

MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA-SÍSMICA DE LOS DISTRITOS DE LA PERLA Y SAN MIGUEL

GEOTECHNICAL-SEISMIC MICROZONATION OF THE DISTRICTS OF LA PERLA AND SAN MIGUEL

Gerson Carrasco-Díaz ¹, Diana Calderón-Cahuana ¹, Carlos Gonzales-Trujillo ¹

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Recibido (Received): 22 / 02 / 2024 Publicado (Published): 30 / 12 / 2025

RESUMEN

En este artículo se presenta el procedimiento que involucra la microzonificación geotécnica-sísmica de los distritos de La Perla y San Miguel. Estos distritos están altamente expuestos a un evento similar al terremoto ocurrido en el año 1746 (Lima), el cual produjo cuantiosas pérdidas de vidas y económicas. La selección de estos distritos se debió a la variabilidad superficial de los materiales y a la cantidad de datos disponibles. Para este estudio se utilizó la metodología empleada por el CISMID, la cual involucra recopilación de información geológica, geotécnica y geofísica, ejecución de ensayos geofísicos, procesamiento de la información y elaboración del mapa de microzonificación sísmica. Además, se consideró el análisis de propagación de ondas en perfiles profundos para estimar el movimiento del suelo en superficie. Para este último análisis se realizó previamente la evaluación de peligro sísmico probabilístico para estimar el movimiento a nivel de roca. Finalmente se obtuvieron los mapas de isoperiodos, Vs30 y microzonificación geotécnica-sísmica. En este último se identificaron cinco zonas con periodos fundamentales menores a 0.20 s: (a) Zona I: suelos con presencia de grava a poca profundidad (3 m) y Vs30 entre 450 m/s y 700 m/s, (b) Zona II-A: presencia de material areno-limoso (mayor a 3 m de profundidad), Vs30 entre 350 m/s y 450 m/s, (c) Zona II-B: presencia de material areno-limoso con profundidades mayores a 5 m y menores a 11 m y Vs30 menor a 350 m/s, (d) Zona IV: presencia de los acantilados de Lima y (e) Zona V: material de relleno (playa).

Palabras Clave: Microzonificación sísmica, ensayos geofísicos, isoperiodos, Vs30, perfiles profundos

ABSTRACT

This article presents the procedure that involves the geotechnical-seismic microzonation of the districts of La Perla and San Miguel. These districts are highly exposed to an event similar to the earthquake that occurred in 1746 (Lima), which caused significant loss of life and economic losses. The selection of these districts was due to the variability of the surface materials and the amount of available data. For this study, the methodology used by CISMID was used, which involves the collection of geological, geotechnical and geophysical information, the execution of geophysical tests, the processing of the information and the preparation of the seismic microzonation map. In addition, the analysis of wave propagation in deep profiles was considered to estimate the motion on the surface. For this last analysis, a probabilistic seismic hazard assessment was previously carried out to estimate the movement at rock. Finally, the isoperiod, Vs30 and geotechnical-seismic microzonation maps were obtained. In the latter, five zones with fundamental periods less than 0.20 s were identified: (a) Zone I: soils with the presence of gravel at shallow depth (3 m) and Vs30 between 450 m/s and 700 m/s, (b) Zone II-A: presence of sandy-silty material (greater than 3 m depth), Vs30 between 350 m/s and 450 m/s, (c) Zone II-B: presence of sandy-silty material with depths greater than 5 m and less than 11 m and Vs30 less than 350 m/s, (d) Zone IV: presence of the Lima cliffs and (e) Zone V: fill material (beach).

Keywords: Seismic microzonation, geophysical tests, isoperiods, Vs30, deep profiles

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente Lima Metropolitana ha sido sometida a eventos sísmicos, los cuales han traído como consecuencia pérdida de vidas humanas y materiales. En los últimos años, el crecimiento de la construcción de edificios multifamiliares en los distritos de La Perla y San Miguel ha aumentado. Sin embargo, debido a la diversidad de los tipos de suelos en la zona, resulta importante entender el

comportamiento del suelo frente a estos eventos de tal manera que pueda ser considerado en el diseño sismorresistente de edificaciones.

Los estudios previos a este trabajo señalan que el distrito de La Perla presenta capas superficiales de material areno arcillo de espesores que pueden llegar hasta 11 m [1]. Por otro lado, el distrito de San Miguel, que se encuentra contiguo al anterior, presenta una disminución del espesor de estos materiales hacia la

zona noreste. Debido a esto, se puede inferir que la respuesta sísmica del suelo puede ser diferente en estos sitios a pesar de encontrarse cercanos. A partir de esas consideraciones, se definió a los distritos de La Perla y San Miguel como zonas de interés (Fig. 1) para poder determinar áreas que compartan similares características geotécnicas y dinámicas.



Fig. 1. Área de estudio.

2. ANTECEDENTES

Según Villegas et al. [2], la región presenta un déficit en el deslizamiento de las placas tectónicas, lo que podría liberar la energía acumulada y desencadenar un terremoto con una magnitud momento (M_w) estimada de 8.8. Un sismo de tal magnitud tendría un impacto destructivo en la zona central del Perú, afectando severamente a Lima Metropolitana y localidades cercanas.

En los distritos de La Perla y San Miguel, se han desarrollado múltiples investigaciones, entre las que destacan las realizadas por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID-FIC-UNI). Estos estudios, orientados a la microzonificación sísmica, incluyeron evaluaciones geológicas, geotécnicas y geofísicas, identificando la presencia de suelos arcillosos, arenosos y gravosos en dichas áreas [3].

Adicionalmente, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) ha determinado que el centro de Lima se encuentra sobre depósitos aluviales dominados por grava del río Rímac [4]. Sin embargo, en zonas adyacentes como La Perla en el Callao, estos depósitos pierden espesor y son reemplazados por capas superficiales de arena y materiales finos [1].

La investigación de Quispe et al. [5] en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), ubicada en San Miguel, estimó un perfil de

velocidades de onda de corte (V_s), identificando depósitos de grava de compacidad media a densa [3]. Estos hallazgos permitieron evaluar la amplificación sísmica considerando la estructura geológica profunda del área.

Por su parte, Gonzales et al. [6] estimaron un perfil V_s en el Colegio Militar Leoncio Prado, situado a 3.70 km de la PUCP, detectando estratos de materiales areno-limosos. Estas diferencias reflejan que, a pesar de la proximidad geográfica, los depósitos de suelos en ambos distritos presentan variaciones en su estratigrafía y en sus características dinámicas.

Estudios realizados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), que incluyen perfiles V_s y análisis de relaciones espectrales horizontal/vertical (H/V), muestran picos en periodos cortos y largos, asociados a depósitos de suelos profundos de gran espesor [7]. Quispe et al. [8] también reporta amplificaciones en suelos de San Miguel en periodos largos, lo que destaca la necesidad de considerar periodos de vibración más allá de los rangos tradicionales.

3. METODOLOGÍA

La metodología empleada por el CISMID-FIC-UNI [3] fue tomada como base para la elaboración de los mapas de microzonificación sísmica. Así, el procedimiento utilizado es el siguiente:

- Recopilar información geológica para la identificación de unidades geomorfológicas y peligros naturales de geodinámica externa.
- Evaluar la sismicidad en el área de estudio mediante el análisis de peligro sísmico.
- Recolectar datos de estudios geotécnicos y geofísicos para tener una noción preliminar del comportamiento dinámico del suelo.
- Elaborar mapas de microzonificación geotécnica, de acuerdo al tipo de suelo encontrado y sus características mecánicas.
- Realizar ensayos geofísicos para capturar registros de vibraciones ambientales del área de estudio.
- Analizar estos registros mediante la técnica de relaciones espectrales H/V.
- Desarrollar modelos unidimensionales de perfiles V_s para representar áreas específicas distribuidas en toda la zona de estudio.
- Elaborar mapas de isoperiodos del suelo y de microzonificación geotécnica-sísmica.

