

Microzonificación sísmica para la evaluación del riesgo sísmico. Caso - ciudad de Ica, Perú.

Seismic microzonation for seismic risk assessment. Case - City of Ica, Perú

Jorge Alva, Carmen Ortiz, Grover Riveros

Centro de Investigación en Transformación Digital en Ingeniería - CITDI, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jalvah@uni.edu.pe

RESUMEN: Perú se encuentra en una de las regiones sísmicamente más activas debido a la interacción de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. La ciudad de Ica ha experimentado a lo largo de su historia diversos sismos que, en más de una ocasión, causaron la destrucción total de la ciudad. El último evento sísmico de gran magnitud que afectó a la ciudad de Ica fue el terremoto del 15 de agosto de 2007 ($M_w = 8$), que causó la muerte de 596 personas. La microzonificación sísmica es una herramienta importante para evaluar el riesgo sísmico a nivel local. Este artículo presenta la microzonificación sísmica de la ciudad de Ica. Para ello, se realizaron ensayos geofísicos como mediciones de velocidades de ondas de corte mediante ensayos MASW y MAM, periodos de suelo mediante el método de relación espectral H/V y registros acelerográficos. Además, se presenta de manera concisa la historia geológica del área y se ha generado un mapa de caracterización geotécnica a partir de la recopilación de estudios geotécnicos, reflejando el material observado en la zona de estudio. Esta investigación ayudará a mejorar los diseños sismorresistentes de las edificaciones para los habitantes de la ciudad de Ica. Asimismo, permitirá proponer mejoras en los coeficientes sísmicos establecidos en el Código Peruano E-030.

ABSTRACT: Peru is located in one of the most seismically active regions due to the interaction of the Nazca Plate and the South American Plate. The city of Ica has experienced various earthquakes throughout its history that, on more than one occasion, caused the complete destruction of the city. The last significant seismic event that affected the city of Ica was the earthquake on August 15, 2007 ($M_w = 8$), resulting in the death of 596 people. Seismic microzoning is an important tool for assessing seismic risk at the local level. This article presents the seismic microzoning of the city of Ica. To achieve this, geophysical tests such as measurements of shear wave velocities through MASW and MAM tests, soil periods using the H/V spectral ratio method, and accelerograph records. Additionally, a concise geological history of the area is presented, and a geotechnical characterization map has been generated based on the compilation of geotechnical studies, reflecting the observed material in the study area. This research will help improve earthquake-resistant designs for the buildings for the residents of the city of Ica. Furthermore, it will allow for proposed enhancements to the seismic coefficients established in the Peruvian Code E-030.

KEYWORDS: Microzonificación sísmica, velocidad de onda de corte, microtremor, H/V, ensayos geotécnicos.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

A lo largo de los últimos 100 años, la ciudad de Ica ha sido testigo de varios terremotos devastadores que han causado la destrucción total en más de una ocasión. Por ejemplo, en 1942 se registró un terremoto de magnitud 8.1 Ms, con intensidades cercanas a IX en la escala Mercalli Modificada (MM). Otro evento significativo fue el sismo del 12 de noviembre de 1996, que tuvo una magnitud de 7.9 M_w y una intensidad de VII en la escala MM. Además, el sismo del 15 de agosto de 2007, con una magnitud de 8 M_w y una intensidad de VIII en la escala MM, resultó en la trágica pérdida de 596 vidas humanas.

Actualmente la microzonificación sísmica es fundamental para analizar para evaluar el riesgo sísmico a nivel local lo que puede contribuir a mitigar los daños ocasionados por los terremotos. Ejemplos internacionales, como la microzonificación en Bengkulu (Indonesia) presentada por Mase et al. (2021), la zonificación sísmica en Ghabt Admin en Marruecos (Khadrouf et al., 2024),

los estudios en Lisboa (Oliveira et al., 2023) y la región del Himalaya (Ansari et al., 2024), destacan la importancia global de comprender las características del suelo a partir de un conjunto de datos multidisciplinarios compuestos por geología de superficie, una base de datos geotécnicos y una base de datos geofísicos.

El análisis de microzonificación sísmica implica la gestión de una extensa cantidad de datos multidisciplinarios que abarcan estudios geológicos, sismológicos, geotécnicos, geofísicos y de amplificación sísmica. Cuando toda esta información se maneja con criterio ingenieril, puede dar lugar a la creación de un mapa de microzonificación sísmica que facilite la interpretación conjunta de varios estudios en áreas con respuestas uniformes ante eventos sísmicos. (Riveros, 2022).

La amplitud, el contenido de frecuencia y la duración de un movimiento fuerte del suelo están significativamente influenciados por las condiciones locales del sitio (Yamazaki et al 2011). Seed e Idriss (1969) analizaron los registros acelerométricos obtenidos durante el terremoto de San Francisco de 1957, evidenciando el efecto de sitio dentro de la misma ciudad. De manera similar en el terremoto de 1985 en la Ciudad de México, aunque el epicentro

estaba a unos 350 km de distancia, la ciudad sufrió graves daños. Esto se debió a la amplificación del movimiento sísmico del suelo en los depósitos de suelo blando (Seed et al. 1987).

