UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Obtención de perfiles de velocidad de ondas de corte mediante la inversión
del cociente espectral H/V en el distrito de Santa Rosa - Lima

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Nalvarte Beltrán, Sergio Antonio (0000-0003-2404-2152)

Oyarce Rengifo, José Manuel (0000-0003-4571-523X)

ASESOR

Dr. Cárdenas Guillén, Jorge Luis (0000-0001-5420-1877)

Lima, 18 de Setiembre del 2018

DEDICATORIA

A Dios, por darme fuerzas para nunca darme por vencido.

A mis padres, Eusebio y Benjamina, por su amor y fe en mí.

A mis hermanos, Ernesto y Chevi, por los consejos brindados y el apoyo incondicional.

Este logro es gracias a ustedes.

Nalvarte Beltrán, Sergio Antonio

Es mi deseo como sencillo gesto de agradecimiento, dedicar mi tesis de grado a mis amados padres, Carlos y Marcela, y a mi querida novia Eliana, quienes me apoyaron con su espíritu alentador, contribuyendo incondicionalmente a lograr mis objetivos propuestos.

A mi familia, maestros, compañeros y amigos quienes me compartieron sus conocimientos, alegrías y apoyo moral en esta importante etapa.

Oyarce Rengifo, José Manuel

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por haber compartido una valiosa información para realizar la presente tesis, y al Dr. Hernando Tavera que sin cuyo apoyo esta investigación no hubiera podido ser culminada.

Al Dr. Jorge Cárdenas por sus enseñanzas, apoyo y confianza durante el desarrollo de esta tesis y en nuestra formación profesional.

A la Ing. Rocío Uriarte por sus consejos y sugerencias para la presente investigación.

RESUMEN

La presente tesis se realizó con la finalidad de evaluar el uso inversión 1D de la curva de cociente espectral H/V para estimación de la velocidad de ondas de corte en el distrito de Santa Rosa, a partir de métodos de optimización no lineal, basados en el Algoritmo de Vecindario (Sambridge, 1999a). En esta investigación se recopiló información de medición de datos de ruido sísmico ambiental, que fueron realizados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP). Con estos datos se realizó la digitalización de la curva H/V con el programa SimpleDigitizer, para obtener el formato que se utilizará para la inversión. Posteriormente, se usó el programa Geopsy-Dinver que es un módulo que permite realizar la inversión de las curvas H/V. Los modelos 1D generados fueron comparados con ensayos MASW, los cuales muestran un resultado bastante cercano.

Palabras clave: Refracción sísmica; Cociente espectral H/V, Velocidad de ondas de corte, Método inverso.

Obtaining shear-wave velocity profiles through the H/V spectral ratio inversion in the district of Santa Rosa - Lima

ABSTRACT

The present thesis was carried out with the purpose of evaluating the use of inverse-1D of the curve of H/V spectral ratio for estimation of the shear-wave velocity in the district of Santa Rosa, from methods of no-linear optimization, based on the Algorithm of Neighborhood (Sambridge, 1999a). In this research, there was compiled information of measurements of seismic environmental noise, which were effected by the Geophysical Institute of Peru (IGP). With this data, there was realized the digitalization of the H/V curve with the SimpleDigitizer software, to obtain the format that will be used for the inversion. Subsequently, there was used the Geopsy-Dinver software that is a module that allows to make the inversion of the H/V curves. The 1D models generated were compared with the MASW tests, which show a very close result.

Keywords: Seismic refraction; H/V spectral ratio; Shear-wave velocity; Inverse method.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	10
1.1 GENERALIDADES	10
1.2 ANTECEDENTES	11
1.3 FUNDAMENTACIÓN.....	12
1.3.1 Realidad problemática	12
1.3.2 Formulación del problema.....	13
1.3.3 Hipótesis	13
1.4 OBJETIVOS.....	14
1.4.1 Objetivo general	14
1.4.2 Objetivos específicos	14
1.5 INDICADORES DE LOGRO.....	14
1.6 METODOLOGÍA	15
1.7 CONTENIDO DEL ESTUDIO.....	16
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	17
2.1 ONDAS SÍSMICAS	17
2.1.1 Ondas de cuerpo	17
2.1.1.1 Ondas primarias.....	17
2.1.1.2 Ondas secundarias	18
2.1.2 Ondas superficiales.....	18
2.1.2.1 Ondas Love.....	19
2.1.2.2 Ondas Rayleigh	19
2.2 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL SUELO	20
2.2.1 Velocidades de ondas	20
2.2.2 Periodo fundamental.....	22
CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE ANÁLISIS.....	23
3.1 MÉTODO DE NAKAMURA.....	23
3.2 TÉCNICAS GEOFÍSICAS PARA EL ANÁLISIS DE ONDAS	26
3.2.1 Refracción sísmica.....	27

3.2.2	Técnicas de arreglos sísmicos lineales (MASW)	27
3.3	INVERSIÓN	30
3.3.1	Algoritmo de Vecindario	32
3.3.2	Elipticidad	34
CAPÍTULO 4: CASO APLICATIVO		35
4.1	CARACTERIZACIÓN DE SITIO EN EL DISTRITO DE SANTA ROSA	35
4.1.1	Zona de estudio	35
4.1.2	Aspecto geológico	37
4.1.3	Aspecto geomorfológico	39
4.1.4	Caracterización geotécnica de sitio	40
4.1.5	Caracterización dinámica de sitio	44
4.1.5.1	Recolección de datos	44
4.1.5.2	Distribución de periodos dominantes	46
4.1.5.3	Ensayos de MASW	47
4.2	PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	49
4.2.1	Curvas de razones espectrales H/V	49
4.2.2	Programa Geopsy – Dinver	51
4.2.3	Matriz de inicialización	53
4.3	DETERMINACIÓN DE PERFILES DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE	57
4.3.1	Comparación de H/V observado y teórico	57
4.3.2	Comparación de perfiles de ondas de corte	63
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		71
5.1	CONCLUSIONES	71
5.2	RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS		75
ANEXOS		77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros V_s del suelo según la Norma E.030.....	22
Tabla 2 Clasificación SUCS de suelos para el Distrito de Santa Rosa.....	41
Tabla 3 Resumen de Calicatas de exploración.	42
Tabla 4 Capacidad portante para cada punto donde se construyó una calicata, distrito Santa Rosa.	43
Tabla 5 Resumen de Ensayos MASW.....	47
Tabla 6 Matriz de inicialización para el área 1 en Santa Rosa.	54
Tabla 7 Matriz de inicialización para el área 2 en Santa Rosa.	54
Tabla 8 Matriz de inicialización para el área 3 en Santa Rosa.	55
Tabla 9 Matriz de inicialización para el área 4 en Santa Rosa.	55
Tabla 10 Velocidades de ondas de corte de perfiles sintéticos para registros H/V en el Área 1.	64
Tabla 11 Velocidades de ondas de corte de perfiles sintéticos para registros H/V en el Área 2 cercana al borde litoral.	65
Tabla 12 Velocidades de ondas de corte de perfiles sintéticos para registros H/V en el rea 2..	66
Tabla 13 Velocidades de ondas de corte de perfiles sintéticos para registros H/V en el Área 3.	68
Tabla 14 Velocidades de ondas de corte de perfiles sintéticos para registros H/V en el Área 4.	69
Tabla 15 Variación de V_s entre MASW y registros H/V.	70
Tabla 16 Registro de puntos de vibración ambiental.	77
Tabla 17 Registro de puntos de MASW.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Comportamiento de las ondas primarias.	17
<i>Figura 2.</i> Comportamiento de las ondas secundarias.....	18
<i>Figura 3.</i> Comportamiento de las ondas Love.	19
<i>Figura 4.</i> Comportamiento de las ondas Rayleigh.	19
<i>Figura 5.</i> Descripción gráfica del procesamiento de los registros de vibraciones ambientales.	26
<i>Figura 6.</i> Configuración de equipo para el registro de datos - Método MASW.....	28
<i>Figura 7.</i> Esquema de la metodología utilizada para el procesamiento de datos obtenidos por un arreglo lineal, usando el análisis de F-K para determinar el perfil de velocidades.	30
<i>Figura 8.</i> Definición de un problema de inversión.	31
<i>Figura 9.</i> Celdas de Voronoi para un espacio de parámetro de dos dimensiones.	33
<i>Figura 10.</i> Mapa de ubicación y límites del Distrito de Santa Rosa.	36
<i>Figura 11.</i> Mapa geológico del Distrito de Santa Rosa.	37
<i>Figura 12.</i> Vista del balneario de Santa Rosa: terraza marina, zona albufera en verde y edificaciones ubicadas en terraza aluvio-eólica. En el fondo, se muestra un afloramiento rocoso volcánico.	38
<i>Figura 13.</i> Mapa geomorfológico para el Distrito de Santa Rosa.	39
<i>Figura 14.</i> Vista del sector La Bajada, extremo SO del Distrito de Santa Rosa, se observa un asentamiento humano sobre arenas eólicas.	40
<i>Figura 15.</i> Mapa de distribución de las 7 calicatas ejecutadas en el distrito de Santa Rosa... ..	42
<i>Figura 16.</i> Mapa de distribución espacial de puntos de vibración ambiental en el Distrito de Santa Rosa.	45
<i>Figura 17.</i> Mapa de distribución de periodos dominantes para el distrito de Santa Rosa.	46
<i>Figura 18.</i> Mapa de distribución de ensayos MASW.	48
<i>Figura 19.</i> Ejemplo de gráfica de razón espectral obtenida en el extremo NE del distrito de Santa Rosa (Área 1).	49
<i>Figura 20.</i> Interfaz del programa SimpleDigitizer.	50
<i>Figura 21.</i> Determinación de las coordenadas de 100 puntos ubicados en la primera capa de la gráfica (arriba hacia abajo).	50
<i>Figura 22.</i> Ejemplo del formato *.hv.	51
<i>Figura 23.</i> Procedimiento del programa Geopsy.	52

<i>Figura 24. Comparación de espectro H/V para el Área 1 – Registro 109.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 25. Comparación de espectro H/V para el Área 2 – Registro 87.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 26. Comparación de espectro H/V para el Área 2 – Registro 89.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 27. Comparación de espectro H/V para el Área 3 – Registro 152.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 28. Comparación de espectro H/V para el Área 4 – Registro 67.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 29. Comparación de perfiles para el Área 1 – Registro 109.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 30. Comparación de perfiles para el Área 2 – Registro 87.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 31. Comparación de perfiles para el Área 2 – Registro 99.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 32. Comparación de perfiles para el Área 3 – Registro 152.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 33. Comparación de perfiles para el Área 4 – Registro 67.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 34. Registro del ensayo MASW 1.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 35. Registro del ensayo MASW 2.</i>	<i>113</i>
<i>Figura 36. Registro del ensayo MASW 3.</i>	<i>114</i>
<i>Figura 37. Registro del ensayo MASW 4.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 38. Registro del ensayo MASW 5.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 39. Registro del ensayo MASW 6.</i>	<i>117</i>

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En un evento sísmico, los daños que se producen en las estructuras están relacionados en gran parte con el comportamiento del suelo ante cargas cíclicas. En consecuencia, es importante estudiar y conocer sus propiedades mecánicas para poder considerar sus efectos en los diseños de obras civiles.

Nuestro país está ubicado en un lugar de alta sismicidad, debido a la cercanía al sitio de interacción entre la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca. Por ello, la preocupación por el comportamiento de nuestros suelos frente a eventos sísmicos es latente. Después del sismo ocurrido en Pisco (2007), se han incrementado las investigaciones del riesgo sísmico para mitigar los efectos negativos. Por lo tanto, es tarea de la ingeniería geotécnica continuar con las investigaciones y brindar recomendaciones para el comportamiento dinámico de los suelos.

La presente investigación, en consideración con lo anteriormente mencionado, estudia el método de inversión de la curva de cocientes espectrales H/V mediante el uso de la elipticidad de las ondas Rayleigh, y como consecuencia de ello, obtener el perfil de velocidades de ondas de corte del suelo del distrito de Santa Rosa, provincia y departamento de Lima.

Asimismo, se busca dar a conocer un método geofísico, que consiste en la inversión del cociente espectral H/V , con el fin de obtener el perfil de velocidades de ondas de corte, para que se ponga en práctica o sirva como fuente de nuevas investigaciones en nuestro país.

1.2 Antecedentes

Después de que la comunidad de investigación de geofísicos aceptara el método de razón espectral H/V, a partir del trabajo de Nakamura (1989), su uso se ha venido incrementando. Esto debido a su facilidad de ejecución y la importante información que contiene. Su principal uso está orientado a la determinación del periodo fundamental del suelo, pero en la actualidad, usando el procesamiento adecuado, se puede obtener la estratigrafía del subsuelo para estudios de microzonificación sísmica y obtención de modelos dinámicos del suelo.

