

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**IDENTIFICACIÓN DE PERIODOS PREDOMINANTES E
INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD EN LA RESPUESTA
SÍSMICA DEL SUELO EN LIMA METROPOLITANA**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

ANGEL LEANDRO CCAHUA LAQUI

ASESOR:

MSc. LUIS FERNANDO LAZARES LA ROSA

LIMA - PERÚ

2023

© 2023, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados
**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**
Ccahua Laqui, Angel Leandro
accahua@uni.pe
+51 957457521

DEDICATORIA

A mis queridos padres Máximo y Susana, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy una meta más, gracias por inculcar en mí el mejor ejemplo.

A mi familia, porque con sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona.

Finalmente, quiero dedicar esta tesis a mis amigos, por extender su mano incondicionalmente en difíciles momentos y quienes acompañaron mi paso académico en la universidad.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es posible gracias al apoyo de muchas personas. Me encantaría extender mi más sincera gratitud para la mayoría de ellos.

A toda mi familia, en especial a mis padres Máximo y Susana por su invaluable apoyo, aliento y la confianza dada a mi persona todo este tiempo. Su esfuerzo y sacrificio por brindarme lo mejor de ustedes es inicialmente retribuido con el presente trabajo.

Agradecer a mi asesor MSc. Fernando Lazares, por compartir sus conocimientos y experiencia, su paciencia y tiempo en explicar los principales tópicos que direccionaron el tema de investigación y las conclusiones que se presentan.

Mi más profundo agradecimiento al Dr. Carlos Gonzáles y al Dr. Luis Moya, por confiar en mí, abrirme las puertas y facilitarme el material que permitió realizar este trabajo de investigación dentro del marco del proyecto BM038: “Fusión de Algoritmos de Machine Learning y Tecnologías de Observación de la Tierra para la Mitigación de Desastres” en el CISMID. Fueron mis principales colaboradores durante todo este proceso, quienes con su dirección, conocimiento, enseñanza y valiosos consejos permitieron el desarrollo de este trabajo.

Agradecer así mismo la disponibilidad pública de la información sísmica acelerográfica de las redes consideradas en este trabajo: REDACIS y UPG/FIC-CIP, su extensa base de datos permitió el desarrollo de los capítulos presentados.

De igual manera, mis agradecimientos a la UNI, a la Facultad de Ingeniería Civil, a mis profesores quienes con sus enseñanzas hicieron que pueda crecer día a día como profesional, generando en mi persona la pasión por ejercer la profesión que dictan. Gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación y apoyo incondicional.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	5
PRÓLOGO	7
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	12
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	14
1.1 GENERALIDADES	14
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	16
1.3.1 Objetivo General	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 HIPÓTESIS DEL ESTUDIO	16
1.5 METODOLOGÍA	17
1.6 AREA DE ESTUDIO	18
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	21
2.1 SISMICIDAD EN LIMA	21
2.2 MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA SÍSMICA DE LIMA	24
2.3 ENSAYOS GEOFÍSICOS	26
2.3.1 MASW	26
2.3.2 Medición puntual de microtremor	27
2.3.3 Arreglo de microtremores	27
2.4 PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO	29
2.4.1 Velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 m (V_{s30})	29
2.4.2 Período predominante de vibración (T_d)	30
2.5 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PROMEDIO	32
2.6 ESPECTROS DE RESPUESTA	34
CAPÍTULO III: PERFILES SÍSMICOS EN LIMA METROPOLITANA	35
3.1 PERFILES SÍSMICOS RECOPIADOS	36

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE REGISTROS SÍSMICOS DE ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS EN LIMA METROPOLITANA.	41
4.1 INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA	41
4.1.1 REDACIS	41
4.1.2 RED UPG/UNI-CIP	42
4.2 BASE DE DATOS	47
4.3 IDENTIFICACIÓN DEL PERÍODO DOMINANTE T_d	48
4.4 RESULTADOS	54
CAPÍTULO V: EVALUACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PROMEDIO	66
5.1 METODOLOGÍA	66
5.2 RESULTADOS	67
5.2.1 Funciones de transferencia sucesivas	67
5.2.1.1 Zona Norte	68
5.2.1.2 Zona oeste El Callao	69
5.2.1.3 Zona central, el conglomerado de Lima	71
5.2.1.4 Zona sur	74
5.2.2 Función de transferencia promedio ($AvTF$)	75
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD DE LA $AvTF$ Y SU EFECTO EN LOS PERÍODOS PREDOMINANTES ESTIMADOS	78
6.1 PERFILES SÍSMICOS SELECCIONADOS	78
6.2 EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LA $AvTF$	79
6.3 RESULTADOS	80
6.3.1 Principales formas de las gráficas de sensibilidad de la $AvTF$	80
6.3.2 Relación entre la $AvTF$ y los períodos predominantes T_d	82
CONCLUSIONES.	88
RECOMENDACIONES.	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXOS.	97

RESUMEN

Los registros sísmicos son importantes para la mejora del diseño sísmico, la evaluación de daños y el análisis de los efectos de los sismos. A pesar de la relevancia de contar con redes acelerográficas, su implementación en el Perú se ha realizado recién en los últimos años. Por ejemplo, sólo cinco estaciones en Lima registraron el terremoto de 7,9 M_W de Pisco 2007, mientras que 55 estaciones registraron el sismo de 6,0 M_W de Mala 2021. El número actual de estaciones acelerográficas en la ciudad de Lima ofrece una oportunidad para mejorar la caracterización sísmica del suelo. Por otro lado, existe evidencia empírica de registros de vibración ambiental, analizadas con las técnicas de mediciones puntuales como arreglo de microtemores en ciertos distritos de Lima, los cuales mostraron la influencia de la estructura profunda del suelo en su comportamiento sísmico, ya que se observaron cambios en las funciones de transferencia sucesivas que las hacían semejantes en forma a sus respectivas funciones de transferencia empírica, por ello, resulta necesario analizar estos resultados empíricos incluyendo los nuevos perfiles profundos disponibles.

Uno de los objetivos de esta tesis es determinar el período dominante de vibración del suelo (T_d) de las estaciones acelerográficas ubicadas en Lima Metropolitana. Para ello, se adoptó el método propuesto por Hassani y Atkinson (2016), que se describe como sigue. Primero se recopiló, para una estación arbitraria, todos los eventos disponibles registrados desde el 2011 al 2021, incluyendo el sismo de 2007 M_W 7.9 de Pisco. Luego, se calcularon las pseudo aceleraciones espectrales, usando 5% de amortiguamiento para cada componente, y se calcularon las relaciones espectrales horizontales y verticales (H/V). Por último, se utilizó la relación espectral de respuesta H/V promedio para caracterizar adecuadamente los valores de T_d mediante un ajuste Gaussiano. En total, se evaluaron 51 estaciones en toda la ciudad de Lima. Se observaron valores de T_d superiores a 1 s para las zonas costeras en las que el suelo subyacente consiste en depósitos arcillosos/arenosos y zonas con un importante contraste de impedancia en la parte más profunda. Estos valores disminuyen hacia el centro de la ciudad coincidiendo con los depósitos superficiales de grava. Es importante destacar que en aproximadamente el 24% de los casos no fue posible identificar un valor claro de T_d debido principalmente a la escasez de información sísmica o al incremento gradual de la rigidez de los depósitos del suelo.

Por otro lado, la influencia de la estructura profunda de los suelos es analizada haciendo uso de las funciones de transferencia (FT) sucesivas, en otras palabras, se evalúa la sensibilidad de la FT para distintos niveles de profundidad truncando los perfiles sísmicos profundos disponibles de la técnica de arreglo de microtemores. Así, las FT sucesivas de 48 perfiles profundos son comparados con sus

respectivas FT de perfiles superficiales MASW y sus espectros H/V cercanos. Se evidencian importantes amplificaciones en las FT sucesivas concordantes con el espectro H/V , las mismas que no siempre están presentes en el perfil superficial. Para caracterizar estas diferencias se usó la función de transferencia promedio ($AvTF$) propuesta por Sekiguchi, Calderón, Nakai, Aguilar, y Lazares (2013). Se encuentran menores valores de $AvTF$ cuando se consideran sólo las capas superficiales donde las máximas amplificaciones se dan en el rango de períodos cortos. Por el contrario, los valores de $AvTF$ son mayores cuando se analiza la parte más profunda debido a significativos ratios de impedancia de los estratos más profundos. Finalmente, se observa que el rango de integración de la expresión original de $AvTF$ no caracterizaría apropiadamente perfiles con importantes amplificaciones en períodos largos.

En la parte final del presente estudio se analiza la sensibilidad de la $AvTF$. Para ello, se calcula el cociente entre la $AvTF$ del perfil profundo completo y la $AvTF$ del mismo perfil, pero truncado hasta el primer estrato con $V_s \sim 500 \text{ m/s}$. Este cociente es evaluado para diferentes rangos de integración de las FT (de esta forma se considera el aporte de amplificaciones en el rango de períodos largos) y se compara el resultado con las relaciones espectrales de respuesta H/V de estaciones acelerográficas cercanas. Se identificaron en total 8 pares conformados por una estación y un perfil profundo. Las gráficas de sensibilidad revelan que el 87% de los pares analizados demuestran una clara influencia de la estructura del suelo. Esto se evidencia en la importante correspondencia entre las gráficas de sensibilidad de los perfiles sísmicos profundos y los períodos dominantes largos (T_d) identificados en los espectros H/V . En otras palabras, estos estratos profundos caracterizan las propiedades vibratorias de la subestructura profunda del perfil de suelo donde fueron obtenidos al tener correspondencia con los T_d identificados del procesamiento de vibraciones reales de terreno como son los sismos.

ABSTRACT

Strong motion records are important for the improvement of seismic design, damage assessment and analysis of earthquakes effects. Despite the relevance of having strong motion networks, their implementation in Peru has been performed in the very recent years. For instance, only five strong motion stations in Lima recorded the 2007 M_W 7.9 Pisco earthquake, whereas 55 stations recorded the 2021 M_W 6.0 Mala earthquake. The current number of instrumentation in Lima city provides an opportunity to improve soil characterization. On the other hand, there is empirical evidence of ambient vibration records, analyzed with the techniques of single point microtremor observation and microtremor arrays in certain districts of Lima, which showed the influence of the deepest soil structure in its seismic behavior, since changes were observed in the successive transfer functions (TF) that made them similar in shape to their respective empirical TF (i.e. H/V), therefore, it is necessary to analyze these empirical results including the new deep profiles available.

One of the objectives of this thesis is to determine the dominant period of ground vibration (T_d) of the accelerographic stations located in Metropolitan Lima. For this purpose, the method proposed in Hassani y Atkinson (2016) was adopted, which is described as follows. First, all available events recorded from 2011 to 2021, including the 2007 M_W 7.9 Pisco earthquake, were collected for an arbitrary station. Then, spectral pseudo spectral accelerations, using 5% damping for each component were computed, and the horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios were calculated. Finally, the average H/V response spectral ratio was used to properly characterize the T_d values using a Gaussian fit. In total, 51 stations were evaluated throughout the city of Lima. Values of T_d greater than 1 s were observed for coastal areas where the underlying soil consists of clay/sandy deposits and areas with significant impedance contrast at the deepest part. These values decrease towards the center of the city coinciding with shallow gravel deposits. It is important to highlight that in approximately 24% of the cases it was not possible to identify a clear value of T_d mainly due to the scarcity of seismic information or to the gradual increase of the stiffness of the soil deposits.

On the other hand, the influence of the deep soil structure is analyzed by making use of sequential TF, in other words, the sensitivity of the TF for different depth levels is evaluated by truncating the deep seismic profiles available from the microtremor array technique. Thus, sequential TF of 48 deep profiles are compared with their respective TF of shallow MASW profiles and their nearby H/V spectra from single point microtremor observation technique. Significant amplifications are evident in the sequential TF's consistent with the H/V spectra, which are not always present in the shallow profile. To characterize these differences we used the average transfer function (A_vTF) proposed by Sekiguchi et al. (2013). Thus, lower values of

$AvTF$ are found when considering only the surface layers where the maximum amplifications occur in the short-period ranges. On the contrary, the values of $AvTF$ are higher when the deeper part is analyzed due to significant impedance ratios of the deeper strata. Finally, the range of integration of the original $AvTF$ expression would not properly characterize profiles with significant amplifications at long periods.

In the final part of the present study, the sensitivity of the $AvTF$ is analyzed. For this purpose, the ratio between the $AvTF$ of the complete deep profile and the $AvTF$ of the same profile, but truncated up to the first stratum with $V_s \sim 500m/s$, is calculated. This ratio is evaluated for different integration ranges of the TFs (thus considering the contribution of amplifications in the long-period range) and the result is compared with the H/V response spectral ratios from nearby accelerographic stations. A total of 8 pairs consisting of a station and a deep profile were identified. The sensitivity graphs demonstrate the influence of the soil structure on the 87% pairs, since they present an important match between the sensitivity graphs of the deep seismic profiles with indirect explorations up to seismic rock and the identified long T_d from the H/V response spectral ratio. In other words, these deep layers would adequately characterize the vibrational properties of the deep substructure of the soil profile where they were obtained by matching the T_d identified from the analysis of real ground vibrations, i. e., earthquakes.

PRÓLOGO

El aumento de instrumentación sísmica en el Perú ofrece una oportunidad para mejorar la caracterización sísmica del suelo, más aún en Lima Metropolitana, ciudad que cuenta con la mayor densidad de estaciones sísmicas acelerográficas en el presente. Es fundamental comprender la influencia de la estructura profunda del suelo en la respuesta sísmica, sobre todo en esta ciudad que está mayormente compuesta por un suelo rígido denominado conglomerado y áreas costeras con depósitos arcillosos/arenosos de alta potencia.

La presente tesis tiene como objetivo determinar los períodos predominantes de vibración del suelo en diversas estaciones sísmicas. Estos hallazgos son de gran importancia para comprender el comportamiento sísmico del suelo y la intensidad del movimiento sísmico que se puede experimentar en diferentes áreas de la ciudad de Lima durante un evento sísmico. Asimismo, el análisis de eventos sísmicos de campo lejano proporcionará información adicional sobre el comportamiento de los depósitos de suelo rígido de gran espesor presentes en esta metrópolis, los cuales en algunos casos muestran mayores amplificaciones en el rango de períodos largos.

El análisis y los resultados del presente estudio aportan información complementaria a la de los estudios de microzonificación sísmica, ya que permiten comprender las características vibratorias de los depósitos de suelo donde se han registrado señales sísmicas. Asimismo, podrían ser considerados para futuras actualizaciones del mapa de microzonificación.

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 2.1	Valores de período T_0 (s) y T_1 (s) para estaciones acelerográficas en Lima	32
Tabla N° 3.1	Ubicación geográfica y principales características de los perfiles sísmicos recopilados	37
Tabla N° 4.1	Ubicación geográfica y principales características de las estaciones acelerográficas del estudio	44
Tabla N° 4.2	Resumen de las redes acelerográficas y bases de datos utilizadas en el estudio	47
Tabla N° 4.3	Criterios usados para la definición de grupos de la base de datos	53
Tabla N° 4.4	Número de registros sísmicos por estación y por criterio	53
Tabla N° 4.5	Resumen de los valores de T_d por estación y criterio	60
Tabla N° 5.1	Parámetros usados para el cómputo de las funciones de transferencia	67
Tabla N° 6.1	Estaciones acelerográficas y arreglos profundos cercanos	79
Tabla A.1	Resumen de los valores de T_d por criterio y estación	98
Tabla B.1	Lista de eventos sísmicos de la base de datos	107

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1	Ubicación geográfica de Lima Metropolitana	18
Figura N° 1.2	Caracterización geológica del área de estudio Lima Metropolitana	20
Figura N° 2.1	Mapa Sísmico del Perú 1960-2019 ($M_W > 4.0$)	22
Figura N° 2.2	Sismicidad en la zona de subducción de la Placa de Nazca para sismos $M_W > 7.5$	23
Figura N° 2.3	Mapa de microzonificación sísmica de Lima Metropolitana	25
Figura N° 2.4	Procedimiento básico de procesamiento del método MASW	26
Figura N° 2.5	Distribución geométrica de algunos arreglos de microtremores	28
Figura N° 2.6	Procedimiento básico de procesamiento del método de arreglo de microtremores	29
Figura N° 2.7	Definición gráfica de la $AvTF$	33
Figura N° 3.1	Ubicación geográfica de los perfiles sísmicos recopilados	40
Figura N° 4.1	Ubicación geográfica de las estaciones acelerográficas consideradas en el estudio (triángulos) dentro del mapa de microzonificación sísmica de Lima Metropolitana	43
Figura N° 4.2	Ubicación geográfica de los epicentros sísmicos (círculos) considerados en el estudio	49
Figura N° 4.3	Caracterización de los registros sísmicos de la base de datos	50
Figura N° 4.4	Definición del umbral para identificar los T_d	52
Figura N° 4.5	Principales elementos de la metodología para la identificación de T_d usando ratios espectrales de respuesta H/V	56
Figura N° 4.6	Formas típicas de las razones espectrales de respuesta horizontal-vertical promedio (H/V) para eventos con $M_W \geq$ 3.5	57
Figura N° 4.7	Ratios espectrales de respuesta H/V de la parte norte de Lima Metropolitana	58
Figura N° 4.8	Ratios espectrales de respuesta H/V de la zona sur-oeste de la provincia del Callao	63
Figura N° 4.9	Ratios espectrales de respuesta H/V de la parte central y sur-este de Lima Metropolitana	64
Figura N° 4.10	Sensibilidad de la relación espectral de respuesta H/V de la estación CAL001	65
Figura N° 4.11	Distribución de los T_d por criterio y estaciones	65
Figura N° 5.1	Parámetros presentados en las gráficas de funciones de transferencia secuenciales	67

Figura N° 5.2	Patrones encontrados en las FT secuenciales de los grupos de perfiles sísmicos	69
Figura N° 5.3	Comparación de las FT sucesivas de los perfiles sísmicos recopilados de la técnica MAM, FT del perfil superficial MASW y el espectro H/V de la medición puntual de microtemores para la región norte de Lima Metropolitana	70
Figura N° 5.4	Comparación de las FT sucesivas de los perfiles sísmicos recopilados de la técnica MAM, FT del perfil superficial MASW y el espectro H/V de la medición puntual de microtemores para la para la provincia Constitucional del Callao	72
Figura N° 5.5	Comparación de las FT sucesivas de los perfiles sísmicos recopilados de la técnica MAM, FT del perfil superficial MASW y el espectro H/V de la medición puntual de microtemores para zona central (I) de Lima Metropolitana	73
Figura N° 5.6	Comparación de las FT sucesivas de los perfiles sísmicos recopilados de la técnica MAM, FT del perfil superficial MASW y el espectro H/V de la medición puntual de microtemores para zona central (II) de Lima Metropolitana	74
Figura N° 5.7	Comparación de las FT sucesivas de los perfiles sísmicos recopilados de la técnica MAM, FT del perfil superficial MASW y el espectro H/V de la medición puntual de microtemores para zona sur de Lima Metropolitana	76
Figura N° 5.8	Evaluación de la A_vTF para las FT secuenciales de algunos perfiles profundos y FT del perfil superficial	77
Figura N° 6.1	Grupo con FT sucesivas con importante amplificación en períodos largos en donde la expresión original de A_vTF no consideraría apropiadamente todos los picos de amplificación, la región sombreada representa los límites de la expresión original de A_vTF	79
Figura N° 6.2	Principales formas de las gráficas de sensibilidad de A_vTF	81
Figura N° 6.3	Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de A_vTF para la estación CAL002-NISTA	82
Figura N° 6.4	Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de A_vTF para la estación CAL011-PRADO	83
Figura N° 6.5	Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de A_vTF para la estación LIM013-SANM	83

Figura N° 6.6	Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de A_vTF para la estación CAL001-DHN	84
Figura N° 6.7	Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de A_vTF para la estación LIM007-VES	85
Figura N° 6.8	Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de A_vTF para la estación LIM005-RESER	86
Figura N° 6.9	Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de A_vTF para la estación LIM023-ANCON	86
Figura N° 6.10	Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de A_vTF para la estación LIM032-SCOLIVO	87

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLOS

A_vTF	:	Función de Transferencia Promedio.
D_{epi}	:	Distancia epicentral.
f_d	:	Frecuencia dominante de vibración del suelo.
f_n	:	Frecuencia natural de vibración del suelo.
f_0	:	Frecuencia fundamental de vibración del suelo.
FT	:	Función de Transferencia.
H/V	:	Razón espectral de respuesta horizontal-vertical.
M_W	:	Magnitud momento de los sismos.
PSA	:	Espectro de respuesta de pseudo-aceleración.
T	:	Periodo estructural.
T_d	:	Periodo dominante de vibración del suelo.
V_s	:	Velocidad de ondas de corte.
V_{s30}	:	Velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad.

SIGLAS

CENSIS	: Centro Sismológico Nacional.
CISMID	: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres - Facultad de Ingeniería Civil - Universidad Nacional de Ingeniería.
IGP	: Instituto Geofísico del Perú.
INEI	: Instituto Nacional de Estadística e Informática.
MAM	: Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanales.
MASW	: Análisis Multicanal de Ondas de Superficie.
MVCS	: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
REDACIS	: Red acelerográfica de CISMID.
SATREPS	: Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development.
SENCICO	: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción
UPG/UNI-CIP	: Red acelerográfica de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, en convenio con el Colegio de Ingenieros del Perú.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El análisis sísmico de estructuras es una etapa crucial en el diseño global de edificaciones, especialmente en áreas con alta actividad sísmica. Para lograr un diseño adecuado, es fundamental estimar de manera precisa los valores de movimiento sísmico en la superficie o en el nivel de cimentación donde se ubicará la estructura. En este sentido, el profesional a cargo debe determinar inicialmente el horizonte estratigráfico donde inicia la roca ingenieril competente (*bedrock*) del proyecto. A partir de esta referencia, se realiza el análisis de propagación de ondas de corte, lo cual implica evaluar la distribución y el comportamiento de las capas superficiales de suelo de manera precisa. Esta evaluación adecuada es crucial para obtener resultados confiables en el análisis y diseño sísmico de las estructuras (Yoshida, 2015).

En la búsqueda de una amplia aplicación práctica, la mayoría de los códigos sismorresistentes utilizados a nivel mundial se basan en la consideración de un único parámetro de rigidez equivalente hasta cierta profundidad para la caracterización sísmica de depósitos de suelo. Este parámetro se conoce como el valor promedio de las velocidades de onda de corte en los primeros 30 metros (V_{s30}). Sin embargo, esta aproximación omite la evaluación directa de las características dinámicas del suelo, como el período fundamental de vibración, así como información relacionada con la profundidad del estrato firme o rocoso, que puede encontrarse a una profundidad mayor a los 30 metros.

En los últimos años, se ha observado un creciente uso de ensayos geofísicos de fuente pasiva para la estimación de perfiles profundos de suelos en diversos distritos de Lima Metropolitana. Estos ensayos han permitido identificar la profundidad de la roca sísmica (roca con una $V_s \geq 3000\text{m/s}$ según Yoshida (2015)) en distritos como Bellavista, Villa el Salvador, La Molina y Rímac (Calderón, Lazares, Aguilar, Sekiguchi, y Nakai, 2011). Para llevar a cabo estos estudios, se han empleado técnicas de medición de vibraciones ambientales utilizando arreglos poligonales con diferentes radios de apertura. Estos arreglos han posibilitado la captura de ondas con longitudes de onda más largas que las obtenidas habitualmente en ensayos geofísicos de fuente activa.

En consonancia con estos avances, el estudio realizado por Gonzales, Sifuentes, Lazares, Quispe, y Huerta (2020) ha demostrado que, en ciertos distritos de Lima, los primeros 30 metros de profundidad no son representativos para comprender el comportamiento dinámico de los depósitos de suelo. Estos hallazgos respaldan la necesidad de considerar perfiles profundos de suelos en la caracterización sísmica, ya que proporcionan información más precisa y detallada sobre las propiedades

geotécnicas y dinámicas del suelo en diferentes áreas de la ciudad.

En los últimos años, se ha observado un notable incremento en la adquisición y administración de estaciones sísmicas acelerográficas por parte de instituciones tanto públicas como privadas en Lima y a nivel nacional. El Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) opera la Red Acelerográfica de CISMID (REDACIS), mientras que la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, en colaboración con el Colegio de Ingenieros del Perú, administra una serie de equipos a nivel nacional conocidos como red UPG/UNI-CIP. Además, el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO) cuenta con estaciones acelerográficas en sus gerencias zonales, las cuales son gestionadas por las instituciones previamente mencionadas. El Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través del Centro Sismológico Nacional (CENSIS), también desempeña un papel importante en este ámbito.

Esta expansión de la instrumentación sísmica ha generado un aumento significativo en la cantidad de información relacionada con el registro de eventos sísmicos. Este crecimiento ha permitido un mayor entendimiento del comportamiento de los diferentes tipos de materiales del suelo en los cuales se instalan dichas estaciones ante vibraciones reales, como los eventos sísmicos.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El problema de investigación de esta tesis se centra en la caracterización del comportamiento sísmico de los suelos en Lima Metropolitana. La compleja geomorfología de la zona, resultado de la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana y la acción erosiva de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, plantea desafíos significativos en esta tarea.

Hasta ahora, se han realizado estudios de microzonificación sísmica que utilizan información superficial obtenida a partir de ensayos geotécnicos y geofísicos para caracterizar los suelos de la ciudad. Sin embargo, es necesario respaldar estos resultados con análisis de registros acelerográficos de eventos sísmicos reales. Estos registros proporcionan información valiosa sobre las características vibratorias de los depósitos de suelo específicos en los que se obtuvieron.

Además, se ha observado evidencia empírica de la influencia de la estructura profunda del suelo en el comportamiento sísmico, mediante el análisis de registros de vibración ambiental utilizando técnicas como arreglos de microtemores en ciertos distritos de Lima. Estos análisis revelan cambios en las funciones de transferencia sucesivas y su correspondencia con la función de transferencia empírica (H/V) a partir de cierto nivel. Por lo tanto, es fundamental considerar tanto los aspectos superficiales como los aspectos profundos para lograr una mejor caracterización

sísmica de los suelos de Lima Metropolitana.

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1 Objetivo General

Identificar los períodos predominantes de la oscilación horizontal del suelo mediante el cociente horizontal-vertical de espectros de respuesta para las estaciones acelerográficas y evaluar la sensibilidad de la función de transferencia promedio ($AvTF$), tanto en profundidad de exploración como en rango de períodos efectivo para los perfiles sísmicos profundos en Lima Metropolitana.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Recopilar perfiles sísmicos superficiales y profundos, así como valores del período fundamental del suelo obtenidos a partir de vibraciones ambientales en Lima Metropolitana.
- Compilar, calcular el cociente espectral respuesta e identificar el período predominante de vibración (T_d) a partir de registros de las estaciones de redes acelerográficas REDACIS y UPG/UNI-CIP de Lima Metropolitana. La evaluación se dará para diferentes condiciones epicentrales, de magnitud y mínimo valor de aceleración máxima.
- Calcular las funciones de transferencia promedio ($AvTF$) para distintos niveles de referencia y rangos de integración, con el objetivo de caracterizar adecuadamente los perfiles sísmicos.
- Evaluar e identificar el efecto de la estructura profunda del suelo en los períodos predominantes calculados para eventos sísmicos de diversas características en las estaciones acelerográficas de la REDACIS y la UPG/UNI-CIP.

1.4 HIPÓTESIS DEL ESTUDIO

Al utilizar el cociente horizontal-vertical de espectros de respuesta para las estaciones acelerográficas y evaluar la sensibilidad de la función de transferencia promedio ($AvTF$) en términos de profundidad de exploración y rango de períodos efectivo para los perfiles sísmicos profundos en Lima Metropolitana, se podrán identificar de manera precisa los períodos predominantes de la oscilación horizontal del suelo e identificar zonas donde la estructura profunda de los depósitos ejerce una influencia significativa y donde es probable que exista una caracterización incompleta de los efectos locales de sitio.

1.5 METODOLOGÍA

La presente tesis se divide en dos partes. La primera parte se enfoca en una etapa teórica y de recopilación de información, mientras que la segunda parte se centra en el análisis de los datos recopilados.

En la etapa teórica, se desarrollará el marco conceptual necesario para analizar los resultados de manera adecuada. Esto implica revisar y comprender los conceptos clave relacionados con el análisis de perfiles sísmicos y la evaluación de la función de transferencia promedio ($AvTF$).

Aquí se recopilarán perfiles sísmicos obtenidos a partir de ensayos geofísicos realizados en Lima Metropolitana. Se dará prioridad a aquellos perfiles que estén ubicados en las cercanías de estaciones acelerográficas. Los ensayos geofísicos utilizados incluirán técnicas como MASW, mediciones puntuales y arreglos de micro-tremores. Además, se recopilarán eventos sísmicos de magnitud considerable que hayan sido registrados por las estaciones acelerográficas de las redes REDACIS y UPG/UNI-CIP durante el período de 2011-2021.

En la segunda etapa, con los eventos sísmicos se calculará el cociente espectral de los espectros de respuesta horizontal y vertical para un amortiguamiento elástico del 5%, siguiendo la metodología presentada por Hassani y Atkinson (2016). A partir de este último análisis, se identificarán los picos predominantes que superen ciertos umbrales, considerando diferentes condiciones epicentrales, magnitudes y aceleraciones máximas.

Luego, con la información geofísica recopilada, se procederá a evaluar las funciones de transferencia promedio ($AvTF$) utilizando la metodología propuesta por Sekiguchi et al. (2013). Esto se realizará para los perfiles profundos obtenidos a partir de los arreglos de micro-tremores y los ensayos MASW. Se evaluará la sensibilidad de la función de transferencia promedio ($AvTF$) en relación con la profundidad de exploración y el rango de integración para diferentes tipos de depósitos en Lima Metropolitana. Finalmente, se analizará la influencia de la estructura profunda en la estimación de los períodos predominantes (T_d) obtenidos a partir del procesamiento de los registros sísmicos y los perfiles sísmicos profundos recopilados y procesados.

En resumen, esta tesis combina una etapa teórica con la recopilación de datos geofísicos y acelerográficos para evaluar los períodos predominantes del suelo y la sensibilidad de la función de transferencia promedio ($AvTF$) en Lima Metropolitana. Los resultados obtenidos proporcionarán una mejor comprensión del comportamiento sísmico de los suelos y contribuirán a una caracterización más precisa de los efectos locales de sitio en la zona de estudio.

1.6 AREA DE ESTUDIO

El área geográfica de estudio de la presente tesis es Lima Metropolitana, ciudad ubicada en el centro occidente de Perú a lo largo del litoral del Océano Pacífico (Ver Figura N° 1.1). Oficialmente, Lima Metropolitana está conformada por la provincia constitucional del Callao y la provincia de Lima; localizándose aproximadamente en las coordenadas 77°03' longitud oeste y 12°04' latitud sur. Esta importante metrópoli posee un área geográfica cerca de 2819 km² en la cual residen alrededor de 9'569 468 ciudadanos (aproximadamente la tercera parte de la población del Perú) acorde a los reportes oficiales del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2019).

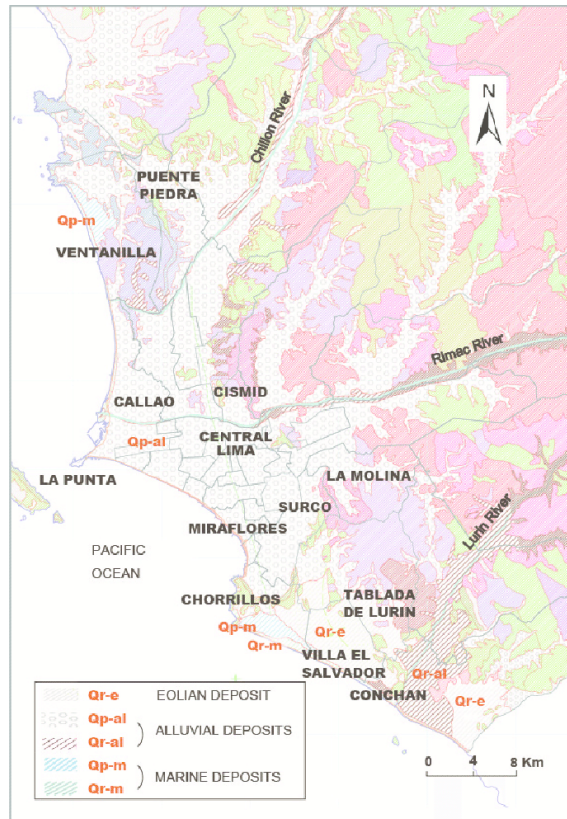


FIGURA N° 1.1: Ubicación geográfica de Lima Metropolitana.

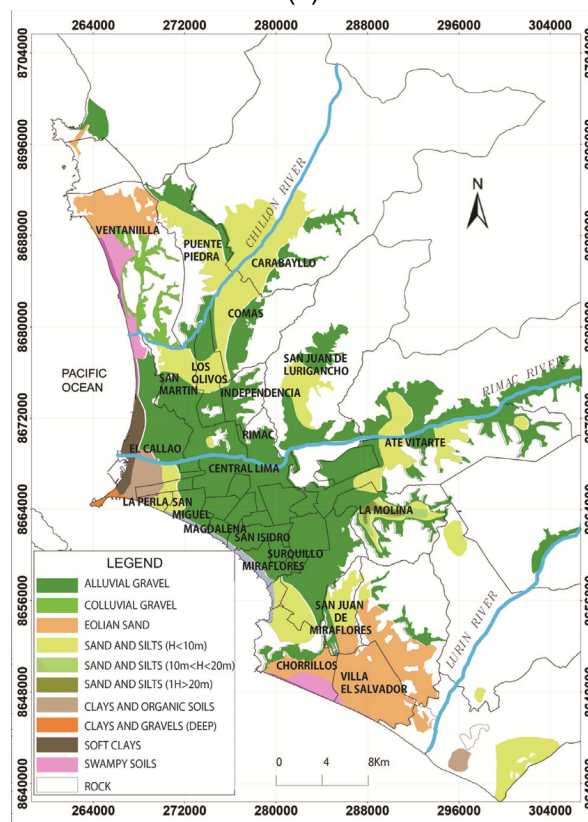
La geología y geomorfología del Perú, y en efecto, la de Lima Metropolitana se ve principalmente influenciada por la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana (que originan las estribaciones de la Cordillera de los Andes por el este). Se suma a ello la actividad geodinámica de los ríos que cruzan la metrópoli, lo que ha contribuido a la configuración actual del paisaje, así como la actividad erosiva del océano por el litoral. Así, el casco urbano se asienta sobre los abanicos de deyección cuaternarios de los ríos Rímac y Chillón, limitado por rocas sedimentarias del Jurásico Superior al Cretáceo Inferior y rocas intrusivas del Batolito Andino (Aguilar y Alva, 2005). En dichos abanicos se identifican principalmente depósitos aluviales en forma de un conglomerado compuesto de gravas, cantos y bloques de diferente diámetro, aislados por una matriz de arenas y arcillas. Estudios de resistividad eléctrica han determinado que el conglomerado alcanza potencias de 400-600 m, aumentando progresivamente su espesor de este a oeste (Arce, 1984).

Además de los depósitos aluviales, en la región de Lima afloran rocas de diferente naturaleza denominadas unidades litoestratigráficas por Palacios, Caldas, y Vela (1992), entre las que destacan el grupo Puente Piedra y el grupo Morro Solar. Asimismo, se observan afloramientos de rocas intrusivas pertenecientes al Batolito de la Costa en distritos periféricos de la ciudad como Atocongo, Villa María, La Molina, El Agustino, Vitarte y La Atarjea. Áreas con presencia de depósitos eólicos son identificados en el Cono Sur de Lima (Villa El Salvador y San Juan de Miraflores). Por otro lado, en el Callao hay predominancia de arcillas arenosas tal como se aprecia en el mapa geológico de la ciudad (ver Figura N° 1.2a) y el mapa de distribución de suelos (ver Figura N° 1.2b).

En términos de la topografía, la mayor parte del terreno de Lima Metropolitana tiene una tendencia plana, con una ligera pendiente promedio de 4-5% en la dirección NE-SO. La elevación promedio en la parte central de la ciudad es de aproximadamente 137 m.s.n.m.



(a)



(b)

FIGURA N° 1.2: Caracterización geológica del área de estudio Lima Metropolitana. (a) Mapa geológico tomado de Martínez y Porturas (1975); Palacios et al. (1992), y (b) mapa de distribución de suelos tomado de CISMID (2005).

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 SISMICIDAD EN LIMA

El Perú se encuentra localizado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona caracterizada por la presencia de volcanes activos y una elevada recurrencia sísmica. La sismicidad del área de estudio se evidencia en la Figura N° 2.1 para eventos con $M_W \geq 4.0$ y en la Figura N° 2.2 para eventos con $M_W \geq 7.5$.

Técnicamente, frente a las costas peruanas se extiende parte de la zona de subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana, cuyo acercamiento relativo se da a una velocidad constante de aproximadamente 55-70 mm por año (Argus, Gordon, y DeMets, 2011; Villegas-Lanza et al., 2016).

La interacción entre estas placas tectónicas es responsable de la generación de sismos de diversas magnitudes y con focos localizados a diferentes profundidades. Estos sismos son el resultado de diferentes procesos geodinámicos, como la fricción de placas (subducción interplaca), la deformación interna de la placa sudamericana por debajo de la cordillera (subducción intraplaca oceánica e intraplaca de profundidad intermedia y profunda) y la deformación cortical o de corteza a niveles superficiales.

La primera fuente sismogénica subducción interfase, ha provocado numerosos eventos sísmicos de gran magnitud. Según datos históricos disponibles, el mayor de ellos tuvo lugar en 1746 en Lima Metropolitana con una magnitud momento (M_W) estimada entre 8.5 y 9.0 (Silgado, 1978). Otros eventos sísmicos históricos registrados son los ocurridos en 1966, 1974 y el sismo de Pisco 2007 (M_W 7.9).

Por otra parte, los sismos de fuente sismogénica intraplaca son debido a los esfuerzos de flexión y fractura de la corteza oceánica antes desubductar, en proximidades de la fosa peruano-chilena y resultado de la colisión de las placas de Nazca y Sudamericana, un destacado ejemplo es el sismo de Ancash 1970.

Los sismos intraplaca de profundidad intermedia y profunda típicamente provocan menos daños en la superficie cerca a su epicentro que los terremotos más superficiales de una magnitud similar, sin embargo, pueden sentirse a largas distancia de sus epicentros (CAPRA, 2019) como los sismos de Lagunas 2019 (M_W 8.0) y Barranca 2021 (M_W 7.5), cuyos epicentros se estimaron a distancias aproximadas de 700 km respecto de Lima Metropolitana, lugar donde fueron registrados con valores de aceleración máxima del suelo del orden de 50 cm/s^2 .

Finalmente, los sismos corticales son aquellos que ocurren en la corteza terrestre, sin estar directamente relacionados con la subducción de placas. Se originan por las fallas geológicas activas, junto con la presencia de la elevada actividad volcánica regional. Estos eventos se producen debido a la liberación repentina de energía

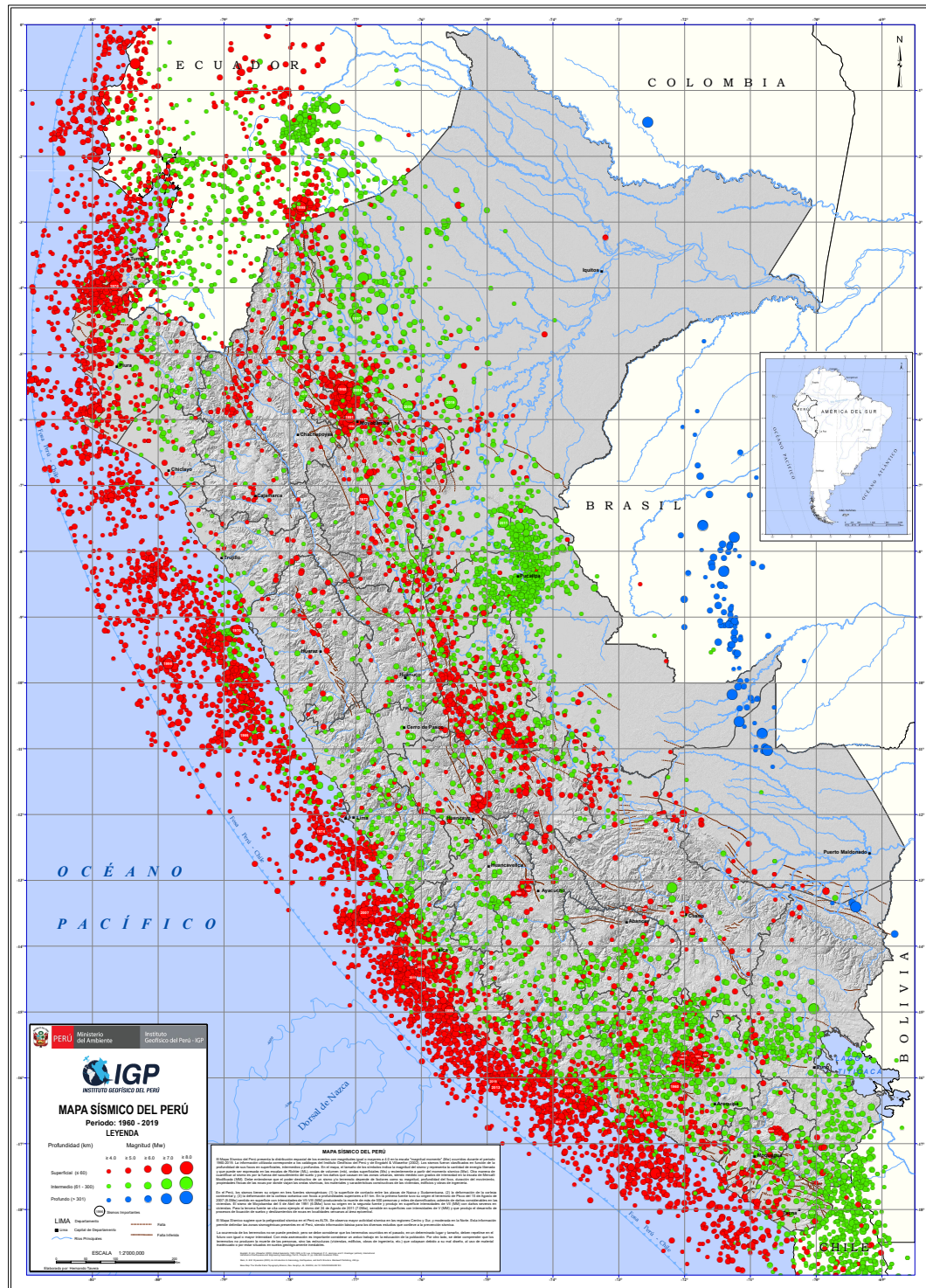


FIGURA N° 2.1: Mapa Sísmico del Perú 1960-2019 ($M_W > 4.0$). Extraído de Instituto Geofísico del Perú [IGP] (2019).

acumulada por la deformación de la corteza a lo largo de las fallas.