Por otro lado, la ciudad de Ica no cuenta con un mapa de microzonificación sísmica actualizado. Para abordar este problema, se ha realizado inicialmente la recopilación de diversas investigaciones como la Lara y Alva (1994). En dicho estudio se presentan mapas con curvas de isoperiodos obtenidas a partir de mediciones de vibración ambiental, así como información geotécnica disponible, como calicatas y ensayos de penetración estándar (STP). Por otro lado Mitma y Alva (2003), llevaron a cabo la zonificación geotécnica en la zona urbana de la ciudad de Ica, caracterizando el área según sus propiedades geotécnicas obtenidas de los ensayos realizados. Posteriormente, Lermo et al. (2007) estimaron el efecto de sitio en tres zonas de la ciudad de Ica y presentaron los mapas de clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico.

Otro trabajo reciente corresponde a Bernal et al. (2018), quienes evalúan la influencia de la geomorfología en la respuesta dinámica de los suelos de Ica. En este estudio se propone un mapa de distribución de isoperiodos y zonificación para la ciudad de Ica, así como la profundidad de los estratos de suelo. Asimismo, Alva et al. (2021) estimaron las propiedades dinámicas de suelo de la ciudad de Ica. Para tal efecto utilizaron la técnica de medición con sonda de registro PS Logging.

El comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Ica ha despertado interés debido a las características únicas de sus espectros de diseño y periodos de respuesta sísmica. En este estudio, se plantea la generación de un mapa de microzonificación sísmica actualizado para la ciudad de Ica y sus alrededores, que refleje la actividad sísmica observada. Este trabajo permitirá evaluar el riesgo sísmico a nivel local y proponer mejoras en los coeficientes sísmicos establecidos en el Código Peruano E-030.

2 GEOLOGIA DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Geología y geomorfología.

Según Fernández (1993), la ciudad de Ica se encuentra en las unidades geomorfológicas de Penillanura Costera y Valles. La Penillanura Costera está parcialmente cubierta por extensos depósitos eólicos, que se extienden a lo largo de 63 km en la margen derecha del río Ica, con un ancho de 18 km y pendientes menores al 2% como se muestran en las Figuras 1 y 2.

El río Ica, después de un breve recorrido NE-SO perpendicular a las estribaciones, experimenta un desarrollo significativo en dirección N-S, posiblemente debido a una falla evidenciada en los cerros Jatú y Paraya. Además, en la Cordillera de la Costa, existe un callejón de granito rojo con orientación NE-SO, que desemboca en la faja litoral, posiblemente el antiguo cauce del río Ica.

La ciudad de Ica está rodeada por depósitos aluviales en quebradas y estribaciones andinas, formando las pampas aluviales características de la penillanura costera. Estos depósitos incluyen conglomerados gruesos, arena, limo y arcilla, distribuyéndose cerca de formaciones rocosas como conos de deyección y materiales de piedemonte.

Por otro lado, los depósitos eólicos están formados por capas de arena con superficies onduladas y crestas separadas. Principalmente consisten en arenas cuarzosas de grano fino a medio, con un contenido moderado de minerales ferromagnesianos. También se destacan las dunas, especialmente en la ribera del río

Ica, lo que sugiere movimientos geológicos como el plegamiento en las estribaciones andinas y el fallamiento en bloques en la región costera. Además, encontramos mesetas sub horizontales, también conocidas como montes de Isla en el Noroeste, y en el Noreste se encuentran colinas y colmadas conformadas por rocas ígneas y sedimentarias.

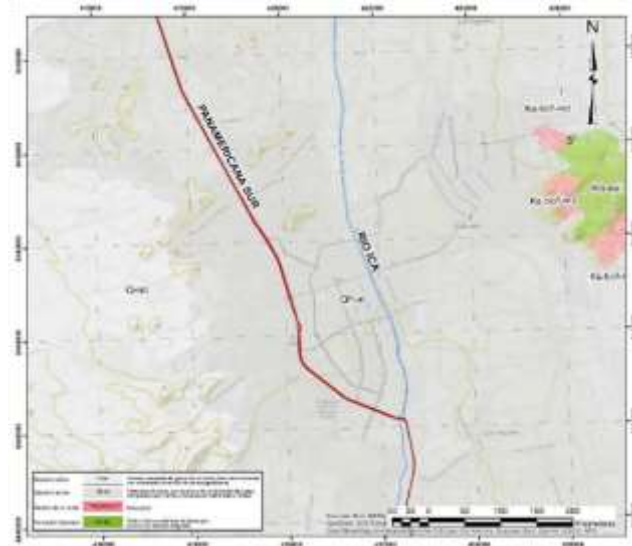


Figura 1. Mapa Geológico de Ica. **(mejorar la leyenda)**

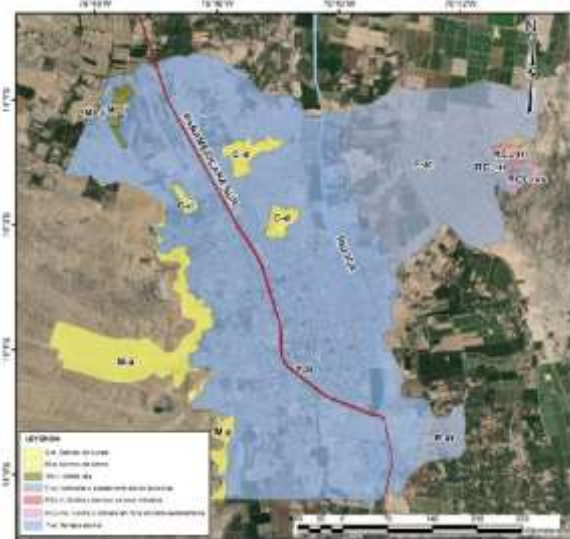


Figura 2. Mapa de unidades geomorfológicas de la ciudad de Ica.

