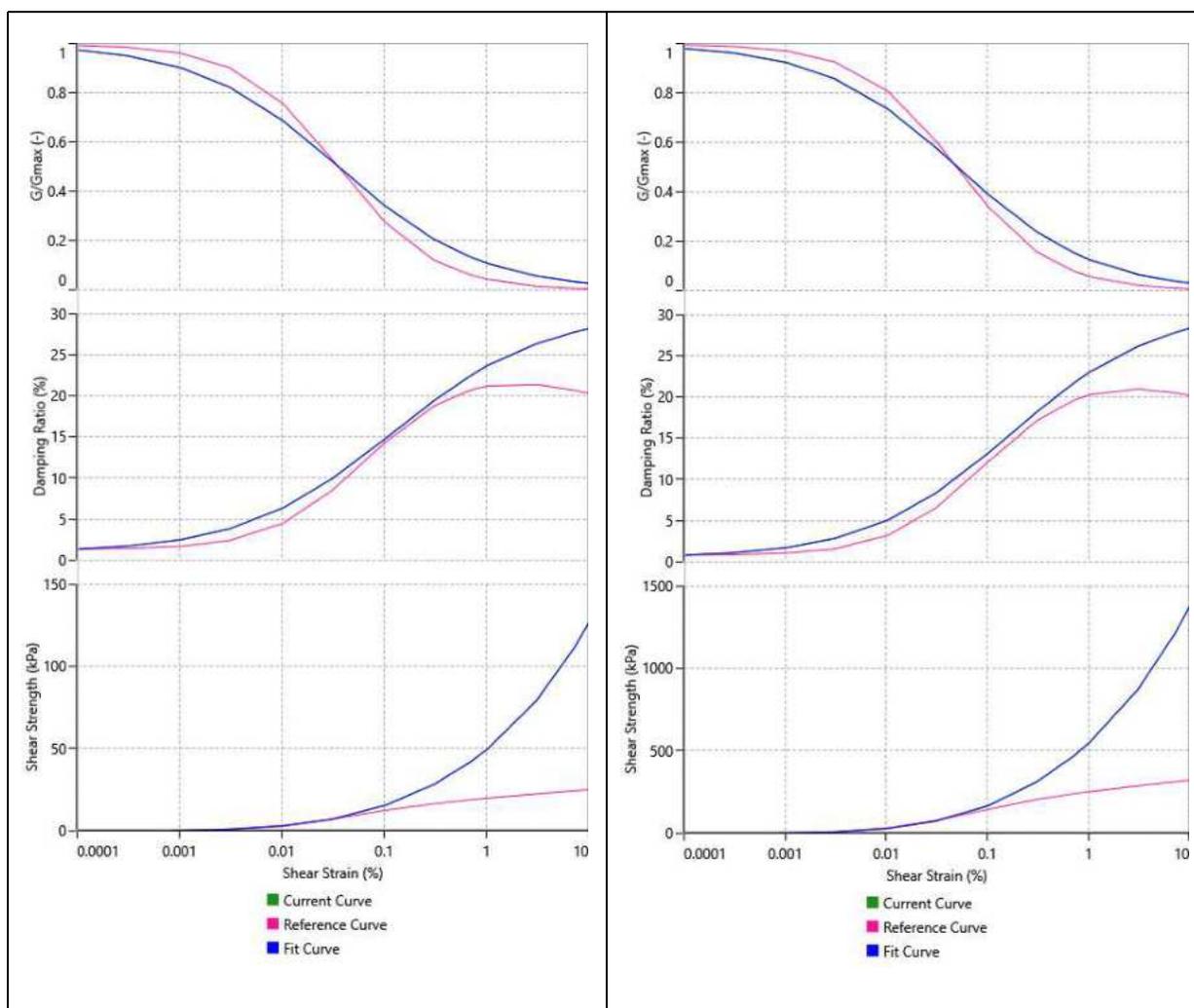
## 6.2.3.1. MÉTODO LINEAL



**FIGURA 83** Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal de los estratos de suelo del pozo PCQ0014, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.2.3.2. MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE



**FIGURA 84** Gráficas de las curvas: Degradación del módulo de corte, Degradación del amortiguamiento y Esfuerzo vs Deformación cortante, mediante el método lineal equivalente de los estratos de suelo del pozo PCQ0014, a la izquierda primer estrato, a la derecha segundo estrato.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

### 6.3. GLOSARIO DE TERMINOS DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS

<b>Glosario de traducción de términos, unidades y nomenclatura</b>			
<b>Nombre en ingles</b>	<b>Nombre en español</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nomenclatura</b>
Thickness	Espesor de capa	m	-
Unit Weight	Peso específico	KN/m <sup>3</sup>	-
Shear Wave Velocity	Velocidad de onda de corte	m/s	Vs
Shear modulus	Módulo de corte	MPa	G
Effective Vertical Stress	Tensión vertical efectiva	KPa	$\sigma'_v$
Damping ratio	Relación de amortiguamiento	%	Dmin
Shear strain	Deformación cortante	%	$\gamma$
Shear strength- Shear stress	Esfuerzo cortante	KPa	$\tau$
Friction Angle	Angulo de fricción	Grados	$\Phi$
Natural Frequency	Frecuencia natural	Hz	-
Effective Shear Strain	Deformación de corte efectiva		SSR

**Tabla 24** Glosario de términos que utilizan los programas Deepsoil y Proshake

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.4. MODELOS DE SUELO

### 6.4.1. PROSHAKE

Tipos de suelos	
Nombre	Característica
Darandeli (2001)	Curva definida por parámetros geotécnicos
EPRI	Curva precargada
Gravel (Seed et al.)	Curva precargada
Ishibashi & Zhang (1993)	Curva definida por parámetros geotécnicos
Linear	Curva definida por parámetros geotécnicos
Menq (2003)	Curva definida por parámetros geotécnicos
Rock (Idriss)	Curva definida por parámetros geotécnicos para el basamento rocoso
Sand (Seed & Idriss)	Curva definida por parámetros geotécnicos para estratos gruesos
Vucetic - Dobry	Curva definida por parámetros geotécnicos

**Tabla 25** Tipos de suelo del programa Proshake

FUENTE: (EduPro Civil Systems, Inc., 2017).

### 6.4.2. DEEPSOIL

Tipos de suelos	
Nomenclatura	Nombre
Linear	Lineal
GQ/H	General Quadratic/ Hiperbolic Model
MKZ	Pressure-Dependent / Modified Kondner Zelasko
Discrete points	Equivalent Linear
User defined	UMAT

**Tabla 26** Tipos de suelo del programa Deepsoil.

FUENTE: (Hashash Y., y otros, 2020)

## 6.4.2.1. NOMENCLATURA MODELOS DE SUELO

Nomenclatura	Descripción de modelo
Lineal	
DS-FL0	Dominio de la frecuencia lineal
DS-TL0	Dominio del tiempo lineal
Lineal Equivalente	
DS-EL0	Dominio de la frecuencia-lineal equivalente-puntos discretos
DS-EL1	Dominio de la frecuencia-lineal equivalente-MKZ-reglas de Masing
DS-EL2	Dominio de la frecuencia-lineal equivalente- MKZ- sin reglas de Masing
DS-EL3	Dominio de la frecuencia-lineal equivalente- GQ/H-reglas de Masing
DS-EL4	Dominio de la frecuencia-lineal equivalente- GQ/H-sin reglas de Masing

**Tabla 27** Nomenclatura de los modelos de suelo del programa Deepsoil.

FUENTE: (Hashash Y., y otros, 2020)

## 6.5. SEÑALES, DENSIDADES ESPECTRALES Y FUNCION DE TRASFERENCIA

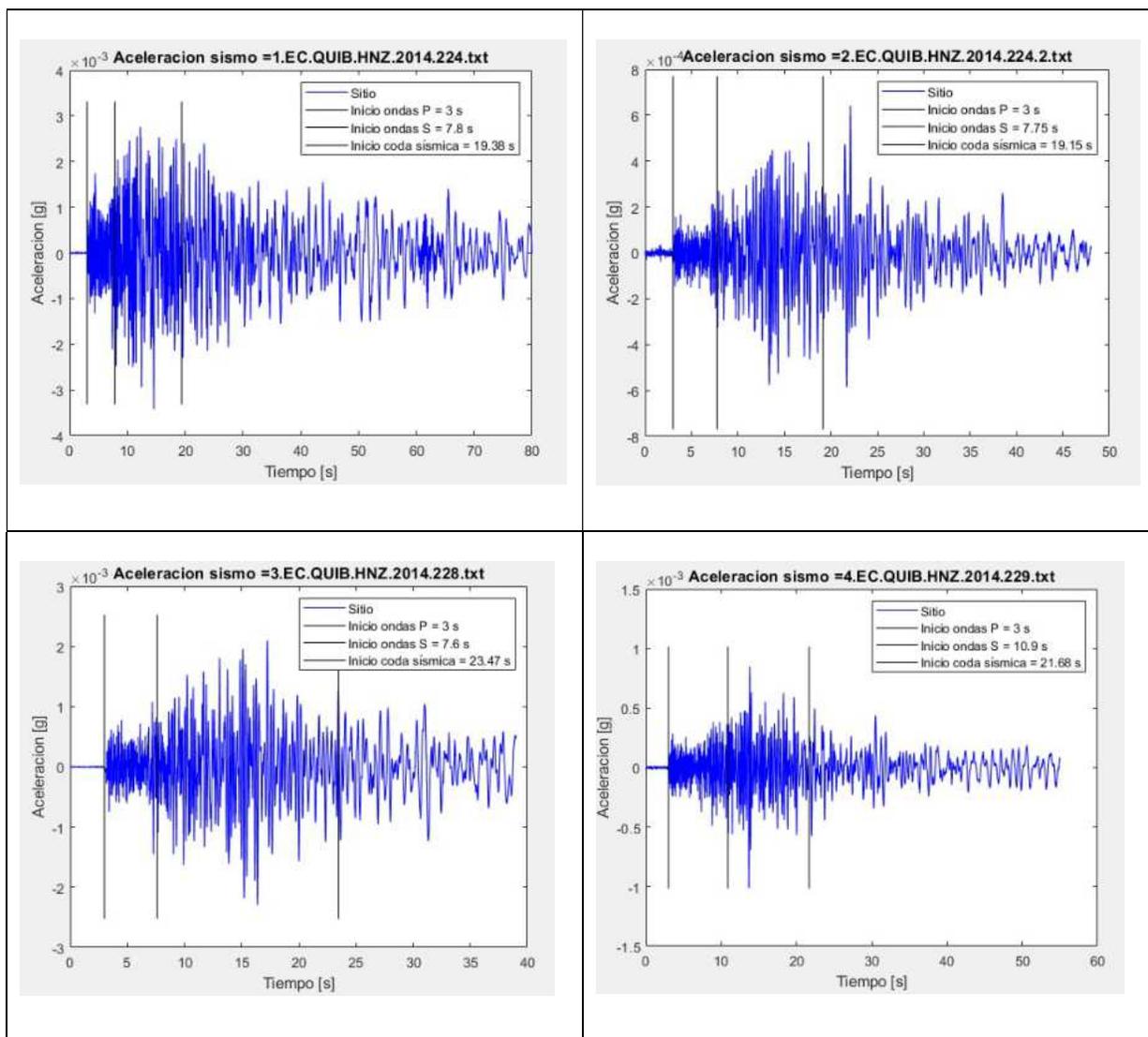
### 6.5.1. SEÑALES UTILIZADAS

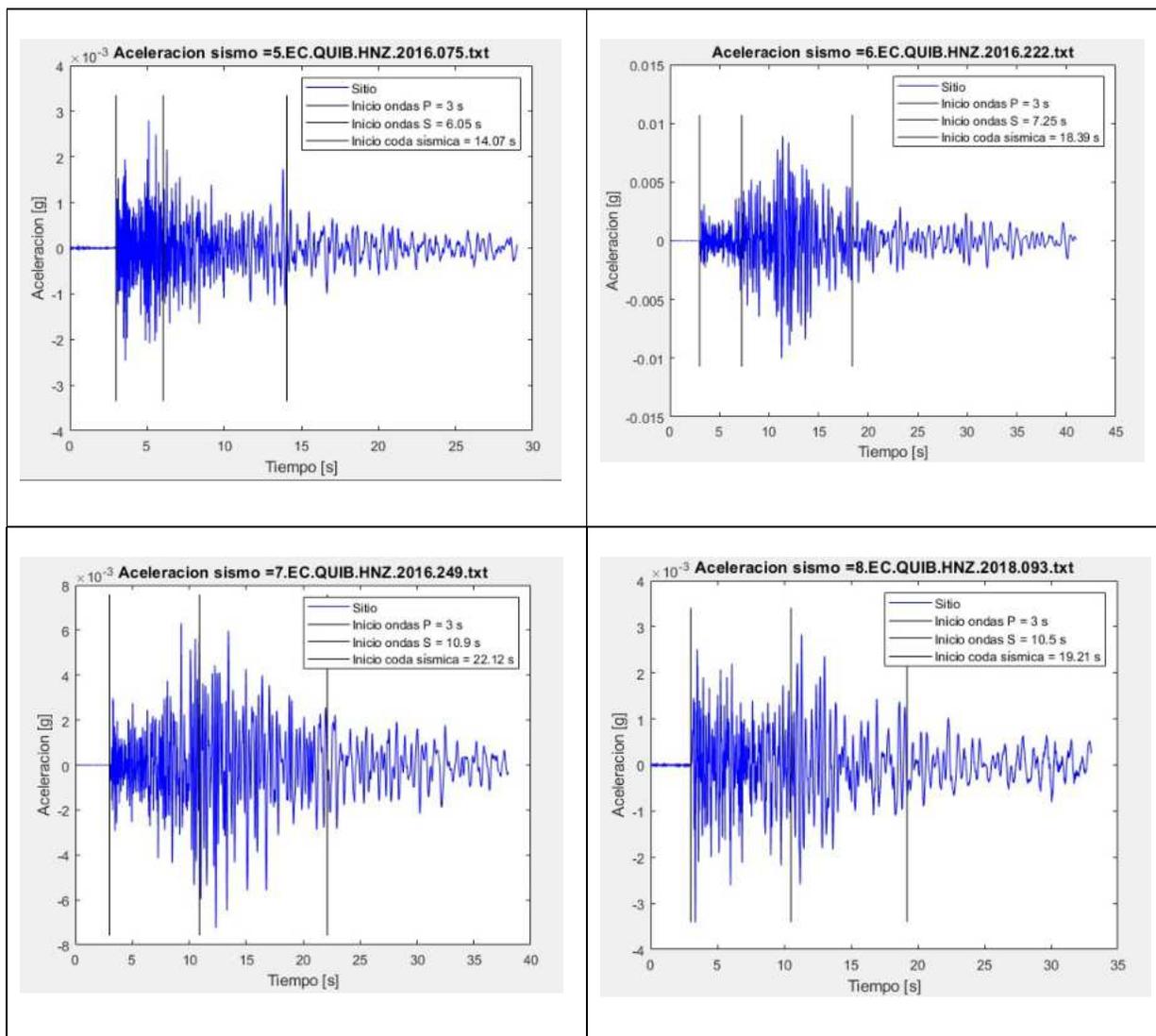
Evento	Inicio onda P (s)	Inicio onda S (s)	Inicio Coda sísmica (s)
1	3	7.8	19.38
2	3	7.75	19.15
3	3	7.6	23.47
4	3	10.9	21.68
5	3	6.05	14.07
6	3	7.25	18.39
7	3	10.9	22.12
8	3	10.5	19.21

**Tabla 28.** Inicio de onda P, S y Coda sísmica en las señales utilizadas

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.5.1.1. COMPONENTE VERTICAL

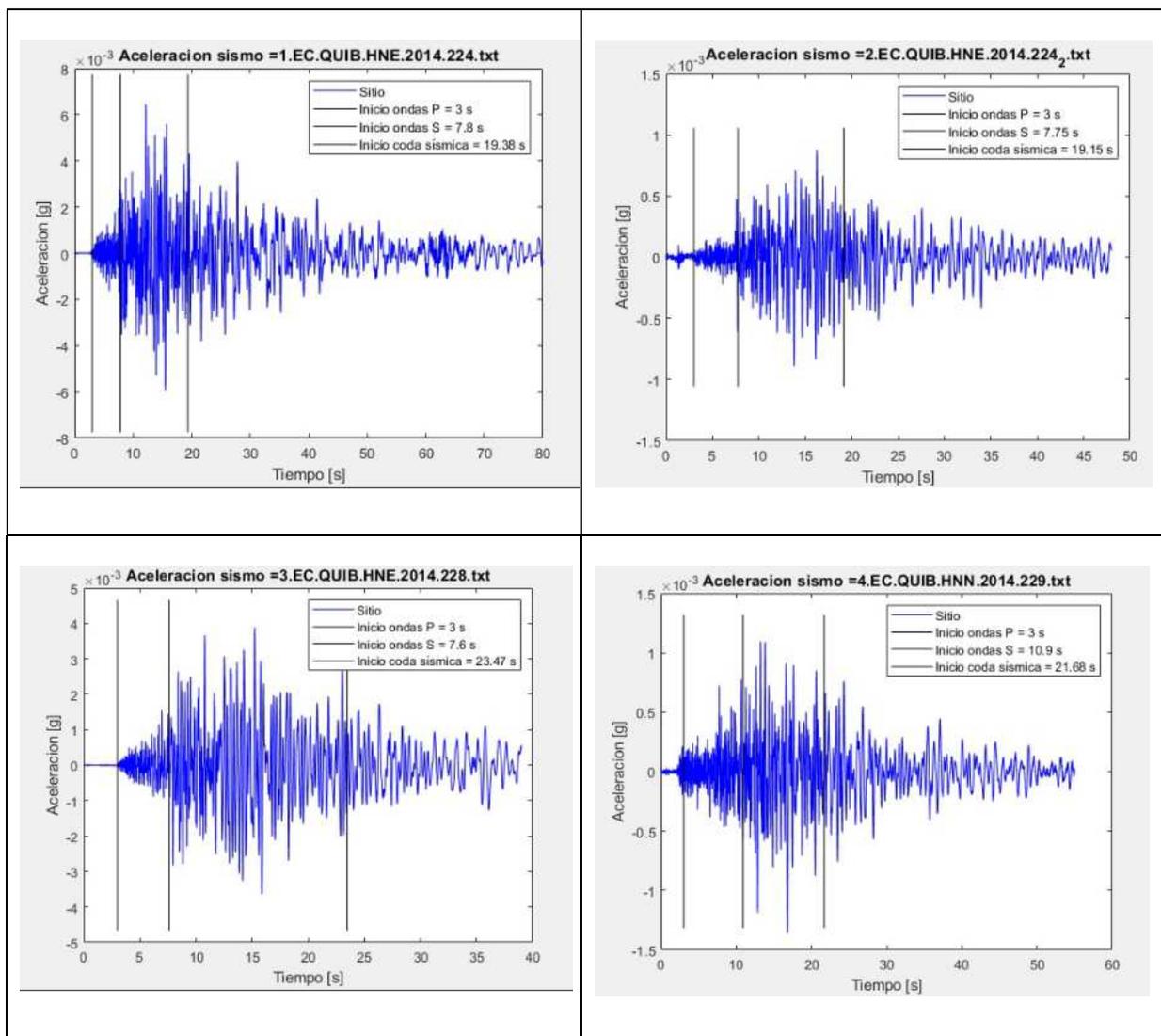


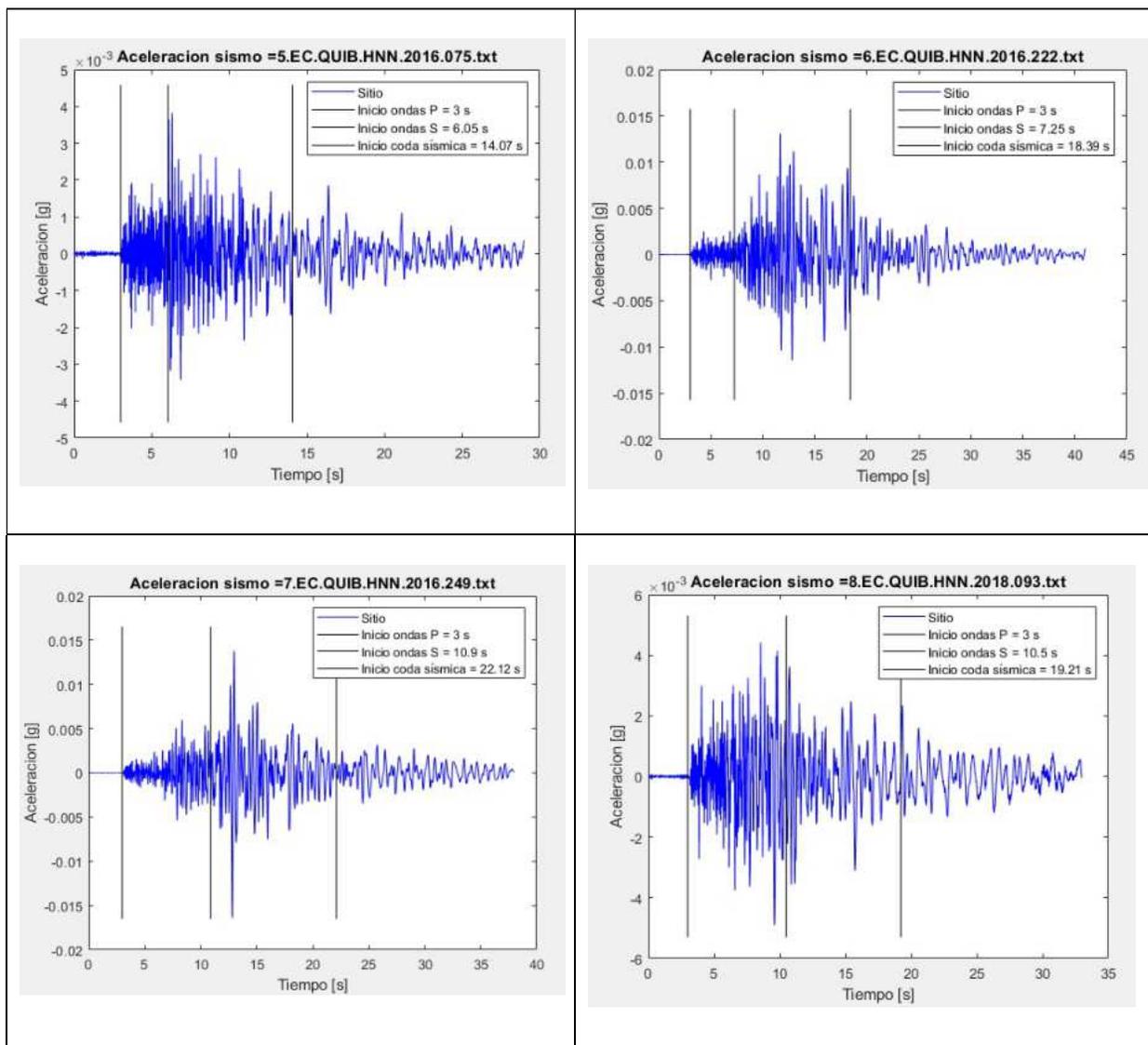


**FIGURA 85** De izquierda a derecha, en orden descendente, figuras de las componentes verticales de los 8 eventos sísmicos utilizados para el presente trabajo de titulación.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.5.1.2. COMPONENTE HORIZONTAL





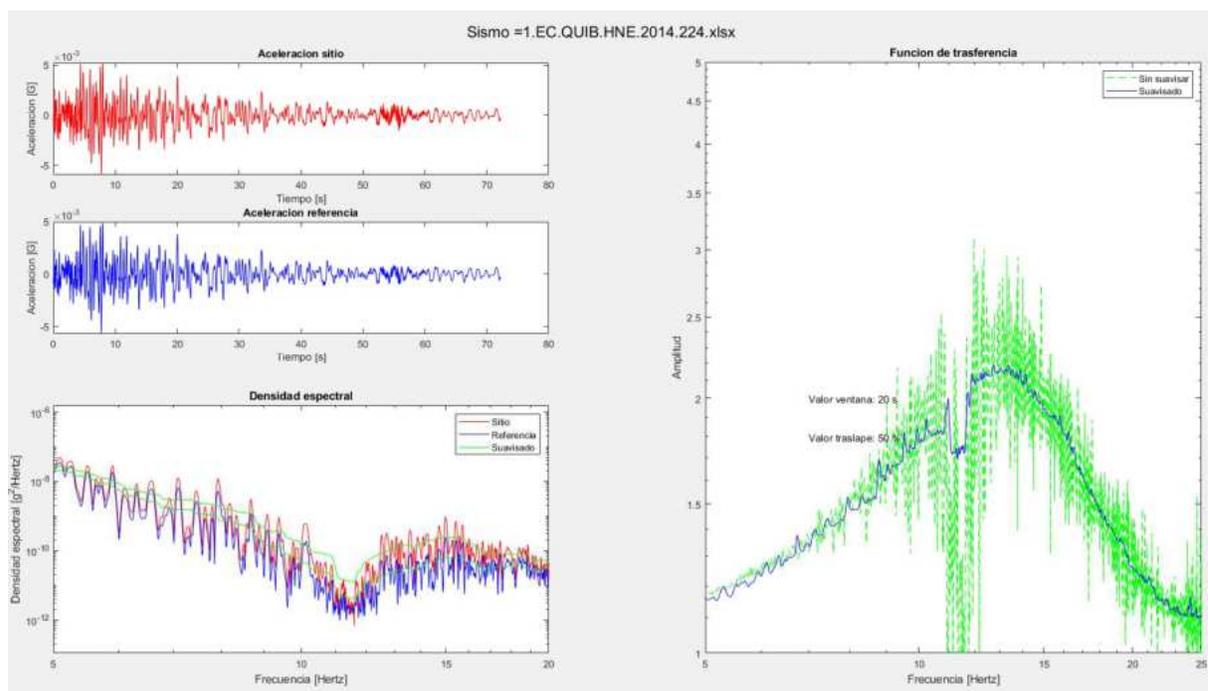
**FIGURA 86** De izquierda a derecha, en orden descendente, figuras de las componentes horizontales de los 8 eventos sísmicos utilizados para el presente trabajo de titulación.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.5.2. GRÁFICOS CONVOLUCION PCQ0012