Los ensayos geofísicos permiten estimar las características dinámicas del suelo mediante el uso de equipos de registro de ondas sísmicas. La aplicación

de estos ensayos es muy utilizada actualmente debido a su facilidad logística y obtención rápida de resultados. Debido a esto, las mediciones de microtemores puntuales, ensayos de arreglos de microtemores y ensayos de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW, por sus siglas en inglés) fueron considerados en este estudio.

3.1. Características geológicas y geotécnicas

El área de estudio se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de una llanura aluvial, los acantilados de la Costa Verde y áreas de playa. La llanura aluvial muestra uniformidad en sus unidades litológicas, salvo en los depósitos aluviales más recientes. Se ha observado una reducción en el espesor de los materiales de grava en los depósitos pleistocénicos a medida que se avanza hacia el oeste, siendo sustituidos por capas superficiales de arena y arcilla, como ocurre en La Perla.

Los acantilados de la Costa Verde, situados al sur de ambos distritos, están formados por depósitos aluviales y, en algunas áreas, incluyen rellenos. Las playas, ubicadas al pie de estos acantilados, han sido conformadas con materiales de relleno como parte de las obras del proyecto Costa Verde.

En las capas superficiales de la llanura predominan materiales arenosos limosos, mientras que en las capas profundas se encuentra la grava aluvial, la cual presenta una alta capacidad para soportar estructuras de gran carga. Estas características están reflejadas en el mapa de microzonificación geotécnica (Fig. 2), desarrollado por el CISMID [1].

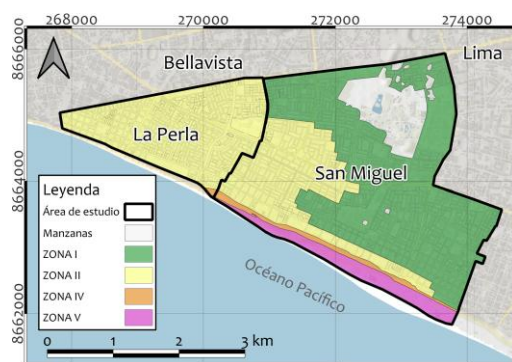


Fig. 2. Mapa de microzonificación geotécnica del área de estudio. [1]

El mapa de microzonificación geotécnica de la Fig. 2 fue considerado para la elaboración del mapa

de microzonificación geotécnica-sísmica debido a que representa el contenido superficial de los depósitos de suelos (profundidades menores a 3 m) en donde se cimientan viviendas comunes. Este mapa (Fig. 2) identifica cuatro microzonas principales: (a) Zona I, compuesta por grava aluvial cubierta por una capa superficial delgada de material fino; (b) Zona II, caracterizada por suelos arenosos, limosos y arcillosos, con espesores que varían entre 3 m y 12 m, siendo más potentes en la zona oeste y disminuyendo hacia el este, donde se encuentra grava aluvial subyacente; (c) Zona IV, que corresponde a los acantilados de la Costa Verde; y (d) Zona V, que comprende áreas de relleno.

3.2. Evaluación de peligro sísmico

Para estimar el movimiento del suelo a nivel de roca, se realizó una evaluación probabilística del peligro sísmico en el área de estudio. Para la definición de fuentes sismogénicas se tomó como referencia las geometrías y recurrencia sísmica de Roncal [9] y CISMID [10] considerando 11 fuentes con potencial mecanismo de subducción (incluyendo interfase e intraplaca) y 5 fuentes continentales. Las geometrías de las fuentes se muestran en la Fig. 3 y sus parámetros de recurrencia se detallan en la Tabla I.

Tabla I
Parámetros de recurrencia sísmica

Fuente	Mmin	Mmax	Beta	Tasa
F2	4.5	8	1.302	4.2
F3	4.8	8.6	1.732	3.98
F4	4.4	8.4	1.73	6.62
F8	4.4	6.6	1.99	3.38
F9	5	8	3.351	3.359
F10	4.5	7	1.805	6.57
F13	4.3	7.4	1.491	3.71
F14	4.2	6.6	1.28	2.07
F15	4.6	6	2.334	2.52
F16	4.1	6.9	1.307	1.25
F18	4.8	7.1	2.413	3.13
F22	4.1	7.2	1.068	1.32
F23	4.5	7	1.384	0.675
F27	4.8	6.8	2.162	1.27
F28	4.5	7	1.667	2.85
F29	4.3	7	1.259	1.42

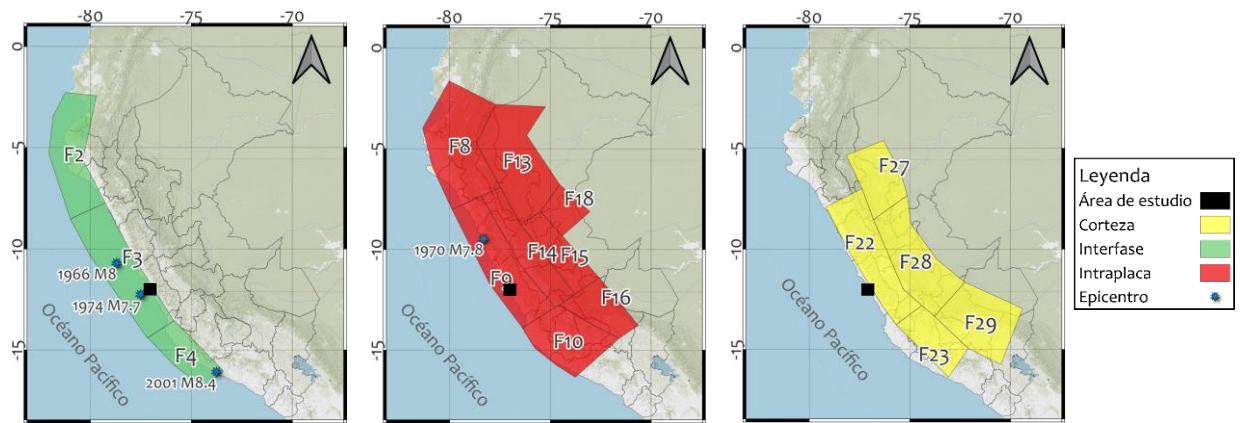


Fig. 3. Fuentes sismogénicas consideradas para el análisis de peligro sísmico.

Los modelos de movimiento del suelo (GMM) de mecanismo de subducción utilizados fueron de los trabajos de Montalva (2017) y Parker (2020). Estas ecuaciones fueron calibradas con información mundial que incluye la data sísmica peruana.

En la Tabla II y Tabla III se muestra el árbol lógico utilizado para fuentes de subducción y continentales, respectivamente.

Tabla II
Árbol lógico de los GMM para fuentes de subducción

GMM	Peso
Montalva et al. [11] – 2017	0.50
Parker et al. [12] - 2020	0.50

Tabla III
Árbol lógico de los GMM para fuentes continentales

GMM	Peso
Campbell & Bozorgnia [13]	0.25
Chiou & Youngs [14]	0.25
Abrahamson et al. [15]	0.25
Sadigh et al. [16]	0.25

Se generaron los espectros de peligro uniforme (UHS, por sus siglas en inglés) para suelos de los tipos Vs promedio de los 30 primeros metros (V_{s30}) de 1500 m/s y 360 m/s. Estos V_{s30} respectivamente correspondientes a Suelos tipo A y C de acuerdo con la clasificación del International Building Code (IBC). En la Fig. 4. Se muestran los UHS considerando un periodo de retorno de 475 años.

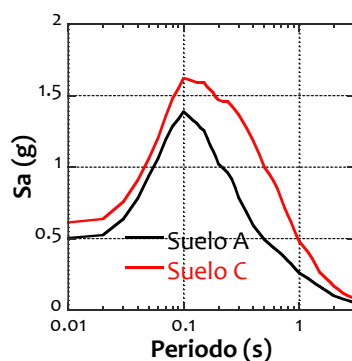


Fig. 4. UHS para Tr=475 años

3.3. Análisis de respuesta de sitio

El objetivo del análisis de respuesta de sitio es estimar el movimiento en la superficie mediante la propagación unidimensional de ondas, partiendo desde un material rígido y profundo, como la roca sana. Para el desarrollo de este análisis se utilizó en programa DeepSoil v7.