Es relevante mencionar que los eventos sísmicos se clasifican principalmente en dos categorías según la distancia al epicentro y el contenido de frecuencias: even-

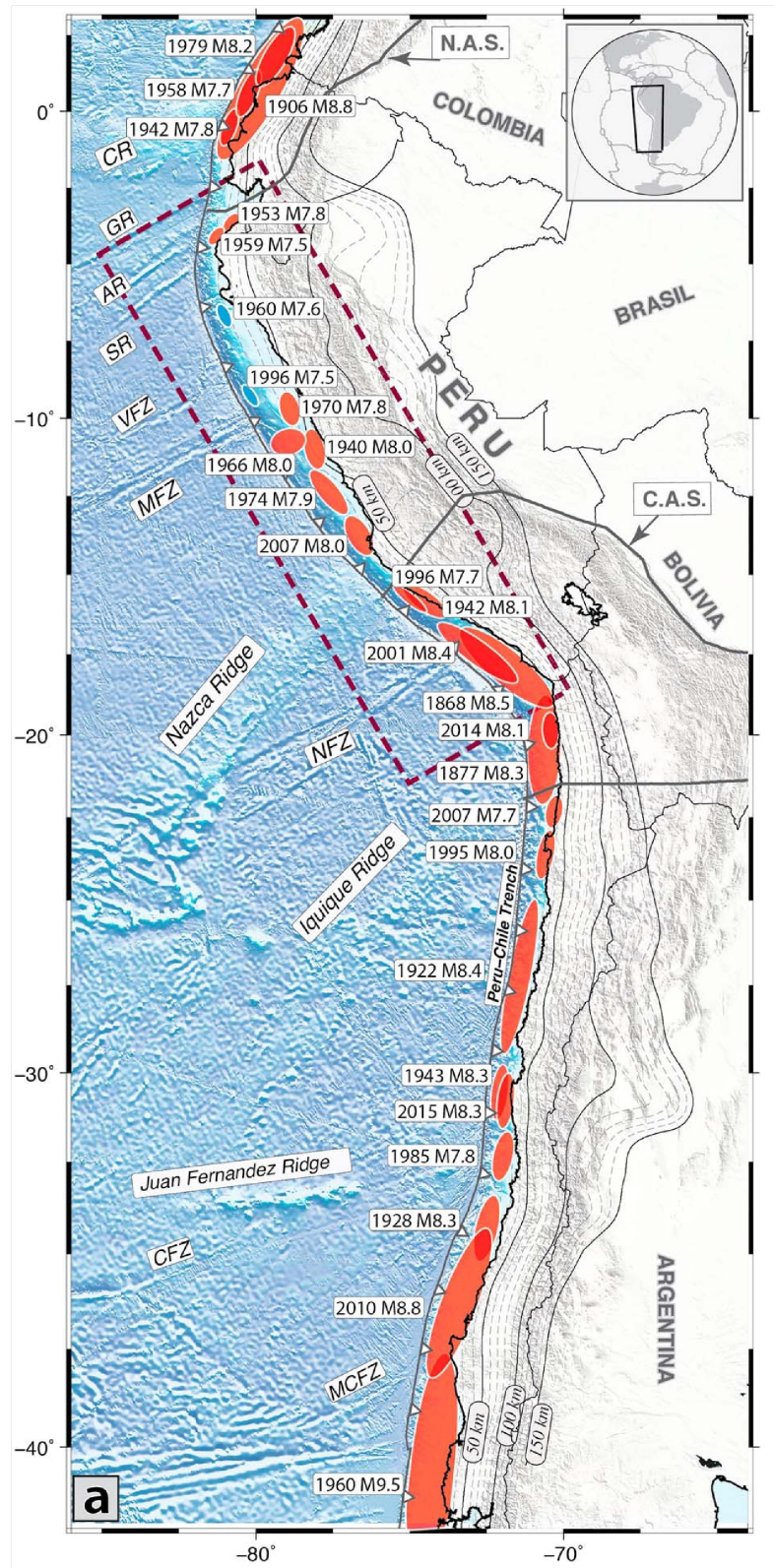


FIGURA N° 2.2: Sismicidad en la zona de subducción de la Placa de Nazca para sismos $M_W > 7.5$. Extraído de Villegas-Lanza et al. (2016).

tos de campo cercano, con períodos cortos, y eventos de campo lejano, con períodos largos (Koketsu y Miyake, 2008). Los eventos de campo cercano suelen tener un mayor contenido de frecuencias altas y tiempos de llegada similares entre las ondas de cuerpo y superficie, debido a la corta distancia entre la estación de registro y el epicentro. En contraste, los eventos de campo lejano se caracterizan por la llegada posterior de las ondas de superficie, con componentes de períodos largos, ya que los períodos cortos son atenuados debido a los efectos de trayectoria. Estos eventos de campo lejano revelan el comportamiento profundo de la estructura del suelo y pueden inducir resonancia en edificios altos.

No existe un consenso universal sobre la distancia mínima para clasificar un sismo como de campo cercano o campo lejano dado que la distinción no se basa exclusivamente en una distancia específica desde la fuente sísmica, sino que también considera factores adicionales como la magnitud del sismo, las condiciones geológicas y el impacto en la estación de registro o punto de observación. Según Stewart et al. (2002), el campo cercano se define cuando la distancia desde la fuente del terremoto está en el rango de 20 a 60 km, mientras que el campo lejano se refiere a una distancia superior a 200 km. Sin embargo, otros criterios pueden sugerir que un evento sísmico sea considerado de campo cercano si la distancia registrada es menor que el tamaño de la fuente. Para esta investigación en particular, se considerarán eventos sísmicos de campo lejano aquellos que presenten una distancia epicentral mayor a 100 km con respecto a la estación de registro.

2.2 MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA SÍSMICA DE LIMA

En la última década, el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIC-UNI) ha desarrollado un mapa de microzonificación sísmica geotécnica para Lima Metropolitana (Calderón et al., 2014). El estudio consideró información geotécnica recopilada y propiedades dinámicas de los suelos obtenida a partir de varios tipos de ensayos como: calicatas, *Downhole* o *P-S Logging*, MASW, medición puntual y arreglo de microtemores (MAM). A pesar de las limitaciones en términos de la máxima profundidad de suelo explorada y el número de ensayos disponibles para el procesamiento, este estudio es el más completo que existe, y podría ser actualizado con la nueva información geotécnica disponible.

Según el mapa de zonificación, la ciudad de Lima se ha dividido en cinco zonas distintas (ver Figura N° 2.3). La mayor parte del casco urbano se encuentra en la Zona I, que está caracterizada por la presencia de estratos de gravas o arenas con diferentes niveles de compactación, así como limos o arcillas duras y algunas formaciones rocosas. En esta zona, los períodos dominantes de vibración del suelo son menores a 0.30 segundos ($T_d \leq 0.30 s$).

Por otro lado, las áreas con riesgos geológicos moderados se encuentran en la Zona II. En esta zona, se presentan arenas medianamente compactadas, así como limos y arcillas duras. Los períodos dominantes del suelo en esta zona son de hasta 0.40 segundos ($T_d \leq 0.40 s$).

La Zona III abarca áreas con presencia de arenas sueltas a medianamente compactadas, así como suelos arcillosos y/o limosos de consistencia blanda a firme.

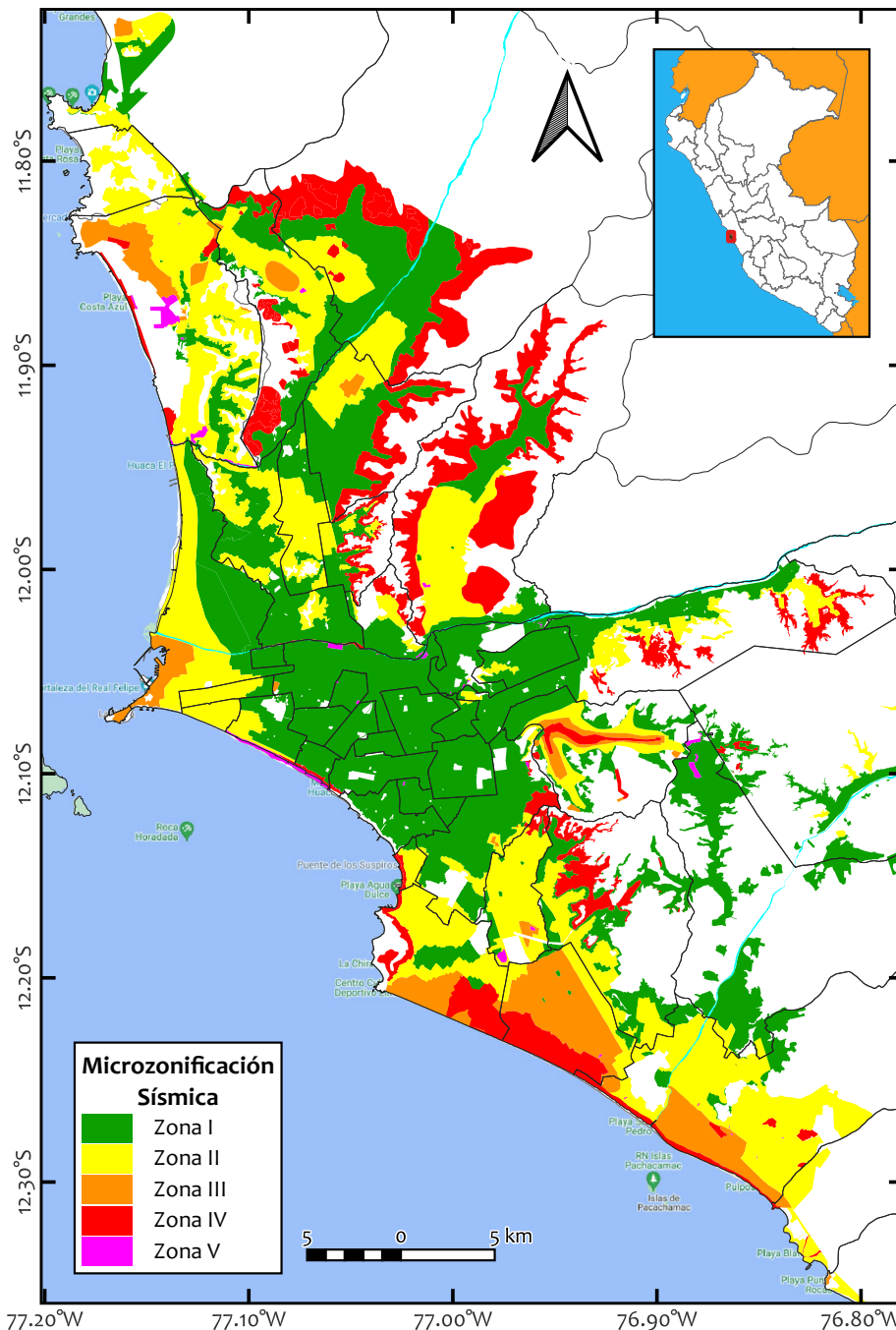


FIGURA N° 2.3: Mapa de microzonificación sísmica de Lima Metropolitana. Adaptado de Calderón et al. (2014).

En esta zona, los períodos dominantes del suelo son superiores a 0.40 segundos ($T_d > 0.40 s$).

Por último, las zonas IV y V incluyen depósitos marinos y eólicos, suelos pantanosos, escombros y materiales de relleno sanitario. Estos tipos de suelos tienen una respuesta sísmica inadecuada, por lo que no se recomienda su uso para fines de expansión urbana.

2.3 ENSAYOS GEOFÍSICOS

2.3.1 MASW

El análisis multicanal de ondas de superficie (MASW, del inglés *Multichannel analysis of Surface waves*) es un método de caracterización sísmica basado en el análisis de la dispersión geométrica de ondas de superficie tipo Rayleigh. El procesamiento de los ensayos MASW involucra típicamente 3 pasos: adquisición, procesamiento e inversión como se muestra en la Figura N° 2.4.

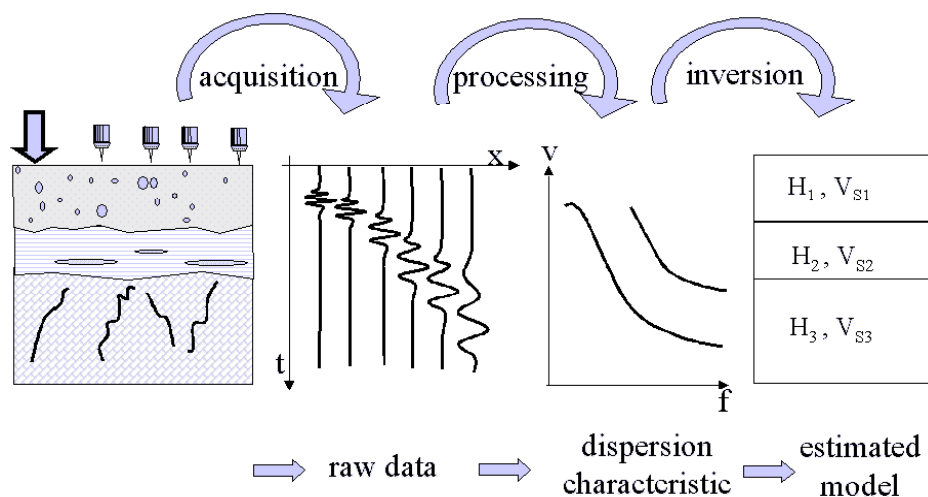


FIGURA N° 2.4: Procedimiento básico de procesamiento del método MASW. Tomado de Strobbia (2003).

La adquisición de data de ondas Rayleigh se da en una ancha banda de frecuencias y es registrada por un arreglo de receptores multicanales (usualmente 24 geófonos) dispuestos a lo largo de decenas de metros de forma lineal. El origen de las ondas comúnmente es una fuente activa (golpe de un martillo) en los extremos del arreglo.

El procesamiento consiste en obtener las características dispersivas de los registros mediante un espectro de velocidades (la velocidad de fase como función de la frecuencia), dado que en un medio estratificado las diferentes componentes de una onda viajan a diferentes velocidades, la señal inicial sufrirá un proceso de dispersión, el cual es aprovechado identificándose una curva de dispersión en el espectro de velocidades.

Finalmente se tiene el procedimiento de inversión, el cual inicia con un modelo con un número mínimo de parámetros que permite obtener la curva de dispersión identificada anteriormente. Como resultado final de este ensayo se obtienen un perfil unidimensional de velocidades de ondas de corte V_s versus profundidad.

La profundidad máxima de investigación es habitualmente de 10–30 m, pero puede variar con el sitio y el tipo de fuente activa usada. Una descripción más detallada de la técnica de MASW es dada en Strobbia (2003).

A partir del perfil de V_s se estima uno de los parámetros de caracterización sísmica más populares, como se sabe, la rigidez de los suelos se relaciona con el módulo de corte, y este a su vez con la velocidad de onda de corte. En ese sentido, el ensayo MASW ofrece una alternativa económica de obtención de perfiles de V_s comparado a otros ensayos como refracción de ondas de corte, *downhole* o *crosshole*. Así mismo, ofrece una relativa velocidad de adquisición de datos, redundancia de muestreo, y en general, buena precisión de los datos obtenidos (Park, Miller, y Xia, 1999).

2.3.2 Medición puntual de microtremor

A diferencia de los métodos de ondas de superficie de fuente activa que registran ondas provocadas por un impacto, el método de microtremores registra el ruido ambiental (conocido también como microsismos, micro trepidaciones o microtremores) cuyo origen puede ser natural o producto de la actividad humana.

Típicamente, las vibraciones debido a fenómenos naturales como el oleaje oceánico, las condiciones atmosféricas, viento, lluvia, flujo de los ríos y similares tienen componentes con períodos > 1 s, mientras que los originados de actividades humanas como el tráfico, actividad industrial, construcción civil y gente caminando tienen $T \leq 1$ s (Okada y Suto, 2003).

Una de las técnicas más comunes usadas para el análisis de la data de microtremores es el método de relaciones espectrales H/V presentada por Nakamura (1989). El cual, con la medición puntual de microtremores permite identificar el período fundamental de resonancia de la estructura de suelo mediante la obtención de un espectro H/V (también conocido como función de transferencia empírica o pseudo-función de transferencia). Este método ha sido ampliamente difundido como un ensayo efectivo de bajo costo que permite estudiar los efectos de sitios en diferentes regiones del mundo.

2.3.3 Arreglo de microtremores

La técnica de arreglo de microtremor (MAM, del inglés *Microtremor Array Measurement*) utiliza cuatro o más receptores alineados en un arreglo bidimensional para poder estimar un perfil unidimensional de ondas de corte más profundo que el potencial-

mente obtenible de la técnica MASW. Los receptores habitualmente consisten en geófonos de 1-4.5 Hz. A pesar de que cualquier arreglo 2D de sensores puede brindar resultados favorables (incluyendo receptores colocados aleatoriamente), las formas más utilizadas de disposición geométrica son las: triangulares, circulares, semicirculares y en forma de L. De todas ellas, el arreglo triangular (que consiste en varios triángulos equiláteros inscritos dentro de otro y un receptor al centro) es frecuentemente usado, dado que proporciona buenos resultados con un relativo menor número de geófonos (ver Figura N° 2.5b). Con este arreglo, la longitud del lado del triángulo exterior debe ser al menos igual a la profundidad de investigación deseada, así mismo, la profundidad de exploración es afectada por la frecuencia de muestreo y tiempo de registro.

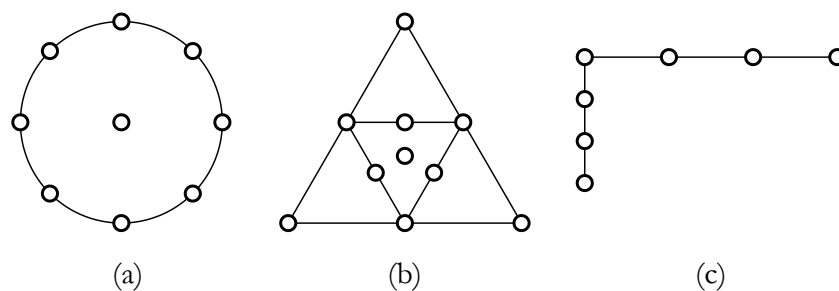


FIGURA N° 2.5: Distribución geométrica de algunos arreglos de microtremores. Tomado de Asten y Hayashi (2018).

El procesamiento de registros de arreglo de microtremor comparten los mismos pasos esenciales que el método MASW: adquisición, procesamiento e inversión (ver Figura N° 2.6). Dándose un tratamiento especial en la adquisición de registros de vibraciones, esto debido a que los microtremor son ondas superficiales que se generan aleatoriamente, y viajan a través de una amplia variedad de condiciones geológicas, haciendo que se convierten en un conjunto muy complejo de ondas elásticas que contienen no sólo ondas de cuerpo y ondas de superficie, sino también ondas reflejadas y refractadas. Para separar las ondas superficiales de este conjunto, los investigadores han propuesto varios métodos. Los métodos más conocidos son el Método espectral del número de onda y la frecuencia (F-k, Capon (1969)) y el método de autocorrelación espacial (SPAC, Aki (1957)), así mismo, enfoques derivados del SPAC como el análisis de arreglo circular sin centro (CCA, Cho, Tada, y Shinozaki (2004)) y el análisis de arreglo circular con compensación de ruido (nc-CCA, Tada, Cho, y Shinozaki (2007)) son utilizados actualmente. Mayor detalle de estas metodologías y procesamiento de la técnica de arreglo de microtremor es descrito en Okada y Suto (2003).

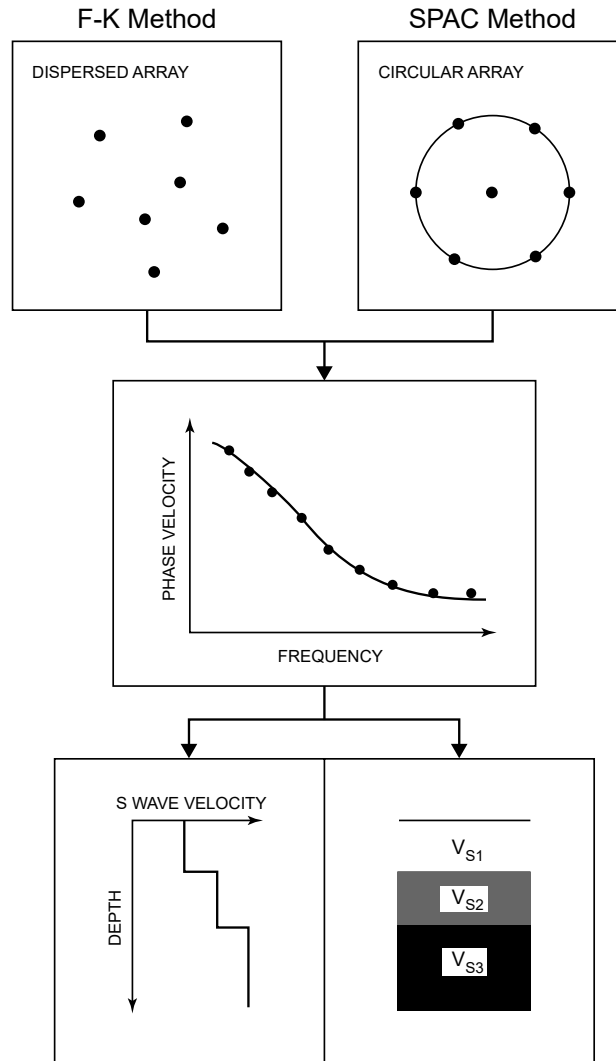


FIGURA N° 2.6: Procedimiento básico de procesamiento del método de arreglo de microtremores. Tomado de Okada y Suto (2003).

2.4 PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO

2.4.1 Velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 m (V_{s30})

El V_{s30} es un parámetro de sitio que aproxima la rigidez de un depósito de suelo por medio de una velocidad representativa de onda de corte en los primeros 30 metros de potencia (Borcherdt, 1994). El valor de V_{s30} reproduce el tiempo de recorrido vertical de una onda de corte que se propaga a lo largo de este espesor. Su expresión es:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n h_i / V_{si}} \quad (2.1)$$

Donde:

- V_{s30} : Velocidad promedio de ondas de corte de los primeros 30 m.
 n : Número de estratos identificados.
 h_i : Espesor del estrato i .
 V_{si} : Velocidad de onda de corte en el estrato i .

A pesar de que la decisión de adoptar una profundidad de análisis de 30 m fue pragmática y de alguna forma arbitraria, este valor ha sido ampliamente adoptado como principal parámetro de clasificación de sitio por los códigos de diseño internacionales, y en efecto el del Perú. Por ejemplo el ASCE 7-16; Eurocode 8; NTP E.030-2018.

Según Verdugo (2019), el V_{s30} como único parámetro asociado a la clasificación de sitio provee información valiosa sobre la amplificación sísmica, pero también presenta inherentes limitaciones. En primer lugar, al basarse solo en las propiedades de los primeros 30 m de estructura del suelo, desestima los efectos de los suelos por debajo de los 30 m y la profundidad total de los estratos. Por otro lado, en su cómputo no se toma en consideración el orden de los estratos, como consecuencia, dos perfiles de suelos que comparten un mismo valor de V_{s30} pero diferente orden de estratos, presentarán diferentes funciones de transferencias debido a que la respuesta sísmica es sensible a la secuencia de estratos.

2.4.2 Período predominante de vibración (T_d)

La literatura distingue tres conceptos asociados a los máximos locales de las funciones de transferencia empíricas o teóricas en términos de frecuencias. En primer lugar, el conjunto de todas las frecuencias que corresponden a máximos locales son denominados las frecuencias naturales del depósito del suelo (f_n). Siguiendo esa línea, el menor de todas las frecuencias de este conjunto (que habitualmente coincide con la frecuencia a la que se produce el mayor pico de amplificación) es la frecuencia fundamental o frecuencia fundamental de resonancia (f_0). En ocasiones resulta más útil reportar la frecuencia correspondiente al pico máximo de amplificación, la cual es denominada la frecuencia dominante del sitio, frecuencia predominante del sitio (f_d) o su valor inverso como el período predominante del suelo (T_d) (Kramer, 1996; Luzi et al., 2011).

Existen diferentes técnicas utilizadas para analizar los distintos tipos de datos que permiten identificar los T_d . Mayor detalle de estas se puede encontrar en Motazedian et al. (2011); Pando et al. (2008). Es usual identificar el T_d utilizando la metodología que analiza las razones espectrales horizontales y verticales (H/V), la cual fue presentada por primera vez por Nakamura (1989) al usar registros de microtremor, a partir de allí, varios estudios a nivel mundial han desarrollado variantes de este método incluyendo el análisis de registros sísmicos.

Sobre las variantes de la metodología H/V , es una práctica común identificar T_d utilizando los espectros de Fourier de los registros de ruido ambiental o de sismos, como se señala en Ghofrani y Atkinson (2014); Kawase, Sanchez-Sesma, y Matsushima (2011); Lermo y Chávez-García (1993) y Nakamura (1989). Sin embargo, algunos inconvenientes del uso de los espectros de Fourier son por ejemplo que, a períodos cortos los picos agudos de cada componente podrían producir una gran variabilidad en la ratio espectral. Por otro lado, y debido a la importancia crucial del suavizado en el cálculo de los espectros de Fourier, el esfuerzo y el tiempo serían extremadamente grandes para procesar varios registros, ya que los parámetros elegidos para una estación podrían no ser necesariamente aplicables para las demás. Además, el efecto de suavizado podría sobre utilizarse de forma involuntaria (Zhao, 2006). Una variante de la metodología H/V recomienda usar las amplitudes de los espectros de respuesta de registros sísmicos (por ejemplo, el espectro de respuesta de pseudo aceleración amortiguada al 5%, PSA), aprovechando que investigaciones han reportado que el oscilador amortiguado de un grado de libertad actúa como un filtro de banda estrecha (Safak, 2001), haciendo que relaciones espectrales de respuesta H/V sean funciones mucho más suaves y al mismo tiempo se evita el uso de factores de suavizado estandarizados.

Generalmente se acepta que el período pico con mayor amplificación obtenido de la metodología H/V (ya sea utilizando datos de ruido ambiental o de sismos) es una buena estimación del T_d de un depósito de suelo. De hecho, el T_d puede obtenerse fácilmente para estaciones acelerográficas usando esta metodología ofreciendo información geotécnica del sitio sin necesidad de estudios adicionales.

Es necesario resaltar que la técnica H/V proporciona un período predominante estable de sitio. Yamazaki y Ansary (1997) utilizaron ratios espectrales de Fourier para demostrar que, para los registros de sismos de campo intermedio y lejano, los resultados de H/V son casi independientes de la magnitud, la distancia epicentral y la profundidad del sismo. En un enfoque similar, Zhao (2006) demostró que los ratios obtenidos a partir de espectros de respuesta amortiguados al 5% no se ven fuertemente afectados por la magnitud, la distancia hipocentral ni la profundidad focal.

En el ámbito nacional, Soto (2021) determinó el período de vibración del suelo de Lima Metropolitana y el Callao utilizando el método del cociente de espectros de aceleraciones propuesto por Zhao et al. (2006) en un total de 18 estaciones sísmicas acelerográficas. Dicho estudio validó este método empírico para identificar T_d mediante la comparación del cociente H/V de la amplitud de Fourier y el espectro de respuesta de las estaciones de su investigación con los espectros H/V de los microtemores. Como resultado, se concluyó que es factible utilizar el cociente de espectros de respuesta de aceleración para la identificación del T_d . Los valores de T_d identificados en dicho estudio se presentan en Tabla N° 2.1.

En ese sentido, aprovechando la disponibilidad de una considerable cantidad registros sísmicos y la estabilidad de la metodología, en la presente tesis se identificó los T_d a partir de la metodología H/V que usa las respuestas espectrales de PSA .

TABLA N° 2.1: Valores de período T_0 (s) y T_1 (s) para estaciones acelerográficas en Lima. Adaptado de Soto (2021).

Red	Código	Estación	Distrito	H/V Microtremor		H/V Sismos	
				T_0 (s) ^a	T_1 (s) ^b	T_0 (s) ^a	T_1 (s) ^b
UPG/UNI-CIP	D855	PUNTA	La Punta	1.20	0.45	1.20	0.50
	9E7E	CIPLIM	San Isidro	0.60	<0.10	0.30	0.60
	LIM011	CIPCN	Miraflores	0.20	<0.10	0.20	0.90
	D91A	UNI	Rímac	0.60	<0.10	0.25	0.60
	D914	UNTELS	Villa El Salvador	0.60	0.10	0.60	0.18
REDACIS	CAL001	DHN	El Callao	1.20	0.50	1.20	0.55
	CAL003	DSMI	El Callao	0.25	ND †	1.25	0.30
	CAL005	ACAPU	El Callao	0.25	ND †	1.00	0.40
	CAL004	RAMON	El Callao	0.25	ND †	1.00	0.25
	CAL002	NISTA	Bellavista	1.50	0.15	1.20	0.25
	CAL011	PRADO	La Perla	0.15	*	1.20	0.20
	LIM016	IMCA	La Molina	0.70	0.11	0.90	0.18
	LIM010	MARTI	La Molina	1.00	0.15	0.80	0.15
	LIM028	USILM	La Molina	0.25	*	0.20	0.90
	LIM022	MDPP	Puente Piedra	0.40	-	0.50	-
	LIM006	PIEDRA	Puente Piedra	0.40	0.30	0.40	0.18
	LIM020	SROSA	Santa Rosa	0.28	-	0.15	-
	LIM023	ANCON	Ancón	0.30	-	0.40	0.12

^a Período fundamental característico del sitio, de mayor amplitud del espectro H/V .

^b Primer período característico del sitio.

* Espectro H/V incompleto, recortado hasta 1.0s

- No se identificó un segundo período de vibración predominante.

† Resultado No Disponible.

2.5 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PROMEDIO

Las funciones de transferencia (FT) determinan la amplificación o desamplificación de cada frecuencia producida por el depósito del suelo cuando el movimiento sísmico pasa desde la roca ingenieril competente (*bedrock*) o espacio semi-infinito a un determinado estrato del perfil de suelo (que comúnmente es la superficie). Puede considerarse como un filtro que actúa sobre una señal de entrada para producir una señal de salida. Entre las metodologías para estimar la respuesta sísmica del suelo, tenemos el enfoque lineal equivalente, que se basa en FT para estimar parámetros de interés (como la aceleración o la velocidad de la superficie del suelo) usando

parámetros conocidos (como la aceleración del *bedrock*). La forma de una FT está influenciada por el espesor, la rigidez y las características amortiguadoras de cada estrato de suelo que compone el perfil del suelo, así mismo, es influenciada por las propiedades del *bedrock* (Kramer, 1996).

Sekiguchi et al. (2013) propusieron una expresión para estimar el factor de amplificación de suelos para Lima Metropolitana a partir de una función de transferencia promedio ($AvTF$ por sus siglas en inglés) de perfiles sísmicos superficiales obtenidos de la técnica MASW, esta expresión permite considerar el T_d y el valor de su amplificación de manera práctica, superando la limitación de ciertos sitios que poseen similares valor de T_d , pero diferente amplificación, al estimar un valor promedio en un ancho de banda de interés. Su formulación en esencia estima el área promedio bajo la FT (ver Figura N° 2.7) y es:

$$AvTF = \frac{1}{0.95} \int_{0.05}^{1.0} TF(T) dT \quad (2.2)$$

Donde: TF : La función de transferencia entre la superficie y el *bedrock*
 T : Período.

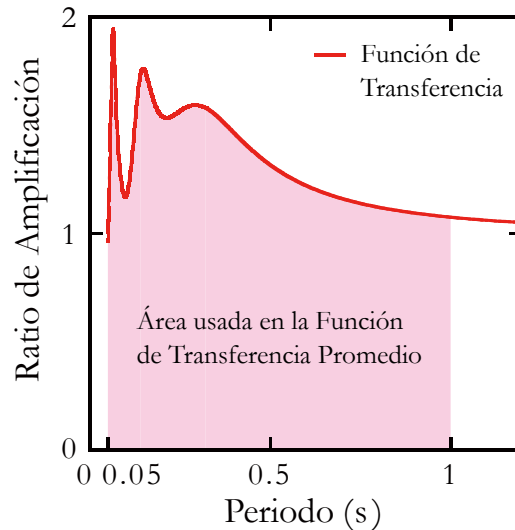


FIGURA N° 2.7: Definición gráfica de la $AvTF$. Modificado de Sekiguchi et al. (2013).

Los límites de integración de la expresión original de la $AvTF$ (Ecuación 2.2) no permiten considerar T_d de depósitos de suelo que mayores a 1 s, por lo que la presente tesis extendió el límite de integración superior para estimar una $AvTF$ más apropiada para perfiles sísmicos profundos con importantes aportes de amplificación en el rango de períodos largos en sus respectivas FT.

2.6 ESPECTROS DE RESPUESTA

Son una herramienta fundamental en la ingeniería sísmica, utilizados para aplicar de manera práctica los principios de la dinámica estructural y cumplir con los requisitos de rigidez y resistencia establecidos por los códigos de diseño sismorresistentes.

En estas gráficas se resumen las respuestas máximas de todos los posibles sistemas lineales de un grado de libertad (1GDL) excitados por un componente particular de un registro sísmico o cualquier aceleración. Las respuestas máximas son graficadas como función de la frecuencia natural (o período natural) del sistema de 1GDL para un factor de amortiguamiento fijo. Las respuestas máximas son expresadas en términos de espectro de respuesta de aceleración (S_A), velocidad relativa (S_V) o deformación (S_D), las cuales pueden ser obtenidas a partir métodos numéricos de derivación e integración de forma más precisa.

De entre los métodos numéricos de integración, la aplicación de la integral de Duhamel permite estimar la respuesta tiempo-historia de desplazamiento del sistema de 1GDL de forma sencilla y más aún, proporciona expresiones en las que el desplazamiento, la velocidad y aceleración son proporcionales, como se muestra en la Ecuación 2.5.

$$S_D = |u|_{max} \quad (2.3)$$

$$S_V = |\dot{u}|_{max} \approx \omega_0 S_D = PSV \quad (2.4)$$

$$S_A = |\ddot{u}|_{max} \approx \omega_0^2 S_D = \omega_0 \cdot PSV = PSA \quad (2.5)$$

u : Máximo valor del desplazamiento tiempo historia del sistema de 1GDL

ω_0 : Frecuencia natural circular del sistema de 1GDL

S_D : Espectro de respuesta de deformación

S_V : Espectro de respuesta de velocidad relativa

S_A : Espectro de respuesta de aceleración

PSV : Espectro de respuesta de pseudo-velocidad

PSA : Espectro de respuesta de pseudo-aceleración

A pesar de que los valores de PSV y PSA no son los verdaderos máximos, son buenas aproximaciones de las respuestas máximas esperadas, tal como se demuestra en Chopra (1995). Debido a esto, los espectros de respuesta de PSV y PSA son generalmente aceptados como valores iguales a los S_V y S_A , e inclusive sus términos usados indistintamente el uno del otro.

CAPÍTULO III: PERFILES SÍSMICOS EN LIMA METROPOLITANA

La identificación de las propiedades dinámicas de la subestructura del suelo en Lima Metropolitana ha aumentado considerablemente en los últimos años producto de diferentes proyectos y trabajos de investigación. Uno de los primeros estudios que recopiló información mecánica de los suelos y ejecutó ensayos tanto geofísicos como geotécnicos fue realizado entre los años 2003 y 2005, por encargo de la Asociación Peruana de Empresas de Seguros (APESEG), donde se desarrolló un mapa inicial de microzonificación sísmica de la ciudad de Lima abarcando 42 distritos (CISMID, 2005). Para esa fecha, se contaba con información de perfiles sísmicos superficiales obtenidos de técnica MASW y períodos predominantes de vibración producto de la medición puntual de microtremores.

Como se sabe, los perfiles de distribución de velocidad de ondas de corte obtenidos mediante métodos indirectos activos sólo permiten caracterizar estratos superficiales (típicamente hasta los 30 m de profundidad). Con el objetivo de estimar los perfiles de V_s hasta la profundidad de la roca sísmica ($V_s \geq 3000m/s$ de acuerdo a Yoshida (2015)) y al mismo tiempo exploraciones indirectas más profundas, se empezó a aplicar la técnica de Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanales (MAM) o arreglo de microtremores. Así, Calderón et al. (2011) aplicaron dicha técnica para estimar la profundidad de la roca sísmica de 8 lugares representativos de Lima Metropolitana, entre ellos los distritos de Bellavista, Villa el Salvador, La Molina y Rímac, usando arreglos y grandes arreglos poligonales de diferente radio de apertura (se consideraron grandes arreglos a aquellos que tenían un radio mayor a 50 m). Por su parte, Quispe et al. (2014) estimaron los perfiles de V_s profundos para 5 estaciones acelerográficas del Instituto Geofísico del Perú (IGP) en la zona de estudio. En el 2020 (Gonzales et al., 2020) estimaron 3 perfiles profundos usando arreglos de microtremores en los distritos de Comas, La Perla y Bellavista con el fin de estimar el impacto de los estratos profundos de la subestructura del suelo en el comportamiento dinámico de estos depósitos particulares.

Actualmente, la mayor cantidad de perfiles sísmicos profundos disponibles en Lima Metropolitana son producto de los entregables de proyectos financiados por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) a través de sus programas 'Mis Ciudades' y 'Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres, PP068'. De igual forma, en el marco del Proyecto SATREPS "Enhancement of Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation Technology" (Yamazaki et al., 2014) se desarrollaron investigaciones en gran parte del área de Lima Metropolitana que enriquecieron la base de datos. La data obtenida de los proyectos mencionados, junto a otros datos recopilados de Estudios de Mecánica de Suelos permitieron actualizar los mapas de microzonificación sísmica y reanalizar la data de algunos distritos.

3.1 PERFILES SÍSMICOS RECOPIRADOS

Con el objetivo de analizar el impacto de los estratos profundos de la subestructura del suelo en las funciones de transferencia (FT), se recopiló la información de perfiles sísmicos obtenidos de la técnica de MAM de las fuentes descritas anteriormente. No se consideraron aquellos perfiles en los que no se tenía el cociente H/V de la medición puntual de microtremores. En ciertos puntos, se efectuó la digitalización de data disponible sólo de manera gráfica, ya sea del perfil de V_s y/o el espectro H/V .

A continuación, se procedió a identificar perfiles de velocidad producto de la técnica MASW ejecutados cerca a los perfiles profundos y que compartan la misma tendencia en los primeros metros (en el caso que el perfil V_s superficial se encuentre distanciado hasta 500 m respecto al perfil profundo).

Así, sólo aquellos perfiles superficiales que cumplían con dichos criterios fueron incluidos en grupos junto a los perfiles profundos. Los grupos se codificaron de acuerdo a las iniciales de los distritos en los que fueron ejecutados y se añadió un número de orden para diferenciar entre múltiples arreglos en un mismo distrito.

En total se formaron 48 grupos localizados en 33 distritos de Lima Metropolitana (cada uno con su perfil sísmico profundo) y se recopilaron 54 perfiles superficiales (el número de perfiles superficiales varía de 0-4 por grupo). La ubicación de los perfiles recopilados y las principales características de los mismos se presentan en la Figura N° 3.1 y la Tabla N° 3.1, respectivamente.

De la data recopilada, el arreglo de microtremores de gran radio apertura ejecutado Comas (10_COM_01) permitió la exploración indirecta más elevada de velocidad de ondas de corte ($V_s > 3500m/s$). Y la profundidad máxima de exploración indirecta se tiene para el arreglo 45_BLL_03 en distrito de Bellavista ($z = 820 m$). Los perfiles sísmicos presentados en esta sección serán posteriormente analizados en detalle en el Capítulo V y Capítulo VI.

TABLA N° 3.1: Ubicación geográfica y principales características de los perfiles sísmicos recopilados.

Código	Perfil ^A	Técnica ^B	Lat (°)	Long (°)	Distrito	Año	V_{s30} ^C
01_LIM_01	PQR ^[3]	MAM	12.071319	77.033171	Lima Cercado	2012	668.9
02_ANC_01	A01 ^[2]	MAM	11.686279	77.184888	Ancón	2014	325.7
	MASW15 ^[2]	MASW	11.691344	77.184407	Ancón	2014	366.3
02_ANC_02	MASW05 ^[2]	MASW	11.773974	77.176023	Ancón	2014	407.6
	A02 ^[2]	MAM	11.775536	77.172496	Ancón	2014	425.2
02_ANC_03	A03 ^[2]	MAM	11.815953	77.125208	Ancón	2014	344.0
	MASW17 ^[2]	MASW	11.815680	77.125476	Ancón	2014	416.4
02_ANC_04	A04 ^[2]	MAM	11.733436	77.141516	Ancón	2014	382.9
	MASW03 ^[2]	MASW	11.733271	77.141109	Ancón	2014	387.5
03_ATE_01	A01 ^[2]	MAM	12.013996	76.875351	Ate	2014	550.6
	MASW 12 ^[2]	MASW	12.021963	76.875025	Ate	2014	611.7
03_ATE_02	MASW11 ^[2]	MASW	12.020373	76.884906	Ate	2014	631.4
	A02 ^[2]	MAM	12.032673	76.929410	Ate	2014	571.9
10_COM_01	MASW37 ^[7]	MASW	12.034749	76.929009	Ate	2013	722.8
	COMAS ^[5]	MAM	11.927945	77.061509	Comas	2020	323.2
13_JMA_01	MASW10 ^[6]	MASW	11.929256	77.063887	Comas	2018	465.7
	A01 ^[2]	MAM	12.077125	77.040928	Jesús María	2017	568.1
14_LMO_01	MASW 04 ^[2]	MASW	12.076516	77.044920	Jesús María	2017	719.9
	MOL ^[3]	Array	-12.077994	-76.917278	La Molina	2012	376.8
14_LMO_02	MASW09 ^[1]	MASW	-12.084036	-76.919491	La Molina	2010	394.0
	EMO ^[3]	Array	-12.082051	-76.938943	La Molina	2012	303.1
15_VCT_01	MASW01 ^[1]	MASW	-12.082241	-76.941052	La Molina	2010	304.7
	A01 ^[1]	MAM	12.087597	77.022377	La Victoria	2018	619.2
16_LIN_01	MASW01 ^[1]	MASW	12.084773	77.024498	La Victoria	2018	702.6
	A01 ^[2]	MAM	12.088977	77.043016	Lince	2014	590.6
17_LOL_01	MASW01 ^[2]	MASW	12.089520	77.043080	Lince	2014	630.5
	A01 ^[2]	MAM	11.987613	77.067983	Los Olivos	2014	371.7
17_LOL_02	MASW10 ^[2]	MASW	11.986971	77.073995	Los Olivos	2014	438.8
	A02 ^[2]	MAM	11.979068	77.068178	Los Olivos	2014	389.2
17_LOL_03	MASW09 ^[2]	MASW	11.978465	77.065921	Los Olivos	2014	390.3
	A03 ^[2]	MAM	11.994078	77.064929	Los Olivos	2014	423.1
20_MAG_01	MASW15 ^[2]	MASW	11.994190	77.065035	Los Olivos	2014	427.7
	A01 ^[2]	MAM	12.091686	77.073047	Magdalena	2017	550.4
21_PLI_01	MASW04 ^[2]	MASW	12.092298	77.073336	Magdalena	2017	631.6
	A01 ^[1]	MAM	12.076649	77.068843	Pueblo Libre	2018	567.0
23_PCH_01	MASW08 ^[1]	MASW	12.078376	77.072095	Pueblo Libre	2018	639.6
	MASW02 ^[2]	MASW	12.102515	76.878953	Pachacámac	2018	523.4
	A01 ^[2]	MAM	12.102448	76.878887	Pachacámac	2018	575.7

Continúa en la página siguiente

Código	Perfil ^A	Técnica ^B	Lat (°)	Long (°)	Distrito	Año	V _{s30} ^C
24_PUC_01	A01 ^[2]	MAM	12.478246	76.758800	Pucusana	2018	311.2
	MASW02 ^[2]	MASW	12.476908	76.756963	Pucusana	2018	417.6
24_PUC_02	MASW22 ^[2]	MASW	12.492416	76.787150	Pucusana	2018	574.0
	A02 ^[2]	MAM	12.491461	76.787325	Pucusana	2018	655.2
26_PTH_01	A01 ^[2]	MAM	12.334140	76.822344	Punta Hermosa	2016	334.7
	MASW12 ^[2]	MASW	12.334568	76.823021	Punta Hermosa	2016	490.4
27_PTN_01	A01 ^[2]	MAM	12.367133	76.794540	Punta Negra	2017	349.9
	MASW18 ^[2]	MASW	12.363750	76.793562	Punta Negra	2017	409.2
	MASW17 ^[2]	MASW	12.368929	76.793113	Punta Negra	2017	503.2
27_PTN_02	A02 ^[2]	MAM	12.349120	76.809747	Punta Negra	2017	401.7
	MASW04 ^[2]	MASW	12.349628	76.808775	Punta Negra	2017	439.8
28_RIM_01	A01 ^[2]	MAM	12.026628	77.037141	Rímac	2015	540.8
	MASW14 ^[2]	MASW	12.027162	77.037118	Rímac	2015	578.3
29_SBA_01	A01 ^[1]	MAM	12.386325	76.774105	San Bartolo	2017	381.6
	MASW06 ^[1]	MASW	12.387103	76.775569	San Bartolo	2017	386.4
	MASW16 ^[1]	MASW	12.388867	76.774207	San Bartolo	2017	394.9
	MASW03 ^[1]	MASW	12.386553	76.771536	San Bartolo	2017	398.9
	MASW04 ^[1]	MASW	12.383963	76.775860	San Bartolo	2017	490.9
29_SBA_02	A02 ^[1]	MAM	12.396266	76.776137	San Bartolo	2017	433.7
	MASW14 ^[1]	MASW	12.395936	76.776128	San Bartolo	2017	466.4
30_SBO_01	CER ^[4]	MAM	12.104000	76.999200	San Borja	2015	610.2
	MASW08 ^[2]	MASW	12.103822	76.995446	San Borja	2019	679.4
31_SIS_01	MASW07 ^[2]	MASW	12.107124	77.045343	San Isidro	2019	634.2
	A01 ^[2]	MAM	12.105319	77.044874	San Isidro	2019	636.3
32_SJL_01	MASW08 ^[3]	MASW	11.995434	77.010211	San Juan de Lurigancho	2012	352.0
	ARREGLO 1 ^[1]	MAM	11.993424	77.009080	San Juan de Lurigancho	2011	361.7
33_SJM_01	A01 ^[1]	MAM	12.190022	76.975928	San Juan de Miraflores	2015	226.1
	MASW27 ^[2]	MASW	11.975955	77.097023	San Martín de Porres	2016	370.2
35_SMP_01	A01 ^[2]	MAM	11.979040	77.085964	San Martín de Porres	2016	401.0
	MASW12 ^[2]	MASW	11.983807	77.097064	San Martín de Porres	2016	440.0
35_SMP_02	A02 ^[2]	MAM	11.952044	77.099977	San Martín de Porres	2016	455.2
	MASW06 ^[2]	MASW	11.951358	77.097557	San Martín de Porres	2016	490.0

Continúa en la página siguiente

Código	Perfil ^A	Técnica ^B	Lat (°)	Long (°)	Distrito	Año	V_{s30} ^C
36_SMI_01	A01 ^[1]	MAM	12.081612	77.106783	San Miguel	2015	316.6
	MASW01 ^[1]	MASW	12.081686	77.105782	San Miguel	2015	340.7
37_STA_01	MASW09 ^[1]	MASW	12.046910	76.978719	Santa Anita	2016	378.2
	A01 ^[1]	MAM	12.041207	76.983318	Santa Anita	2016	513.9
38_SMA_01	A02 ^[2]	MAM	12.401757	76.776644	Santa María del Mar	2017	563.2
	MASW09 ^[2]	MASW	12.401526	76.776552	Santa María del Mar	2017	598.4
39_SAR_01	MASW05 ^[1]	MASW	11.793675	77.174961	Santa Rosa	2015	350.2
	A01 ^[1]	MAM	11.800226	77.174496	Santa Rosa	2015	372.6
40_SDS_01	MASW19 ^[1]	MASW	12.153739	77.007229	Surco	2016	374.2
	A01 ^[1]	MAM	12.147465	77.009736	Surco	2016	390.8
	MASWR26 ^[1]	MASW	12.142064	77.010024	Surco	2016	449.4
	MASWR25 ^[1]	MASW	12.142250	77.009842	Surco	2016	476.1
40_SDS_02	MASW18 ^[1]	MASW	12.159204	76.985447	Surco	2016	364.8
	A02 ^[1]	MAM	12.164377	76.991090	Surco	2016	483.6
41_SRQ_01	A01 ^[1]	MAM	12.104634	77.024122	Surquillo	2017	400.0
	MASW06 ^[1]	MASW	12.104695	77.024290	Surquillo	2017	582.5
42_VES_01	MASW01 ^[1]	MASW	12.210150	76.933976	Villa el Salvador	2010	426.6
	MASW02 ^[1]	MASW	12.215617	76.932789	Villa el Salvador	2010	433.3
	VSV ^[3]	MAM	12.213421	76.938803	Villa el Salvador	2012	453.9
44_CLL_01	CAL ^[3]	MAM	12.064413	77.155016	El Callao	2012	275.1
45_BLL_01	MASW05 ^[1]	MASW	12.067463	77.133476	Bellavista	2017	371.9
	A01 ^[1]	MAM	12.063961	77.130715	Bellavista	2017	410.9
45_BLL_02	UNMSM ^[5]	MAM	12.055005	77.085280	Bellavista	2020	597.2
	MASW14 ^[7]	MASW	12.055705	77.081677	Bellavista	2013	657.5
45_BLL_03	MASW01 ^[7]	MASW	12.060009	77.123523	Bellavista	2013	334.7
	CMA ^[3]	MAM	12.060734	77.123570	Bellavista	2012	386.9
47_PER_01	LPRADO ^[5]	MAM	12.073508	77.118740	La Perla	2020	309.3
	MASW05 ^[1]	MASW	12.074958	77.118139	La Perla	2016	340.0
47_PER_02	A02 ^[1]	MAM	12.070138	77.131251	La Perla	2016	342.5
	MASW02 ^[1]	MASW	12.070402	77.127115	La Perla	2016	397.8
49_VNT_01	A06 ^[1]	MAM	11.832035	77.121186	Ventanilla	2012	435.6
	MASW02 ^[1]	MASW	11.832115	77.117156	Ventanilla	2016	460.5

^A Nombre de los ensayos geofísicos recopilados de las siguientes fuentes: entregables de proyectos financiados por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) a través de sus programas: [1] 'Mis Ciudades' y [2] 'Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres, PP068', [3] Calderón et al. (2011), [4] Quispe et al. (2014), [5] Gonzales et al. (2020), Estudio de Mecánica de Suelos para el [6] Mall de Collique y [7] Línea 2 y 4 del tren eléctrico.