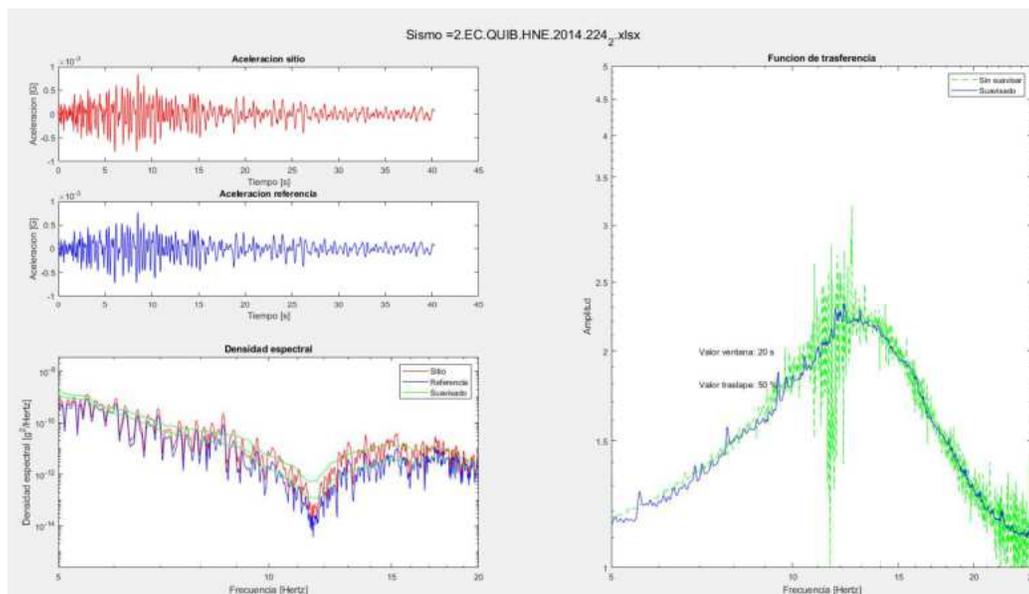
### 6.5.2.1. MÉTODO LINEAL

#### 6.5.2.1.1. COMPONENTE HORIZONTAL



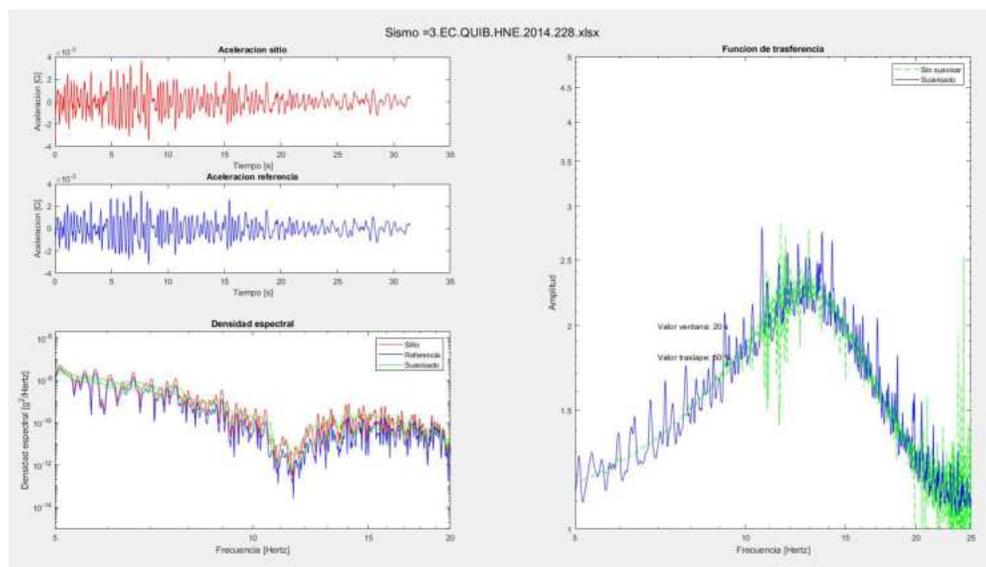
**FIGURA 87** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



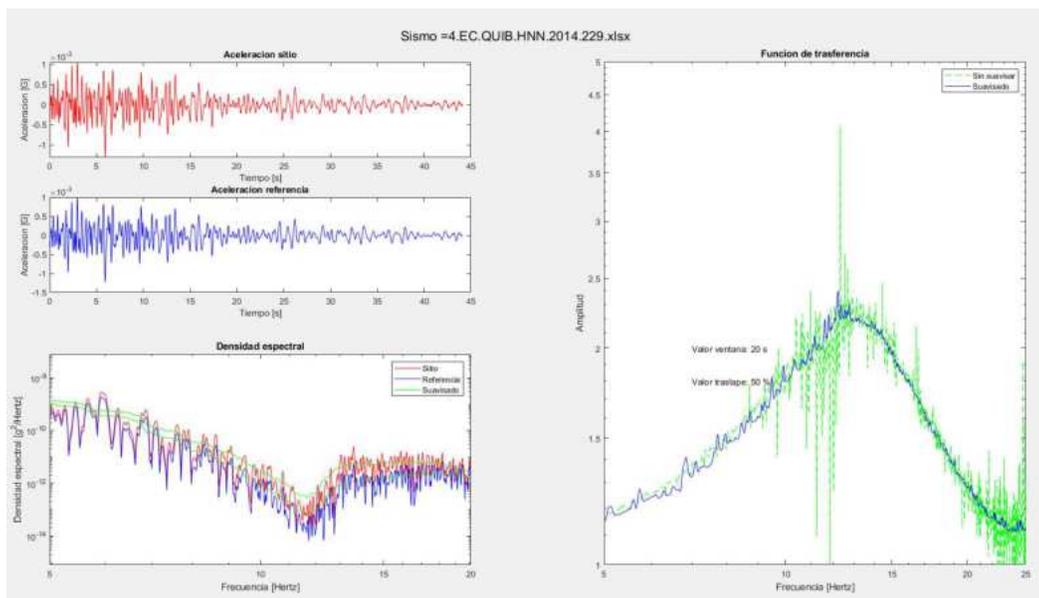
**FIGURA 88** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



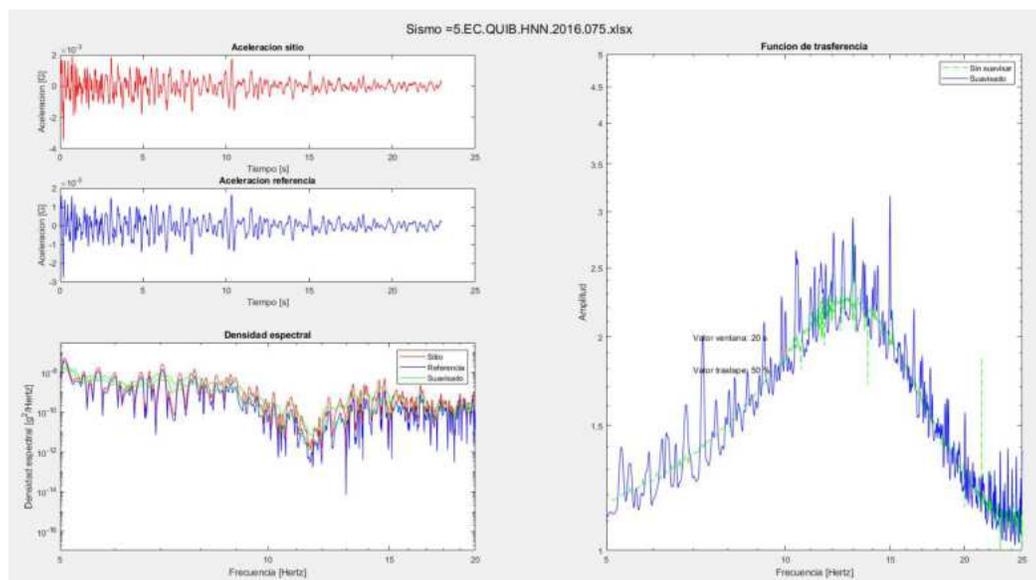
**FIGURA 89** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



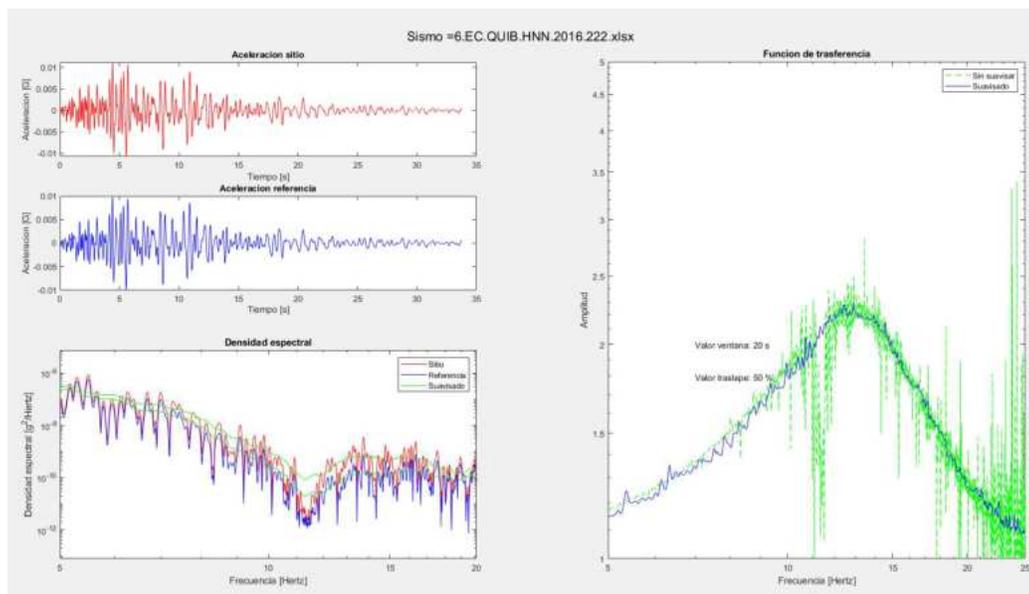
**FIGURA 90** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



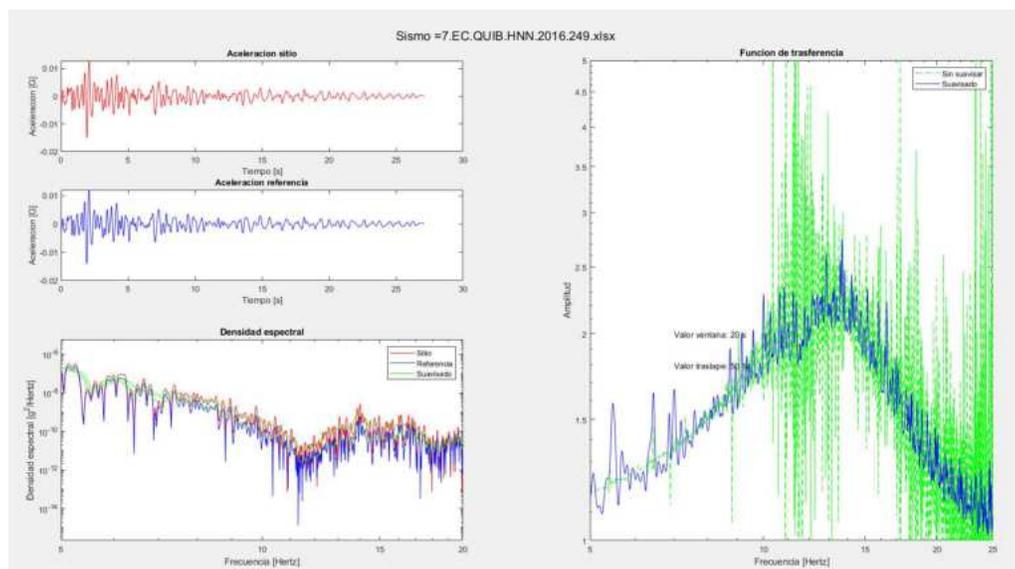
**FIGURA 91** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



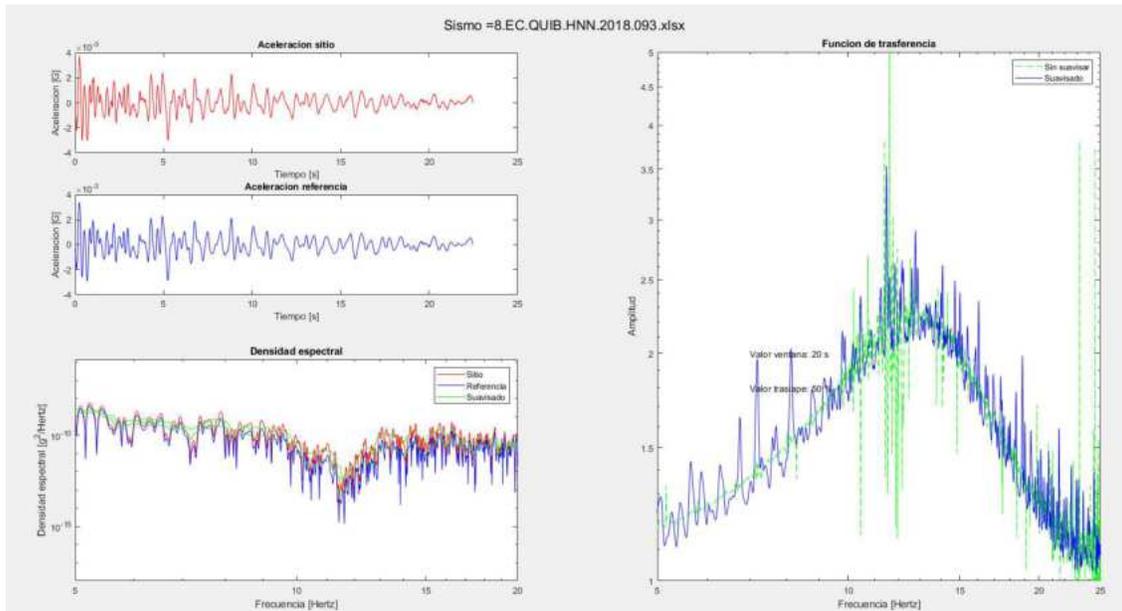
**FIGURA 92** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 93** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 7.

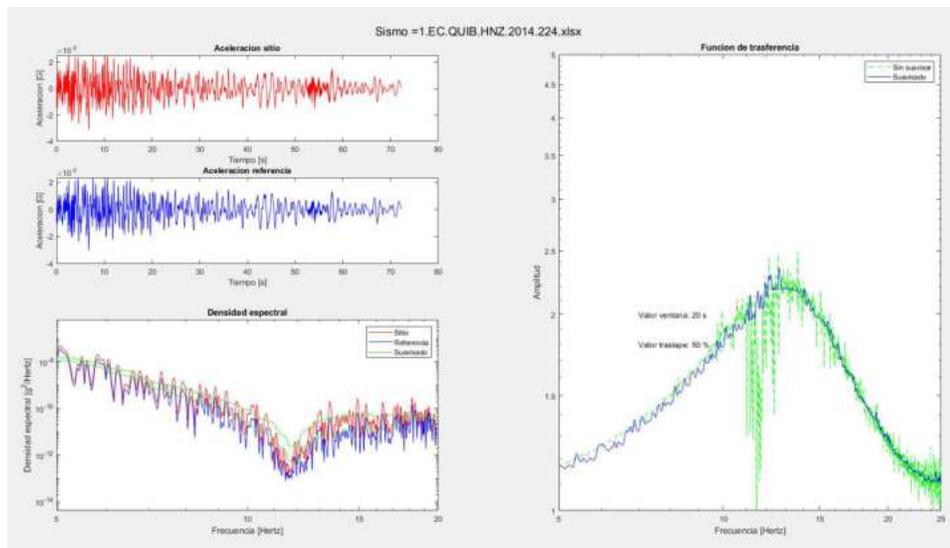
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 94** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 8.

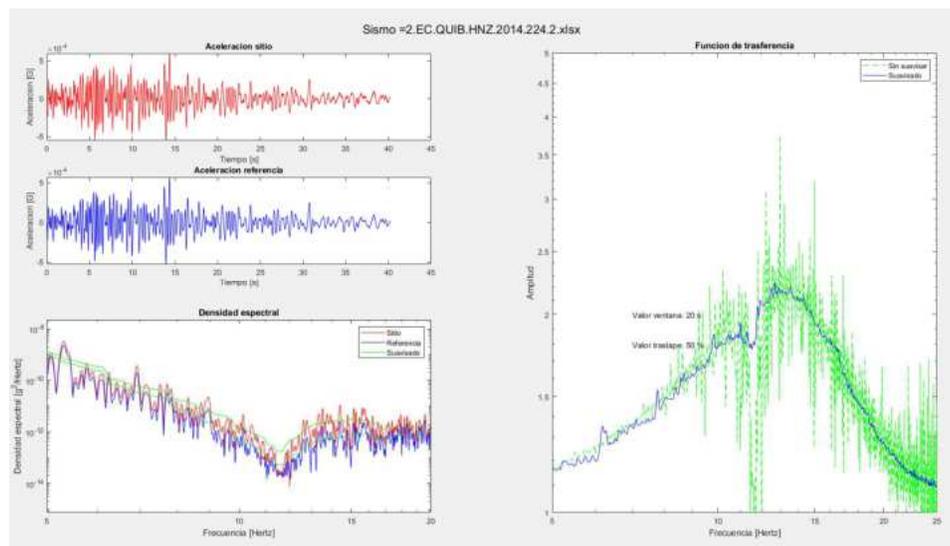
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.5.2.1.2. COMPONENTE VERTICAL



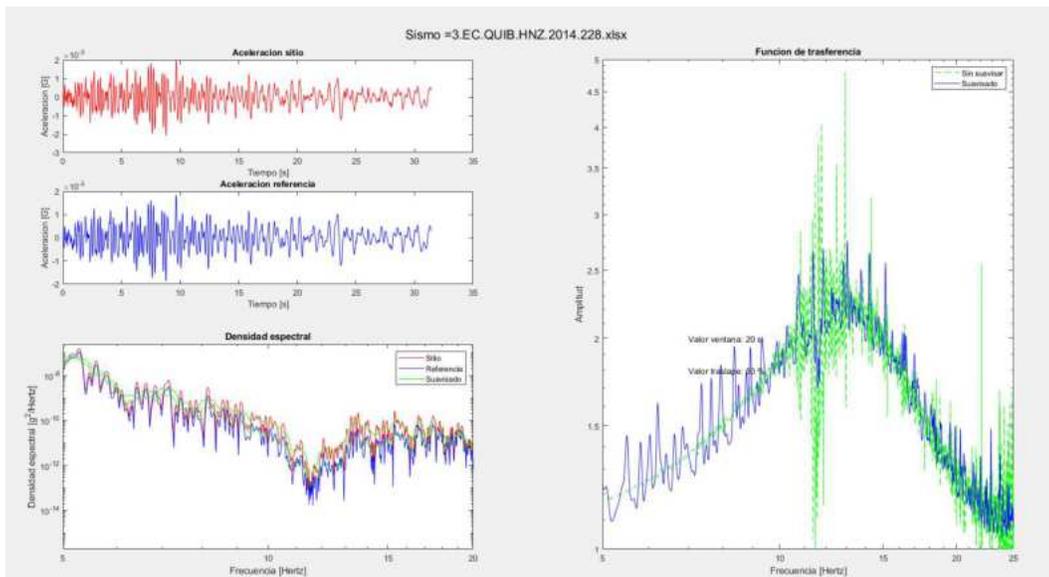
**FIGURA 95** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



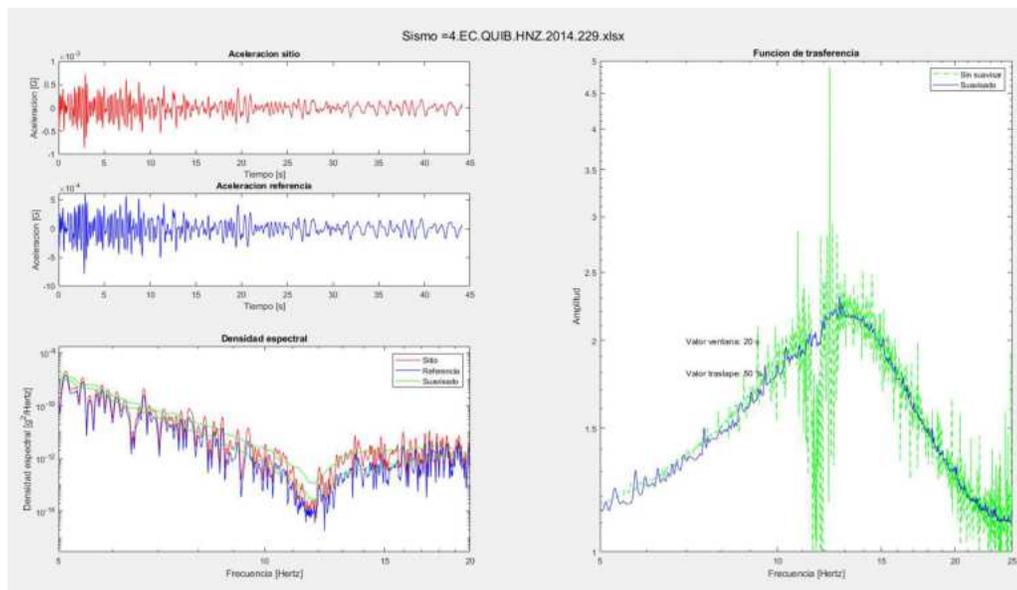
**FIGURA 96** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



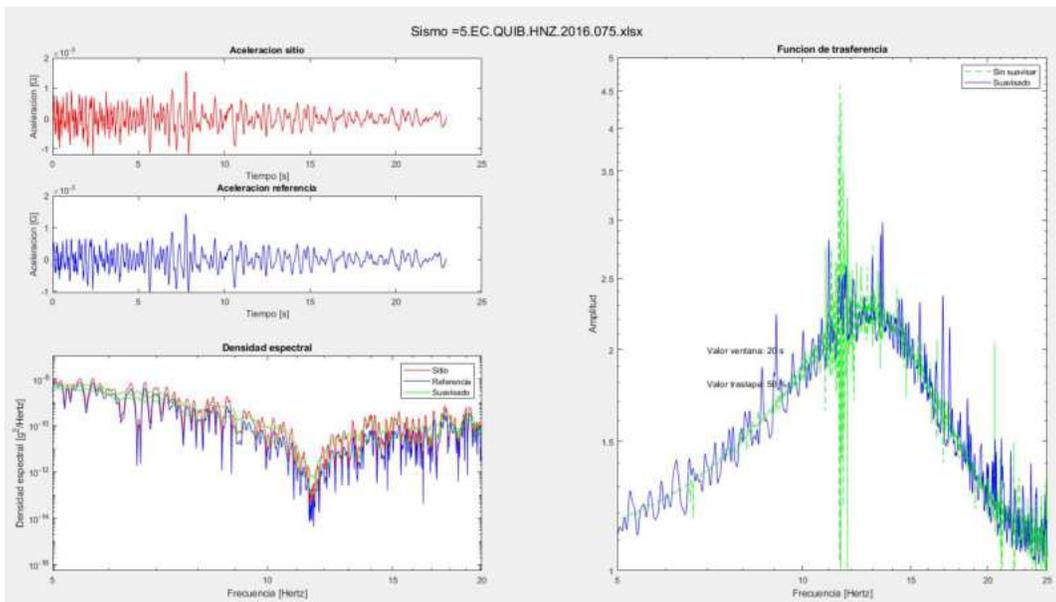
**FIGURA 97** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



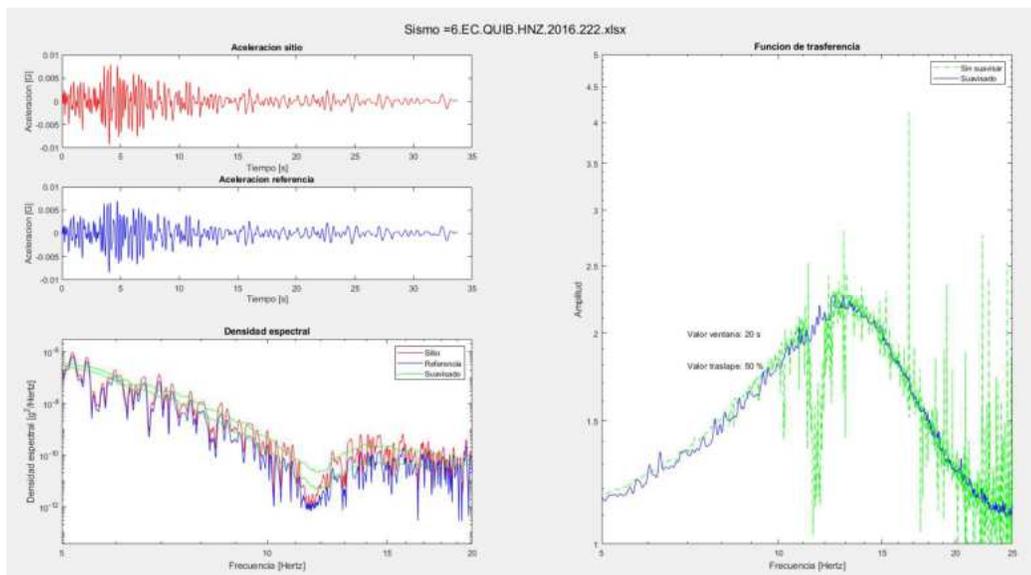
**FIGURA 98** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



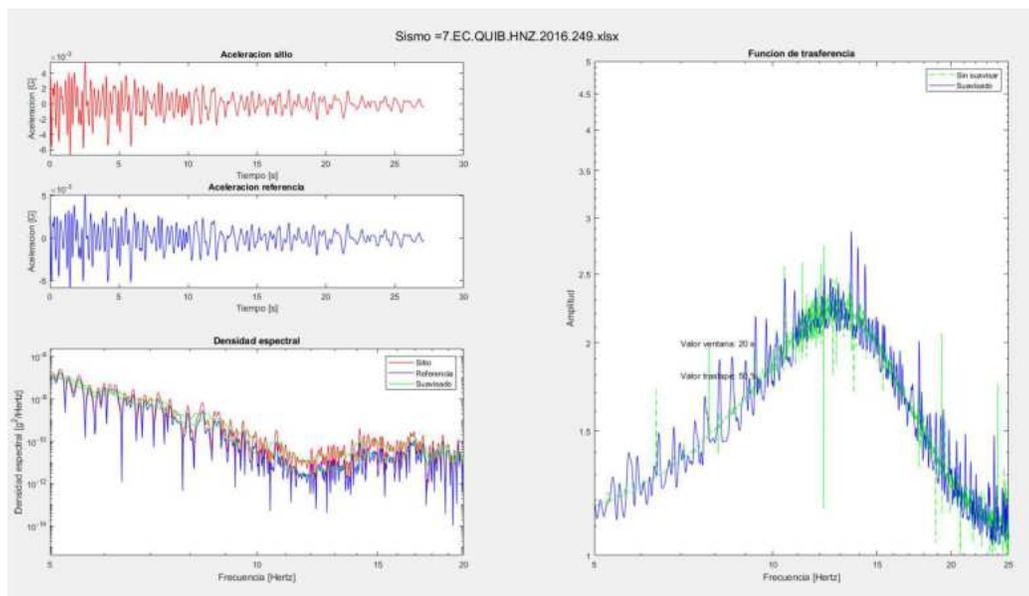
**FIGURA 99** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