Para realizar este análisis, se emplearon cinco perfiles profundos de velocidad de ondas de corte (V_s), los cuales fueron obtenidos a través de ensayos de arreglos de microtemores (Fig. 5). Las ubicaciones específicas de estos perfiles se detallan en la Tabla IV y se muestran en la Fig. 6.

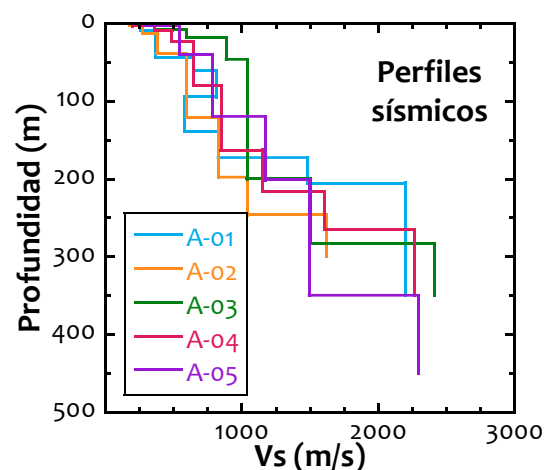


Fig. 5. Perfiles Vs profundos

Tabla IV
Ubicación de los perfiles Vs utilizados en el análisis de respuesta

Perfil	Coordenadas UTM		Distrito
	Este (m)	Norte (m)	
A-01 [6]	269337.00	8664288.00	La Perla
A-02	270206.23	8664327.66	La Perla
A-03 [5]	273632.00	8664470.00	San Miguel
A-04	271914.84	8664550.00	San Miguel
A-05	272916.11	8663220.19	San Miguel

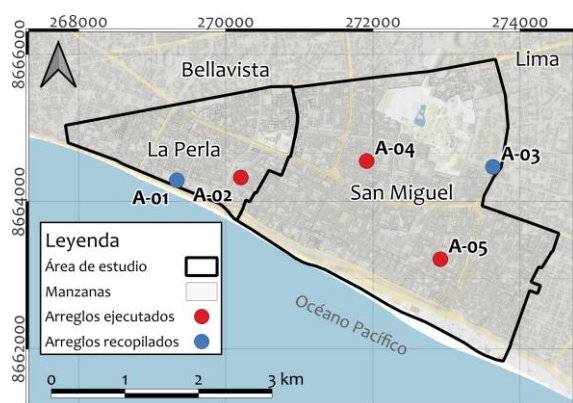


Fig. 6. Ubicación de los perfiles Vs profundos.

La Fig. 5 muestra que el espacio semi-infinito del perfil A-02 (representado en color naranja) alcanza un valor de V_s de 1624 m/s, siendo menor en comparación con los demás perfiles. Por esta razón, y para uniformar el análisis, los espacios semi-infinitos de los otros perfiles fueron ajustados a valores de V_s cercanos a 1500 m/s. Las características de los materiales de las capas de los perfiles A-01 a A-05 y los modelos de las curvas dinámicas de deformación se presentan en las Tablas V, VI, VII, VIII y IX, respectivamente.

Tabla V
Materiales del perfil A-01

Capa	Material	Espesor (m)	V_s (m/s)	Modelo
1	Arena con arcilla	2.6	175.7	Laboratorio
2	Arena con arcilla	6.4	256.4	Laboratorio
3	Grava	33.8	367.5	Menq (2003)
4	Grava	17.7	643.7	Menq (2003)
5	Grava	33.6	814.1	Menq (2003)
6	Grava	44.5	580.3	Menq (2003)
7	Grava	33.9	825.2	Menq (2003)
8	Roca	-	1482.8	Basamento

Tabla VI
Materiales del perfil A-02

Capa	Material	Espesor (m)	V_s (m/s)	Modelo
1	Arcilla	1.6	176.2	Zhang (2005)
2	Arcilla	11.5	272.0	Zhang (2005)
3	Grava	25.7	379.1	Menq (2003)
4	Grava	82.1	595.5	Menq (2003)
5	Grava	76.7	828.2	Menq (2003)
6	Grava	48.6	1042.1	Menq (2003)
7	Roca	-	1624.5	Basamento

Tabla VII
Materiales del perfil A-03

Capa	Material	Espesor (m)	V_s (m/s)	Modelo
1	Grava	7.7	362	Menq (2003)
2	Grava	9.9	596	Menq (2003)
3	Grava	28.5	884	Menq (2003)
4	Grava	153.8	1038	Menq (2003)
5	Roca	-	1503	Basamento

Tabla VIII
Materiales del perfil A-04

Capa	Material	Espesor (m)	V_s (m/s)	Modelo
1	Arcilla	3.1	195.0	Zhang (2005)
2	Grava	6.3	356.0	Menq (2003)
3	Grava	13.1	485.2	Menq (2003)
4	Grava	56.8	641.1	Menq (2003)
5	Grava	83.7	846.2	Menq (2003)
6	Grava	53.3	1154.5	Menq (2003)
7	Roca	-	1608.0	Basamento

Tabla IX
Materiales del perfil A-05

Capa	Material	Espesor (m)	V_s (m/s)	Modelo
1	Grava	2.6	362	Menq (2003)
2	Grava	37.2	596	Menq (2003)
3	Grava	79.5	884	Menq (2003)
4	Grava	81.5	1038	Menq (2003)
5	Roca	-	1503	Basamento

Las dos primeras capas del perfil A-01 están compuestas por un suelo clasificado como SM (arena limosa), cuyas propiedades de degradación se evaluaron mediante ensayos de columna resonante y corte torsional [17] (Fig. 7). En contraste, la arcilla superficial presente en los demás perfiles fue modelada utilizando las curvas de degradación propuestas por Zhang [18], dado que corresponden a materiales del Cuaternario con índices de plasticidad (IP) entre 5 y 10, conforme a los resultados de las calicatas cercanas a estos perfiles.

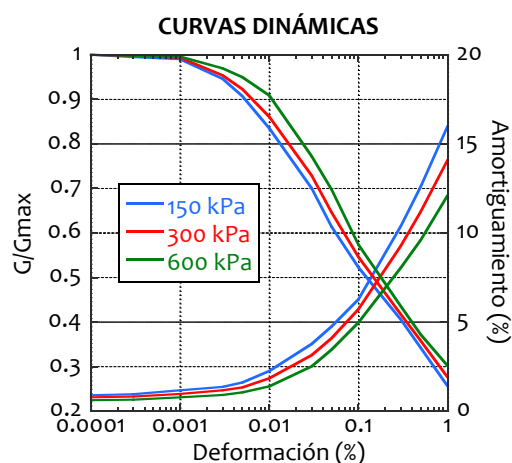


Fig. 7. Curvas dinámicas de deformación del material SM del perfil A-01.

Para modelar el comportamiento del material gravoso, se emplearon las curvas dinámicas propuestas por Menq [19], considerando un valor de $D_{50}=25$ mm, característico de las gravas de Lima. Para determinar el coeficiente de uniformidad (C_u), se recopiló información de ensayos de corte directo a gran escala realizados en el Laboratorio Geotécnico del CISMID-FIC-UNI sobre gravas aluviales del río Rímac (Fig. 8). Se identificó que las gravas de Lima

presentan valores elevados de Cu, superando el rango de aplicación del modelo de Menq [19]. Para lidiar con esta limitación, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, el cual consistió en evaluar la respuesta sísmica promedio para distintos valores de Cu. El análisis de sensibilidad se explicará párrafos más adelante.

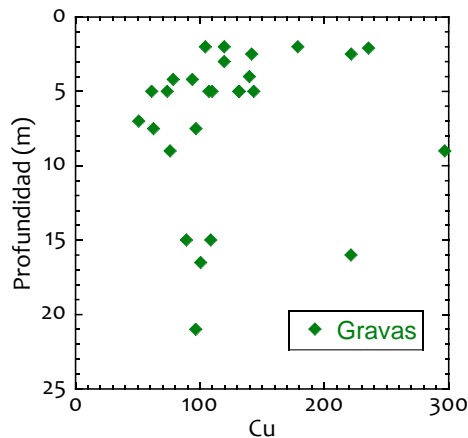


Fig. 8. Coeficientes de uniformidad de las gravas de Lima a diferentes profundidades.