^B Técnica empleada para la estimación del perfil sísmico: Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanales [MAM] y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales [MASW].

^C Velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad en m/s

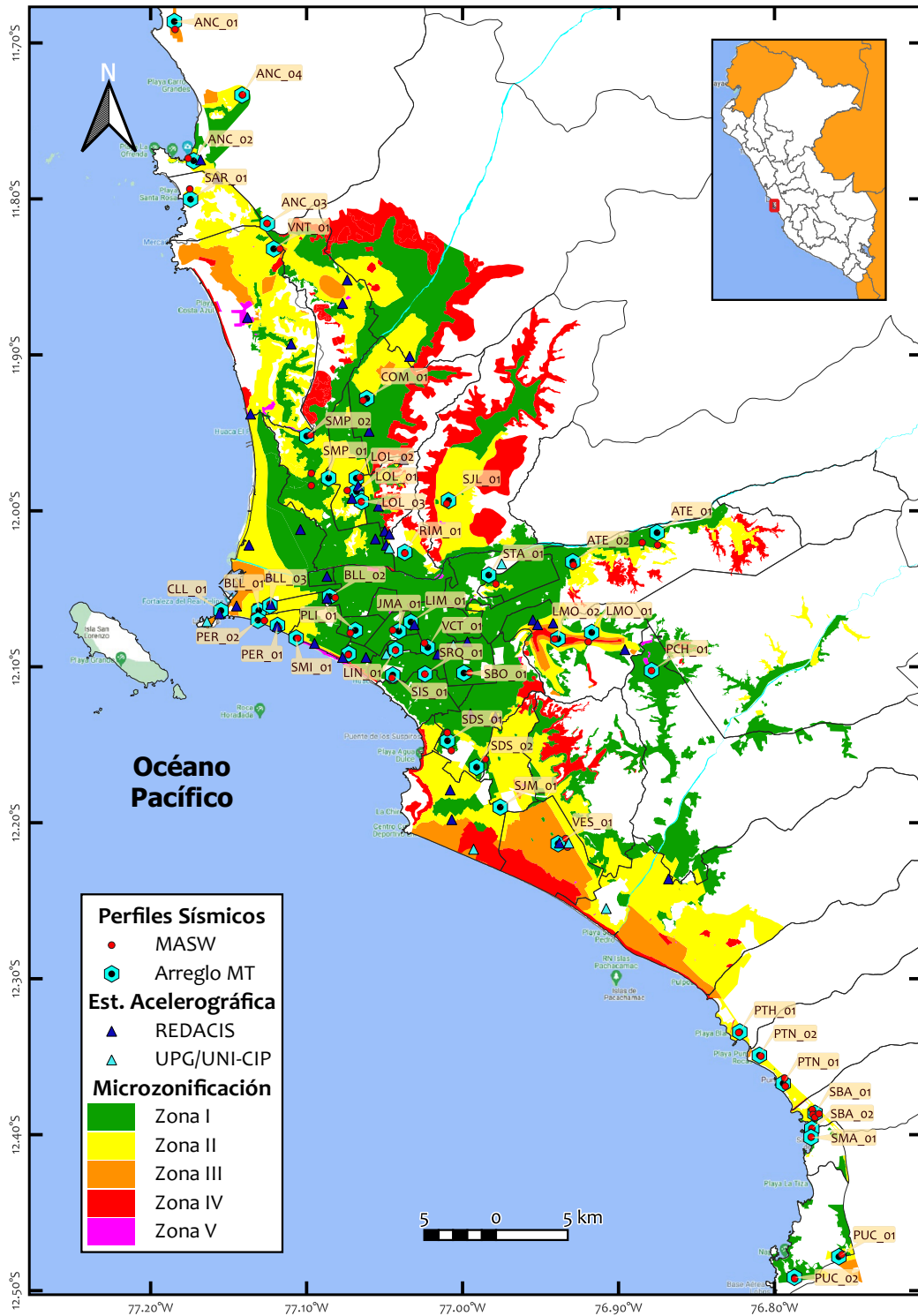


FIGURA N° 3.1: Ubicación geográfica de los perfiles sísmicos recopilados. Se presentan perfiles profundos de arreglo de microtemores (hexágonos) y perfiles superficiales de MASW (círculos rojos), también se muestra la ubicación de las estaciones acelerográficas usadas en la presente tesis (triángulos) dentro del mapa de microzonificación sísmica de Lima Metropolitana.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE REGISTROS SÍSMICOS DE ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS EN LIMA METROPOLITANA

Desde hace algunos años, instituciones tanto públicas como privadas han adquirido y administran estaciones sísmicas acelerográficas instaladas en Lima Metropolitana. El Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería cuenta con la Red Acelerográfica del CISMID (REDACIS) y la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, en convenio con el Colegio de Ingenieros del Perú, administran una serie de equipos a nivel nacional (red UPG/UNI-CIP). Asimismo, el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO) cuenta también con estaciones acelerográficas en sus gerencias zonales, las cuales son administradas por las instituciones antes mencionadas. El Instituto Geofísico del Perú hace lo propio a través de Centro Sismológico Nacional (CENSIS).

En el presente capítulo se identifican los T_d de las estaciones acelerográficas administradas por la REDACIS y la red UPG/UNI-CIP aprovechando el considerable número de instrumentación sísmica disponible (51 estaciones), para ello se utiliza la metodología de ratios horizontal-vertical de espectros de respuesta (H/V) de registros sísmicos acelerográficos acontecidos entre los años 2011 y 2021.

4.1 INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

4.1.1 REDACIS

Red acelerográfica administrada por el CISMID. Sus primeros instrumentos fueron acelerógrafos analógicos RION, modelo SM-10 B de procedencia japonesa; estos equipos registraban 100 muestras de aceleración por segundo e iniciaban el registro cuando el movimiento del suelo excedía el valor de 5 cm/s^2 de aceleración en la componente vertical. Los registros analógicos obtenidos eran luego procesados con un convertidor analógico digital.

A partir del año 2001 se fueron reemplazando estos instrumentos por estaciones acelerográficas digitales Kinometrics modelo ETNA, que tienen una frecuencia de muestreo de 200 Hz; y el umbral puede ser programado como un porcentaje de la máxima amplitud de registro (actualmente, los equipos tienen como umbral 2 cm/s^2). En 2011, y en el marco del proyecto de Asociación para la Investigación Científica y Tecnológica para un Desarrollo Sostenible (SATREPS por sus siglas en inglés, Yamazaki et al. (2014)) se instalaron sensores CV-374A2 Tokyo Sokushin.

Desde el 2017, también se instalaron sensores REFTEK 130-SMA, que actualmente representan el mayor número de los equipos operativos de la red. Las principales

características de estos equipos es que son de 24 bits de resolución, 3 canales, registro de 200 muestras por segundo, 16 GB de memoria, cuentan además con una batería interna de 48 horas de duración. finalmente, los registros son grabados directamente a una memoria interna a la cual se accede mediante internet, el equipo además cuenta con una antena GPS que le permite actualizar en forma permanente los datos de la fecha, hora y coordenadas geográficas del lugar donde se encuentra instalado.

REDACIS tiene estaciones sísmicas acelerográficas instaladas en instituciones tales como colegios, centros de salud, municipios, estaciones de bomberos y universidades. Cuenta en la actualidad con 36 estaciones en Lima Metropolitana, y 11 estaciones monitoreadas en convenio con el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO) en las principales ciudades del Perú (3 de ellas en Lima Metropolitana de la arquitectura Basalt Kinematics y Sigma-TS4G-ACC Gaiacode). Para el presente estudio se identificaron 42 estaciones entre operativas y otras históricas, cuya información fue recuperada de la base de datos del CISMID. La ubicación geográfica y las principales características de las estaciones acelerográficas utilizadas en esta tesis se presentan en la Figura N° 4.1 y la Tabla N° 4.1, respectivamente.

4.1.2 RED UPG/UNI-CIP

La red UPG/UNI-CIP está conformada por diversas instituciones que comparten alianzas estratégicas y cooperaciones. Por un lado, la red acelerográfica sísmica de la Unidad de Posgrado FIC-UNI la cual fue implementada desde el año 2013. Un año más tarde, se creó la Red Acelerográfica del Colegio de Ingenieros del Perú, Consejo Nacional. Para el año 2017 ambas instituciones se unirían mediante el Convenio Marco y Específico de Cooperación Interinstitucional entre la Universidad Nacional de Ingeniería y el Colegio de Ingenieros del Perú Consejo Nacional. Este convenio permitió una colaboración mutua para facilitar el uso de las estaciones acelerográficas y fortalecer la red en general.

En el año 2020 se firmó el Convenio Marco y Específico de Cooperación Interinstitucional entre la Universidad Nacional de Ingeniería y el SENCICO. Este convenio permite la cooperación recíproca facilitando el uso de las estaciones acelerográficas pertenecientes al SENCICO. De esta forma, estas estaciones actualmente son administradas por la REDACIS y la red UPG/UNI-CIP.

La red UPG/UNI-CIP cuenta actualmente con 34 registradores acelerométricos instalados a nivel nacional en diversas universidades e instituciones. Estos equipos envían la información de los registros sísmicos digitalizados a un servidor de la UNI. Son de la marca TRIMBLE REFTEK modelo 130-SMA y 130-SMHR de 24 bits de resolución, 3 canales, capacidad para registrar 200 muestras por segundo, 16 GB

de memoria y una sensibilidad que va desde 0.0001 g hasta 4 g, estos equipos cuentan además con una batería interna de 48 horas de duración.

En Lima Metropolitana se identificaron 9 estaciones acelerográficas pertenecientes a esta red, algunas de ellas operativas y otras con registros de eventos pasados recuperables. El detalle de las estaciones analizadas y su ubicación geográfica se presentan en la Tabla N° 4.1 y la Figura N° 4.1, respectivamente.

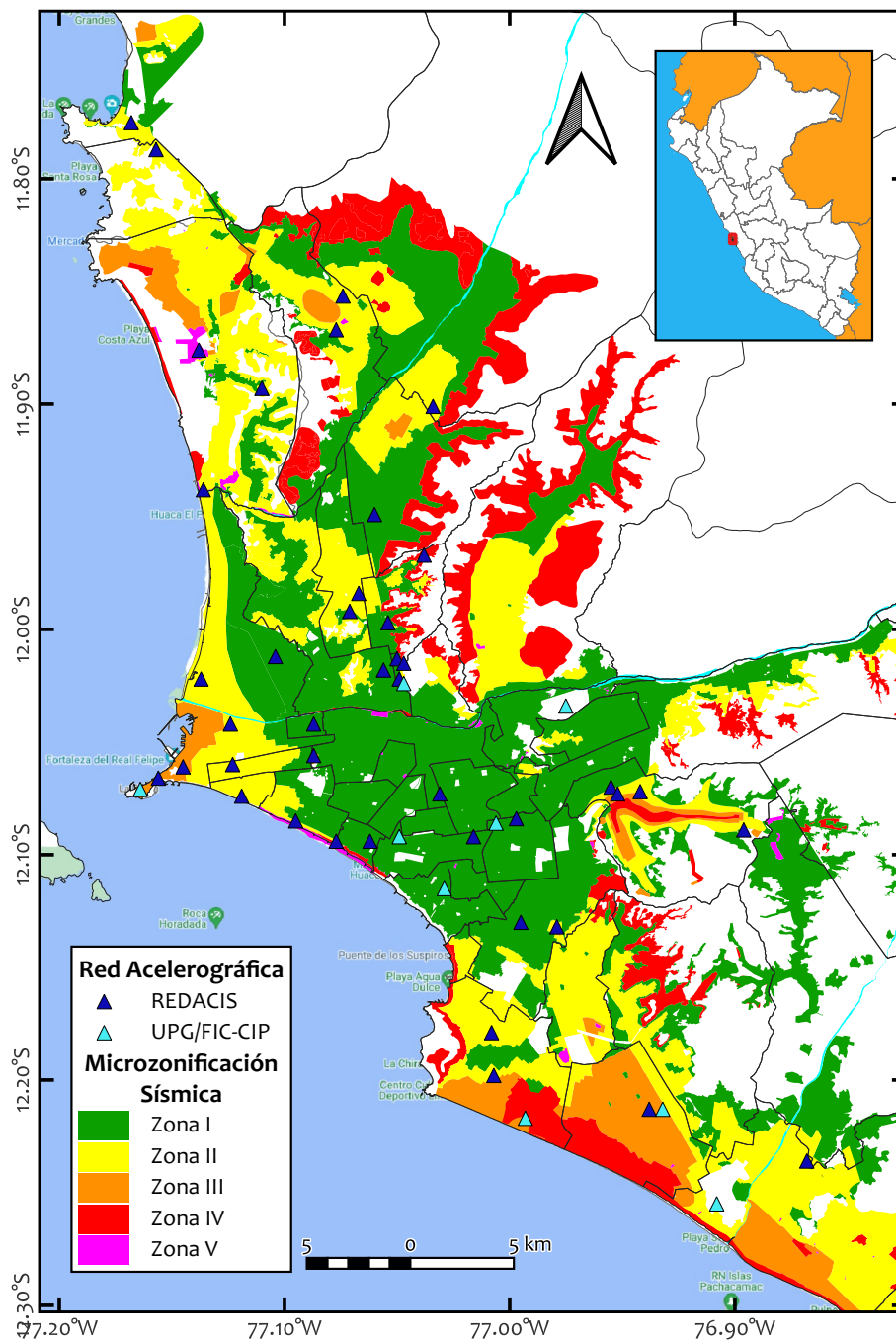


FIGURA N° 4.1: Ubicación geográfica de las estaciones acelerográficas consideradas en el estudio (triángulos) dentro del mapa de microzonificación sísmica de Lima Metropolitana.

TABLA N° 4.1: Ubicación geográfica y principales características de las estaciones acelerográficas del estudio.

Código	Nombre	Coordenadas			Sensor†	Ubicación	Distrito	Zona
		Lat (°)	Lon (°)	Z				
CAL001 ^R	DHN	-12.0657	-77.1557	19	E, R1	Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú	Callao	3
CAL002 ^R	NISTA	-12.0597	-77.1230	26	TK, R1	Colegio San Antonio Marianistas	Bellavista	2
CAL003 ^R	DSMI	-12.0608	-77.1449	8	R1	Dirección de Sanidad Marítima Internacional	Callao	3
CAL004 ^R	RAMON	-12.0416	-77.1235	28	R1	Institución Educativa Técnica Mariscal Ramón Castilla Marquesado	Callao	2
CAL005 ^R	ACAPU	-12.0221	-77.1368	20	R1	Centro de Salud Acapulco	Callao	2
CAL006 ^R	VHAYA	-11.9383	-77.1360	17	R1	Institución Educativa 5130-3 Víctor Raúl Haya de la Torre	Ventanilla	2
CAL007 ^R	ESTAL	-12.0118	-77.1042	45	R1	Escuela de Talentos	Callao	1
CAL008 ^R	AMORE	-11.8933	-77.1103	218	R1	Institución Educativa 5090 Antonia Moreno de Cáceres	Ventanilla	1
CAL010 ^R	BONDY	-12.0423	-77.0869	73	R1	Institución Educativa Augusto Salazar Bondy	Carmen de la Legua	1
CAL011 ^R	PRADO	-12.0744	-77.1190	35	R1	Colegio Militar Leoncio Prado	La Perla	2
CAL012 ^R	DEFEN	-11.8763	-77.1381	12	R1	Centro de Salud Defensores de la Patria	Ventanilla	5
LIM001 ^R	JALVA	-12.0133	-77.0502	110	TK, R1	CISMID-FIC-UNI	Rímac	1
LIM002 ^R	FIC	-12.0223	-77.0490	132	TK, R1	Decanato de la FIC-UNI	Rímac	1
LIM004 ^R	PIQUE	-12.0890	-76.8960	145	E	Casa del Dr. Javier Pique	La Molina	1
LIM005 ^R	RESER	-12.0730	-77.0310	130	TK	Parque de la Reserva	Cercado de Lima	1
LIM006 ^R	PIEDRA	-11.8520	-77.0740	194	TK	Casa privada en Puente Piedra	Puente Piedra	2
LIM007 ^R	VES	-12.2130	-76.9380	167	TK	Estación de Bomberos N° 105	Villa El Salvador	3
LIM008 ^R	SMP	-12.0180	-77.0560	102	TK	Estación de Bomberos N° 65	San Martín de Porres	1
LIM009 ^S	BORJA	-12.0856	-77.0064	177	B, DC, RF	Gerencia Zonal de SENCICO	San Borja	1
LIM010 ^R	MARTI	-12.0719	-76.9415	285	R1	Facultad de Ingeniería y Arquitectura - USMP	La Molina	2

Continúa en la página siguiente

Código	Nombre	Coordenadas			Sensor [†]	Ubicación	Distrito	Zona
		Lat (°)	Lon (°)	Z				
LIM011 ^{U,R}	CIPCN	-12.1152	-77.0291	111	R1	Colegio de Ingenieros del Perú, Consejo Nacional	Miraflores	1
LIM012 ^R	UNFV	-12.0943	-77.0767	82	R1	Facultad de Ingeniería Civil, UNFV	Magdalena del Mar	2
LIM013 ^R	SANM	-12.0560	-77.0872	270	R1	Escuela de Ingeniería Civil, UNMSM	Cercado de Lima	3
LIM014 ^R	CENEP	-12.0916	-77.0160	148	R1	CENEPRED	San Isidro	1
LIM015 ^R	INICT	-12.0839	-76.9968	178	R1	INICTEL-UNI	San Borja	1
LIM016 ^R	IMCA	-12.0695	-76.9548	256	R1	Instituto de Matemática y Ciencias Afines (IMCA)	La Molina	1
LIM017 ^R	URP	-12.1316	-76.9791	135	R1	Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Ricardo Palma	Santiago de Surco	3
LIM018 ^R	OLIVO	-11.9918	-77.0706	56	R1	Municipalidad Distrital de los Olivos	Los Olivos	2
LIM019 ^R	COMAS	-11.9485	-77.0598	119	R1	Centro Civico de la Municipalidad Distrital de Comas	Comas	1
LIM020 ^R	SROSA	-11.7872	-77.1570	53	R1	Municipalidad de Santa Rosa	Santa Rosa	2
LIM021 ^R	CARAB	-11.9011	-77.0343	190	R1	Estadio Ricardo Palma, Municipalidad Distrital de Carabaylo	Carabaylo	2
LIM022 ^R	MDPP	-11.8669	-77.0768	204	R1	Municipalidad Distrital de Puente Piedra	Puente Piedra	2
LIM023 ^R	ANCON	-11.7745	-77.1681	28	R1	Estadio José Balta, Municipalidad de Ancón	Ancón	2
LIM024 ^R	INDEP	-11.9968	-77.0544	88	R1	Municipalidad Distrital de Independencia	Independencia	1
LIM025 ^R	CEPRE	-12.0935	-77.0616	118	R1	El Centro de Estudios Pre-Universitario de la UNI CEPRE-UNI	Magdalena del Mar	1
LIM026 ^R	SERVI	-12.1302	-76.9951	124	R1	Universidad Nacional de Ingeniería SERVI-UNI	Santiago de Surco	1
LIM027 ^R	UPCVI	-12.1979	-77.0072	26	R1	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) - Campus Villa	Chorrillos	2
LIM028 ^R	USILM	-12.0728	-76.9518	264	R1	Universidad San Ignacio de Loyola (USIL) - Campus La Molina	La Molina	2
LIM029 ^R	UPCSM	-12.0854	-77.0952	57	R1	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) - Campus San Miguel	San Miguel	2
LIM030 ^R	USILP	-12.2357	-76.8675	68	R1	Universidad San Ignacio de Loyola (USIL) - Campus Pachacámac	Pachacámac	2

Continúa en la página siguiente

Código	Nombre	Coordenadas			Sensor [†]	Ubicación	Distrito	Zona
		Lat (°)	Lon (°)	Z				
LIM031 ^R	OLAYA	-11.9668	-77.0383	252	R1	Centro Deportivo Olaya	Independencia	2
LIM032 ^S	SCOLIVO	-11.9836	-77.0668	61	G	Centro de Formación SENCICO, Los Olivos	Los Olivos	2
LIM033 ^S	SCHORR	-12.1793	-77.0084	34	G	Centro de Formación SENCICO, Chorrillos	Chorrillos	2
LIM-SLP ^R	LIM-SLP	-12.0150	-77.0470	134	TK	Cerro UNI	Rimac	-
D91A ^U	UNI	-12.0240	-77.0470	107	R2	Universidad Nacional de Ingeniería - FIQT	Rimac	2
D95E ^U	BRCHO	-12.2170	-76.9930	48	R2	BRISAS DE VILLA	Chorrillos	3
D855 ^U	PUNTA	-12.0710	-77.1640	18	R1	Facultad de Teología Redemptoris Mater	La Punta	3
D914 ^U	UNTELS	-12.2130	-76.9320	201	R2	Universidad Nacional Tecnológica De Lima Sur	Villa el Salvador	3
D925 ^U	ATARJEA	-12.0340	-76.9750	277	R2	SEDAPAL - LA ATARJEA	El Agustino	-
9E7E ^U	CIPLIM	-12.0920	-77.0490	98	RF	Colegio de Ingenieros del Perú Lima	San Isidro	1
D958 ^U	LURIN	-12.2550	-76.9080	34	R1	Pachacámac	Lurin	-

[†] Modelos de sensores, RF:Reftek; R1: 130-SMA REFTEK; R2:130-SMHR REFTEK; TK :CV-374A2 Tokyo Sokushin; E:Etna Kinematics; B:Basalt Kinematics; DC:Episensor.DC-200.5VDF.4G; G :GaiaCode Sigma-TS4G-ACC

^R Estación perteneciente a REDACIS.

^S Estación perteneciente a SENCICO y operada por REDACIS.

^U Estación perteneciente a UPG/UNI-CIP.

4.2 BASE DE DATOS

Con el objetivo de identificar los T_d de las estaciones acelerográficas, se copiaron todos los eventos sísmicos disponibles registrados en las redes REDACIS y UPG/UNI-CIP desde el año 2011 hasta el 2021, para lo cual se accedió a las páginas web de dichas instituciones (CEOIS, Red acelerográfica UPG/UNI-CIP). Es importante mencionar que, debido a su importancia histórica, también se incluyeron los registros del sismo de Pisco 2007 (M_W 7.9) en la base de datos. La Figura N° 4.2 y la Figura N° 4.1 muestran la distribución geográfica de los epicentros de los terremotos y las estaciones acelerográficas utilizadas en la presente tesis, respectivamente. Mientras que las coordenadas y datos de las estaciones se brindan en la Tabla N° 4.1.

TABLA N° 4.2: Resumen de las redes acelerográficas y bases de datos utilizadas en el estudio.

	Red Acelerográfica	
	REDACIS	UPG/UNI-CIP
No. De eventos	219	132
No. De registros	1695	380
No. De estaciones	42	9
Fecha de registros ^a	Ene 2011 - Nov 2021	Nov 2016 - Nov 2021
Sensores	130-SMA REFTEK, ETNA Kinematics, CV-374A2 Tokyo Sokushin, Basalt Kinematics ^c , Sigma-TS4G-ACC Gaiacode ^c	130-SMA REFTEK, 130-SMHR REFTEK, Basalt Kinematics ^c
Frecuencia muestreo (Hz)	200	200
Institución administradora	Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres	Unidad de Posgrado de la FIC-UNI y el Colegio de Ingenieros del Perú
Rango de Magnitud (M_W)	3.5 - 8.0	3.5 – 8.0
Rango de D_{epi} (km) ^b	3 - 1093	4-1087
Rango de Profundidades	11-175	12 - 141

^a Incluye los registros del sismo de Pisco de 2007 (M_W 7.9).

^b Distancias respecto a cada estación acelerográfica.

^c Equipos administrados en acuerdo institucional con SENCICO.

Se identificaron en total 51 estaciones, para las cuales se procesaron y analizaron 2075 registros de 292 eventos sísmicos en total. La lista completa de eventos sísmicos se presenta en el Anexo B. Sólo se utilizaron registros con una magnitud momento (M_W) superior a 3.5, variando el número de eventos de cada estación entre 3 a 134 (Ver Figura N° 4.3d). La Figura N° 4.3 muestra la distribución magnitud-profundidad, magnitud-distancia epicentral (D_{epi}) y aceleración máxima del suelo

(*PGA*) versus magnitud de los eventos de la base de datos, además se muestra el histograma del número de registros disponibles por estaciones.

Los archivos recopilados son registros de sismos de magnitudes entre $3.5 \leq M_W \leq 8.0$, con distancias regionales ($3 \text{ km} \leq D_{epi} \leq 1000 \text{ km}$). El evento con mayor magnitud de este grupo es el terremoto de Lagunas 2019 M_W 8.0, un evento de campo lejano con un valor de D_{epi} de unos 727 km. Sin embargo, el *PGA* máximo (230 gal) se registró para el sismo de Mala 2021 M_W 6.0, con una profundidad focal de 32 km y localizado a 85 km del centro de Lima Metropolitana. Finalmente, en la Tabla N° 4.2 se presenta un resumen de los datos utilizados en este estudio.

4.3 IDENTIFICACIÓN DEL PERÍODO DOMINANTE T_d

Se aplicó la metodología introducida en Hassani y Atkinson (2016). En resumen, para cierto registro sísmico de determinada estación acelerográfica, se calculó el espectro de respuesta de pseudo-aceleración (*PSA*, 5% de amortiguamiento) para cada componente utilizando el método de integración directa de Newmark a lo largo de 501 períodos estructurales entre el ancho de banda de 0.05 y 5.0 s. Todos los cálculos y expresiones se computaron en unidades logarítmicas \log_{10} . El ratio espectral de respuesta horizontal-vertical (H/V) para dicho registro sísmico se obtuvo dividiendo la media geométrica de los espectros horizontales entre el *PSA* la componente vertical, como sigue:

$$\log_{10}(H/V)_{i,j} = \frac{1}{2} \left[\log_{10}(H_1)_{i,j} + \log_{10}(H_2)_{i,j} \right] - \log_{10}(V)_{i,j} \quad (4.1)$$

donde $(H_1)_{i,j}$ y $(H_2)_{i,j}$ son los *PSA* de las componentes este-oeste y norte-sur, respectivamente, y $(V)_{i,j}$ es la correspondiente *PSA* de la componente vertical del evento sísmico i registrado en la estación j . Para los siguientes pasos, sólo se consideraron las estaciones acelerográficas con al menos 3 registros.

El espectro promedio H/V para la estación j se calcula luego como la media geométrica de los ratios obtenidos de la Ecuación 4.1 y es evaluada entre los valores de períodos de 0.05 s y 5 s, dado que la mayor parte de las estructuras poseen períodos naturales de vibración entre dichos valores. Su expresión es:

$$\log_{10}(\overline{H/V})_{j,T} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{j,T}} \log_{10} H/V_{i,j}}{n_{j,T}} \quad (4.2)$$

en esta última ecuación, $\overline{H/V}_{j,T}$ es el promedio de ratios espectrales de respuesta H/V_i de la estación j evaluado en el período estructural T y $n_{j,T}$ es el número de eventos registrados en la estación j para el período T . Luego de esto, se define el

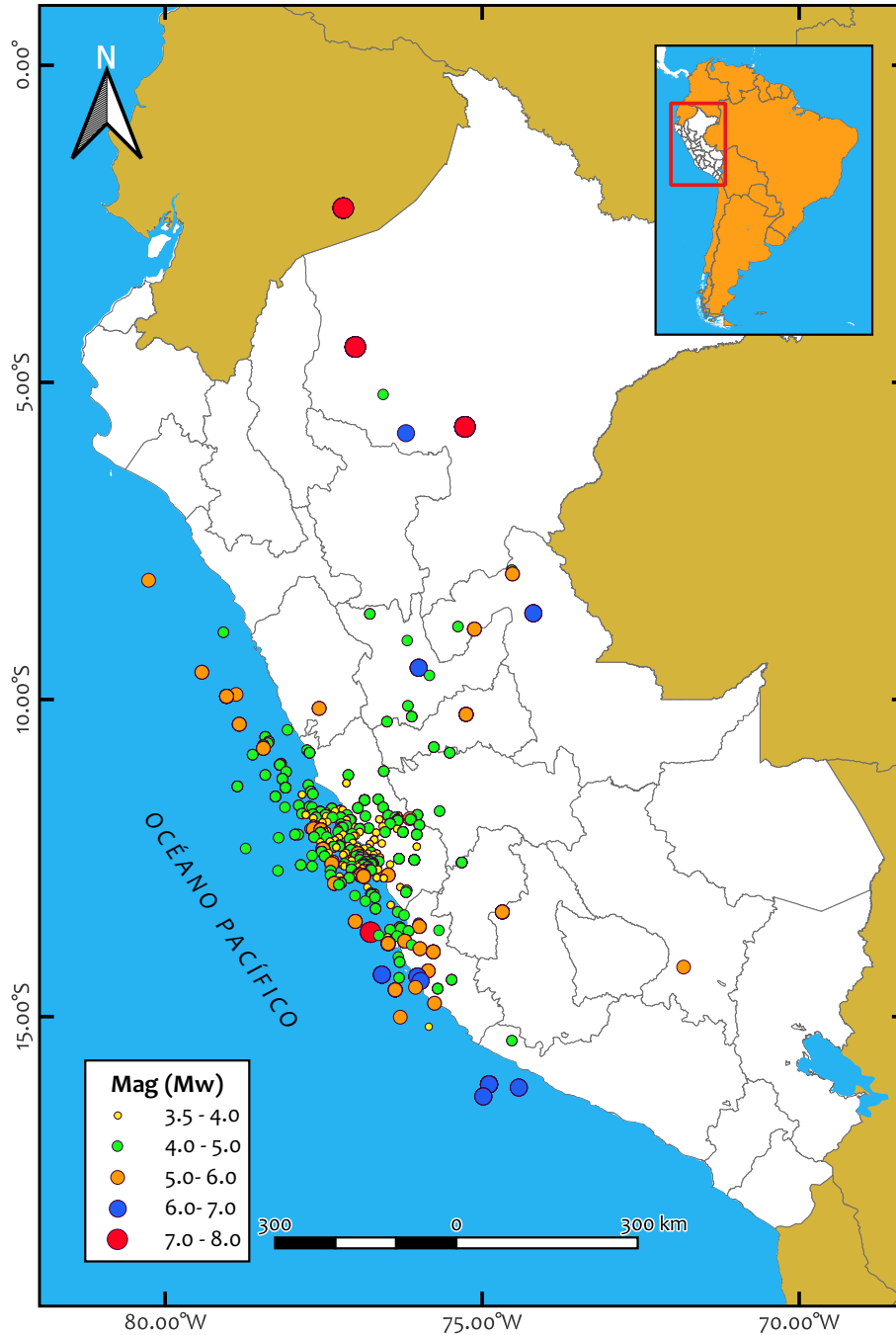


FIGURA N° 4.2: Ubicación geográfica de los epicentros sísmicos (círculos) considerados en el estudio.

promedio del espectro H/V a lo largo del ancho de banda de interés como:

$$\log_{10} \overline{\overline{H/V}}_j = \frac{\sum_{T_1}^{T_2} \log_{10} (\overline{H/V})_{j,T}}{n_j} \quad (4.3)$$

en donde $\overline{\overline{H/V}}_j$ es el promedio de $\overline{H/V}_{j,T}$ de la estación j sobre el ancho de banda

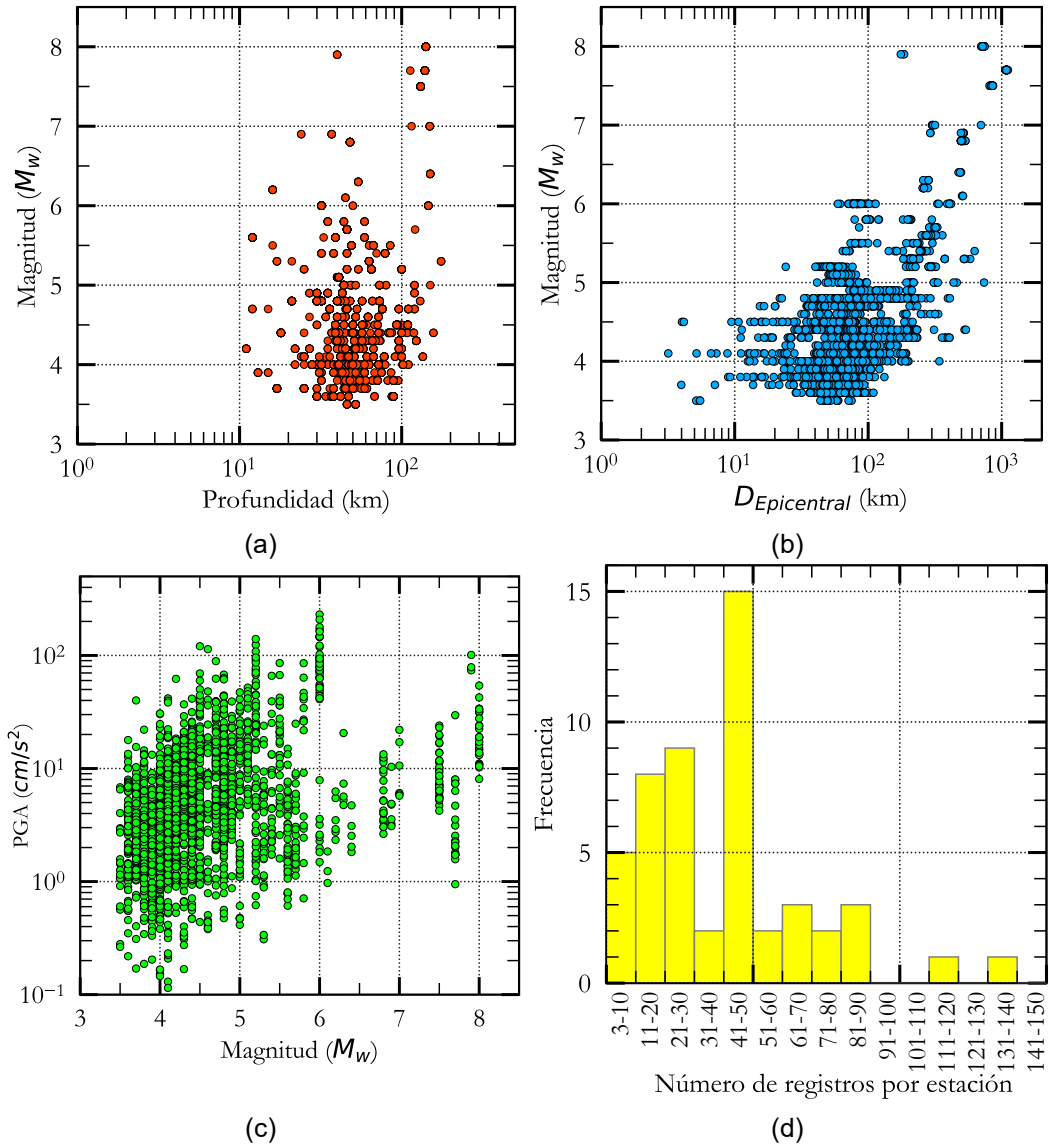


FIGURA N° 4.3: Caracterización de los registros sísmicos de la base de datos. Se presenta la distribución de (a) magnitud-profundidad, (b) magnitud-distancia epicentral, (c) aceleración máxima del suelo (PGA) versus magnitud e (d) histograma del número de registros por estación.

cuyos límites son T_1 y T_2 (0.05 s y 5 s respectivamente); y n_j es el número de períodos estructurales que discretizan el ancho de banda para el cómputo de los PSA .

Con el valor promedio de $\overline{H/V_j}$ podríamos identificar los máximos locales y reportarlos como los T_d , sin embargo, Hassani y Atkinson indican que estos períodos podrían ser no significativos, ya que en muchos casos no están claramente definidos, o bien son máximos locales cercanos el uno del otro sin un valle entre ellos, y en otros casos no tienen amplificaciones mayores al $\overline{H/V_j}$ (Ecuación 4.3). En efecto, la metodología sugiere definir un umbral (*threshold*), para lo cual se inicia identificando los máximos locales (T_{peak}) con amplificaciones mayores a: $\overline{H/V_j}$ y

$> 0.3 \log_{10}$ (lo cual es una amplificación mínima de 2 en unidades no-logarítmicas). Para cada uno de estos puntos se estiman las diferencias entre la amplitud del máximo local y el $\overline{H/V_j}$ correspondiente (ver Figura N° 4.4a). En la Figura N° 4.4b se presentan estas diferencias para los dos primeros máximos locales (es decir, aquellos con los mayores valores de $A_{peak} - \overline{H/V_j}$) como función de su correspondiente T_{peak} para las 51 estaciones acelerográficas analizadas. De acuerdo a la Figura N° 4.4b y Figura N° 4.4c, el valor promedio de las diferencias tiende a un valor de $\sim 0.18 \log_{10}$. A continuación, sólo se consideran aquellos máximos locales con amplificaciones mayores que: $\overline{H/V_j} + 0.18$ y $> 0.3 \log_{10}$ como períodos que podrían representar picos significativos en la respuesta del sitio, tal como se muestra en la Ecuación 4.4.

$$Umbral = \begin{cases} 0.3 \log_{10} \text{ unidades} \\ \overline{H/V_j} + 0.18 \end{cases} \quad (4.4)$$

Continuando con la metodología, se ejecuta el ajuste de una función Gaussiana sobre una vecindad de los T_{peak} , de esta forma, se suaviza más el espectro $\overline{H/V}$ en estaciones que poseen pocos registros acelerográficos. La función Gaussiana es definida como:

$$Y = a \cdot e^{-\frac{X}{w^2}} + c$$

$$X = \log_{10} \left(\frac{T}{T_{peak}} \right) \quad (4.5)$$

donde a , w y c son los coeficientes de la función Gaussiana; T_{peak} representa el pico significativo y los valores de T son los períodos estructurales pertenecientes a la vecindad (*neighborhood*) sobre la que se realiza el ajuste, que, a su vez, está definida como aquellos períodos cercanos al T_{peak} y cuya amplificación sea mayor a $\overline{H/V_j}$. Para el ajuste Gaussiano se empleó una regresión no lineal de mínimos cuadrados, habitualmente utilizada en la optimización de funciones de varias variables, presente en lenguajes de programación interpretados como Python en la librería SciPy (Virtanen et al., 2020).

Finalmente, usando la función Gaussiana ajustada se estima el período en cual dicha curva alcanza su máximo valor de amplificación, este período es reportado como el período dominante de vibración del suelo (T_d). Los elementos descritos para la identificación de T_d en los párrafos anteriores son presentados en la Figura N° 4.5.

Para evaluar la sensibilidad de los valores T_d , el análisis se realizó no sólo para toda la base de datos, sino también para cuatro sub-conjuntos de bases de datos,

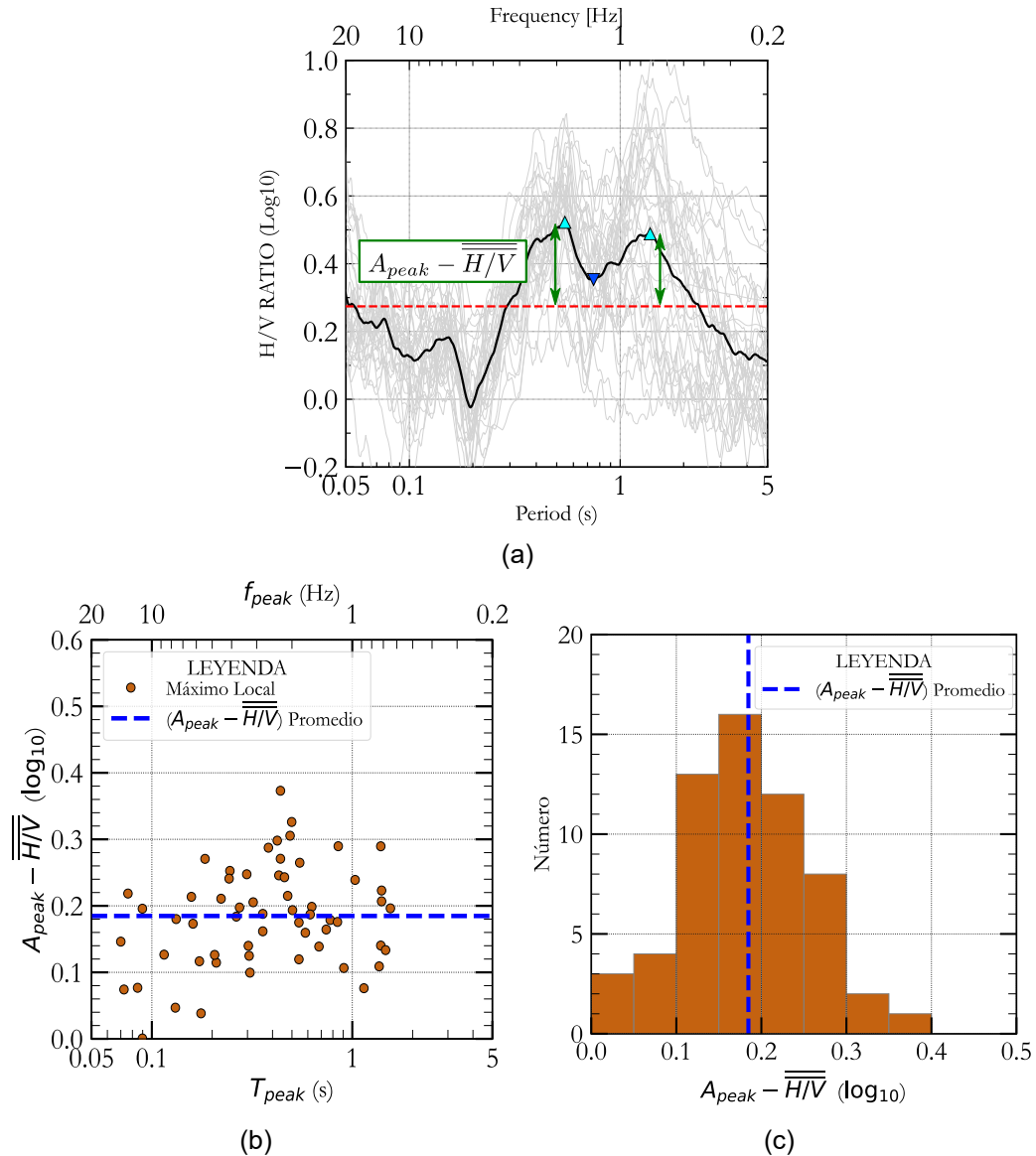


FIGURA N° 4.4: Definición del umbral para identificar los T_d . En la gráfica (a) cada flecha representa el valor de la diferencia entre amplificación del máximo local (T_{peak}) y el promedio de ancho de banda $\overline{H/V}$ para una estación en particular; (b) distribución de las diferencias de los dos primeros máximos locales con mayor valor de amplificación ($A_{peak} - \overline{H/V}$) como función de su T_{peak} correspondiente para todas las estaciones analizadas; (c) histograma de $A_{peak} - \overline{H/V}$; el promedio de $A_{peak} - \overline{H/V}$ es la línea discontinua azul en (b) y (c).

y para cada uno de ellos se aplicó la metodología descrita anteriormente. Para esto, se agruparon los registros sísmicos según diferentes criterios de selección, como M_W , D_{epi} y PGA , descritos en la Tabla N° 4.3. El número de eventos por criterio y por estación se muestra en la Tabla N° 4.4.