El estudio de la teoría de ondas en medios estratificados se ha venido incrementando, debido a que los resultados de investigaciones basadas en esta son prometedores para determinar las características dinámicas del suelo. Estudios iniciales como el análisis espectral de frecuencia-número de onda (F-k) planteado por Capón (1969) y el análisis de autocorrelación espacial propuesto por Aki (1957) para las componentes verticales de los sensores de microtremor, medidos con arreglos de sensores, pueden dar las características de dispersión de las ondas de Rayleigh. Además, se ha puesto en manifiesto que el análisis inverso de los datos de dispersión brinda resultados exitosos del perfil de velocidad de onda de corte V_s de un depósito sedimentario (Horike, 1985, Matsushima y Okada, 1990, Tokimatsu et al., 1992). Hobiger, Bard, Cornou y Le Bihan (2009) propusieron una técnica RayDec para la obtención de la curva de elipticidad de la onda Rayleigh, la cual es invertida para determinar el perfil de velocidades de ondas de corte.

En septiembre del año 2010, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) desarrollo el Informe técnico de la Zonificación Sísmico-Geotécnica para siete distritos de Lima metropolitana (Pucusana, Santa María, San Bartolo, Punta Negra, Punta Hermosa, Santa Rosa y El Agustino). El objetivo de dicha investigación es presentar los resultados del estudio de Microzonificación Sísmica-Geotécnica con base en el comportamiento dinámico del suelo (Tavera, Bernal y Gómez, 2010). En dicho informe técnico se desarrollan los estudios sísmicos y geotécnicos para el área de Santa Rosa, los cuales son la base de esta investigación.

En el informe técnico, se dividió el distrito de Santa Rosa en cuatro áreas de estudios, con el fin de ejecutar los ensayos de análisis de ondas superficiales con arreglo multicanal, conocidos como MASW. Para cada zona de estudio se obtuvo un perfil dominante de velocidades de onda de corte (V_s), mediante el ensayo MASW.

La presente tesis, siguiendo la línea de investigación de los estudios desarrollados en el Informe técnico del Instituto Geofísico del Perú, y la investigación titulada “Estudio Sísmico-Geotécnico para la Zonificación de Suelos en el distrito de Santa Rosa” (Arredondo, 2014), propone comparar perfiles de velocidades de onda de corte sintéticos con los observados en el ensayo MASW para el distrito de Santa Rosa. Posteriormente, se aproximarán perfiles sintéticos para registros de vibración ambiental con el fin de aportar información frente amenazas sísmicas.

1.3 Fundamentación

1.3.1 Realidad problemática

Debido a la incertidumbre de la ocurrencia de un evento sísmico, no se puede mitigar los efectos que puedan causar. Sin embargo, se puede tomar medidas preventivas para reducir su impacto. Los terremotos catastróficos dejaron lecciones importantes de su comportamiento y uno de los más relevantes es que la geología superficial del lugar, influye en el potencial destructivo de movimiento telúrico. Para ello es importante conocer las propiedades de los depósitos de suelo de diferentes sitios de nuestro país, ya que todos los lugares de una misma ciudad no tienen el mismo comportamiento ante un sismo. La evaluación del efecto de sitio es, por lo tanto, uno de los componentes clave para prevenir los desastres causados por un terremoto. Con el fin de evaluar los posibles efectos de forma cuantitativa, se busca determinar los perfiles de velocidad de onda de corte de uno, dos o tres dimensiones (V_s) de los depósitos sedimentarios, de preferencia hasta el lecho rocoso (Arai y Tokimatsu, 2004), ya que es una variable importante en el conocimiento de la geología superficial.

Sin embargo, es demasiado costoso y consume mucho tiempo estimar un perfil de onda de corte Vs de sedimentos basado en métodos geofísicos o geotécnicos debido al gran número de perforaciones necesarias. De esta manera, se requiere una metodología práctica y económica que permita la obtención de los perfiles de velocidades de ondas de corte Vs.

1.3.2 Formulación del problema

La historia sísmica del Perú muestra que la región costera presenta un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos que, de acuerdo a su magnitud, han ocasionado pérdidas humanas y materiales debido a sus efectos secundarios como asentamiento, licuación de suelos y derrumbes. Debido a su ubicación cercana a la interacción de la placa Sudamericana y la de Nazca existe la probabilidad de que las mismas áreas sean afectadas por nuevos sismos con igual o mayor intensidad.

Por otro lado, la ciudad de Lima Metropolitana ha empezado a experimentar procesos continuos de migración provenientes del interior del país a partir de los años 80. Debido a este motivo, y la mala planificación urbana, la población ha optado por construir sus viviendas en zonas donde el peligro ante desastres naturales es mayor. A ello se suma las construcciones que no obedecen al Reglamento Nacional de Edificaciones.

El área urbana de Santa Rosa (distrito de Lima) no fue la excepción, sufriendo una expansión urbana no planificada, incrementando de este modo el peligro ante la posible ocurrencia de sismos. Siendo esta el área que se ha seleccionado para el presente estudio.

Con lo descrito anteriormente se puede formular la siguiente pregunta: ¿Cómo se puede determinar el perfil de onda de corte Vs de manera práctica y económica en el distrito de Santa Rosa-Lima?

1.3.3 Hipótesis

El método de inversión de la curva de razón espectral H/V es una alternativa práctica, económica y confiable para obtener perfiles de velocidad de onda de corte Vs en el distrito de Santa Rosa-Lima.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Comparar perfiles sintéticos de velocidad de onda de corte, obtenidos mediante la inversión de cocientes espectrales H/V, con resultados MASW.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la geología y geomorfología local a partir de la recopilación de trabajos desarrollados en campo.
- Estimar un rango de velocidades de onda de corte V_s para las zonas estudiadas.
- Generar curvas sintéticas de cociente espectral H/V.
- Aplicar el método de inversión de cocientes espectrales H/V para la obtención de perfiles de onda de corte del suelo.

1.5 Indicadores de logro

- Delimitación y caracterización geológica, geofísica y geotécnica del Distrito de Santa Rosa.
- Identificación de los parámetros dinámicos necesarios para la descripción del subsuelo.
- Conocimiento de la frecuencia teórica del cociente espectral H/V.
- Aproximación de un perfil de velocidad de onda de corte para cada registro de vibración ambiental seleccionado.

1.6 Metodología

La presente tesis comprende dos metodologías de investigación. En primer lugar, se realizará una metodología exploratoria, que consiste en recopilar data de ensayos realizados “In situ” sobre el cociente espectral H/V de los ensayos de vibración ambiental; y perfiles de velocidad ondas de corte de ensayos MASW realizados por el Instituto Geofísico del Perú. En segundo lugar, se realizará una metodología sistémica que aproxima perfiles de ondas de velocidad de onda de corte para cada cociente espectral H/V en base al perfil dominante obtenido del MASW. El objetivo es poder comparar ambos ensayos geofísicos.

Los pasos a desarrollar en la investigación comprenden:

- Descripción y delimitación del área en Estudio.
- Recopilación de ensayos MASW para obtener un perfil dominante de velocidad de ondas de corte para cada área de estudio.
- Recopilación de información del cociente espectral H/V de Nakamura para conocer las frecuencias fundamentales en los puntos a usar.
- Definir la caracterización geotécnica del Distrito de Santa Rosa.
- Estimación de rangos para las propiedades dinámicas y físicas del suelo.
- Comparación de la función elíptica H/V teórica y observada, con el objetivo de calibrar el rango de parámetros en cada área de estudio.
- Aproximación de los perfiles de velocidades de ondas de corte (V_s) para cada punto seleccionado de las razones espectrales utilizando el método inverso.
- Comparación de perfiles de velocidades sintéticos con los obtenidos en el ensayo MASW.
- Generación de perfiles de velocidades de onda de corte para los puntos restantes de cada área de estudio.

La comparación desarrollada en esta investigación es válida solo para los primeros 30 metros debido a que es la profundidad máxima proporcionada por el MASW.

1.7 Contenido del estudio

La presente investigación ha sido estructurada en cinco capítulos que se detallan de la siguiente manera:

El Capítulo 2 comprende el fundamento teórico del comportamiento de las ondas sísmicas de cuerpo y superficie. Así como la definición de las principales características dinámicas del suelo.

El Capítulo 3 abarca el concepto de los métodos de análisis utilizados. Se desarrollan la técnica de Nakamura y la de arreglos sísmicos lineales, conocida como MASW. Con base en estas técnicas se emplea la metodología de inversión del cociente espectral H/V.

En el Capítulo 4 se presenta el caso aplicativo. En la caracterización de sitio se define las 4 áreas de estudio seleccionadas para el Distrito de Santa Rosa - Lima, así como la adquisición de datos de los ensayos. Posteriormente, se explica el procesamiento de la información mediante el SimpleDigitizer y el módulo Dinver del Geopsy. Finalmente, como resultado de la inversión se obtienen el espectro H/V y el perfil de velocidad de onda de corte (V_s) sintéticos, los cuales se compararán y analizarán, respectivamente, con los obtenidos de campo.

El Capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones a las que se llegaron al haber concluido la investigación.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Ondas sísmicas

Son oscilaciones que se propagan desde una fuente (foco o hipocentro) a través de un medio material elástico (sólido y líquido) transportando energía mecánica. Se clasifican en Ondas de Cuerpo y Superficiales. Las primeras viajan por el interior de la Tierra y se clasifican en Primarias (P) y Secundarias (S). Las Superficiales, como su nombre lo indica, se desplazan por la superficie del planeta y se dividen en Ondas Love (L) y Ondas Rayleigh (R).

2.1.1 Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo tienen como medio de propagación las zonas más profundas de la tierra y son de dos tipos: Ondas primarias (P) y ondas secundarias (S), las cuales son llamadas así, por su orden de llegada a una estación dada.

2.1.1.1 Ondas primarias

Las ondas P son longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es altamente comprimido y dilatado en la dirección de propagación. Estas ondas viajan a una velocidad de 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material. La velocidad a la que viajan estas ondas se le conoce como V_p . En la Figura 1 se ilustra el movimiento de la onda de compresión.

Figura 1. Comportamiento de las ondas primarias.

Adaptado de “Glosario sismológico”, por FUNVISIS, s.f.

2.1.1.2 Ondas secundarias

Las ondas S son ondas transversales o de corte lo cual significa que el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro. Las ondas S pueden viajar únicamente en medios sólidos debido a que los líquidos no soportan resistencia al corte. Por ejemplo, en el núcleo externo, que es un medio líquido, no permite el paso de las ondas S. La velocidad a la que viajan estas ondas se le conoce como V_s . En la Figura 2 se ilustra el movimiento de la onda de corte.

Figura 2. Comportamiento de las ondas secundarias.

Adaptado de “Glosario sismológico”, por FUNVISIS, s.f.

2.1.2 Ondas superficiales

Las ondas superficiales se caracterizan por propagarse en la parte más superficial de la corteza terrestre, disminuyendo la amplitud de su movimiento a medida que la profundidad aumenta. Las ondas superficiales generadas por un terremoto se pueden clasificar en dos grupos.

2.1.2.1 Ondas Love

Las ondas Love están formadas por la interferencia constructiva de múltiples reflexiones en la superficie libre de ondas S. Las ondas de Love son más rápidas que las ondas de Rayleigh y por lo tanto arriban antes que ella en el sismograma. El movimiento de partícula para la onda de Love es paralelo a la superficie, pero perpendicular a la dirección de propagación. En la Figura 3 se ilustra el movimiento de la onda Love.

Figura 3. Comportamiento de las ondas Love.

Adaptado de “Glosario sismológico”, por FUNVISIS, s.f.

2.1.2.2 Ondas Rayleigh

Las ondas Rayleigh son ondas superficiales que viajan como ondulaciones similares a aquellas encontradas en la superficie del agua. En la Figura 4 se ilustra el movimiento de la onda Rayleigh.

Figura 4. Comportamiento de las ondas Rayleigh.

Adaptado de “Glosario sismológico”, por FUNVISIS, s.f.

2.2 Características dinámicas del suelo

2.2.1 Velocidades de ondas

Las velocidades de propagación de ondas sísmicas en un sólido elástico lineal se asocian con los parámetros mecánicos del medio a través de relaciones simples. De hecho, la respuesta mecánica de un medio elástico está completamente caracterizada por dos constantes elásticas, por ejemplo, las constantes de Lamé λ y μ (siendo este último el módulo de corte G en notación de ingeniería). Las velocidades de las ondas sísmicas pueden expresarse con relaciones simples entre dichas constantes y la densidad de masa del material ρ como se muestra en las expresiones. (2.1) y (2.2)

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

Dónde: V_p : Velocidad de onda de compresión en m/s.

V_s : Velocidad de onda de corte en m/s.

La velocidad de propagación de las ondas del cuerpo está directamente relacionada con la rigidez del medio y no depende de la frecuencia en los materiales elásticos lineales. En particular, la velocidad de propagación de las ondas P se asocia con el módulo longitudinal, mientras que la velocidad de propagación de las ondas S se asocia con el módulo de corte. Las ecuaciones de V_p y V_s constituye la base para el uso de ondas sísmicas en la caracterización del material, mostrando que las constantes elásticas pueden determinarse fácilmente si las velocidades de las ondas sísmicas se miden experimentalmente.

Las velocidades de la onda P son de valor limitado en suelos saturados debido al papel desempeñado por el fluido poroso en la determinación de la respuesta global del suelo. Se puede demostrar que la velocidad de propagación de las ondas P está fuertemente influenciada por la compresibilidad del fluido poroso en lugar del esqueleto del suelo, mientras que la influencia del fluido poroso en la propagación de la onda S es despreciable, ya que el fluido poroso no posee resistencia al corte, y sólo está relacionada con el cambio en la densidad. Por lo tanto, las ondas S son ampliamente utilizadas para la caracterización del suelo porque su velocidad está directamente relacionada con el módulo de corte de la estructura del suelo.