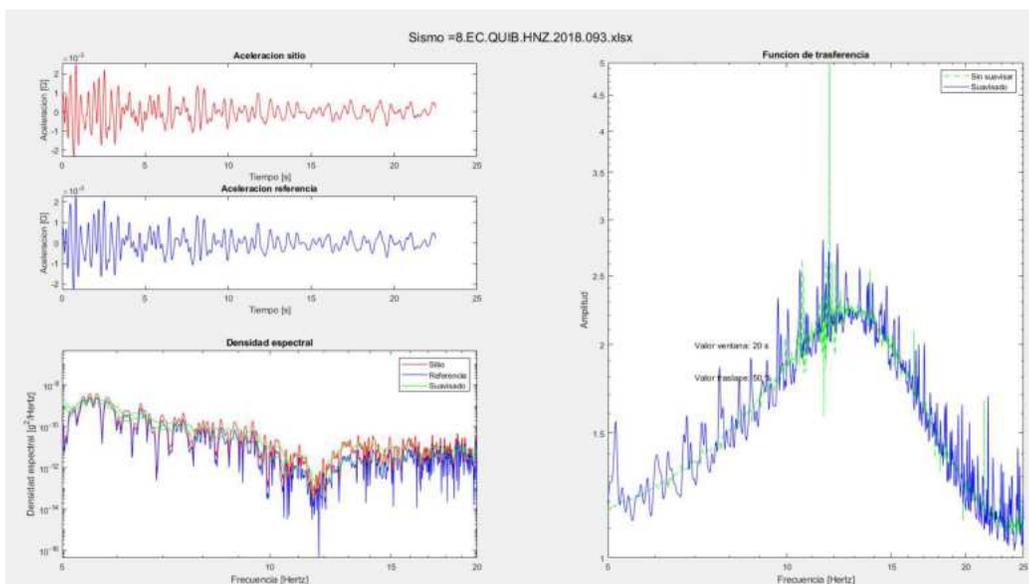
**FIGURA 100** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 101** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 7.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

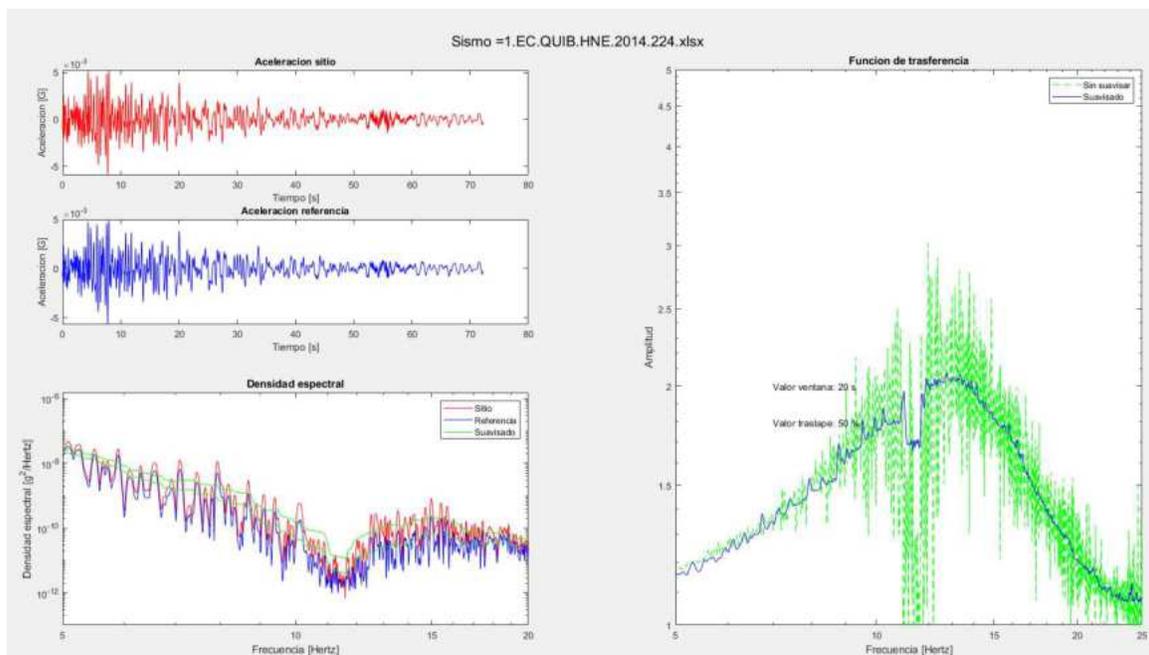


**FIGURA 102** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 8.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

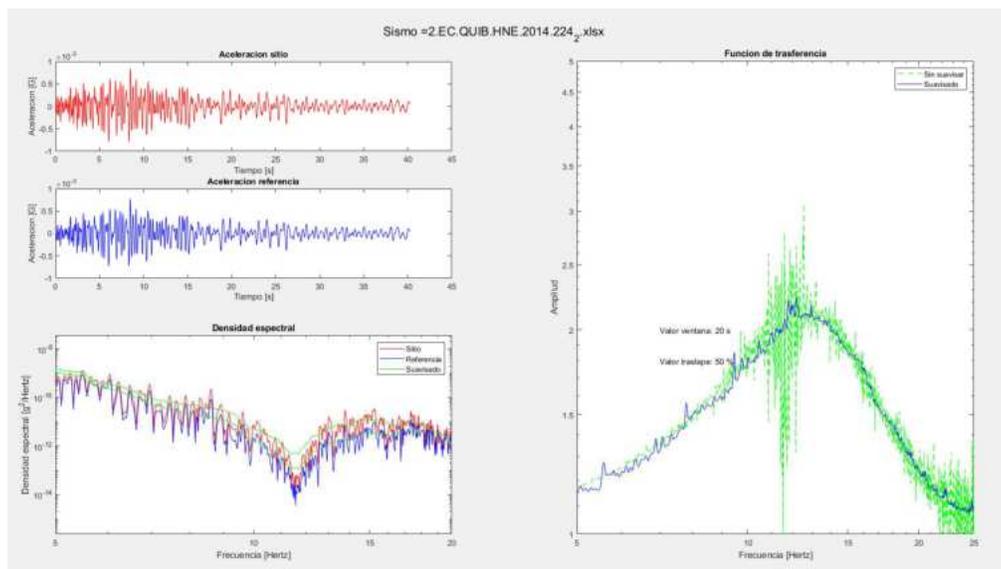
## 6.5.2.2. MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE

### 6.5.2.2.1. COMPONENTE HORIZONTAL



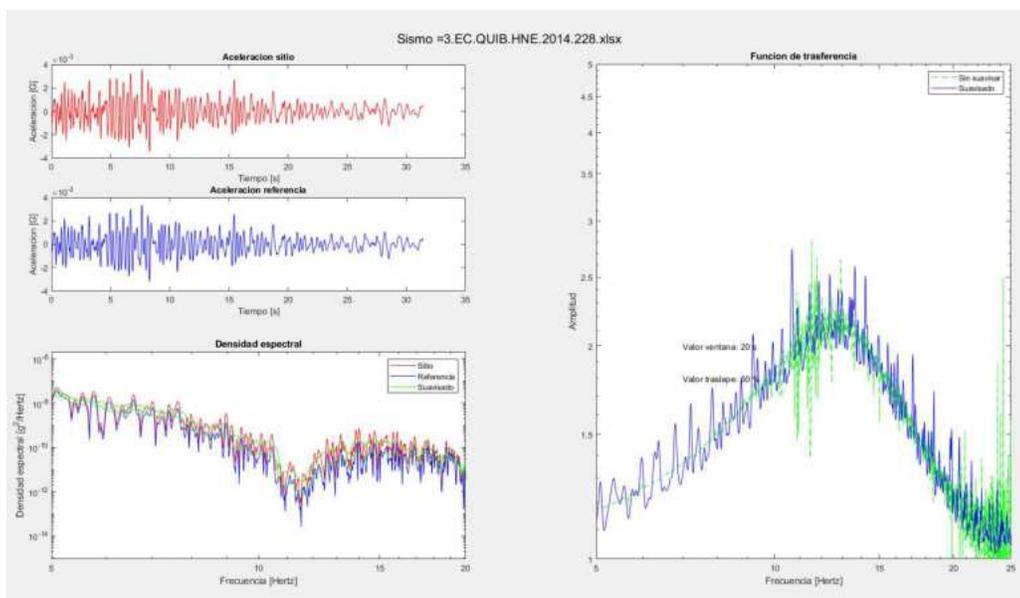
**FIGURA 103** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



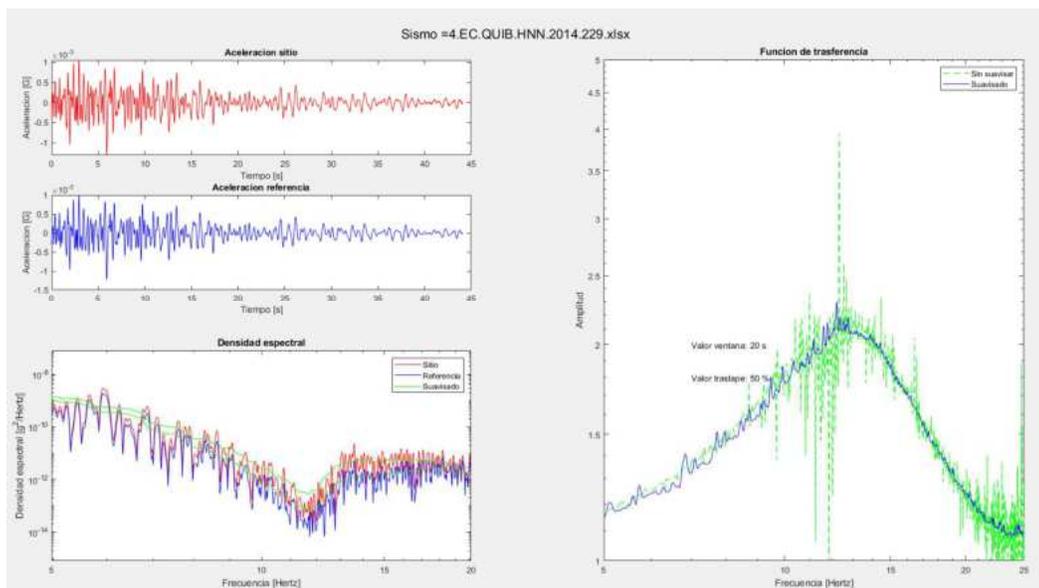
**FIGURA 104** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



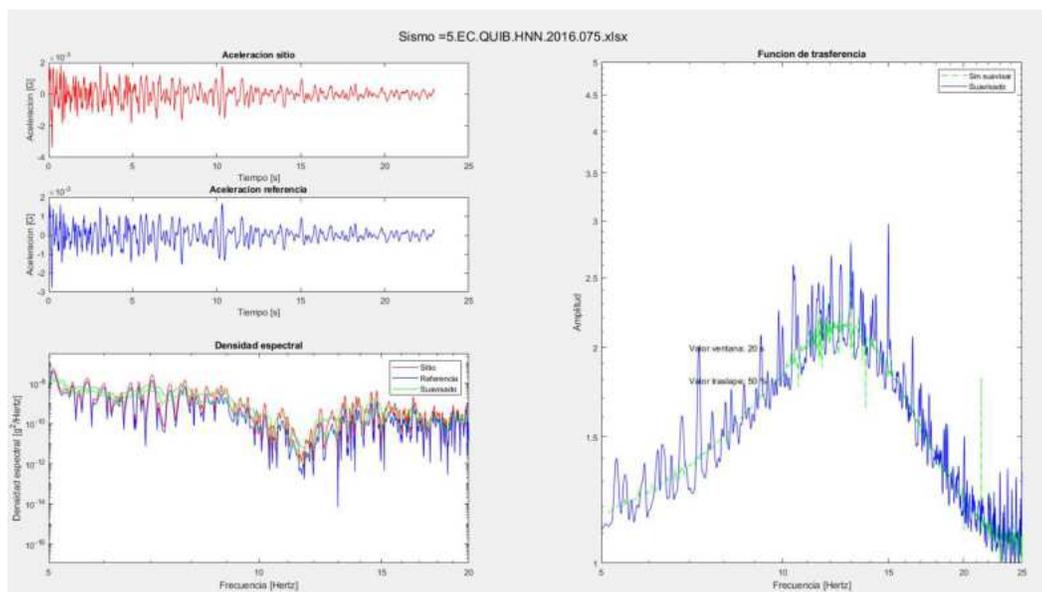
**FIGURA 105** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



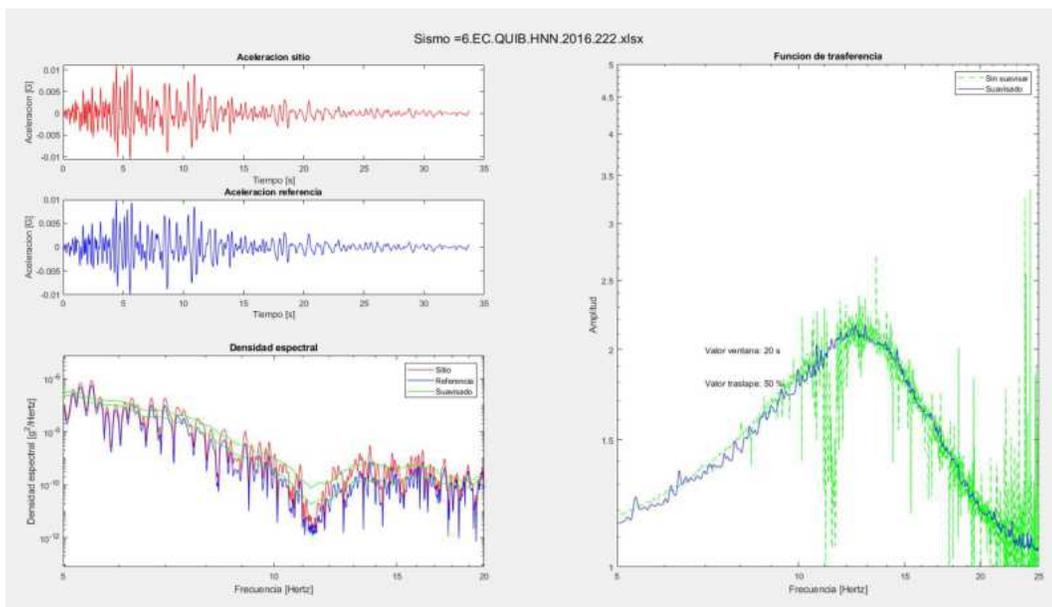
**FIGURA 106** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



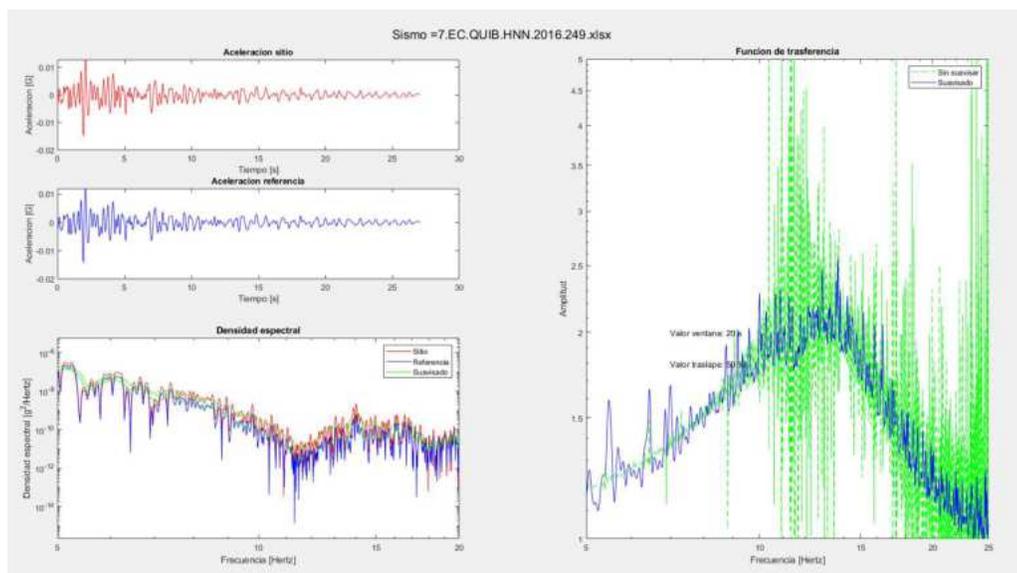
**FIGURA 107** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



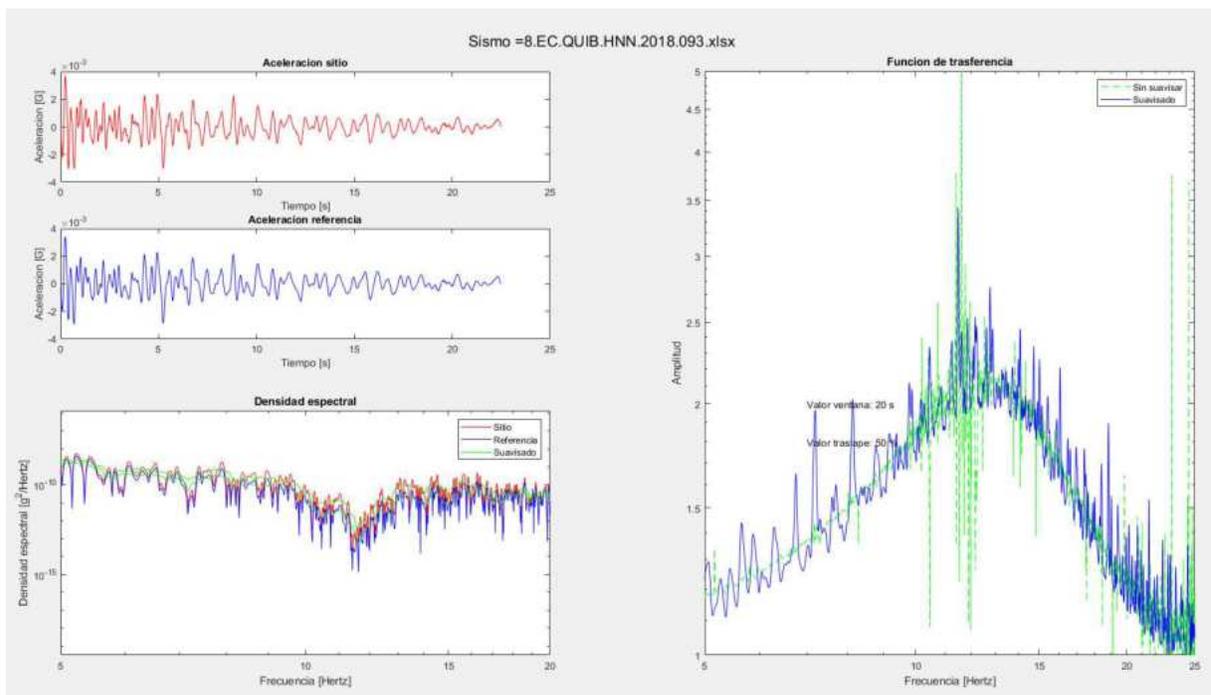
**FIGURA 108** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 109** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 7.

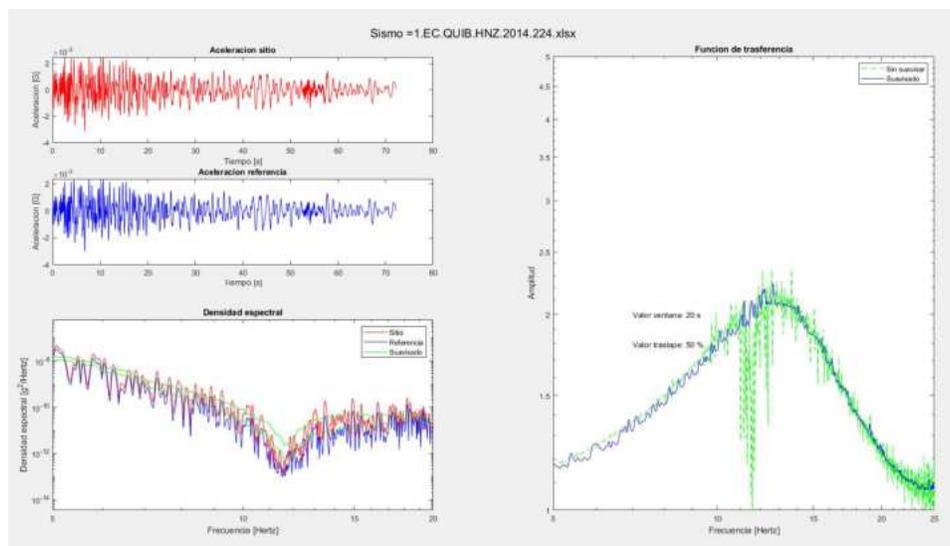
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 110** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 8.

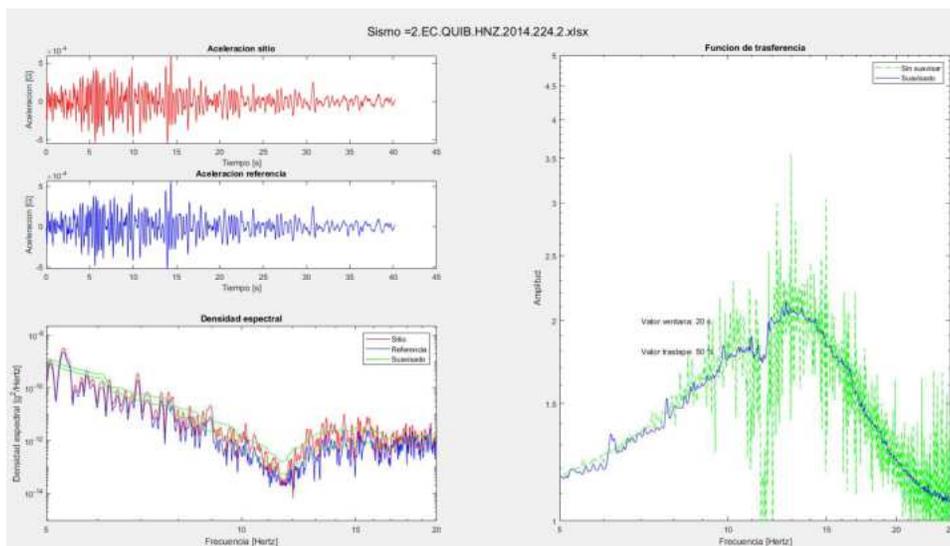
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.5.2.2.2. COMPONENTE VERTICAL



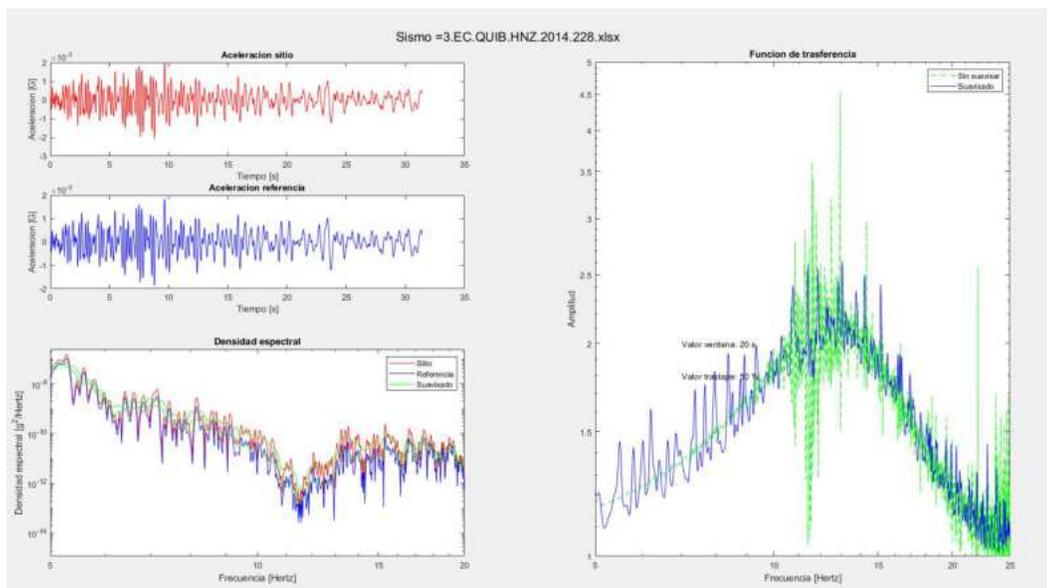
**FIGURA 111** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



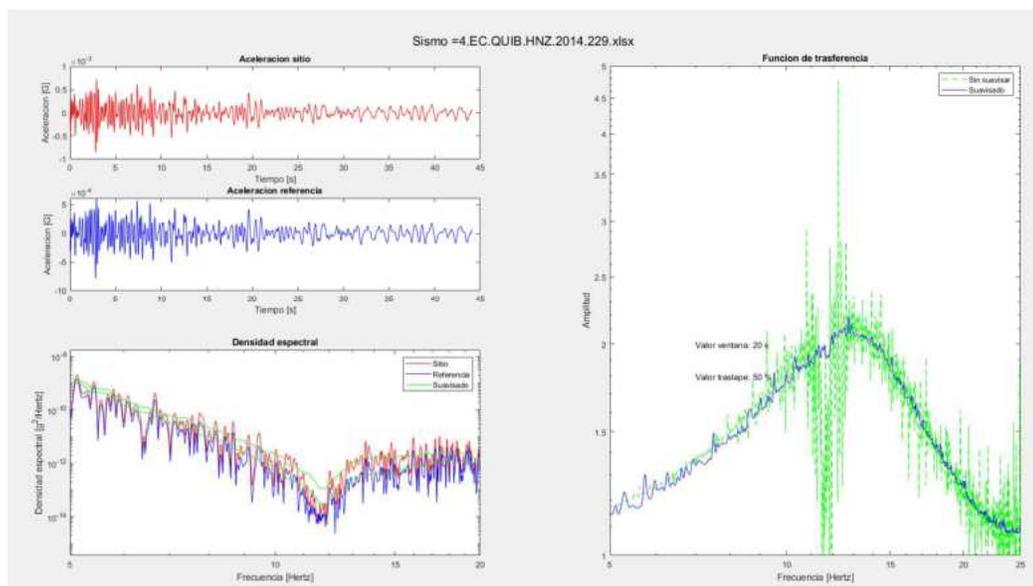
**FIGURA 112** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



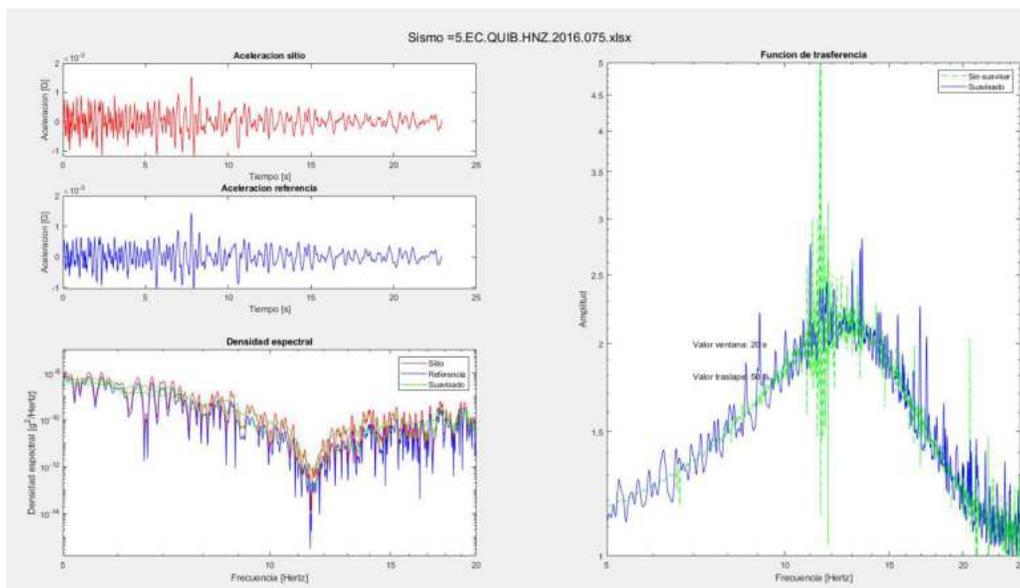
**FIGURA 113** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