TABLA N° 4.3: Criterios usados para la definición de grupos de la base de datos.

GRUPO	Etiqueta	No. eventos	No. Registros
Magnitud mayor que 3.5 M_W	$M_W \geq 3.5$	292	2075
Magnitud mayor que 5.0 M_W	$M_W \geq 5.0$	55	518
Distancia epicentral mayor que 100 km	$D_{epi} \geq 100 \text{ km}$	137	727
Algún PGA horizontal mayor que 5 cm/s^2	$PGA \geq 5 \text{ gal}$	153	938
Algún PGA horizontal mayor que 10 cm/s^2	$PGA \geq 10 \text{ gal}$	100	517

TABLA N° 4.4: Número de registros sísmicos por estación y por criterio.

Código	Nombre	No. De registros disponibles				
		$M_W \geq 3.5$	$M_W \geq 5.0$	$D_{epi} \geq 100 \text{ km}$	$PGA \geq 5 \text{ gal}$	$PGA \geq 10 \text{ gal}$
CAL001	DHN	47	13	15	27	14
CAL002	NISTA	84	25	31	18	7
CAL003	DSMI	19	9	8	5	3
CAL004	RAMON	24	9	8	8	4
CAL005	ACAPU	29	11	10	8	6
CAL006	VHAYA	27	10	10	10	7
CAL007	ESTAL	16	4	4	7	2
CAL008	AMORE	24	9	9	21	14
CAL010	BONDY	20	8	7	5	2
CAL011	PRADO	13	5	3	9	4
CAL012	DEFEN	21	7	8	14	7
LIM001	JALVA	115	30	46	66	39
LIM002	FIC	136	27	52	44	17
LIM004	PIQUE	4	3	2	4	4
LIM005	RESER	68	16	25	18	8
LIM006	PIEDRA	74	12	36	21	11
LIM007	VES	89	11	32	44	24
LIM008	SMP	77	14	32	24	9
LIM009	BORJA	48	15	15	14	6
LIM010	MARTI	54	15	17	50	32
LIM011	CIPCN	81	15	25	15	9
LIM012	UNFV	45	12	14	11	6
LIM013	SANM	12	5	3	3	1
LIM014	CENEP	63	13	18	17	6
LIM015	INICT	49	12	16	38	22

Continúa en la página siguiente

Código	Nombre	No. De registros disponibles				
		$M_W \geq 3.5$	$M_W \geq 5.0$	$D_{epi} \geq 100 \text{ km}$	$PGA \geq 5 \text{ gal}$	$PGA \geq 10 \text{ gal}$
LIM016	IMCA	48	9	12	20	6
LIM017	URP	45	12	13	23	10
LIM018	OLIVO	49	13	14	36	22
LIM019	COMAS	42	12	12	20	9
LIM020	SROSA	40	9	17	35	23
LIM021	CARAB	41	10	11	37	24
LIM022	MDPP	40	13	16	26	14
LIM023	ANCON	49	12	22	32	22
LIM024	INDEP	36	13	13	25	16
LIM025	CEPRE	14	8	8	4	3
LIM026	SERVI	3	2	0	3	1
LIM027	UPCVI	15	6	5	13	5
LIM028	USILM	37	10	9	26	18
LIM029	UPCSM	18	7	5	14	10
LIM030	USILP	27	8	7	17	11
LIM031	OLAYA	23	6	7	23	16
LIM032	SCOLIVO	7	5	1	6	6
LIM033	SCHORR	5	4	1	5	3
LIM-SLP	LIM-SLP	46	7	22	6	4
D91A	UNI	27	2	9	9	2
D95E	BRCHO	15	1	7	3	2
D855	PUNTA	61	13	20	10	5
D914	UNTELS	53	8	21	25	13
D925	ATARJEA	49	6	14	8	3
9E7E	CIPLIM	40	10	12	11	5
D958	LURIN	6	2	3	0	0
Total		2075	518	727	938	517

4.4 RESULTADOS

A pesar de los diferentes valores de los T_d y sus respectivas amplitudes, los ratios espectrales de respuesta $\overline{H/V}$ pueden agruparse en función de su forma espectral. Para el grupo que consideró todos los eventos sísmicos disponibles ($M_W \geq 3.5$) alrededor del 43% de las estaciones mostraron un máximo local único y claramente definido, el cual se asocia con T_d (por ejemplo, la estación CAL005, Figura N° 4.6a).

El resto de las relaciones espectrales $\overline{H/V}$ pueden dividirse en grupos que tienen dos picos (10% de las estaciones, Figura N° 4.6b), varios picos no identificables o no significativos (forma irregular, Figura N° 4.6c) o ningún pico significativo (espectro plano, Figura N° 4.6d). Para las estaciones con dos picos significativos, el valor de T_d reportado es la que tiene el mayor valor de amplificación.

Para facilitar la visualización de los resultados, se presenta la distribución espacial de los valores de T_d dividiendo la ciudad de Lima Metropolitana en tres regiones, graficadas sobre el mapa microzonificación sísmica vigente. Así mismo, se destacaron las relaciones espectrales de respuesta H/V de sismos importantes, tal es el caso de eventos de fuerte magnitud de campo cercano (Mala 2021 M_W 6.0, Callao 2021 M_W 5.2), campo intermedio (Pisco 2007 M_W) y campo lejano (Lagunas 2019 M_W 8.0, Barranca 2021 M_W 7.5). Es importante mencionar que los valores de los T_d se presentan en las Figuras 4.7, 4.8, 4.9 sólo si superan el umbral definido en la Ecuación 4.4 y que pasan luego a un ajuste Gaussiano. Además, los valores entre paréntesis representan un segundo T_d , en estaciones que las presentan.

La Figura N° 4.7 muestra la parte norte de Lima Metropolitana donde, por ejemplo, la estación LIM020 muestra un pico claro en 0.18 s, valor que concuerda con los reportes que indican que la zona cercana está formada por arenas eólicas superficiales sobre depósitos aluviales de grava muy cercanos a una formación de roca volcánica andesítica (CISMID, 2005; Roux, Correa, y Alayza, 2000). Por otro lado, estaciones como LIM022, LIM023, CAL012 y CAL006 muestran valores de T_d un poco más largos, alrededor de los 0.4 s - 0.5 s, estos a su vez corresponden a formaciones eólicas con mayor potencia o depósitos arcillosos (LIM022, LIM023) y al efecto de los materiales más blandos cercanos a la costa (CAL006) o suelos pantanosos cercanos (CAL012).

Por otro lado, se identificaron dos T_d en la mayoría de las estaciones situadas en la zona sur-oeste de la provincia del Callao (Ver Figura N° 4.8), donde se sabe que los depósitos de suelo consisten de gruesas capas de arcilla blanda y valores de V_{s30} de unos 300 m/s según Calderón et al. (2014). Por lo tanto, los dos picos observados representan tanto la influencia de los suelos blandos superficiales (el menor T_d) como el contraste de impedancia en la parte más profunda de la subestructura (el mayor T_d). Hacia el centro de Lima Metropolitana, los valores de T_d tienden a disminuir o a ser no identificables en la mayor parte de las estaciones debido a formas espectrales H/V planas o irregulares con múltiples picos. Se sabe que estas áreas pertenecen al cono deyectivo del río Rímac y se caracterizan por ser depósitos superficiales de grava (conglomerado) cuyas frecuencias dominantes se esperan que sean mayores a 3 Hz (Quispe et al., 2014; Yamanaka et al., 2016) y en concordancia con el mapa de microzonificación sísmica (Zona I, $T_d \leq 0.3s$).

En la Figura N° 4.9 se muestra la zona central y sur-este de la ciudad de Lima

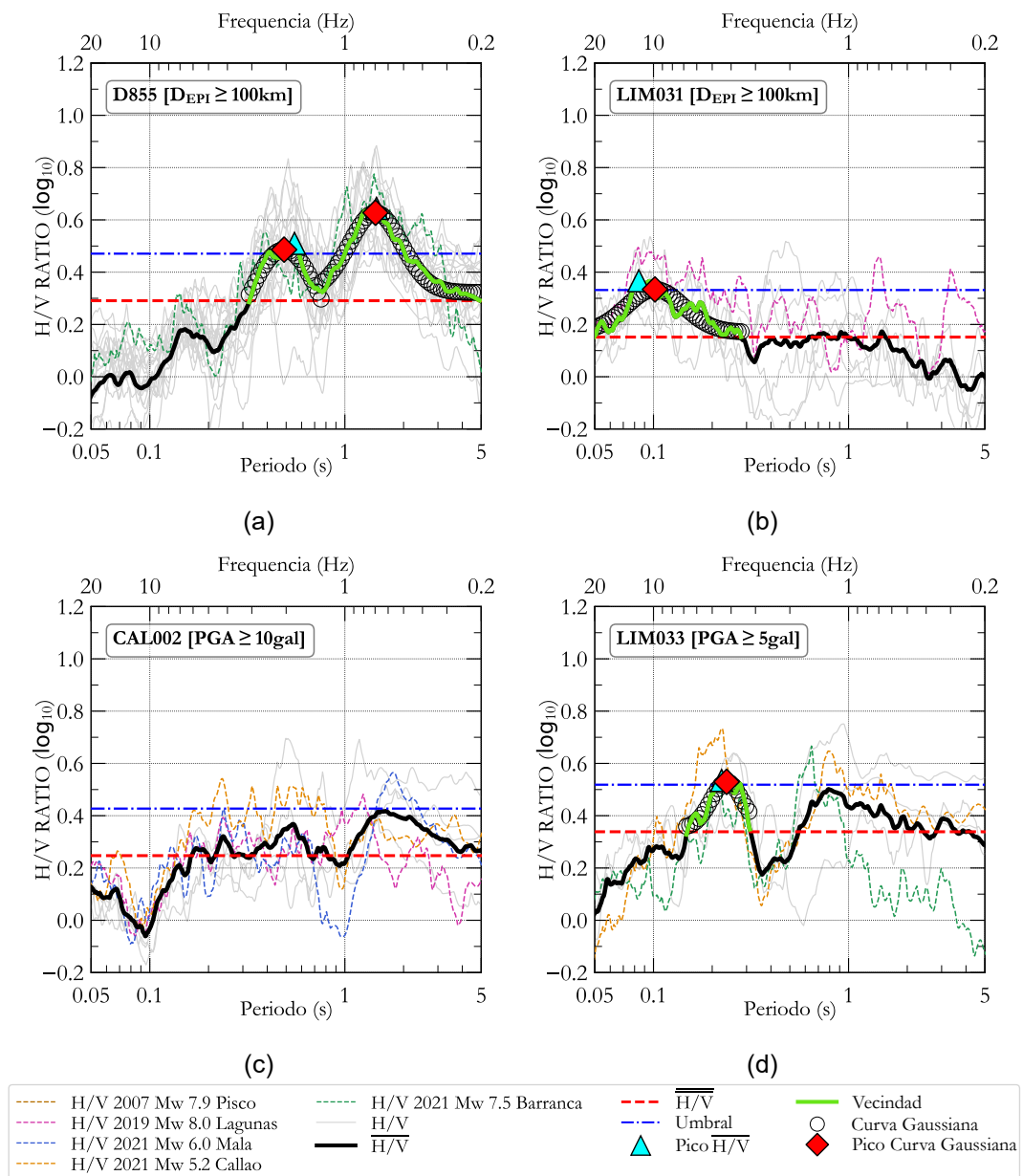


FIGURA N° 4.5: Principales elementos de la metodología para la identificación de T_d usando ratios espectrales de respuesta H/V . El criterio de agrupación de los sismos se indica en el recuadro superior izquierdo de cada gráfica. Las líneas grises son las relaciones espectrales de respuesta horizontal-vertical (H/V , Ecuación 4.1) para cada registro. A continuación, el promedio espectral de los ratios individuales ($\overline{H/V}$, Ecuación 4.2) está representado por líneas negras sólidas. Los ratios de respuesta H/V de los principales eventos sísmicos de la base de datos se presentan en líneas finas de color discontinuo. Las líneas rojas gruesas discontinuas corresponden al promedio de ancho de banda ($\overline{H/V}$), como se especifica en la Ecuación 4.3 entre el rango de períodos de interés, mientras que las líneas azules gruesas discontinuas muestran los umbrales definidos en Ecuación 4.4. Los triángulos cian representan los picos significativos (T_{peak}). Finalmente, se presentan las funciones Gaussianas ajustadas (círculos negros) sobre las vecindades consideradas (líneas verdes), así como el período dominante de vibración del suelo identificado (T_d , diamante rojo).

Metropolitana. Se observa una considerable variación de los valores de T_d en los distritos de Chorrillos y La Molina debido a la transición de depósitos rígidos (Zona

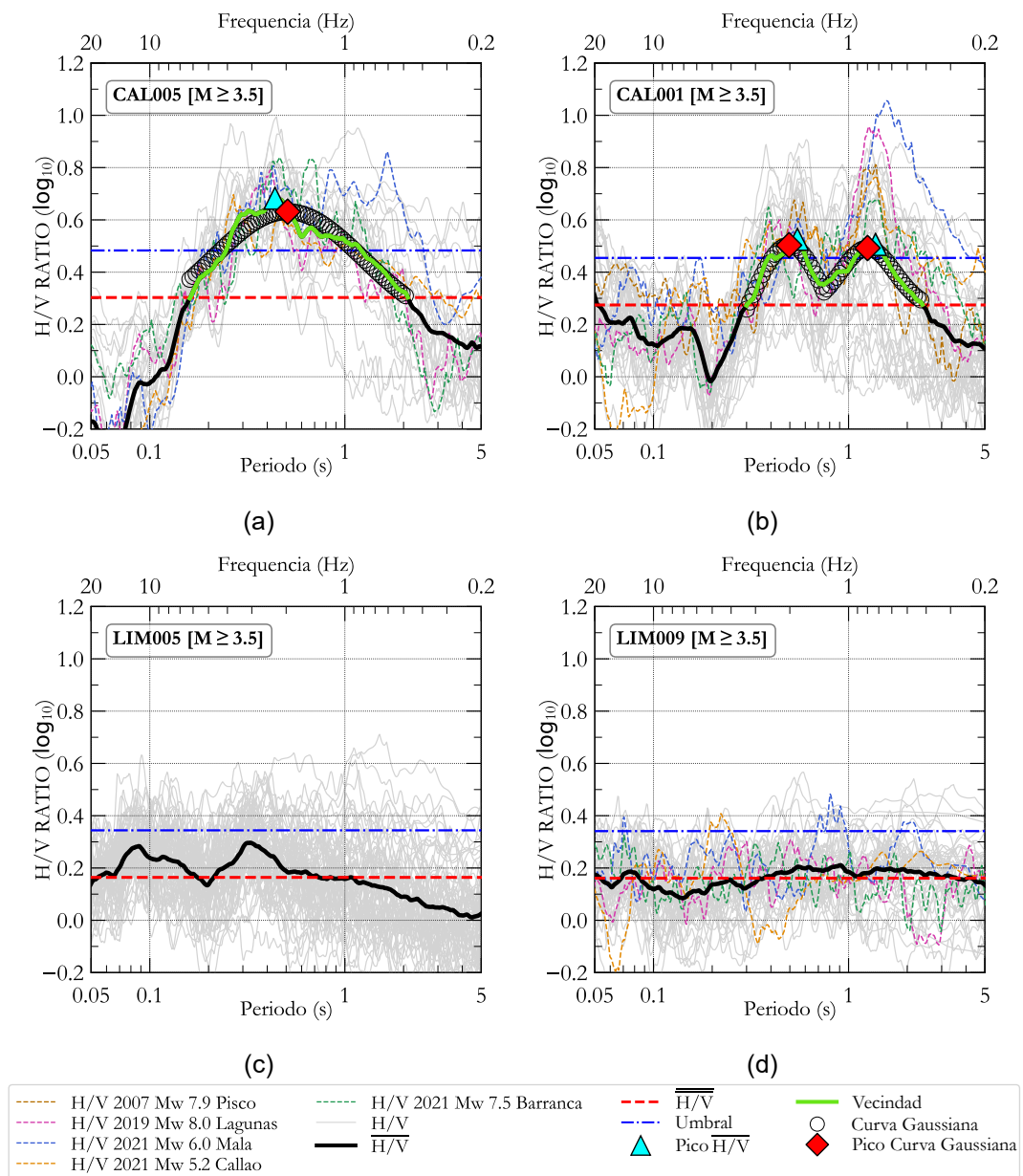


FIGURA N° 4.6: Formas típicas de las razones espectrales de respuesta horizontal-vertical promedio ($\overline{H/V}$) para eventos con $M_W \geq 3.5$. (a) Estación con un pico claro definido, (b) forma espectral promedio con 2 picos, (c) espectro con múltiples picos no significativos y (d) espectro plano.

l) a blandos en cada distrito. Como fue descrito en la distribución de suelos del área de estudio, se encuentran depósitos de gran potencia de arenas eólicas en Villa El Salvador, coincidiendo con los valores de períodos más largos $\sim 0.6s$ (por ejemplo, las estaciones LIM007 y D914). Así mismo, existe concordancia entre los valores de T_d y los valores estimados según la zona microsísmica para la estación LIM011, LIM028, LIM004. Es importante destacar que, entre las 51 estaciones analizadas, la estación LIM009 (Figura N° 4.6d) podría ser considerada como una estación de referencia, debido a la forma plana de su espectro H/V a lo largo del ancho de

banda considerado en este estudio, además por poseer una considerable rigidez al corte ($V_{s30} > 750m/s$) concordante con los estudios de caracterización del sitio realizados por SENCICO, 2018.

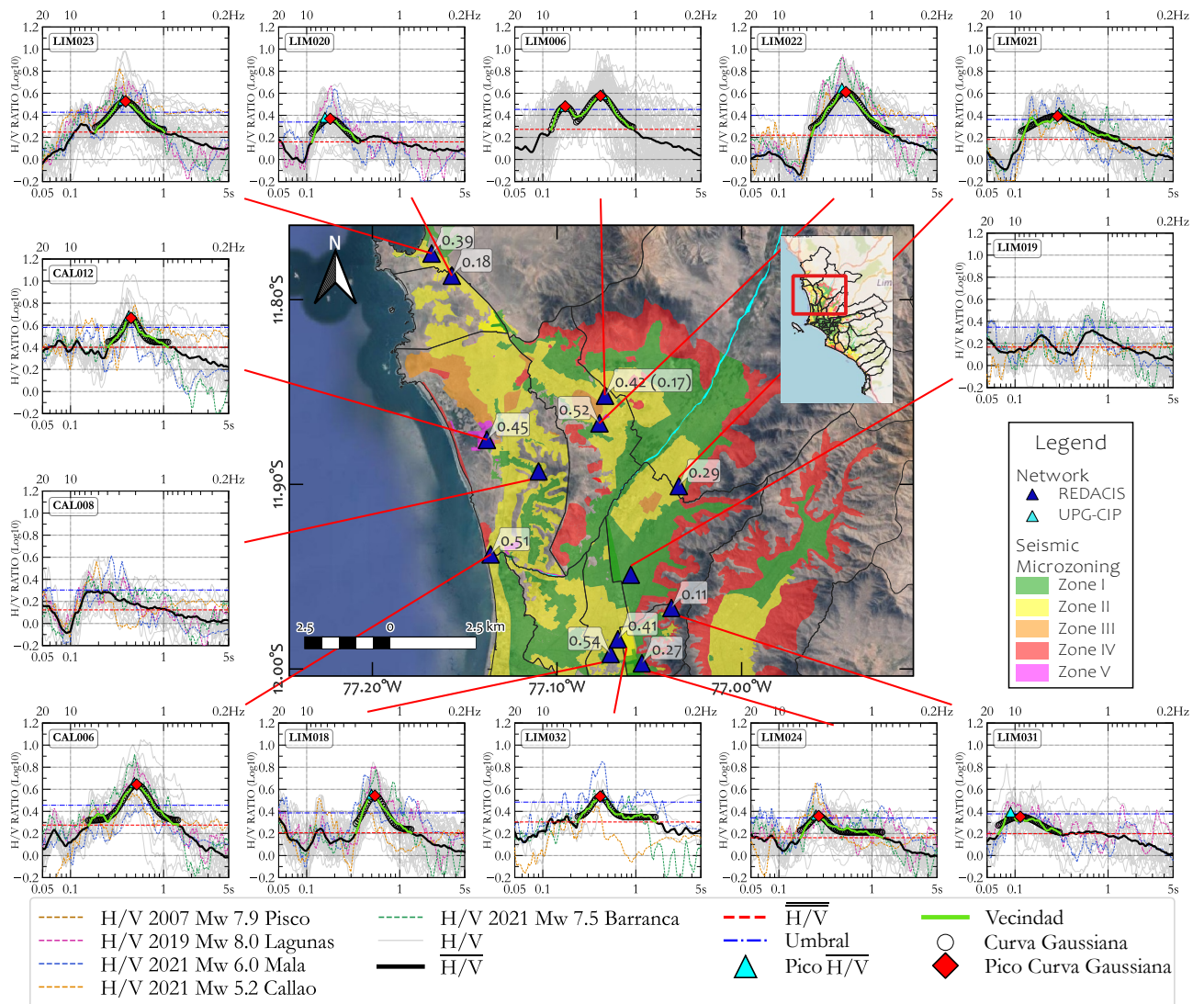


FIGURA N° 4.7: Ratios espectrales de respuesta H/V de la parte norte de Lima Metropolitana. Los valores entre paréntesis son los segundos valores de T_d ordenados según su amplificación.

La comparación entre los valores identificados de T_d y los rangos de períodos esperados en las estaciones según su ubicación en el mapa de microzonificación (ver Figura N° 4.1) y la Tabla N° 4.1) muestra que hay una buena concordancia en el 47% de los casos, mientras que el 43% de los valores T_d se encuentran en el rango de la siguiente zona desfavorable. Además, en el 10% de las estaciones, los picos predominantes no superaron el umbral definido. Para este último análisis, se consideraron formas espectrales planas como zona I, ya que se esperan pequeños valores de amplificación dentro del rango de análisis.

Los valores de T_d identificados en este estudio son consistentes con los presen-

tados por Soto (2021) en la Tabla N° 2.1 para la mayoría de estaciones en común (15 de 18 estaciones). En las tres estaciones restantes no fue posible identificar los valores de T_d debido a los criterios mínimos establecidos por la metodología adoptada. Estos resultados respaldan la validez de los hallazgos obtenidos, y sugieren la aplicabilidad de la metodología utilizada para determinar los períodos dominantes en las estaciones sísmicas evaluadas.

En este sentido, los resultados presentados podrían ser considerados como información complementaria para futuras actualizaciones de estudios de microzonificación en regiones como la provincia del Callao, donde se observa el mayor número de discrepancias, u otras que requieren de más puntos de exploración de la vibración ambiental.

Con referencia a la sensibilidad de los espectros, la Figura N° 4.10 muestra las relaciones espectrales de la respuesta H/V para la estación CAL001 según los criterios descritos en la Tabla N° 4.3. Si bien las relaciones H/V presentan picos con valores de T_d razonablemente similares para todos los casos, las amplitudes pueden variar, alternando el orden de significancia del período corto y largo para estaciones que presentan dos picos significativos, como el caso que se muestra. Así, al considerar todos los eventos ($M_W \geq 3.5$), en la mayoría de los casos, se elige el T_d más corto debido a su mayor amplitud H/V , mientras que todos los demás grupos, el T_d más largo tiende a tener mayor importancia. Los eventos sísmicos de campo lejano de magnitud considerable, como el evento de Lagunas 2019 M_W 8.0 y de Barranca 2021 M_W 7.5 provocaron ratios de amplificación H/V elevados en el rango de períodos largos, debido al contenido energético que llegó al fondo del perfil del suelo y excitó la parte más profunda de la subestructura.

TABLA N° 4.5: Resumen de los valores de T_d por estación y criterio.

Código	Nombre	Período dominante de vibración T_d (s) †,‡				
		$M_W \geq 3.5$	$M_W \geq 5.0$	$D_{epi} \geq 100 \text{ km}$	$PGA \geq 5 \text{ gal}$	$PGA \geq 10 \text{ gal}$
CAL001	DHN	0.5 (1.25)	1.37 (0.5)	1.3 (0.5)	1.33 (0.51)	1.39 (0.51)
CAL002	NISTA	-	1.61	1.43	1.66	-
CAL003	DSMI	0.3 (1.47)	0.29 (1.6)	0.29 (1.5)	0.3 (1.61)	0.3 (1.64)
CAL004	RAMON	0.95 (0.41)	0.41 (0.97)	0.92 (0.43)	0.41 (1.05)	0.68
CAL005	ACAPU	0.51	0.58	0.55	0.64	0.65
CAL006	VHAYA	0.51	0.52	0.55	0.52	0.51
CAL007	ESTAL	0.76	0.71	0.69	0.32 (0.79)	-
CAL008	AMORE	-	0.2	0.23	0.21	-
CAL010	BONDY	-	1.16	1.12	-	-
CAL011	PRADO	1.39	1.56	1.45 (0.62)	-	1.41 (0.35)
CAL012	DEFEN	0.45	0.45	0.43	0.45	0.46
LIM001	JALVA	-	-	-	-	-
LIM002	FIC	-	-	-	-	-
LIM004	PIQUE	0.21	0.23	-	0.21	0.21
LIM005	RESER	-	-	-	-	-
LIM006	PIEDRA	0.42 (0.17)	0.45	0.45	0.46	0.47
LIM007	VES	-	0.83	0.8	-	-
LIM008	SMP	0.48	0.52	0.48	0.52	-
LIM009	BORJA	-	-	-	-	-
LIM010	MARTI	-	-	-	-	-
LIM011	CIPCN	0.23	0.22	0.22	0.23	0.25
LIM012	UNFV	0.87	0.96	0.91	0.87	1.04
LIM013	SANM	-	0.97	0.87	1.07	-
LIM014	CENEP	-	0.31	-	-	0.28
LIM015	INICT	-	-	-	-	-
LIM016	IMCA	-	1.02	1.04	-	1.24
LIM017	URP	-	-	-	-	-
LIM018	OLIVO	0.54	0.54	0.57	0.55	0.54
LIM019	COMAS	-	-	0.69	-	-
LIM020	SROSA	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
LIM021	CARAB	0.29	0.27	0.31	0.29	0.27
LIM022	MDPP	0.52	0.54	0.55	0.53	0.53
LIM023	ANCON	0.39	0.39	0.38	0.39	0.4

Continúa en la página siguiente

Código	Nombre	Período dominante de vibración T_d (s) ^{†,‡}				
		$M_W \geq 3.5$	$M_W \geq 5.0$	$D_{epi} \geq 100 \text{ km}$	$PGA \geq 5 \text{ gal}$	$PGA \geq 10 \text{ gal}$
LIM024	INDEP	0.27	0.26	0.25	0.27	0.29
LIM025	CEPRE	-	-	0.84	1.02	-
LIM026	SERVI	-	-	-	-	-
LIM027	UPCVI	0.08	0.08 (0.58)	0.07 (0.53)	0.08	0.08
LIM028	USILM	0.2	0.2	0.19 (0.92)	0.2	0.2
LIM029	UPCSM	0.89	0.92	0.94	0.86	-
LIM030	USILP	-	0.81	0.22 (0.79)	-	-
LIM031	OLAYA	0.11	0.1	0.1	0.11	0.12
LIM032	SCOLIVO	0.41	0.42	-	0.41	0.41
LIM033	SCHORR	0.24	0.23	-	0.24	-
LIM-SLP	LIM-SLP	-	-	-	-	-
D91A	UNI	-	-	-	-	-
D95E	BRCHO	0.27	-	1.04 (0.26)	0.3	-
D855	PUNTA	1.38 (0.51)	1.41 (0.5)	1.44 (0.49)	1.55	1.5 (0.53)
D914	UNTELS	0.65	0.68	0.65	0.67	0.69
D925	ATARJEA	-	0.16	0.15	-	0.16
9E7E	CIPLIM	-	-	-	-	-
D958	LURIN	-	-	-	-	-

[†] Los valores entre paréntesis son un segundo T_d ordenados según su amplificación.

[‡] Los guiones corresponden a estaciones cuyos T_d no se pudieron identificar.

En la mayoría de los casos, la variabilidad de los valores de T_d con respecto a la magnitud, la distancia epicentral y el valor de PGA mínimo no es considerable, aunque se observan intercambios entre los valores de T_d principal y secundario en ciertas estaciones cuando se considera el grupo de eventos de campo lejano ($D_{epi} \geq 100 \text{ km}$, por ejemplo, las estaciones CAL001, CAL011 y LIM028). La Figura N° 4.11 y la Tabla N° 4.5 muestran los resultados para todas las estaciones y criterios de agrupamiento analizados. Lo cual estaría en concordancia con los trabajos de Yamazaki y Ansary (1997) y Zhao (2006) quienes mostraron que los ratios $\overline{H}/\overline{V}$ no se ven fuertemente influenciados por parámetros de magnitud, distancia y profundidad. El procesamiento completo, las gráficas por estación y criterio de selección de la sub-base de datos es presentado en el Anexo A.

Con referencia a los niveles mínimos de PGA , es importante señalar que para niveles de deformación mayores, el T_d podría cambiar considerablemente debido a los efectos de no-linealidad del suelo. Soto y Alva (2023) consideraron que valores de

PGA menores a $100gal$ preservarían el comportamiento elástico del suelo al determinar perfiles profundos de V_s a partir de la inversión de las relaciones espectrales de respuesta H/V utilizando la teoría de campo difuso. Su aplicación se realizó utilizando los registros sísmicos de estaciones sísmicas ubicadas en la ciudad de Lima.

Por su parte, Kawase (2006) analizó el efecto de no linealidad del suelo en factores de amplificación de sitio para 1700 estaciones sísmicas de Japón con diferentes condiciones de suelo usando eventos sísmicos con altos valores de aceleración ($PGA > 200gal$). Identificó que considerando este valor umbral algunos de los sitios objetivo no mostraban un efecto de no linealidad significativa, pero que la mayoría de los sitios muestran factores de sitio no lineales, es decir, un período pico más alto y una amplitud más alta. En ese sentido, dado que la mayoría de los valores de PGA de la base de datos son inferiores a $200gal$, podíamos esperar que la influencia del comportamiento no lineal fuera no importante en nuestros T_d identificados.

Finalmente, la identificación del T_d no fue posible en varios casos debido principalmente a que los espectros promedio presentaron picos cuya amplificación no superaron los umbrales establecidos y en ciertas estaciones no se tuvieron más de tres registros. El criterio de selección de eventos cuya magnitud es superior a 5.0 ($M \geq 5.0$) presenta una mayor efectividad, ya que permitió identificar valores de T_d en más estaciones sísmicas acelerográficas (36 de 51).

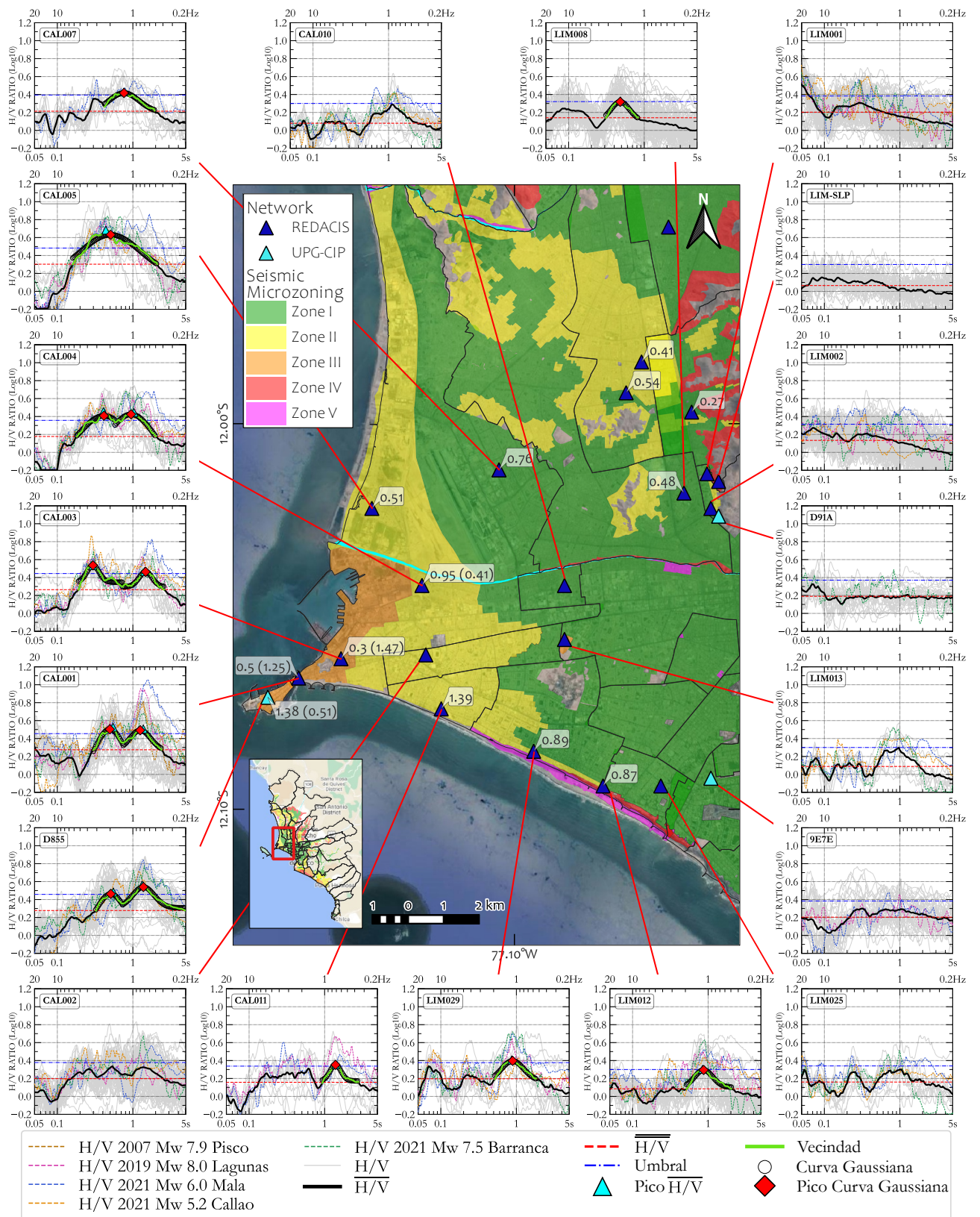


FIGURA N° 4.8: Ratios espectrales de respuesta H/V de la zona sur-oeste de la provincia del Callao. Los valores entre paréntesis son los segundos valores de T_d ordenados según su amplificación.

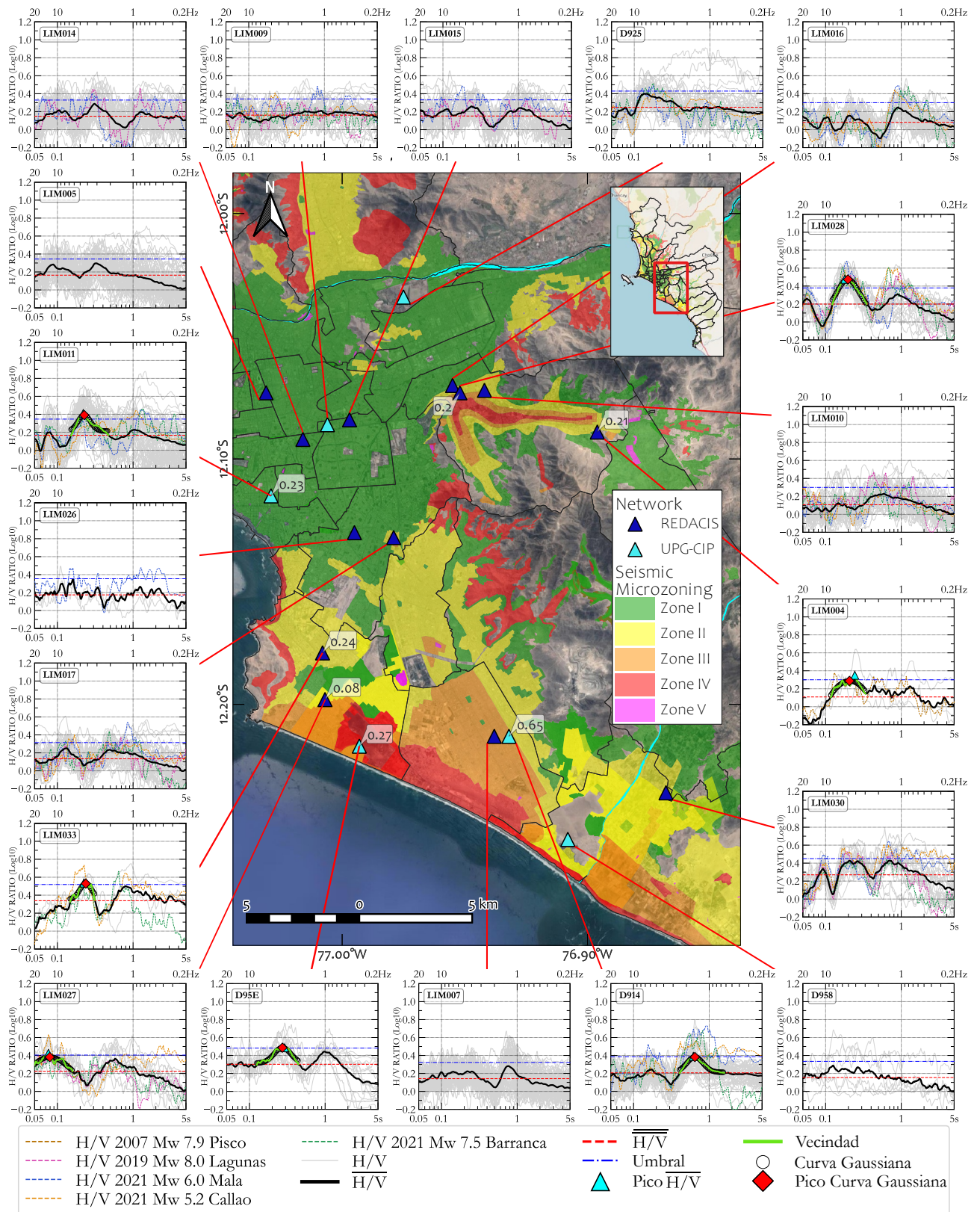


FIGURA N° 4.9: Ratios espectrales de respuesta H/V de la parte central y sur-este de Lima Metropolitana. Los valores entre paréntesis son los segundos valores de T_d ordenados según su amplificación.

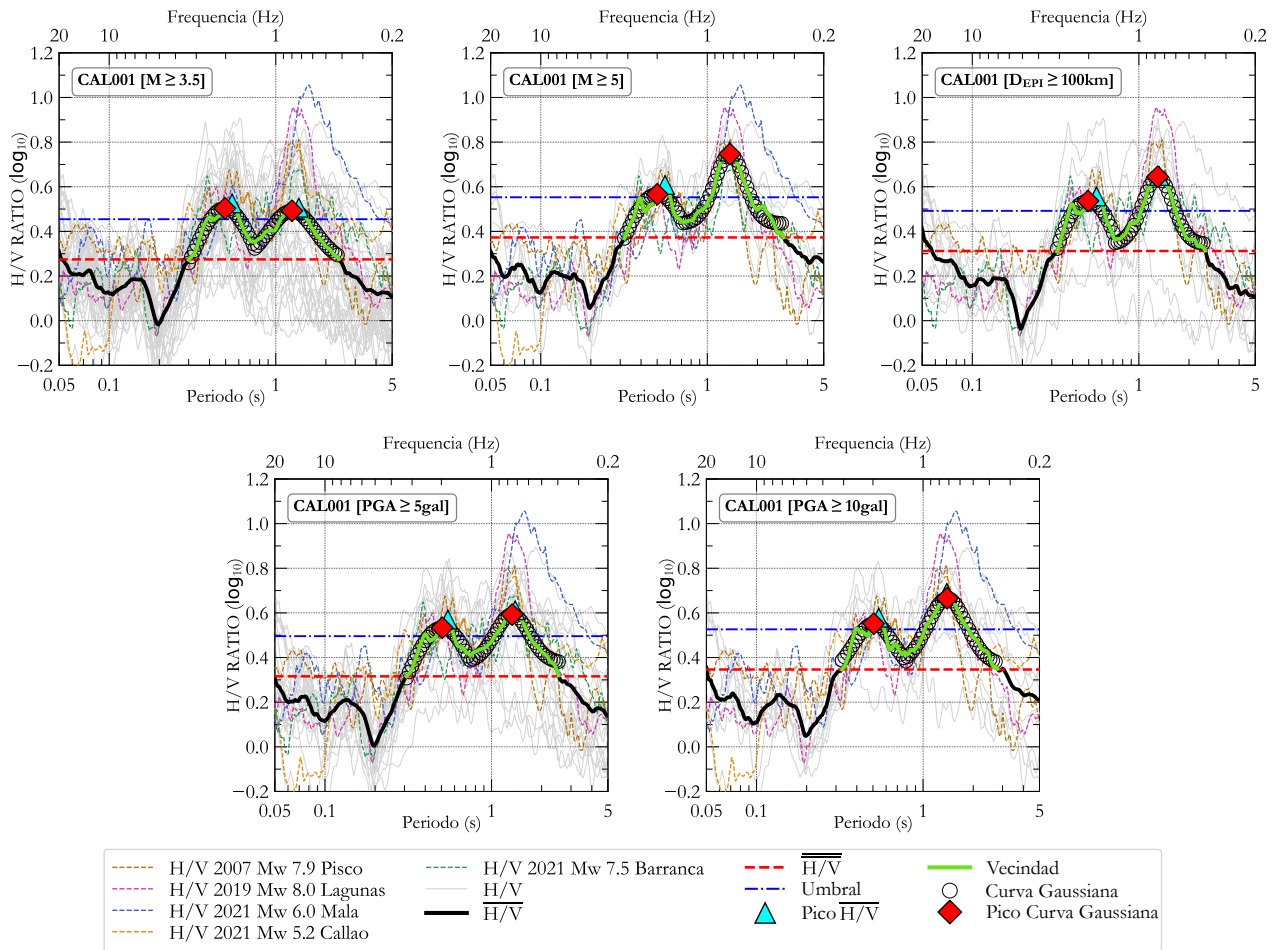


FIGURA N° 4.10: Sensibilidad de la relación espectral de respuesta H/V de la estación CAL001. Se presentan los resultados para todos los criterios definidos en la Tabla N° 4.3.

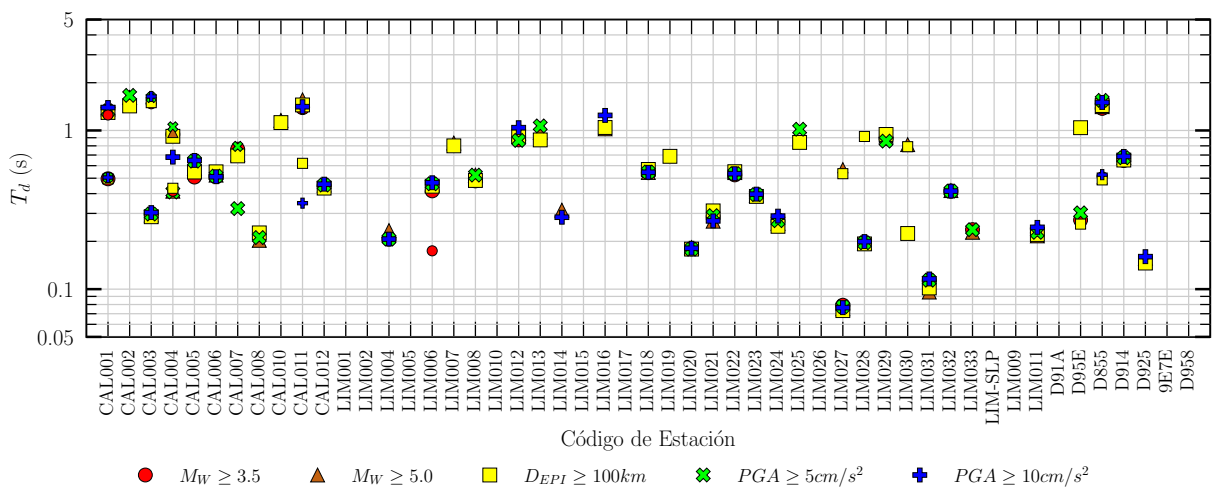


FIGURA N° 4.11: Distribución de los T_d por criterio y estaciones. Para cada criterio y cada estación, el símbolo más grande corresponde al primer T_d y el de menor tamaño, a un segundo T_d ordenados de acuerdo a su amplificación.