Condiciones Dinámicas de Suelo en el Perú: Norma E.030

En Norma técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de edificaciones (2016), uno de los criterios para clasificar el perfil de los suelos es en función a la velocidad promedio de propagación de ondas de corte ($\bar{V}_S$).

Según la norma antes indicada, los suelos son de cinco tipos:

- Perfil Tipo S₀: Roca Dura.

Este tipo corresponde a las rocas sanas.

- Perfil Tipo S₁: Roca o Suelos muy rígidos.

Este tipo corresponde a las rocas con diferentes grados de fracturación, de macizos homogéneos y suelos muy rígidos. También, se pueden presentar suelos de arena muy densa o de grava arenosa densa.

- Perfil Tipo S₂: Suelos intermedios.

Este tipo corresponden a suelos medianamente rígidos. También, se pueden presentar suelos de arena densa o de grava arenosa medianamente densa.

- Perfil Tipo S₃: Suelos blandos.

En este tipo corresponden a suelos flexibles.

- Perfil Tipo S4: Condiciones Excepcionales.

En este tipo corresponden los suelos excepcionalmente flexibles y los sitios en donde las condiciones geológicas y/o topográficas son desfavorables.

En la Tabla 1 se muestra el rango de velocidades propuesto en la norma técnica E-030 para cada tipo de suelo.

Tabla 1

Parámetros V_s del suelo según la Norma E.030

CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DE SUELO	
Perfil	$\bar{V}_s$ (m/s)
S ₀	> 1500
S ₁	500 a 1500
S ₂	180 a 500
S ₃	< 180
S ₄	Según EMS

Nota: Perfil del suelo de acuerdo a la velocidad de onda de corte. Adaptado de “Norma E.030 Diseño sismorresistente”, por VIVIENDA, 2016.

2.2.2 Periodo fundamental

Dado que el periodo fundamental del estrato está asociado a la flexibilidad de la columna de suelo, el parámetro T_0 es un posible indicador de la distribución de daño en un terremoto. El periodo fundamental es un parámetro relevante en la respuesta sísmica de un sitio, estando definido por las características del depósito hasta la roca.

El periodo fundamental (T_0), para un modelo de depósito en 1 dimensión (1D) y velocidad de onda de corte constante se calcula como: (2.3)

$$T_0 = \frac{4H}{V_s} \quad (2.3)$$

En la expresión se observa que el periodo fundamental depende de la profundidad de la roca (H) y la velocidad de onda corte (V_s). Así, por ejemplo, si la velocidad de onda de corte (V_s) es menor, mayor será el periodo fundamental T_0 . Por el contrario, mientras más profundo sea el depósito, mayor es el periodo fundamental (Errázuriz, 2012).

CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE ANÁLISIS

3.1 Método de Nakamura

Debido a su fácil implementación y procesamiento de datos, la técnica de Nakamura ha tenido bastante aceptación en los ensayos de microtemblores. El método consiste en registrar microtemblores en la superficie con un velocímetro o acelerómetro triaxial, para luego procesar las componentes Horizontal (H) y Vertical (V) como espectros de Fourier. Finalmente, se realiza la relación H/V, lo cual, según Nakamura, da la función de transferencia del suelo.

Para determinar la función de transferencia de las capas superficiales del suelo, Nakamura tiene las siguientes suposiciones:

- Los microtemblores están compuestos por ondas internas y por ondas superficiales Rayleigh inducidas por fuentes superficiales (tráfico, maquinarias, etc.). Dichas ondas se consideran perturbaciones que son necesarios eliminar.
- Las componentes horizontal y vertical son similares en la base rocosa
- Las ondas Rayleigh sólo afectan a las componentes horizontales y verticales en la superficie, pero no afecta a los de la base rocosa.
- La componente horizontal de los microtemblores es amplificada por la multireflexión de las ondas S y la componente vertical por multireflexión de las ondas P.
- Los registros son amplificados por las capas de suelo blando que existan sobre la base rocosa.
- El efecto de las ondas Rayleigh es visible fundamentalmente en la componente vertical.

Generalmente la función de transferencia de los estratos superficiales se define de la siguiente forma. (3.1)

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (3.1)$$

Donde S_{HS} corresponde al espectro de amplitud de Fourier de la componente horizontal del movimiento de la superficie y S_{HB} , del movimiento horizontal del basamento rocoso.

Sin embargo, S_{HS} es afectado por las ondas superficiales y por ello, por el ruido artificial que se propaga como ondas Rayleigh. De este modo, el espectro la componente vertical del movimiento en la superficie S_{VS} , también debe incluir este efecto, pero no el espectro del basamento rocoso S_{VB} .

El efecto de las ondas Rayleigh es visible principalmente en el movimiento vertical, y por tanto se puede definir la razón. (3.2)

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (3.2)$$

Si no hay ondas Rayleigh, $E_S=1$. Si se aumenta el efecto de las ondas Rayleigh, E_S se hace mayor que la unidad.

Nakamura considera que la relación S_T/E_S proporciona una función de transferencia más confiable debido a que considera la reducción del efecto del ruido artificial, por ello la función de transferencia queda definida de la siguiente manera. (3.3) y (3.4)

$$F_{TT} = \frac{S_T}{E_S} \quad (3.3)$$

$$F_{TT} = \frac{R_S}{R_B} \quad (3.4)$$

Dónde: R_S simboliza la división de los espectros H y V en superficie (S). (3.5)

R_B simboliza la división de los espectros H y V en el basamento (B). (3.6)

$$R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (3.5)$$

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}} \quad (3.6)$$

Si se tiene en cuenta que el efecto de las ondas Rayleigh es igual en las dos componentes del basamento, se considera que el valor de $R_B = 1$, por lo tanto se tiene lo siguiente: (3.7) y (3.8)

$$F_{TT} = \frac{R_S}{R_B} \quad (3.7)$$

$$F_{TT} = R_S \quad (3.8)$$

Esto significa que la función de transferencia (F_{TT}) de las capas superficiales puede ser estimada a partir, únicamente, del movimiento en superficie. Sin embargo, es importante recordar que la exactitud de la estimación decae cuando existe un ruido coincidente con la frecuencia predominante de la función de transferencia estimada.

Cálculo de las razones espectrales

A continuación, se muestra el procedimiento que se realiza para la obtención de las curvas de razones espectrales. Los pasos seguidos para el análisis de información son:

- Se toman registros de vibración ambiental utilizando acelerógrafos triaxiales, los cuales registran dos movimientos horizontales (norte – sur y este – oeste) y uno vertical.
- Se seleccionan n ventanas más estables de los registros tomados.
- Se calculan espectros de Fourier para cada ventana de tiempo considerando un espaciamiento de frecuencias lineales entre 0.5 Hz y 30 Hz a fin de eliminar picos que puedan perturbar la curva H/V.
- Seguidamente, se combinan los dos espectros de Fourier horizontales para cada ventana, mediante una media cuadrática.
- A continuación, se calcula el espectro de Fourier para la componente vertical.
- Finalmente, se divide el promedio de los espectros de Fourier horizontales con el de la vertical. También, se calcula la desviación estándar (+/- σ).

En la Figura 5 se hace una representación Gráfica con el procedimiento ya descrito.

Figura 5. Descripción gráfica del procesado de los registros de vibraciones ambientales.

Adaptado de “Caracterización de sitio para el área urbana de Chosica utilizando métodos sísmicos”, por Herrera D., 2016.

3.2 Técnicas geofísicas para el análisis de ondas

En el campo de la geotecnia se han ido incorporando gradualmente diversas pruebas geofísicas, principalmente las de tipo sísmico en las cuales se trabaja con la propagación de ondas superficiales.

Las pruebas geofísicas sísmicas de campo que principalmente se usan en geotecnia son: refracción sísmica y diversos métodos de onda de superficie, como por ejemplo la técnica de arreglos sísmicos lineales (MASW). También, existen técnicas geofísicas invasivas; como el *Down Hole* y *Cross Hole*, en las cuales es necesario realizar perforaciones.

3.2.1 Refracción sísmica

La prueba de refracción sísmica consiste en colocar varios sensores (geófonos) a lo largo de una línea, y en un punto se genera vibración. Los géofonos se conectan a un sismógrafo, en donde se registra la llegada de las ondas elásticas. Conocida la distancia desde la fuente de vibración hasta los géofonos y el tiempo, que se obtiene de los sismogramas, es posible determinar la velocidad de propagación de las ondas.

Con la refracción sísmica se determina la velocidad de ondas primarias o de compresión (V_p), pero es muy difícil evaluar la velocidad de ondas secundarias o de corte (V_s). Asimismo, con esta prueba solo es posible detectar estratos con rigideces progresivamente mayores con la profundidad.

3.2.2 Técnicas de arreglos sísmicos lineales (MASW)

También conocido como análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). Esta técnica como todos los ensayos de ondas superficiales, es un método de exploración geofísica no invasiva que permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que conforman los estratos.

Este método consiste en la interpretación de las ondas superficiales de registros de un arreglo multicanal, generadas por una fuente de energía impulsiva o fuente sísmica en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, obteniéndose el perfil de velocidades de las ondas de corte (V_s) para el punto central de dicha línea (Park et al., 1999).

Figura 6. Configuración de equipo para el registro de datos - Método MASW.

Adaptado de “Caracterización de sitio para el área urbana de Chosica utilizando métodos sísmicos”, por Herrera D., 2016.

En la Figura 6 se presenta la configuración utilizada por el método MASW, donde x_1 es la distancia de la fuente de disparo al primer geófono, dx representa la distancia entre geófonos, D es la dimensión del arreglo. La profundidad máxima de investigación ($Z_{m\acute{a}x}$) a la que se puede llegar depende de las propiedades del subsuelo y del tipo de fuente utilizada. Finalmente, se elabora el registro sísmico para cada punto de medición.

En este caso, el movimiento generado por la fuente en superficie, se detecta simultáneamente en varios receptores que se encuentran alineados con la misma. La configuración usada por la técnica de arreglo lineal (MASW) es similar a la utilizada para estudios de refracción o reflexión sísmica.

Recomendaciones para el ensayo

La aplicación del método MASW debe desarrollarse sobre una superficie plana, debido a que los cambios en la topografía a lo largo de la línea de estudio afectan la naturaleza de propagación de las ondas superficiales. Por ese motivo, se debe considerar tomar los datos en terrenos con pendientes planas o suaves.

El alcance de la profundidad de investigación de los estudios es limitado por el ambiente de adquisición (área urbana de Santa Rosa), el cual presenta un elevado nivel de ruido sísmico y limitados espacios para la aplicación del ensayo. Por este motivo, la profundidad del estudio se vio limitada a los primeros 30 metros, los cuales son de interés para aplicaciones ingenieriles.

Cálculo del perfil de velocidades de onda de corte

A continuación, se muestra el procedimiento del ensayo MASW, el cual se realiza para la obtención del perfil de velocidades de onda de corte. Los pasos seguidos para el análisis de información son:

- Se tiende un arreglo lineal de geófonos, los cuales son sensores de componente vertical de baja frecuencia.
- Se generan los registros de las ondas superficiales obtenidos de los arreglos lineales considerando como impacto o fuente de incitación, el golpe de martillo en el arreglo. Para el registro de estas señales se utiliza el registrador multipropósito GEODE, el cual se opera desde una Laptop.
- Se calcula la dispersión de las ondas superficiales mediante el análisis F-K (frecuencia – número de onda).
- Se estima la curva de dispersión de la cual se obtiene la curva de velocidad de fase (m/s) vs la frecuencia (Hz). La velocidad de fase está dada por la relación entre la frecuencia y el número de onda.
- Se invierte la curva de dispersión mediante el módulo Dinver del programa Geopsy con el fin de determinar el perfil de velocidad para el punto medio del arreglo.
- Se obtiene el perfil de velocidades de onda de corte.

En la Figura 7 se esquematiza la metodología empleada para el procesamiento de datos obtenidos por un arreglo lineal, utilizando el análisis de F-K (frecuencia-número de onda) para determinar el perfil de velocidades.

Figura 7. Esquema de la metodología utilizada para el procesamiento de datos obtenidos por un arreglo lineal, usando el análisis de F-K para determinar el perfil de velocidades.

Adaptado de “Caracterización de sitio para el área urbana de Chosica utilizando métodos sísmicos.”, por Herrera D., 2016.

3.3 Inversión

Para la caracterización dinámica del suelo, una de las propiedades más importantes es la resistencia al esfuerzo cortante, la cual está evaluada en términos del módulo dinámico de rigidez. Debido a la importancia de esta propiedad en la caracterización del suelo se desarrollaron variedad de métodos destinados a medir el módulo dinámico de rigidez. Entre los métodos más conocidos están los de laboratorio (Triaxial cíclico, Columna Resonante RC), los in-situ (*Down Hole*, *Cross Hole*, Prueba de Penetración del Cono Sísmico SCPT) y los empíricos (Prueba de Penetración Estándar SPT, Prueba de Penetración del Cono CPT). Los primeros hacen una medición directa del módulo, los segundos lo hacen indirectamente a través de la medición de la velocidad de onda de corte y los empíricos a través de relaciones producto de la experiencia.