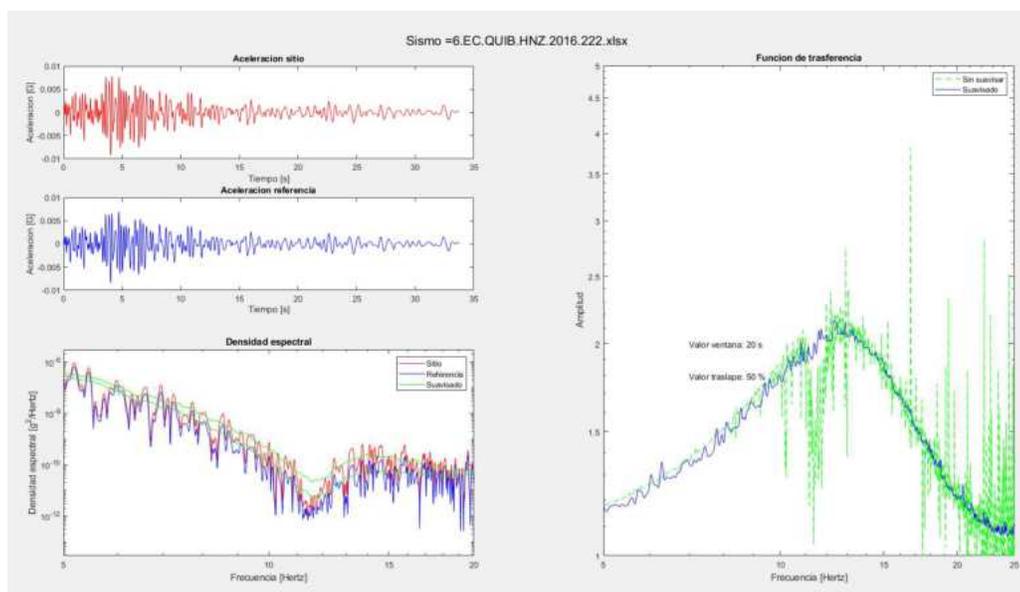
**FIGURA 114** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



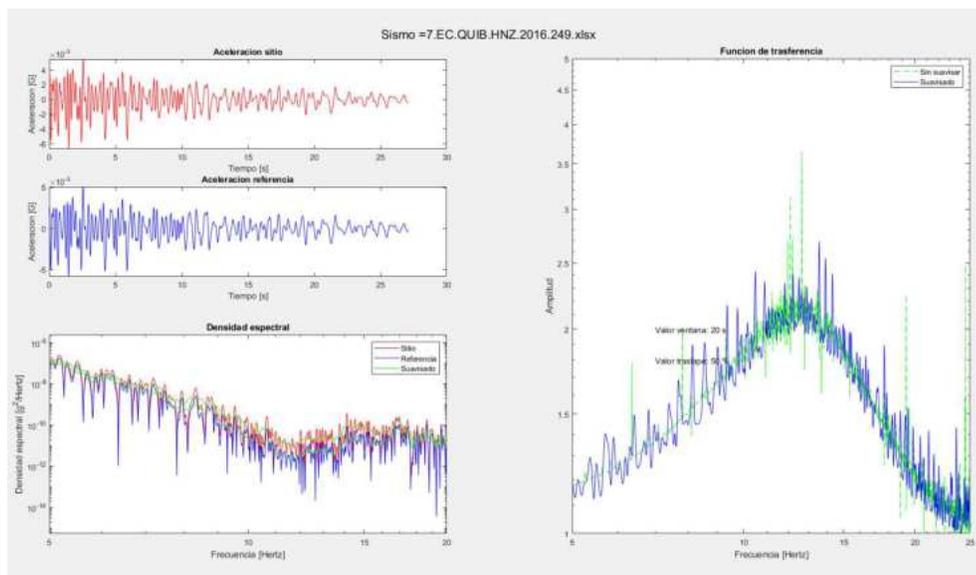
**FIGURA 115** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



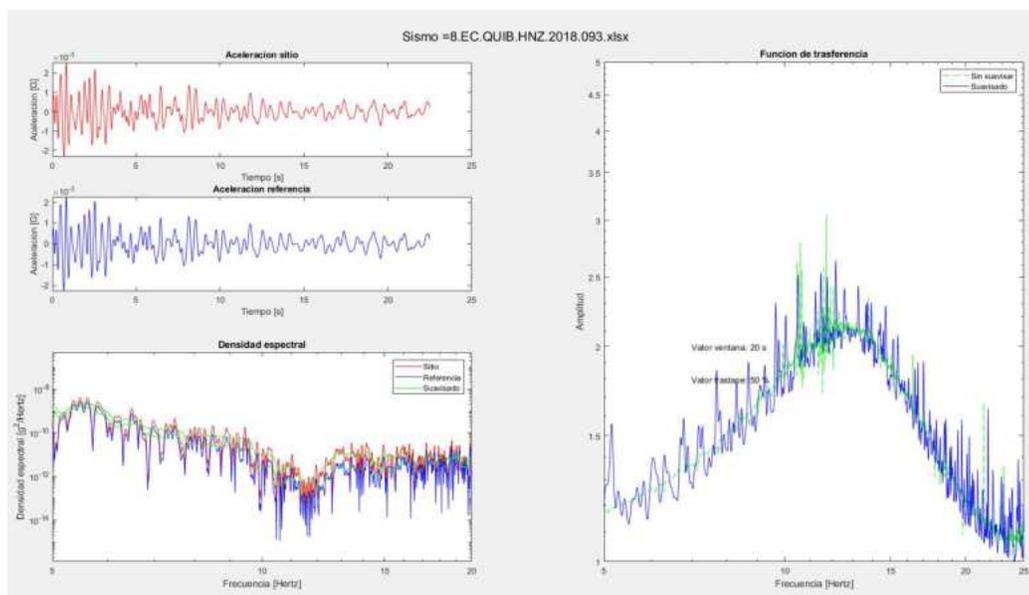
**FIGURA 116** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 117** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 7.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



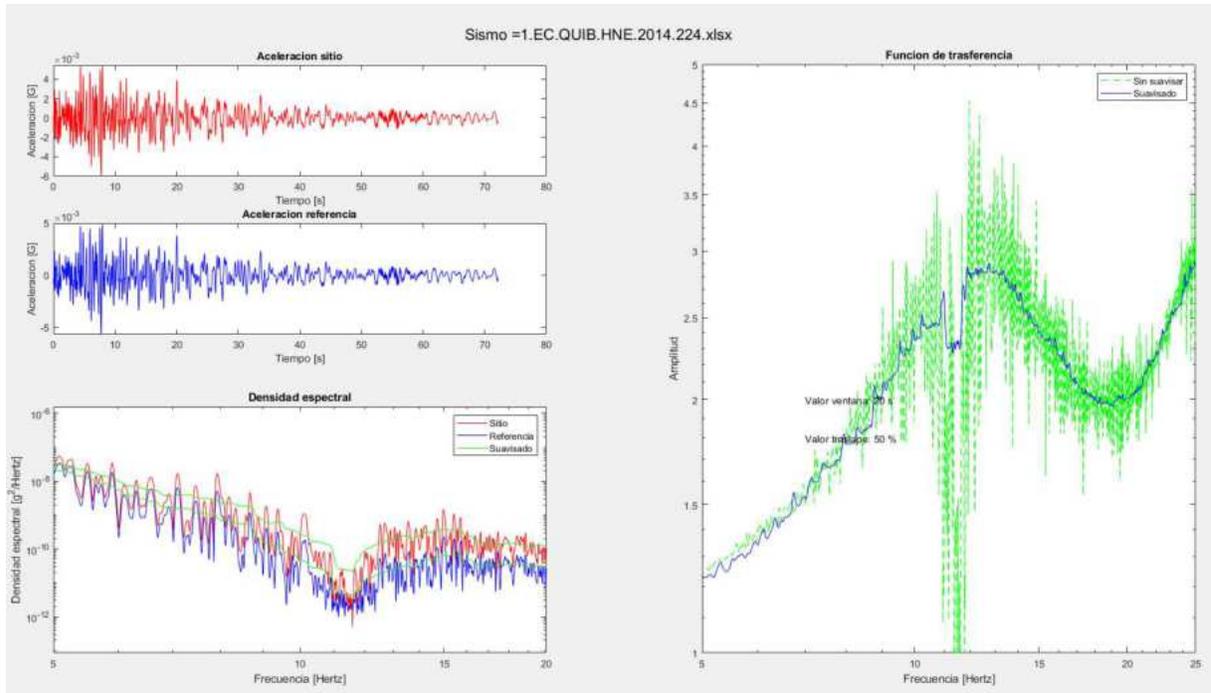
**FIGURA 118** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 8.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

### 6.5.3. GRÁFICOS CONVOLUCION PCQ0013

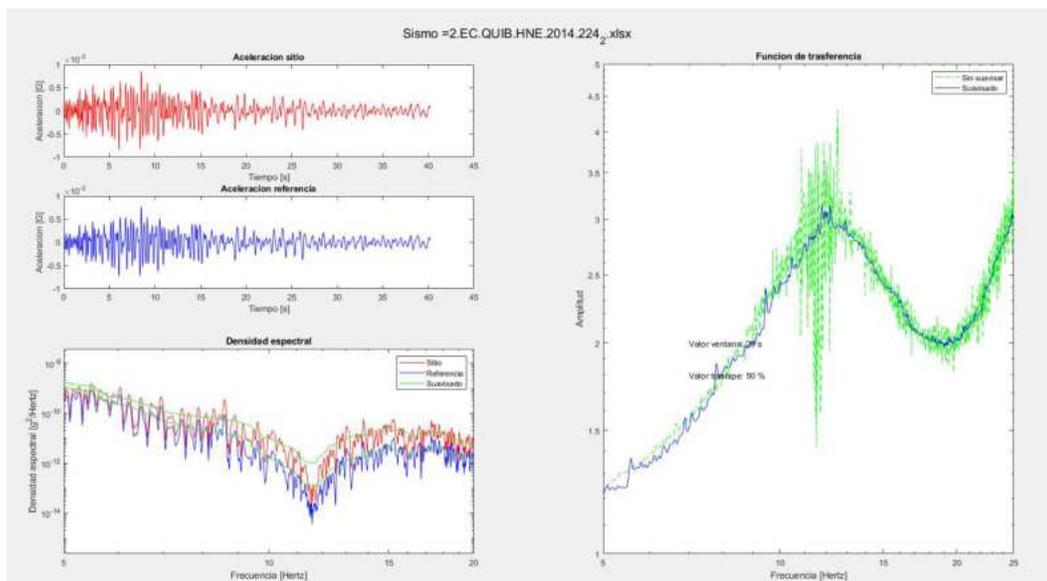
#### 6.5.3.1. MÉTODO LINEAL

##### 6.5.3.1.1. COMPONENTE HORIZONTAL



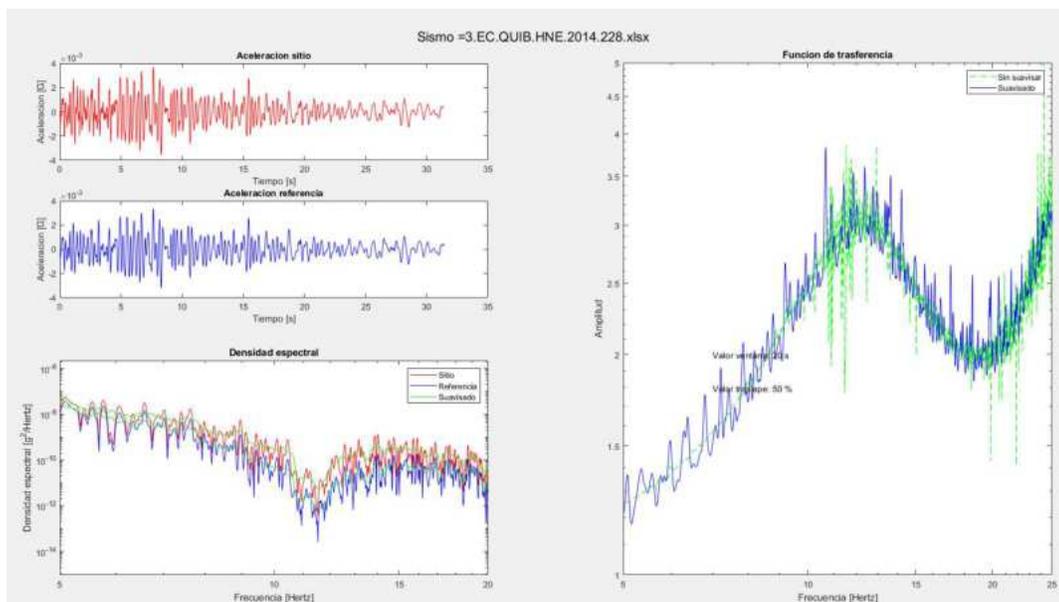
**FIGURA 119** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



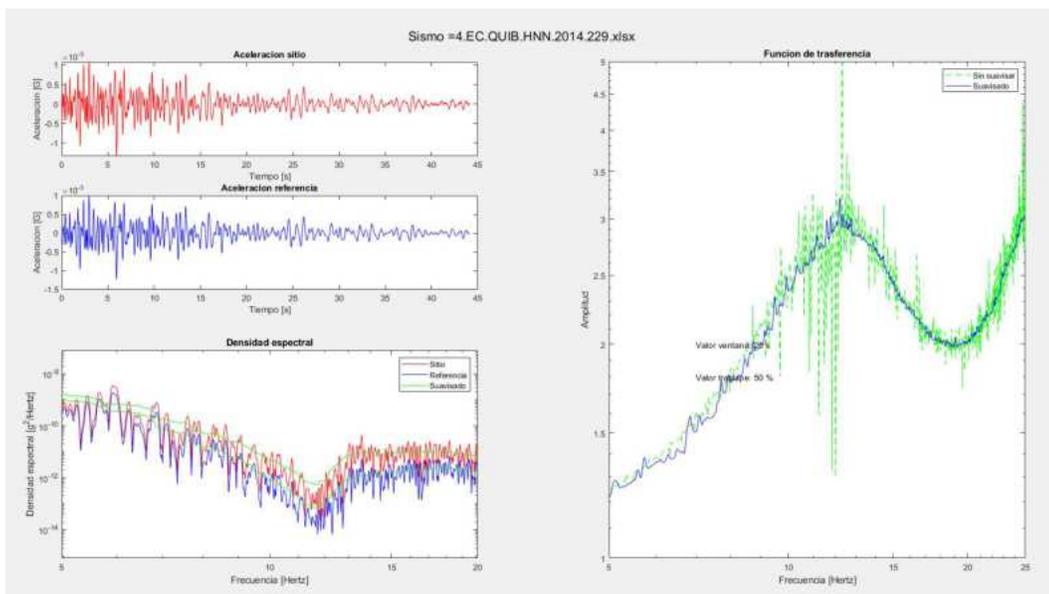
**FIGURA 120** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



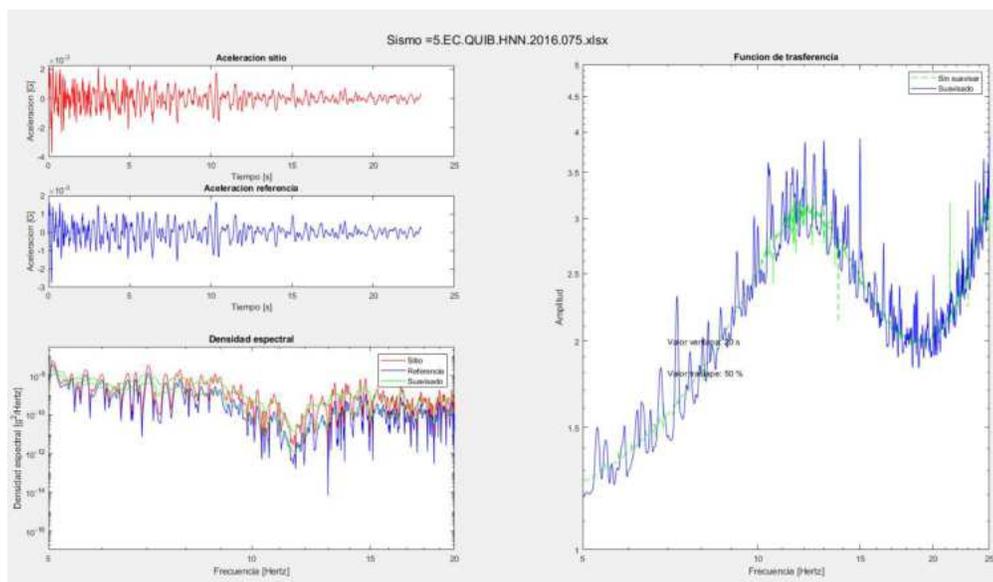
**FIGURA 121** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



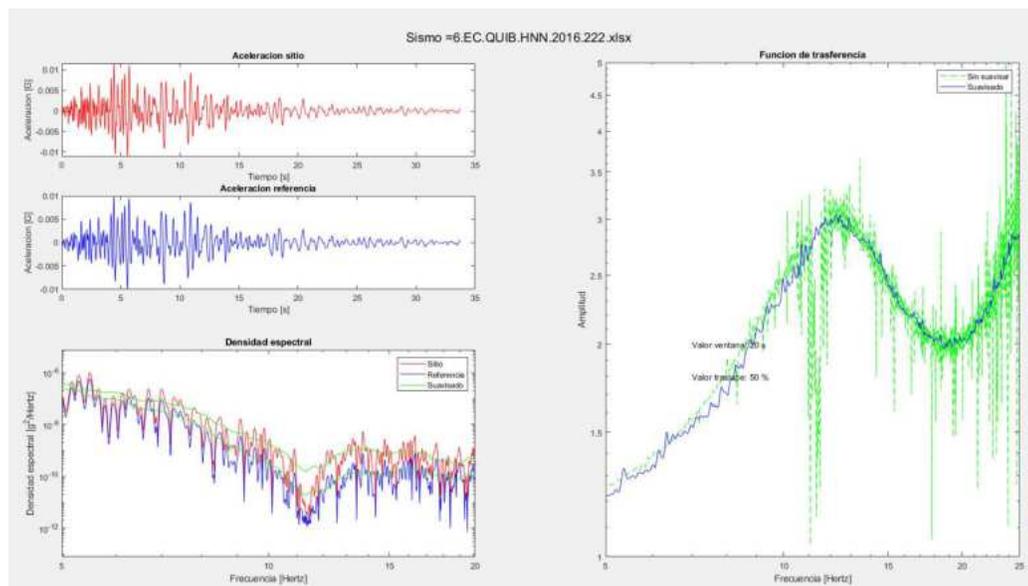
**FIGURA 122** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



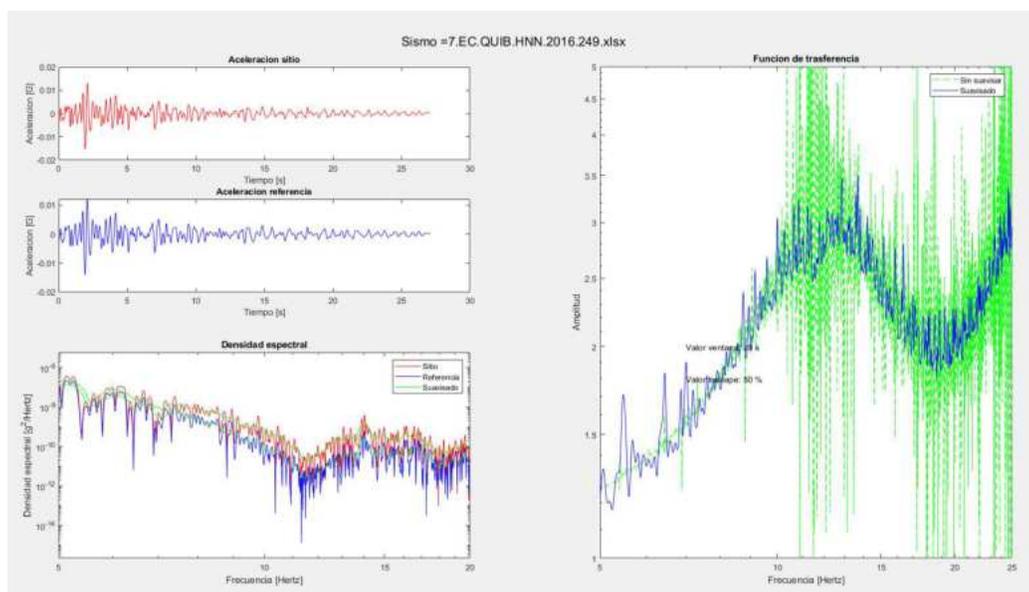
**FIGURA 123** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



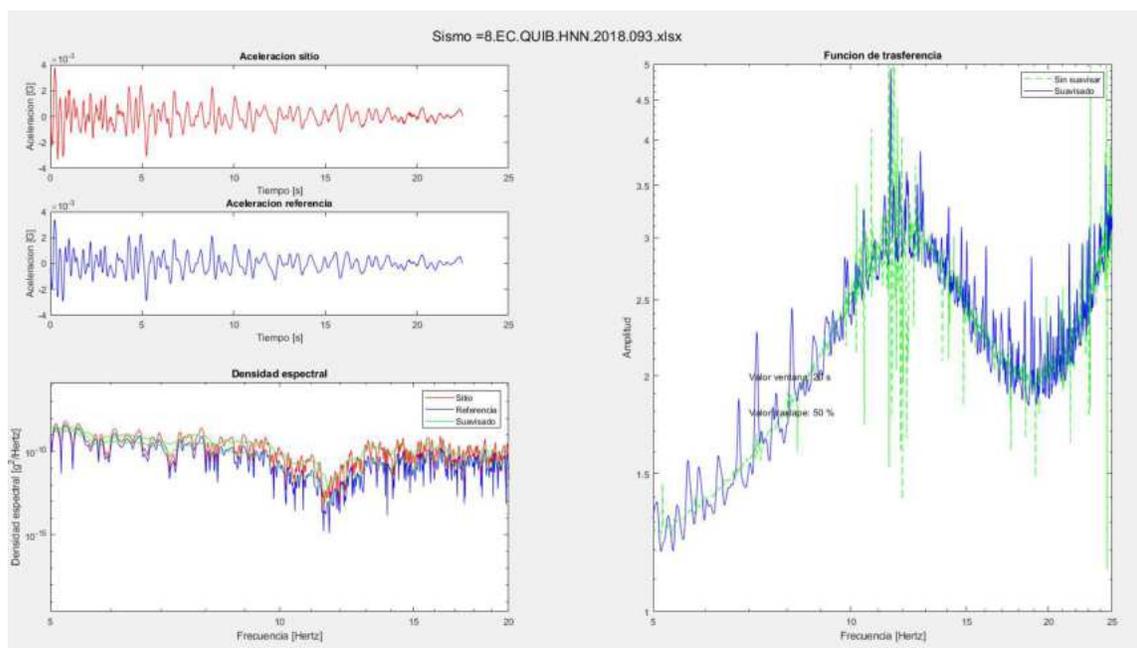
**FIGURA 124** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 125** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 7.

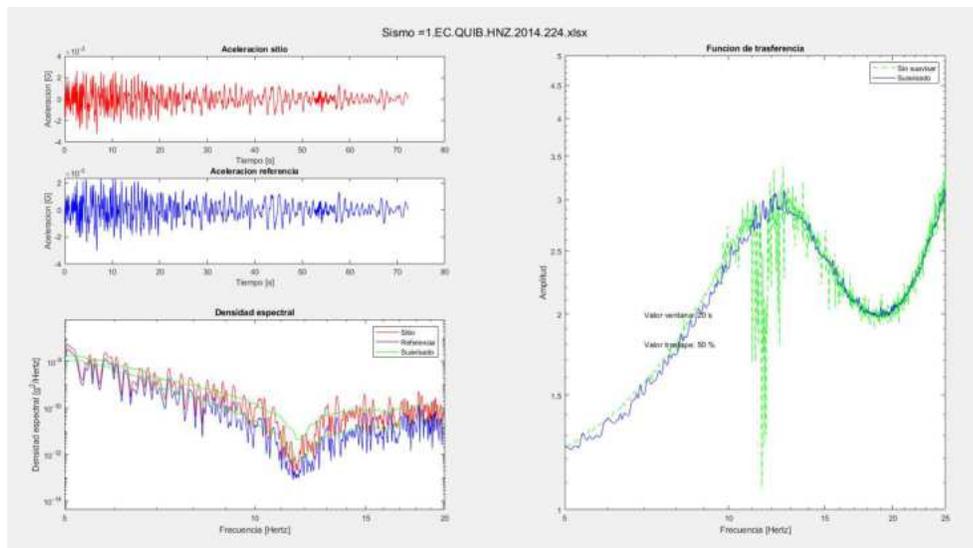
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 126** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 8.