CAPÍTULO V: EVALUACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PROMEDIO

En este capítulo se realiza un análisis de la sensibilidad de las funciones de transferencia (FT) de los perfiles sísmicos obtenidos mediante la técnica MAM, considerando diferentes profundidades de evaluación. Se comparan las gráficas resultantes con las FT de los perfiles superficiales de la técnica MASW, teniendo en cuenta la respuesta de todo el perfil de exploración indirecta alcanzada. Como era de esperar, se observan valores más bajos de la función de transferencia promedio ($AvTF$) cuando se consideran únicamente las capas superficiales. Además, las mayores amplificaciones se limitan a un rango de períodos cortos ($< 1 s$). Por el contrario, al analizar la parte más profunda del perfil, se obtienen valores más altos y evidentes de $AvTF$, debido a los significativos ratios de impedancia presentes. Se reportan los valores más altos de $AvTF$ en los perfiles donde se identifica el basamento rocoso. Por último, se concluye que el rango de integración de la fórmula original para estimar la $AvTF$ no consideraría de manera adecuada perfiles con amplificaciones significativas en períodos largos.

5.1 METODOLOGÍA

Se realizaron evaluaciones de las funciones de transferencia (FT) secuenciales utilizando los perfiles sísmicos profundos obtenidos mediante la técnica MAM, los cuales se encuentran detallados en la Tabla N° 3.1. Las FT secuenciales nos permiten estimar la sensibilidad de las amplificaciones en profundidad. Estas se obtienen al evaluar la FT de un mismo perfil sísmico profundo, truncándolo sucesivamente hasta la capa correspondiente según la etiqueta asignada, como se muestra a continuación:

$$FT_{1j} = \frac{|u_1|}{|u_j|} \quad (5.1)$$

donde FT_{1j} es la relación entre la amplitud de movimiento de la superficie libre (u_1) y la amplitud de movimiento de la capa j (u_j , capa considerada como espacio semi-infinito o *bedrock*), consecuentemente, su etiqueta sería: función de transferencia de j Capas. Por ejemplo, la FT de 3 capas evaluaría la respuesta de los 2 primeros estratos sobre un espacio semi-infinito con las características del tercer estrato. Los parámetros presentados en los resultados se describen la Figura N° 5.1.

Para evaluar las FT se utilizó una rutina de cómputo en lenguaje Fortran compartida por el CISMID, denominada *Trans4*. Los parámetros utilizados para el modelamiento de los estratos horizontalmente uniformes y amortiguados que complementan a las

V_s del perfil sísmico se detallan en la Tabla N° 5.1.

TABLAN° 5.1: Parámetros usados para el cómputo de las funciones de transferencia.

Parámetro	Símbolo	Estratos	Bedrock
Amortiguamiento	ξ	2%	3%
Peso unitario	ρ	1.8ton/m ³	1.8ton/m ³

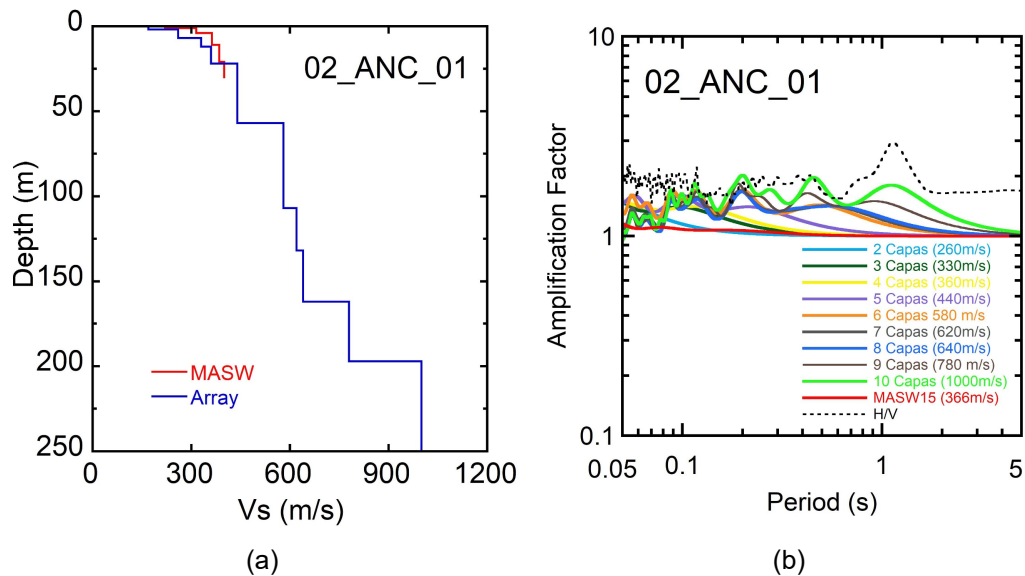


FIGURA N° 5.1: Parámetros presentados en las gráficas de FT secuenciales. (a) Perfil de velocidades de ondas de corte (V_s) obtenidos de las técnicas MAM (línea azul) y MASW (línea roja), (b) gráfica de FT secuenciales del perfil profundo (líneas de colores), FT del perfil superficial (línea roja continua o discontinua) y espectro H/V de la técnica medición puntual de microtemores (línea negra discontinua), los valores en paréntesis en la leyenda son el valor de V_s del estrato considerado como *bedrock* en la evaluación de la FT para el caso de los perfiles profundos y el valor de V_{s30} para el perfil superficial.

A continuación, se evaluó la función de transferencia promedio ($AvTF$) usando la expresión definida en la Ecuación 2.2 de la Sección 2.5 para cada una de las FT secuenciales y para la FT del perfil completo superficial.

5.2 RESULTADOS

5.2.1 Funciones de transferencia sucesivas

A pesar de las variaciones en las formas y valores de las FT, es posible identificar dos patrones distintos. En el primer patrón, se observan algunos grupos en los que tanto las FT sucesivas a partir de cierta profundidad como la FT del perfil superficial muestran similitudes en su forma con la FT empírica H/V (ver Figura N° 5.2a). En el segundo patrón, que es más frecuente, se observan grupos en los que solo los

perfiles profundos coinciden adecuadamente con las tendencias de los espectros H/V (ver Figura N° 5.2b).

En el primer patrón, a pesar de que las diferencias en las profundidades de exploración indirecta reportadas por las técnicas MASW y MAM son de unas pocas decenas de metros, estas diferencias son suficientes para caracterizar adecuadamente las propiedades vibratorias de la subestructura profunda del perfil de suelo. Sin embargo, esto no se cumple en el segundo patrón, donde los cambios en las relaciones de impedancia en los estratos más profundos reflejan de manera más precisa el comportamiento dinámico del suelo, mostrando picos coherentes con el espectro H/V .

Estos hallazgos concuerdan con lo descrito por Gonzales et al. (2020), quienes, utilizando un enfoque similar pero basado en curvas de elipticidad del modo fundamental de las ondas Rayleigh, demostraron que los primeros 30 metros de suelo no son representativos del comportamiento dinámico global del suelo en ciertos perfiles sísmicos en Lima Metropolitana.

Para facilitar la visualización de los resultados, se presenta la distribución espacial de las FT sucesivas dividiendo la ciudad de Lima Metropolitana en cuatro regiones, graficadas sobre el mapa microzonificación sísmica vigente.

5.2.1.1 Zona Norte

En esta región se incluyen los distritos de Ancón, Santa Rosa, Ventanilla, Los Olivos, Comas y San Martín de Porres (ver Figura N° 5.3). Los tres primeros distritos se localizan esencialmente sobre depósitos de arenas eólicas con mediana densidad. El grupo Ventanilla (49_VNT_01) se encuentra próximo a la transición de gravas medianamente densas a densas. Finalmente, Los Olivos, Comas y San Martín de Porres ven influenciada su geomorfología por el conglomerado de los conos deyeativos de los ríos Chillón y Rímac, superficialmente son depósitos de arenas medianamente densas y arcillas/limos rígidos o gravas medianamente densas a densas con estratos arcillosas poco profundos.

El grupo localizado en Ancón presenta una FT relativamente plana según el perfil MASW, pero la FT sucesiva de 10 capas muestra una similitud con el espectro H/V con claras amplificaciones en el rango de períodos largos ($\sim 1s$). El arreglo de microtemores de gran apertura ejecutado en Comas (10_COM_01) evidencia el impacto de las altas relaciones de impedancia de los estratos ubicados a profundidades mayores a 60 m, sólo a partir de dicha profundidad se encuentra similitud entre las FT empíricas y teóricas. En cuanto al grupo ubicado en Ventanilla, el perfil profundo de exploración indirecta reporta un importante cambio de impedancia a una profundidad menor a los 30 m, lo cual no está claramente definido en el perfil MASW, a pesar de esto, ambas FT guardan similitud con el espectro H/V , siendo la

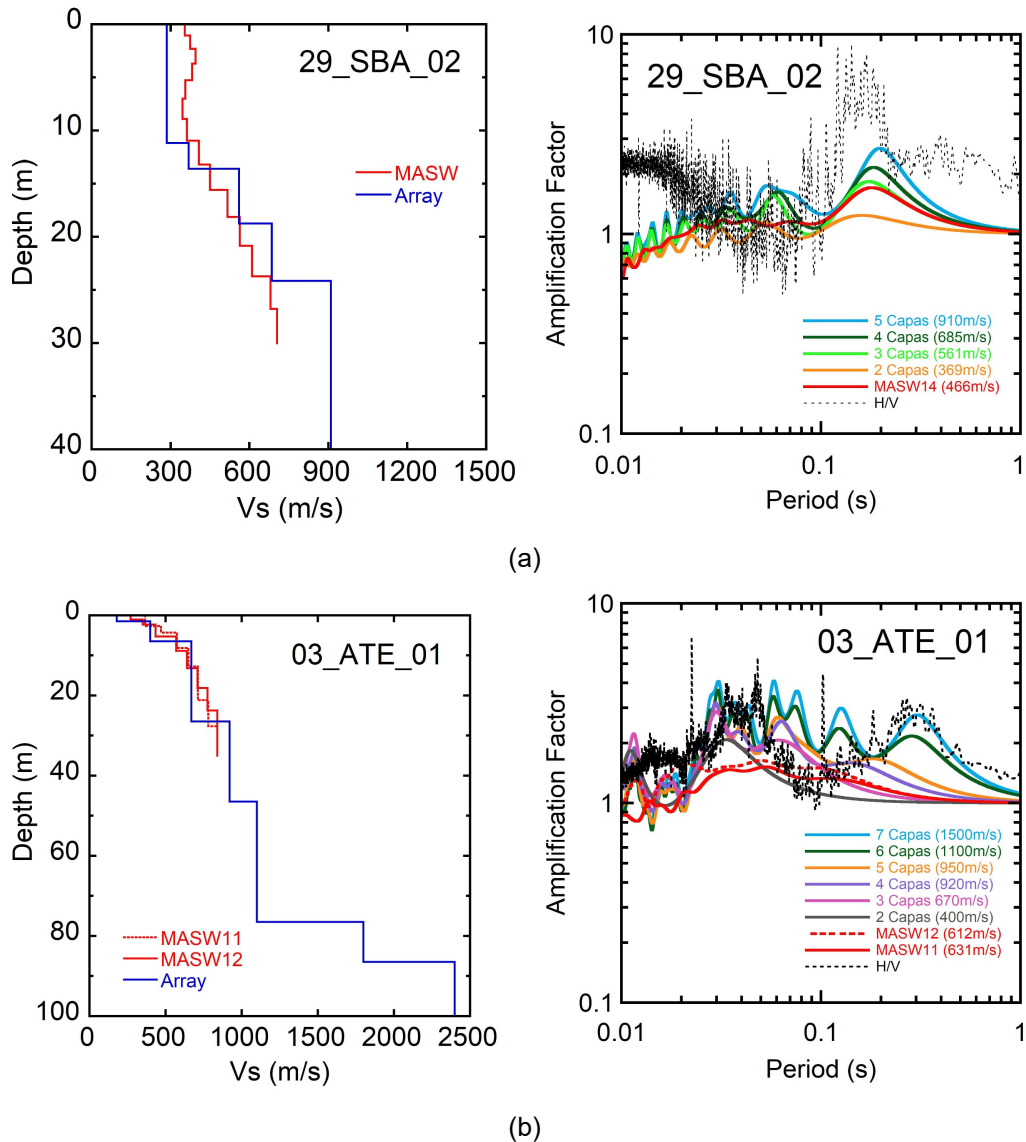


FIGURA N° 5.2: Patrones encontrados en las FT secuenciales de los grupos de perfiles sísmicos. (a) Grupo en donde tanto las FT sucesivas del perfil profundo y la del perfil superficial guardan concordancia con la función de transferencia empírica (H/V), (b) grupo donde sólo los estratos más profundos de los perfiles profundos coinciden adecuadamente con las tendencias de los espectros H/V .

FT del perfil profundo la que presenta una mayor similitud. En general, en esta zona las FT secuenciales empiezan a tener coherencia tanto la forma como amplificaciones máximas con espectro H/V a partir de estratos con $V_s > 800m/s$ identificados a una profundidad mayor ($z > 50m$ en la mayoría de los grupos) al potencialmente obtenible de la técnica MASW.

5.2.1.2 Zona oeste El Callao

En esta zona se encuentran fuertes potencias de arcillas blandas con bajos valores de $V_{s30} \sim 300m/s$. Con dirección al este, distritos como Bellavista y La Perla,

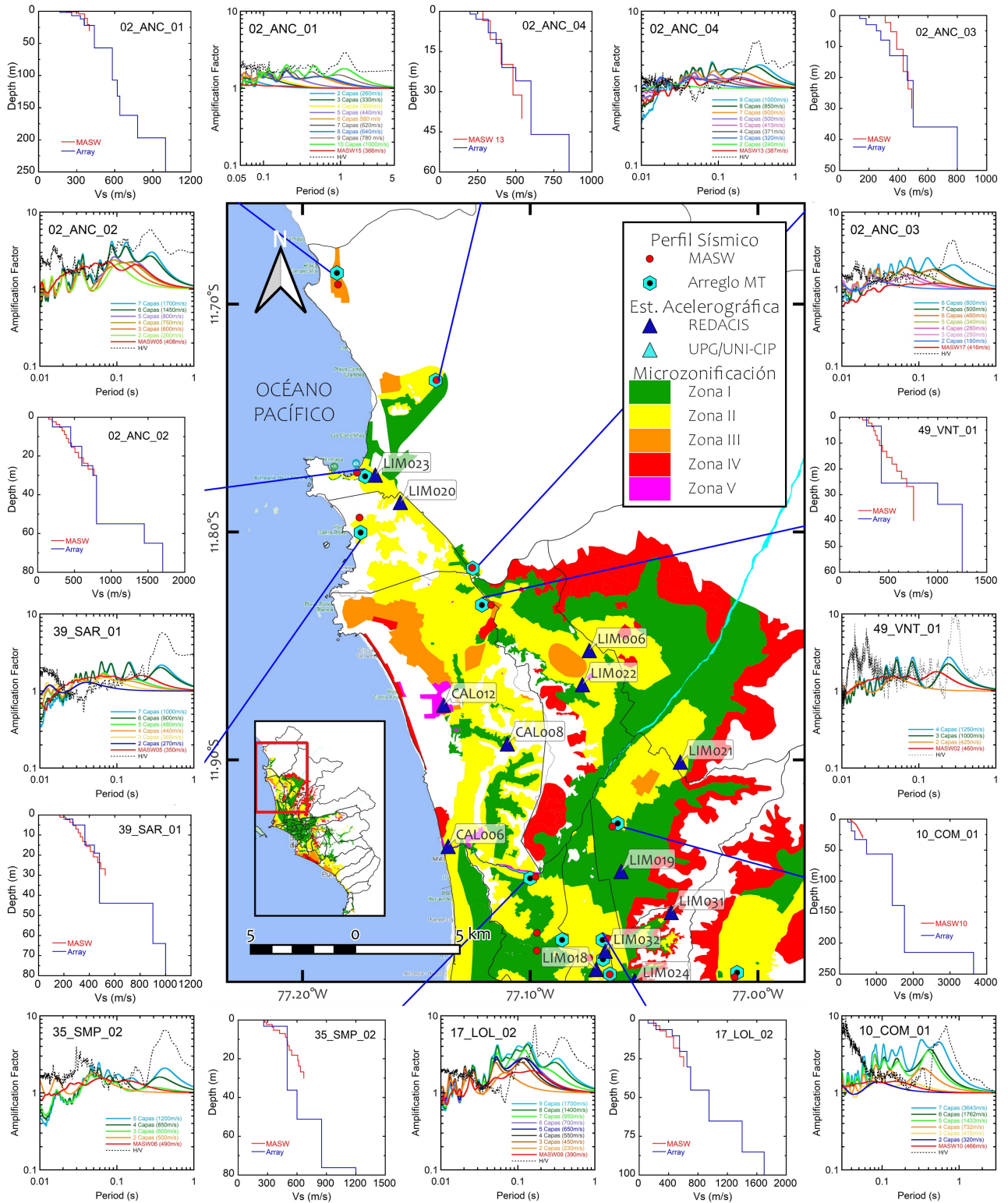


FIGURA N° 5.3: Comparación de las FT sucesivas de los perfiles sísmicos recopilados de la técnica MAM, FT del perfil superficial MASW y el espectro H/V de la medición puntual de microtremores para la región norte de Lima Metropolitana.

se ubican sobre una transición de gruesos depósitos de gravas aluviales densas o medianamente densas a arenas medianamente densas. Así mismo, en la Figura

N° 5.4 se presentan también algunos resultados de grupos ubicados sobre suelos más rígidos que pertenecen a las densas gravas aluviales del conglomerado de Lima (45_BLL_02, 21_PLI_01, 20_MAG_01). Los perfiles en el Callao muestran claros valores de amplificación en períodos largos, con excepción de los grupos 47_PER_02 y 44_CLL_01 donde parecen requerir exploraciones indirectas más profundas para que coincidan con la tendencia de períodos largos reportada en sus espectros H/V . Como se esperaba, los mayores valores de amplificación en períodos largos son consecuencia de los ratios de impedancia de los estratos más profundos, y sólo pueden ser identificados en los picos del espectro H/V y/o en exploraciones indirectas excepcionalmente profundas (45_BLL_03, 45_BLL_02 y 47_PER_01). En general, los perfiles superficiales no reflejan adecuadamente las propiedades dinámicas de vibración como lo haría un perfil sísmico profundo.

5.2.1.3 Zona central, el conglomerado de Lima

En las Figuras 5.5 y 5.6 se presentan la zona central de Lima Metropolitana, áreas con notable influencia del abanico aluvial del río Rímac, caracterizada por depósitos de grava medianamente densas a densas, denominados el conglomerado de Lima. Es una de las zonas más rígidas de la metrópoli, con los valores más altos de V_{s30} y la microzonificación más óptima (Zona I, color verde). Los grupos ubicados en el distrito de Surco (40_SDS_01 Y 40_SDS_02, Figura N° 5.5) muestran similitud entre la FT de los perfiles superficiales y profundos con sus espectros H/V respectivos (espectros H/V de tendencia plana), al igual que los perfiles ubicados en la parte más central (Figura N° 5.6). En esta zona se estima las mayores potencias del conglomerado (Arce, 1984) y, por ende, no existen variaciones importantes de ratios de impedancia. En estos casos, los perfiles de exploración indirecta superficiales caracterizan apropiadamente el comportamiento vibracional del suelo.

Por el contrario, alejados un poco del centro, los grupos localizados en los distritos de San Juan de Miraflores, Pachacámac y Ate (33_SJM_01, 23_PCH_01 y 03_ATE_01, respectivamente) muestran que el perfil obtenido por la técnica MASW no es coherente las propiedades vibratorias de la estratigrafía subyacente, como sí lo hace el perfil profundo, que guarda similitud con el ratio H/V para FT de perfiles truncados con espacios semi-infinitos de $V_s > 900m/s$. En el distrito de La Molina, se encuentra una variada distribución de suelos que incluye afloramientos rocosos, depósitos coluviales, aluviales, fluviales e importantes depósitos de arenas eólicas en algunas laderas, según lo mencionado por Calderón et al. (2011). En el grupo 14_MOL_02, se observa el impacto de los estratos más profundos, ya que a medida que se consideran más estratos en el análisis, la FT se asemeja cada vez más al espectro H/V . Esto indica que los estratos más profundos tienen una influencia significativa en el comportamiento vibracional del suelo en esta zona. Finalmente, el grupo ubicado en San Juan de Lurigancho (32_SJL_01) parece requerir explo-

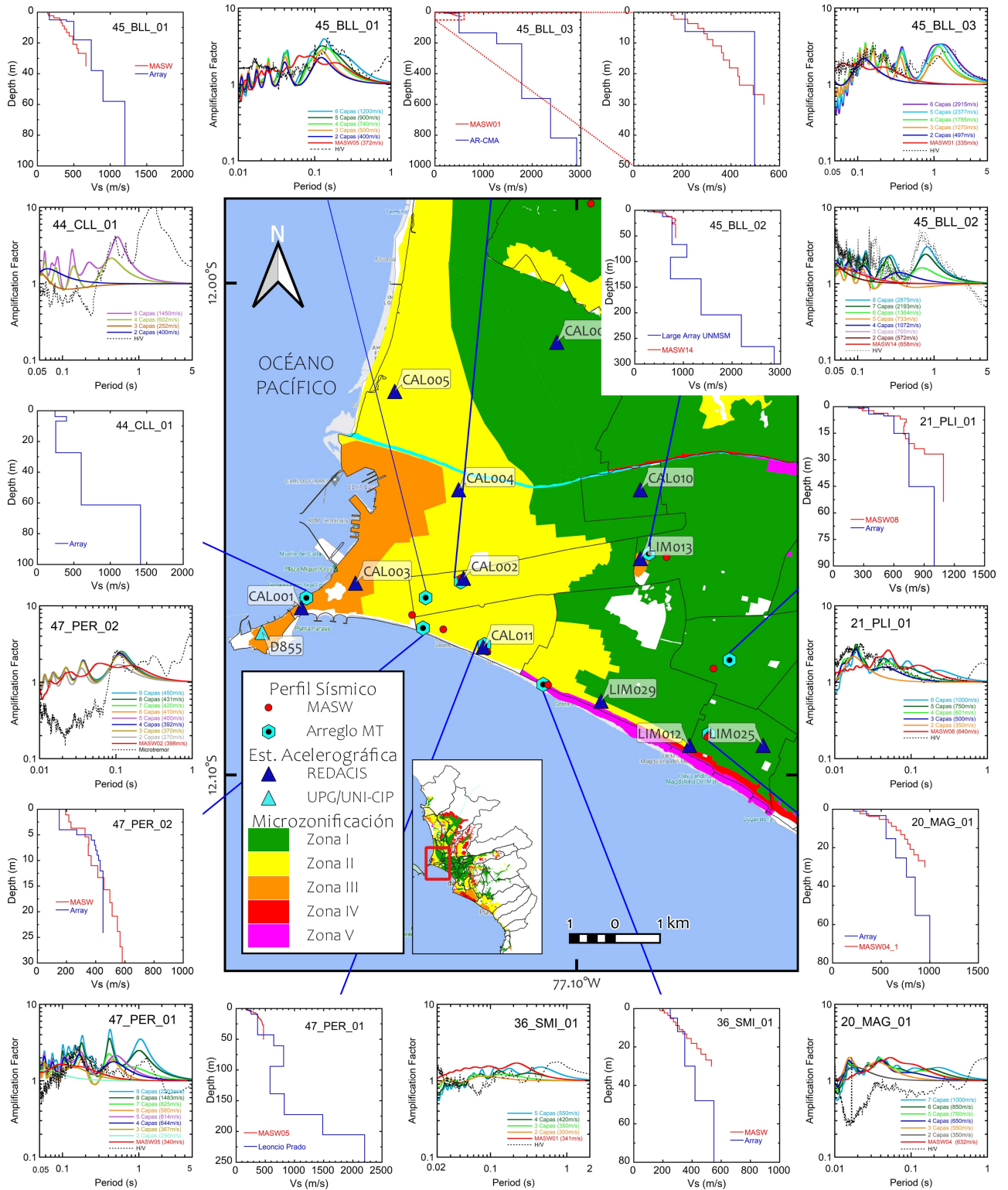


FIGURA N° 5.4: Comparación de las FT sucesivas de los perfiles sísmicos recopilados de la técnica MAM, FT del perfil superficial MASW y el espectro H/V de la medición puntual de microtremores para la para la provincia Constitucional del Callao.

raciones indirectas más profundas para reflejar adecuadamente la tendencia de su espectro H/V .

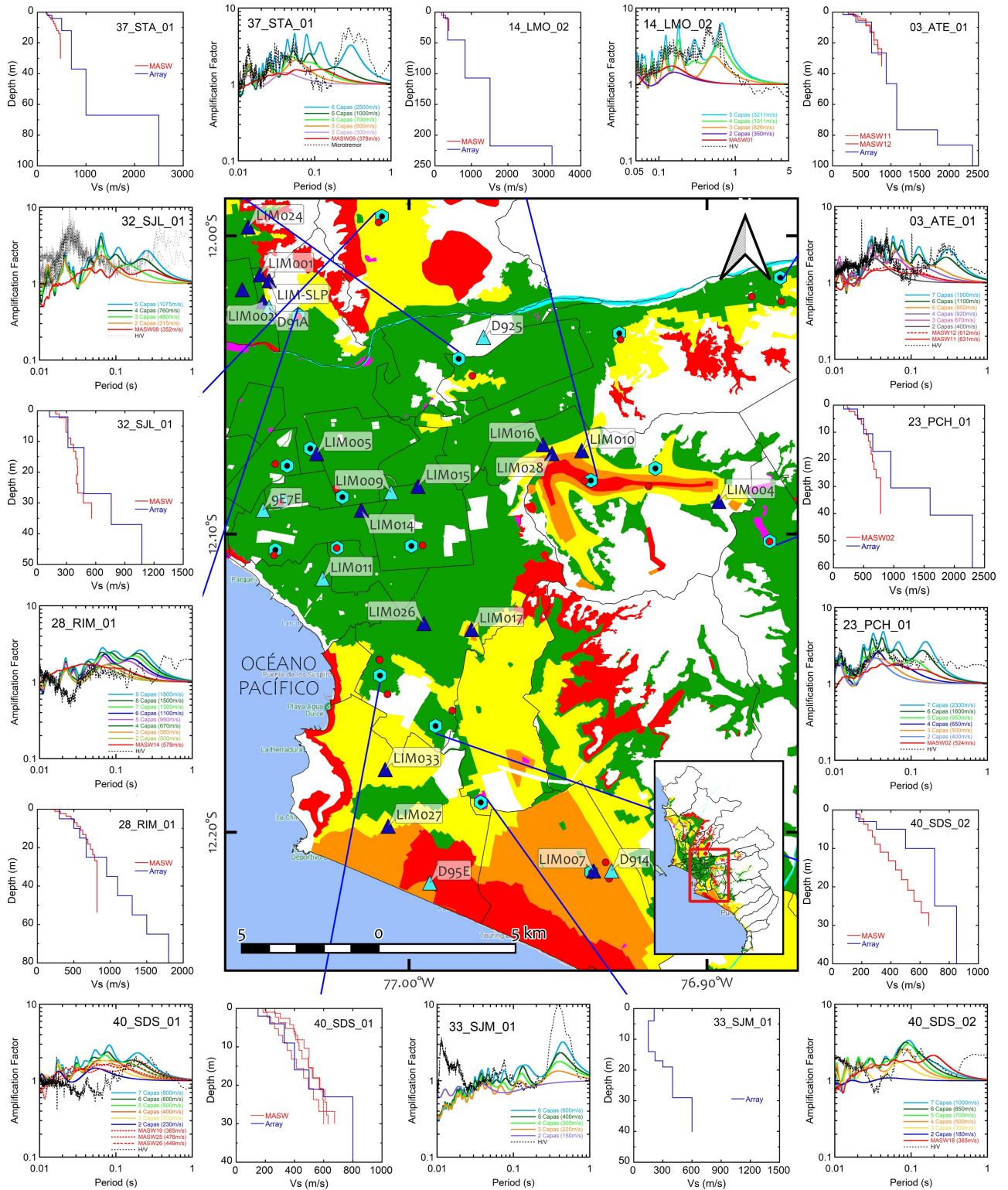


FIGURA N° 5.5: Comparación de las FT sucesivas de los perfiles sísmicos recopilados de la técnica MAM, FT del perfil superficial MASW y el espectro H/V de la medición puntual de microtremores para zona central (I) de Lima Metropolitana.

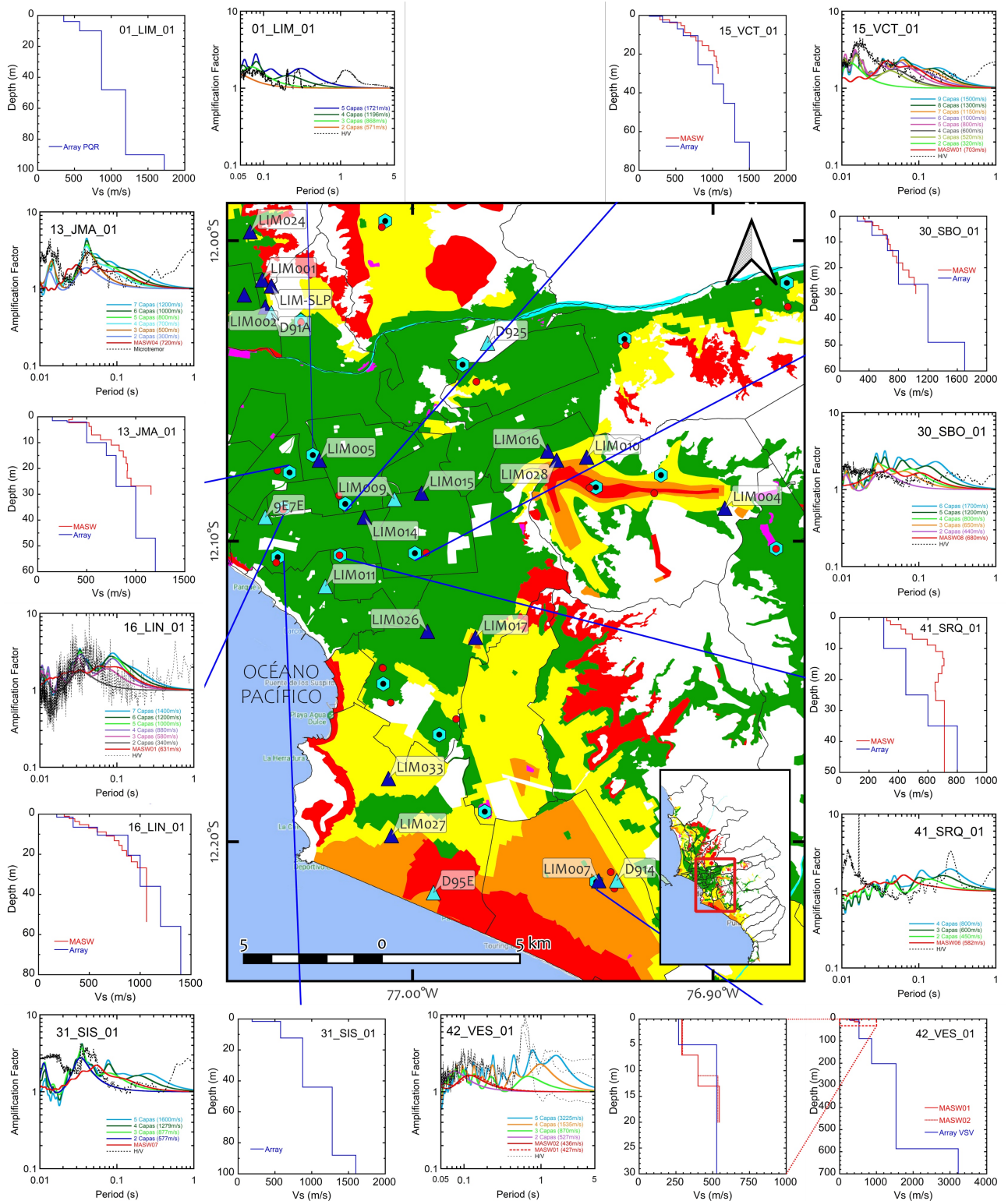


FIGURA N° 5.6: Comparación de las FT sucesivas de los perfiles sísmicos recopilados de la técnica MAM, FT del perfil superficial MASW y el espectro H/V de la medición puntual de microtremores para zona central (II) de Lima Metropolitana.

5.2.1.4 Zona sur

En la Figura N° 5.7 se incluyen los distritos de Villa el Salvador y Lurín, donde se encuentran potentes depósitos de arenas finas eólicas ligeramente húmedas, suel-

tas a media densas, y más al oeste, áreas susceptibles a licuación de suelos. En la parte meridional de Lima Metropolitana, encontramos a los distritos de Punta Hermosa, Punta Negra, San Bartolo, Santa María del Mar y Pucusana, que forman parte del litoral y están compuestas esencialmente de arenas eólicas densas y medianamente densas y rígidos depósitos de limos y arcillas. En el grupo ubicado en Villa el Salvador (42_VES_01) se identifican amplificaciones importantes en el rango de períodos largos, aquí, es evidente que sólo las FT de los perfiles profundos coinciden apropiadamente con las tendencias de los espectros H/V ($z > 200m$, $V_s > 1500m/s$). En el caso particular del grupo 29_SBA_02, la profundidad de exploración indirecta reportada tanto por la técnica MAM y MASW coinciden con el espectro H/V . En el grupo 24_PUC_01, la máxima profundidad de exploración de la técnica MAM empieza a tener similitud con el espectro H/V , al mismo tiempo sugiere una exploración indirecta más profunda. En todos los demás grupos, sólo las FT de los perfiles profundos truncados hasta estratos con una $V_s \geq 900m/s$ caracterizan apropiadamente las propiedades vibraciones de los estratos subyacentes.

5.2.2 Función de transferencia promedio ($AvTF$)

La evaluación de la $AvTF$ a diferentes profundidades para el perfil sísmico profundo y para el perfil completo superficial muestra un patrón común en todos los grupos. Como es evidente, a mayor profundidad de exploración indirecta considerada en la respuesta del suelo (es decir, mayor número de capas), mayores valores de FT son encontrados debido a importantes cambios de impedancia (ver Ecuación 5.1). En consecuencia, el área bajo la FT y el $AvTF$ aumentan, superando siempre a la $AvTF$ del perfil superficial de la técnica MASW. Así, los mayores $AvTF$ se identifican en aquellos grupos en los que se identificó la roca sísmica ($V_s \sim 3000 m/s$) como es el caso de los grupos ubicados en los distritos de La Molina, Comas, San Bartolo, La Perla, El Callao, Villa el Salvador y Bellavista, los cuales se presentan en la Figura N° 5.8.

Resulta importante señalar que, cuando se considera sólo la parte superficial, los pequeños valores de amplificación de la FT se restringen dentro del rango de períodos cortos, pero al considerar los estratos más profundos, aparecen significativas amplificaciones en períodos largos ($> 1 s$), rango que excede el límite superior de integración de la expresión original de la $AvTF$ propuesta por Sekiguchi et al.. Este tema será abordado con mayor detalle en el Capítulo VI, dándole prioridad a los grupos que se encuentren en las proximidades de una estación acelerográfica.

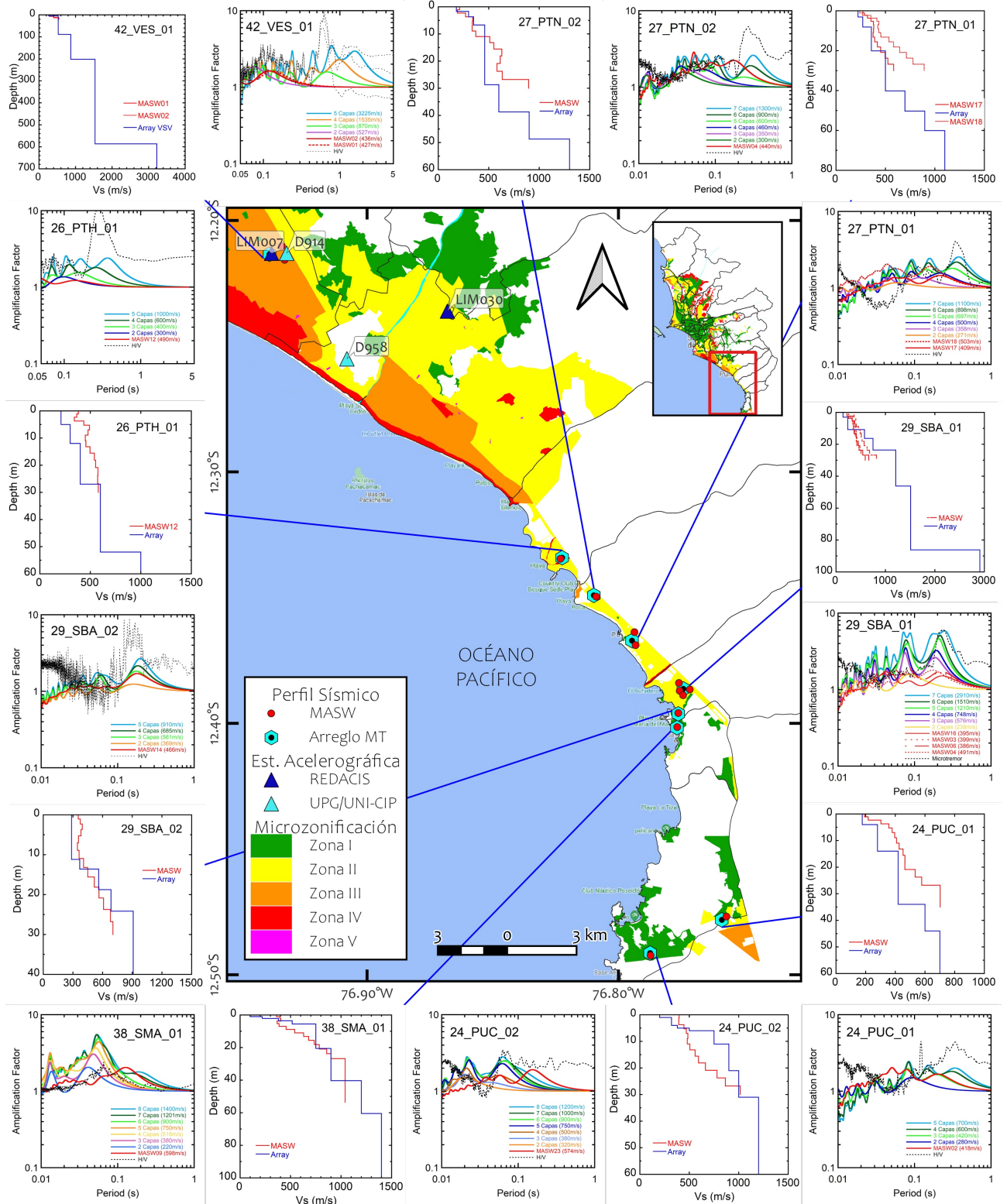


FIGURA N° 5.7: Comparación de las FT sucesivas de los perfiles sísmicos recopilados de la técnica MAM, FT del perfil superficial MASW y el espectro H/V de la medición puntual de microtremores para zona sur de Lima Metropolitana.

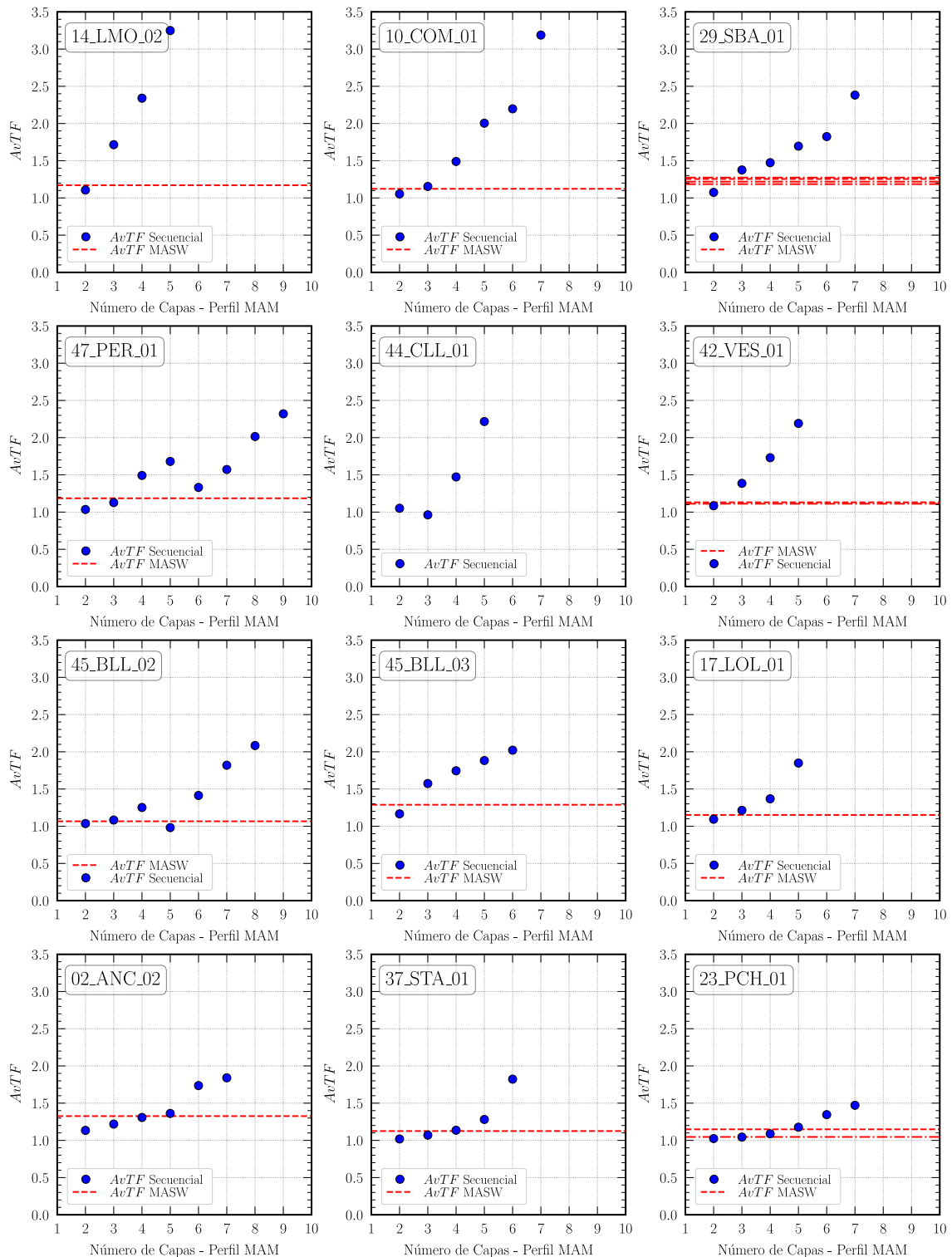


FIGURA N° 5.8: Evaluación de la $AvTF$ para las FT secuenciales de algunos perfiles profundos y FT del perfil superficial. Se presentan los perfiles profundos con los mayores valores de V_s explorados indirectamente (círculos) y $AvTF$ del perfil sísmico superficial (líneas rojas discontinuas).

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD DE LA $AvTF$ Y SU EFECTO EN LOS PERÍODOS PREDOMINANTES ESTIMADOS

La expresión original del $AvTF$ (Ecuación 2.2) propuesta por Sekiguchi et al. (2013) para perfiles obtenidos de la técnica MASW considera apropiadamente a los picos de las FT de dichos perfiles a lo largo de su rango de integración ($0.05s - 1s$). Pero como se presentó en el Capítulo V, se identificaron importantes amplificaciones en rangos de períodos largos ($> 1s$) en las FT cuando se analizan los estratos más profundos, ya que los ratios de impedancia empezaban a caracterizar adecuadamente las propiedades vibratorias de la subestructura profunda del perfil de suelo, apareciendo picos coherentes con las FT empíricas (espectros H/V).

Grupos como los presentados en la Figura N° 5.1 y la Figura N° 6.1, donde, claramente la evaluación de la $AvTF$ hasta $T = 1s$ no representaría apropiadamente un valor promedio, sugieren que se extienda el rango de integración. Así, en el presente capítulo se analiza la sensibilidad de la $AvTF$ evaluando un cociente entre $AvTF$ del perfil profundo completo y la $AvTF$ del mismo perfil, pero truncado hasta el estrato con $V_s \sim 500 m/s$, considerando distintos rangos de integración.