Estos métodos poseen una desventaja principal, que es la invasión del suelo mediante perforaciones. Estas aumentan el costo total del estudio, asimismo, sólo se puede conocer información de sitios puntuales, la cual obliga a realizar interpolaciones entre puntos de exploración. Adicionalmente para el caso de los métodos de laboratorio, se requiere la recuperación de muestras, que son llevadas a las instalaciones para practicarles los procedimientos requeridos; esto implica manipulación y alteración de las condiciones naturales del suelo.

El método de la sísmica de dispersión de ondas superficiales se perfila como una buena alternativa a las desventajas de los métodos tradicionales ya que se aplica directamente en el sitio de estudio y no requiere la realización de perforaciones. El fundamento teórico del método está en la propiedad dispersiva de las ondas Rayleigh, esto es, cada componente frecuencial de la onda viaja a una velocidad diferente (velocidad de fase) que depende de las propiedades del suelo principalmente de la rigidez.

A partir del método de dispersión sísmica de ondas superficiales se puede conocer un modelo estructural del subsuelo. El procedimiento utilizado es denominado de inversión, ya que, en base a las mediciones obtenidas mediante ensayos geofísicos activos y pasivos, regresaremos a la obtención de los parámetros dinámicos que la generaron. En la Figura 8 se puede apreciar un esquema del planteamiento de la inversión.

Figura 8. Definición de un problema de inversión.

Adaptado de “Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion.”, por Wathelet M., 2007.

Para solucionar los problemas de inversión, en principio se utilizaron métodos basados en aproximación lineal del problema mediante la expansión de la serie de Taylor. Sin embargo, estas inversiones linealizadas poseían obstáculos para su desarrollo. La principal dificultad fue su dependencia de un modelo inicial, y éste muchas veces tenía que ser asumido con total desconocimiento, afectando a las soluciones locales del problema, por ende, a la solución global del mismo.

Con el fin de reducir estas dificultades, en los últimos años, se han desarrollado métodos para tratar los casos no lineales sin necesidad de linealizarlas. Estos métodos se basan en el muestro pseudo-aleatorio de las propiedades dinámicas del suelo dentro de ciertos rangos, los cuales son definidos por el usuario en donde se cree que se puede encontrar la solución. Para esta investigación se utilizará el método de optimización por medio de algoritmo de vecindario (Sambridge, 1999a).

Para conseguir los perfiles de ondas de corte se utilizará el programa Geopsy, ya que este programa utiliza el algoritmo de vecindario. Este será desarrollado con mayor detalle en el siguiente apartado.

3.3.1 Algoritmo de Vecindario

El origen de este algoritmo es la descomposición de Voronoi para el espacio de parámetros, la cual tiene como fin la aproximación a cero de la función *misfit* (Error), esta función es refinada progresivamente durante el proceso de inversión.

El algoritmo de Vecindario requiere cuatro parámetros definidos:

- it_{max} : Indica el número de iteraciones máximo para llevar a cabo.
- n_{s0} : Es el número de modelos iniciales al comienzo de la inversión.
- n_s : Es el número de nuevos modelos generados en cada iteración.
- n_r : Es el número de mejores modelos, con el menor *misfit*, donde n_s modelos son generados.

El proceso de inversión desarrollado por el módulo Dinver del programa Geopsy comprende las siguientes fases:

1. Un conjunto de modelos n_{s0} son generados aleatoriamente con una probabilidad uniforme en el espacio de parámetros.
2. El programa calcula la función *misfit* para los últimos modelos generados.
3. De todos los modelos generados se selecciona a los modelos n_r con el menor *misfit*.
4. Se genera un promedio de n_s/n_r muestras nuevas con una probabilidad uniforme en cada celda seleccionada.
5. Se añaden las nuevas muestras n_s al conjunto previo de modelos y se vuelve a la fase

En la Figura 9a se ejemplifica un parámetro de dos dimensiones mostrando los modelos como puntos negros y el límite de Voronoi. En este caso, son generados $n_{s0}=9$ modelos y la celda gris tiene el menor *misfit*. Luego, siete nuevos modelos son generados en una celda, donde $n_r = 1$, y $n_s = 7$. En la Figura 9b se aprecia la geometría de Voronoi despues de la primera iteración.

Figura 9. Celdas de Voronoi para un espacio de parámetro de dos dimensiones.

Adaptado de “Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion.”, por Whatelet M., 2007.

Los parámetros de control para este algoritmo son: it_{max} , n_{s0} , n_s y n_r . Para el empleo del algoritmo de Vecindario en el módulo Dinver se deben tener en cuenta las siguientes indicaciones de Wathelet (2007), explicadas por Uriarte (2014):

- El algoritmo de vecindario es más exploratorio si n_s muestras nuevas son distribuidas en muchas celdas y ellos se optimizan si son restringidos a las mejores celdas.
- Los típicos valores para los parámetros n_{s0} , n_s y n_r son 100, para forzar una optimización, n_r puede establecerse para 5, 10 o 50. Generalmente, los ensayos muestran que los mejores *misfit* son obtenidos con menos iteraciones si n_r es un valor bajo.
- El modo de exploración, es decir $n_r = 100$ y $n_s = 100$, usualmente provee el mejor *misfit* final, si la inversión se realiza con un gran número de iteraciones, con un rango de iteraciones de 50 a 200. Esto hace un total de 5 000 a 20 000 modelos generados. Por ende, comparado con métodos linealizados el número de cálculo directo es mucho mejor.

3.3.2 Elipticidad

El método H/V es una herramienta común utilizada para las investigaciones de efecto de sitio. La relación entre la componente horizontal (H) sobre la componente vertical (V) presenta generalmente un pico, el cual corresponde aproximadamente a la frecuencia fundamental de sitio (Nakamura, 1989). El espectro H/V contiene información valiosa de la estratigrafía, especialmente de la relación de la velocidad de onda de corte de los sedimentos y su espesor.

Las ondas ambientales están compuestas por partes desconocidas de las ondas de cuerpo y superficie. En el caso de las ondas de cuerpo, la relación es influenciada principalmente por la resonancia de las ondas de corte en las capas superficiales. Por otro lado, si predominan las ondas Rayleigh, la elipticidad teórica determina a las curvas observadas. La curva de elipticidad teórica de las ondas Rayleigh obtenida del programa es una razón de cocientes espectrales para calcular la frecuencia exacta de los picos.

Los picos de los registros H/V observados de datos usualmente se ajustan a la frecuencia de las curvas de elipticidad teórica. Sin embargo, la amplitud rara vez es confiable y estable. Por ende, es necesario que la curva de elipticidad teórica y observada coincidan en la frecuencia fundamental.

CAPÍTULO 4: CASO APLICATIVO

4.1 Caracterización de sitio en el distrito de Santa Rosa

Como base para la caracterización de sitio del Distrito de Santa Rosa, esta tesis recopila información del Informe técnico de la Zonificación Sísmico-Geotécnica para siete distritos de Lima metropolitana (Pucusana, Santa María, San Bartolo, Punta Negra, Punta Hermosa, Santa Rosa y El Agustino) desarrollado en el año 2010 por el Instituto Geofísico del Perú.

El presente capítulo tiene la finalidad de presentar la zona del Distrito de Santa Rosa y su geología, los parámetros dinámicos y los estudios geotécnicos ejecutados en la zona, los cuales son la base para la investigación en curso.

4.1.1 Zona de estudio

El Distrito de Santa Rosa pertenece a la provincia de Lima, departamento de Lima, Perú. Se ubica a 32 km al noroeste de la ciudad de Lima y ocupa, aproximadamente, un área de 9 kilómetros cuadrados (km^2) de una superficie de 21.5 km^2 .

El distrito de Santa Rosa está limitado por:

- Norte y Este: Distrito de Ancón.
- Sur: Distrito de Ventanilla.
- Oeste: Océano Pacífico.

En la Figura 10 se presenta el mapa de ubicación del Distrito de Santa Rosa.

Figura 10. Mapa de ubicación y límites del Distrito de Santa Rosa.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

En el año 2015, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), el Distrito de Santa Rosa tiene una población de 18 751 habitantes.

Las viviendas de los pobladores se distribuyen en tres zonas (Tavera et al., 2010):

- Zona de balneario en conjunto al borde litoral forman una pequeña bahía.
- Zona de depósitos aluviales y coluviales presente en las inmediaciones de la carretera Panamericana Norte.
- Depósitos eólicos ubicados en el extremo sur del Distrito donde se encuentran asentamientos humanos recientes.

4.1.2 Aspecto geológico

Las unidades geológicas que afloran en el Distrito de Santa Rosa están conformadas por afloramientos rocosos volcánicos andesíticos cuya cobertura en la parte baja, corresponde a depósitos cuaternarios aluviales, eólicos y marinos.

En la Figura 11 se aprecia el mapa geológico para el Distrito de Santa Rosa donde predominan las siguientes unidades geológicas:

- Qr-m: Depósitos marinos del cuaternario reciente.
- Qr-e: Depósitos eólicos del cuaternario reciente.
- Ki-va: Afloramiento rocosa volcánico Ancón del cretáceo inferior perteneciente al Grupo Puente Piedra.

Figura 11. Mapa geológico del Distrito de Santa Rosa.

Adaptado de “Mapa Geológico de los cuadrángulos de Chancay y Lima”, por INGEMMET, 2010.

En la Figura 12 se muestra la presencia de una cobertura eólica sobre afloramientos volcánicos, los cuales rodean al Distrito. El área urbana de Santa Rosa está asentada sobre depósitos aluviales-eólicos. Asimismo, sobre el borde litoral destacan los depósitos marinos.

Figura 12. Vista del balneario de Santa Rosa: terraza marina, zona albufera en verde y edificaciones ubicadas en terraza aluvio-eólica. En el fondo, se muestra un afloramiento rocoso volcánico.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

4.1.3 Aspecto geomorfológico

Los rasgos geomorfológicos presentes en el Distrito de Santa Rosa son las colinas onduladas constituidas por afloramientos volcánicos con una importante cobertura eólica, la unidad llanura aluvial-eólica cubre una gran extensión de Santa Rosa, así como los depósitos marinos de arena media a fina presentes junto al borde litoral y junto a la zona de albufera por filtración de agua marina.

En la Figura 13 se ilustra el mapa geomorfológico para el Distrito de Santa Rosa.

Figura 13. Mapa geomorfológico para el Distrito de Santa Rosa.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

En la Figura 14 se muestra el Sector La Bajada localizado al extremo SO del distrito donde se ubica edificaciones informales. Como se aprecia en la imagen, predominan las arenas.

Figura 14. Vista del sector La Bajada, extremo SO del Distrito de Santa Rosa, se observa un asentamiento humano sobre arenas eólicas.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

4.1.4 Caracterización geotécnica de sitio

Los estudios geotécnicos tienen la finalidad de analizar y cuantificar las propiedades físicas y mecánicas del subsuelo. Para ello, hacen usos de técnicas de campo y ensayos de laboratorio. La información obtenida es importante para ser utilizada como un elemento de las propuestas estructurales de los proyectos.

Las calicatas son una de las técnicas de prospección empleadas para facilitar el reconocimiento geotécnico. Debido a la inspección directa del suelo, las calicatas son un método de exploración que normalmente entrega información completa y confiable.

Para el estudio se elaboraron 7 calicatas de exploración a cielo abierto con dimensiones 1.5 m x 1.5 m de lado x 3.0 m de profundidad. Las muestras fueron obtenidas y analizadas por el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), solicitados por el Instituto Geofísico del Perú, los cuales recolectaron tres muestras de suelo por cada calicata. Las muestras en su totalidad permitieron diferenciar tres tipos de suelos predominantes, cuyas características con descritas en la Tabla 2.

Tabla 2

Clasificación SUCS de suelos para el Distrito de Santa Rosa.

CALICATAS	Profundidad (m)	Contenido de humedad (%)	Clasificación SUCS	Denominación	Observación
SR - 1	3	18.46	ML	Limos	Se encuentra en la zona aluvial, con poca influencia eólica.
SR - 2	3	14.41	SM	Arena gruesa subredondeada con clastos angulosos	Se encuentra en material aluvial con poca influencia marina, más actual arena eólicas.
SR - 3	3	4.31	SM	Arena gruesa a medio con clastos subredondeados	Material aluvial con poca influencia marina, más actual arenas eólicas.
SR - 4	3	2.94	SM	Arena fina a media con clastos angulosos	La calicata se encuentra en la zona aluvial, mezclado con arenas eólicas mas recientes.
SR - 5	3	2.34	SM	Arena fina con fragmentos subangulosos	Material tipo aluvial con influencia marino y acción más actual formada por arenas eólicas.
SR - 6	3	4.21	SM	Arena gruesa a media con clastos subangulosos	Deposito aluvial, con cierta influencia coluvial.
SR - 7	3	10.43	ML	Limos y Arcillas	Zona de material aluvial, con poca influencia de arenas eólicas.