En la evaluación de la respuesta de sitio, se seleccionaron cinco escenarios sísmicos para simular el comportamiento dinámico de los depósitos del suelo. Los epicentros y magnitudes de estos eventos sísmicos se muestran en la Tabla X.

Tabla X
Eventos sísmicos seleccionados

Sismo	Fecha	Ubicación (°)		Magnitud (Mw)
		Lat.	Long.	
Lima y Callao de 1966	17/10/1966	-	-	8.0
Áncash de 1970	31/05/1970	-9.36	-78.87	7.8
Lima de 1974	3/10/1974	-12.50	-77.98	7.7
Sur del Perú de 2001	23/06/2001	-16.08	-73.77	8.4

Estos escenarios fueron seleccionados considerando la magnitud de estos (Mw mayor a 7.5) y el mecanismo de falla que predomina en el área de estudio (subducción). Además, en la Tabla XI se describe la duración significativa de cada evento sísmico, la cual fue estimada a partir de los registros sísmicos como aquella que se encuentra entre el 5% y 95% de la Intensidad de Arias. La Fig. 3 muestra la ubicación de las fuentes sísmogénicas y epicentro de los escenarios para mecanismos de interfase e intraplaca. Los registros sísmicos correspondientes a cada escenario fueron obtenidos en las estaciones PQR (Parque de la Reserva), SCO (Estación Surco) y MOQ (Estación César Vizcarra). Las ubicaciones de las estaciones sísmicas se muestran la Tabla XII y los parámetros de los registros en la Tabla XIII. Es

importante mencionar que las estaciones PQR [20] y MOQ [21] se encuentran emplazadas sobre suelo tipo S1 con velocidades que superan los 500 m/s según la Norma Técnica Peruana E.030, mientras que la estación SCO se encuentra sobre un suelo S2. Sin embargo, esta última presenta valores cercanos a 500 m/s según los estudios del CISMID [22]. Los registros sísmicos fueron procesados utilizando un filtro Butterworth pasa banda de cuarto orden y ajustados al UHS correspondiente al suelo tipo A. Los espectros de los registros sintéticos obtenidos del ajuste espectral se muestran en la Fig. 9.

Tabla XI
Características de los eventos sísmicos seleccionados

Evento	Prof (km)	Duración (s)	Mecanismo
Lima y Callao de 1966	37	15	Interfase [23]
Áncash de 1970	43	30	Intraplaca [24]
Lima de 1974	21	47	Interfase [23]
Sur del Perú de 2001	32	36	Interfase [23]

Tabla XII
Ubicación de las estaciones acelerográficas

Estación	Distrito	Ubicación (°)	
		Lat.	Long.
PQR	Lima	-12.070	-77.040
SCO	Santiago de Surco	-12.130	-76.980
MOQ	Moquegua	-17.186	-70.928

Tabla XIII
Parámetros de los registros sísmicos seleccionados

ID	Evento	Estación	PGA (g)	I. Arias (m/s)	Dist. Epic. (km)	Tipo
1	Lima y Callao de 1966	PQR	EW: 0.18	0.65	235	S1
			NS: 0.27	0.93		
			EW: 0.11	0.32		
2	Áncash de 1970	PQR	NS: 0.10	0.27	320	S1
			EW: 0.2	1.36		
			NS: 0.18	0.95		
3	Lima de 1974	PQR	EW: 0.20	1.63	56	S1
			NS: 0.21	2.09		
			EW: 0.3	2.85	60	S2
4	Lima de 1974	SCO	NS: 0.22	2.47		
			EW: 0.3	2.85		
			NS: 0.22	2.47	326	S1
5	Sur del Perú de 2001	MOQ	EW: 0.3	2.85		
			NS: 0.22	2.47		
			EW: 0.3	2.85		

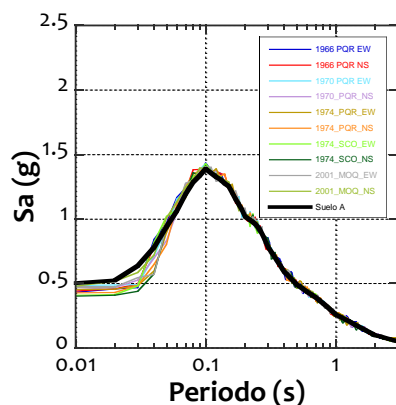
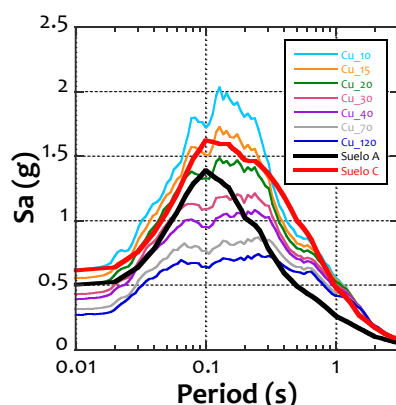


Fig. 9. Ajuste espectral de los registros sísmicos

Para el análisis de propagación de ondas, se consideraron los siguientes aspectos:

- Se llevó a cabo un análisis no lineal.
- Se utilizó el modelo GQ/H desarrollado por Groholski [25].
- Las capas de suelo fueron discretizadas de manera que la frecuencia máxima en cada estrato subdividido superara los 30 Hz.
- Se asumió que el movimiento de entrada se origina en un afloramiento rocoso.
- Cada perfil de suelo fue evaluado utilizando los cinco escenarios sísmicos seleccionados.

Como se mencionó anteriormente, no se estableció un valor de C_u para caracterizar el material gravoso. Por esta razón, se realizó un análisis de sensibilidad el cual consistió en la estimación de espectros de respuesta promedio para distintos valores de C_u . En la Fig. 10 se muestran los espectros de peligro uniforme para Suelo A, C y los espectros de respuesta promedio para valores de C_u de 10, 15, 20, 30, 40, 70 y 120 de la grava aluvial. En esta gráfica se observa que el C_u de 20 se encuentra dentro de los límites de los espectros del Suelo A (color negro) y Suelo C (color rojo) para el rango de periodos de 0.02 y 0.9 s. En consecuencia, en este artículo se estableció un valor representativo de C_u igual a 20 para el material gravoso únicamente para la aplicación de la ecuación de Menq [19] en el análisis de respuesta de sitio.

Fig. 10. Análisis de sensibilidad para distintos C_u .

Los espectros de respuesta promedio en la superficie para los cinco perfiles de velocidad V_s (líneas continuas) y los espectros de peligro uniforme (UHS) para suelos A y C (líneas discontinuas) se muestran en la Fig. 11.

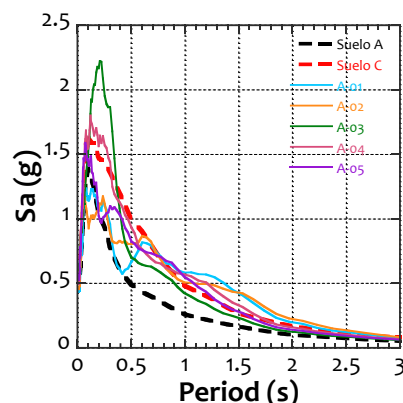


Fig. 11. UHS en suelo A y C y espectros de respuesta promedio en superficie de los perfiles profundos.

Los resultados del análisis de respuesta de sitio demostraron que a pesar de la cercanía de los perfiles V_s obtenidos a partir de arreglos de microtremores, estos pueden presentar diferencias en su respuesta dinámica debido a la variabilidad de rigideces en profundidad. En el caso de los perfiles A-01 y A-02, al encontrarse sobre zonas con menor V_{s30} (365 m/s y 322 m/s, respectivamente), presentan menor amplificación en el rango de periodos de 0.01 a 0.6 s y muestran una mayor amplificación para periodos mayores, superando incluso el UHS del suelo tipo C. Por otro lado, los perfiles A-03 y A-05, que presentan características más rígidas (587 m/s y 555 m/s), muestran amplificaciones importantes en periodos menores a 0.6 s y posteriormente su respuesta va decayendo para periodos mayores. Finalmente, este análisis de respuesta ayudó a definir las zonas del mapa de microzonificación sísmica juntamente con los resultados de los ensayos geotécnicos y geofísicos recopilados y ejecutados.