Se priorizan para este análisis los grupos de perfiles sísmicos que se encuentren próximos a una estación acelerográfica, para evaluar el efecto de la estructura profunda del suelo en los T_d calculados en el Capítulo IV. Se encuentra una correspondencia entre aquellos perfiles sísmicos profundos con exploraciones indirectas hasta la roca sísmica y los T_d largos identificados de las relaciones espectrales de respuesta H/V . Esto evidencia claramente la influencia de la profundidad en la respuesta sísmica del suelo y destaca la importancia de considerar la estructura profunda al caracterizar el comportamiento dinámico del suelo en estudios de microzonificación sísmica.

6.1 PERFILES SÍSMICOS SELECCIONADOS

Se seleccionaron únicamente los perfiles sísmicos profundos (presentados en la Tabla N° 3.1) que se encuentran en la misma zona de microzonificación sísmica y que están próximos a las estaciones acelerográficas mencionadas en la Tabla N° 4.1, en un rango de hasta $500 m$. En total, se han identificado 8 pares de perfiles sísmicos y estaciones acelerográficas que cumplen con estos criterios, y se presentan en la Tabla N° 6.1. El objetivo de esta selección es comparar las relaciones espectrales de respuesta H/V obtenidas a partir de vibraciones reales del terreno (sismos) con las funciones de transferencia sucesivas derivadas de las exploraciones indirectas profundas, así como sus correspondientes valores de $AvTF$.

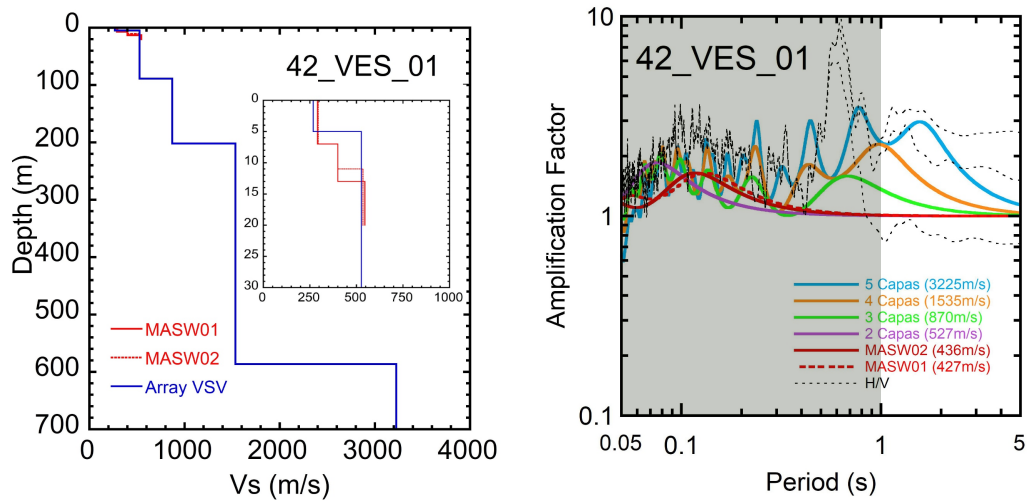


FIGURA N° 6.1: Grupo con FT sucesivas con importante amplificación en períodos largos en donde la expresión original de $AvTF$ no consideraría apropiadamente todos los picos de amplificación, la región sombreada representa los límites de la expresión original de $AvTF$.

TABLA N° 6.1: Estaciones acelerográficas y arreglos profundos cercanos.

N°	Estación Acelerográfica	Perfil Sísmico Profundo	Distrito	Distancia (m)	Zona
1	CAL001-DHN	44_CLL_01	Callao	161	III
2	CAL002-NISTA	45_BLL_03	Bellavista	130	II
3	CAL011-PRADO	47_PER_01	La Perla	103	II
4	LIM005-RESER	01_LIM_01	Cercado de Lima	301	I
5	LIM007-VES	42_VES_01	Villa el Salvador	99	III
6	LIM013-SANM	45_BLL_02	Bellavista	232	III
7	LIM023-ANCON	02_ANC_02	Ancón	493	II
8	LIM032-SCOLIVO	17_LOL_01	Los Olivos	462	II

6.2 EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LA $AvTF$

Para estimar la sensibilidad de la $AvTF$ en profundidad, se calculó el cociente entre la $AvTF$ de la profundidad total de exploración indirecta alcanzada con la técnica MAM y la $AvTF(Z_{500})$ del mismo perfil. Esto es:

$$R = \frac{AvTF(Z_{max})}{AvTF(Z_{500})} \quad (6.1)$$

Donde, Z_{500} representa el perfil profundo truncado hasta la profundidad donde la V_s esté lo más próximo al valor de 500 m/s . De esta forma, se identifica la magnitud

de $AvTF$ que se desestimaría si se considera la FT de un perfil superficial (Z_{500}) en lugar del perfil sísmico profundo completo (Z_{max}).

Es importante mencionar que en la ingeniería sísmica se suele considerar ampliaciones a partir de las FT estimadas respecto a la denominada roca estándar” ($V_s \sim 760 - 800 \text{ m/s}$ de acuerdo a Stambouli, Zendagui, Bard, y Derras (2017)). Sin embargo, en este estudio se adoptó un valor de V_s de aproximadamente 500 m/s como referencia, ya que esta velocidad fue utilizada en la primera estimación de factores de amplificación en Lima Metropolitana basada en perfiles superficiales obtenidos mediante la técnica MASW, tal como se describe en Sekiguchi et al. (2013).

A continuación, se evaluó la sensibilidad de la $AvTF$ respecto al rango de integración, para ello, se extendió el límite superior considerando aportes de ampliaciones en períodos largos, tomando como referencia la expresión original de Sekiguchi et al.:

$$AvTF \Big|_{0.05}^x = \frac{1}{x - 0.05} \int_{0.05}^x TF(T) \, dT \quad ; \quad x \in \langle 0.05; 5.00 \rangle \quad (6.2)$$

Finalmente, para cada límite superior de integración (x en s), se evaluó el cociente del $AvTF$ del perfil completo y el $AvTF$ superficial, y este último valor, es graficado respecto a $x(s)$, combinando la Ecuación 6.1 y la Ecuación 6.2:

$$R(x) = \frac{AvTF(Z_{max}) \Big|_{0.05}^x}{AvTF(Z_{500}) \Big|_{0.05}^x} \quad (6.3)$$

6.3 RESULTADOS

6.3.1 Principales formas de las gráficas de sensibilidad de la $AvTF$

Al evaluar el ratio de $AvTF$ para diferentes profundidades y rango de integración se presentan tres patrones principales. En primer lugar, la Figura N° 6.2a y la Figura N° 6.2b representan a perfiles profundos donde las FT tienen importantes ampliaciones en períodos cortos ($T < 0.6 \text{ s}$), así, al evaluar el ratio en la expresión original de $AvTF$, es decir $R(x = 1 \text{ s})$, se alcanzan valores progresivamente menores y estables, el $AvTF(Z_{max})$ representaría un valor de $20 - 40\%$ mayor al valor del perfil truncado $AvTF(Z_{500})$, luego se tiene los perfiles como 10_COM_01 (ver Figura N° 6.2c) que presentan importantes impedancias en profundidad, las que provocan

amplificaciones en $T \sim 1.0$ s, aquí considerar la expresión original del $AvTF(Z_{500})$ llevaría a considerables desestimaciones del orden de 180% en comparación del perfil completo. Finalmente, en la Figura N° 6.2d se muestra el patrón de los perfiles con importantes amplificaciones en el rango de períodos largos ($T \geq 1.0$ s), los ratio $R(x \geq 1.0$ s) muestran que la expresión original de $AvTF$ desestimaría estas amplificaciones.

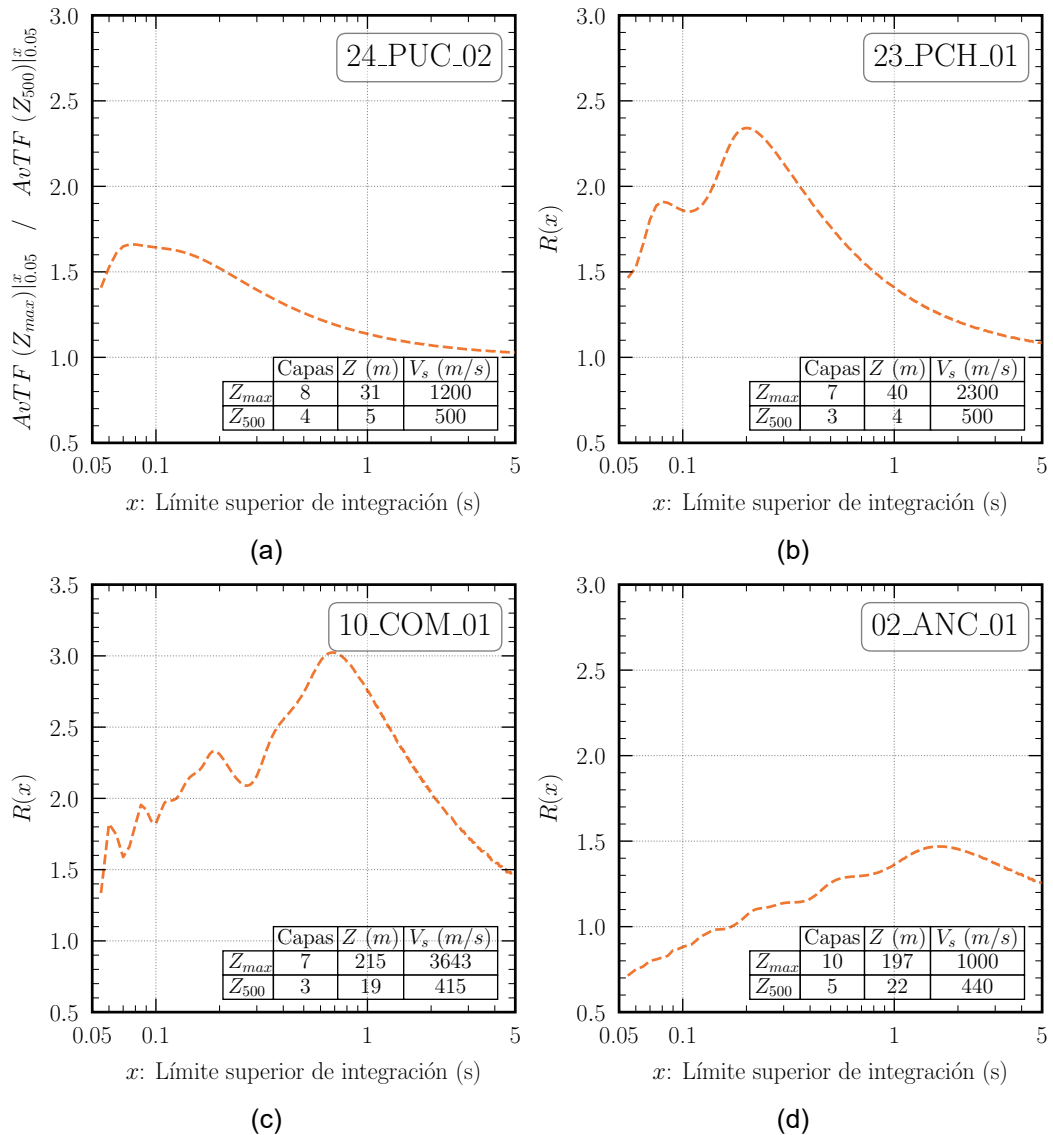


FIGURA N° 6.2: Principales formas de las gráficas de sensibilidad de $AvTF$. Las figuras (a) y (b) representan a perfiles profundos donde las FT tienen importantes amplificaciones en períodos cortos, (c) ratio de un perfil donde se presentan importantes impedancias en profundidad que reflejan amplificaciones en $T \sim 1.0$ s y (d) perfil con importantes amplificaciones en rango de períodos largos, las cuales no serían consideradas en la expresión original de $AvTF$.

6.3.2 Relación entre la $AvTF$ y los períodos predominantes T_d

El ratio R (Ecuación 6.3) usado para estimar la sensibilidad de la $AvTF$ para diferentes profundidades y límites de integración relaciona las $AvTF$ del perfil completo con una parte del perfil profundo superficial (perfil truncado Z_{500}). Como las ampliaciones en las FT atribuidas a las impedancias en profundidad no estarían del todo presentes en la FT del perfil superficial, al evaluarse el cociente, estos representarían máximos valores de ratio R en las gráficas de sensibilidad. En otras palabras, la forma y la abscisa de los máximos locales de la gráfica R y la FT del perfil sísmico completo, guardarían similitud y estos a su vez con la forma de las relaciones espectrales de respuesta H/V .

De esta forma, se identifican que 7 de los 8 los pares presentados en la Tabla N° 6.1 presentan una apropiada coherencia en forma de las relaciones espectrales de respuesta H/V y las gráficas de sensibilidad R .

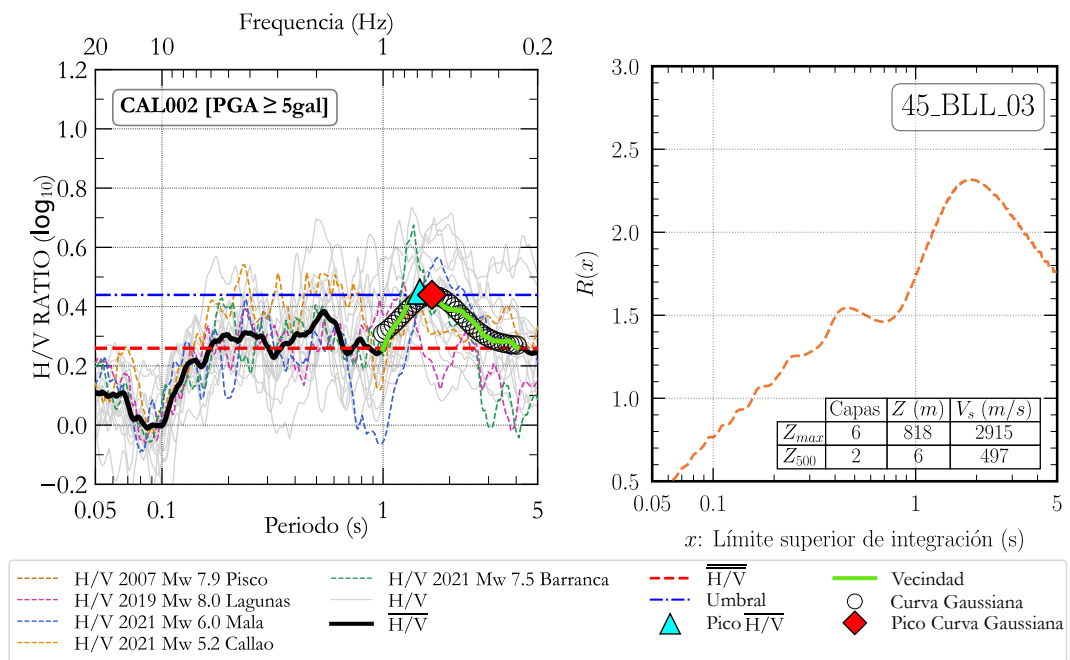


FIGURA N° 6.3: Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de $AvTF$ para la estación CAL002-NISTA.

Los T_d en el rango de períodos largos afectados por la subestructura profunda del suelo se evidencian en las estaciones CAL002, CAL011 y LIM013 (ver Figuras 6.3, 6.4 y 6.5, respectivamente). El primer T_d para la estación CAL011 se identifica en períodos largos, indiferente de la D_{epi} , PGA y M_W y está acorde con el máximo valor de ratio $R(x \sim 1.3 s)$ para el perfil profundo más cercano. De igual forma, el único T_d identificado en la estación CAL002 tiene concordancia con el máximo valor de ratio R en $x \sim 1.6 s$. Finalmente, el perfil 45_BLL_02, con la tercera mayor profundidad de exploración indirecta de la base de datos (265.8 m), presenta una

adecuada representación de las características vibracionales de los estratos profundos sobre los que se ubica la estación LIM013, al tener máximos locales con valores consistentes entre las gráficas de sensibilidad y las relaciones espectrales de respuesta H/V .

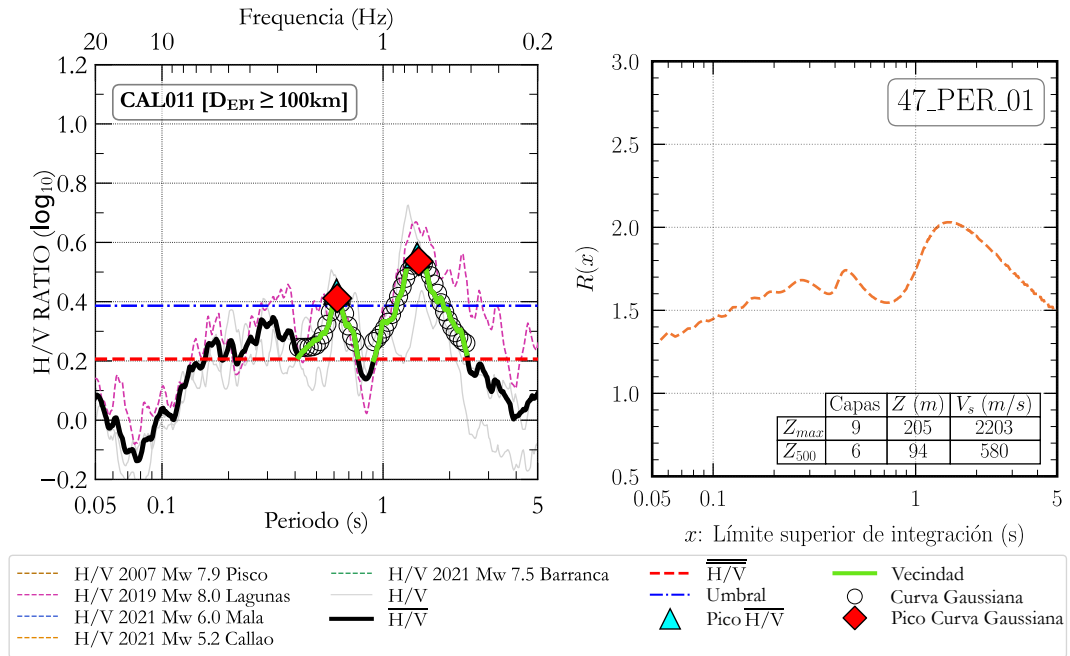


FIGURA N° 6.4: Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de $AvTFY$ para la estación CAL011-PRADO.

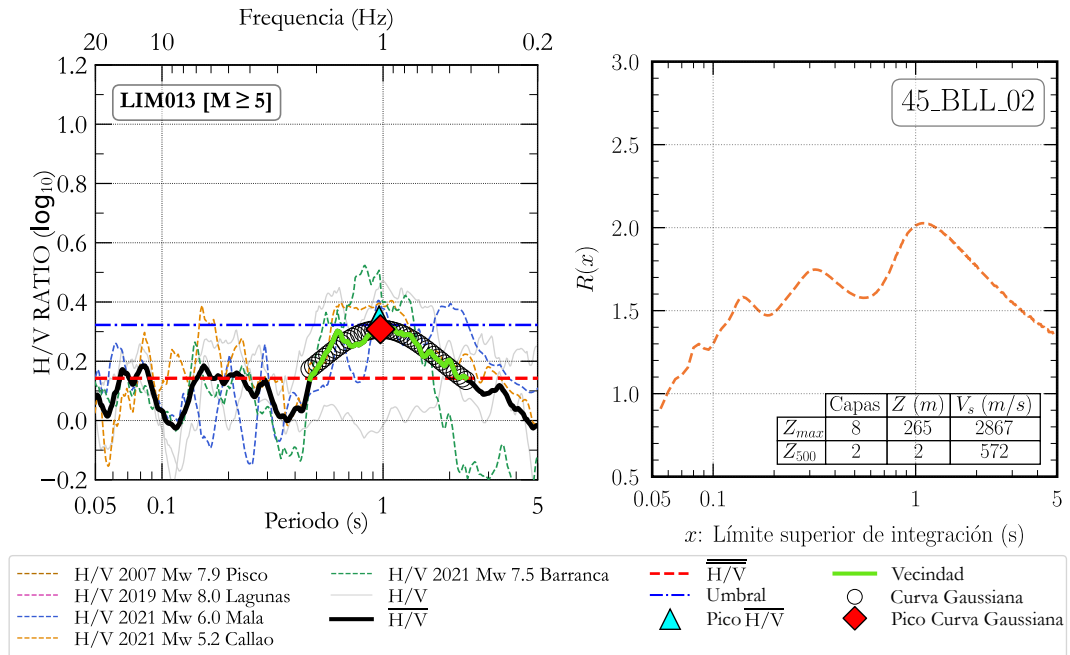


FIGURA N° 6.5: Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de $AvTFY$ para la estación LIM013-SANM.

Con referencia a la estación CAL001, a pesar de la prolongación indirecta del perfil MAM realizada por Calderón et al. (2011) para superar las limitaciones de espacio dadas por su ubicación geográfica que no permiten realizar arreglos de mayor radio de apertura, el ratio de impedancia en profundidad no reflejaría por completo las características vibratorias del suelo subyacente (ver Figura N° 6.6), pero la forma obtenida en el ratio R sugiere que existiría similitud si el perfil 44_CLL_01 pudiera alcanzar una mayor profundidad de exploración indirecta. Esto significa que, aunque se haya realizado la prolongación indirecta del perfil MAM, es posible que aún falte información crucial sobre las propiedades del suelo en profundidad.

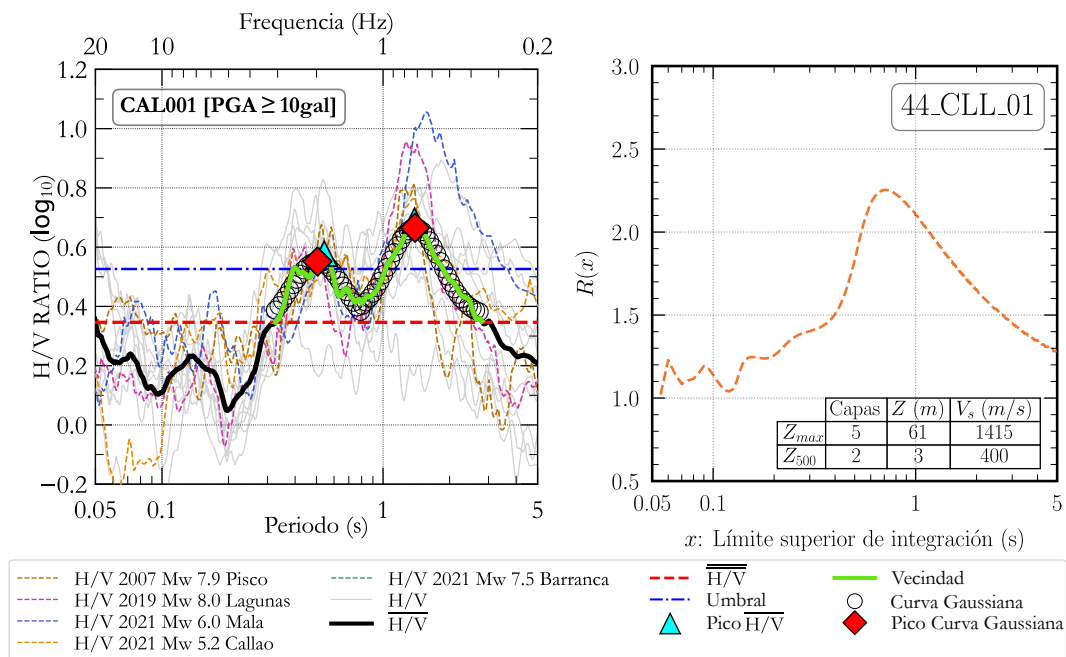


FIGURA N° 6.6: Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de $AvTFY$ para la estación CAL001-DHN.

Los potentes estratos de arenas finas eólicas ligeramente húmedas, sueltas a media densas (cuya compacidad aumenta con la profundidad) presentes cerca a LIM007 y el perfil MAM 42_VES_01 (~ 99 m de separación entre ellos) deberían poseer largos T_d . Al comparar sus resultados en la Figura N° 6.7 se aprecia un contraste entre el máximo valor del ratio R para $x \sim 2$ s) y el $T_d = 0.8$ s (se presenta el resultado de los eventos sísmicos con $D_{epi} \geq 100$ km, ya que tendrían mayor probabilidad de excitar la estructura profunda del suelo y reflejar su comportamiento dinámico). Esta diferencia podría deberse a incertidumbres en los resultados obtenidos en el perfil VSV, en efecto Calderón et al. (2011) describen una discontinuidad en la curva de dispersión entre $0.5 - 1.5$ s debido a la baja potencia del espectro de Fourier en este rango de períodos al momento de realizar la técnica MAM. Aun así, los espectros H/V tanto de la medición puntual de microtemores (ver Figura N° 6.1) como de las relaciones espectrales de respuesta muestran valores congruentes de T_d .

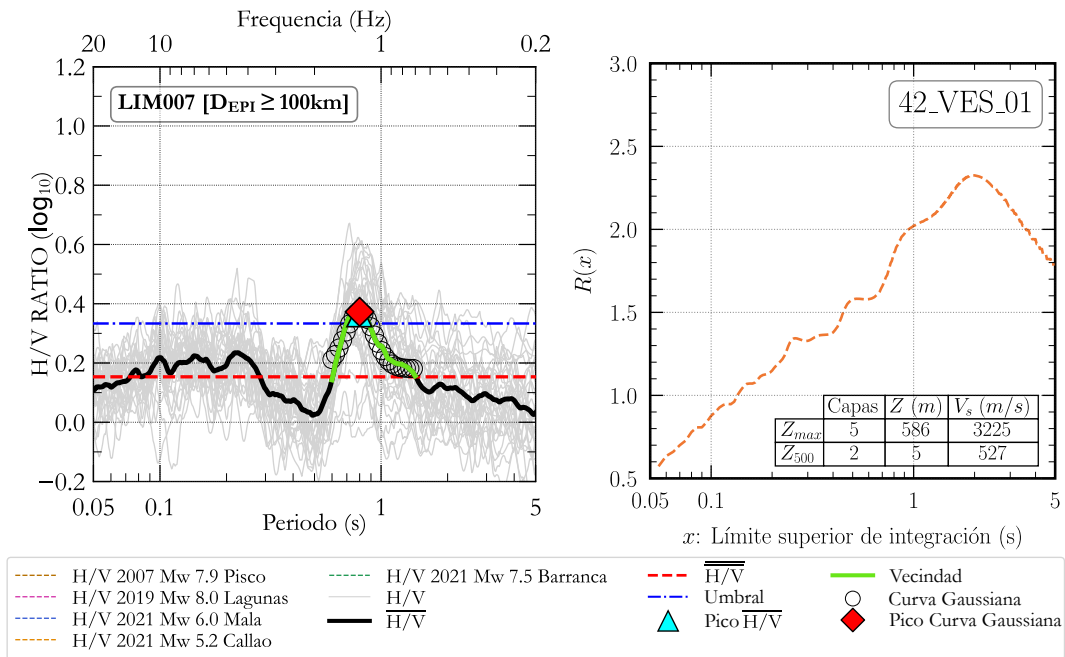


FIGURA N° 6.7: Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de $AvTFY$ para la estación LIM007-VES.

Las estaciones sísmicas acelerográficas LIM005 (ver Figura N° 6.8), LIM023 (ver Figura N° 6.9) y LIM032 (ver Figura N° 6.10) muestran el aporte de la subestructura profunda del suelo en períodos cortos e intermedios. En el caso de la estación LIM005, se identifica un leve máximo local en $T \sim 1 s$, es presumible que una profundidad de exploración indirecta mayor ($z \geq 90 m$) refleje este pico en el ratio R , tal como lo hace para los otros 2 picos en períodos más cortos. Por su parte, los perfiles profundos cercanos a las estaciones LIM023 y LIM032 alcanzarían profundidades con ratios de impedancia capaces de reflejar los máximos valores del ratio R y los T_d de su respectiva estación, en estos casos la estructura profunda de suelo podría ser caracterizada con los estratos de $z \leq 65m$.

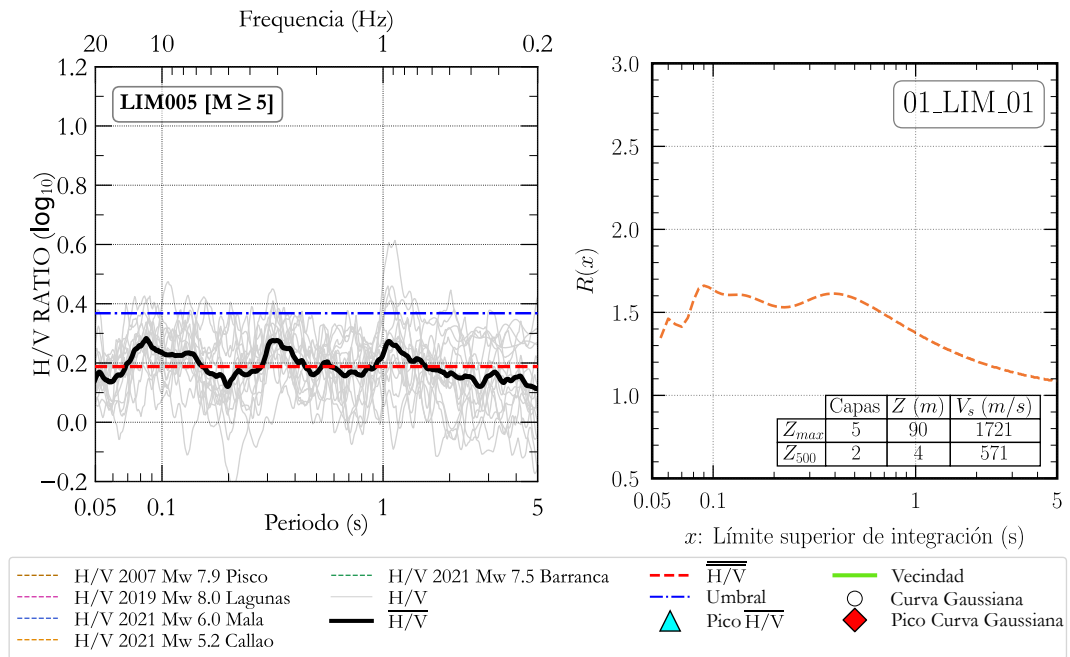


FIGURA N° 6.8: Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de $AvTFY$ para la estación LIM005-RESER.

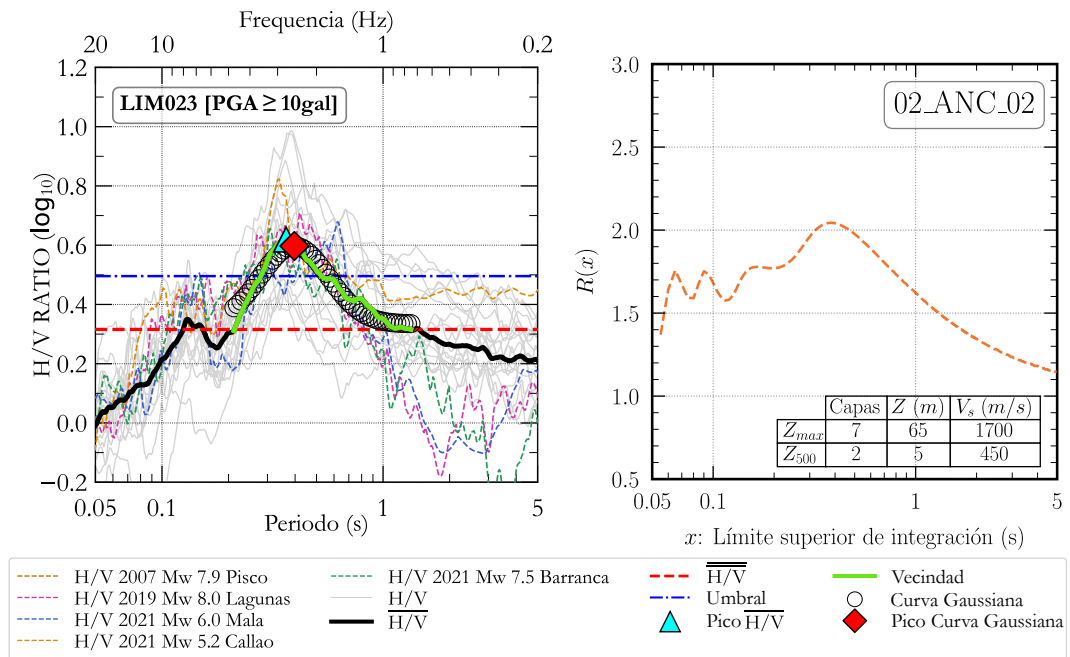


FIGURA N° 6.9: Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de $AvTFY$ para la estación LIM023-ANCON.

Finalmente, a pesar de que no se encuentre una estación cercana al perfil profundo 02_ANC_01 (ver Figura N° 6.2d), la gráfica de sensibilidad presenta el patrón con el máximo cociente R en periodos largos ($x \sim 1.8$ s), el cual podría deberse a importantes impedancias en profundidad identificadas por el alcance de la exploración

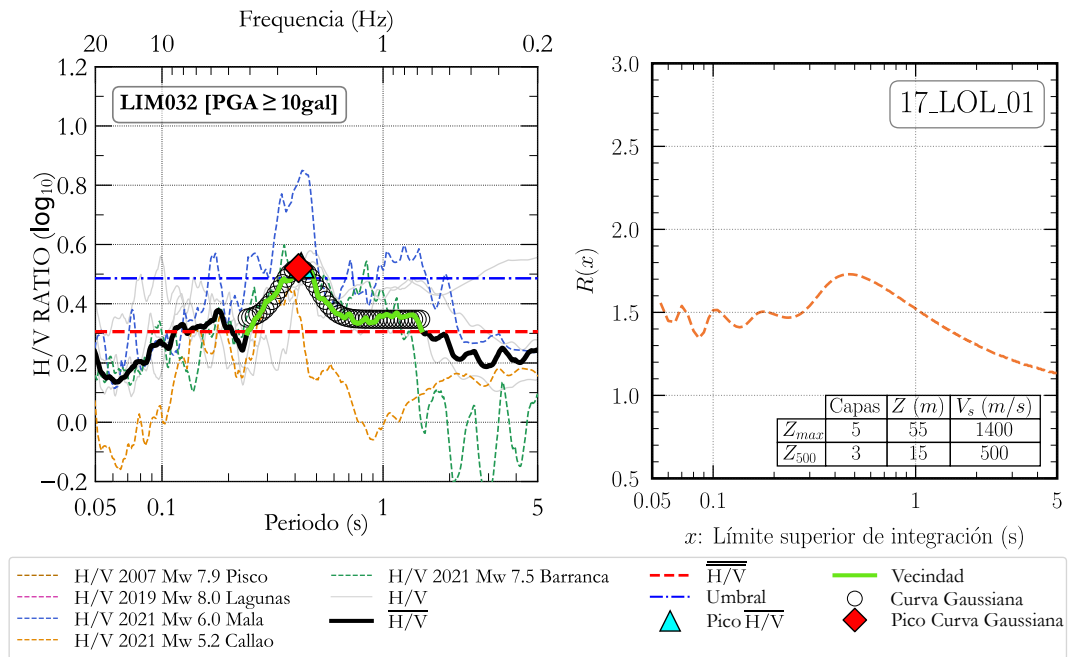


FIGURA N° 6.10: Comparación del T_d identificado de los ratios espectrales de respuesta H/V y la gráfica de sensibilidad de $AvTF$ para la estación LIM032-SCOLIVO.

indirecta realizada. Se sugiere la implementación de una estación acelerográfica en esta zona que permita corroborar el comportamiento dinámico del suelo con vibraciones reales de terreno y compararla con el espectro H/V de vibraciones ambientales (que de antemano muestra un $T_d > 1$ s, ver Figura N° 5.1).

CONCLUSIONES

1. Los períodos dominantes de vibración del suelo (T_d) fueron calculados por medio de las relaciones espectrales de respuesta H/V para 2075 registros sísmicos en 51 estaciones de la ciudad de Lima. La metodología aplicada proporciona una buena estimación de los valores de T_d debido al efecto de suavizado inherente de utilizar espectros de respuesta de pseudo-aceleración (PSA al 5% de amortiguamiento crítico). Se pudo determinar claramente los períodos pico para el 76,5% de las estaciones sísmicas acelerográficas (39 de 51). No fue posible identificar T_d en estaciones que tenían formas particulares en su respectiva relación espectral de respuesta H/V (por ejemplo, espectros con múltiples picos no significativos o planos) o cuando no se disponía de al menos tres registros sísmicos por criterio de agrupamiento.
2. Se observaron formas espectrales con dos picos en las áreas costeras de la provincia Constitucional del Callao, con un T_d en la vecindad de $T \sim 1.0$ s. Aquó el suelo subyacente consiste en depósitos arcillosos/arenosos y regiones con un importante contraste de impedancia en la parte más profunda de la subestructura. Estos valores disminuyen hacia el centro de la ciudad coincidiendo con los depósitos superficiales de grava (conglomerado de Lima) de mejor densidad.
3. Los valores de T_d identificados son consistentes, en la mayoría de los casos, con los períodos sugeridos en el mapa de microzonificación sísmica vigente. Así, la comparación entre los valores identificados de T_d y los rangos de períodos esperados en las estaciones según su ubicación en el mapa de microzonificación muestra que hay una buena concordancia en el 47% de los casos, mientras que el 43% de los valores T_d se encuentran en el rango de la siguiente zona desfavorable. Además, en el 10% de las estaciones, los picos predominantes no superaron el umbral definido.
4. Se adoptaron criterios de selección y agrupamiento de registros que incluyen valores mínimos de distancia epicentral, magnitud momento y PGA. Las relaciones espectrales la respuesta H/V promedio ($\overline{H/V}$) no cambian significativamente. Sin embargo, las amplitudes varían, alternando el orden de importancia de los períodos dominantes cortos y largos para algunas estaciones. Esto se observa principalmente en los registros de campo lejano ($D_{epi} \geq 100$ km) y en los eventos de mayor magnitud ($M_W \geq 5.0$).
5. De las 51 estaciones analizadas, la estación LIM009-BORJA podría ser considerada una estación de referencia para futuros estudios, debido a la forma plana de su relación espectral de respuesta H/V a lo largo del ancho de ban-

- da analizado en este estudio, además por poseer una considerable rigidez al corte ($V_{s30} > 750m/s$).
6. La sensibilidad de las funciones de transferencia (FT) de 48 perfiles sísmicos profundos recopilados, obtenidos de la técnica de arreglo de microtemores (MAM), fue analizada. Se formaron grupos comparativos que incluían al perfil profundo, perfiles superficiales de la técnica MASW y relaciones espectrales H/V de la medición puntual de microtemores cercanos entre sí. La sensibilidad se evaluó en profundidad calculando la FT de perfiles profundos truncados sucesivamente hasta determinado número de estratos, es decir, en cada FT se redefinía la profundidad donde iniciaba el espacio semi-infinito. Las FT sucesivas del perfil profundo MAM, la FT del perfil superficial completo MASW y la FT empírica H/V , fueron comparadas gráfica y numéricamente (la comparación numérica no aplica al espectro H/V) a través de la función de transferencia promedio ($AvTF$) en cada grupo.
 7. La comparación gráfica realizada muestra que solo en los grupos localizados en depósitos óptimos (de acuerdo a la microzonificación sísmica), que consisten principalmente en gravas aluviales conocidas como conglomerado, tanto las FT secuenciales como la FT del perfil obtenida con la técnica MASW pueden representar adecuadamente el comportamiento vibratorio de los estratos subyacentes. Sin embargo, en cualquier otro caso, la respuesta dinámica del suelo está principalmente gobernada por los ratios de impedancia presentes a una profundidad mayor, que no pueden ser explorados mediante la técnica MASW. Esto indica que en áreas con depósitos diferentes a los conglomerados, se requiere una exploración indirecta más profunda para comprender mejor la respuesta sísmica del suelo.
 8. Se encontraron menores valores de $AvTF$ y las mayores amplificaciones se inclinan al rango de períodos cortos ($< 1 s$) cuando se consideraron sólo las capas superficiales. Por el contrario, los valores de $AvTF$ son mayores, aumentan sucesivamente y las formas de las FT son gradualmente coherentes con la de los espectros H/V conforme se analiza la parte más profunda debido a importantes ratios de impedancia presentes a partir de determinado estrato. Los mayores valores de $AvTF$ se reportan en los perfiles en donde se identificó la roca sísmica ($V_s \sim 3000 m/s$). Estos últimos en su mayoría presentan importantes amplificaciones en el rango de períodos largos ($T > 1 s$), evidenciando que el límite superior de integración de la expresión original de la $AvTF$ (que fue formulada para la FT de perfiles MASW) no los caracterizaría apropiadamente.
 9. La sensibilidad de la $AvTF$ fue analizada en el último capítulo. Para ello se realizó el cómputo de un cociente (R) entre $AvTF$ del perfil sísmico profun-

do completo y la $AvTF$ del mismo perfil, pero truncado hasta el estrato con $V_s \sim 500 \text{ m/s}$ (parte superficial del perfil profundo), considerando distintos rangos de integración. Con el propósito de comparar las relaciones espectrales de respuesta H/V de vibraciones reales del terreno (sismos) con las FT sucesivas de exploraciones indirectas profundas y sus respectivas $AvTF$ se priorizó para este análisis los grupos de perfiles sísmicos que se encontrasen próximos a una estación acelerográfica ($D \leq 500 \text{ m}$ y misma zona de microzonificación sísmica), identificándose así 8 pares comparativos.

10. Las gráficas de sensibilidad R entre los perfiles sísmicos profundos con exploraciones indirectas hasta la roca sísmica y los T_d largos identificados de las relaciones espectrales de respuesta H/V presentan apropiada coherencia en los perfiles ubicados en la provincia Constitucional del Callao. A pesar de que la metodología adoptada no permita identificar un T_d debido al umbral, se aprecia una similitud entre los máximos locales y la forma entre las gráficas R y H/V en 7 de los 8 grupos comparativos. Evidenciando así la influencia de la profundidad en la respuesta sísmica del suelo.
11. Se observó que los perfiles sísmicos excepcionalmente profundos ubicados en los distritos de La Perla, Comas y Bellavista, los cuales se exploraron indirectamente en suelos rígidos, presentaron un impacto significativo en la forma de los espectros H/V y en las FT sucesivas. Estos perfiles mostraron una respuesta considerable en el rango de períodos largos ($T_d \sim 1.0 \text{ s}$), especialmente aquellos cercanos a una estación sísmica acelerográfica como La Perla y Bellavista. El perfil sísmico ubicado en Ancón también mostró un patrón similar. Por lo tanto, se recomienda la instalación de equipos acelerográficos que permitan verificar la respuesta en períodos largos en los distritos de Comas y Ancón.
12. Se encontró que al considerar la FT de un perfil superficial (Z_{500}) en lugar del perfil sísmico profundo completo (Z_{max}) en la expresión original de $AvTF$ (integración entre $0.05 - 1 \text{ s}$), se desestimaría aproximadamente el 180% de la magnitud de $AvTF$ en un perfil sísmico profundo de Comas. Por otro lado, los perfiles MAM ubicados en los distritos de El Callao, Bellavista, La Perla, Villa El Salvador y Ancón mostraron su máximo valor de $AvTF$ en rangos de integración mayores a 1 s .

RECOMENDACIONES

1. Los resultados obtenidos en esta tesis pueden ser utilizados para futuras actualizaciones del mapa de microzonificación sísmica de Lima Metropolitana y para la estimación de perfiles de velocidad de ondas de corte fiables mediante procedimientos de *joint inversion*. Otros análisis pueden considerar la comparación de la relación espectral de respuesta H/V estimada con las obtenidas a partir de los registros de vibración ambiental y la recopilación de información de la red acelerográfica del IGP.
2. A pesar del considerable aumento de instrumentación sísmica en los últimos años, el número de estaciones acelerográficas actuales podrían no caracterizar apropiadamente todos suelos de Lima. Así, se exhibe la falta de información en lugares asentados sobre condiciones particulares de suelo, como potentes depósitos arenosos o suelos pantanosos. Se recomienda encarecidamente la instalación de instrumentación sísmica en puntos estratégicos de la ciudad que permitan obtener una comprensión más completa del comportamiento dinámico del suelo, para ser utilizada en futuros estudios y proyectos de ingeniería.
3. Dada la eficacia de las razones espectrales de respuesta (H/V) en caracterizar apropiadamente las propiedades vibratorias de estructura profunda del suelo, se sugiere considerar la incorporación del T_d como parámetro complementario al convencional V_{s30} en el Reglamento Nacional de Edificaciones E.030 Diseño Sismorresistente. Esta inclusión permitiría una mejor evaluación del riesgo sísmico y un diseño más preciso de estructuras en Lima Metropolitana, siguiendo las recomendaciones y estándares utilizados en otros países que han adoptado esta práctica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, Z., y Alva, J. (2005). *Microzonificación Sísmica De Lima*. Descargado de https://jorgealvahurtado.com/files/redacis32_p.pdf
- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415-456. Descargado de <https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/43280/>
- Arce, J. (1984). Estructura geoelectrica del subsuelo Rimac-Chillón. *Sociedad Geológica del Perú*.
- Argus, D. F., Gordon, R. G., y DeMets, C. (2011, 11). Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12, n/a-n/a. doi: 10.1029/2011GC003751
- ASCE7-16. (2017). *American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*.
- Asten, M. W., y Hayashi, K. (2018, 7). Application of the Spatial Auto-Correlation Method for Shear-Wave Velocity Studies Using Ambient Noise. *Surveys in Geophysics*, 39, 633-659. doi: 10.1007/s10712-018-9474-2
- Borcherdt, R. D. (1994, 11). Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification). *Earthquake Spectra*, 10, 617-653. doi: 10.1193/1.1585791
- British Standards Institution. (1998). Eurocode 8 : Design provisions for earthquake resistance of structures. *Design*.
- Calderón, D., Aguilar, Z., Lazares, F., Alarcon, S., y Quispe, S. (2014). Development of a seismic microzoning map for Lima city and Callao, Peru. *Journal of Disaster Research*, 9. doi: 10.20965/jdr.2014.p0939
- Calderón, D., Lazares, F., Aguilar, Z., Sekiguchi, T., y Nakai, S. (2011). Estimation of Deep Soil Profiles in Lima Peru. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5. doi: 10.17265/1934-7359/2011.07.006
- Capon, J. (1969). High-resolution Frequency-Wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57, 1408-1418. doi: 10.1109/PROC.1969.7278
- CAPRA. (2019). *Magnitude 8 deep earthquake strikes northern Peru*.
- Cho, I., Tada, T., y Shinozaki, Y. (2004, 11). A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms. *GEOPHYSICS*, 69, 1535-1551. doi: 10.1190/1.1836827
- Chopra, A. (1995). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (6.^a ed.). Prentice Hall.