Nota: Clasificación del suelo para cada calicata ejecutada. Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

En la Tabla 3 se indica la distribución de las calicatas para cada área de estudio designada.

Tabla 3

Resumen de Calicatas de exploración.

Área	Ensayos
1	SR 6 y SR 7
2	SR 1, SR 2 y SR 3
3	SR 5
4	SR 4

Nota: Calicatas de exploración adoptadas en cada área de estudio. Elaboración propia.

En la Figura 15 se muestra la ubicación de las 7 calicatas realizadas en Santa Rosa.

Figura 15. Mapa de distribución de las 7 calicatas ejecutadas en el distrito de Santa Rosa.

Elaboración propia

Tipos de suelos identificados en el Distrito de Santa Rosa:

- Suelo tipo SM: Compuestos por arenas gruesas a medias con contenido de limos, puesto que son de origen aluvial. Estos suelos se emplazan en la parte central del distrito.
- Suelos tipo ML: Conformado por limos con poca influencia de arenas eólicas. Estos suelos se emplazan en el sector NO del distrito y también en la entrada del distrito en el extremo NE.
- Suelos tipo GP: Corresponden a gravas pobremente gradadas con arenas medias provenientes de materiales coluviales. Este suelo se distribuye en el extremo SE del distrito.

Finalmente, se realizó los ensayos de corte directo para determinar la capacidad portante de los suelos en los 7 sitios analizados en este estudio.

Para el distrito de Santa Rosa, la capacidad portante del suelo se ha calculado para una profundidad y ancho mínimo de cimentación de 1.00 m. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Capacidad portante para cada punto donde se construyó una calicata, distrito Santa Rosa.

CALICATAS	Ángulo de fricción interna del suelo (°)	Cohesión Aparente del suelo (kg/cm ²)	Capacidad Carga Admisible (kg/cm ²)	Densidad (gr/cm ³)
SR - 1	24.21	0.01	3.05	1.56
SR - 2	23.04	0.06	3.33	1.83
SR - 3	27.90	0.02	4.08	1.56
SR - 4	26.93	0.05	4.49	1.53
SR - 5	29.03	0.01	4.34	1.55
SR - 6	30.30	0.01	5.31	1.64
SR - 7	31.70	0.01	6.28	1.71

Nota: Parámetros geotécnicos de cada calicata de exploración. Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

En base a los resultados obtenidos resulta posible clasificar, a los suelos del distrito de Santa Rosa, de regular a baja resistencia al corte y falla. De esta manera, los suelos del balneario (SR-1, SR-2 y SR-3) presentan los valores más bajos; los valores intermedios de capacidad portante (SR-4 y SR-5) se encuentran en el área del autódromo y sector La Bajada y, finalmente, los suelos en el sector de la entrada a Santa Rosa, por la Panamericana Norte (SR-6 y SR-7) presentan los valores más altos de capacidad portante.

4.1.5 Caracterización dinámica de sitio

4.1.5.1 Recolección de datos

El Instituto Geofísico del Perú, en el marco del Proyecto SIRAD (Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres) realizó los distintos ensayos para la zonificación sísmico-geotécnica para siete distritos de Lima Metropolitana, los cuales se recolectaron para esta investigación.

Para estimar el comportamiento dinámico del suelo para Santa Rosa, se dividió en cuatro áreas al Distrito, esta delimitación se realizó teniendo en cuenta la distribución de viviendas y la densidad poblacional.

En la Figura 16 se ilustra la distribución de los 173 registros de vibración ambiental divididos en 4 áreas de estudio.

Figura 16. Mapa de distribución espacial de puntos de vibración ambiental en el Distrito de Santa Rosa.

Elaboración propia

Los puntos de toma de datos fueron seleccionados considerando el mapa catastral del Distrito de Santa Rosa llegando a considerar un total de 173 puntos distribuidos sobre todo el distrito de Santa Rosa de los cuales, 63 se encuentran en el área 1, 48 en el área 2, 47 en el área 3 y 15 en el área 4. El mayor número de puntos se distribuye sobre el Área 1 por concentrarse el mayor número de viviendas y, por tanto, de habitantes.

4.1.5.2 Distribución de periodos dominantes

En el Estudio de Zonificación Sísmico – Geotécnica para el Distrito de Santa Rosa elaborado por el Instituto geofísico del Perú (IGP) se determina el periodo fundamental y se define el comportamiento dinámico del suelo. Para caracterizar el comportamiento dinámico del suelo se registraron 98 puntos de vibración ambiental.

El IGP, en función a la evaluación y análisis de datos definió tres zonas para el Distrito de Santa Rosa en las cuales se espera similar comportamiento sísmico. En la Figura 17 se aprecia la distribución de los periodos dominantes.

Figura 17. Mapa de distribución de periodos dominantes para el distrito de Santa Rosa.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

Los resultados del estudio fueron los siguientes:

- La primera zona considera un área pequeña ubicada en el extremo oeste del Distrito y se caracteriza por presentar los periodos dominantes altos de 0.4 segundos. Esta concentración de valores altos es concordante con la presencia de un estrato de gran espesor compuesto por depósitos aluvio-marinos con baja compactación, asentados dentro de una cuenca aparente.
- La segunda zona, rodea de manera dispersa a la primera sobre los extremos norte y oeste del Distrito. La zona se caracteriza por presentar periodos dominantes de 0.3 segundos que corresponden a una capa sedimentaria cuyo espesor disminuye conforme tiende a los lomeríos.
- La tercera zona abarca casi el 70 % del Distrito. Es una llanura aluvial-eólica, en donde sobresalen periodos de 0.2 segundos a menos.

En el anexo 1 se presentan las mediciones de vibración ambiental para los 173 registros correspondientes al cociente espectral H/V observado en campo, con su respectiva frecuencia dominante, amplificación máxima y periodo dominante. Esta información es proporcionada por el Instituto Geofísico del Perú.

4.1.5.3 Ensayos de MASW

El Instituto Geofísico del Perú desarrolló 6 ensayos de refracción sísmica para el distrito de Santa Rosa. En la Tabla 5 se indica la ubicación para cada área de estudio designada.

Tabla 5

Resumen de Ensayos MASW.

Área	Ensayos
1	MASW 6
2	MASW 3 y MASW 4
3	MASW 1 y MASW 5
4	MASW 2

Nota: Ensayos MASW adoptados en cada área de estudio. Elaboración propia.

En la Figura 18 se ilustra la distribución de los ensayos en el área del distrito de Santa Rosa.

Figura 18. Mapa de distribución de ensayos MASW.

Elaboración propia

En el anexo 2 se encuentra la ficha de resultado de los 6 sondeos de refracción sísmica, en la cual se puede apreciar la curva de dispersión, e perfil de velocidades de ondas de corte (V_s) y los resultados obtenidos para cada ensayo. Esta información es proporcionada por el Instituto Geofísico del Perú.

4.2 Procesamiento de información

4.2.1 Curvas de razones espectrales H/V

Para procesar los datos proporcionados por el Instituto Geofísico del Perú se usó el programa SimpleDigitizer, el cual sirvió para convertir las gráficas de razones espectrales al formato que utiliza el programa Geopsy-Dinver como entrada para la inversión. Las curvas H/V fueron recopiladas en formato .jpg, las cuales se tuvieron que digitalizar para poder convertir al formato *.hv que es usado para la inversión. A continuación, se explicará el procedimiento seguido para la digitalización de la curva H/V.

En primer lugar, se tiene la imagen en formato .jpg la cual es introducida al programa SimpleDigitizer como se muestra a continuación en las Figuras 19 y 20.

Figura 19. Ejemplo de gráfica de razón espectral obtenida en el extremo NE del distrito de Santa Rosa (Área 1).

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

Figura 20. Interfaz del programa SimpleDigitizer.

Elaboración propia.

Después de introducir la gráfica, el programa solicitará la ubicación de las coordenadas X e Y respectivamente. Esta acción se realiza trazando un segmento sobre los ejes utilizados en la gráfica. Después de ello, se configura una opción donde el programa funciona como un *autoclicker* según el número de puntos que se desee obtener. Para las gráficas utilizadas en esta investigación se usaron 100 puntos. En la Figura 21 se muestra los puntos seleccionados por el programa con sus respectivas coordenadas.

Figura 21. Determinación de las coordenadas de 100 puntos ubicados en la primera capa de la gráfica (arriba hacia abajo).

Elaboración propia.

Para obtener las coordenadas de la capa del centro e inferior se tiene que borrar la capa superior y central respectivamente.

Los puntos obtenidos del programa son procesados para darle el formato *.hv que utiliza el programa Geopsy-Dinver para la inversión. En la Figura 22 se muestra un ejemplo del archivo que almacena los parámetros de procesamiento.

#	Frequency	Average	Min	Max
0.	541796	2.26494	1.5	3.35101
0.	564971	2.10367	1.41525	3.15588
0.	587086	2.23084	1.4322	3.47826
0.	612198	2.45132	1.55932	3.78367

Figura 22. Ejemplo del formato *.hv.

Elaboración propia.

A continuación, se describirá el contenido del archivo:

El signo # indica líneas inutilizables para la definición de la curva.

La primera columna corresponde a la frecuencia en Hz.

La segunda columna da el valor promedio de la curva H / V a la frecuencia en la primera columna.

La tercera columna da el valor promedio de la curva H / V dividido por su desviación estándar.

La cuarta columna da el valor promedio de la curva H / V multiplicado por su desviación estándar.

4.2.2 Programa Geopsy – Dinver

Para desarrollar el procedimiento de inversión se utilizó el programa Geopsy, versión: 2.10.1. Dentro de este paquete de datos se ubica el módulo Dinver, en el cual se realizan los problemas de inversión. El fundamento de este es el Algoritmo de Vecindario, originalmente, propuesto por Sambridge (1999a), implementado en C++ y mejorado por Wathelet (2007).

En la Figura 23 se muestra la interface del módulo Dinver.

Figura 23. Procedimiento del programa Geopsy.

Elaboración propia.

A continuación, se explica el procedimiento:

A: Se selecciona como objetivo el modo de inversión de curva elíptica.

B: Se carga los puntos de vibración ambiental observado Figura 16 en formato *.txt, Frecuencia (Hz) vs Amplitud o *Ellipticity* (H/V).

C: Se observa la curva *Ellipticity* (H/V) vs Frecuencia (Hz).

D: Se define el número de estratos a utilizar en la inversión y en cada celda se otorga valores en rangos. Se insertan datos estimados para la velocidad de onda de compresión V_p (m/s), velocidad de onda de corte V_s (m/s), módulo de Poisson ν y densidad ρ (kg/m³), obtenidos de los ensayos de refracción sísmica. Para realizar la inversión se vincula los valores de V_p , ν y ρ a la velocidad de onda de corte V_s .

E: Para el modo de inversión se otorga valores a los 4 parámetros: it_{max} , n_{s0} , n_s y n_r . Anteriormente, se definieron estos valores en la sección 3.4.1.

F: La curva presenta la variación del *misfit* respecto a los modelos generados.

G: Se observa en celdas el cambio progresivo y simultaneo de los valores, respecto a la variación de la curva del *misfit*. Se busca lograr el menor *misfit* posible.

4.2.3 Matriz de inicialización

A continuación, se presentan los cuadros para cada una de las cuatro áreas de estudio en el Distrito de Santa Rosa. Estas tablas son matrices de inicialización para realizar la inversión.

En la Tabla 6, se muestran los valores para 63 registros, de las mediciones del SR-01 al SR-54 y del SR-107 al SR-115. En el área 1 se presentan 2 estratos de suelo, donde predominan frecuencias de entre 3 a 4 Hz.

Tabla 6

Matriz de inicialización para el área 1 en Santa Rosa.

Velocidad de compresión Vp (m/s)	Velocidad de corte Vs (m/s)	Espesor (m)	Densidad (kg/cm³)
500 - 700	200 - 400	1.00 - 5.00	1400
700 - 1000	400 - 500	30.00 - 100.00	1600

Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 7, se muestran los valores para 48 registros, de las mediciones del SR-71 al SR-106 y del SR-117 al SR-128. En el área 2 se presentan de 2 a 3 estratos de suelo, donde predominan frecuencias de entre 2 Hz a 3 Hz.

Tabla 7

Matriz de inicialización para el área 2 en Santa Rosa.

Velocidad de compresión Vp (m/s)	Velocidad de corte Vs (m/s)	Espesor (m)	Densidad (kg/cm³)
450 - 700	200 - 350	1.00 - 4.00	1400
800 - 1000	350 - 500	35.00 - 100.00	1600

Velocidad de compresión Vp (m/s)	Velocidad de corte Vs (m/s)	Espesor (m)	Densidad (kg/cm³)
400 - 600	150 - 300	1.00 - 5.00	1300
700 - 900	300 - 450	5.00 - 20.00	1600
900 - 1300	450 - 750	20.00 - 200.00	1700

Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 8, se muestran los valores para 47 registros, de las mediciones del SR-55 al SR-64, SR-116, SR-129 y del SR-139 al SR-173. En el área se presentan 2 estratos de suelo, donde predominan frecuencias de entre 2 Hz a 3 Hz.

Tabla 8

Matriz de inicialización para el área 3 en Santa Rosa.