(mejorar la leyenda)

3 ENSAYOS EXPERIMENTALES

3.1 Prospección geotécnica

Para la elaboración del nuevo mapa de zonificación geotécnica, se utilizaron los datos obtenidos de los sondeos recopilados por Lara y Alva (1994), Mitma y Alva (2003) y Alva y Ortiz (2021), los cuales se dispusieron en un sistema de referencia geográfica. Toda la información geotécnica actual se encuentra registrada en

un sistema informático. Adicionalmente, se recopiló una variedad de ensayos geotécnicos con el objetivo de ampliar el conocimiento sobre las características del subsuelo de la ciudad de Ica.

La información recopilada corresponde a 64 calicatas y 57 ensayos de penetración estándar (SPT) los que se muestran en la Figura 3. La revisión de los ensayos (SPT) se llevó a cabo siguiendo la metodología de la norma E0.50, equivalente a la norma ASTM D1586.

De la información recopilada se aprecia que las características del subsuelo de la ciudad Ica, esta compuesto por tres tipos de suelos predominantes arena limosa (SM), arena mal gradada con presencia de limo SP-SM y grava mal gradadas (GW).

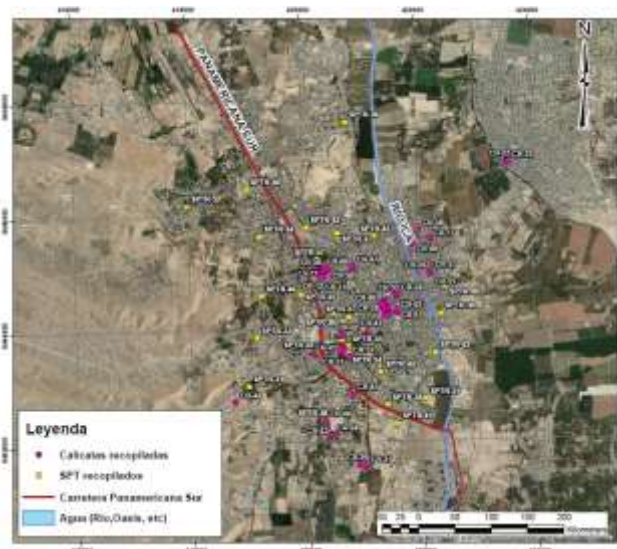


Figura 3. Se muestra la ubicación de los estudios geotécnicos recopilados.

3.2 Prospección geofísica

Con el propósito de caracterizar el comportamiento dinámico del suelo en la zona de estudio, se llevó a cabo una campaña de ensayos geofísicos. Durante esta campaña, se realizaron mediciones de microtremores y ensayos de análisis multicanal de ondas de superficie (MASW). Con estos ensayos se obtuvieron los perfiles de velocidades de ondas de corte y períodos del suelo. En la Tabla 1 se presenta la cantidad de ensayos geofísicos realizados.

Tabla 1. Cantidad de ensayos geofísicos ejecutados por el CITDI

Ensayo	Cantidad
Microtremores	177
MASW	36

Para llevar a cabo este estudio, se seleccionaron cuidadosamente las ubicaciones de los ensayos con el fin de abarcar una amplia gama de condiciones del subsuelo. Para lograr este objetivo, se empleó como referencia la información recopilada en estudios previos realizados por Lara y Alva (1994) y Bernal et al. (2019).

Con relación a las mediciones de microtremores, la ubicación se muestra en la Figura 4. Asimismo, se utilizaron sensores triaxiales ubicados a nivel del suelo, dispuestos en paralelo uno después del otro. Estos sensores registraron las componentes horizontales E-W, N-S y la componente vertical U-D a una frecuencia de muestreo de 200 Hz durante un periodo de tiempo lo suficientemente extenso como para capturar secciones de ondas cercanas al sensor. Estas mediciones registraron las velocidades de las vibraciones de los microtremores, las cuales fueron almacenadas digitalmente para su posterior procesamiento en el gabinete.

Se empleó el programa GEOPSY para analizar y procesar las señales captadas. El procesamiento consistió en la selección de ventanas de 81.92 segundos y la aplicación de un suavizado a lo largo de la señal siguiendo la función Konno y Ohmachi. En cada ventana, se calculó el espectro de Fourier de las tres componentes de la señal y se determinó el cociente entre los espectros horizontales y verticales. Posteriormente, se promediaron estos cocientes para obtener la razón espectral, la cual se presenta en las Figuras 5 y 6, mostrando familias espectrales similares.