- CISMID. (2005). *Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en 42 distritos de Lima y Callao*.
- Ghofrani, H., y Atkinson, G. M. (2014, 12). Site condition evaluation using horizontal-to-vertical response spectral ratios of earthquakes in the NGA-West 2 and Japanese databases. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 30-43. doi: 10.1016/j.soildyn.2014.08.015
- Gonzales, C., Sifuentes, S., Lazares, F., Quispe, S., y Huerta, K. (2020). V_s Profiles, H/V Spectra And Geotechnical Classification As Proxies Of The Soil Dynamic Behavior In Lima, Peru. *17 World Conference on Earthquake Engineering*.
- Hassani, B., y Atkinson, G. M. (2016, 2). Applicability of the Site Fundamental Frequency as a V_{s30} Proxy for Central and Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, 653-664. Descargado de <https://doi.org/10.1785/0120150259> doi: 10.1785/0120150259
- Instituto Geofísico del Perú [IGP]. (2019). *Mapa Sísmico del Perú periodo 1960- 2019*. Descargado de https://ultimosismo.igp.gob.pe/img/mapas_sismicos/B1_2019_c.pdf?v=15672118
- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (2019). *Provincia de Lima: Compendio Estadístico*. Descargado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1714/Libro.pdf
- Kawase, H. (2006). Site effects derived from spectral inversion method for K-NET, KiK-net, and JMA strong motion network with special reference to soil nonlinearity in high PGA records. *Bulletin of the Earthquake Research Institute = Tokyo Daigaku Jishin Kenkyusho Iho*, 81, 309-315.
- Kawase, H., Sanchez-Sesma, F. J., y Matsushima, S. (2011, 10). The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse-Field Theory for Plane Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 2001-2014. doi: 10.1785/0120100263
- Koketsu, K., y Miyake, H. (2008, 4). A seismological overview of long-period ground motion. *Journal of Seismology*, 12, 133-143. doi: 10.1007/s10950-007-9080-0
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall.
- Lermo, J., y Chávez-García, F. J. (1993, 10). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 1574-1594. doi: 10.1785/BSSA0830051574
- Luzi, L., Puglia, R., Pacor, F., Gallipoli, M. R., Bindi, D., y Mucciarelli, M. (2011, 12). Proposal for a soil classification based on parameters alternative or complementary to V_{s30} . *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 1877-1898. doi: 10.1007/s10518-011-9274-2

- Martínez, A., y Porturas, F. (1975). Planos Geotécnicos para Lima, Perú. Análisis y Visión en Ingeniería Sísmica. *Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.*
- Ministerio de Vivivenda Construcción Saneamiento [MVCS]. (2018). Reglamento Nacional de Edificaciones E.030 Diseño Sismorresistente. *Diario El Peruano.*
- Motazedian, D., Banab, K. K., Hunter, J. A., Sivathayalan, S., Crow, H., y Brooks, G. (2011, 12). Comparison of Site Periods Derived from Different Evaluation Methods. *Bulletin of the Seismological Society of America, 101*, 2942-2954. doi: 10.1785/0120100344
- Nakamura, Y. (1989). Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan)*, 30.
- Okada, H., y Suto, K. (2003). *The Microtremor Survey Method*. Society of Exploration Geophysicists. doi: 10.1190/1.9781560801740
- Palacios, O., Caldas, J., y Vela, C. (1992). Geología de los Cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica. *Boletín del INGEMMET.*
- Pando, M., Cano, L., Suárez, L., Ritta, J., y Montejo, L. (2008). Comparison of Site Fundamental Period Estimates Using Weak-Motion Earthquakes and Microtremors..
- Park, C. B., Miller, R. D., y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics, 64*. doi: 10.1190/1.1444590
- Quispe, S., Chimoto, K., Yamanaka, H., Tavera, H., Lazares, F., y Aguilar, Z. (2014, 12). Estimation of S-Wave Velocity Profiles at Lima City, Peru Using Microtremor Arrays. *Journal of Disaster Research, 9*, 931-938. doi: 10.20965/jdr.2014.p0931
- Roux, J. P. L., Correa, C. T., y Alayza, F. (2000). Sedimentology of the Rimac-Chillon alluvial fan at Lima, Peru, as related to Plio-Pleistocene sea-level changes, glacial cycles and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences, 13*. doi: 10.1016/S0895-9811(00)00044-4
- Safak, E. (2001, 7). Local site effects and dynamic soil behavior. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21*, 453-458. doi: 10.1016/S0267-7261(01)00021-5
- Sekiguchi, T., Calderón, D., Nakai, S., Aguilar, Z., y Lazares, F. (2013). Evaluation of surface soil amplification for wide areas in Lima, Peru. *Journal of Disaster Research, 8*. doi: 10.20965/jdr.2013.p0259
- Silgado, E. (1978). *Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 - 1974)*. Descargado de <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20500.12544/251#files>

- Soto, J. (2021). *Factores de Amplificación en la Ciudad de Lima Mediante el Análisis de Respuesta de Sitio* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Soto, J., y Alva, J. E. (2023). Estimation of Deep S-Wave Velocity Profile Using Seismic Records Case of Lima, Peru. En M. Karkush, D. Choudhury, y J. Han (Eds.), *Current trends in geotechnical engineering and construction* (pp. 421–432). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Stambouli, A. B., Zendagui, D., Bard, P.-Y., y Derras, B. (2017, 12). Deriving amplification factors from simple site parameters using generalized regression neural networks: implications for relevant site proxies. *Earth, Planets and Space*, 69, 99. doi: 10.1186/s40623-017-0686-3
- Stewart, J. P., Chiou, S.-J., Bray, J. D., Graves, R. W., Somerville, P. G., y Abrahamson, N. A. (2002). Ground motion evaluation procedures for performance-based design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9), 765-772. doi: [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00097-0](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00097-0)
- Strobbia, C. (2003). *Surface Wave Methods Acquisition, processing and inversion*. Dottorato di Ricerca in Geingegneria Ambientale.
- Tada, T., Cho, I., y Shinozaki, Y. (2007, 12). Beyond the SPAC Method: Exploiting the Wealth of Circular-Array Methods for Microtremor Exploration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 2080-2095. doi: 10.1785/0120070058
- Terrasolutions Perú. (2018). *Servicio de Consultoría Para Ejecución del Estudio Caracterización Geotécnica y Geofísica de Estaciones Acelerométricas del SENCICO*. Descargado de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1058210/Informe_Lima.pdf
- Verdugo, R. (2019, 9). Seismic site classification. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124, 317-329. doi: 10.1016/j.soildyn.2018.04.045
- Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., y Nocquet, J. M. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121. doi: 10.1002/2016JB013080
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., ... Vázquez-Baeza, Y. (2020, 3). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261-272. doi: 10.1038/s41592-019-0686-2
- Yamanaka, H., Quispe, S., Yamanaka, H., Chimoto, K., Tavera, H., Aguilar, Z., ... Calderón, D. (2016). Evaluation of local site amplification in Lima, Peru from ground motion data..

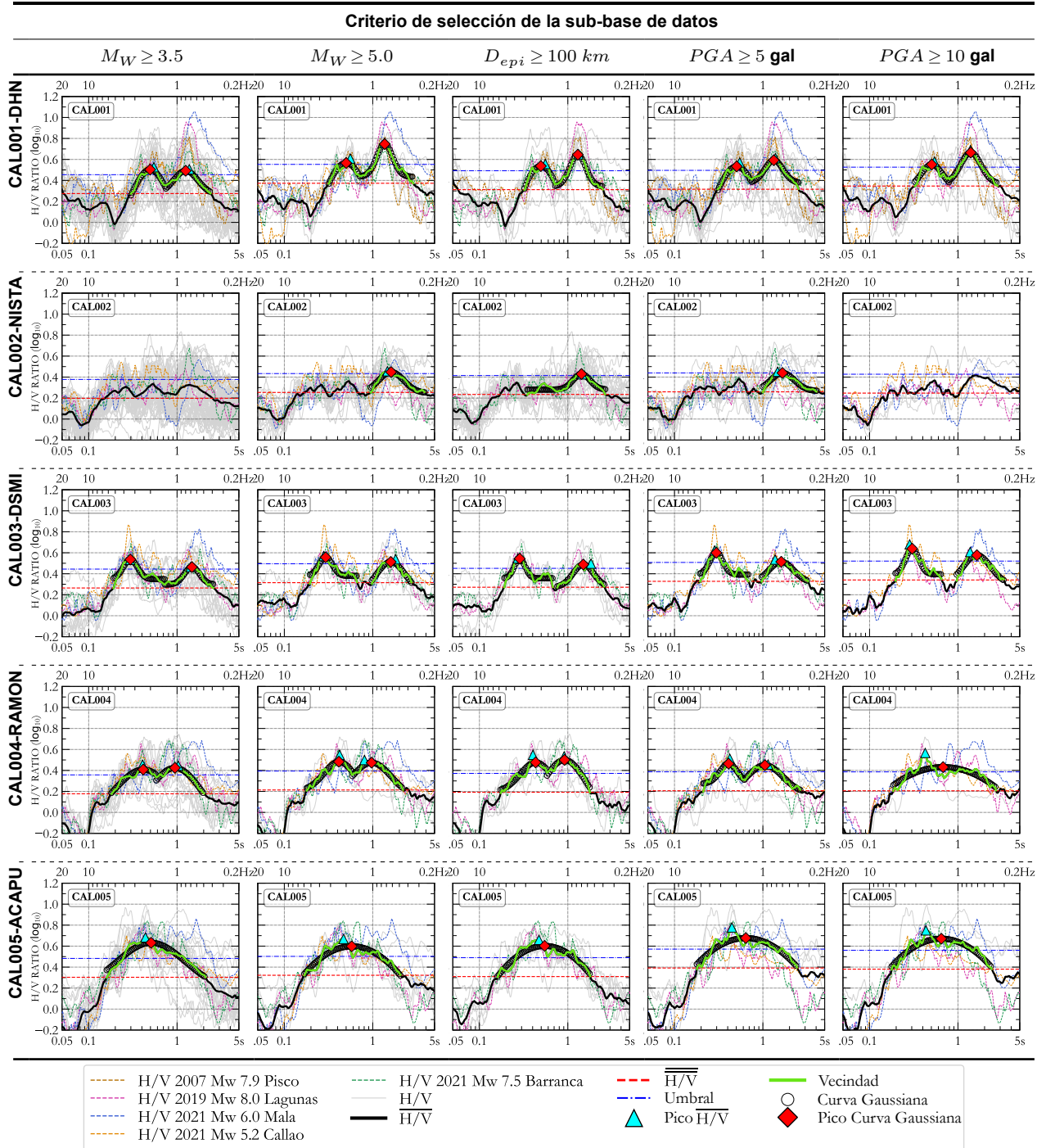
- Yamazaki, F., y Ansary, M. A. (1997). Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26. doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(199707)26:7<671::AID-EQE669>3.0.CO;2-S
- Yamazaki, F., Zavala, C., Nakai, S., Koshimura, S., Saito, T., Midorikawa, S., ... Bisbal, A. (2014, 12). Summary Report of the SATREPS Project on Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation Technology in Peru. *Journal of Disaster Research*, 9, 916-924. doi: 10.20965/jdr.2014.p0916
- Yoshida, N. (2015). *Seismic Ground Response Analysis* (Vol. 36). Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-94-017-9460-2
- Zhao, J. X. (2006, 6). An Empirical Site-Classification Method for Strong-Motion Stations in Japan Using H/V Response Spectral Ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 914-925. doi: 10.1785/0120050124
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., ... Fukushima, Y. (2006, 06). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913. Descargado de <https://doi.org/10.1785/0120050122> doi: 10.1785/0120050122

ANEXOS

ANEXO A: ESPECTROS H/V OBTENIDOS POR ESTACIONES Y CRITERIOS	98
ANEXO B: LISTA DE EVENTOS USADOS EN EL ESTUDIO	107

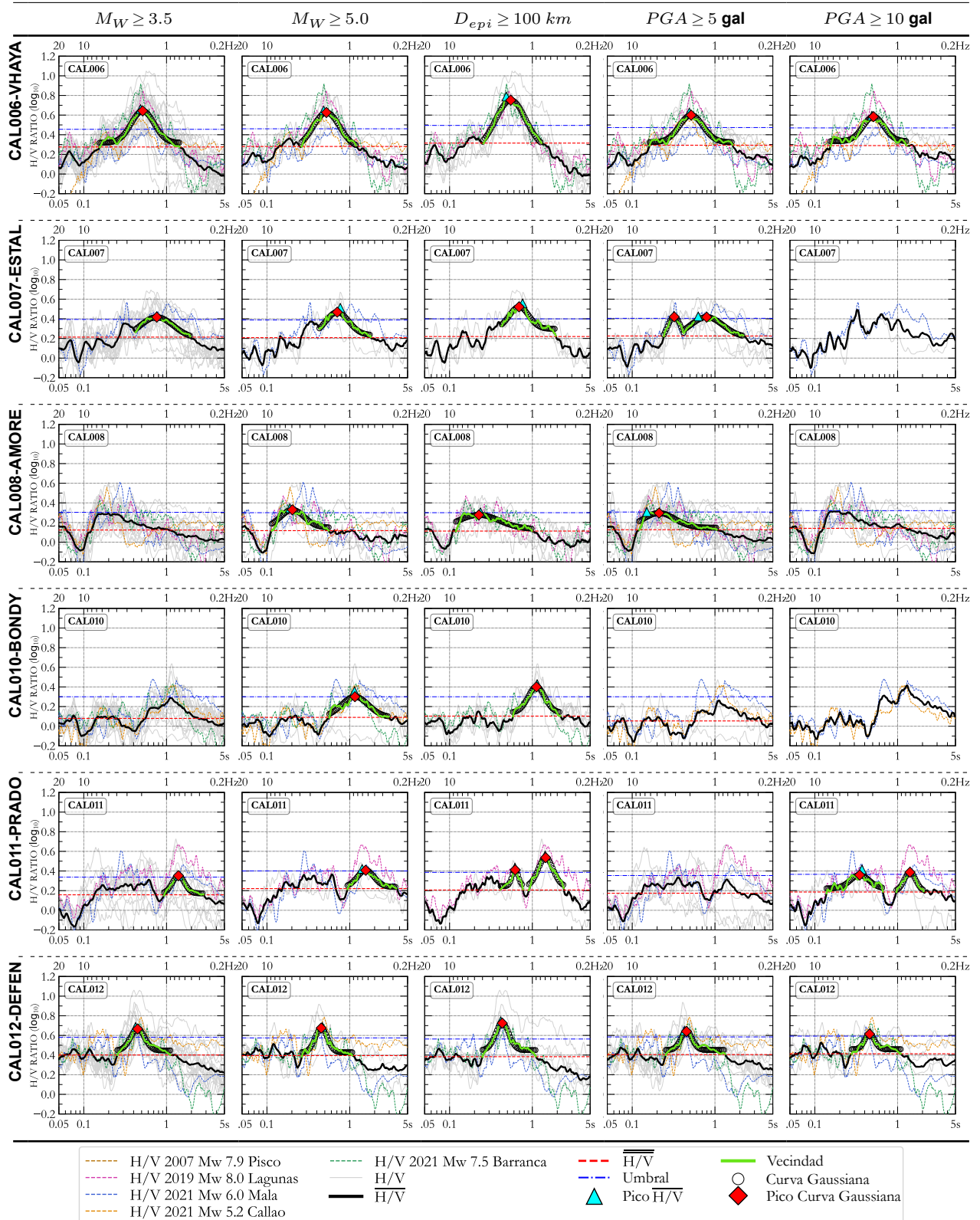
ANEXO A: ESPECTROS H/V OBTENIDOS POR ESTACIONES Y CRITERIOS

TABLA N° A.1: Resumen de los valores de T_d por criterio y estación.



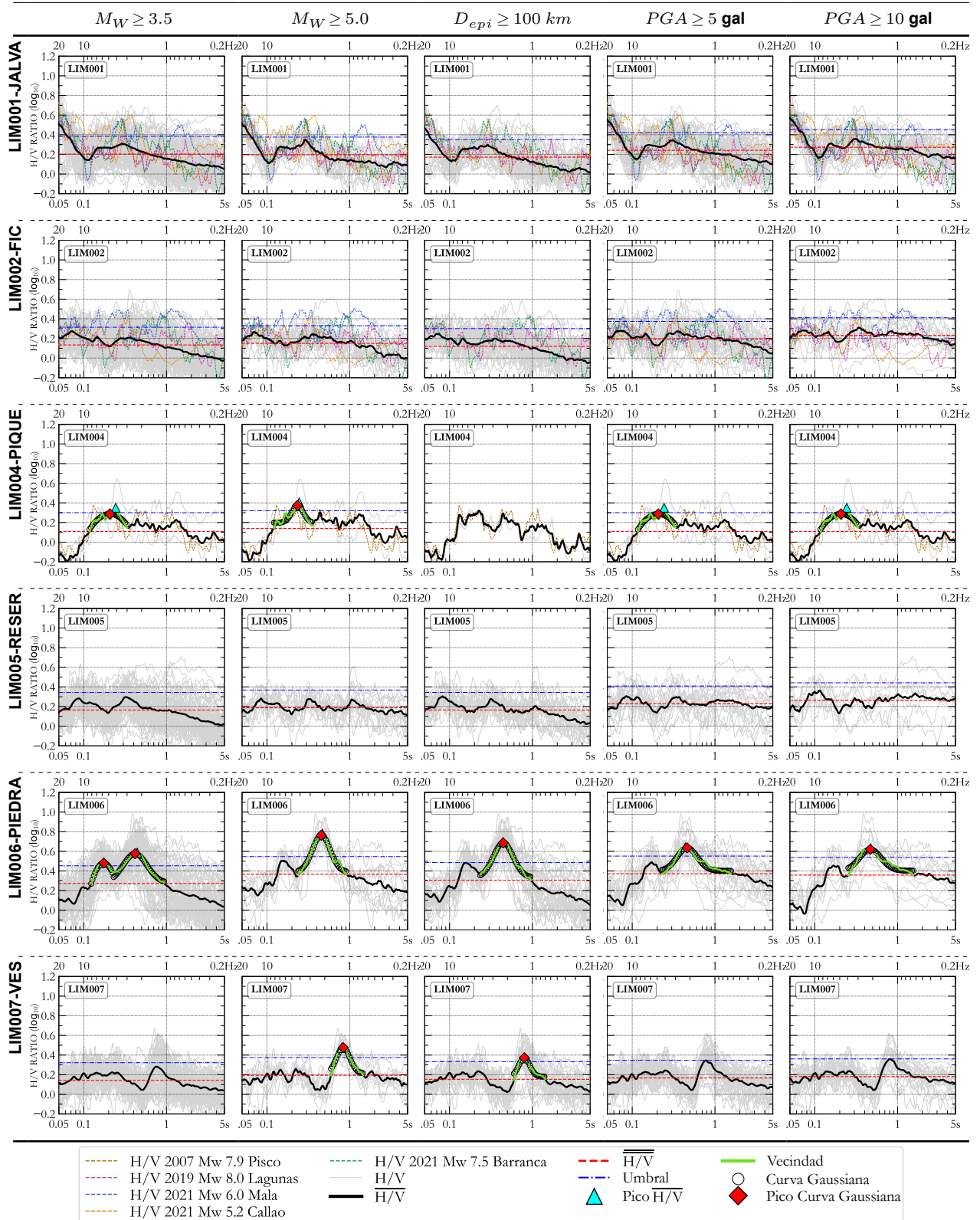
Continúa en la página siguiente

Criterio de selección de la sub-base de datos



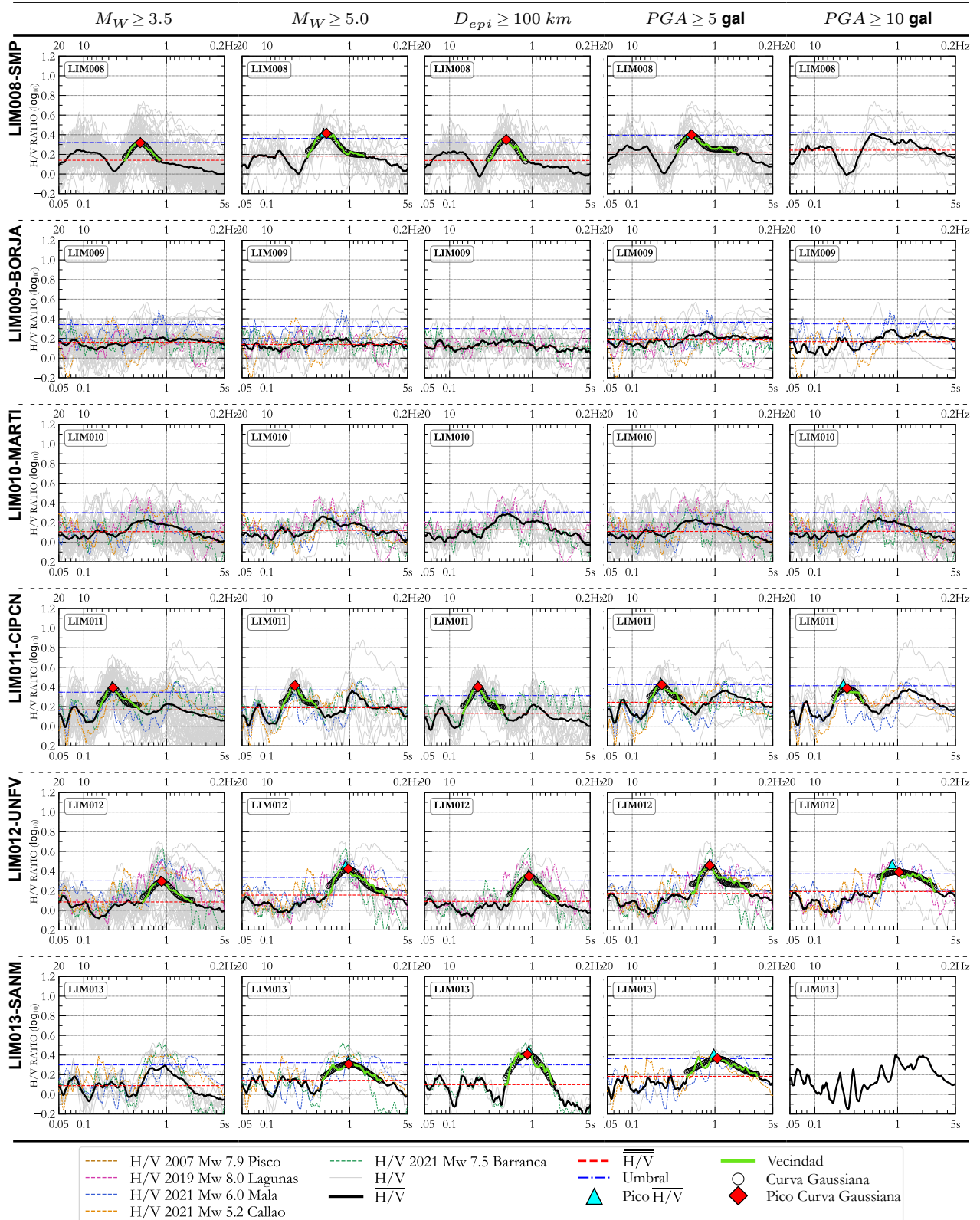
Continúa en la página siguiente

Criterio de selección de la sub-base de datos



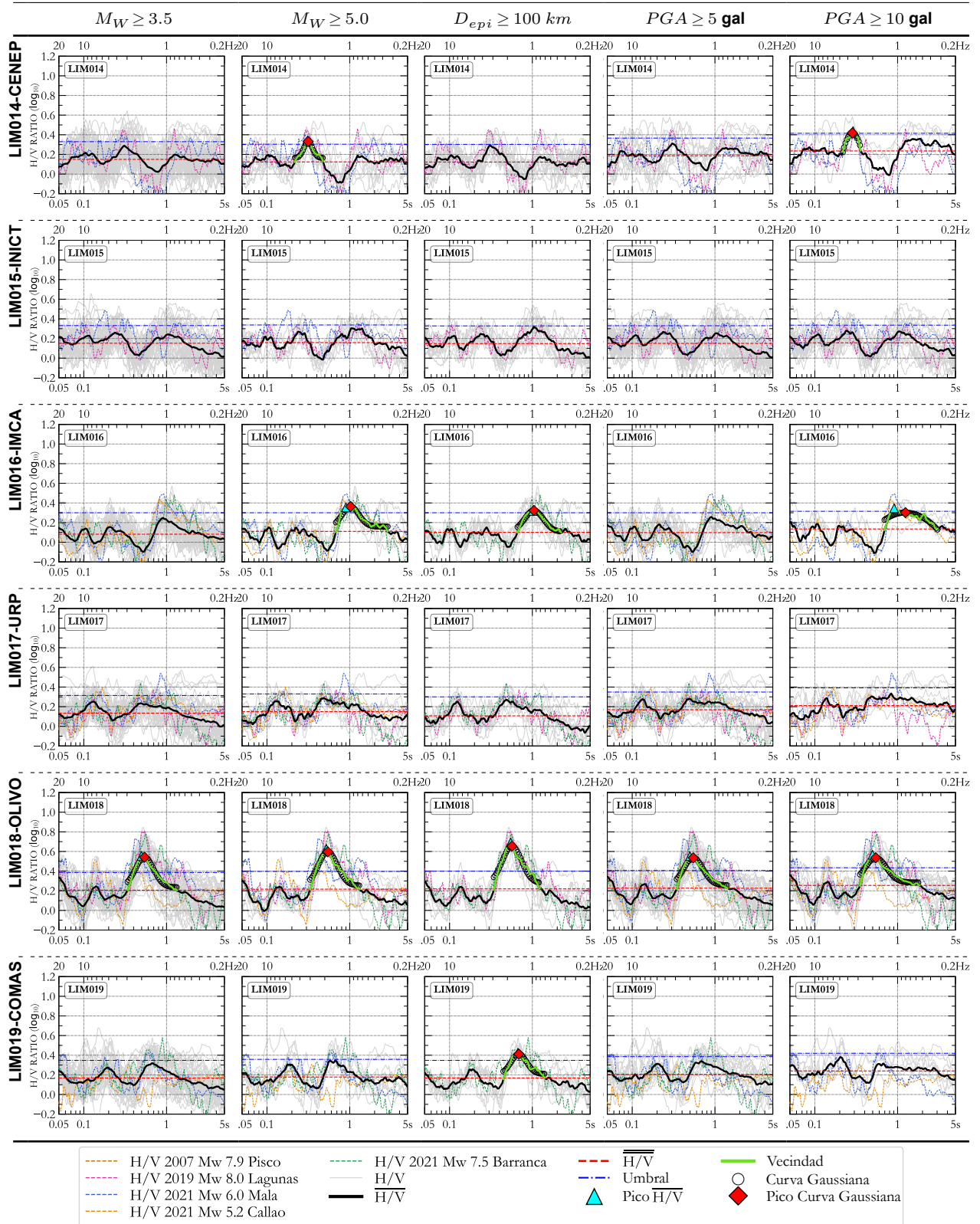
Continúa en la página siguiente

Criterio de selección de la sub-base de datos



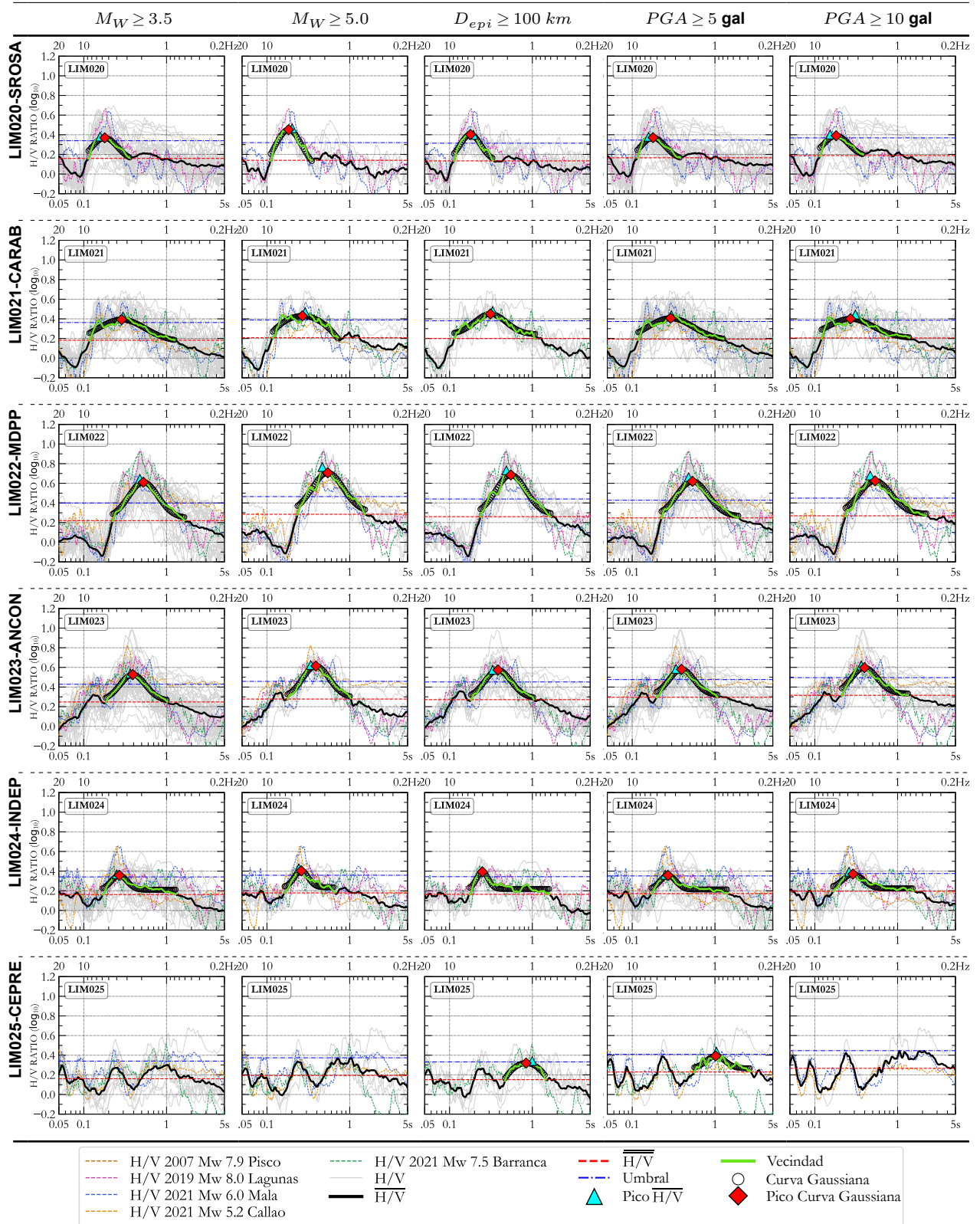
Continúa en la página siguiente

Criterio de selección de la sub-base de datos



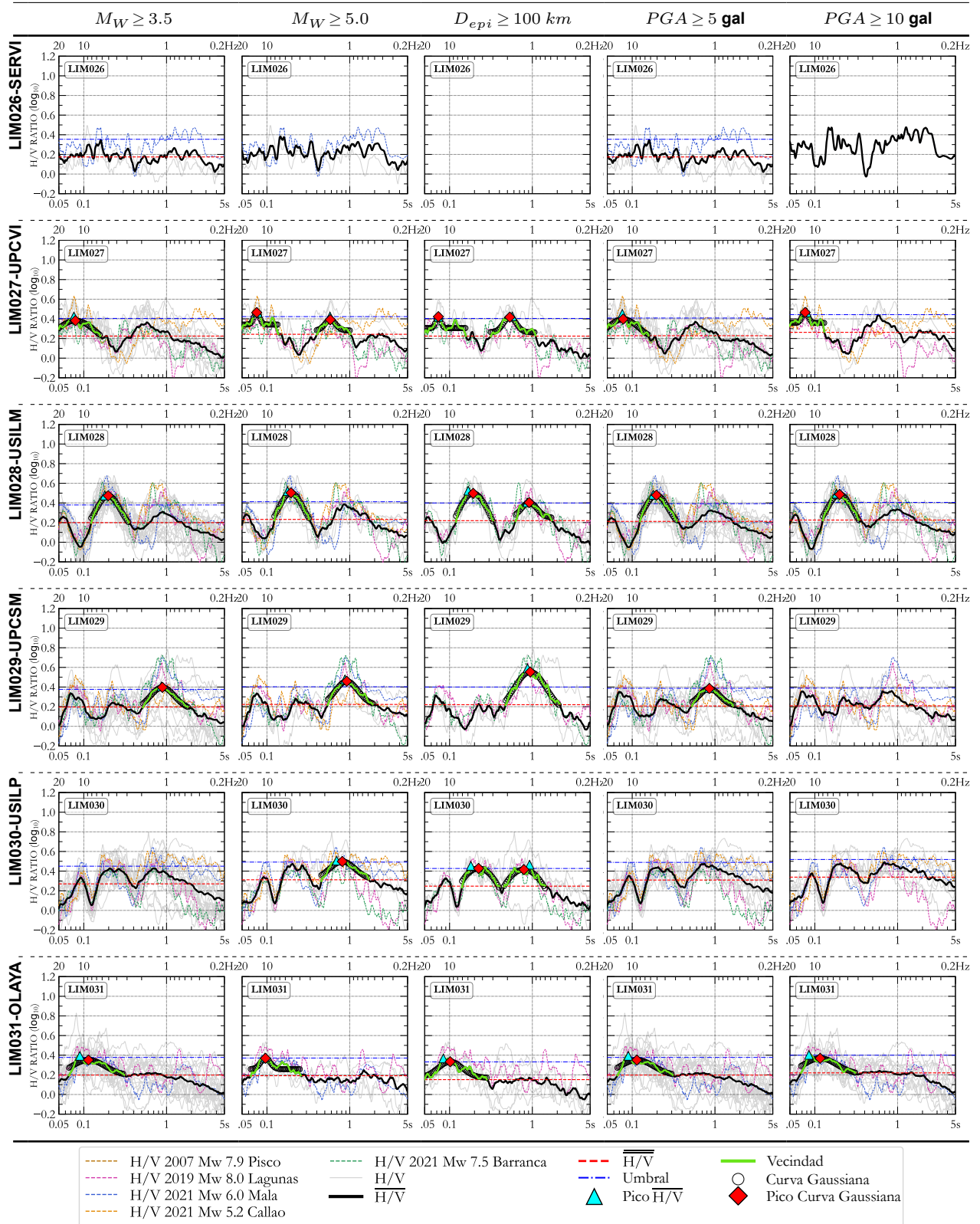
Continúa en la página siguiente

Criterio de selección de la sub-base de datos



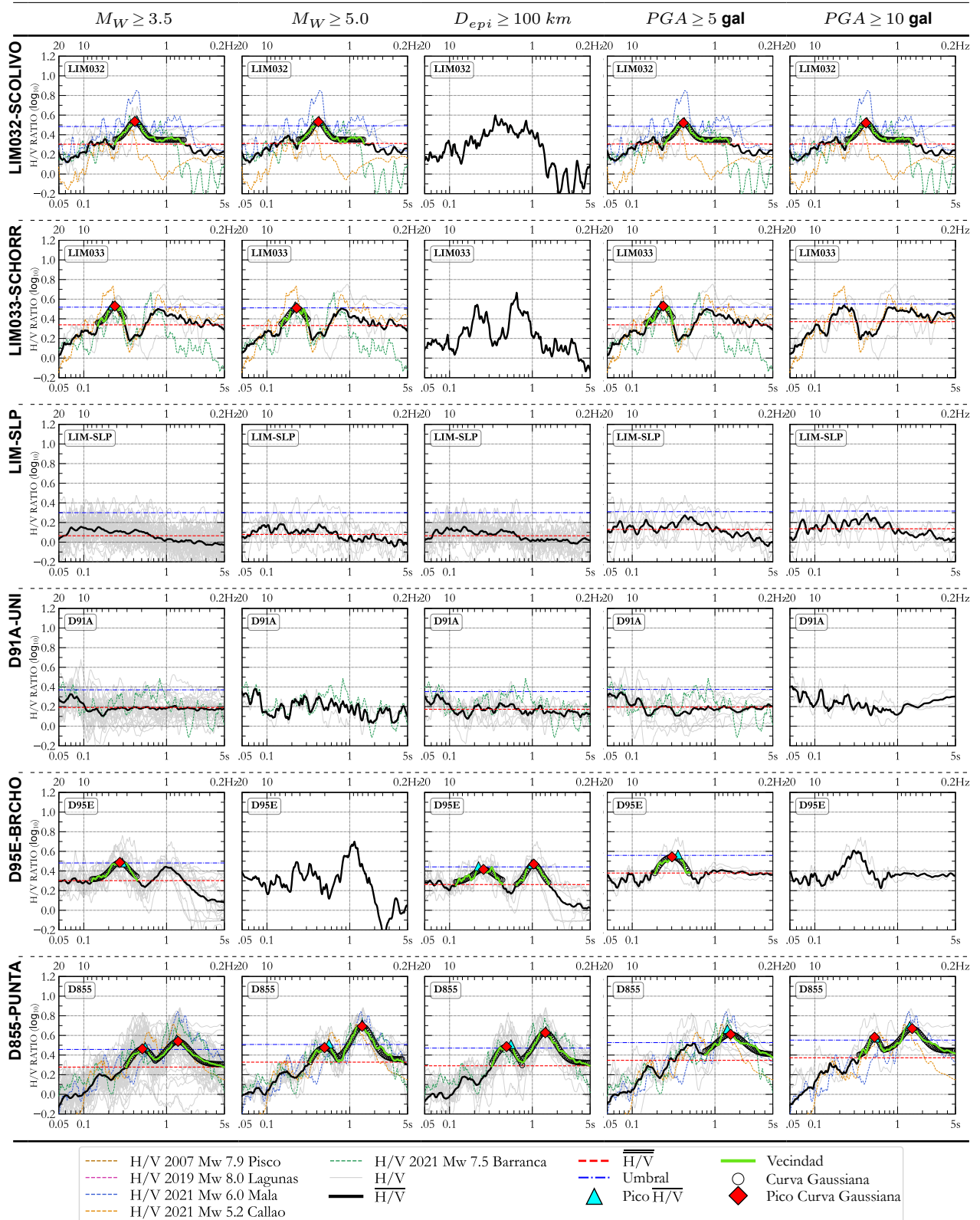
Continúa en la página siguiente

Criterio de selección de la sub-base de datos



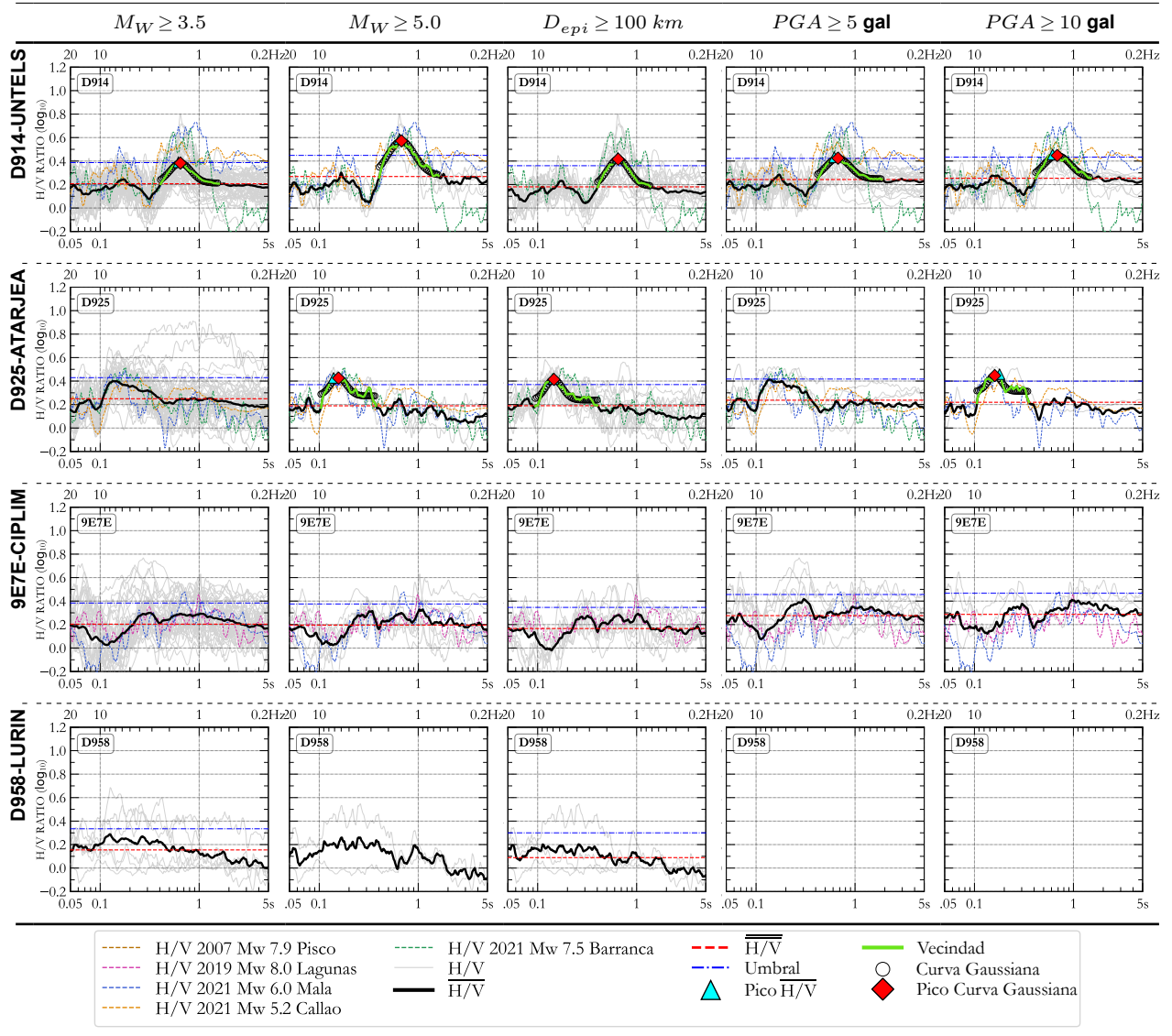
Continúa en la página siguiente

Criterio de selección de la sub-base de datos



Continúa en la página siguiente

Criterio de selección de la sub-base de datos



ANEXO B: LISTA DE EVENTOS USADOS EN EL ESTUDIO

TABLA N° B.1: Lista de eventos sísmicos de la base de datos.