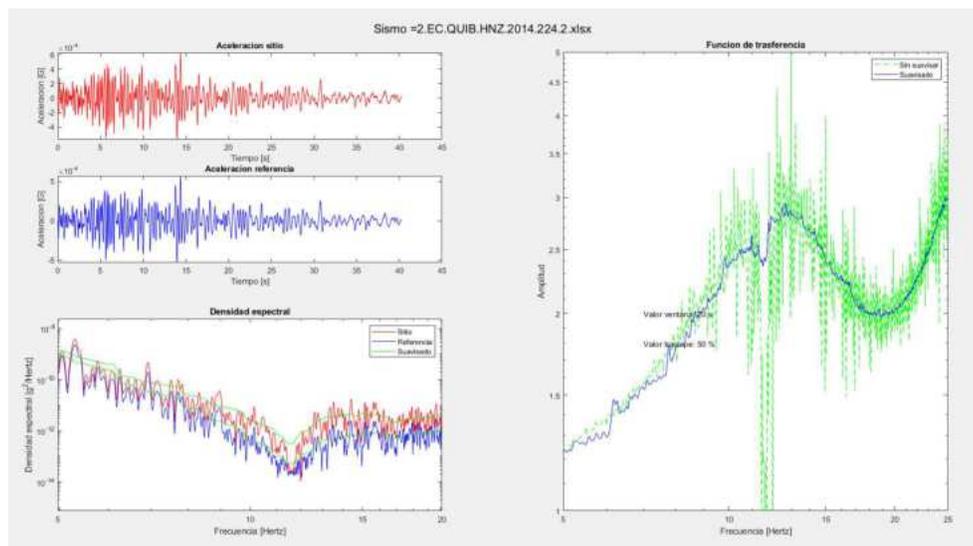
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.5.3.1.2. COMPONENTE VERTICAL



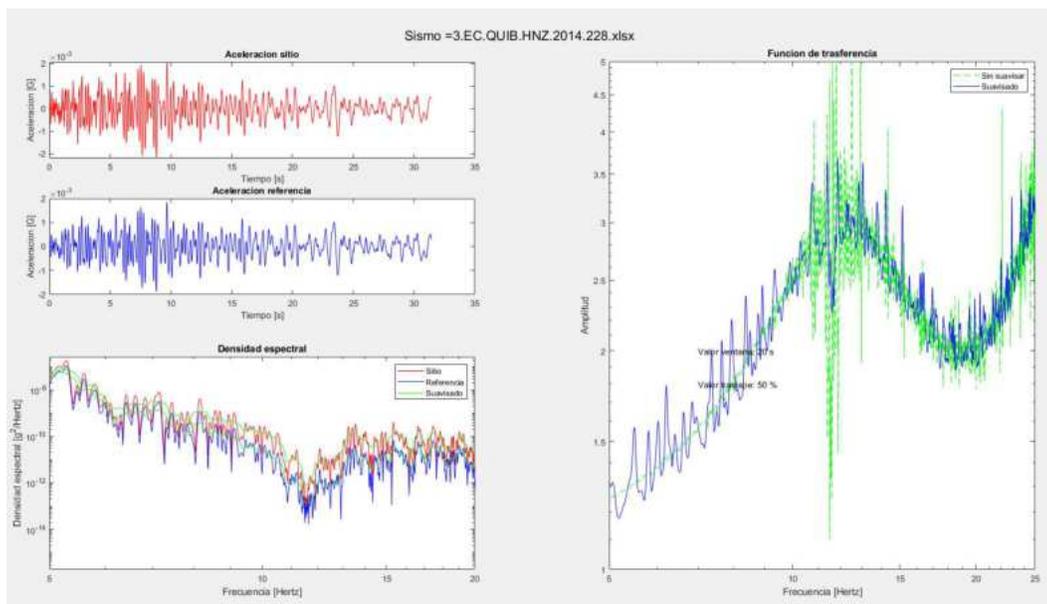
**FIGURA 127** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



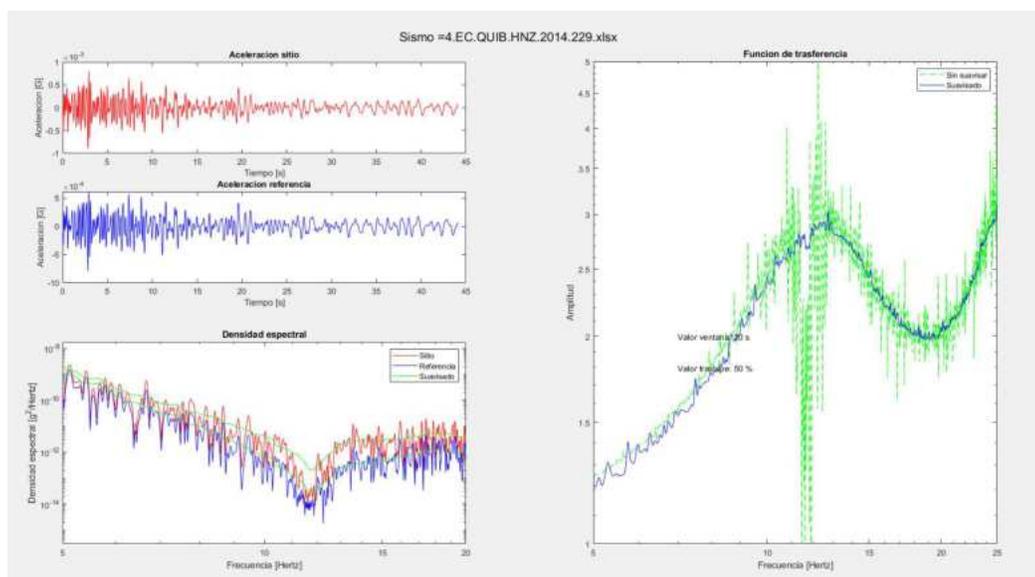
**FIGURA 128** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



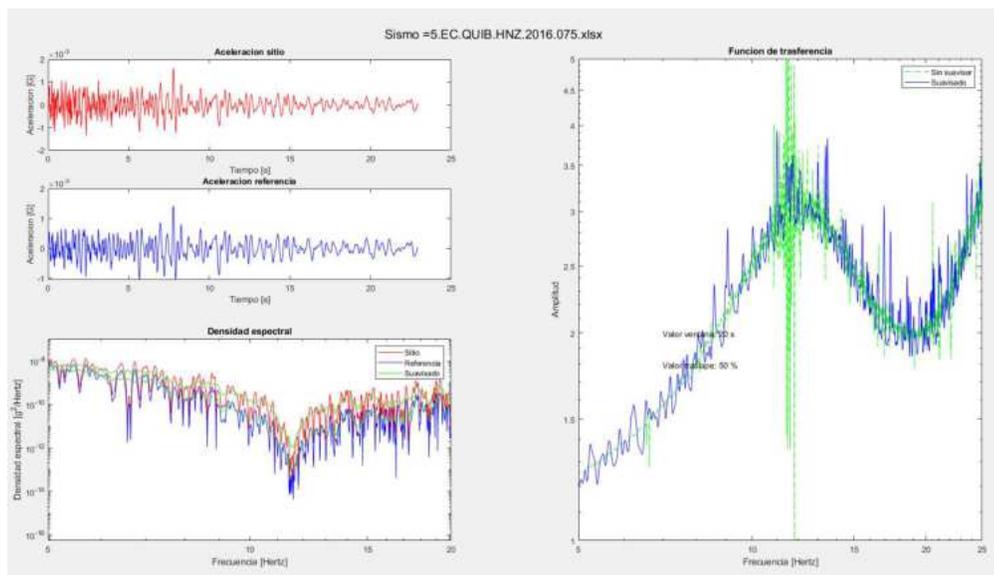
**FIGURA 129** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



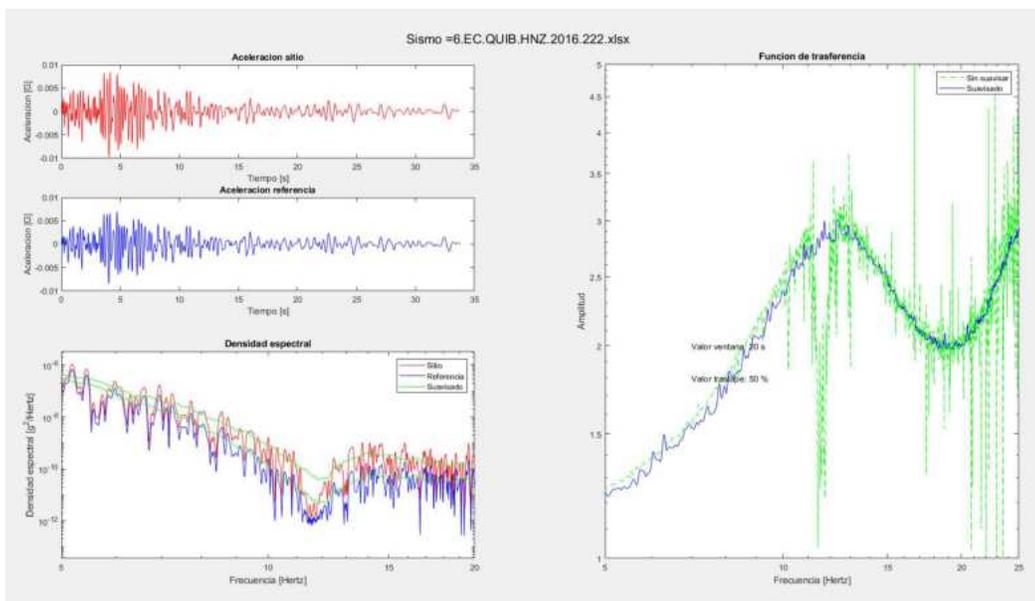
**FIGURA 130** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



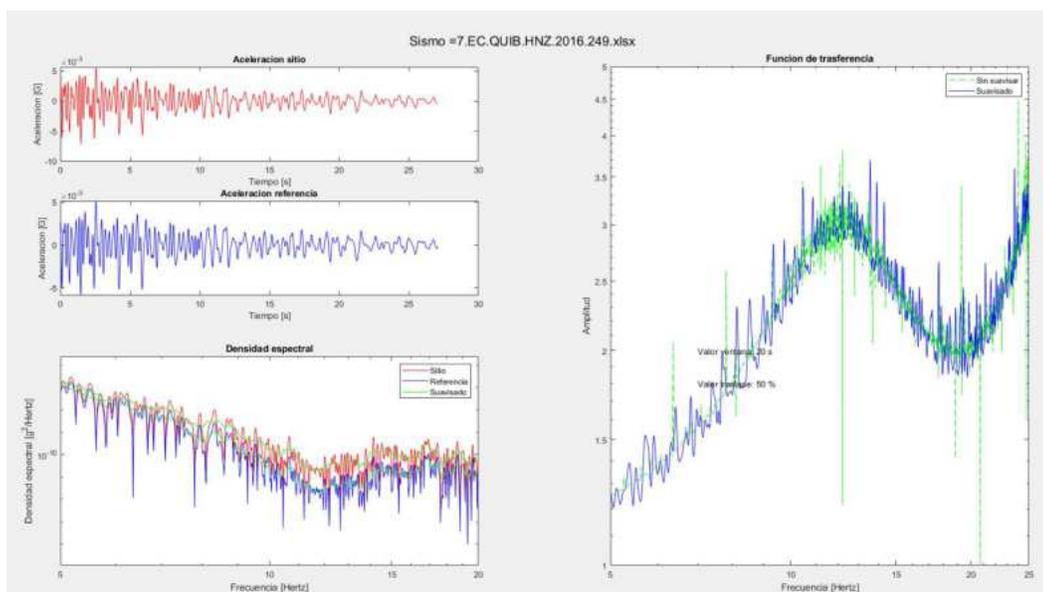
**FIGURA 131** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



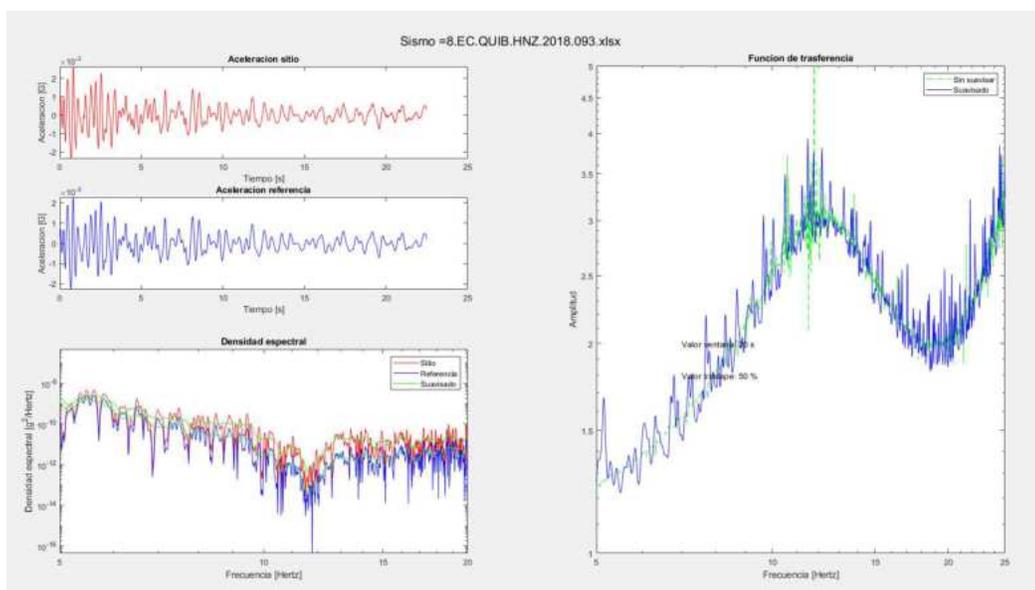
**FIGURA 132** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 133** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 7.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

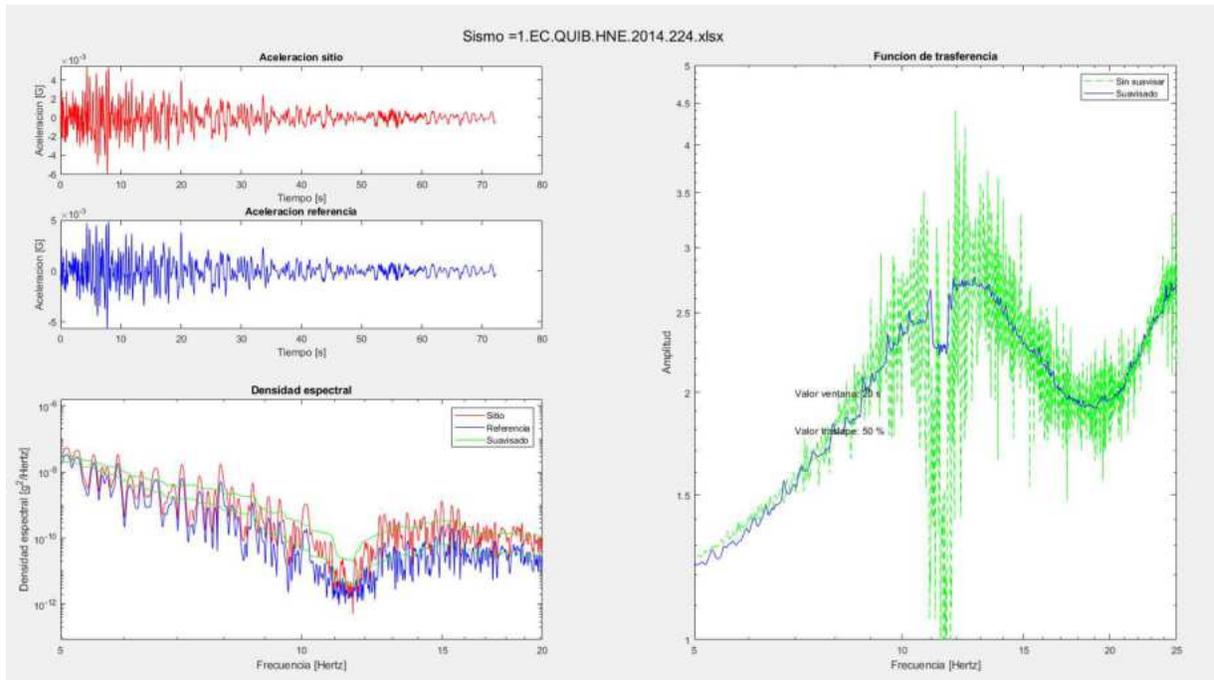


**FIGURA 134** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 8.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

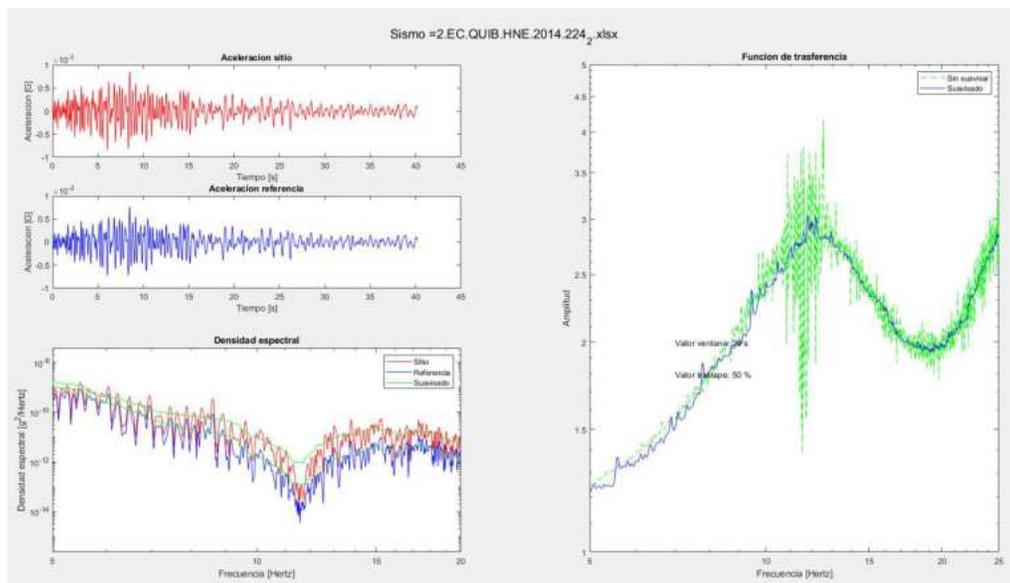
### 6.5.3.2. MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE

#### 6.5.3.2.1. COMPONENTE HORIZONTAL



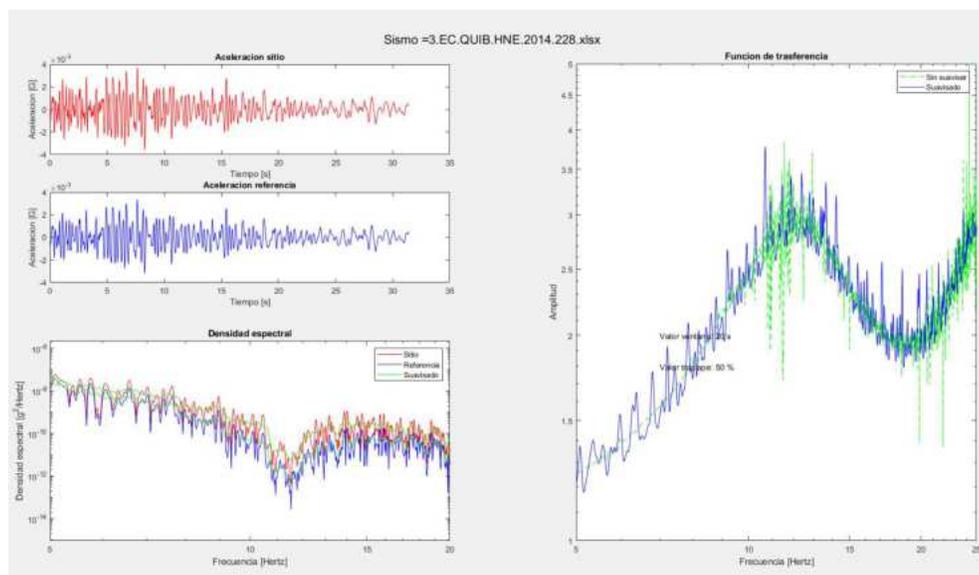
**FIGURA 135** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



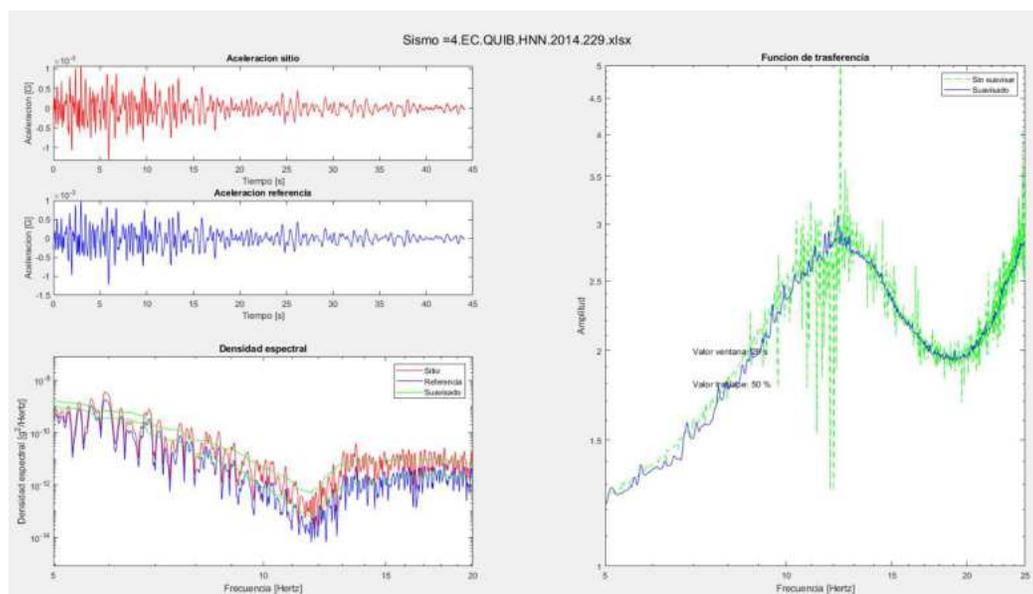
**FIGURA 136** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



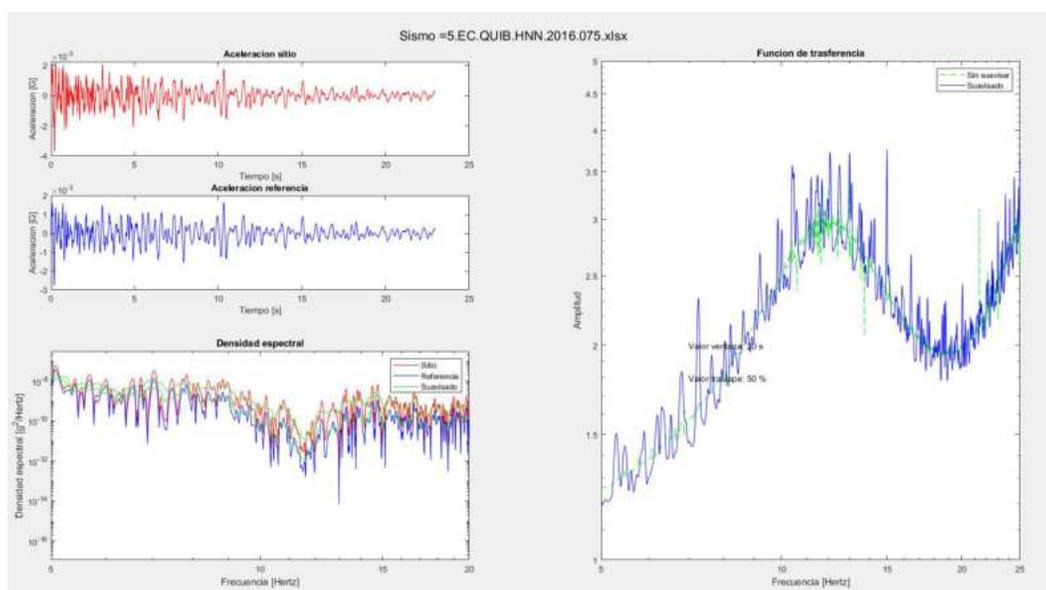
**FIGURA 137** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



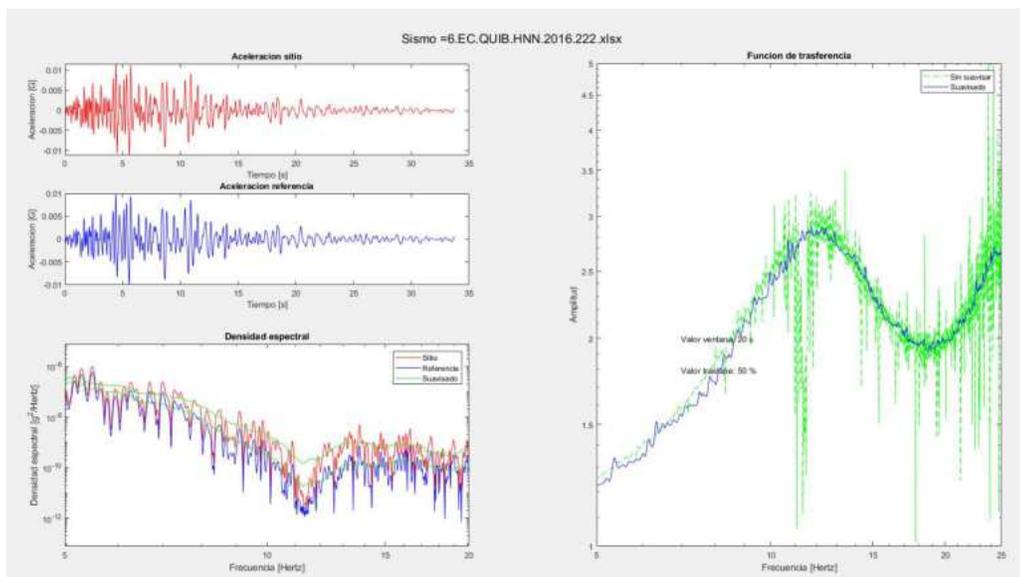
**FIGURA 138** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



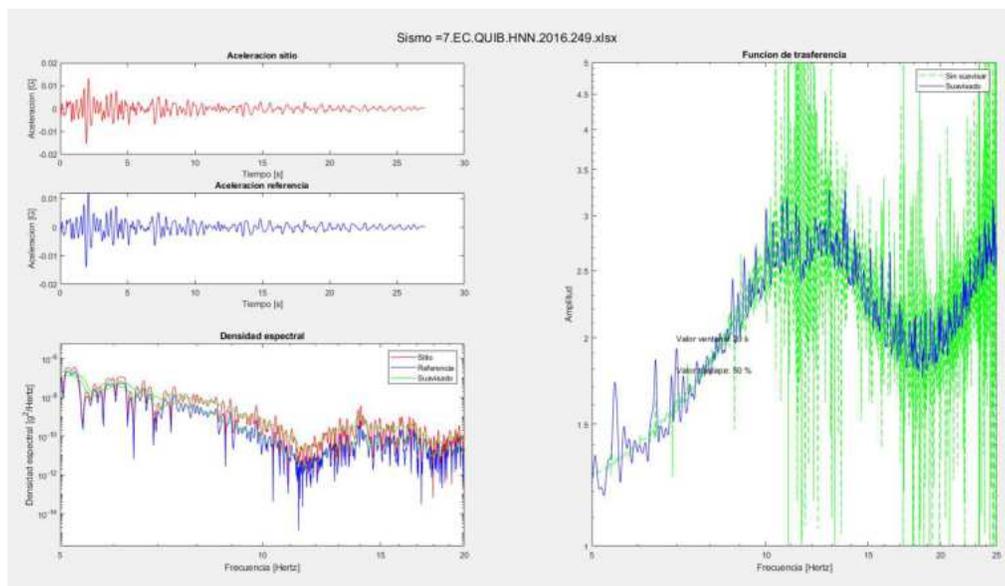
**FIGURA 139** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



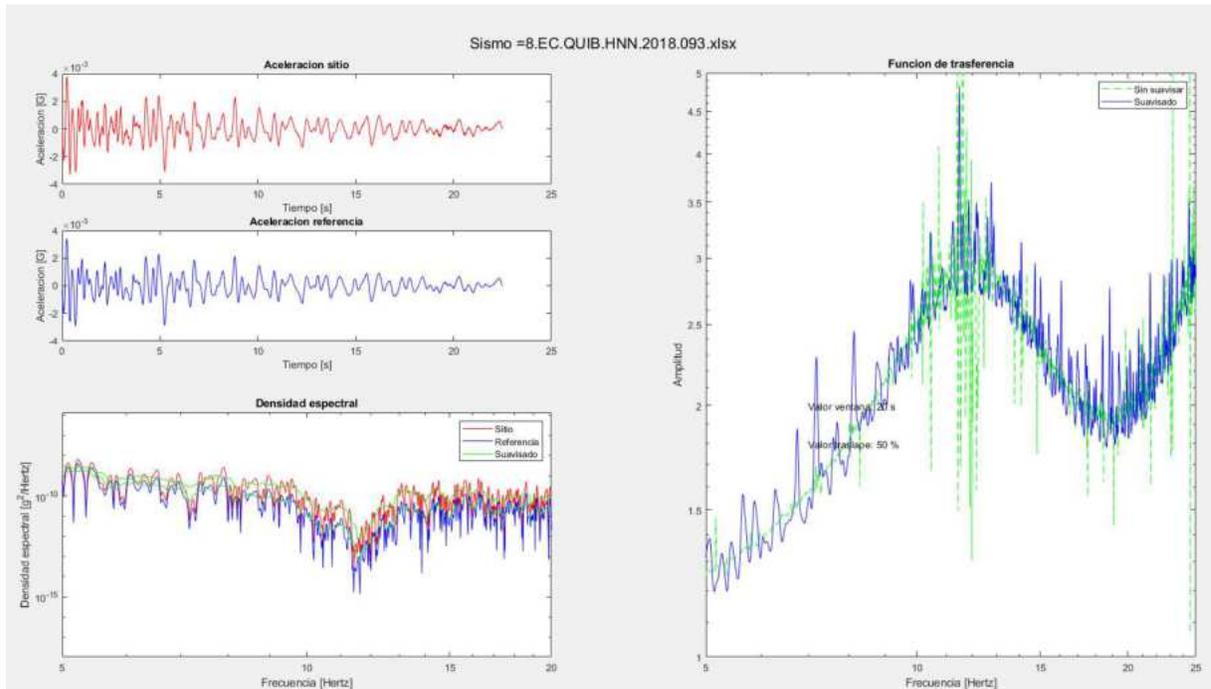
**FIGURA 140** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 141** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 7.