Velocidad de compresión Vp (m/s)	Velocidad de corte Vs (m/s)	Espesor (m)	Densidad (kg/cm³)
400 - 700	250 - 400	1.00 - 5.00	1400
700 - 900	300 - 600	31.00 - 100.00	1600

Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 9, se muestran los valores para 15 registros, de las mediciones del SR-65 al SR-70 y del SR-131 al SR-139. En el área se presentan 2 estratos de suelo, donde predominan frecuencias de entre 2. Hz a 3 Hz.

Tabla 9

Matriz de inicialización para el área 4 en Santa Rosa.

Velocidad de compresión Vp (m/s)	Velocidad de corte Vs (m/s)	Espesor (m)	Densidad (kg/cm³)
500 - 700	200 - 350	1.00 - 5.00	1500
700 - 1000	300 - 450	30.00 - 100.00	1600

Nota: Elaboración propia.

Los valores definidos en la matriz de inicialización para cada área fueron dados luego de analizar el comportamiento de los 6 perfiles de velocidades de ondas de corte obtenidos de los ensayos de MASW desarrollados en el distrito, con los cuales se puede estimar un rango de velocidad de onda de corte (V_s) para los estratos del Distrito de Santa Rosa. Esta información es de suma importancia para aproximar el perfil sintético al perfil observado del MASW.

Cabe destacar que en el proceso de inversión el valor de la velocidad de onda de corte (V_s) tiene suma importancia, en cambio los valores de velocidad de onda de compresión (V_p), módulo de Poisson (ν) y densidad (ρ) influyen en un mejor ajuste para la curva de elipticidad teórica, y consecuentemente, en el perfil de velocidades de onda de corte invertido. Por ello, es necesario definirlos como dato inicial en el Dinver para la calibración del modelo.

En la investigación se propone analizar el comportamiento de puntos relevantes para cada una de las zonas, debido a que los demás registros poseen frecuencias similares. A continuación, se presentan los registros seleccionados para los cuales se obtendrá un perfil de velocidades de ondas de corte.

- En el área 1 se eligió 10 registros: 5, 7, 8, 16, 18, 19, 50, 53, 54 y 109.
- En el área 2 se eligió 10 registros: 72, 73, 74, 75, 78, 87, 88, 89, 90 y 99.
- En el área 3 se eligió 6 registros: 129, 152, 157, 160, 161 y 173.
- En el área 4 se eligió 9 registros: 65, 66, 67, 68, 130, 132, 133, 135 y 136.

4.3 Determinación de perfiles de velocidad de onda de corte

Para obtener el perfil de velocidades de onda de corte es necesario comparar el cociente espectral H/V observado, con el cociente el cociente espectral H/V teórico, ambos deben de presentar similar valor pico de frecuencias y semejanza en la forma.

Para esta comparación se elegirá el punto más cercano al ensayo MASW realizado en cada área. De esta manera, se pretende calibrar un modelo que sea de utilidad para aproximar los perfiles de velocidades de onda de corte para los registros de H/V restantes de cada área.

Posteriormente, con los parámetros definidos en calibración, los cuales son presentados en la matriz de inicialización de cada área de estudio, se procederá a aproximar perfiles velocidad de onda de corte (V_s) para cada registro seleccionado con la intención de conocer la estratigrafía del Distrito de Rosa. En el anexo 3 se muestran la comparación del espectro H/V teórico y observado, así como los gráficos de perfiles de V_s obtenidos de la inversión del espectro H/V.

4.3.1 Comparación de H/V observado y teórico

Las Figuras 24, 25, 26, 27 y 28 se muestran la comparación entre el cociente espectral H/V observado registrado en la vibración ambiental y el H/V sintético obtenido del procesamiento realizado en el programa Geopsy, el cual representa el cociente espectral del movimiento horizontal de la partícula, producida por la forma elíptica que describe la onda Rayleigh, entre la vertical.

En el proceso de inversión el objetivo es encontrar una curva teórica con el menor *misfit* (error) y que sea lo más cercana posible a la curva H/V observada, siguiendo tendencias similares. De esta manera, se busca que ambas curvas coincidan en el valor de la frecuencia fundamental y forma, debido a que estas contienen información del suelo.

En la Figura 24 se aprecia que los periodos fundamentales de ambas curvas coinciden en el rango cercano a 5 Hz. para el registro 109 ubicado en el área 1, se nota la presencia de un solo pico de frecuencia que representa la presencia de un estrato dominante. Asimismo, este pico se muestra de una forma muy marcada, lo cual es un indicador de que el material representa un estrato arenoso. También, se puede observar que la curva teórica de H/V se asemeja al registro de la curva H/V observada.

Figura 24. Comparación de espectro H/V para el Área 1 – Registro 109.

Elaboración propia.

En la Figura 25 se aprecia que los periodos fundamentales de ambas curvas coinciden en el rango cercano a 3 Hz. y 7 Hz. para el registro 87 ubicado en el área 2, se nota la presencia de dos picos de frecuencia que representan la presencia de dos estratos dominantes. Este registro se realizó en la zona cercana al litoral. En esta gráfica se muestra un buen ajuste para ambos picos que sobresalen de la figura.

Figura 25. Comparación de espectro H/V para el Área 2 – Registro 87.

Elaboración propia.

En la Figura 26 se aprecia que los periodos fundamentales de ambas curvas coinciden en el rango cercano a 2.75 Hz. para el registro 99 ubicado en el área 2, se nota la presencia de un pico de frecuencia que representa la presencia de un estrato dominante. En esta curva de muestra un buen ajuste para los primeros rangos de frecuencia, pero para los rangos más altos no hay un adecuado ajuste. Esto se puede deber a la falta de información de los estratos a mayor profundidad de los 30 primeros metros.

Figura 26. Comparación de espectro H/V para el Área 2 – Registro 89.

Elaboración propia.

En la Figura 27 se aprecia que los periodos fundamentales de ambas curvas coinciden en el rango cercano a 3 Hz. para el registro 152 ubicado en el área 3, se nota la presencia de un pico de frecuencia que representa la presencia de un estrato dominante de material arenoso. Asimismo, a pesar del buen ajuste en la frecuencia del modo fundamental, existen pequeños picos que no se ajustan adecuadamente.

Figura 27. Comparación de espectro H/V para el Área 3 – Registro 152.

Elaboración propia.

En la Figura 28 se aprecia que los periodos fundamentales de ambas curvas coinciden en el rango cercano a 2.5 Hz. para el registro 67 ubicado en el área 4. En esta curva se aprecia un ligero desfase entre los picos de la curva observada y teórica, lo cual se puede producir por los rangos ajustados que se dio al programa para su procesamiento. Ello se debió a que la calibración del modelo se hace difícil por la falta de conocimiento de estratos a mayores profundidades a la que se obtuvo la información.

Figura 28. Comparación de espectro H/V para el Área 4 – Registro 67.

Elaboración propia.

4.3.2 Comparación de perfiles de ondas de corte

En las Figuras 29, 30, 31, 32 y 33 se muestra el perfil de velocidad de ondas de corte obtenido de las inversiones de los cocientes espectrales H/V para cada área de estudio. Este perfil será comparado con el perfil obtenido del ensayo de MASW más cercano a cada registro.

En la Figura 29 se aprecia una gran similitud entre ambos perfiles siendo la profundidad de ambos cercana a los 4 metros. La curva generada a partir de la inversión muestra una mayor variación entre las velocidades del primer y segundo estrato.

Figura 29. Comparación de perfiles para el Área 1 – Registro 109.

Elaboración propia.

Posteriormente, con el rango de parámetros definidos en la matriz de inicialización para la zona 1 se procedió a invertir 10 registros, de los cuales se aproximaron perfiles de velocidad de onda de corte con las características presentadas en la Tabla 10.

Tabla 10

Velocidades de ondas de corte de perfiles sintéticos para registros H/V en el Área 1.

Área 1			Registros H/V										Promedio de registros	Variación MASW 6 y promedio
Rango de Vs (m/s)	Prof. (m)	MASW 6	5	7	8	16	18	19	50	53	54	109		
200 - 350	1 - 5	293	222	230	200	201	324	245	329	232	324	252	256	13%
300 - 500	-	420	459	497	499	468	427	498	429	433	499	495	470	-12%
Misfit	-	-	0.049	0.069	0.057	0.095	0.059	0.051	0.053	0.045	0.052	0.078	-	-

Nota: Elaboración propia.

Los valores mostrados del procesamiento de los puntos del área 1 muestran que los valores de velocidad del primer estrato son menores a los del MASW, en cambio, para el segundo estrato se muestran valores mayores.

En la Figura 30 se aprecia la profundidad del primer estrato cercana a los 5 metros y de segundo a 15 metros. Asimismo, se muestra una gran sobrestimación de velocidad en el tercer estrato respecto al MASW. Esto se debe a la falta de información a profundidades mayores a dicho estrato. Al asumir información tentativa sobre las características del subsuelo, se obtuvo una curva elíptica con mejor ajuste y el perfil de velocidad sintético con mayor similitud al observado. Sin embargo, sólo se trabajará con la información existente proporcionada por los ensayos, las cuales dan los resultados presentados.

Figura 30. Comparación de perfiles para el Área 2 – Registro 87.

Elaboración propia.

Los resultados mostrados en la Tabla 11 presentan un suelo heterogéneo, en el cual la velocidad de la onda de corte del segundo estrato en el perfil sintético es cercana a la del MASW. Por ende, este estrato es posible que corresponda a una arena densa.

Tabla 11

Velocidades de ondas de corte de perfiles sintéticos para registros H/V en el Área 2 cercana al borde litoral.

Área 2			Registro	Variación
Rango de Vs (m/s)	Prof. (m)	MASW 3	87	MASW 3 y registro
150 - 350	1 - 5	211	193	9%
300 - 450	5 - 15	374	349	7%
450 - 750	-	545	711	-30%
Misfit	-	-	0.070	-

Nota: Elaboración propia.

En la Figura 31 se aprecia que la profundidad del primer estrato es aproximadamente coincidente a 3.5 m aproximadamente, pero las velocidades muestran una variación entre 13% y 16%.

Figura 31. Comparación de perfiles para el Área 2 – Registro 99.

Elaboración propia.

Posteriormente, con el rango de parámetros definidos en la matriz de inicialización para la zona 2 se procedió a invertir 9 registros, de los cuales se aproximaron perfiles de velocidad de onda de corte con las características presentadas en la Tabla 12.

Tabla 12

Velocidades de ondas de corte de perfiles sintéticos para registros H/V en el rea 2..

Área 2			Registros H/V										Promedio de registros	Variación MASW 4 y promedio
Rango de Vs (m/s)	Prof. (m)	MASW 4	72	73	74	75	78	88	89	90	99			
200 - 350	1 - 5	290	291	252	228	239	230	264	272	276	253	256	12%	
350 - 500	-	430	475	498	497	497	493	490	446	492	498	487	-13%	
Misfit	-	-	0.093	0.048	0.080	0.078	0.054	0.053	0.075	0.059	0.068	-	-	

Nota: Elaboración propia.

Los valores mostrados del procesamiento de los puntos del área 2 muestran que los valores de velocidad del primer estrato son menores respecto al MASW, en cambio, los valores del segundo estrato tienen una tendencia a 500m/s. lo que sugiere que posiblemente puedan sobrepasar dicho valor, lo cual generaría una sobrestimación mayor.

En la Figura 32 se aprecia que la profundidad de los estratos esta entre 3 y 5 metros. Asimismo, en esta gráfica la diferencia de profundidades, determinados por ambas metodologías, difiere considerablemente. Esto se debe a la falta de información a profundidades mayores a dicho estrato.

Figura 32. Comparación de perfiles para el Área 3 – Registro 152.

Elaboración propia.

Posteriormente, con el rango de parámetros definidos en la matriz de inicialización para la zona 3 se procedió a invertir 6 registros, de los cuales se aproximaron perfiles de velocidad de onda de corte con las características presentadas en la Tabla 13.

Tabla 13

Velocidades de ondas de corte de perfiles sintéticos para registros H/V en el Área 3.

Área 3				Registros H/V						Promedio de registros	Variación MASW 1 y promedio	Variación MASW 5 y promedio
Rango de Vs (m/s)	Prof. (m)	MASW 1	MASW 5	129	152	157	160	161	173			
250 - 400	1 - 5	280	302	255	272	296	253	257	251	271	3%	10%
300 - 600	-	373	397	550	539	542	485	508	520	524	-40%	-32%
Misfit	-	-	-	0.064	0.052	0.092	0.082	0.072	0.050	-	-	-

Nota: Elaboración propia.

Los valores mostrados del procesamiento de los puntos del área 3 muestran que los valores de velocidad del primer estrato están en el promedio del rango obtenido del MASW, en cambio, los valores del segundo estrato tienen una sobreestimación de aproximadamente 36 %.

En la Figura 33 se aprecia que la profundidad de ambos perfiles cercana a los 3 metros. En el primer estrato se muestra una variación subestimada del 31%. En cambio, el segundo estrato muestra un mejor ajuste respecto al MASW con una menor variación porcentual.

Figura 33. Comparación de perfiles para el Área 4 – Registro 67.

Elaboración propia.

Posteriormente, con el rango de parámetros definidos en la matriz de inicialización para la zona 4 se procedió a invertir 9 registros, de los cuales se aproximaron perfiles de velocidad de onda de corte con las características presentadas en la Tabla 14.

Tabla 14

Velocidades de ondas de corte de perfiles sintéticos para registros H/V en el Área 4.

Área 4			Registros H/V									Promedio de registros	Variación MASW 2 y promedio
Rango de Vs (m/s)	Prof. (m)	MASW 2	65	66	67	68	130	132	133	135	136		
200 - 350	1 - 5	317	214	200	219	234	202	205	221	201	201	211	34%
300 - 450	-	391	441	449	449	448	448	436	449	447	443	446	-14%
Misfit		-	0.058	0.039	0.059	0.097	0.046	0.081	0.048	0.042	0.068	-	-

Nota: Elaboración propia.

Los valores mostrados del procesamiento de los puntos del área 4 muestran el primer estrato tienen una tendencia a 200 m/s lo cual difiere mucho al valor de 317 m/s determinado por el MASW. Por otro lado, los valores del segundo estrato son mayores al 391 m/s del MASW y cercanos a los 450 m/s asemejándose a la sugerencia del área 2.

Comentarios Finales

En la Tabla 15 se presenta la variación de las velocidades de onda de corte entre los perfiles del Ensayo MASW y los perfiles sintéticos generados a partir de los cocientes espectrales H/V observados para cada área de estudio.

Tabla 15

Variación de Vs entre MASW y registros H/V.

Variación de Vs entre MASW y registros H/V							
Capa sísmica	Prof. (m)	Área 1 (%)	Área 2 (%)	Área 3 (%)	Área 3 (%)	Área 4 (%)	Promedio
1	1 - 5	13%	12%	3%	10%	34%	14%
Semi-espacio	-	-12%	-13%	-40%	-32%	-14%	-22%

Nota: Elaboración propia.

Los valores de profundidades guardan relación con los del MASW, lo cual es un buen indicador de que la metodología da una buena medida del espesor de las capas de suelo.

Los valores de velocidades del primer estrato tienden a ser menores que las del MASW (en algunos casos con gran porcentaje de variación). Esta subestimación sugiere que exista un factor de corrección respecto al ensayo MASW. Sin embargo, se recomendaría comparar los resultados con ensayos de perforación para determinar con mayor seguridad la eficacia de esta metodología. De acuerdo a la Tabla 15, esta subestimación es de aproximadamente el 15 %.

Los valores de velocidades del segundo estrato tienden a ser sobreestimados respecto a los datos del ensayo MASW (en algunos casos con gran porcentaje de variación). Esta sobre estimación sugiere, al igual que para el primer estrato, que exista un factor de corrección respecto al ensayo MASW. Sin embargo, se observó que a medida que se introdujera más información supuesta de estratos con mayor profundidad a los 30 metros, los resultados mostraban un mayor ajuste. Pero debido a que los ensayos MASW solo tenían 30 metros como profundidad máxima, sólo se procesó la información hasta dicha profundidad. De acuerdo a la Tabla 15, esta sobrestimación es de aproximadamente el 20 %.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La presente investigación se realizó con la finalidad de aproximar perfiles de velocidad de onda de corte, V_s , basados en espectros de H/V de vibración ambiental obtenidos en campo, y comparar los resultados con los perfiles del ensayo MASW *in-situ*. Las conclusiones de la presente investigación se resumen de la siguiente manera:

1. La obtención de los perfiles de onda de corte se obtuvo mediante la inversión de la curva de elipticidad, la misma que representa el efecto de las ondas Rayleigh en las ondas superficiales.
2. Para calcular las curvas de elipticidad de las ondas Rayleigh se ha utilizado el algoritmo de vecindario, el cual consiste en un proceso iterativo para ajustar el modelo sintético con el H/V de campo con el menor error. Los espectros H / V sintéticos de las ondas superficiales muestran un buen acuerdo con los de los microtemores observados en las cuatro zonas que se dividió en el Distrito de Santa Rosa - Lima, con errores (*misfit*) menores a 0.1 en la comparación.
3. Basado en el algoritmo de vecindario, se revela que el espesor del estrato, la velocidad de la onda de corte, la velocidad de la onda de compresión, V_p ; tienen efecto significativo sobre el ajuste la curva de elipticidad sintética generada a través del espectro H/V de las ondas superficiales.
4. Los análisis de inversión se realizan utilizando los espectros H / V observados en cuatro áreas y se calcula su perfil superficial de suelo hasta una profundidad de 30 m (con V_s inferior a 600 m/s). Los perfiles de velocidad de la onda de corte invertidos son consistentes con los registros de MASW en los sitios, con variaciones promedio de 15 % y 20%, lo que confirma que la inversión propuesta es confiable.

5. En la comparación de V_s para el primer estrato muestra resultados exitosos variando su valor entre 210 m/s y 270 m/s para profundidades menores a 5 metros, los cuales corresponden a suelos con presencia de arenas. Por otro lado, para profundidades mayores a 5 metros se presenta valores entre 350 m/s y 540 m/s, los cuales referencian a estratos más rígidos e incluso con posible presencia de gravas, guardando relación con la geología local.
6. Con la información geológica recopilada, el distrito de Santa Rosa presenta un suelo linealmente estratificado u homogéneo compuesto por arenas en su gran mayoría, para el cual, la metodología utilizada en la presente investigación muestra buenos resultados acorde con la realidad.
7. En esta investigación se obtuvieron resultados coherentes al tipo de suelo en estudio y a los valores de velocidad de ondas de corte, a través de la inversión del espectro H/V obtenido en campo. Sin embargo, por ser un método indirecto, se debe verificar su aproximación mediante perforaciones u otros ensayos, además de minimizar el margen de error al realizar la inversión de la curva de elipticidad de la onda Rayleigh.
8. Las sobreestimaciones obtenidas en la comparación entre perfiles de velocidades de ondas de corte sintético y observado, se debe a la falta de información que se tiene a partir del último estrato, el cual está limitado a la profundidad 30 metros en la presente investigación.
9. La practicidad del método radica en la utilización de un geófono de tres componentes que registran las vibraciones naturales del punto seleccionado. Para lo cual, no es necesario hacer perforaciones ni un tendido de sensores sísmicos de registro, siendo de mayor utilidad en zonas urbanas.

10. La presente investigación demuestra que el método de inversión del cociente espectral H/V es de útil y cómoda aplicación en zonas urbanas, debido al uso de ondas superficiales. Asimismo, la ejecución del ensayo se lleva a cabo con bajo costo y con cantidad mínima de personal, esto comparándolo con otros métodos tradicionales invasivos.

5.2 Recomendaciones

Considerando los resultados obtenidos y sus correspondientes conclusiones, se recomienda para futuras investigaciones:

1. Para obtener mejor calidad en los resultados, se recomienda realizar los ensayos en horarios donde las vibraciones producidas por fuentes de actividades humanas sean mínimas para disminuir el ruido ambiental. Asimismo, los registros deben tener un registro de larga duración y sin ruido, ya que el análisis es un promedio de resultados de tiempo del registro.
2. Un proceso de inversión del espectro H/V a perfil de velocidad de ondas puede presentar diferentes perfiles que se ajusten al cociente espectral observado con un bajo *misfit*. Por lo cual, se recomienda tener un perfil dominante para el área en estudio, de esta manera el perfil invertido será más próximo a la realidad, tal como se desarrolló en esta investigación. De igual modo, es labor del ingeniero verificar que el perfil obtenido tenga relación con el tipo de suelo en estudio.
3. Para realizar un buen análisis de los resultados obtenidos por el método de inversión del cociente espectral H/V es necesario contar con información de ensayos con profundidades mayores a 30 m, tales como el MAM, ya que en la presente investigación hubo incertidumbre al definir propiedades como el V_s , V_p para profundidades mayores a los 30 metros.

4. Para futuras investigaciones la calibración de la inversión se puede hacer con métodos geofísicos de mayor precisión, tales como el *Down Hole*, el cual puede ofrecer un mejor ajuste de la curva elíptica respecto al H/V observado. También, se recomienda desarrollar ensayos de perforaciones a profundidad mayores a 30 metros para definir la estratigrafía y validar los resultados de la metodología propuesta.
5. Al definir las propiedades a utilizar para la inversión (Onda de corte, Onda de compresión, profundidades y densidad) en la calibración de una curva H/V, se recomienda aplicar dichas propiedades a los registros curvas H/V que tengan una variación menor a ± 0.5 Hz de frecuencia respecto a la curva calibrada.
6. Se recomienda aplicar la metodología en áreas con suelos heterogéneos, en donde predominen distintos materiales, tales como la grava y arcilla para analizar la efectividad del método inverso. De esta manera, se podrá validar o no esta metodología en suelos con estas características.
7. El módulo Dinver del programa Geopsy es recomendado para desarrollar el método de inversión debido a que posee un entorno sencillo de utilizar y nos permite estimar un rango de parámetros del suelo. Por otro lado, es un programa de libre descarga el cual puede ser utilizado por los estudiantes que se interesen por el estudio de dispersión de ondas.

REFERENCIAS

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 35, (3), 415-457.
- Arai, H., & Tokimatsu, K. (2004). S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, (1), 53-63. doi.org/10.1785/0120030028
- Arredondo, L. (diciembre, 2014). Estudio sísmico-geotécnico para la zonificación de suelos en el Distrito de Santa Rosa (Lima). *Compendio de trabajos de investigación realizados por estudiantes durante los años 2013-2014*, 15, 32-38. Recuperado de <http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/769> [Consulta: 16 de junio de 2016].
- Capon, J. (1969). High-Resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57, 1408-1419.
- Errázuriz, J. (2012). *Microzonificaciones sísmicas en ciudades del mundo y discusión sobre la aplicabilidad en la ciudad de Santiago*. (Tesis de título, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile, Chile) Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/111924> [Consulta: 16 de junio de 2016].
- Fundación venezolana de investigaciones sismológicas (FUNVISIS). (s.f.). *Glosario sismológico*. Caracas: FUNVISIS. Recuperado de <http://www.funvisis.gob.ve/old/glosario.php> [Consulta: 16 de junio de 2016].
- Godoy, C. (2013). *Estudio de la respuesta de sitio en Santiago mediante el método lineal equivalente*. (Tesis de título, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile, Chile) Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114507> [Consulta: 16 de junio de 2016].
- Hobiger, M., Bard, P.-Y., Cornou C., & Le Bihan, N. (2009). Single station determination of Rayleigh wave ellipticity by using the random decrement technique (RayDec). *Geophysical Research Letters*, 36. doi:10.1029/2009GL038863
- Horike, M. (1985). Inversion of phase velocity of long period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas. *Journal of Physics of the Earth*, 33, 59-96. doi.org/10.4294/jpe1952.33.59
- Herrera, D. (2013). *Caracterización de sitio para el área urbana de Chosica utilizando métodos sísmicos*. (Tesis de título, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Geología, Geofísica y Minas. Arequipa, Perú) Recuperado de <http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/1312> [Consulta: 16 de junio de 2016].
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2016) Mapa Geológico de los cuadrángulos de Chancay y Lima. [Mapa]. Recuperado de http://geocatminapp.ingemmet.gob.pe/complementos/Descargas/Mapas/publicaciones/serie_a/mapas/24-i.jpg [Consulta: 16 de junio de 2016].
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.

- Matsushima, T., & Okada H. (1990). Determination of deep geological structures under urban areas using long-period microtremors. *Geophysical Exploration*, 43, 21-33.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (VIVIENDA). (2016). *Norma técnica E.030 "Diseño Sismorresistente" del Reglamento Nacional de Edificaciones*. Recuperado de <https://www.sencico.gob.pe/investigacion/publicaciones.php?id=444> [Consulta: 16 de junio de 2016].
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using Microtremors on the ground surface. *Quarterly Report Railway Technical Research Institute*, 30, (3), 25-33
- Núñez, S., & Vásquez, J. (2009). *Zonas Críticas por peligros geológicos en Lima Metropolitana. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Park, C., Mille, R., & Xia J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64, (3), 800-808. doi.org/10.1190/1.1444590
- Sambridge, M. (1999a). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm: I. Searching a parameter space. *Geophysical Journal International*, 138, (2), 479-494. doi.org/10.1046/j.1365-246X.1999.00876.x
- Sambridge, M. (1999b) Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm: II. Appraising the ensemble. *Geophysical Journal International*, 138, (3), 727-746. doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00900.x
- Tavera H., Bernal I., & Gómez, J. C. (2010). *Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento dinámico del suelo. Informe técnico* Lima: Instituto Geofísico del Perú.
- Tokimatsu, K., Shinzawa, K., & Kuwayama S. (1992) Use of Short – Period Microtremors for Vs Profiling. ASCE. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118, (10). doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:10(1544)
- Uriarte, R. (2014). *Aplicación del método de autocorrelación espacial (SPAC) para la obtención de perfiles de onda de corte del suelo*. (Tesis de título, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. Lima, Perú) Recuperado de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/3811/1/uriarte_br.pdf [Consulta: 16 de junio de 2016].
- Wathelet, M. (2007). *Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion*. (Degree of Doctor, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées. Liège, Belgium)

ANEXOS

Anexo 1: Registros de vibración ambiental

En el anexo 1, se presentan las mediciones de vibración ambiental correspondientes al cociente espectral H/V observado en campo. Esta información es proporcionada por el Instituto Geofísico del Perú.

En la Tabla 16, se presenta los registros de los 173 puntos medidos con su respectiva frecuencia dominante, amplificación máxima y periodo dominante.

Tabla 16

Registro de puntos de vibración ambiental.

Registro	Punto	Frecuencia dominante (Fo)	Amplificación Máxima (Ao)	Periodo dominante (To)
1	SR-01	4.787	4.6	0.209
2	SR-02	2.780	4.4	0.360
3	SR-03	5.170	3.7	0.193
4	SR-04	2.084	7.6	0.480
5	SR-05	3.913	3.4	0.256
6	SR-06	4.808	1.8	0.208
7	SR-07	3.088	4.2	0.324
8	SR-08	4.109	3.2	0.243
9	SR-09	0.605	1.7	1.652
10	SR-10	4.065	3.7	0.246
11	SR-11	1.097	3.2	0.912
12	SR-12	5.729	4.9	0.175
13	SR-13	3.728	5.7	0.268
14	SR-14	3.479	6.2	0.287
15	SR-15	1.192	1.8	0.839
16	SR-16	4.372	3.5	0.229
17	SR-17	4.677	3.5	0.214
18	SR-18	3.590	4.1	0.279
19	SR-19	3.411	2.9	0.293
20	SR-20	2.951	6.1	0.339
21	SR-21	2.986	6.0	0.335
22	SR-22	4.636	4.0	0.216

Registro	Punto	Frecuencia dominante (Fo)	Amplificación Máxima (Ao)	Periodo dominante (To)
23	SR-23	3.605	5.1	0.277
24	SR-24	5.664	7.3	0.177
25	SR-25	8.290	4.7	0.121
26	SR-26	3.295	6.6	0.304
27	SR-27	1.024	1.7	0.976
28	SR-28	4.311	5.3	0.232
29	SR-29	4.566	3.4	0.219
30	SR-30	3.532	4.7	0.283
31	SR-31	3.570	3.1	0.280
32	SR-32	4.158	3.4	0.240
33	SR-33	3.821	4.3	0.262
34	SR-34	3.333	5.0	0.300
35	SR-35	4.007	4.8	0.250
36	SR-36	5.212	2.9	0.192
37	SR-37	3.816	4.1	0.262
38	SR-38	3.498	5.4	0.286
39	SR-39	2.925	7.0	0.342
40	SR-40	3.545	4.3	0.282
41	SR-41	2.987	9.4	0.335
42	SR-42	3.797	6.8	0.263
43	SR-43	3.244	5.9	0.308
44	SR-44	3.728	4.8	0.268
45	SR-45	3.855	6.7	0.259
46	SR-46	3.830	5.0	0.261
47	SR-47	3.645	4.5	0.274
48	SR-48	1.935	12.0	0.517
49	SR-49	3.693	4.5	0.271
50	SR-50	3.335	3.1	0.300
51	SR-51	6.075	5.5	0.165
52	SR-52	4.063	4.9	0.246
53	SR-53	3.803	4.1	0.263
54	SR-54	3.478	3.8	0.288
55	SR-55	5.457	4.1	0.183
56	SR-56	6.294	6.3	0.159
57	SR-57	5.285	2.3	0.189
58	SR-58	5.882	5.1	0.170
59	SR-59	21.927	3.0	0.046
60	SR-60	5.328	2.7	0.188
61	SR-61	4.977	2.6	0.201
62	SR-62	5.022	4.6	0.199
63	SR-63	6.353	2.5	0.157
64	SR-64	4.291	6.0	0.233
65	SR-65	2.609	4.3	0.383

Registro	Punto	Frecuencia dominante (Fo)	Amplificación Máxima (Ao)	Periodo dominante (To)
66	SR-66	2.831	6.3	0.353
67	SR-67	2.387	8.3	0.419
68	SR-68	2.901	4.0	0.345
69	SR-69	4.531	6.9	0.221
70	SR-70	5.156	4.7	0.194
71	SR-71	3.527	6.7	0.283
72	SR-72	2.003	7.8	0.499
73	SR-73	2.297	6.3	0.435
74	SR-74	2.768	6.4	0.361
75	SR-75	2.806	6.1	0.356
76	SR-76	3.803	3.8	0.263
77	SR-77	7.503	3.8	0.133
78	SR-78	2.869	8.3	0.349
79	SR-79	23.142	5.7	0.043
80	SR-80	2.622	5.1	0.381
81	SR-81	2.265	6.0	0.441
82	SR-82	2.268	7.6	0.441
83	SR-83	2.203	7.2	0.454
84	SR-84	2.445	5.4	0.409
85	SR-85	2.234	4.1	0.448
86	SR-86	2.411	5.9	0.415
87	SR-87	3.251	5.8	0.308
88	SR-88	2.460	7.5	0.406
89	SR-89	2.540	6.3	0.394
90	SR-90	2.210	5.4	0.453
91	SR-91	4.047	7.1	0.247
92	SR-92	2.838	4.6	0.352
93	SR-93	7.820	7.3	0.128
94	SR-94	2.243	5.8	0.446
95	SR-95	2.120	4.5	0.472
96	SR-96	2.751	6.6	0.363
97	SR-97	4.182	3.5	0.239
98	SR-98	3.203	6.4	0.312
99	SR-99	2.605	6.0	0.384
100	SR-100	5.109	3.3	0.196
101	SR-101	5.670	7.5	0.176
102	SR-102	3.129	5.1	0.320
103	SR-103	2.262	6.1	0.442
104	SR-104	1.774	6.8	0.564
105	SR-105	2.258	6.0	0.443
106	SR-106	2.889	8.5	0.346
107	SR-107	6.091	6.6	0.164
108	SR-108	3.563	2.8	0.281

Registro	Punto	Frecuencia dominante (Fo)	Amplificación Máxima (Ao)	Periodo dominante (To)
110	SR-110	5.286	7.0	0.189
111	SR-111	3.265	5.9	0.306
112	SR-112	9.841	4.1	0.102
113	SR-113	3.795	3.0	0.264
114	SR-114	5.743	9.9	0.174
115	SR-115	3.646	5.2	0.274
116	SR-116	26.199	3.5	0.038
117	SR-117	4.776	3.2	0.209
118	SR-118	2.944	7.4	0.340
119	SR-119	4.731	2.8	0.211
120	SR-120	2.199	7.0	0.455
121	SR-121	2.156	6.0	0.464
122	SR-122	2.361	4.6	0.423
123	SR-123	2.171	7.6	0.461
124	SR-124	6.220	5.1	0.161
125	SR-125	2.272	7.1	0.440
126	SR-126	2.327	6.0	0.430
127	SR-127	3.010	9.3	0.332
128	SR-128	3.158	6.0	0.317
129	SR-129	3.041	5.6	0.329
130	SR-130	2.467	5.6	0.405
131	SR-131	7.731	2.6	0.129
132	SR-132	2.564	5.3	0.390
133	SR-133	3.034	3.3	0.330
134	SR-134	13.417	4.7	0.075
135	SR-135	2.865	5.6	0.349
136	SR-136	2.471	4.8	0.405
137	SR-137	4.374	3.5	0.229
138	SR-138	5.261	4.5	0.190
139	SR-139	8.022	5.0	0.125
140	SR-140	9.555	7.2	0.105
141	SR-141	6.212	4.8	0.161
142	SR-142	7.586	5.3	0.132
143	SR-143	4.457	4.1	0.224
144	SR-144	8.402	4.1	0.119
145	SR-145	14.262	2.4	0.070
146	SR-146	7.599	5.2	0.132
147	SR-147	1.794	1.7	0.557
148	SR-148	12.791	5.6	0.078
149	SR-149	9.105	19.8	0.110
150	SR-150	4.534	7.8	0.221
151	SR-151	4.399	2.9	0.227
152	SR-152	2.773	3.1	0.361

Registro	Punto	Frecuencia dominante (Fo)	Amplificación Máxima (Ao)	Periodo dominante (To)
153	SR-153	22.940	4.3	0.044
154	SR-154	3.893	2.7	0.257
155	SR-155	1.882	3.1	0.531
156	SR-156	1.741	3.1	0.574
157	SR-157	2.011	3.2	0.497
158	SR-158	7.591	4.1	0.132
159	SR-159	3.030	3.9	0.330
160	SR-160	2.431	7.7	0.411
161	SR-161	2.276	3.3	0.439
162	SR-163	1.689	3.5	0.592
163	SR-164	7.988	7.8	0.125
164	SR-165	4.892	5.4	0.204
165	SR-166	6.611	7.0	0.151
166	SR-167	10.125	5.4	0.099
167	SR-168	8.464	4.9	0.118
168	SR-170	12.216	2.8	0.082
169	SR-172	1.824	4.0	0.548
170	SR-173	2.273	4.8	0.440
171	SR-174	10.053	3.8	0.099
172	SR-175	6.558	3.1	0.152
173	SR-177	2.986	7.2	0.335

Nota: Frecuencia dominante para cada registro de vibración ambiental. Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

A continuación, se ilustran las gráficas de los cocientes espectrales H/V observados.

Anexo 2; Registros de ensayos MASW

En el Anexo 2, se presentan los perfiles de velocidad de ondas de corte obtenidos mediante el ensayo MASW. Esta información es proporcionada por el Instituto Geofísico del Perú.

En la Tabla 17, se presenta los registros de los 6 puntos medidos con sus respectivas coordenadas de cada línea y su ubicación de acuerdo al área de estudio.

Tabla 17

Registro de puntos de MASW.

MASW	Este	Norte	Altura	Área
1	265081	8692819	335 m	3
	265055	8692856	335 m	
	265029	8692896	325 m	
2	264377	8693843	122 m	4
	264296	8693800	127 m	
	264336	8693821	126 m	
3	262759	8694549	18 m	2
	262746	8694643	19 m	
	262754	8694597	20 m	
4	263183	8694873	43 m	2
	263175	8694961	41 m	
	263179	8694918	41 m	
5	264035	8692142	217 m	3
	264068	8692173	213 m	
	264000	8692107	217 m	
6	265313	8696070	84 m	1
	265302	8695977	63 m	
	265305	8696024	62 m	

Nota: Coordenadas UTM de los ensayos MASW. Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

A continuación, se ilustran los resultados del ensayo de refracción sísmica para cada uno de los puntos mencionados.

Figura 34. Registro del ensayo MASW 1.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

Figura 35. Registro del ensayo MASW 2.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

Figura 36. Registro del ensayo MASW 3.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

Figura 37. Registro del ensayo MASW 4.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

Figura 38. Registro del ensayo MASW 5.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

Figura 39. Registro del ensayo MASW 6.

Adaptado de “Zonificación Sísmico – Geotécnica para 7 distritos de Lima Metropolitana. Comportamiento Dinámico del suelo. Informe técnico”, por Tavera et. al, 2010.

Anexo 3; Espectro H/V y perfiles de velocidad de onda de corte sintéticos

En el anexo 3, se presentan la comparación de cocientes espectrales H/V con respectivo perfil de velocidad de ondas de corte (V_s) obtenidos de la inversión para cada uno de los 35 registros seleccionados, divididos de la siguiente manera:

- En el área 1 se eligió 10 registros.
- En el área 2 se eligió 10 registros.
- En el área 3 se eligió 6 registros.
- En el área 4 se eligió 9 registros.

Área 1

Registro 5

Registro 7

Fundamental mode

Resultados	
7	
Rango de velocidades (m/s)	Vs sintético (m/s)
200 - 350	230
300 - 500	497
Vs: Velocidad de ondas de corte	
Misfit	0.0687

Registro 8

Fundamental mode

Resultados	
8	
Rango de velocidades (m/s)	Vs sintético (m/s)
200 - 350	200
300 - 500	499
Vs: Velocidad de ondas de corte	
Misfit	0.0573

Registro 16

Fundamental mode

Registro 18

Fundamental mode

Registro 19

Fundamental mode

Registro 50

Fundamental mode

Registro 53

Fundamental mode

Registro 54

Fundamental mode

Registro 109

Fundamental mode

Área 2

Registro 72

Registro 73

Registro 74

Registro 75

Registro 78

Registro 87

Registro 88

Registro 89

Registro 90

Registro 99

Área 3

Registro 129

Registro 152

Registro 157

Registro 160

Registro 161

Registro 173

Área 4

Registro 65

Registro 66

Registro 67

Fundamental mode

Resultados	
67	
Rango de velocidades (m/s)	Vs sintético (m/s)
200 - 350	219
300 - 450	449
Vs: Velocidad de ondas de corte	
Misfit	0.0588

Registro 68

Fundamental mode

Resultados	
68	
Rango de velocidades (m/s)	Vs sintético (m/s)
200 - 350	234
300 - 450	448
Vs: Velocidad de ondas de corte	
Misfit	0.0966

Registro 130

Registro 132

Registro 133

Fundamental mode

Registro 135

Fundamental mode

Registro 136

Fundamental mode

Resultados	
136	
Rango de velocidades (m/s)	Vs sintético (m/s)
200 - 350	201
300 - 450	443
Vs: Velocidad de ondas de corte	
Misfit	0.068