3.5. Microzonificación sísmica

Con base en la información recopilada y procesada, se elaboraron mapas de isoperiodos, de valores promedio de velocidad de onda de corte en los primeros 30 m (V_{s30}), y de microzonificación sísmica-geotécnica para los distritos de La Perla y San Miguel.

El mapa de isoperiodos se creó a partir de los valores obtenidos de las mediciones de microtremores utilizando la técnica de Nakamura [26]. Para esto, se emplearon velocímetros triaxiales GEODAS 15-HS de 1 Hz y TOKYO SOKUSHIN de 0.2 Hz de frecuencia (Fig. 12).



Fig. 12. Equipos de medición puntual de microtemores.

Las Figuras 13 y 14 muestran las relaciones espectrales H/V recopiladas (color gris) y obtenidas en campo (otros colores) para los distritos de La Perla y San Miguel, respectivamente. Se identificaron valores de periodo de vibración del suelo tanto en rangos cortos (menores a 0.60 s) como largos (mayor a 0.60s).

La Fig. 15 muestra el mapa de isoperiodos para periodos cortos, en el cual se identifican tres microzonas: (a) Zona I, caracterizada por picos de periodos cortos menores a 0.20 s, correspondientes a suelos rígidos; (b) Zona II, que presenta picos de periodos cortos entre 0.20 y 0.25 s, lo cual indica suelos de rigidez media; y (c) Zona de relleno, compuesta por suelos muy heterogéneos debido a la presencia de materiales de relleno, con periodos cortos que oscilan entre 0.10 y 0.35 s.

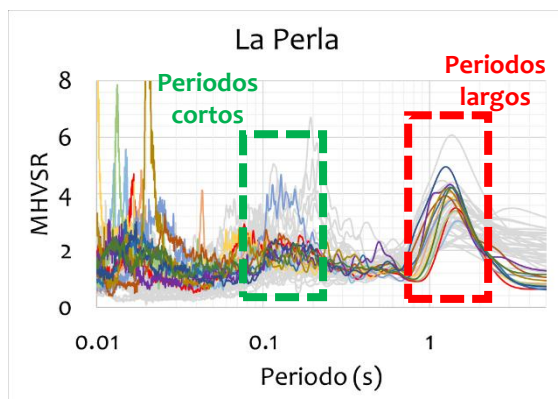


Fig. 13. Razones espectrales HV en La Perla.

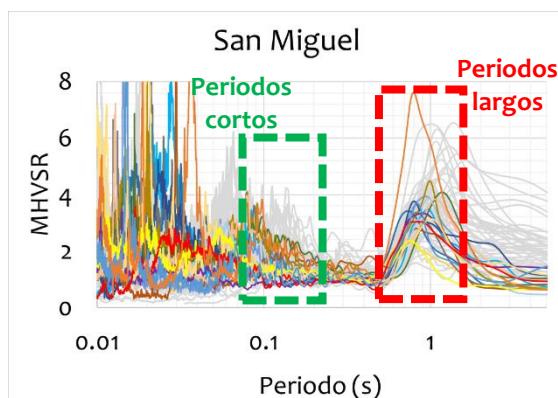


Fig. 14. Razones espectrales HV en San Miguel.



Fig. 15. Mapa de isoperiodos para valores de periodos cortos.

La Fig. 16 muestra el mapa de isoperiodos para valores de periodos largos, en el que se identifican cuatro microzonas: (a) Zona A, con picos de periodos largos que varían entre 0.60 y 1.00 s; (b) Zona B, donde los picos de periodos largos se encuentran entre 1.00 y 1.30 s; (c) Zona C, con periodos largos que oscilan de 1.30 a 1.70 s; y (d) Zona de relleno, en la cual los periodos largos fluctúan entre 0.60 y 1.30 s.



Fig. 16. Mapa de isoperiodos para valores de periodos largos.

El mapa de Vs30 fue elaborado a partir de los ensayos MASW [27], empleando 24 geófonos verticales de 4.5 Hz separados cada 2 m (Fig. 17).

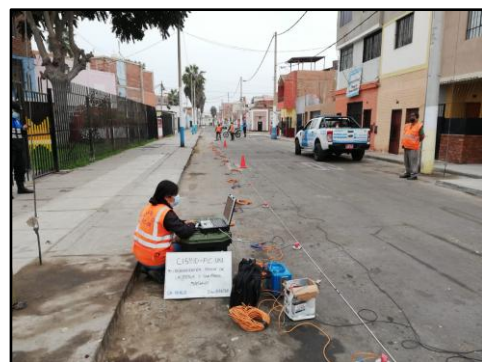


Fig. 17. Equipos de ensayo MASW.

Las Figuras 18 y 19 muestran los perfiles Vs superficiales recopilados (color gris) y los ejecutados (otros colores) en los distritos de La Perla y San Miguel, respectivamente. En San Miguel, los suelos

tienden a volverse más blandos a medida que se acercan a los acantilados y se tornan más rígidos al alejarse de ellos.

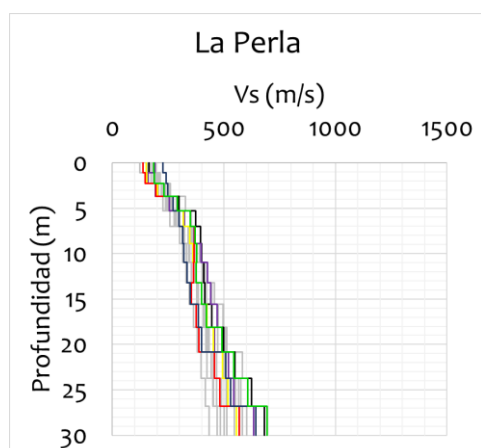


Fig. 18. Perfiles Vs superficiales en La Perla.

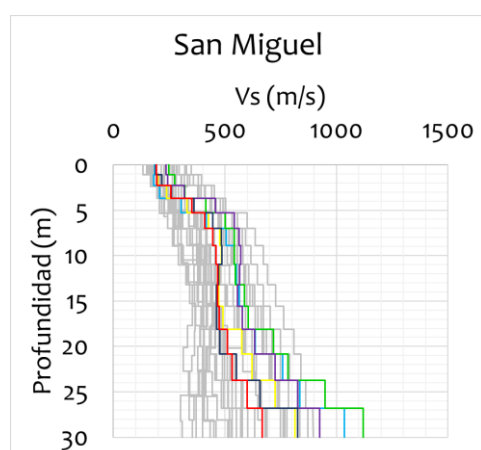


Fig. 19. Perfiles Vs superficiales en San Miguel.

La Fig. 20 presenta el mapa de Vs30, basado en la clasificación propuesta por Aguilar et al. [28]. Se definieron cuatro microzonas: (a) S1, que representa suelos muy rígidos con valores de Vs30 entre 500 m/s y 650 m/s; (b) S2a, correspondiente a suelos intermedios con Vs30 en el rango de 350 m/s a 500 m/s; (c) S2b, que incluye suelos intermedios con Vs30 de 300 m/s a 350 m/s; y (d) Zona de relleno (no zonificada), donde los valores de Vs30 oscilan entre 340 y 520 m/s.

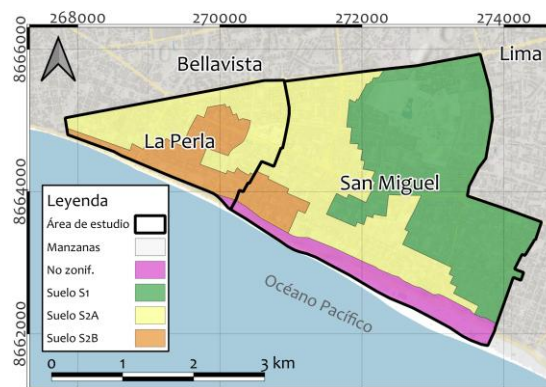


Fig. 20. Mapa de Vs30.