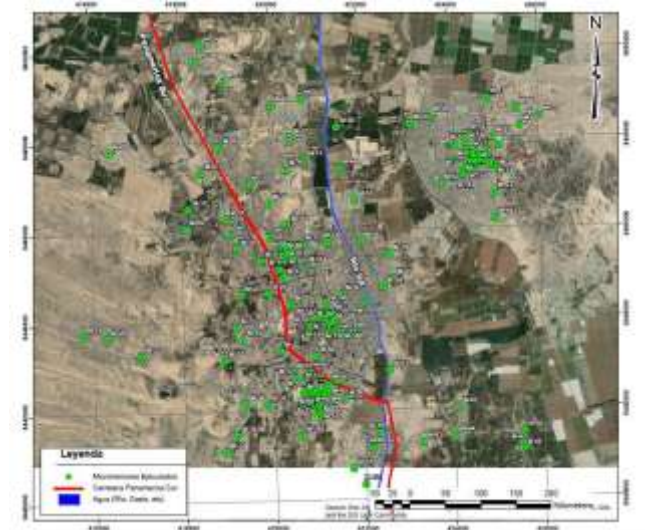


Figura 4. Ensayos de microtremores en la ciudad de Ica.

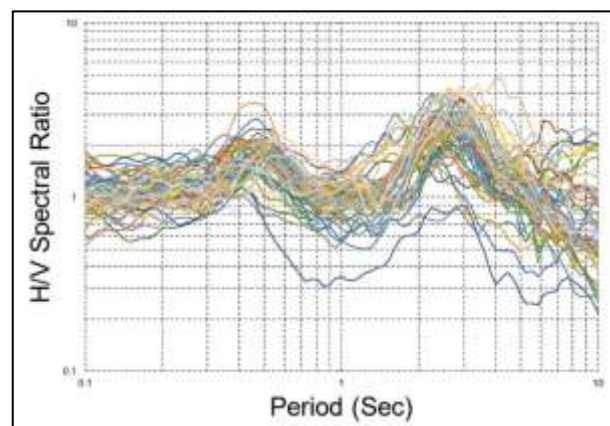


Figura 5. Familia de razones espectrales H/V, con períodos que muestran el efecto de sitio, presentados mediante líneas continuas de colores

variados.

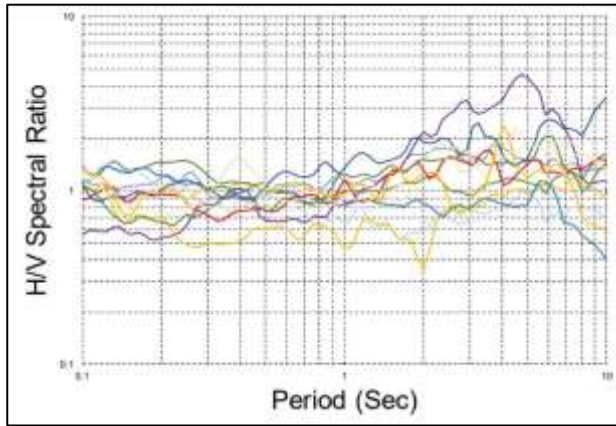


Figura 6. Familia de razones espectrales H/V, representados por razones espectrales con amplificación menor a 2 sin ningún valor característico de periodo.

Para complementar la información desarrollada y recopilada por el Centro de Transformación Digital (CITDI) de la UNI, se llevó a cabo una campaña de ensayos de MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves). Los sitios fueron seleccionados con el objetivo de correlacionar el período y las condiciones del subsuelo. Como resultado, se obtuvieron 32 perfiles de velocidad de ondas de corte, la ubicación de los mismos se muestra en la Figura 7.

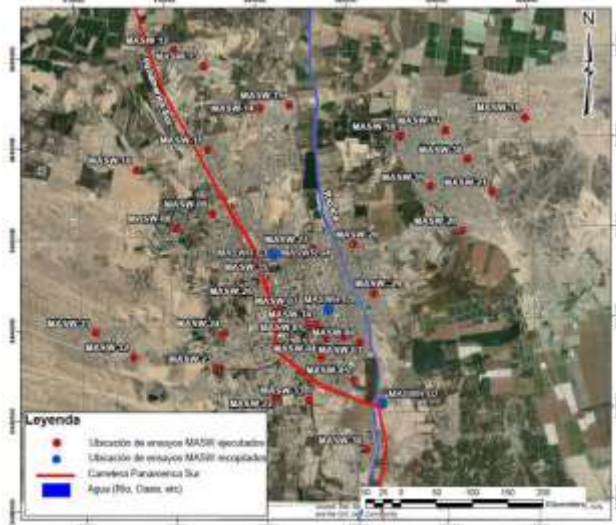


Figura 7. Ensayos MASW en la ciudad de Ica

4 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO SEGÚN NORMA E0.30/ASCE7-16

Los suelos de las ciudad de Ica fueron caracterizados utilizando el criterio del V_{s30} y el perfil de velocidades de ondas S hasta 30 metros de profundidad, según la Norma Técnica Peruana (E.030-2016) y la American Society of Civil Engineering (ASCE 7-16).

Los perfiles de velocidad de ondas de corte fueron determinados mediante el análisis multicanal de ondas de superficie (MASW).

Este enfoque examina las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh (Park et al., 1999).

Los ensayos MASW obtenidos varían desde $V_{s30}=262$ m/s hasta $V_{s30} = 437$ m/s, clasificados mayoritariamente como tipo D y S2 según la normativa. En cuanto a los periodos predominantes, se identifican dos modos con periodos desde 0.1 s hasta 0.95 s para el primer modo, y de 1.6 s hasta 4.4 s para el segundo modo.