Id ^A	Fecha Local		Coordenadas			Mag.	NR [†]	D _{epi} [‡] (km)			Max. PGA [§] (cm/s ²)		
	#	aaaa/mm/dd	hh:mm:ss	Lat (°)	Lon (°)			Prf. [¶]	Med.	Min.	Max.	EW	NS
1	2005/03/02	08:48:37	-11.880	-76.140	121	5.7 M _L	1	85.5	85.5	85.5	16.85	24.92	20.42
2	2005/09/25	20:58:15	-5.800	-76.200	115	7.0 M _L	1	699.8	699.8	699.8	12.81	17.10	14.70
3	2005/10/14	00:01:59	-12.410	-76.750	74	4.4 M _L	1	38.9	38.9	38.9	19.73	17.44	22.72
4	2007/08/15	18:40:58	-13.670	-76.760	40	7.9 M _W	3	181.4	175.5	186.0	95.76	101.03	57.09
5	2011/05/07	05:35:22	-15.380	-74.530	80	5.0 M _L	2	448.6	436.5	460.7	1.66	1.24	0.93
6	2011/06/26	06:45:51	-12.540	-76.870	49	4.0 M _L	1	61.5	61.5	61.5	2.98	3.86	1.68
7	2011/07/11	10:20:20	-12.520	-77.090	54	3.9 M _L	3	48.0	37.8	56.2	8.23	7.42	5.96
8	2011/07/13	05:07:50	-12.430	-76.960	54	5.2 M _L	3	37.2	24.1	47.1	9.51	9.84	8.56
9	2011/07/30	09:02:24	-12.770	-77.390	31	4.1 M _L	2	91.1	90.7	91.5	1.17	1.19	0.60
10	2011/08/01	09:30:11	-11.770	-77.450	63	4.0 M _L	2	51.5	51.2	51.8	5.43	4.79	2.22
11	2011/08/24	12:46:57	-9.500	-76.000	149	7.0 M _L	5	306.9	300.8	317.1	21.97	18.64	14.12
12	2011/10/02	11:33:10	-12.570	-76.880	74	4.0 M _L	1	62.3	62.3	62.3	0.59	0.52	0.96
13	2011/10/28	18:46:52	-14.540	-76.050	35	5.8 M _L	1	299.8	299.8	299.8	0.53	0.71	0.45
14	2011/10/28	13:55:16	-14.440	-75.970	24	6.9 M _W	2	292.4	291.9	292.9	4.20	4.87	3.18
15	2011/12/19	00:37:55	-12.200	-77.090	53	4.7 M _L	4	22.7	15.5	38.5	89.07	80.66	39.87
16	2011/12/26	15:29:46	-12.810	-76.660	52	4.0 M _L	5	94.5	72.6	115.2	10.75	12.22	9.49
17	2011/12/29	08:45:44	-12.550	-76.780	52	4.6 M _L	6	63.6	41.1	83.6	16.26	15.00	12.60
18	2011/12/30	04:22:53	-14.420	-75.480	49	5.0 M _W	5	317.8	309.3	332.5	0.99	1.25	0.46
19	2012/01/19	15:58:41	-12.610	-77.200	48	3.9 M _L	5	63.4	52.4	68.0	7.69	7.63	7.80
20	2012/01/22	21:31:27	-12.040	-77.710	37	4.4 M _L	4	75.8	71.3	86.2	9.27	12.95	7.13
21	2012/01/30	00:11:21	-14.370	-76.020	54	6.3 M _L	5	277.0	258.5	283.6	18.28	20.60	11.26
22	2012/02/10	23:27:37	-13.120	-76.690	66	4.8 M _L	4	122.1	103.9	128.5	5.53	7.33	6.17
23	2012/02/13	23:42:25	-12.410	-76.940	42	4.8 M _L	7	43.2	21.8	63.4	61.41	67.68	32.51
24	2012/02/18	21:19:14	-11.990	-77.230	47	4.0 M _L	7	22.8	14.0	40.2	7.28	8.41	8.59
25	2012/02/18	07:41:22	-13.040	-76.200	96	4.2 M _L	1	145.6	145.6	145.6	1.13	1.29	0.85
26	2012/02/29	03:50:30	-12.690	-76.750	40	4.3 M _L	4	75.1	56.6	81.7	8.54	11.57	9.88
27	2012/03/06	22:51:57	-12.310	-77.110	49	3.7 M _L	5	32.1	21.6	50.8	7.42	5.58	6.71
28	2012/03/08	12:43:19	-11.010	-78.170	63	4.3 M _L	2	158.3	151.6	164.9	1.20	1.64	1.00
29	2012/03/11	03:20:42	-12.540	-77.130	52	3.8 M _L	3	57.0	41.8	76.4	5.43	5.54	5.12
30	2012/03/12	01:35:34	-14.220	-71.820	70	5.4 M _L	1	627.2	627.2	627.2	1.37	1.73	0.60
31	2012/03/14	05:53:03	-10.100	-76.170	108	4.4 M _L	2	225.4	217.5	233.3	0.45	0.59	0.30

Continúa en la página siguiente

Id ^A	Fecha Local		Coordenadas			Mag.	NR [†]	D _{epi} [‡] (km)			Max. PGA [§] (cm/s ²)		
	#	aaaa/mm/dd	hh:mm:ss	Lat (°)	Lon (°)			Prf. [¶]	Med.	Min.	Max.	EW	NS
32	2012/03/15	08:21:55	-13.400	-76.230	64	4.4 M _L	1	194.3	194.3	194.3	1.06	0.87	0.61
33	2012/03/19	18:21:46	-11.930	-77.440	45	4.0 M _L	1	43.8	43.8	43.8	3.45	3.96	2.04
34	2012/03/25	18:01:07	-12.630	-77.680	48	5.0 M _L	2	96.0	95.9	96.1	1.82	1.90	1.29
35	2012/04/14	02:11:41	-10.480	-78.070	61	4.5 M _L	1	186.7	186.7	186.7	0.44	0.42	0.23
36	2012/04/22	18:46:26	-10.270	-76.110	120	4.7 M _L	4	218.8	204.3	233.2	1.76	2.05	1.62
37	2012/05/06	08:13:58	-13.870	-76.110	62	4.3 M _L	1	229.4	229.4	229.4	0.37	0.40	0.19
38	2012/05/06	07:41:12	-13.810	-76.220	67	5.5 M _L	7	215.8	193.1	235.6	14.35	16.57	14.58
39	2012/05/14	19:46:10	-13.240	-76.440	60	4.0 M _L	3	142.3	125.8	151.0	2.96	2.92	2.80
40	2012/05/16	22:45:44	-12.090	-76.530	100	4.2 M _L	4	53.8	46.5	57.3	6.33	6.00	5.32
41	2012/05/23	18:02:08	-11.350	-77.740	73	4.3 M _L	3	113.5	105.1	129.4	5.58	6.93	3.68
42	2012/05/27	00:21:54	-13.730	-76.340	44	4.5 M _L	1	205.0	205.0	205.0	0.88	1.03	0.48
43	2012/05/28	11:46:44	-12.600	-76.450	86	3.9 M _L	2	80.1	68.2	92.1	4.54	3.36	3.58
44	2012/06/08	07:54:31	-12.700	-77.390	40	4.3 M _L	4	80.2	72.9	84.5	25.00	29.04	19.29
45	2012/06/19	15:58:41	-12.610	-77.200	48	3.9 M _L	1	85.0	85.0	85.0	1.17	1.57	1.20
46	2012/06/21	17:17:24	-11.710	-76.960	96	4.7 M _L	6	35.0	20.0	42.6	26.59	27.78	12.37
47	2012/06/27	07:41:29	-13.040	-76.200	96	4.2 M _L	4	125.2	52.4	162.2	1.40	1.60	1.24
48	2012/06/28	06:19:04	-12.170	-77.650	44	4.2 M _L	6	68.4	58.7	77.6	8.72	5.01	3.03
49	2012/07/02	18:32:20	-15.010	-76.290	33	5.6 M _L	1	359.6	359.6	359.6	2.86	4.00	1.00
50	2012/07/04	11:01:36	-12.120	-77.050	50	4.4 M _L	1	11.3	11.3	11.3	4.85	4.06	3.48
51	2012/07/06	13:59:16	-11.900	-76.350	22	4.0 M _L	2	78.5	78.0	79.1	1.06	0.93	0.94
52	2012/07/06	17:59:55	-11.860	-76.370	24	4.1 M _L	2	76.7	76.7	76.7	0.93	1.18	1.15
53	2012/07/14	03:09:12	-12.040	-76.340	15	3.9 M _L	3	76.2	67.9	82.6	2.39	1.58	1.82
54	2012/07/16	12:21:03	-12.350	-76.860	40	3.8 M _L	1	41.7	41.7	41.7	0.97	1.24	0.68
55	2012/07/28	21:07:40	-12.420	-77.420	38	3.7 M _L	4	62.4	57.2	73.3	2.84	2.66	1.80
56	2012/07/29	12:35:39	-12.020	-77.200	58	4.5 M _L	6	19.9	9.5	35.6	40.13	27.19	26.67
57	2012/08/01	08:02:12	-12.320	-77.340	46	3.7 M _L	6	46.1	37.2	59.3	5.39	5.26	4.39
58	2012/08/02	04:39:35	-8.640	-74.190	150	6.4 M _L	5	487.7	475.4	496.2	3.59	4.72	2.38
59	2012/08/03	08:46:55	-12.530	-76.650	56	3.8 M _L	2	59.0	47.0	71.0	3.92	4.25	3.10
60	2012/08/06	02:23:54	-9.070	-76.180	58	4.3 M _L	1	357.4	357.4	357.4	1.03	1.01	0.74
61	2012/08/06	21:03:28	-13.610	-76.280	120	4.9 M _L	3	192.5	170.3	212.7	2.33	1.72	1.36
62	2012/08/07	21:53:10	-12.790	-77.250	32	3.9 M _L	3	88.5	72.3	105.5	1.97	1.90	1.73
63	2012/08/07	05:31:27	-13.500	-77.000	46	5.4 M _L	6	161.7	142.5	182.5	5.29	6.08	3.34
64	2012/08/08	03:36:09	-9.620	-75.830	119	4.4 M _L	1	311.4	311.4	311.4	0.63	0.71	0.57

Continúa en la página siguiente

Id ^A	Fecha Local		Coordenadas			Mag.	NR [†]	D _{epi} [‡] (km)			Max. PGA [§] (cm/s ²)		
	#	aaaa/mm/dd	hh:mm:ss	Lat (°)	Lon (°)			Prf. [¶]	Med.	Min.	Max.	EW	NS
65	2012/08/11	04:36:03	-11.450	-77.700	69	4.3 M _L	6	97.0	81.5	118.4	5.87	6.52	3.53
66	2012/08/24	02:22:18	-11.760	-77.320	68	3.9 M _L	1	41.4	41.4	41.4	0.62	0.68	0.32
67	2012/08/25	11:06:38	-12.330	-77.300	40	3.9 M _L	3	42.0	40.8	43.6	5.28	6.20	3.70
68	2012/08/29	22:02:13	-8.850	-75.380	130	4.8 M _L	2	402.4	395.6	409.2	2.17	2.26	1.53
69	2012/09/01	22:35:15	-13.350	-76.330	67	4.2 M _L	2	154.2	142.1	166.4	1.45	2.16	1.53
70	2012/09/09	20:35:56	-12.560	-76.830	50	3.9 M _L	2	52.1	40.1	64.1	2.94	2.09	2.15
71	2012/09/15	06:27:52	-12.520	-77.330	47	4.0 M _L	5	63.7	54.5	79.0	3.48	3.31	2.36
72	2012/09/18	14:42:27	-12.180	-77.260	66	3.8 M _L	4	33.5	28.5	41.6	2.39	2.28	1.70
73	2012/09/19	00:22:23	-13.050	-76.690	63	4.0 M _L	6	118.3	96.4	139.0	2.69	2.93	2.00
74	2012/09/23	03:47:36	-13.080	-76.740	57	4.4 M _L	6	119.9	98.3	140.6	4.25	4.43	3.20
75	2012/09/25	01:50:45	-12.220	-77.320	42	3.9 M _L	4	35.6	27.6	41.6	5.10	4.57	4.18
76	2012/09/27	23:38:59	-11.830	-76.480	100	4.4 M _L	5	65.5	64.8	66.1	10.79	16.10	9.47
77	2012/10/03	17:49:30	-14.390	-76.310	30	4.8 M _L	3	271.8	250.3	292.8	1.94	1.86	1.68
78	2012/10/08	21:32:52	-14.060	-76.320	39	4.5 M _L	1	215.0	215.0	215.0	1.12	1.28	1.10
79	2012/10/14	11:50:31	-11.980	-77.600	30	3.7 M _L	4	64.6	59.0	76.5	4.86	3.96	2.84
80	2012/10/22	21:26:56	-12.090	-76.930	48	3.8 M _L	3	20.0	13.6	30.7	1.63	1.60	1.52
81	2012/10/30	02:48:56	-12.540	-76.850	52	3.9 M _L	7	57.1	37.4	79.9	5.80	3.91	3.58
82	2012/10/30	14:44:58	-12.520	-76.830	55	4.3 M _L	5	57.9	35.9	78.5	18.48	12.98	12.55
83	2012/10/31	20:53:50	-11.980	-75.990	58	4.2 M _L	6	109.6	82.3	123.7	3.05	3.80	3.40
84	2012/10/31	20:37:27	-11.820	-76.020	57	4.5 M _L	6	115.0	109.0	123.0	15.39	16.01	9.27
85	2012/11/03	20:52:34	-12.130	-76.030	110	4.7 M _L	6	111.6	99.3	119.2	16.17	13.84	11.31
86	2012/11/05	03:08:21	-12.510	-76.810	50	3.9 M _L	1	35.7	35.7	35.7	2.26	2.13	1.84
87	2012/11/10	01:57:51	-12.450	-76.710	45	3.9 M _L	1	36.1	36.1	36.1	3.21	3.51	3.28
88	2012/11/10	09:58:30	-8.890	-75.120	146	6.0 M _L	7	407.0	391.3	418.0	7.88	7.21	4.45
89	2012/11/12	22:03:47	-12.560	-76.810	38	3.9 M _L	1	40.8	40.8	40.8	1.75	2.08	1.40
90	2012/11/13	00:49:09	-12.610	-76.770	50	4.0 M _L	1	47.6	47.6	47.6	2.17	2.06	1.45
91	2012/11/15	19:22:19	-13.300	-76.680	57	4.8 M _L	7	145.8	123.5	165.8	7.81	7.98	6.75
92	2012/11/20	00:11:15	-12.260	-77.040	50	3.8 M _L	2	19.3	12.3	26.3	1.24	1.18	1.21
93	2012/11/20	00:20:44	-11.690	-77.720	61	4.1 M _L	6	83.6	72.7	103.0	3.97	3.45	4.26
94	2012/11/26	20:51:05	-12.500	-76.740	49	3.9 M _L	1	38.4	38.4	38.4	2.84	2.29	2.03
95	2012/11/27	04:20:22	-10.840	-77.720	51	4.4 M _L	7	151.4	132.3	174.2	4.55	3.53	2.33
96	2012/11/27	22:12:27	-5.190	-76.560	150	5.0 M _L	1	739.0	739.0	739.0	2.06	2.17	0.67
97	2012/12/04	20:33:03	-12.010	-77.000	46	3.5 M _L	3	5.4	5.2	5.5	2.22	2.91	1.22

Continúa en la página siguiente

Id ^A	Fecha Local		Coordenadas			Mag.	NR [†]	D _{epi} [‡] (km)			Max. PGA [§] (cm/s ²)		
	#	aaaa/mm/dd	hh:mm:ss	Lat (°)	Lon (°)			Prf. [¶]	Med.	Min.	Max.	EW	NS
98	2012/12/04	19:24:06	-10.350	-76.500	118	4.4 M _L	3	193.9	193.6	194.5	1.06	1.25	0.66
99	2012/12/10	06:25:32	-11.860	-77.230	51	4.3 M _L	8	28.6	17.0	50.4	14.81	15.52	13.44
100	2012/12/22	01:43:50	-12.560	-76.820	51	4.2 M _L	8	63.4	40.5	83.1	7.41	6.16	6.29
101	2012/12/28	20:57:56	-11.370	-78.860	96	4.3 M _L	8	211.1	201.9	229.3	13.08	16.07	6.65
102	2012/12/30	08:33:13	-10.750	-75.760	96	4.3 M _L	4	198.7	198.3	199.2	1.12	1.03	0.72
103	2013/01/10	00:14:36	-11.670	-77.890	40	4.2 M _L	3	99.2	98.7	99.6	3.44	3.69	2.33
104	2013/01/15	14:01:19	-12.370	-77.070	48	4.8 M _L	6	40.3	33.1	57.3	3.19	4.07	2.60
105	2013/03/30	12:31:34	-9.570	-79.420	17	5.3 M _L	3	374.8	374.4	375.2	0.82	0.89	1.13
106	2013/04/03	08:40:44	-12.270	-76.580	82	3.8 M _L	2	58.0	57.9	58.1	1.54	1.58	0.98
107	2013/04/06	03:50:15	-8.940	-79.080	60	4.3 M _L	2	406.3	406.2	406.5	0.30	0.28	0.34
108	2013/04/07	15:41:11	-13.630	-76.450	45	4.6 M _L	4	188.2	183.4	190.1	1.22	1.22	1.02
109	2013/04/10	02:11:31	-12.320	-76.030	110	4.0 M _L	3	116.0	115.7	116.6	0.50	0.47	0.34
110	2013/04/10	11:20:54	-10.840	-75.510	120	5.0 M _L	4	213.3	212.2	214.8	1.32	1.50	0.96
111	2013/04/12	08:53:34	-11.740	-77.200	58	3.8 M _L	4	36.4	34.5	41.2	7.85	8.34	3.69
112	2013/04/21	04:40:25	-13.640	-75.680	74	4.3 M _L	1	233.1	233.1	233.1	0.31	0.29	0.28
113	2013/05/03	23:06:32	-12.350	-78.730	25	4.4 M _L	1	195.5	195.5	195.5	2.18	1.90	1.53
114	2013/05/09	22:35:28	-8.650	-76.770	52	4.3 M _L	3	382.8	374.3	394.5	31.04	36.94	25.16
115	2013/06/02	15:59:15	-12.820	-76.550	75	3.9 M _L	6	101.8	79.3	121.3	6.44	6.25	4.35
116	2013/06/02	05:47:01	-14.560	-75.700	72	4.6 M _L	5	315.5	292.2	334.6	1.48	1.43	0.94
117	2013/06/05	04:16:00	-8.020	-74.520	175	5.3 M _L	3	526.0	521.5	534.1	0.94	1.09	0.72
118	2013/06/15	14:01:24	-12.370	-77.070	48	4.8 M _L	1	22.5	22.5	22.5	9.17	6.97	11.20
119	2013/06/17	16:10:30	-12.450	-77.190	56	4.0 M _L	5	46.7	37.9	50.6	17.70	22.85	17.76
120	2013/06/18	13:40:00	-12.040	-77.660	40	5.1 M _L	6	67.9	58.5	80.9	29.97	33.96	24.33
121	2013/06/19	07:21:32	-12.040	-77.270	13	3.9 M _L	5	27.8	23.4	40.9	4.31	4.71	3.62
122	2013/07/12	14:27:47	-12.630	-77.170	38	4.0 M _L	4	67.8	52.6	86.7	24.75	19.82	19.88
123	2013/08/29	06:47:47	-12.010	-76.920	45	3.8 M _L	2	14.0	13.8	14.1	0.76	0.87	0.43
124	2013/09/02	03:12:49	-11.760	-75.670	40	4.3 M _L	2	150.1	146.9	153.4	0.80	0.82	0.50
125	2013/09/23	19:18:48	-12.460	-76.850	59	4.0 M _L	5	47.3	29.0	53.8	4.84	3.47	3.59
126	2013/09/25	11:43:45	-16.260	-74.980	37	6.9 M _L	4	512.0	495.1	520.0	9.90	10.35	7.82
127	2013/10/11	11:49:49	-11.900	-77.140	56	3.8 M _L	6	20.2	8.9	41.0	10.79	7.77	9.46
128	2013/10/17	05:51:01	-12.310	-77.230	45	3.9 M _L	7	37.7	30.0	53.4	4.64	4.45	4.55
129	2013/10/18	04:48:04	-12.340	-76.800	60	3.8 M _L	6	47.0	38.8	61.7	5.01	5.21	4.01
130	2013/10/18	02:32:40	-12.590	-77.170	11	4.2 M _L	6	64.0	48.7	82.3	61.85	62.08	28.39

Continúa en la página siguiente

Id ^A	Fecha Local		Coordenadas			Mag.	NR [†]	D _{epi} [‡] (km)			Max. PGA [§] (cm/s ²)		
	#	aaaa/mm/dd	hh:mm:ss	Lat (°)	Lon (°)			Prf. [¶]	Med.	Min.	Max.	EW	NS
131	2013/10/19	20:16:28	-11.320	-77.140	55	3.8 M _L	4	79.0	59.3	101.2	1.45	1.41	1.10
132	2013/11/13	05:30:10	-12.100	-76.670	87	3.6 M _L	3	38.7	31.7	42.2	2.06	2.01	1.74
133	2013/11/14	02:52:18	-7.960	-74.530	157	4.4 M _L	2	533.4	527.4	539.4	0.70	0.94	0.75
134	2013/11/25	15:07:12	-12.770	-76.480	59	5.8 M _L	4	100.3	79.2	120.4	69.45	85.42	77.17
135	2014/01/02	17:28:01	-11.190	-78.420	25	4.1 M _L	3	171.4	164.1	175.4	2.36	2.33	1.98
136	2014/01/20	00:27:06	-12.550	-76.630	91	4.1 M _L	3	78.0	68.5	91.1	0.91	0.94	0.65
137	2014/02/24	22:05:35	-11.190	-77.110	72	4.4 M _L	4	88.2	73.3	96.2	2.89	2.55	1.52
138	2014/03/01	05:52:48	-13.720	-76.630	43	4.6 M _L	1	193.9	193.9	193.9	0.37	0.39	0.79
139	2014/03/13	00:06:08	-12.610	-76.960	38	3.9 M _L	3	72.5	66.3	84.8	0.47	0.48	0.43
140	2014/03/15	01:06:10	-14.140	-76.300	34	4.6 M _L	3	254.7	248.7	266.7	0.45	0.51	0.39
141	2014/03/15	03:59:47	-14.340	-76.580	16	6.2 M _L	6	263.6	255.5	280.4	4.73	6.27	2.80
142	2014/03/18	07:51:30	-12.790	-77.040	45	3.9 M _L	2	94.8	85.7	103.8	1.72	2.29	1.87
143	2014/03/20	07:05:19	-11.890	-76.130	83	4.4 M _L	5	101.4	100.2	102.9	2.11	2.46	1.78
144	2014/04/20	21:36:06	-11.870	-77.660	32	4.0 M _L	3	69.7	68.3	72.1	2.48	3.77	1.39
145	2014/04/20	20:05:50	-13.010	-76.190	67	4.3 M _L	3	142.3	138.2	144.6	1.19	1.39	0.50
146	2014/04/27	11:28:35	-13.180	-76.840	35	4.3 M _L	1	130.8	130.8	130.8	0.26	0.27	0.26
147	2014/05/10	12:57:06	-12.630	-77.060	44	4.5 M _L	1	67.7	67.7	67.7	1.13	0.91	1.12
148	2014/05/24	13:58:14	-11.840	-77.460	39	3.9 M _L	1	48.6	48.6	48.6	0.86	1.18	0.31
149	2014/06/03	16:34:14	-12.590	-77.370	38	5.4 M _L	5	69.1	64.5	72.7	64.91	66.05	23.35
150	2014/06/22	13:06:09	-13.930	-75.980	85	5.5 M _L	3	236.4	232.5	241.8	4.53	6.72	2.90
151	2014/07/15	04:01:43	-12.170	-77.450	36	4.1 M _L	1	49.2	49.2	49.2	0.88	1.06	0.58
152	2014/08/12	00:12:58	-11.810	-77.670	43	4.2 M _L	4	71.4	65.1	78.5	9.67	14.21	3.91
153	2014/11/14	19:18:35	-12.900	-77.330	35	5.8 M _L	6	102.2	95.6	119.2	57.79	63.65	25.98
154	2015/04/01	11:45:25	-10.770	-78.450	46	5.2 M _L	6	204.5	192.1	214.5	14.66	10.76	4.94
155	2015/04/05	00:57:31	-11.700	-78.110	45	4.7 M _L	1	120.6	120.6	120.6	5.30	6.59	2.39
156	2015/06/04	16:35:09	-12.460	-77.680	15	4.7 M _L	1	84.2	84.2	84.2	2.58	2.21	1.71
157	2016/10/28	22:47:28	-12.030	-77.660	52	5.0 M _L	2	68.1	66.9	69.3	16.51	21.83	14.84
158	2016/11/07	22:40:16	-12.090	-77.270	35	4.2 M _L	2	25.2	24.1	26.4	5.37	4.81	2.00
159	2017/03/18	15:20:45	-11.700	-77.680	48	4.1 M _L	1	81.3	81.3	81.3	3.17	2.71	1.32
160	2017/05/03	07:05:49	-12.240	-77.400	32	4.0 M _L	8	44.3	32.9	52.0	1.35	1.64	1.06
161	2017/05/11	10:32:47	-12.070	-77.450	31	3.9 M _L	8	45.9	32.1	53.9	0.49	0.95	0.36
162	2017/06/23	19:03:13	-12.510	-76.310	100	4.1 M _L	12	92.1	84.0	104.3	18.91	10.96	1.55
163	2017/06/28	04:48:12	-12.680	-76.640	59	3.9 M _L	12	79.5	71.0	88.1	13.24	8.40	2.03

Continúa en la página siguiente

Id ^A	Fecha Local		Coordenadas			Mag.	NR [†]	D _{epi} [‡] (km)			Max. PGA [§] (cm/s ²)		
	#	aaaa/mm/dd	hh:mm:ss	Lat (°)	Lon (°)			Prf. [¶]	Med.	Min.	Max.	EW	NS
164	2017/06/30	03:36:25	-12.490	-76.920	49	4.4 M _L	12	47.8	40.2	54.6	13.06	8.94	5.58
165	2017/07/01	00:22:15	-12.500	-76.830	52	3.5 M _L	12	52.2	43.9	59.7	6.82	6.46	1.72
166	2017/07/06	18:23:07	-10.590	-78.420	41	4.4 M _L	11	224.3	213.8	232.0	16.36	25.59	3.60
167	2017/07/08	20:07:24	-11.720	-77.370	73	4.8 M _L	12	54.1	44.8	62.3	47.83	63.11	29.94
168	2017/08/03	18:17:17	-10.720	-78.450	32	4.8 M _L	11	215.0	205.2	223.9	16.54	11.84	1.98
169	2017/08/20	12:42:15	-13.980	-75.770	79	5.4 M _L	11	251.7	242.9	259.7	13.23	7.49	2.49
170	2017/08/29	21:40:32	-13.060	-76.750	67	4.1 M _L	11	113.4	105.7	120.3	12.71	8.75	1.33
171	2017/09/11	12:24:48	-12.430	-76.660	89	3.8 M _L	15	62.5	47.9	91.2	22.05	15.86	6.96
172	2017/09/14	08:26:46	-11.870	-76.340	41	4.0 M _L	17	80.1	69.2	91.4	10.57	10.93	2.96
173	2017/09/14	08:24:50	-11.960	-76.450	42	4.1 M _L	17	66.8	54.9	80.9	9.14	6.04	4.48
174	2017/09/14	08:19:23	-11.910	-76.340	40	4.8 M _L	17	79.2	67.9	91.5	18.29	18.94	10.03
175	2017/09/15	04:10:36	-11.910	-76.330	18	4.4 M _L	16	80.6	69.0	92.6	12.26	11.59	7.40
176	2017/09/24	20:47:09	-12.080	-77.490	37	3.6 M _L	17	49.8	36.4	59.7	11.44	7.42	5.41
177	2017/09/25	19:54:14	-11.960	-77.660	28	4.0 M _L	17	67.6	56.2	79.2	24.09	30.64	16.07
178	2017/10/02	21:57:03	-11.890	-76.320	17	3.7 M _L	18	82.0	70.6	93.3	9.14	6.27	3.18
179	2017/10/22	19:09:13	-12.320	-77.340	36	4.7 M _L	18	47.7	34.6	63.2	34.01	62.30	25.79
180	2017/11/01	22:36:03	-11.770	-77.550	50	4.4 M _L	20	61.3	41.6	74.2	41.48	34.21	35.43
181	2017/11/24	02:24:26	-12.100	-77.550	34	4.1 M _L	20	56.3	43.1	66.3	37.23	41.70	17.95
182	2017/11/24	11:15:53	-12.090	-76.250	76	4.7 M _L	19	88.5	75.3	105.9	11.83	8.18	5.85
183	2017/11/29	06:29:03	-14.580	-76.370	12	5.6 M _L	18	294.5	278.8	322.2	7.35	5.44	2.31
184	2018/01/14	04:18:42	-16.070	-74.890	48	6.8 M _L	18	507.1	494.7	535.2	13.37	13.27	6.72
185	2018/01/18	20:11:39	-13.350	-74.680	100	5.2 M _L	19	297.3	283.4	321.7	14.71	9.62	2.09
186	2018/02/13	19:26:45	-11.835	-76.320	89	3.6 M _L	19	83.0	72.6	94.5	12.68	17.86	2.29
187	2018/04/19	15:19:09	-12.540	-77.060	25	3.7 M _L	17	56.3	46.0	85.5	40.02	20.86	5.27
188	2018/04/29	00:58:35	-12.180	-78.210	45	4.4 M _L	1	114.5	114.5	114.5	0.55	0.27	1.45
189	2018/05/17	06:07:13	-12.790	-76.870	63	5.5 M _L	18	85.4	73.8	116.9	85.63	59.26	48.14
190	2018/05/22	08:08:34	-11.250	-78.150	30	4.9 M _L	19	147.0	121.8	160.6	39.16	22.60	17.04
191	2018/07/18	17:00:54	-12.210	-76.700	72	4.0 M _L	17	42.2	30.4	70.1	30.29	22.55	5.54
192	2018/08/05	02:24:20	-12.250	-77.550	36	3.6 M _L	1	57.3	57.3	57.3	6.22	2.76	3.08
193	2018/08/06	23:32:36	-12.260	-77.250	42	3.6 M _L	1	28.7	28.7	28.7	4.22	2.31	1.39
194	2018/09/15	10:13:13	-9.920	-78.880	16	5.5 M _L	1	303.0	303.0	303.0	1.60	0.91	0.60
195	2018/09/27	17:00:07	-11.530	-78.260	35	4.9 M _L	13	140.6	122.1	154.3	18.89	27.47	14.17
196	2018/11/20	01:38:03	-9.950	-79.030	46	5.7 M _L	26	312.9	286.7	329.3	9.07	6.71	7.95

Continúa en la página siguiente

Id ^A	Fecha Local		Coordenadas			Mag.	NR [†]	D _{epi} [‡] (km)			Max. PGA [§] (cm/s ²)		
	#	aaaa/mm/dd	hh:mm:ss	Lat (°)	Lon (°)			Prf. [¶]	Med.	Min.	Max.	EW	NS
197	2018/11/24	15:20:59	-11.390	-78.100	50	4.5 M _L	28	132.0	110.2	147.2	9.59	8.60	7.21
198	2019/01/25	23:45:19	-14.790	-75.750	50	6.0 M _L	2	333.8	330.0	337.5	1.98	1.82	1.26
199	2019/02/22	05:17:00	-2.250	-77.190	139	7.7 M _L	21	1084.7	1063.6	1113.8	29.61	22.50	4.15
200	2019/03/16	08:43:18	-12.030	-77.550	35	4.0 M _L	2	48.6	42.3	55.0	6.00	3.57	3.06
201	2019/03/22	07:50:29	-12.780	-76.890	27	4.9 M _L	26	86.4	72.3	115.3	29.17	22.37	14.91
202	2019/04/11	10:50:31	-13.850	-76.480	63	5.3 M _L	28	211.5	183.5	241.5	23.68	23.91	7.21
203	2019/05/26	02:41:12	-5.700	-75.270	141	8.0 M _W	28	727.5	703.5	743.9	48.34	54.14	32.97
204	2019/05/27	22:14:36	-12.400	-77.530	32	4.8 M _L	26	67.2	55.0	79.6	33.31	32.83	16.93
205	2019/06/11	00:37:43	-11.800	-77.840	45	4.1 M _L	2	87.2	79.5	95.0	1.65	2.33	1.39
206	2019/06/20	23:43:01	-11.840	-76.840	87	4.4 M _L	2	40.2	36.8	43.6	4.83	3.04	2.23
207	2019/08/05	02:48:46	-11.700	-76.560	100	4.5 M _L	3	71.7	68.7	77.6	3.23	6.37	6.67
208	2019/08/13	10:50:00	-10.140	-77.570	25	5.2 M _L	3	222.6	218.2	226.3	1.66	1.64	1.11
209	2019/09/01	02:11:55	-12.400	-76.760	40	4.0 M _L	2	50.0	43.0	57.1	1.51	0.98	0.77
210	2019/10/24	21:35:47	-11.860	-77.620	39	4.5 M _L	12	64.4	50.2	91.9	89.77	120.70	73.93
211	2019/10/25	21:35:47	-12.130	-77.900	30	4.5 M _L	3	89.3	80.4	94.8	14.51	10.24	7.79
212	2019/11/07	12:18:41	-12.420	-77.150	38	3.6 M _L	10	47.1	29.1	70.0	13.47	10.19	4.11
213	2019/11/12	16:47:34	-11.820	-77.470	52	4.6 M _L	13	49.6	31.6	80.1	113.68	89.19	83.28
214	2019/12/05	13:25:10	-12.570	-75.320	123	4.3 M _L	11	197.0	172.3	219.5	11.98	11.45	6.90
215	2019/12/05	22:23:19	-13.580	-75.990	44	5.8 M _L	6	199.9	182.5	210.0	8.99	9.17	6.74
216	2019/12/15	02:08:00	-12.740	-76.890	32	3.8 M _L	4	74.5	58.5	81.0	3.85	3.05	1.92
217	2019/12/19	08:55:35	-13.650	-76.160	44	4.3 M _L	4	192.7	179.7	199.5	1.42	1.25	0.95
218	2019/12/25	17:53:32	-12.570	-76.830	51	4.0 M _L	4	55.8	41.0	66.1	4.88	4.31	3.19
219	2019/12/28	00:56:54	-10.870	-78.620	30	4.8 M _L	4	221.5	207.1	236.6	1.35	1.16	0.85
220	2020/01/15	04:45:16	-10.390	-78.830	32	5.4 M _L	5	273.2	260.1	289.1	9.70	7.52	5.53
221	2020/01/16	18:45:26	-10.800	-77.760	85	4.4 M _L	3	169.2	161.2	180.5	1.66	1.82	1.44
222	2020/01/27	02:16:25	-12.280	-76.770	59	3.7 M _L	5	34.7	19.1	48.7	5.63	6.49	5.59
223	2020/01/27	14:42:11	-11.490	-77.670	48	4.1 M _L	4	97.5	84.7	113.4	2.69	2.06	1.68
224	2020/01/31	18:06:08	-12.530	-76.710	73	4.8 M _L	4	59.1	42.6	70.8	31.25	19.56	20.03
225	2020/02/14	10:10:48	-12.610	-77.860	12	4.7 M _L	3	104.0	96.4	110.1	2.25	1.96	1.75
226	2020/02/15	12:01:25	-12.130	-77.950	22	4.2 M _L	5	100.6	85.8	111.2	5.16	6.68	4.45
227	2020/02/25	23:14:57	-8.120	-80.260	21	5.3 M _L	1	581.3	581.3	581.3	1.58	1.80	1.08
228	2020/03/02	17:15:16	-12.090	-77.520	61	3.7 M _L	3	54.6	38.8	65.4	2.56	2.26	2.13
229	2020/04/01	08:58:20	-11.820	-77.130	68	4.5 M _L	2	31.8	29.1	34.5	7.74	4.89	3.40

Continúa en la página siguiente

Id ^A	Fecha Local		Coordenadas			Mag.	NR [†]	D _{epi} [‡] (km)			Max. PGA [§] (cm/s ²)		
	#	aaaa/mm/dd	hh:mm:ss	Lat (°)	Lon (°)			Prf. [¶]	Med.	Min.	Max.	EW	NS
230	2020/04/05	17:36:04	-12.440	-76.880	25	4.0 M _L	1	46.1	46.1	46.1	1.05	1.81	0.96
231	2020/04/24	20:58:44	-11.965	-77.221	57	4.3 M _L	7	22.2	11.1	31.6	15.88	20.88	7.60
232	2020/04/25	20:58:44	-11.990	-77.140	66	4.3 M _L	3	17.3	15.0	18.6	3.70	3.41	2.87
233	2020/04/29	09:53:58	-12.577	-76.795	49	4.0 M _L	7	67.4	58.3	84.3	8.03	4.61	2.44
234	2020/05/12	10:10:31	-10.666	-78.365	73	5.0 M _L	6	209.2	193.5	219.1	5.03	5.13	3.76
235	2020/09/09	13:17:06	-12.040	-76.933	71	4.5 M _L	19	20.6	4.0	39.0	59.84	55.19	20.36
236	2020/09/16	13:27:19	-11.940	-77.520	48	3.8 M _L	3	56.3	41.4	70.8	3.98	3.94	2.77
237	2020/10/25	23:52:47	-12.150	-76.990	61	4.0 M _L	1	12.9	12.9	12.9	1.48	1.17	0.78
238	2020/10/31	13:24:41	-10.235	-75.251	39	5.6 M _L	20	278.3	269.1	289.1	13.37	3.66	7.87
239	2020/11/02	08:42:16	-13.094	-77.006	27	4.6 M _L	1	124.7	124.7	124.7	7.06	1.79	4.84
240	2020/11/23	19:01:22	-12.640	-76.950	48	3.7 M _L	1	47.3	47.3	47.3	3.76	3.37	3.07
241	2020/11/26	00:37:19	-11.140	-78.090	39	4.3 M _L	2	158.8	144.2	173.3	3.26	2.18	1.87
242	2020/12/01	22:27:16	-12.893	-77.226	21	4.8 M _L	23	99.8	82.5	123.9	30.20	19.45	22.17
243	2020/12/02	22:27:17	-12.920	-77.260	32	4.8 M _L	5	95.5	86.0	102.8	15.92	12.98	10.11
244	2020/12/12	02:20:34	-11.900	-77.082	78	4.1 M _L	22	17.6	3.2	43.9	39.85	9.01	29.41
245	2020/12/12	08:51:39	-12.599	-76.747	55	4.2 M _L	25	71.5	42.2	102.0	15.89	10.45	13.74
246	2020/12/24	22:20:08	-12.490	-76.610	68	3.6 M _L	3	50.8	41.6	64.2	6.69	3.47	3.06
247	2020/12/27	02:11:10	-16.120	-74.420	45	6.1 M _L	3	509.5	504.9	513.4	1.85	1.69	1.46
248	2021/01/11	23:00:11	-12.700	-78.220	40	4.2 M _L	1	150.0	150.0	150.0	1.13	0.91	0.65
249	2021/01/12	13:48:32	-12.450	-76.930	47	4.1 M _L	26	51.6	24.7	79.1	38.37	12.01	23.04
250	2021/01/15	18:51:16	-12.812	-77.096	40	4.6 M _L	28	77.8	53.4	100.9	18.77	18.50	21.10
251	2021/01/17	04:58:12	-11.820	-77.780	30	3.6 M _L	20	81.9	66.9	109.5	10.02	8.41	7.92
252	2021/01/24	09:19:18	-12.130	-77.190	56	3.7 M _L	2	16.4	7.1	25.7	1.73	0.85	0.76
253	2021/02/05	18:55:21	-11.030	-78.190	30	4.8 M _L	33	165.1	138.6	196.4	18.30	13.68	12.94
254	2021/02/23	10:51:30	-12.960	-76.810	49	3.7 M _L	1	83.7	83.7	83.7	1.02	0.91	0.78
255	2021/02/24	17:07:32	-12.350	-77.010	50	4.0 M _L	2	34.3	26.1	42.5	7.69	3.78	7.27
256	2021/03/28	09:22:16	-12.430	-76.800	43	3.8 M _L	3	43.4	28.0	56.1	6.96	7.12	4.50
257	2021/04/07	16:18:37	-10.690	-78.380	50	4.4 M _L	2	216.7	202.4	231.0	1.66	1.61	1.70
258	2021/04/18	09:51:56	-12.530	-76.070	25	4.1 M _L	27	122.8	92.6	145.8	8.87	3.84	6.43
259	2021/04/19	23:53:34	-12.610	-76.870	44	5.0 M _L	30	69.3	41.4	98.0	47.22	38.77	26.95
260	2021/04/20	23:53:29	-12.596	-76.734	45	4.8 M _L	5	63.4	47.5	74.6	43.83	36.38	30.24
261	2021/04/21	12:24:52	-11.730	-77.240	71	3.8 M _L	30	38.4	9.3	69.1	13.44	6.18	11.13
262	2021/04/21	11:11:08	-12.320	-76.970	79	4.0 M _L	2	22.1	12.5	31.6	5.90	5.68	2.36

Continúa en la página siguiente

Id ^A	Fecha Local		Coordenadas			Mag.	NR [†]	D _{epi} [‡] (km)			Max. PGA [§] (cm/s ²)		
	#	aaaa/mm/dd	hh:mm:ss	Lat (°)	Lon (°)			Prf. [¶]	Med.	Min.	Max.	EW	NS
263	2021/05/12	10:56:57	-14.280	-75.850	59	5.6 M _L	5	268.0	251.7	282.9	14.97	11.10	8.45
264	2021/06/04	22:35:35	-15.160	-75.840	41	4.0 M _L	1	341.5	341.5	341.5	1.15	1.17	0.58
265	2021/06/07	17:00:48	-11.890	-76.620	102	4.0 M _L	5	51.3	41.8	62.5	6.28	6.28	3.82
266	2021/06/18	09:15:20	-12.150	-77.020	50	3.7 M _L	3	11.9	4.0	18.0	1.64	1.09	0.81
267	2021/06/22	21:54:18	-12.770	-76.910	32	6.0 M _W	40	83.8	59.3	113.7	230.32	207.85	125.42
268	2021/06/23	07:02:30	-12.739	-76.930	42	4.7 M _L	34	79.3	49.1	109.8	34.80	22.89	17.16
269	2021/06/24	20:44:47	-12.390	-76.740	51	3.7 M _L	2	49.7	47.0	52.5	1.68	1.29	0.96
270	2021/06/27	21:47:09	-11.587	-76.854	109	4.5 M _L	31	56.0	39.4	79.4	28.77	40.79	14.61
271	2021/06/29	01:05:18	-12.650	-76.780	46	3.5 M _L	3	64.1	45.9	75.1	0.46	0.60	0.29
272	2021/07/01	15:56:46	-12.670	-76.890	43	3.9 M _L	6	62.8	46.0	73.5	9.12	7.24	5.13
273	2021/07/05	09:41:03	-12.620	-76.800	44	3.7 M _L	2	59.2	47.3	71.2	4.08	3.30	2.08
274	2021/07/07	07:43:22	-12.650	-76.870	34	3.6 M _L	2	60.3	48.8	71.9	6.46	4.60	2.41
275	2021/07/07	01:38:49	-12.600	-76.790	36	3.7 M _L	1	45.5	45.5	45.5	2.15	1.55	1.39
276	2021/07/11	16:09:55	-12.000	-76.570	101	4.0 M _L	1	45.9	45.9	45.9	1.35	1.23	0.87
277	2021/07/17	11:21:00	-12.756	-76.958	45	4.2 M _L	40	79.5	52.1	111.0	15.72	11.91	6.78
278	2021/07/19	13:08:13	-11.500	-77.840	50	4.0 M _L	6	112.0	97.1	126.5	2.15	1.95	1.11
279	2021/07/20	00:35:46	-12.610	-77.060	42	3.6 M _L	5	56.0	44.1	64.8	3.86	3.07	2.60
280	2021/07/24	07:29:52	-12.960	-76.290	95	3.8 M _L	3	117.5	108.2	132.3	1.74	1.16	1.05
281	2021/07/27	11:58:38	-13.750	-76.490	30	4.0 M _L	5	188.4	176.7	200.3	1.54	1.38	1.24
282	2021/07/28	09:09:18	-13.590	-76.300	51	4.1 M _L	6	181.5	167.1	192.5	1.10	0.89	0.74
283	2021/07/28	02:45:19	-12.530	-76.930	42	4.3 M _L	6	47.8	35.1	57.4	19.74	15.26	11.06
284	2021/08/01	12:48:34	-12.770	-76.900	45	3.7 M _L	6	74.3	61.7	84.1	1.96	2.21	1.40
285	2021/08/07	19:59:02	-12.780	-76.850	47	3.6 M _L	5	79.2	64.2	86.3	3.71	2.81	2.51
286	2021/08/23	23:33:39	-11.130	-76.550	135	4.1 M _L	4	116.9	110.2	123.8	0.52	0.43	0.27
287	2021/08/24	14:39:38	-12.310	-77.250	39	4.4 M _W	37	38.5	28.1	59.9	31.48	24.29	17.13
288	2021/08/25	02:15:08	-12.471	-77.484	27	4.2 M _L	5	64.4	56.3	73.5	18.40	17.81	9.82
289	2021/08/25	02:15:08	-12.360	-77.510	41	5.1 M _L	33	62.3	50.5	74.7	47.72	51.98	41.95
290	2021/08/31	06:44:28	-13.530	-76.000	50	4.4 M _L	2	191.3	180.9	201.7	1.29	1.43	0.69
291	2021/11/28	01:32:29	-12.056	-77.542	65	5.2 M _W	34	53.8	41.1	76.3	139.79	113.73	84.87
292	2021/11/28	05:52:12	-4.440	-77.000	131	7.5 M _W	35	839.4	811.4	862.3	23.36	23.99	13.30

^ASe destacan los principales eventos sísmicos de la base de datos: Pisco 2007 (N° 4), Lagunas 2019 (N° 203), Mala 2021 (N° 267), Callao 2021 (N° 291) y Barranca 2021 (N° 292).

[¶]Profundidad hipocentral del evento en km.

[†] Número de registros acelerográficos recopilados del evento.

[‡] Distancias epicentrales de los registros, valor promedio (Med), máximo (Max) y mínimo (Min).

[§] Valores máximos de PGA de todos los registros del evento por componente.