Finalmente, el mapa de microzonificación geotécnica-sísmica (Fig. 21) integra información geológica, geotécnica, el mapa de isoperiodos cortos y Vs30, definiendo cinco microzonas:

- Zona I: Esta zona abarca suelos con valores de Vs30 que oscilan entre 450 m/s y 700 m/s, predominando los suelos clasificados como S1 según la NTP E-0.30, con periodos cortos inferiores a 0.20 s. Las capas superficiales están compuestas por material arenoso-limoso con un espesor menor a 3 m, seguido de material aluvial gravoso.
- Zona II-A: Caracterizada por suelos con Vs30 entre 350 m/s y 450 m/s, correspondientes a suelos S2 según la NTP E-0.30, con periodos cortos menores a 0.20 s. La zona presenta capas superficiales de material arenoso-limoso con espesores superiores a 3 m, debajo de las cuales se encuentra grava aluvial.
- Zona II-B: Esta zona presenta suelos con Vs30 por debajo de 350 m/s, clasificados como suelos S2 según la NTP E-0.30, con periodos cortos menores a 0.20 s. Las capas superficiales de material arenoso-limoso superan los 5 m de espesor y pueden llegar hasta 11 m, en contraste con la zona II-A, y debajo de estas capas se encuentra grava aluvial.
- Zona IV: Corresponde a los acantilados de la Costa Verde, donde existe peligro alto, como derrumbes.
- Zona V: Compuesta por material de desmonte proveniente de diversas áreas de la ciudad, esta zona presenta una gran variabilidad en los valores de Vs30 y en los periodos de vibración ambiental, y está expuesta a peligro muy alto por tsunamis.

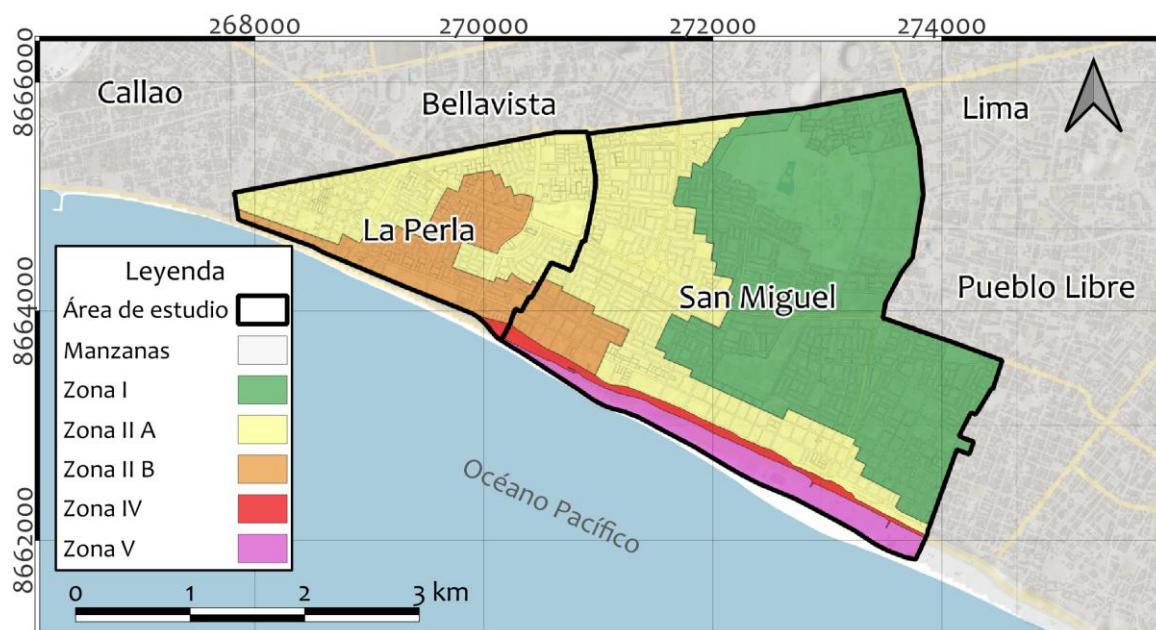


Fig. 21. Mapa de microzonificación geotécnica-sísmica de los distritos de La Perla y San Miguel.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para validar el mapa de microzonificación geotécnica-sísmica, se llevó a cabo un análisis espectral de los sismos registrados (Tabla XIV) en estaciones cercanas al área de estudio (Tabla XV). Las máximas aceleraciones del suelo (PGA) obtenidas en las estaciones y su distancia epicentral se muestran en la Tabla XVI. Los espectros de respuesta de aceleración de eventos como los sismos de Lagunas, Ica, Mala, Callao, Amazonas y Lima se presentan en las Figuras 19 a 24, utilizando colores que corresponden a la zona de microzonificación de los acelerógrafos: verde para la Zona I, amarillo para la Zona II-A y naranja para la Zona II-B.

Tabla XIV
Registros sísmicos en el área de estudio

Sismo	Fecha	Ubicación (°)		Magnitud (Mw)
		Lat.	Long.	
Lagunas	26/05/2019	-5.73	-75.55	8.0
Ica	12/05/2021	-14.27	-75.90	5.8
Mala	22/06/2021	-12.77	-77.01	6.0
Callao	28/11/2021	-12.06	-77.54	5.2
Amazonas	28/11/2021	-4.43	-76.94	7.5
Lima	07/01/2022	-11.97	-76.84	5.6

Tabla XV
Ubicación de las estaciones acelerográficas

Estación	Distrito	Ubicación (°)		Red acelerográfica
		Lat.	Long.	
PRADO	La Perla	-12.07	-77.12	CISMID
PUCP	San Miguel	-12.07	-77.08	PUCP
UPCSM	San Miguel	-12.09	-77.10	CISMID
UNMSM	Lima	-12.04	-77.54	CISMID

Tabla XVI
Ubicación de las estaciones acelerográficas

Sismo	Estación	PGA-EW (cm/s ²)	PGA-NS (cm/s ²)	Distancia epicentral (km)
Amazonas 2021	UPCSM	6.4	6.2	845.6
	UNMSM	3.9	4.2	842.4
	PUCP	4.9	3	844.2
Lagunas 2019	PRADO	12.5	16.2	733.7
	PUCP	11	6.6	732.5
	UPCSM	13.6	17.2	734.2
Ica 2021	PRADO	3	21.3	280.1
	UPCSM	3	4	277.8
Mala 2021	PUCP	59.6	55.7	77.1
	UPCSM	58.7	102.9	76
	UNMSM	31.8	35.1	79.1
Callao 202	UPCSM	24.5	22.7	48.7
	UNMSM	7.7	8.3	49.4
	PUCP	15.9	9.8	50.2
Lima 2022	PUCP	39.7	33.3	25.1
	UPCSM	87.4	54.2	27.2

Aunque los sismos seleccionados fueron de magnitudes moderadas, se observaron picos tanto en periodos cortos como largos. En los eventos cercanos (Ica, Mala, Callao y Lima), los espectros indicaron amplificaciones en periodos cortos, asociadas a la predominancia de ondas de alta frecuencia típicas del campo cercano. Por otro lado, los sismos de Lagunas y Amazonas, con mayores distancias epicentrales, presentaron picos en periodos largos, demostrando la influencia de ondas en este rango.

En este análisis se demuestra que la respuesta obtenida de registros sísmicos reales tiene relación

con el mapa de microzonificación presentado para el área de estudio. Es decir, las aceleraciones espectrales mostradas en las Figuras 22 a 27 son mayores en aquellas estaciones emplazadas en la zona II B (color naranja), intermedias para estaciones ubicadas en la zona II A (color amarillo) y bajas para aquellas instaladas en la zona I (color verde).