Los resultados de los diez primeros puntos se encuentran en las Tablas 2 y 3, mientras que la Figura 8 (a, b y c) muestra los resultados de los ensayos MASW realizados en las casetas acelerográficas.

Tabla 2. Clasificación del suelo según E.030/ASCE 7 – 16

Descripción	V_{s30} (m/s)	$E 0.30$	ASCE 7-16
MASW-01	293	S2	D
MASW-02	262	S2	D
MASW-03	267	S2	D
MASW-04	281	S2	D
MASW-05	285	S2	D
MASW-06	300	S2	D
MASW-07	265	S2	D
MASW-08	264	S2	D
MASW-09	334	S2	D
MASW-10	303	S2	D

Tabla 3. Periodos predominantes de la medición de microtremores

Descripción	$T1$ (s)	$T2$ (s)
M-01	0.49	3.00
M-02	0.36	2.80
M-03	0.43	2.17
M-04	0.40	2.60
M-05	0.40	2.30
M-06	0.50	2.80
M-07	0.36	-
M-08	0.33	-
M-09	0.40	2.10
M-10	0.25	-

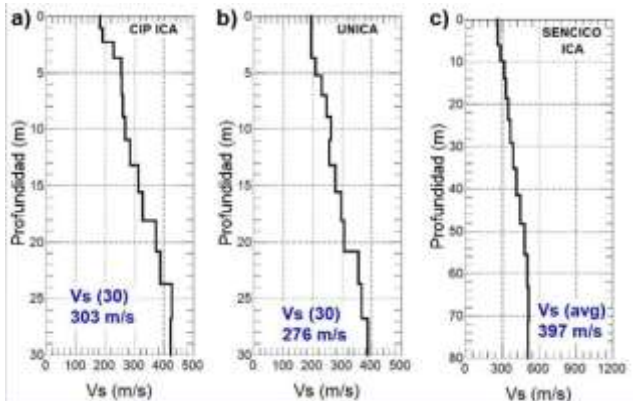


Figura 8. Perfiles sísmicos del suelo. CIP Ica(a). UNICA (b). SENCICO Ica (c).

Los resultados muestran que la mayoría de los suelos en Ica corresponden al tipo D según la clasificación de la ASCE 7-16, como se puede observar en la Figura 9.

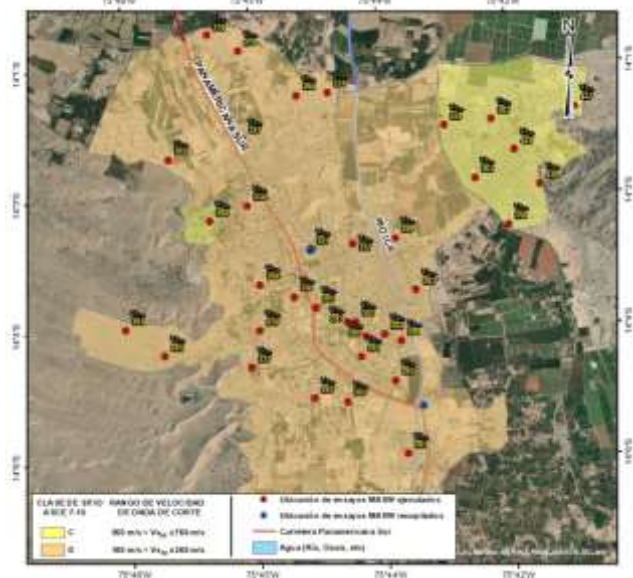


Figura 9. Mapa de Caracterización de sitio según ASCE 7-16.

5 REGISTROS SÍSMICOS

Los sismos son fenómenos naturales de gran complejidad y poder destructivo que han causado considerables pérdidas humanas y materiales en el mundo y en nuestro país. La importancia de registrar y analizar estos eventos se ha vuelto esencial para comprender el comportamiento dinámico del suelo y validar la propuesta de microzonificación sísmica.

Para esta investigación se seleccionaron 120 registros sísmicos de las estaciones acelerográficas UNICA (CISMID), Parcona (IGP), SENCICO Ica y CIP Ica. La ubicación de estas estaciones se muestra en la Figura 10. Para el procesamiento de las señales sísmicas, se realizó la corrección de línea base y un filtrado de pasa banda con frecuencias de corte de 0.08 a 20 Hz, utilizando un filtro

Butterworth causal de cuarto orden.



Figura 10. Ubicación de estaciones acelerográficas en la ciudad de Ica.

En la estación UNICA se evidenció la presencia de dos modos fundamentales. En la Figura 11 a y b, se muestran los espectros de respuesta del sismo del 15 de agosto de 2007 con una magnitud de $M_w=8.1$, correspondientes a las estaciones Parcona y UNICA.

Con el fin de confirmar los modos de vibración de los suelos en la ciudad de Ica, se realizó una comparación de las razones espectrales en los sitios donde se ubican las estaciones acelerográficas, utilizando registros sísmicos y de microtremores (HVNR y HVSr). Al examinar las razones espectrales, se evidencia una similitud en el comportamiento tanto en el rango de frecuencias como en su amplificación relativa. Ver Figura 12.