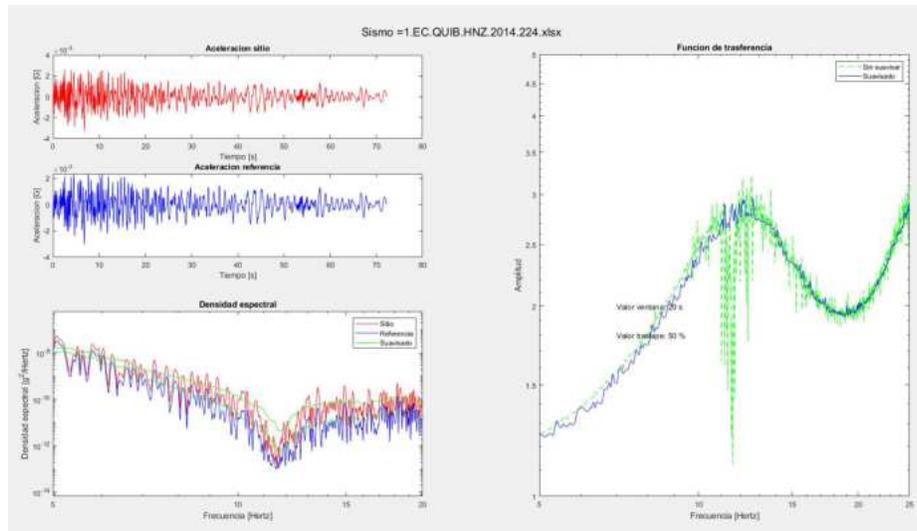
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 142** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 8.

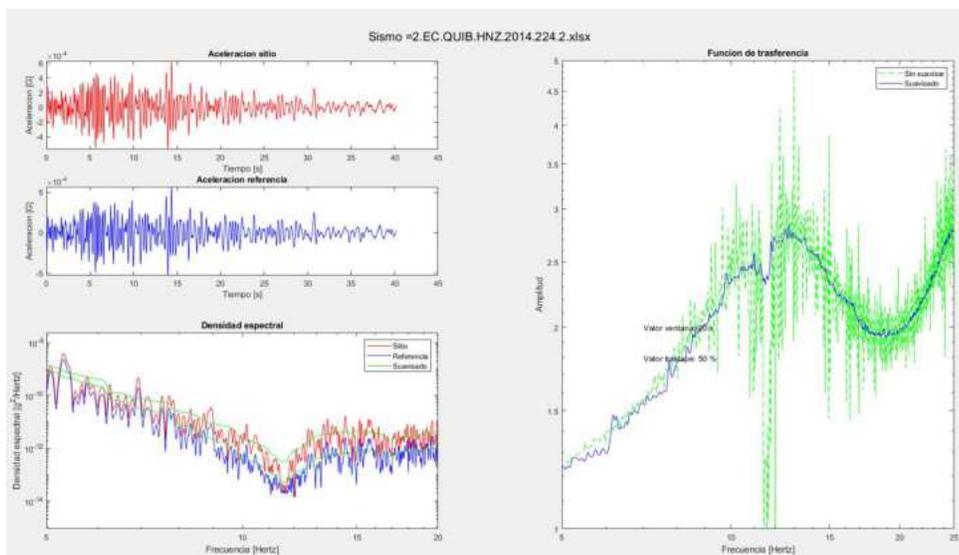
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.5.3.2.2. COMPONENTE VERTICAL



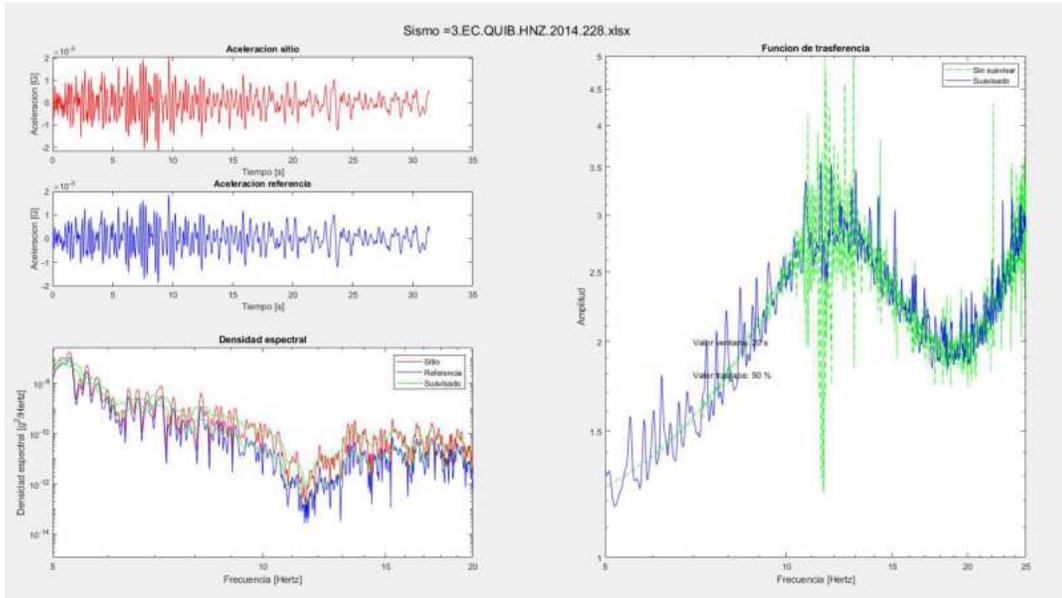
**FIGURA 143** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



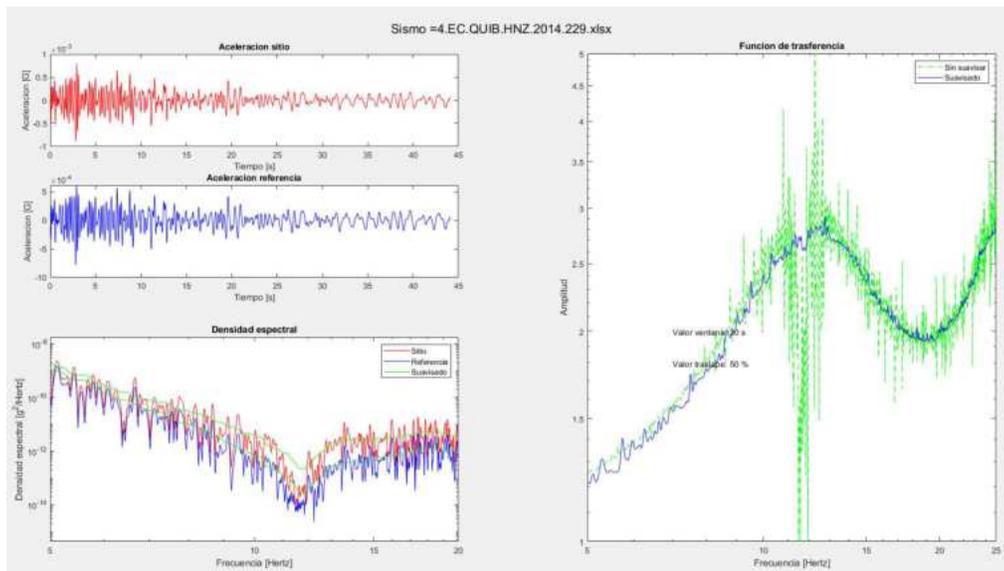
**FIGURA 144** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



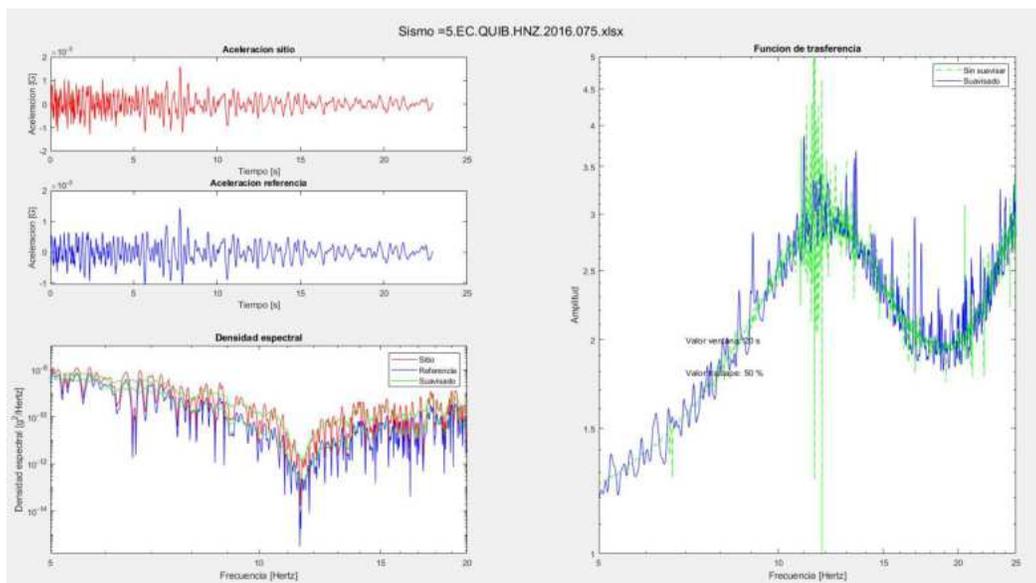
**FIGURA 145** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



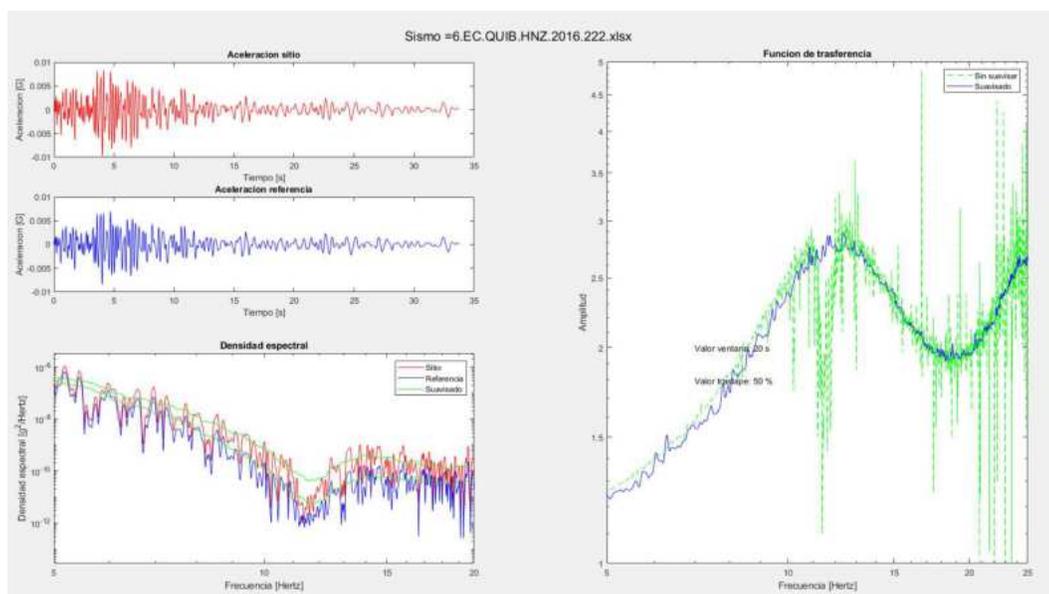
**FIGURA 146** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



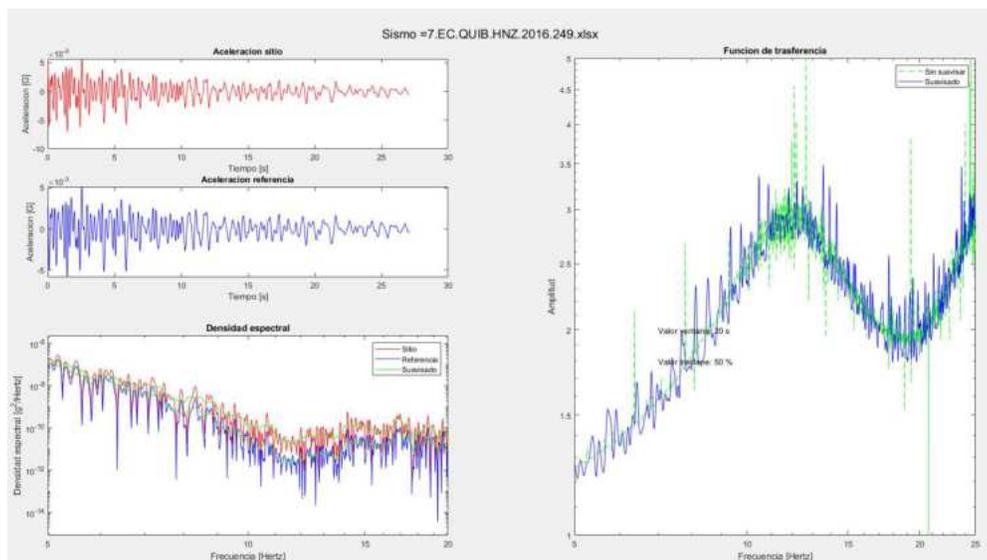
**FIGURA 147** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



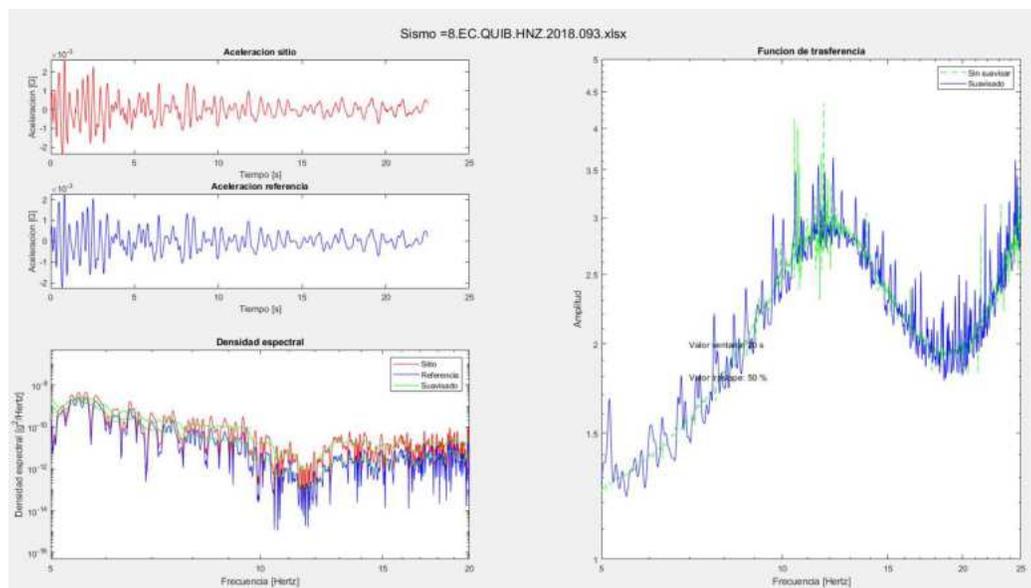
**FIGURA 148** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 149** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 7.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



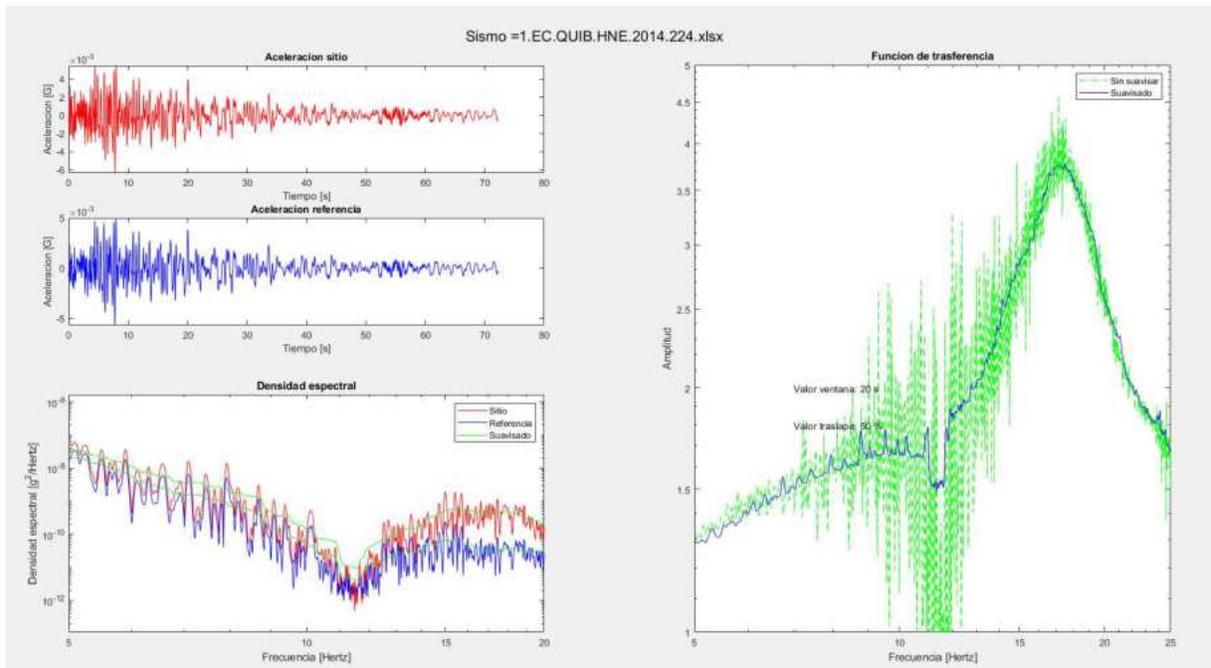
**FIGURA 150** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 8.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.5.4. GRÁFICOS CONVOLUCION PCQ0014

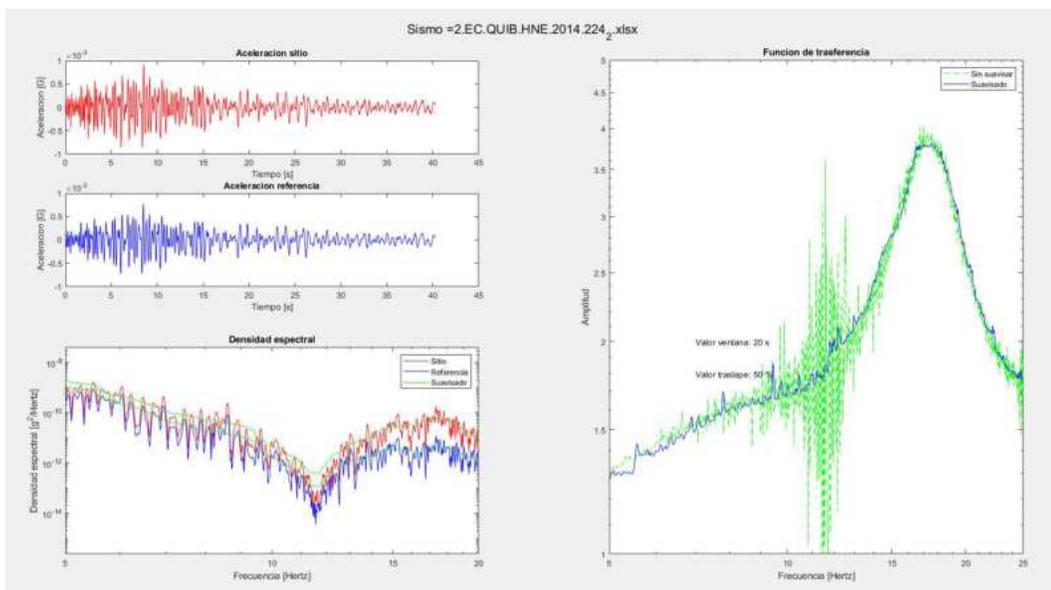
### 6.5.4.1. MÉTODO LINEAL

#### 6.5.4.1.1. COMPONENTE HORIZONTAL



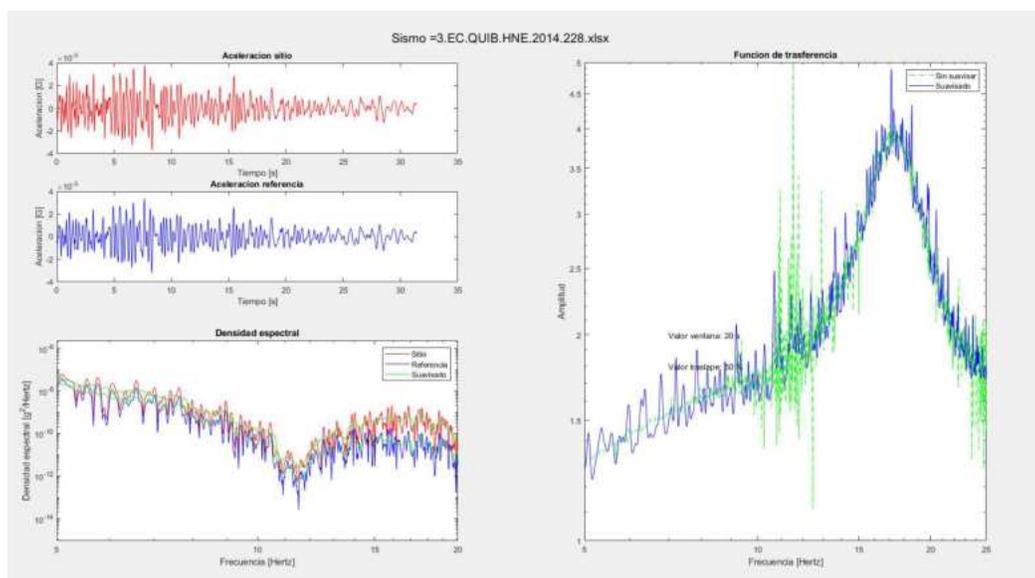
**FIGURA 151** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



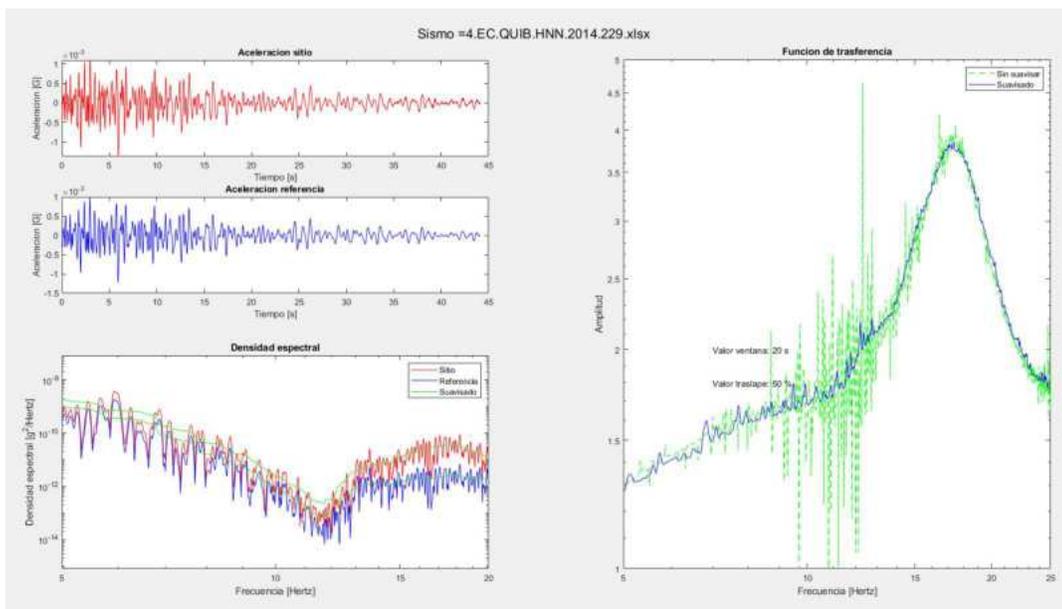
**FIGURA 152** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



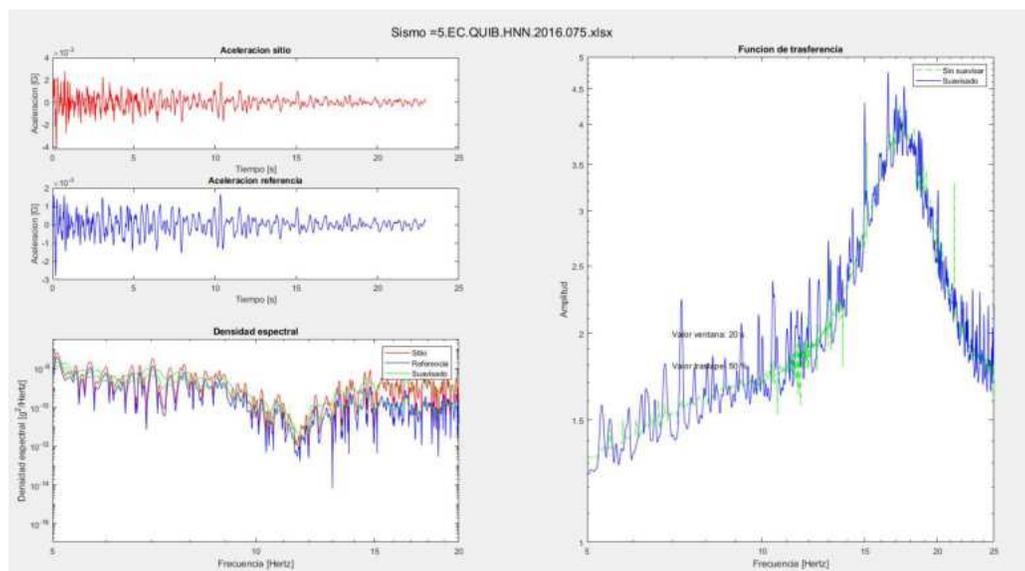
**FIGURA 153** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



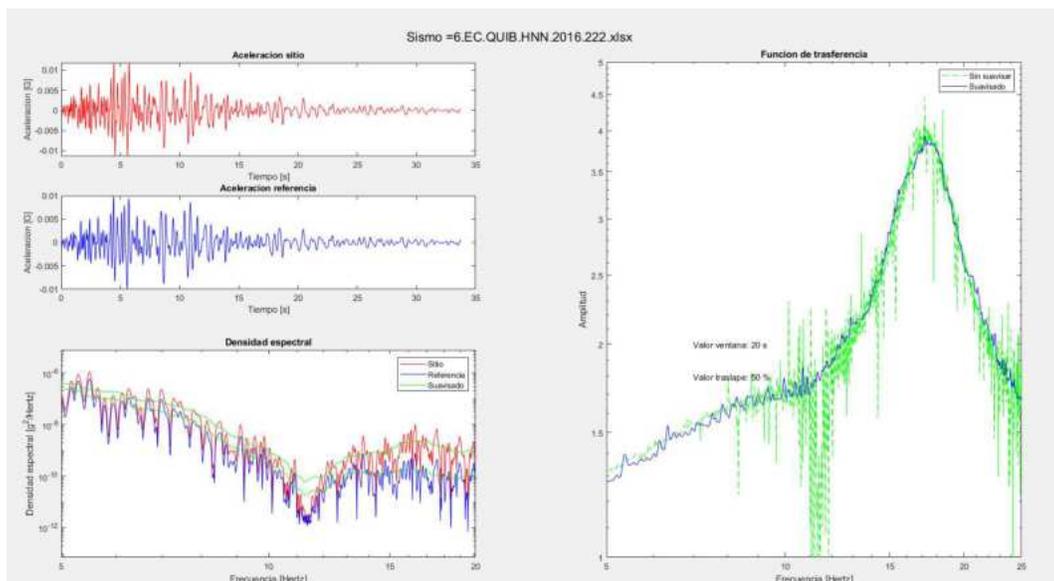
**FIGURA 154** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



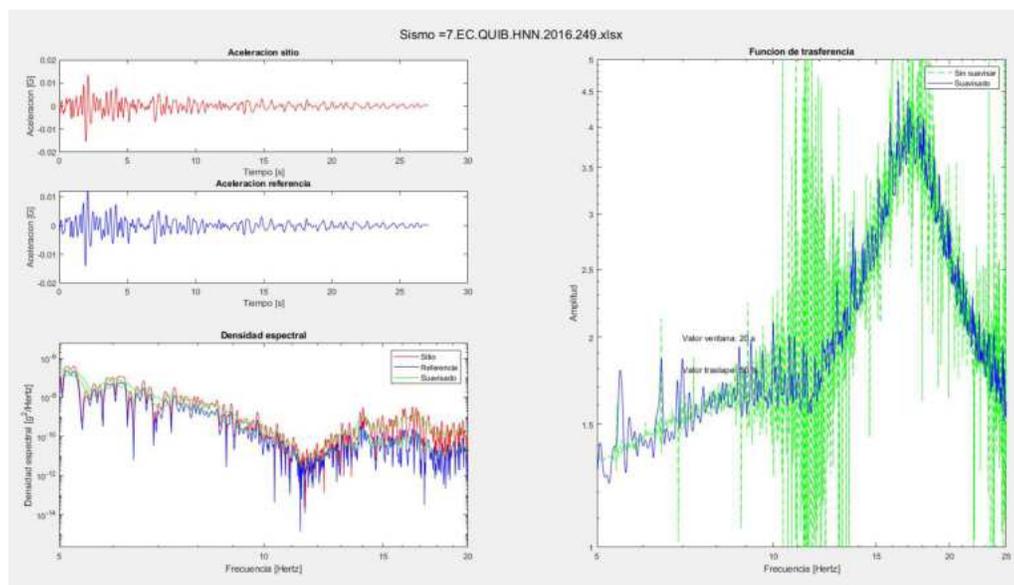
**FIGURA 155** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



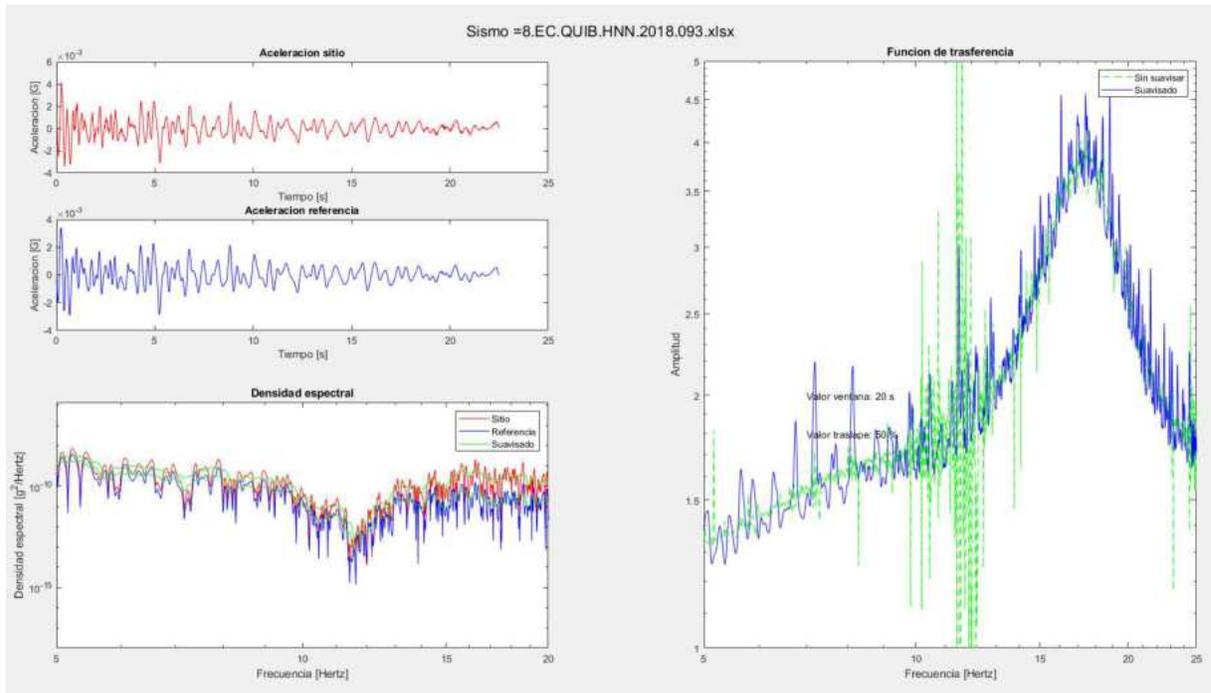
**FIGURA 156** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 157** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 7.

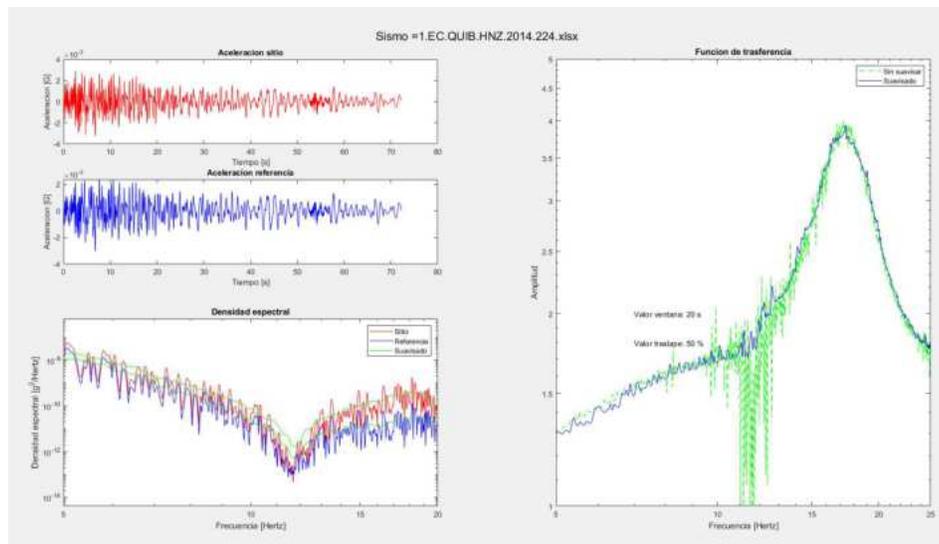
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 158** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de trasferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente horizontal del sismo 8.

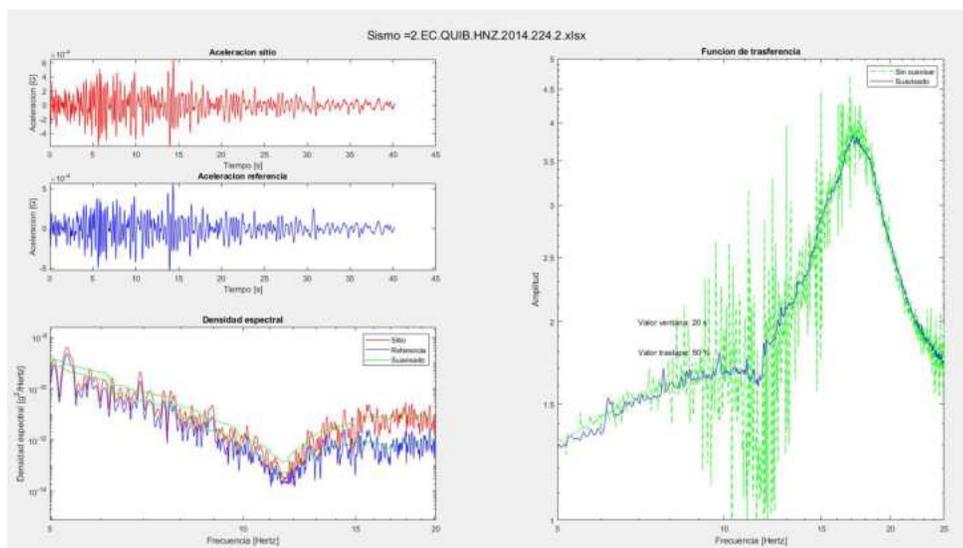
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.5.4.1.2. COMPONENTE VERTICAL



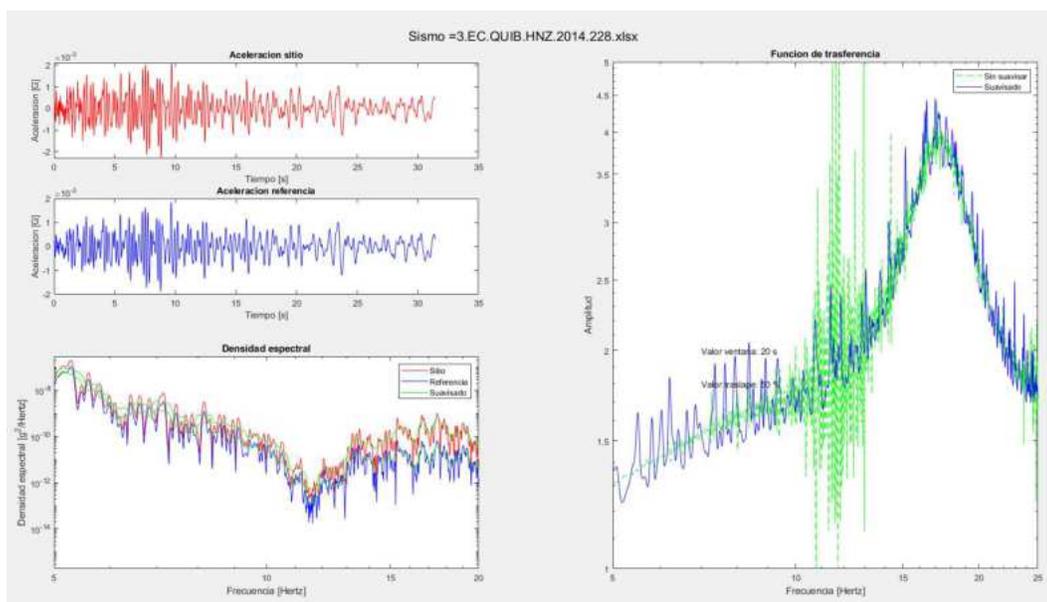
**FIGURA 159** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



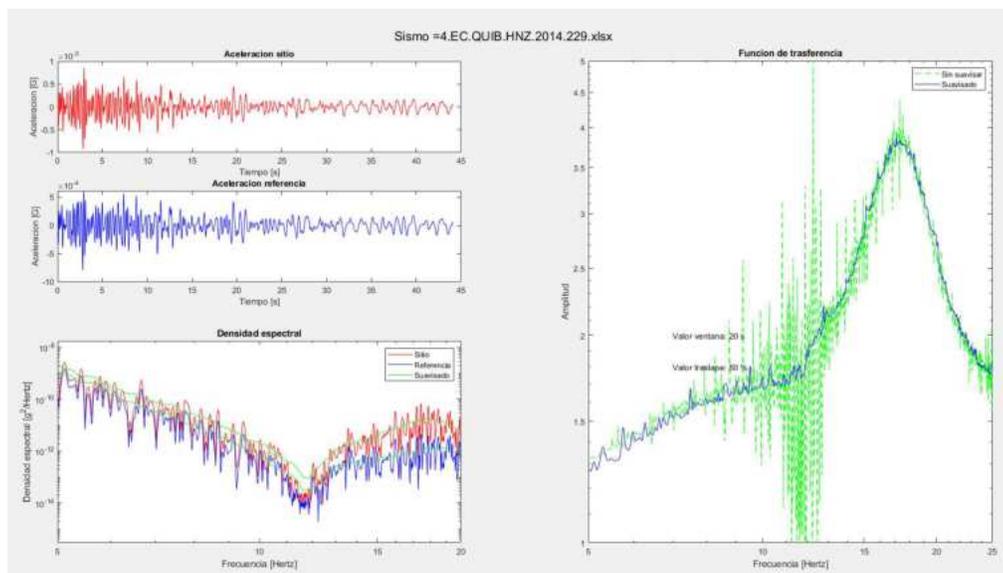
**FIGURA 160** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



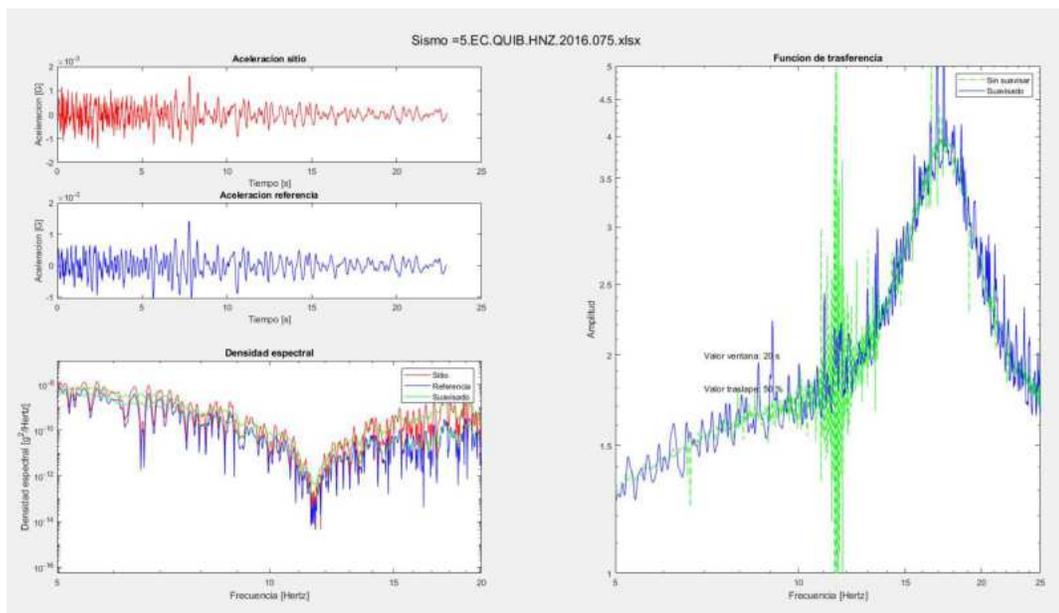
**FIGURA 161** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



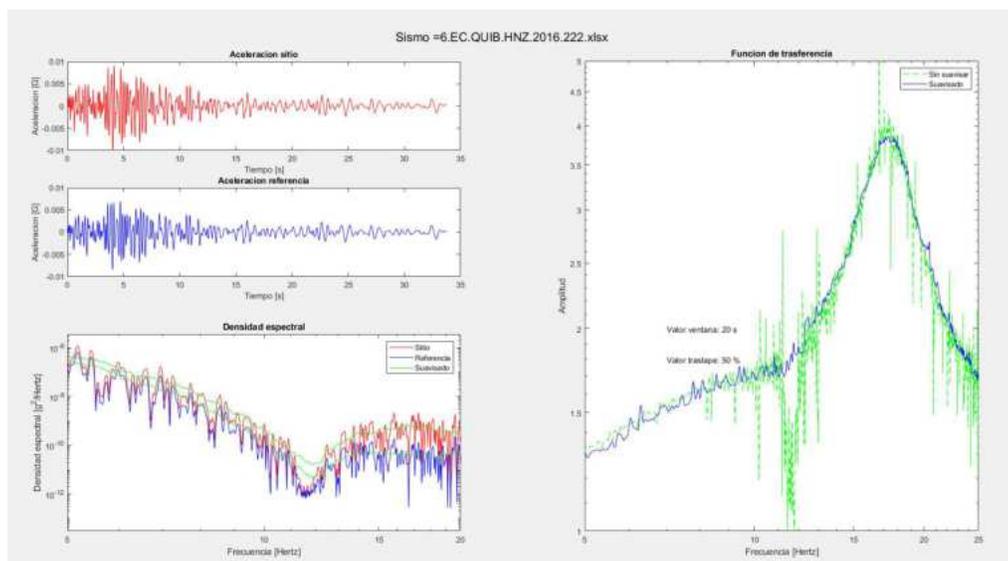
**FIGURA 162** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



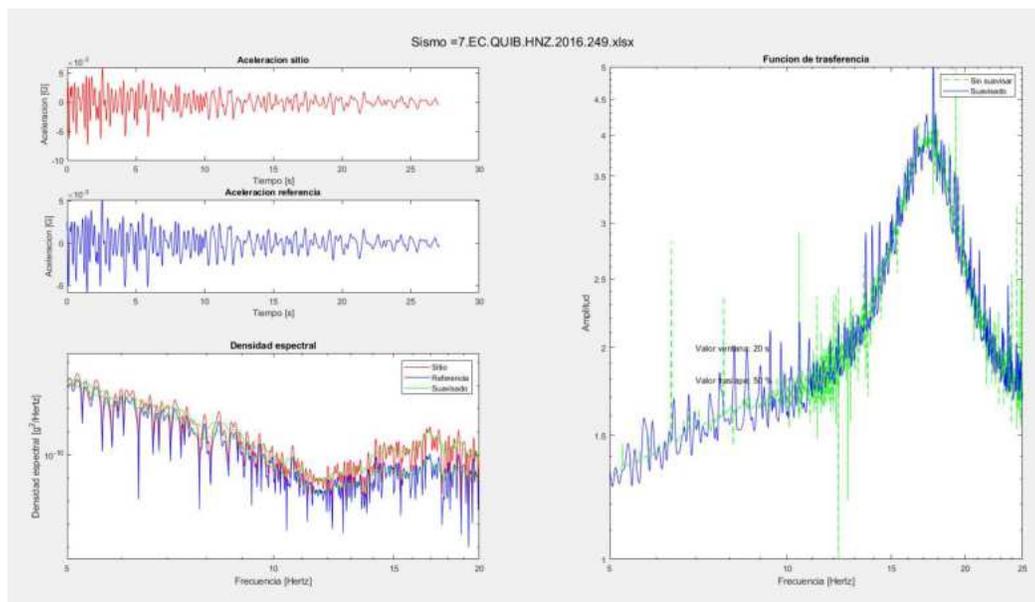
**FIGURA 163** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



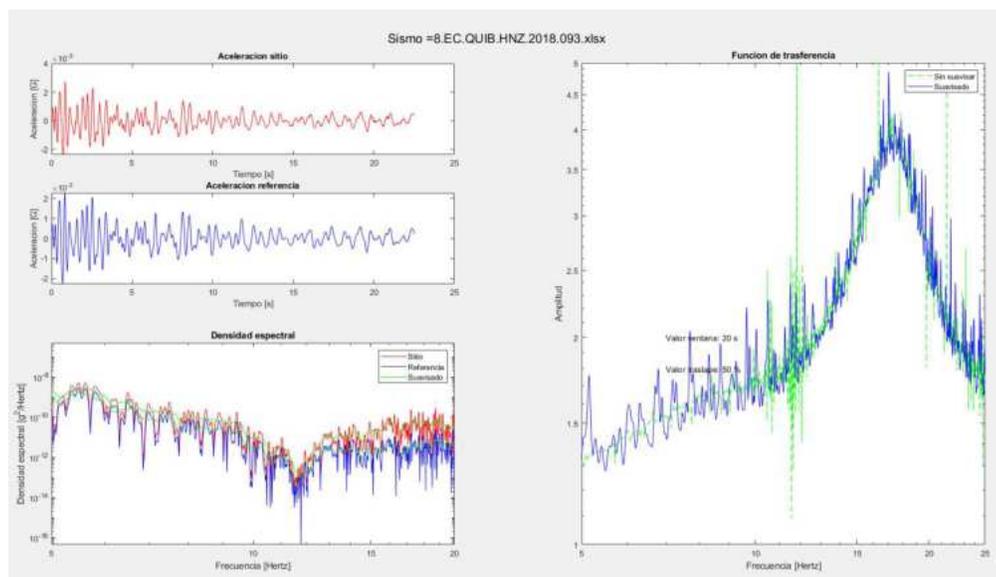
**FIGURA 164** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 165** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 7.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

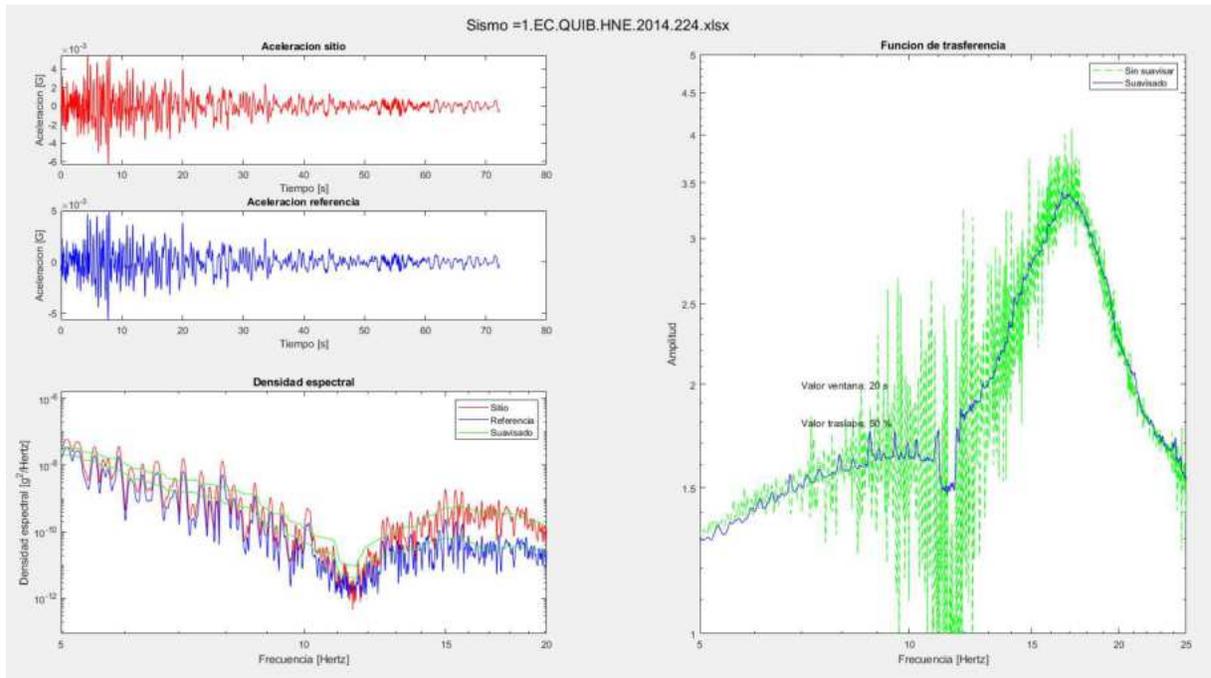


**FIGURA 166** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal, componente vertical del sismo 8.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

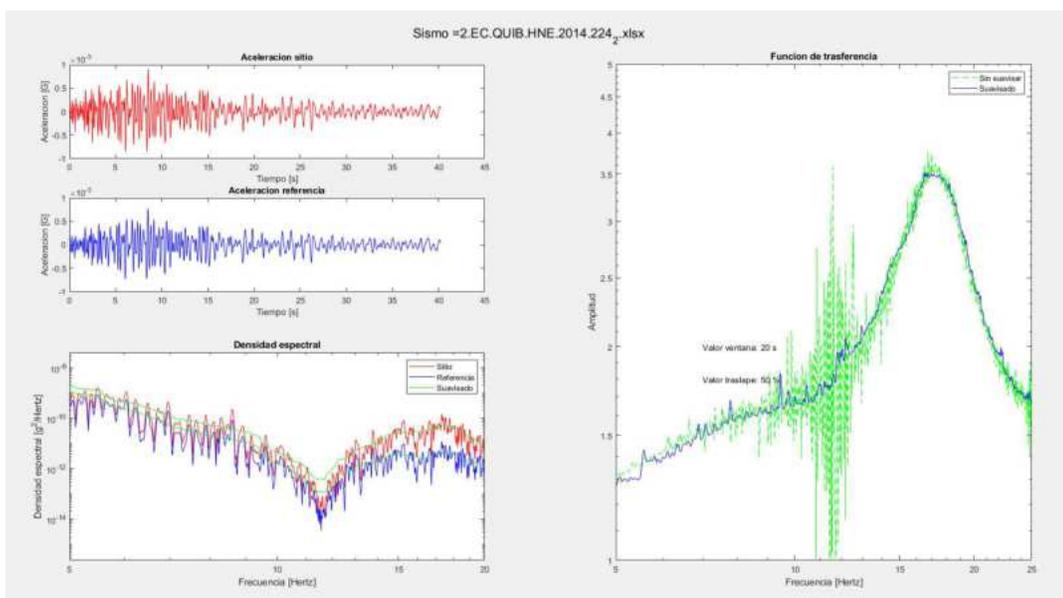
## 6.5.4.2. MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE

### 6.5.4.2.1. COMPONENTE HORIZONTAL



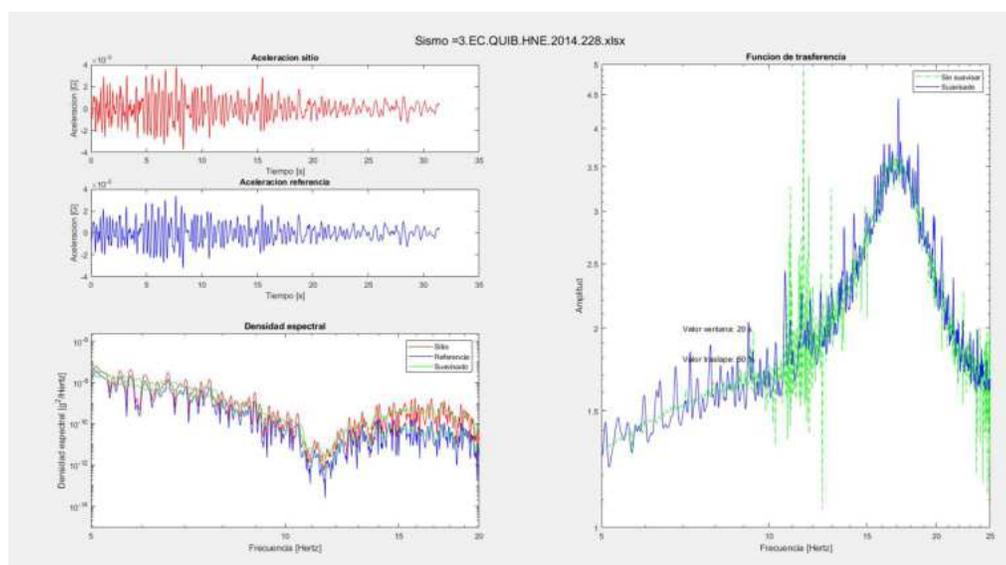
**FIGURA 167** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



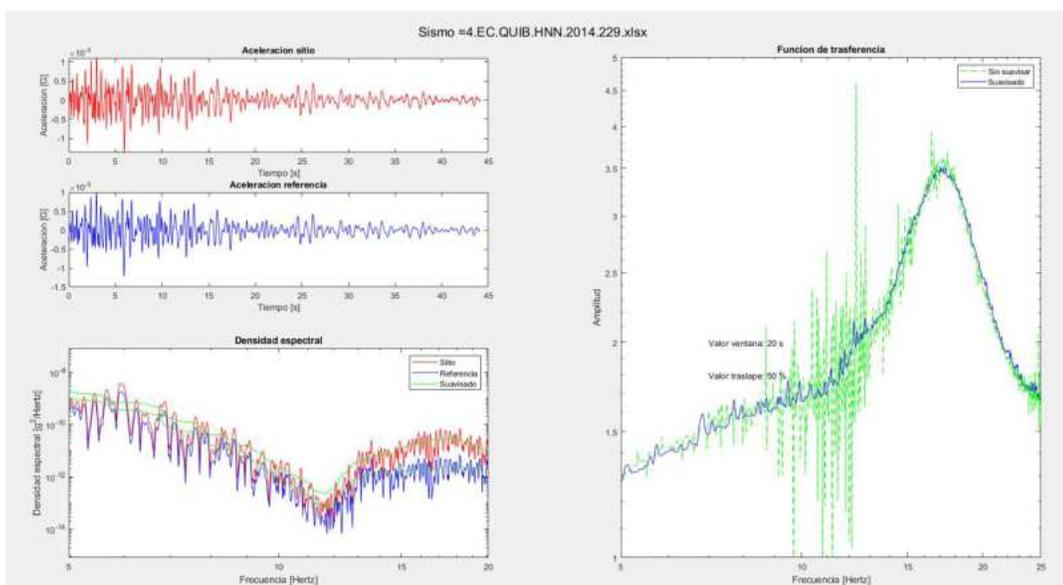
**FIGURA 168** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



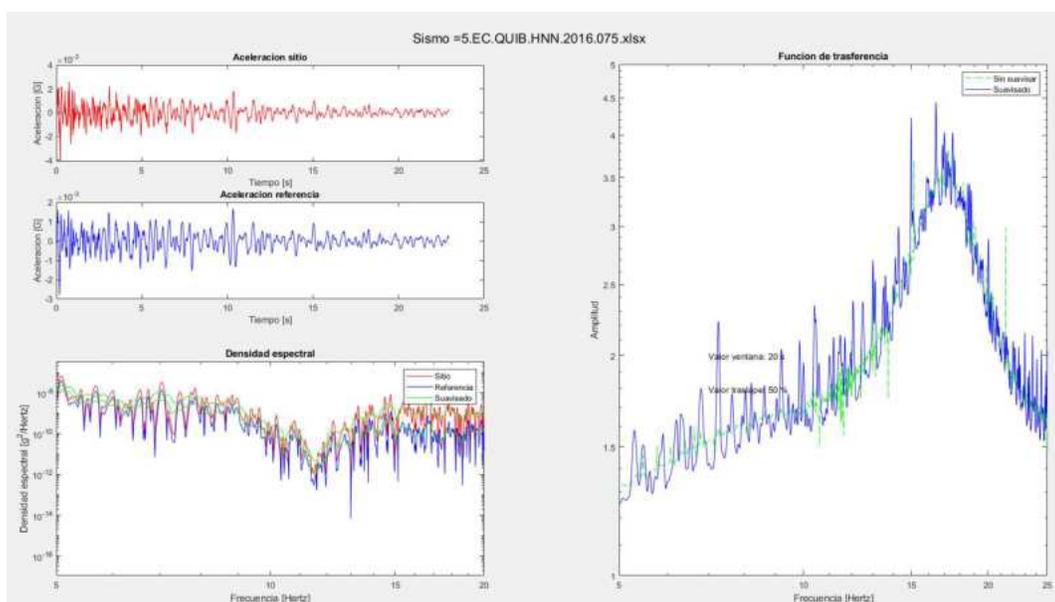
**FIGURA 169** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



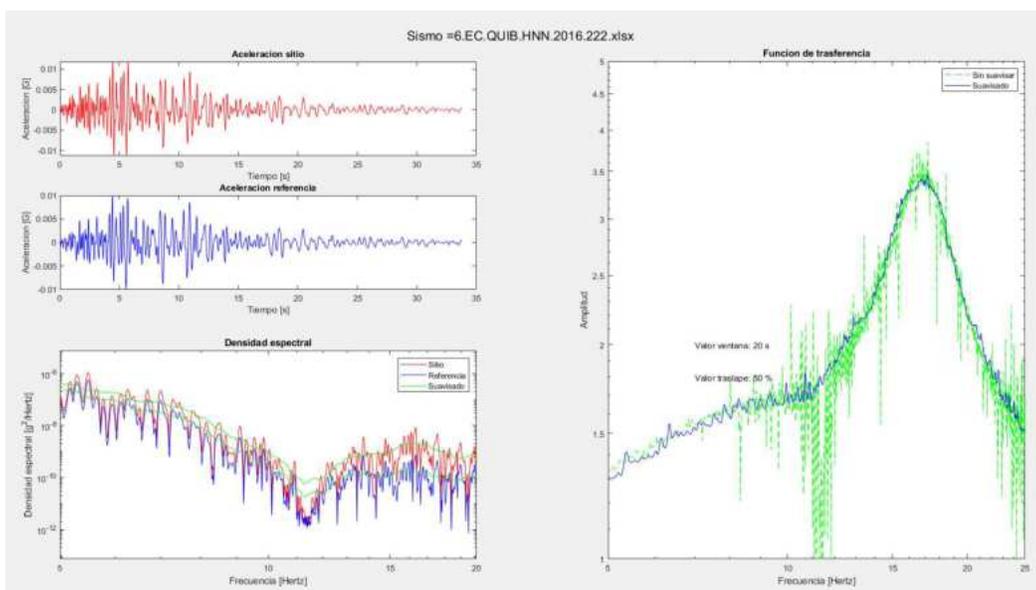
**FIGURA 170** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



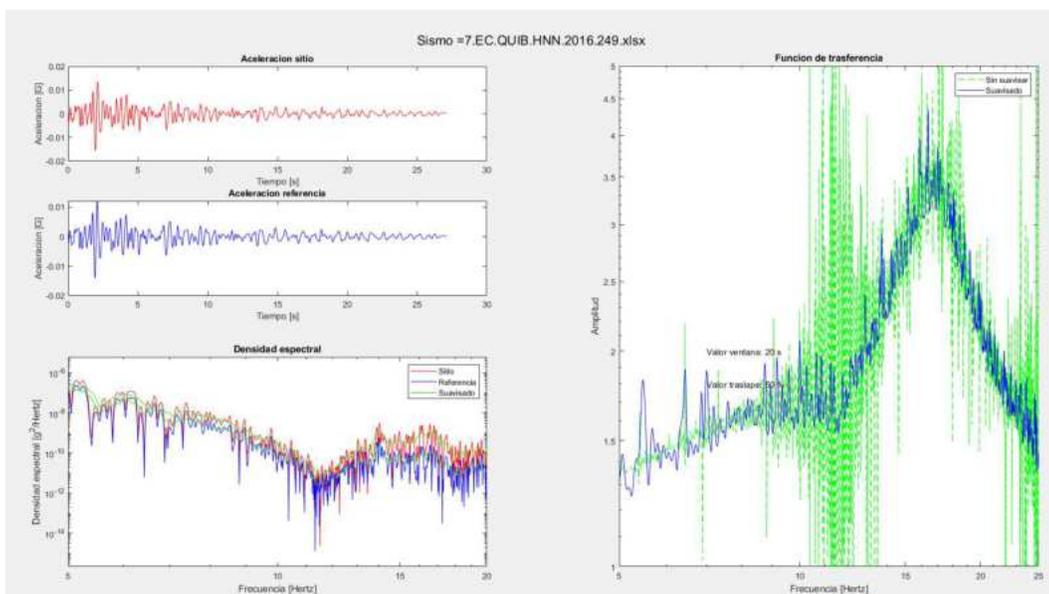
**FIGURA 171** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



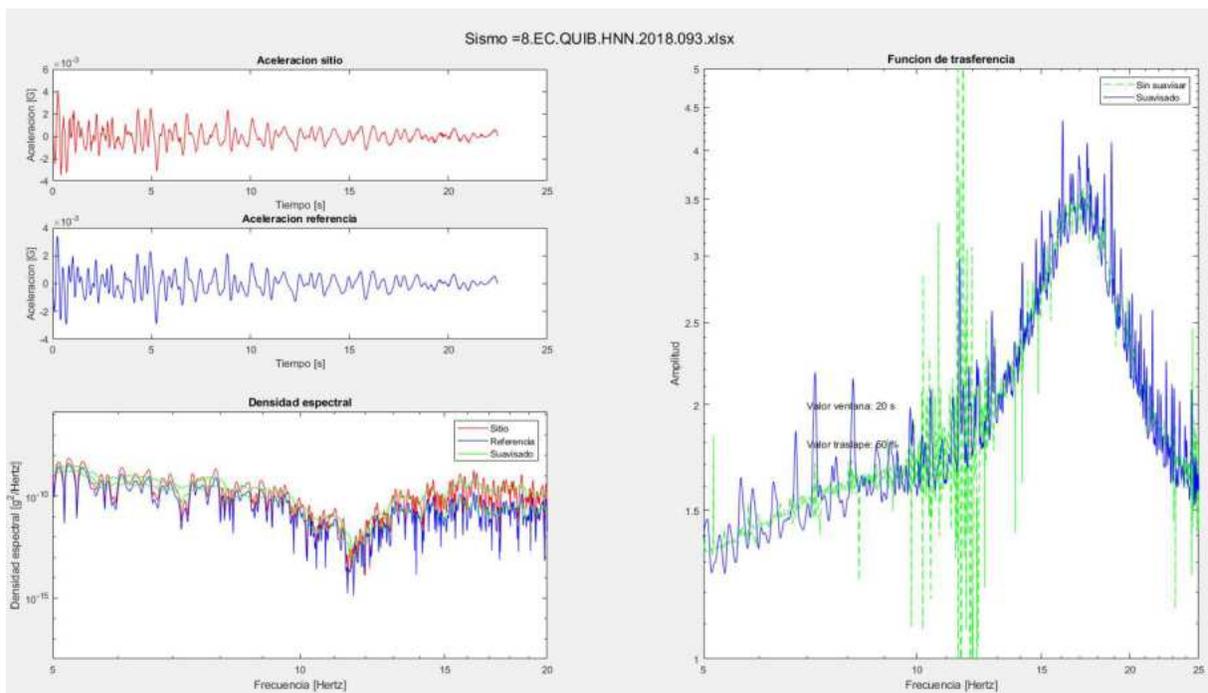
**FIGURA 172** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 173** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 7.

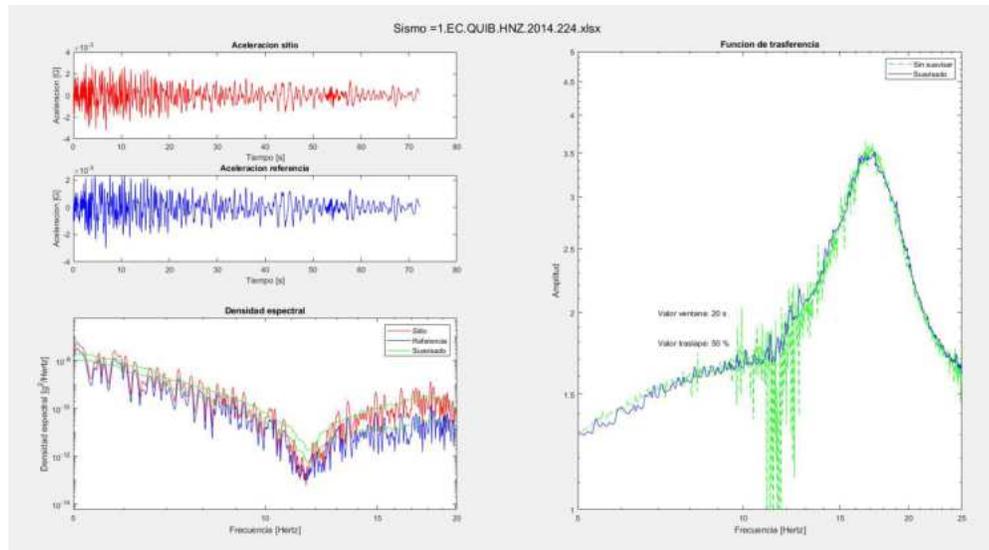
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 174** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente horizontal del sismo 8.

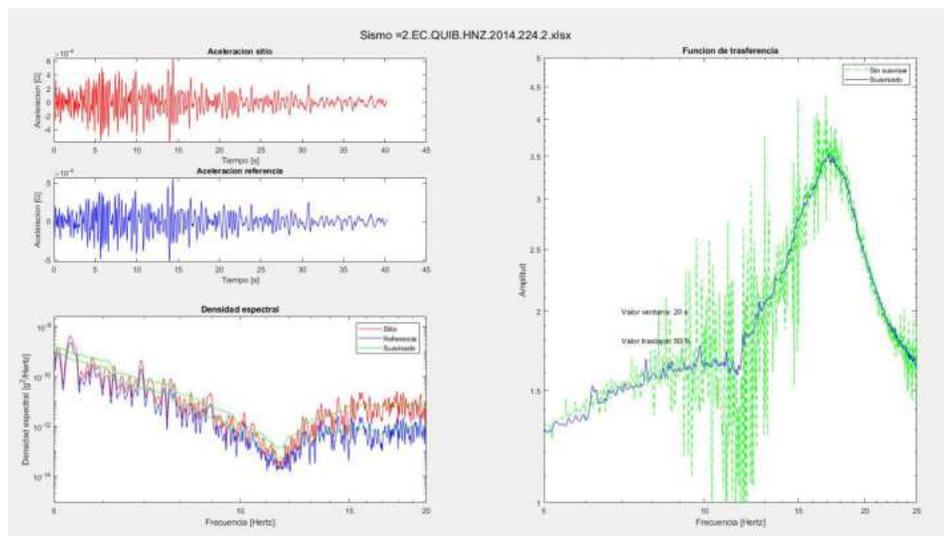
ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)

## 6.5.4.2.2. COMPONENTE VERTICAL



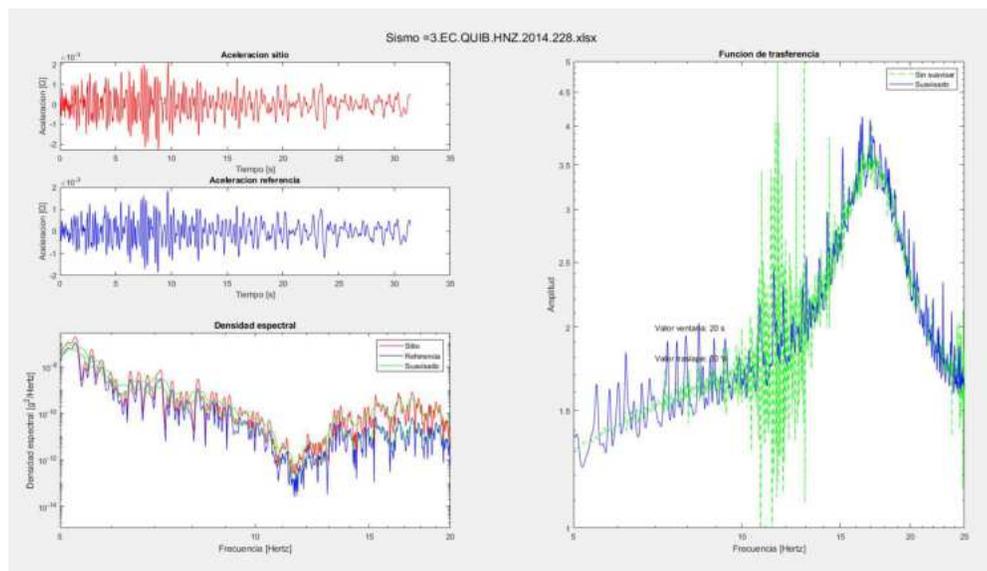
**FIGURA 175** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 1.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



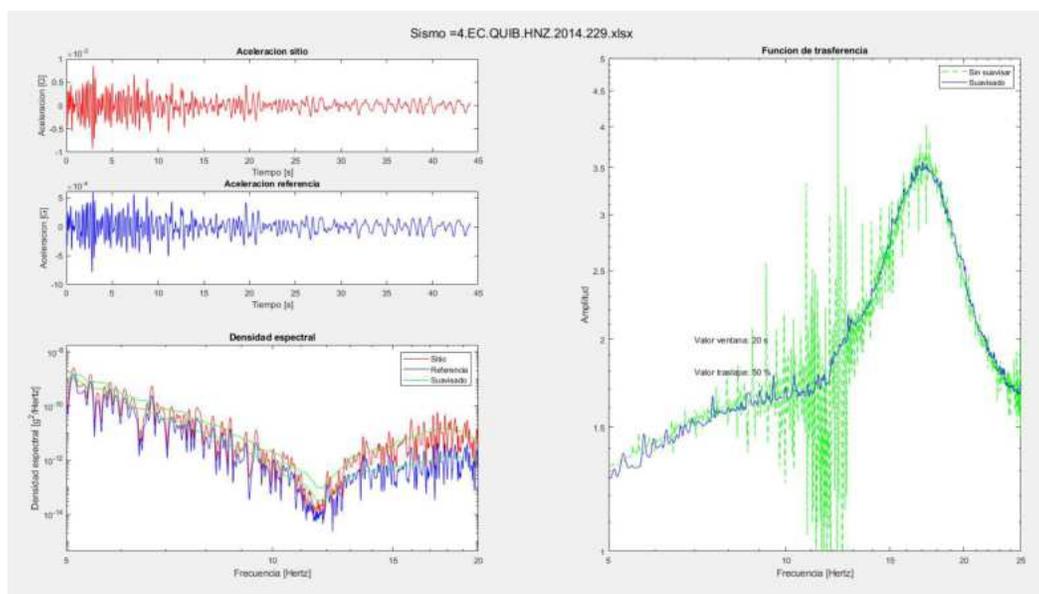
**FIGURA 176** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 2.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



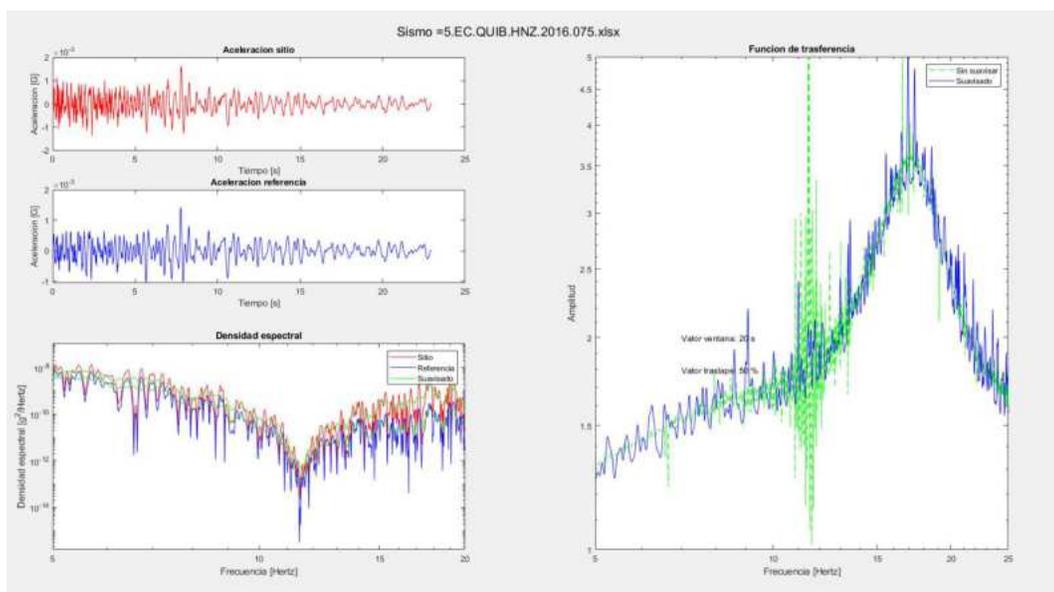
**FIGURA 177** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 3.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



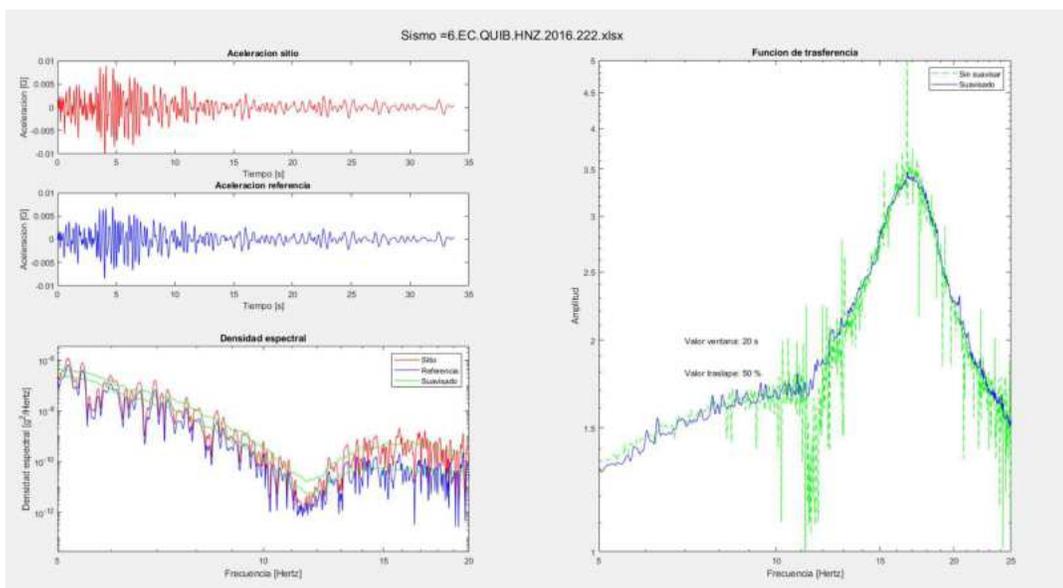
**FIGURA 178** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 4.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



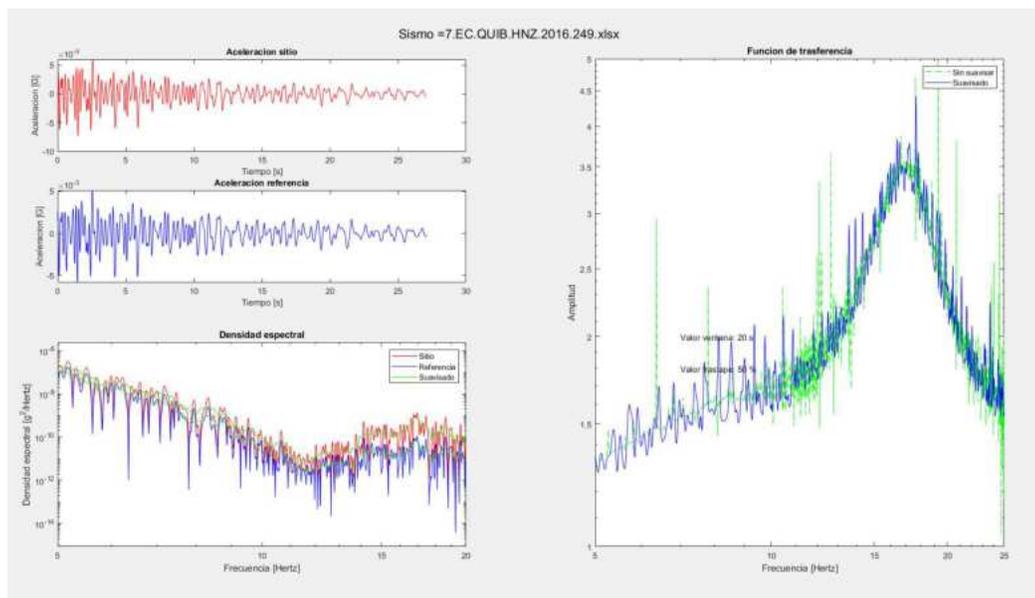
**FIGURA 179** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 5.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



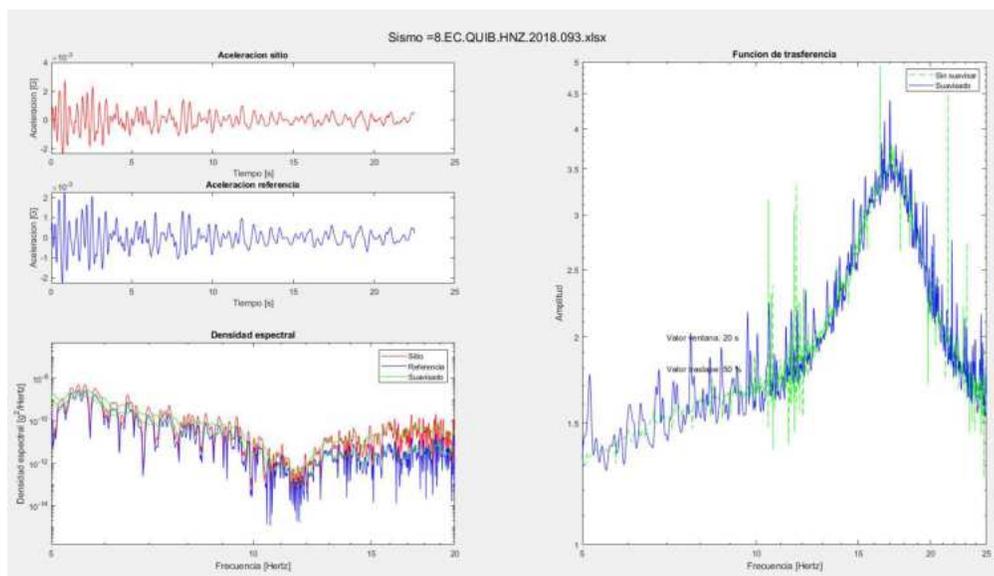
**FIGURA 180** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 6.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 181** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 7.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)



**FIGURA 182** Izquierda superior: gráficos aceleración de sitio, de referencia, izquierda inferior: densidades espectrales de sitio, referencia y suavizadas; derecha: función de transferencia real y suavizada, mediante el método lineal equivalente, componente vertical del sismo 8.

ELABORADO: (Bonilla & López, 2022)