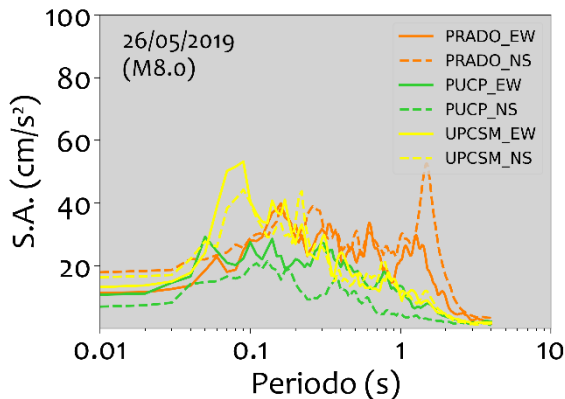


Fig. 22. Espectros de respuesta del sismo Lagunas (2019).

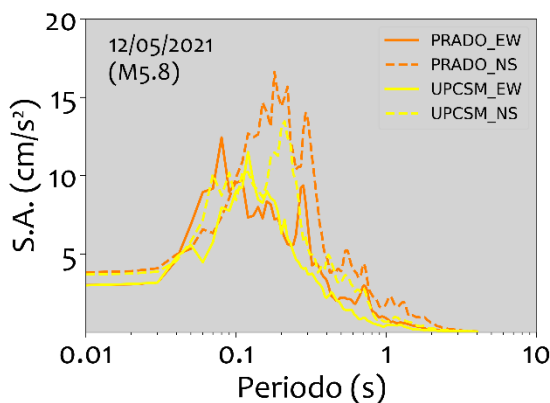


Fig. 23. Espectros de respuesta del sismo de Ica (2021).

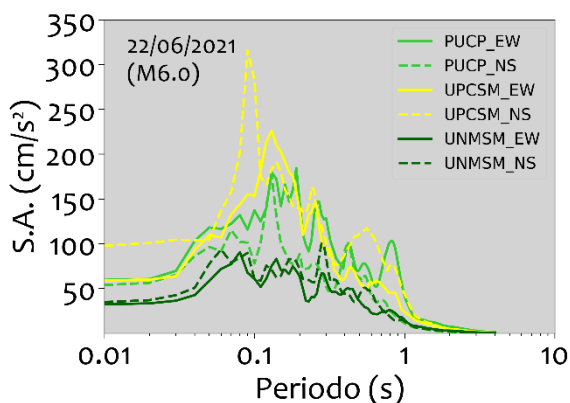


Fig. 24. Espectros de respuesta del sismo de Mala (2021).

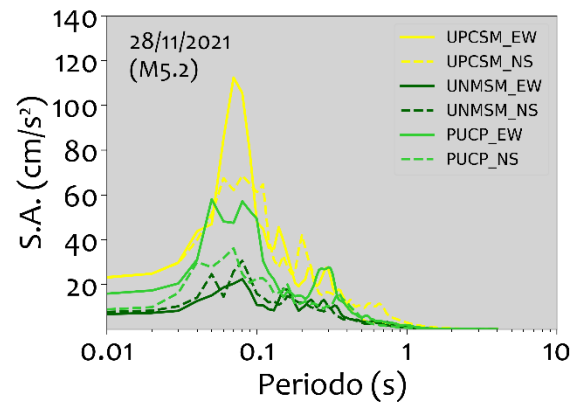


Fig. 25. Espectros de respuesta del sismo de Callao (2021).

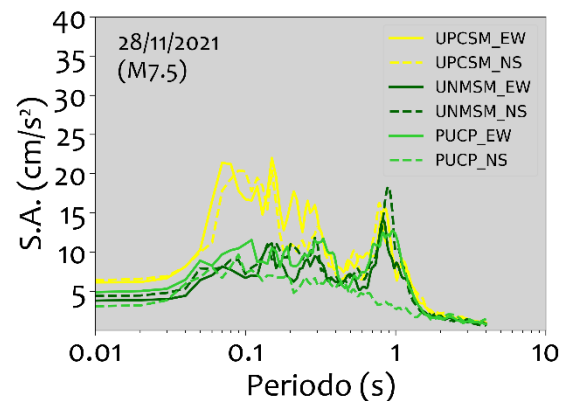


Fig. 26. Espectros de respuesta del sismo de Amazonas (2021).

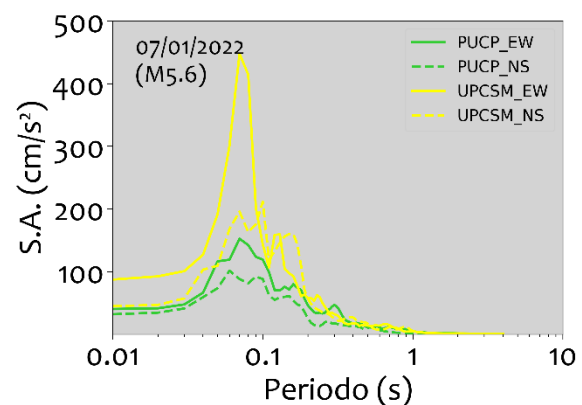


Fig. 27. Espectros de respuesta del sismo de Lima (2022).

Las funciones de transferencia obtenidas de los análisis de respuesta no lineal en los cinco perfiles profundos de Vs (Fig. 28) también muestran la presencia de periodos largos alrededor de 1 s, lo que sugiere que los depósitos de suelos profundos (mayores a 30 m) amplifican estos rangos de periodos, incluso en suelos rígidos como el del perfil A-03. No obstante, estos periodos largos no se incluyeron en la microzonificación final debido a la necesidad de contar con más datos sobre el nivel de amplificación.

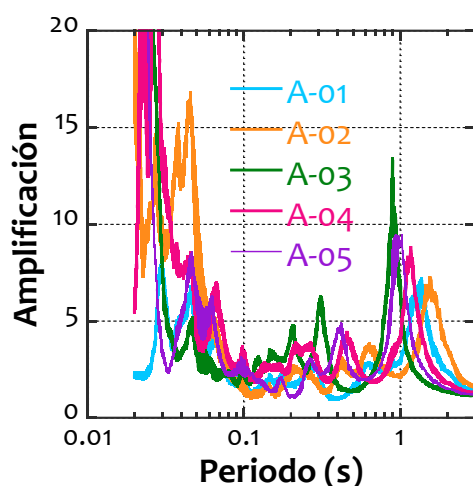


Fig. 28. Funciones de transferencia de los cinco perfiles profundos.

CONCLUSIONES

- Las relaciones espectrales H/V muestran picos en periodos cortos, generalmente menores a 0.20 s, lo que indica la presencia de suelos rígidos. También se identifican picos en periodos más largos, entre 0.60 s y 1.70 s, que podrían estar relacionados con depósitos más profundos; sin embargo, se necesita más información para evaluar su impacto.
- Los mapas de Vs30 indican que los suelos más rígidos (suelo S1) se localizan en el noreste del área de estudio, lo cual coincide con la ausencia de materiales arenosos y arcillosos y la predominancia de materiales gravosos. En contraste, los suelos más blandos (suelos S2) se encuentran en el centro del distrito de La Perla y en áreas cercanas a los acantilados de la Costa Verde.
- Los análisis de sensibilidad de la respuesta sísmica de los perfiles de suelo sugieren que un coeficiente de uniformidad (Cu) representativo para las gravas del conglomerado de Lima, de acuerdo con el modelo de Menq, es de 20.
- Los resultados del estudio fueron validados mediante la comparación de los espectros de respuesta de sismos de magnitudes moderadas, registrados en estaciones situadas en cada una de las zonas definidas por la microzonificación. Se observaron menores amplificaciones en los espectros ubicados en la zona I, y mayores amplificaciones en la zona II.
- En el área de estudio se identificaron cinco microzonas: (a) Zona I: suelos rígidos con velocidades de Vs entre 450 m/s y 700 m/s; (b) Zona II-A: suelos intermedios con velocidades de Vs entre 350 m/s y 450 m/s, con capas superficiales de arena limosa de hasta 3 m de espesor; (c) Zona II-B: suelos intermedios con

Vs30 menores a 350 m/s y capas superficiales de arena limosa de hasta 11 m de espesor; (d) Zona IV: acantilados de la Costa Verde; y (e) Zona V: áreas compuestas por material de relleno.