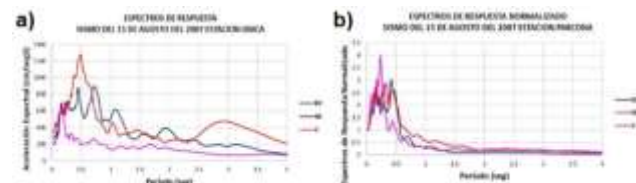


Figura 11. Espectros de respuesta del sismo del 15 de Agosto de 2007. UNICA (a). Parcona (b). (mejorar las leyendas)

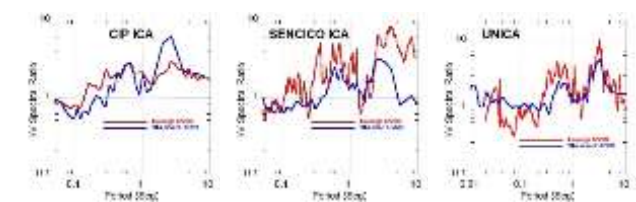


Figura 12. Comparación del promedio del cociente espectral entre los registros sísmicos y los obtenidos mediante microtremores de las estaciones CIP Ica, SENCICO Ica y UNICA.

6 ZONIFICACIÓN SÍSMICA

6.1 Caracterización mecánica

La caracterización mecánica se basó en las características físicas y mecánicas del suelo de la ciudad de Ica en zonas relativamente homogéneas en términos de distribución de material y propiedades de resistencia y deformación. Esto fue posible gracias a numerosos estudios realizados en el pasado, que han proporcionado un conocimiento relativamente detallado de la estratigrafía y han contribuido gradualmente a la generación del mapa de microzonificación geotécnica.

La metodología empleada para la actualización de la microzonificación geotécnica incluyó la recopilación de información geotécnica, la integración y el análisis preliminar de la información, el mapeo de la profundidad de los depósitos superficiales y la definición del mapa de zonificación geotécnica.

Del total de estudios analizados, el 53% de los sondeos fueron exploratorios del tipo calicata (64), con recuperación de muestras alteradas. El 47% de los sondeos correspondieron al tipo de penetración estándar (SPT) (57).

Se interpretó la información resultante de la evaluación geotécnica y geológica para delimitar áreas con propiedades geotécnicas similares. Esto implica identificar zonas con el mismo tipo y distribución espacial de materiales, cuyas propiedades de resistencia y deformación sean comparables, lo que sugiere un comportamiento mecánico similar ante una misma carga o sollicitación.

Basándose en los resultados y la clasificación de perfiles de suelos según la norma E0.30, se definieron tres zonas propuestas, como se muestra en la Figura 13, que se describen a continuación.

Zona I

Esta área se distingue por ser la más competente dentro de la ciudad de Ica, se ubica en el distrito de Parcona. Superficialmente, se encuentran gravas y arenas.

Zona II

Esta zona cubre la parte central de la ciudad de Ica, conformada predominantemente por estratos limosos intercalados con capas de arena, abarcando principalmente el área comprendida entre las urbanizaciones Santo Domingo, Puente Blanco, San José, San Miguel, así como por toda el área de la Comatrana.

Zona III

Esta zona está constituida predominantemente por estratos arenosos intercalados con capas de arenas limosas; el espesor de éstas es variable entre decenas de metros.

6.2 Mapa de isoperiodos

Utilizando el análisis de Nakamura o la razón espectral H/V, se estimó el período fundamental del suelo y su distribución espacial en la zona de estudio, generando así zonas espectrales con períodos similares. Estas zonas se forman al clasificar las razones espectrales según su forma y período, teniendo en cuenta los perfiles de velocidades de onda de corte que ayudan a definir la distribución adecuada de estas zonas.

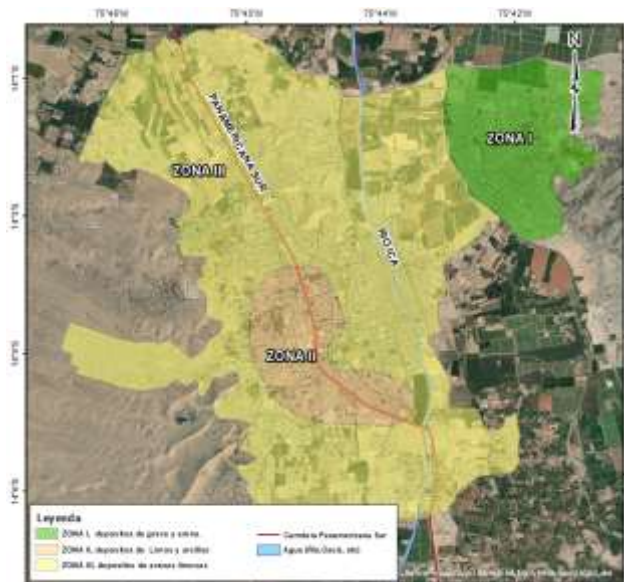


Figura 13: Mapa de microzonificación geotécnica

La forma espectral de las zonas obtenidas describe el comportamiento dinámico del tipo de suelo correspondiente en términos de los períodos de vibración, lo que facilita su clasificación. En base a este análisis, se identificaron 4 zonas como se muestra en la Figura 14, clasificadas de la siguiente manera:

Zona I

La Zona I de color verde abarca el área con períodos menores a 0.2 segundos, atribuidos a la presencia de suelos gravosos y arenosos. La identificación de estos depósitos rígidos se llevó a cabo mediante la recopilación de información geotécnica que coincide con los períodos del sitio. Esta zona corresponde al distrito de Parcona.

Zona II

La Zona II de color amarillo comprende el área con períodos mayores o iguales a 0.2 s. y menores a 0.3 s.

Zona III

La Zona III de color naranja abarca el área con períodos mayores o iguales a 0.3 s y menores a 0.5 s, atribuidos a la presencia de suelos arenosos limosos de gran profundidad. La identificación de estos depósitos se llevó a cabo mediante la recopilación de información geotécnica que coincide con los períodos del sitio. Esta zona corresponde a la ciudad de Ica.

Zona IV

La Zona IV de color rojo abarca el área con períodos mayores a 0.5 s. Comprende los depósitos arenas de la zona norte y parte de la zona central de depósitos de suelos limosos.

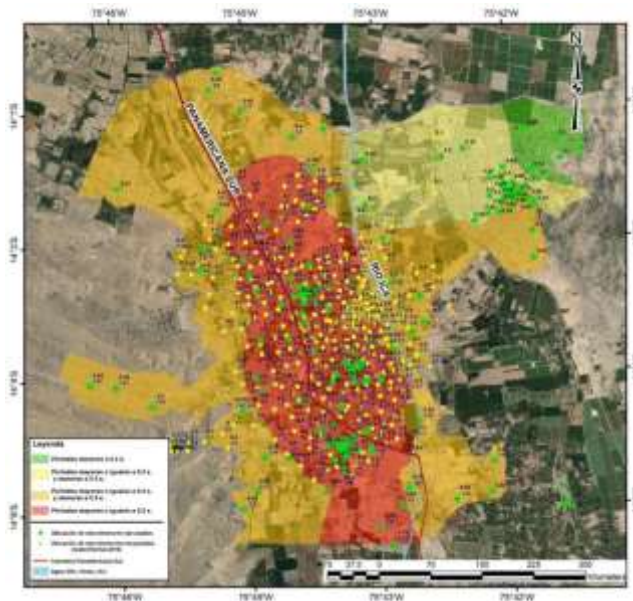


Figura 14: Mapa de isoperiodos.

6.3 Mapa de microzonificación sísmica

La generación del mapa implica la superposición de los resultados obtenidos del mapa de microzonificación geotécnica y el mapa de isoperiodos. El mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Ica se muestra en la Figura 15. Este mapa divide el área de estudio en cinco zonas, las cuales se describen a continuación:

Zona I

Se ha clasificado esta zona como la mejor desde el punto de vista geotécnico sísmico. Está conformada por depósitos de grava arenosa. El comportamiento dinámico de la zona es favorable (rígido), presenta poca vibración, con periodos menores a 0.2 s.

Zona IIA

Depósitos de grava arenosa con periodos mayores o iguales a 0.2 s y menores a 0.3s.

Zona IIB

En esta área predominan las arenas limosas de origen aluvial del río Ica, con una compacidad que varía de media a densa. Los periodos de vibración aquí se sitúan entre 0.2 s. y 0.3 s. Se anticipa un aumento moderado en el nivel de peligro sísmico en esta zona debido al comportamiento dinámico del terreno.

Zona IIIA

Depósitos de gravas arenosas con periodos mayores o iguales a 0.3 s y menores a 0.5 s.

Zona IIIB

En esta área se encuentran depósitos de arenas limosas con espesores variables. Los periodos de vibración en esta zona oscilan entre 0.2 s. y 0.5 s., con velocidades promedio de onda cortante (V_{s30}) de 302 m/s.

Zona IVA

Estos suelos representan las condiciones más desfavorables desde una perspectiva geotécnica sísmica, con exposición a niveles muy elevados de peligro sísmico y un historial

documentado de graves daños en terremotos anteriores. Consisten principalmente en depósitos de limo de gran espesor, con periodos predominantes de vibración que superan los 0.5 s. y una velocidad promedio de onda cortante (V_{s30}) de 291 m/s.

Zona IVB

Esta área incluye depósitos de arenas y limos de considerable potencia. Los periodos predominantes exceden los 0.5 s., con una velocidad promedio de onda cortante (V_{s30}) de 303 m/s.

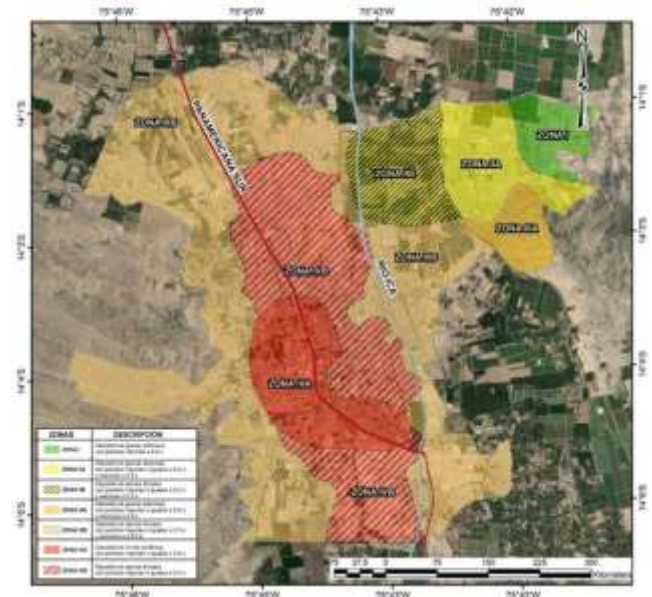


Figura 15: Mapa de microzonificación sísmica.

7 CONCLUSIONES

Las labores de recopilación y ensayos de campo llevados a cabo en este estudio del subsuelo de la ciudad de Ica proporcionan información fundamental para obtener una comprensión más precisa de la variación espacial y respuesta de los materiales del terreno.

Los suelos encontrados en la ciudad de Ica están compuestos principalmente por tres tipos: arena limosa (SM), arena mal graduada con presencia de limo (SP-SM) y grava mal graduada (GW), los cuales tienen su origen en depósitos aluviales y eólicos.

Los periodos naturales de vibración en la ciudad de Ica aumentan gradualmente hacia la parte central de Ica, influenciados por la potencia de sus estratos y la compacidad del suelo.

Los resultados de los ensayos MASW muestran una variación en los valores de V_{s30} , que van desde 262 m/s hasta 437 m/s, clasificados mayoritariamente como tipo D según la ASCE 7-16 y S2 según la normativa E-030. En cuanto a los periodos predominantes, se identificaron dos modos con periodos que van desde 0.1 s hasta 0.95 s para el primer modo, y de 1.6 s hasta 4.4 s para el segundo modo.

Se han identificado siete zonas, siendo los suelos de la zona IV-A los que presentan las condiciones más desfavorables desde una perspectiva geotécnica sísmica, con exposición a niveles muy

elevados de peligro sísmico.

Los resultados de la microzonificación sísmica permitirán evaluar el riesgo sísmico en Ica.

8 REFERENCIAS

- Ansari, A., Rao, K. S., & Jain, A. K. (2024). Seismic Microzonation of the Himalayan Region Considering Site Characterization: Application toward Seismic Risk Assessment for Sustainable Tunneling Projects. *Natural Hazards Review*, 25(1). <https://doi.org/10.1061/nhinfo.nhenge-1815>.
- Alva, J., Ortiz C., Tarque, N. y Montero, J. (2021). Estimation of in-situ deep soil dynamic properties by using PS suspension logging and accelerograph records. Case from the city of Ica – Peru Mediterranean Geosciences Union.
- Bernal, I., Tavera, H., Sulla, W., Arredondo, L., & Oyola, J. (2018). Geomorphology characterization of Ica basin and its influence on the dynamic response of soils for urban seismic hazards in Ica, Peru. *International Journal of Geophysics*. <https://doi.org/10.1155/2018/9434251>.
- Fernández, M. (1993). Geología de los Cuadrángulos de Pisco, Guadalupe, Punta Grande, Ica y Córdova. Boletín N°47. Serie A Carta Geológica Nacional. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Lima, Perú.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2024, enero 12). GEOCATMIN. Sistema de información geológico Catastral Minero. <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- Khadrouf, I., Hammoui, O. E., Goumi, N. E., & Oukassou, M. (2024). Contribution of HVSr, MASW, and geotechnical investigations in seismic microzonation for safe urban extension: A case study in Ghabt Admin (Agadir), western Morocco. *Journal Of African Earth Sciences*, 210, 105138. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105138>
- Lermo, J.; Limaymanta, M.; Antayhua, Y. & Lazares, L. (2008) - El terremoto del 15 de agosto de 2007 (Mw=7.9), Pisco, Perú. Clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico para las ciudades de Pisco, Ica y Lima-Callao. En: Congreso Peruano de Geología, 14, Congreso Latinoamericano de Geología, 13, Lima, PE, 29 setiembre - 3 octubre 2008, Resúmenes. Lima: Sociedad Geológica del Perú 2008, 6 p.
- Lara J. L. y Alva J. (1994), “Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Ica”, X Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Lima.
- Mase, L. Z., Sugianto, N., & Refrizon. (2021). Seismic hazard microzonation of Bengkulu City, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00178-y>.
- Mitma G. y Alva J. (2003), “Microzonificación de la Ciudad de Ica frente a sismo e inundaciones”, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Iquitos.
- Oliveira, L., Gomes, R. T., & Teves-Costa, P. (2023). Contribution to the seismic microzonation of Lisbon based on the integration of geological, geophysical, and geotechnical data. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 171, 107965. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107965>
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Riveros, G. (2022). “Microzonificación Sísmica del distrito de Villa El Salvador,” Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Seed, H., & Idriss, I. (1969). Influence of soil conditions on ground motion during earthquakes. *Journal of soil mechanics and foundation division, American Society of Civil Engineers*, vol. 95, N. SM1.
- Seed, H.B., Romo, M., Sun, J., Jaime A. y Lysmer J. (1987). Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the earthquake of sept. 19, 1985. *Earthquake Engineering Research Center. Report N°. UCB/EERC-87/15*, 248 páginas. California.
- 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)*, vol. 30, no. 1, pp. 25–33.
- Yamazaki, F., Maruyama, Y. (2011). Seismic Microzonation. In: Gupta, H.K. (eds) *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8702-7_187