AGRADECIMIENTOS

- Al Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmica y Mitigación de Desastres de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID-FIC-UNI) donde se desarrolló el presente trabajo utilizando sus equipos geofísicos y el apoyo incondicional de sus profesionales.
- Al apoyo brindado por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) a través de la Dra. Sandra Santa Cruz Hidalgo y el Ing. Carlos Yaya Miranda por el acceso a los registros de aceleración obtenidos en la estación acelerográfica de la PUCP y utilizados en la presente investigación.
- Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC, PROCIENCIA y SENCICO en el marco de la convocatoria Proyecto de Investigación Aplicada en Construcción y Saneamiento 2018-01 [contrato No 118-2018-FONDECYT].

REFERENCIAS

- [1] CISMID-FIC-UNI, "Estudio de microzonificación sísmica y análisis de riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de La Perla estudios de diagnóstico del riesgo", Informe técnico, nov, 2016.
- [2] J.C. Villegas-Lanza, M. Chlieh, O. Cavalié, H. Tavera, P. Baby, J. Chire-Chira y J.-M. Nocquet, "Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation", *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 121, no 10, pp. 7371-7394, set, 2016, doi: 10.1002/2016JB013080
- [3] CISMID-FIC-UNI, "Estudio de microzonificación sísmica y análisis de riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de San Miguel estudios de diagnóstico del riesgo", Informe técnico, oct, 2015.
- [4] O. Palacios, J. Caldas y Ch. Vela, Geología de los cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica. Hojas 25-i, 25-j, 24-i, 24-j, Boletín A43, Serie A: Carta Geológica Nacional, Perú: INGEMMET, 1992.
- [5] S. Quispe, H. Yamanaka, K. Chimoto, H. Tavera, Z. Aguilar, F. Lázares y D. Calderón, "Evaluation of local site amplification in Lima, Peru from ground motion data", en 16th World Conf. on Earthquake Engineering (16WCEE), Santiago de Chile, 2017. [Online]. Available: <https://www.wcee.nicee.org/wcee/article/16WCEE/WCEE2017-3567.pdf>
- [6] C. Gonzales, A. Sifuentes, F. Lázares, S. Quispe y K. Huerta, "Vs profiles, H/V spectra and geotechnical classification as proxies of the soil dynamic behavior in Lima, Peru", en 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE. Sendai, Japan, set, 2020. [Online]. Available: <https://www.cismid.uni.edu.pe/wp-content/uploads/2021/10/1g-0017.pdf>

- [7] Instituto Geofísico del Perú, “Evaluación geofísica de los acantilados de la Costa Verde distrito de San Miguel”, Informe técnico N° 037-2021, oct, 2021. [Online]. Available: https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca/12447_evaluacion-geofisica-de-los-acantilados-de-la-costa-verde-distrito-de-san-miguel-informe-tecnico-no-037-2021igp.pdf
- [8] S. Quispe, F. Lázares y Z. Aguilar, “Explicación de por qué los depósitos de grava en la ciudad de Lima, Perú presentan amplificaciones importantes en periodos largos y su implicancia en la Norma Técnica Peruana Sismorresistente”, IOS Press Ebooks, pp. 2 046 – 2054, nov, 2019. [Online]. Available: <https://ebooks.iospress.nl/publication/53476>
- [9] M. Roncal, *Determinación del peligro sísmico probabilístico en el territorio nacional y elaboración de aplicativo web*, FIC-UNI, Lima, Perú, 2017
- [10] CISMID-FIC-UNI, “Estudio de Vulnerabilidad Sísmica Estructural y Riesgo en el Campus de la Universidad Nacional de Ingeniería”, Informe técnico, nov, 2024.
- [11] G. Montalva, N. Bastidas y A. Rodríguez-Marek, “Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone”, *Earthquake Spectra*, vol. 107, no. 2, pp. 901-9011, abr, 2017, doi: 10.1785/0120160221
- [12] G. Parker, J. Stewart, D. Boore, G. Atkinson y B. Hassani. “NGA-Subduction Global Ground-Motion Models with Regional Adjustment Factors”, *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)*, ago, 2020, doi: 10.55461/INKE2546
- [13] K. W. Campbell y Y. Bozorgnia, “NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra”, *Earthquake Spectra*, vol. 30, no. 3, pp. 1087-1115, ago, 2014, doi: 10.1193/062913EQS175M
- [14] B. S.-J. Chiou y R. R. Youngs RR, “Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra”, *Earthquake Spectra*, vol. 30, no. 3, pp. 1117-1153, ago, 2014, doi: 10.1193/072813EQS219M
- [15] N. A. Abrahamson, W. J. Silva y R. Kamai. “Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions”. *Earthquake Spectra*, vol. 30, no. 3, pp. 1025-1055, ago, 2014, doi: 10.1193/070913EQS198M
- [16] K. Sadigh, C.-Y. Chang, J. A. Egan, F. Makdisi y R. R. Youngs, “Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data”. *Seismological Research Letters*, vol. 68, no. 1, pp. 180-189, ene, 1997, doi: 10.1785/gssrl.68.1.180
- [17] L. Moya, C. Gonzales, M. Díaz, B. Adriano, E. Mas, C. Zavala, S. Koshimura y F. Yamazaki. “Concytec-World Bank Project: Machine Learning and Earth Observation Technologies for Disaster Mitigation”. The 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE. Sendai, Japan, set, 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/354874034_Concytec-World_Bank_Project_Machine_Learning_and_Earth_Observation_Technologies_for_Disaster_Mitigation
- [18] J. Zhang, R. Andrus y C. Juang, “Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*, vol. 131. no. 4, abr, 2005, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:4(453)
- [19] F. Y. Menq, *Dynamic properties of sandy and gravelly soils*, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, TX, USA, 2003. URL: <https://repositories.lib.utexas.edu/items/2a7a8fec-45f1-4c81-920d-b1af79679e2e>
- [20] D. Calderón, *Dynamic characteristics of the soils in Lima, Peru, by estimating shallow and deep shear-wave velocity profiles*, Universidad de Chiba, Chiba, Japón, 2012.
- [21] Instituto Geofísico del Perú, “Zonificación Sísmica – Geotécnica en el Área Urbana de Moquegua - Moquegua”, Informe técnico, set, 2017.
- [22] CISMID-FIC-UNI, “Estudio de Microzonificación Sísmica y Análisis de Riesgo en la zona de estudio ubicada en la Municipalidad Distrital de Santiago de Surco”, Informe técnico, set, 2016.
- [23] Z. Aguilar y J. C. Tarazona, “New Seismicity based seismic sources and hazard model for Peru”, 18th World Conference on Earthquake Engineering, 18WCEE. Milán, Italia, jul, 2024. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/381924144>
- [24] C. Jiménez, M. Saavedra, Y. Zamudio y D. Olcese. “Numerical modelling of the 1970 intraslab Peru earthquake and tsunami (Mw 7.9)”, *Journal of Seismology*, vol. 27, no. 1, pp. 1-12, dic, 2022, doi: 10.1007/s10950-022-10119-3
- [25] D. R. Groholski, Y. M. A. Hashash, B. Kim, M. Musgrove, J. Harmon y J. P. Stewart, “Simplified Model for Small-Strain Nonlinearity and Strength in 1D Seismic Site Response Analysis”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 142, no. 9, may, 2016, doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001496
- [26] Y. Nakamura, “A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface”. *Quarterly Report of Railway Technical Research*, vol.30, pp. 25-33, 1989. [Online]. Available: https://www.sdr.co.jp/papers/hv_1989.pdf
- [27] C. Park, R. Miller y J. Xia, J, “Multichannel analysis of surface waves (MASW)”, *Geophysics*, vol. 64, no. 3, ene, 1997, doi: 10.1190/1.1444590
- [28] Z. Aguilar, J. Tarazona, L. Vergaray y J. Barrantes, “Site response analysis and its comparison with the peruvian seismic design spectrum”. *Tecnia [online]*. vol. 29, no. 2, pp. 91-97, jul, 2019. ISSN 0375-7765, doi: 10.21754/tecnia.v29i2.700



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe