


# ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICA DE PSEUDOACELERACIÓN A PARTIR DEL ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL EQUIVALENTE DEL SUELO EN CHIMBOTE – PERÚ

Cecilio Morales<sup>1\*</sup>; Isabel Bernal<sup>2</sup>; Hernando Tavera<sup>2</sup>; Luz Arredondo<sup>2</sup>; Javier Oyola<sup>2</sup>

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2017002> 

**Forma de citar:** Morales, C., Bernal, I., Tavera, H., Arredondo, L., y Oyola, J. 2017. Espectros de respuesta elástica de pseudoaceleración a partir del análisis dinámico lineal equivalente del suelo en Chimbote – Perú. Boletín de Geología, 39(2): 31-47.

## RESUMEN

En la actualidad en el campo de la ingeniería sísmica se han desarrollado diversas técnicas y metodologías, a fin de estimar o predecir la respuesta espectral de aceleraciones 1D del terreno, basadas en la propagación de las ondas de corte por medios rocosos y depósitos de suelos. Razón por la cual, en la presente investigación se plantea como principal objetivo calcular la respuesta espectral de aceleraciones 1D del suelo en superficie en Chimbote y Nuevo Chimbote, zona norte costera en Perú. Para ello, se utilizó como información base los resultados obtenidos previamente, en el estudio de “Zonificación Sísmica” de ambas ciudades. El cálculo de los espectros elásticos de respuesta se realizó a partir del análisis dinámico del tipo lineal equivalente. Fueron seleccionadas 5 series de tiempo correspondientes a eventos sísmicos producidos a nivel mundial y de sismos sintéticos, simulados siguiendo lineamientos de códigos sismorresistentes internacionales. A partir de estos registros y de un modelo viscoelástico del subsuelo, obtenido con las variaciones de las velocidades  $V_{s30}$  y del espesor de los sedimentos previamente identificados en el mapa de zonificación sísmica, fueron calculados 56 espectros elásticos de aceleración promedio ajustados a cada variación del modelo. Estos 56 espectros fueron a su vez agrupados en rangos de  $V_{s30}$  y espesor de sedimentos para compararlos con los espectros elásticos de diseño recomendados por la Norma Sismorresistente Peruana E.030 en suelos con características similares. A partir de una evaluación cualitativa, la metodología empleada arrojó resultados coherentes, lográndose recomendar para el área de estudio 4 nuevos espectros elásticos de diseño derivados de los propuestos en la E.030 y en base a los resultados de este estudio.

**Palabras clave:** espectros elásticos, microzonificación sísmica, zonificación sísmica, ingeniería de terremotos, espectros de diseño.

## PSEUDOACCELERATION ELASTIC RESPONSE SPECTRA FROM SOIL LINEAR EQUIVALENT DYNAMIC ANALYSIS IN CHIMBOTE – PERÚ

## ABSTRACT

Nowadays in the seismic engineering field several techniques and methodologies have been developed with the main goal to estimate or predict the 1D acceleration response spectra of soil, all of them based in the upward propagation of shear waves from the underlying rock formation. For this reason, the principal aim of this research is determine the 1D surface soil response spectral acceleration in Chimbote and Nuevo Chimbote area at the north cost of Perú. For this purpose we use previous results from the “Seismic Zonation” project carried out previously in Chimbote and Nuevo Chimbote. The response spectra computation was performed through a linear equivalent dynamic analysis. For that, were selected 5 ground motion time series from worldwide earthquakes and artificial earthquakes simulated following international seismic codes guidelines. From these records, and using variations of  $V_{s30}$  and sediment thickness from a seismic zoning map, we computed 56 response spectrums for each soil variation. These 56 acceleration response spectra were grouped into  $V_{s30}$  and thickness ranges and compared with the National Seismic Code criteria and elastic design spectra from international codes for soil in similar conditions. From a qualitative evaluation, the methodology applied shows coherent results; we recommend for the study area 4 new elastic design spectra derived from E.030 recommendations and from the results of this research.

**Keywords:** elastics response spectrum, seismic microzonation, seismic zonation, earthquake engineering, design spectra.

<sup>1</sup> Profesional Independiente. Lima, Perú. (\*)[cecilioj.morales@gmail.com](mailto:cecilioj.morales@gmail.com)

<sup>2</sup> Instituto Geofísico del Perú (IGP). Lima, Perú.

## INTRODUCCIÓN

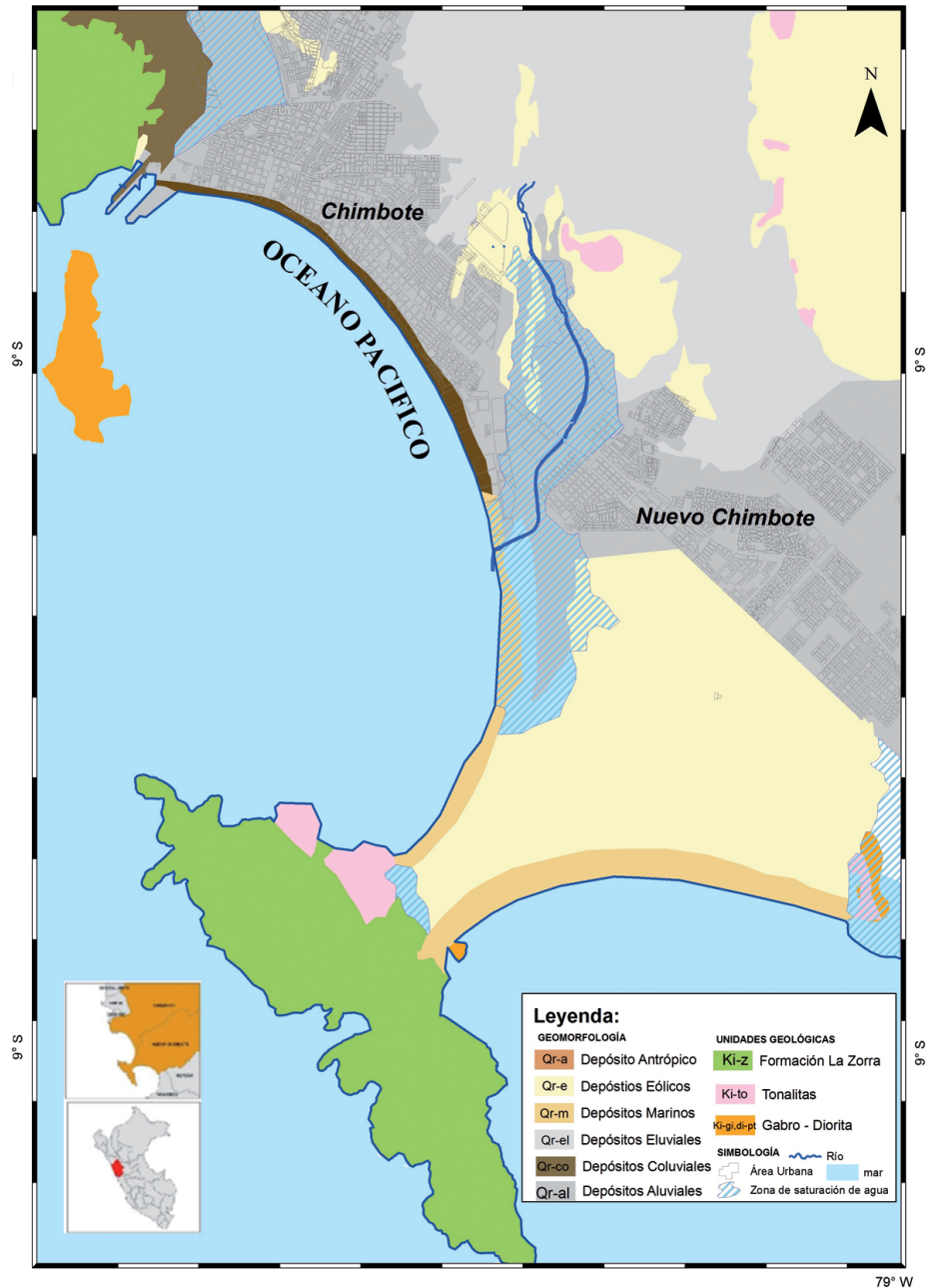
El análisis de la respuesta dinámica de depósitos de suelos es usado para estimar la respuesta del movimiento del suelo en superficie ante eventos sísmicos y para el desarrollo y mejora, en muchos casos, de los espectros elásticos de diseño. La respuesta dinámica del suelo genera grandes diferencias, tanto en amplitud como en el contenido de frecuencias, si se comparan para un mismo evento sísmico registros superficiales en terreno blando con registros adquiridos en afloramientos rocosos, evidenciado como por ejemplo tras el sismo de Caracas en 1967 (Papageorgiou and Kim, 1991); México en 1985 (Sánchez-Sesma *et al.*, 1988; Kawase and Aki, 1989) y en el evento sísmico de Loma Prieta en 1989 (Jarpe *et al.*, 1989; Darragh and Shakal, 1991). Estas diferencias en la amplitud de registros sísmicos ponen en evidencia, como la energía sísmica (principalmente la de las ondas de corte Vs) es modificada en la ruta final de su recorrido, desde el ascenso del basamento rocoso a la superficie y cuyos efectos son conocidos como “efectos de sitio” o “efectos locales”.

En la actualidad se dispone de un gran número de procedimientos numéricos para estimar o predecir la respuesta dinámica del subsuelo (Hashash *et al.*, 2016; Matasovic and Ordóñez, 2011; Kottke and Rathje, 2008). Estos procedimientos consideran en mayor o menor medida la complejidad del comportamiento dinámico de los suelos en los cuales es evidenciado un claro comportamiento no lineal del suelo. De todas las metodologías disponibles, la que ha sido utilizada con mayor frecuencia es la propagación unidimensional de las ondas de corte utilizando un modelado dinámico lineal equivalente del suelo. Este procedimiento se basa inicialmente en el concepto de la matriz propagadora planteado por Haskell (1953), y fue popularizado por Schnabel *et al.* (1972) a partir del software SHAKE. La metodología lineal equivalente ha tenido un amplio reconocimiento mundial y ha sido empleada en numerosos estudios locales y regionales, pues suele arrojar resultados razonables. Ésta metodología trabaja en el dominio de la frecuencia e itera hasta lograr la convergencia de las transformadas de Fourier en cada capa que componen un determinado depósito de suelo, a las cuales les son asignadas a su vez curvas de rigidez y degradación, apropiadas para representar el comportamiento no-lineal de los materiales en cada una de ellas. Los resultados de estas técnicas de estimación de espectros de aceleración han sido reconocidos y utilizados internacionalmente como un resultado fundamental en los estudios de microzonificación sísmica de ciudades en el mundo (Borcherdt and Gibbs,

1976; Schmitz *et al.*, 2011; Aguiar, 2013; Pagliaroli *et al.*, 2014).

Las localidades de Chimbote y Nuevo Chimbote en el departamento de Ancash en Perú (FIGURA 1), se encuentran localizadas en la zona norte costera del país y ubicadas en la Zona 4 del mapa de zonificación sísmica en la Norma Sismorresistente Peruana definida como de “Alto Peligro Sísmico” (PGA de 0,45 g) debido a su cercanía a la zona de interacción entre las placas tectónicas Sudamericana y Nazca, lo cual fue evidenciado tras el terremoto de Ancash en 1970. Razón por la cual, en el año 2013 se llevó a cabo el proyecto de Zonificación Sísmica y Geotécnica de Chimbote y Nuevo Chimbote, por parte del Instituto Geofísico del Perú (Tavera, 2014a, 2014b). El objetivo del proyecto era el de determinar las características geotécnicas y geofísicas del subsuelo, que se encuentran directamente relacionadas con la respuesta dinámica del terreno bajo la influencia de un sismo, información que resulta clave para la ejecución del análisis dinámico de la respuesta espectral del suelo en superficie que se propone en esta investigación. Entre los productos obtenidos a partir del estudio de zonificación sísmica y geotécnica, se puede mencionar: (1) la adquisición, procesamiento y análisis de 11 perfiles sísmicos mediante el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), estimándose la propagación de las velocidades de ondas S en cada estrato del subsuelo hasta los 30 m de profundidad; (2) medición de 695 puntos de vibración natural del suelo obteniéndose el período fundamental de vibración del suelo en cada punto a partir de la técnica de H/V (Nakamura, 1989); (3) delimitación de unidades geológicas y geomorfológicas del área; (4) clasificación SUCS y el mapa de la capacidad de carga admisible del suelo; (5) estudio de sismicidad del área; (6) finalmente, el mapa de zonificación sísmica – geotécnica del suelo en Chimbote y Nuevo Chimbote.

En la presente investigación, a partir del cálculo de espectros elásticos de pseudoaceleración, se evaluará la respuesta sísmica de cada microzona, utilizando como datos de entrada, los resultados del proyecto de microzonificación sísmica de Chimbote y Nuevo Chimbote (los cuales serán sintetizados en modelos de subsuelo). Los espectros elásticos de pseudoaceleración, se calcularán a partir de la teoría lineal equivalente y servirán como información base para la formulación de nuevos espectros elásticos de diseño que se ajusten a las condiciones de sitio locales y podrán ser usados como complemento a los espectros elásticos de diseño recomendados por la Norma Sismorresistente Peruana E.030.



**FIGURA 1.** Ubicación del área de estudio sobre el mapa geológico y geomorfológico de Chimote y Nuevo Chimote en el Departamento de Ancash en Perú.

## MARCO TEÓRICO

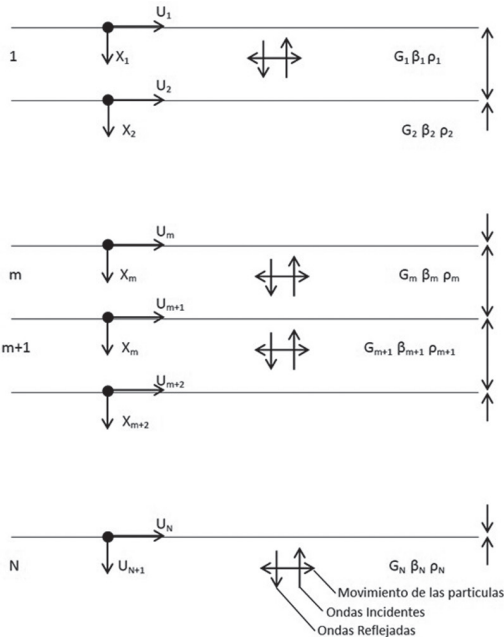
Para cuantificar los niveles fundamentales de aceleración del suelo, la teoría de aproximación del comportamiento no lineal del suelo a través del modelado lineal equivalente, propuesto por Schnabel *et al.* (1972), Idriss y Sun (1992) y Kramer (1996) utiliza relaciones que describen la variación del módulo de corte del material ( $G$ ) y del coeficiente de amortiguamiento

( $\beta$ ) con el esfuerzo al corte. Estas relaciones son conocidas respectivamente como curvas de rigidez y amortiguamiento, y es a partir de éstas que el método aproxima el comportamiento no lineal del suelo. El método realiza un proceso de iteraciones en el dominio de la frecuencia, de manera tal de poder determinar las propiedades de degradación del suelo debido al comportamiento no lineal, producto de la deformación cíclica, en cada capa que compone un depósito de suelo.

Las suposiciones que se aplican en los análisis 1D de la respuesta lineal equivalente del suelo son:

- El suelo es un sistema de estratos horizontales que se extienden al infinito.
- Cada estrato en el sistema se encuentra completamente definido por el valor del módulo de corte ( $G$ ), coeficiente de amortiguamiento crítico ( $\beta$ ), densidad ( $\rho$ ) y espesor ( $h$ ). Valores que son independientes a la frecuencia.
- La respuesta del sistema es producida por el ascenso de los frentes de ondas de corte  $V_s$ , provenientes desde el basamento rocoso subyacente.
- Las ondas de corte están dadas como los valores de aceleración en intervalos de tiempo espaciados equidistantemente. La repetición cíclica de las series de tiempo de aceleración están implícitas en la solución.
- La dependencia del esfuerzo del módulo de corte y del amortiguamiento, se explica por un procedimiento lineal equivalente en un nivel de esfuerzo promedio, calculado para cada estrato.

En la FIGURA 2 se puede observar el modelo viscoelástico de capas horizontales extendidas hasta el infinito propuesto por Schnabel *et al.* (1972).



**FIGURA 2.** Esquema de la composición y características dinámicas del sistema viscoelástico del suelo propuesto por Schnabel *et al.* (1972).

A partir de la FIGURA 2, matemáticamente se puede expresar el movimiento de una partícula que se propaga verticalmente sólo con desplazamientos horizontales, a través de:

$$u = u(x, t) \quad (1)$$

La cual a su vez puede satisfacer la ecuación de onda:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + n \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (2)$$

Adicionalmente, los desplazamientos armónicos de partículas, con frecuencia  $\omega$  pueden ser descritos por:

$$u(x, t) = U(x) \cdot e^{i\omega t} \quad (3)$$

Si sustituimos 3 en 2, la resultante será una ecuación diferencial ordinaria del tipo:

$$(G + i\omega n) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \rho \omega^2 U \quad (4)$$

Cuya solución general es de la forma:

$$U(x) = E e^{ikx} + F e^{-ikx} \quad (5)$$

Donde:

$$k^2 = \frac{\rho \omega^2}{G + i\omega n} = \frac{\rho \omega^2}{G^*} \quad (6)$$

Ecuaciones como la 3 y la 5, también tienen solución a partir de la ecuación para movimientos armónicos y frecuencia  $\omega$ , del tipo:

$$u(x, t) = E e^{i(kx + \omega t)} + F e^{-i(kx - \omega t)} \quad (7)$$

Donde el primer término representa el viaje de la onda incidente en la dirección negativa de las abscisas ( $x$ ) y el segundo el viaje de las ondas reflejadas en la dirección positiva de las abscisas ( $x$ ).

La ecuación 7 es válida para cada una de las capas que componen un depósito de suelo como el que se representa en la FIGURA 2, donde el desplazamiento en el tope y en la base de cada capa está dado respectivamente por:

$$u_m(X=0) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (8)$$

$$u_m(X=h_m) = (E_m \cdot e^{ik_m h_m} + F_m \cdot e^{-ik_m h_m}) \cdot e^{i\omega t} \quad (9)$$

Y a partir del esfuerzo en un plano, el esfuerzo en el tope y base de cada capa queda definido respectivamente por:

$$\tau_m(X=0) = ik_m G_m^* (E_m - F_m) e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$\tau_m(X=h_m) = ik_m G_m^* (E e^{-ik_m h_m} - F e^{-ik_m h_m}) e^{i\omega t} \quad (11)$$

Como el esfuerzo y el desplazamiento deben ser continuos para todas las interfaces, a partir de las ecuaciones 8, 9, 10 y 11 producen las siguientes expresiones de recursividad para las amplitudes  $E_{m+1}$  y  $F_{m+1}$  expresadas en términos de las amplitudes en la capa  $m$ :

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \quad (12)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m) e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \quad (13)$$

El corte en una superficie libre es igual a cero (0), por lo que para las ondas incidentes y reflejadas las amplitudes son  $E_I = F_I$ .

Si adicionalmente se utilizan las ecuaciones 12 y 13 para representar la relación de las amplitudes entre la superficie y la capa  $m$ , queda como resultado:

$$E_m = e_m(\omega) E_I \quad (14)$$

$$F_m = f_m(\omega) E_I \quad (15)$$

Las funciones de transferencia  $e_m$  y  $f_m$  son simplemente las amplitudes para los casos  $E_I = F_I = 1$ , y pueden ser obtenidas sustituyendo ésta condición en las ecuaciones recursivas 14 y 15.

Para otras interfaces la función de transferencia puede ser calculada fácilmente a partir de las funciones  $e_m$  y  $f_m$ . Por ejemplo la función  $A_{n,m}$  entre el desplazamiento en el nivel  $n$  y  $m$  está definido por:

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (16)$$

Basado en la ecuación 16, la función de transferencia  $A(\omega)$  puede ser hallada entre dos capas continuas en el sistema. Por lo tanto, si el movimiento es conocido en cualquiera de estas capas, el movimiento subsiguiente podría ser calculado para la otra y las amplitudes  $E$  y  $F$  pueden ser calculadas para cualquier capa del sistema. A partir de la función desplazamiento, puede ser derivada la aceleración:

$$\ddot{u}(x,t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 (E e^{i(kx+\omega t)} + F e^{-i(kx-\omega t)}) \quad (17)$$

Y la deformación por:

$$\gamma = \frac{\partial u}{\partial x} = ik (E e^{i(kx+\omega t)} - F e^{-i(kx-\omega t)}) \quad (18)$$

## METODOLOGÍA Y USO DE DATOS

De acuerdo a la Norma Sismorresistente Peruana E.030, los estudios de “Microzonificación sísmica” y “Efectos de Sitio”, son estudios multidisciplinarios que investigan los efectos de los sismos y otros fenómenos asociados (p.j tsunamis y deslizamientos de laderas). En ambos casos el objetivo fundamental en este tipo de estudios, es el de determinar las posibles modificaciones de las acciones sísmicas por causa de las condiciones locales en el suelo, y deberán proponer nuevas limitantes o exigencias en función de sus resultados, para el diseño y construcción de obras civiles y para algunas obras industriales.

Siguiendo los lineamientos de la Norma Sismoresistente Peruana, para el cálculo de nuevos espectros de pseudoaceleraciones que se ajusten a las condiciones de sitio evidenciadas en cada microzona sísmica de Chimbote y Nuevo Chimbote, se empleará la siguiente metodología:

- 1) Determinar las características del movimiento sísmico equivalente en roca.
- 2) Determinar las características dinámicas del modelo geotécnico/geofísico del suelo.
- 3) Calcular la repuesta espectral del suelo.

### Movimiento sísmico equivalente en roca

Este es uno de los aspectos fundamentales en la predicción de espectros de respuesta 1D del suelo, ya que es a partir de estas formas espectrales que se estimarán los espectros de respuesta teóricos de aceleración del terreno en superficie. Por tal motivo, es necesario tener un control sobre las variables que determinan el movimiento sísmico en roca o afloramiento rocoso, como lo son la magnitud y la distancia epicentral. Se recomienda mantener una forma espectral como marco de referencia (espectro objetivo para roca), la cual puede provenir de los siguientes: 1) del espectro uniforme del peligro o amenaza sísmica probabilística, calculado para 500 años de retorno en afloramiento rocoso o 2) el espectro de diseño elástico para condiciones de roca o basamento rocoso proveniente de la Norma Sismoresistente.

El código sismoresistente ASCE/SEI 7-10 por su parte, exige que deben ser escogidas por lo menos cinco (5) series de tiempo de registros de aceleraciones de eventos sísmicos para este tipo de análisis, donde las magnitudes y las distancias epicentrales de estos eventos deben ser consistentes con los valores que controlan el espectro de respuesta promedio del movimiento sísmico equivalente (espectro objetivo para roca). Cumpliendo con las mismas condiciones anteriores, la norma ASCE/SEI 7-10 comenta que series de tiempo de aceleraciones de eventos sintéticos, artificiales o simulados pueden ser utilizados dentro de los análisis dinámicos del suelo. Adicionalmente, la norma ASCE/SEI 7-10 menciona, que las series de tiempo seleccionadas (tanto de eventos sísmicos naturales como artificiales), pueden

ser escaladas a los valores del espectro en roca objetivo sobre un rango de período de respuesta significativo para determinadas alturas en estructuras.

Para el modelado de la respuesta espectral 1D sobre el mapa de zonificación sísmica de Chimbote y Nuevo Chimbote, se utilizó como espectro objetivo el espectro elástico de diseño  $S_0$  proporcionado para suelo tipo roca en la Norma Sismorresistente Peruana E.030 (FIGURAS 3 y 4). Además, fueron seleccionadas cinco (5) series de tiempo de aceleración de eventos sísmicos reales y artificiales (simulados), originales y escalados al espectro objetivo (FIGURA 3). En la TABLA 1 pueden ser observadas las características de los 5 eventos sísmicos seleccionados.

**TABLA 1.** Principales características de los eventos sísmicos seleccionados para el análisis dinámico lineal equivalente.

N°	Nombre	Año	Estación	Mw	Régimen Tectónico	Dist. a la Ruptura (Km)	Vs30 (m/s)	Observaciones
1	Manjil_Iran	1990	Abbar	7,4	Transcurrente	13	724	Escalado
2	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #1	6,9	Inverso	10	1428	Escalado
3	Iwate_Japan	2008	IWT010	6,9	Inverso	16	826	Original
4	Artificial 1	-	-	7,7	Cortical	25	Roca	Escalado
5	Artificial 2	-	-	7,5	Cortical	33	Roca	Escalado

En la anterior (TABLA 1), los eventos sísmicos del 1 al 3 fueron seleccionados de la base de datos del PEER y los sismos N° 4 y 5 fueron simulados y ajustados al espectro en roca objetivo, a partir de la técnica de Halldorsson y Papageorgiou (2005). Una consideración adicional fue tomada en cuenta en la selección de los sismos simulados y la validez de sus resultados. Estas consideraciones corresponden a las relaciones de Newmark y Hall (1982), las cuales relacionan los valores de PGA, PGV y de desplazamiento, de registros acelerográficos adquiridos en roca o suelos duros, para los cuales siempre debe cumplirse que:

$$D_{te}A_{te} > V_{te}^2 \quad (19)$$

$$\frac{D_{te}A_{te}}{V_{te}^2} \approx \text{para afloramiento rocoso} \quad (20)$$

$$\frac{V_{te}}{A_{te}} \approx 0,91 \text{ para afloramiento rocoso} \quad (21)$$

Donde  $A_{te}$  es el PGA (aceleración pico),  $V_{te}$  es el PGV (velocidad pico) y  $D_{te}$  el desplazamiento de cada acelerograma.

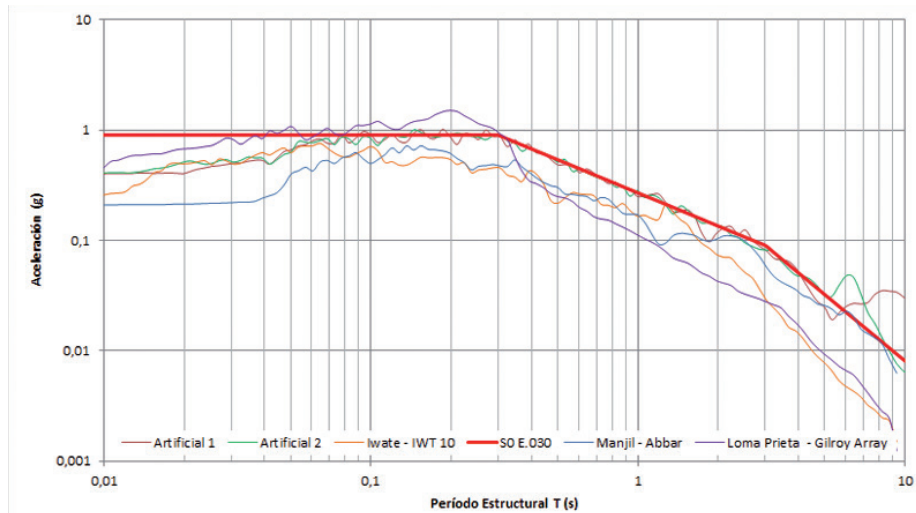
En la TABLA 2 se muestran los valores calculados según las relaciones de Newmark y Hall (1982), tanto para los sismos reales como para los simulados.

**TABLA 2.** Valores referenciales de los registros acelerográficos registrados en roca o suelo duro calculados según las relaciones de Newmark y Hall (1982) para los sismos seleccionados.

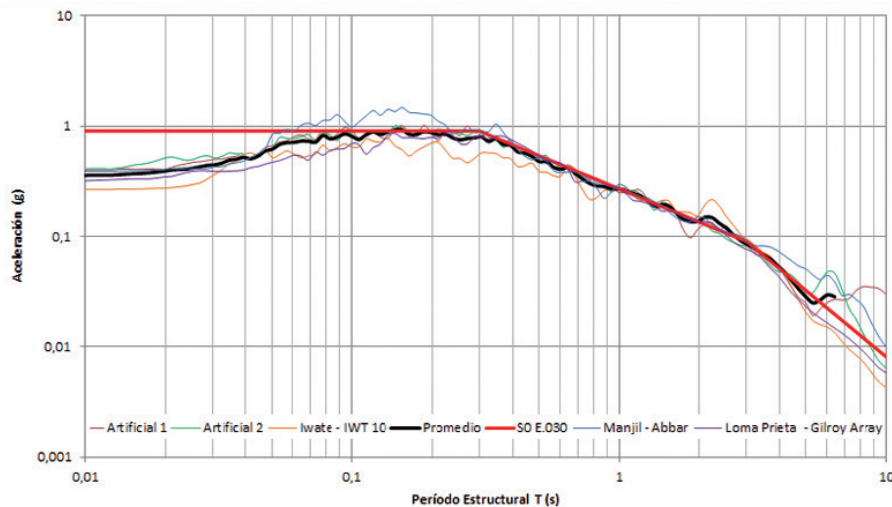
N°	Nombre	PGA	PGV	PGD	1) $A_{te} * D_{te}$	2) $V_{te}^2$	3) $A_{te} * D_{te} / V_{te}^2$	4) $V_{te} / A_{te}$	PROMEDIOS			
									1)	2)	3)	4)
1	Manjil_Iran	0,36	0,29	0,16	0,55	0,08	7	0,8				
2	Loma Prieta	0,32	0,31	0,09	0,28	0,09	3	0,9	0,43	0,07	6	0,87
3	Iwate_Japan	0,26	0,24	0,18	0,46	0,05	8	0,9				
4	Artificial 1	0,4	0,27	0,14	0,56	0,08	7	0,7				
5	Artificial 2	0,4	0,31	0,21	0,86	0,10	9	0,8	0,71	0,09	8	0,75

En la anterior (TABLA 2), se observa que los valores obtenidos tanto para los sismos reales como en los simulados, que la relación  $D_{te} A_{te} > V_{te}^2$  siempre se cumple y que los promedios de  $D_{te} A_{te} / V_{te}^2$  y de  $V_{te} / A_{te}$  se aproximan a los encontrados por Newmark y Hall (1982) para afloramientos rocosos.

Adicionalmente, en las FIGURAS 3 y 4 pueden ser observados, tanto el espectro de diseño  $S_0$  (espectro objetivo en roca), como los espectros de respuesta de aceleraciones de cada sismo antes y después de su escalamiento, respectivamente. En la FIGURA 3 se muestra además la media de los espectros de aceleraciones de los sismos seleccionados y su ajuste (escalamiento) al espectro de diseño  $S_0$ .



**FIGURA 3.** Espectros elásticos originales de los cinco (5) eventos sísmicos seleccionados. En línea roja gruesa de muestra el espectro elástico de diseño  $S_0$  de la Norma Sismoresistente Peruana E.030 utilizado como referencia.



**FIGURA 4.** Espectros elásticos de repuesta de los cinco (5) eventos sísmicos seleccionados, escalados al espectro elástico de diseño  $S_0$  de la Norma Sismoresistente Peruana E.030 (línea roja gruesa). La línea negra gruesa representa el promedio de los espectros elásticos de los eventos sísmicos seleccionados y escalados.

### Modelo geotécnico/geofísico

El modelo geotécnico/geofísico del subsuelo, está basado en el sistema viscoelástico propuesto por Schnabel *et al.* (1972) (FIGURA 2) y consiste en un sistema de  $N$  capas extendidas hasta el infinito en la

horizontal con un semi-espacio elástico en el fondo (basamento rocoso). Cada capa que compone el sistema, es homogénea e isotrópica y está caracterizada por su espesor ( $h$ ), densidad ( $\rho$ ), módulo de corte ( $G$ ) y factor de amortiguamiento ( $\beta$ ).

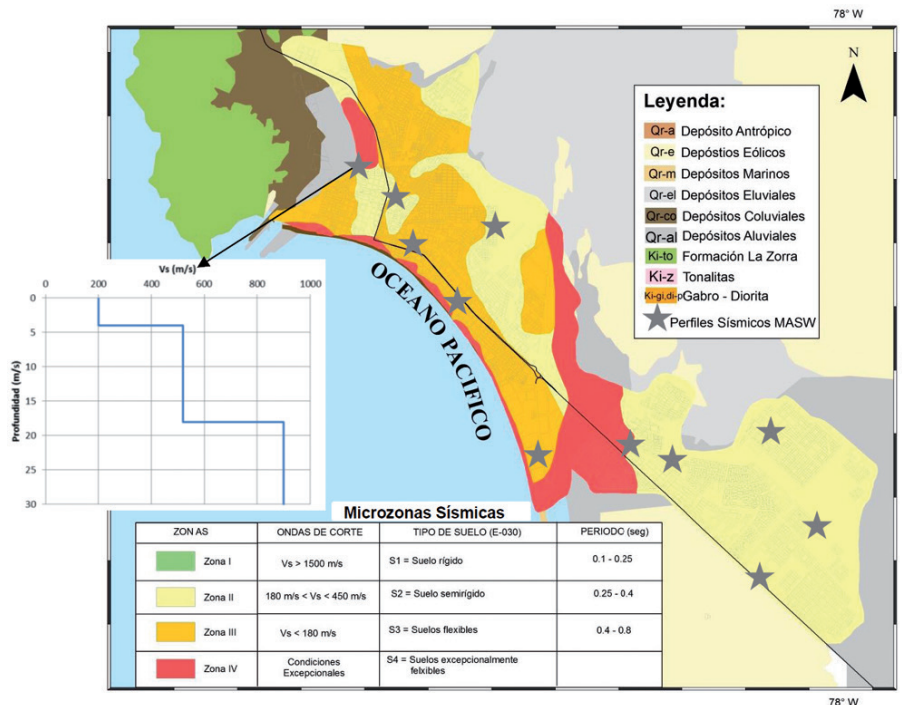
A partir de estudios geotécnicos y geofísicos, se deben calcular las velocidades de ondas de corte  $V_s$  (hasta el basamento rocoso), el espesor y la granulometría de cada capa que compone el depósito de suelo, así como su densidad promedio. La definición de suelo granular o cohesivo, es fundamental para determinar el comportamiento dinámico no-lineal de cada capa y para introducir correctamente en el modelado la correspondiente curva de degradación y de amortiguamiento correspondiente.

El modelo geotécnico/geofísico empleado en esta investigación proviene principalmente de los resultados de la zonificación sísmica y geotécnica realizada en Chimbote y Nuevo Chimbote llevada a cabo por Tavera (2014a, 2014b), siguiendo la metodología propuesta en Hernández *et al.* (2011) y Morales *et al.* (2015). Para determinar la variación de las velocidades de ondas de corte se utilizaron los resultados de 11 mediciones de arreglos MASW (FIGURA 5), de donde se obtuvo principalmente la distribución  $V_{s30}$  (promedio de la  $V_s$  en estratos superficiales hasta 30 m de espesor) del área de estudio. Entre este promedio de velocidades en los estratos superficiales (hasta 30 m de profundidad) y el basamento rocoso, se utilizó una capa intermedia cuya velocidad  $V_s$  fue asignada principalmente en base a los resultados obtenidos del

perfil P1 (FIGURA 5), el cual fue adquirido en una zona de afloramiento rocoso o de muy poca cobertura sedimentaria. Los resultados del P1 también ayudaron en la determinación de la  $V_s$  asignada al basamento rocoso (TABLA 3). La variación de la profundidad del basamento rocoso fue estimada a partir de los períodos fundamentales de vibración (FIGURA 6), obtenidos a su vez a partir de la técnica de H/V. Para ello, se empleó la estimación de Rocabado *et al.* (2011), obtenida para suelos principalmente arenosos (Ecuación 22) y que relaciona el período de vibración fundamental ( $T$ ) con el promedio de las velocidades de las ondas de corte superficiales ( $V_{s30}$ ) e intermedias ( $V_{s_{inf}}$ ). La clasificación del suelo y la asignación de la densidad fue realizada a partir de los resultados de ensayos geotécnicos realizados por Tavera (2014a, 2014b). En la TABLA 3 se muestra un resumen de las principales características dinámicas obtenidas, para la definición del modelo geológico-geofísico a ser utilizado en el modelado 1D de la respuesta espectral del suelo en Chimbote y Nuevo Chimbote.

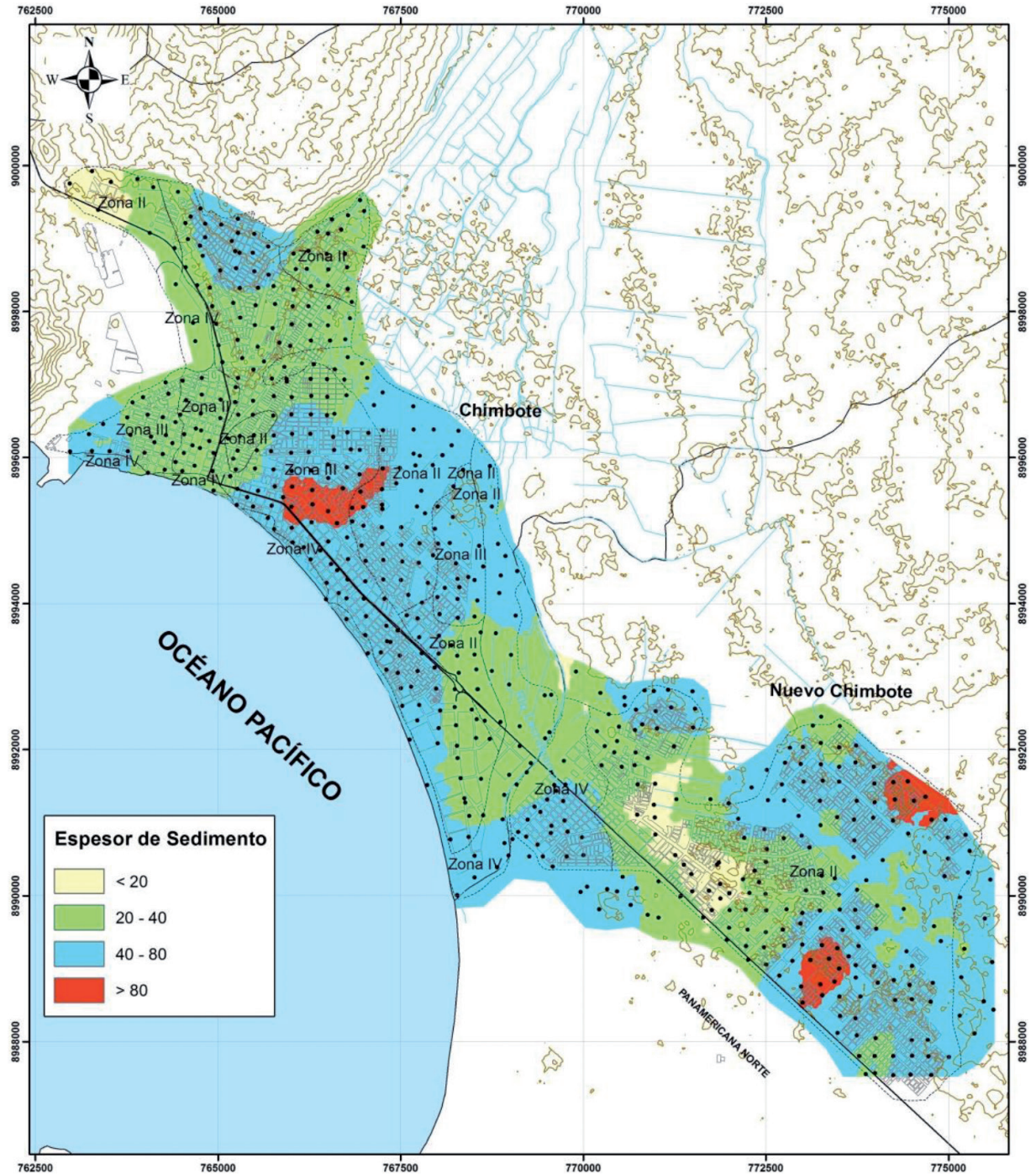
$$H = \frac{T \cdot V_{s_{inf}}}{4} + 30 \left( 1 - \frac{V_{s_{inf}}}{V_{s_{30}}} \right) \quad (22)$$

Donde  $H$  es el espesor de los sedimentos o profundidad del basamento rocoso.



**FIGURA 5.** Mapa de la distribución de perfiles MASW adquiridos en el área de estudio. Se detalla la ubicación del perfil P1 y los resultados del mismo en un perfil 1D de la velocidad de onda de corte estimado para suelo “duro”. Como base se muestra el mapa de microzonas sísmicas editado de Tavera (2014a, 2014b) donde se muestra el rango de promedios  $V_s$  calculados para la zona de estudio.





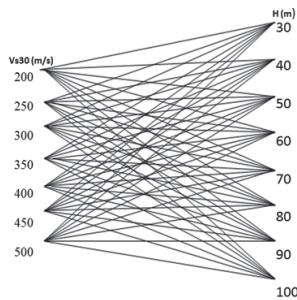
**FIGURA 6.** Mapa de la distribución de puntos H/V adquiridos en el área de estudio y valores de profundidad del basamento rocoso o espesor sedimentario estimado para la zona de estudio a partir de la ecuación 22.

Para la completa definición del modelo geotécnico-geofísico, se utilizó la variación de los  $V_{s30}$  (m/s) y del espesor de sedimentos  $H$  (m) calculados para Chimbote y Nuevo Chimbote. Sobre las combinaciones de este modelo (condiciones de sitio), se obtendrá la respuesta espectral de aceleración 1D en superficie, a partir de la entrada de los acelerogramas de los eventos sísmicos

seleccionados (movimiento sísmico equivalente en roca) introducidos a la profundidad del basamento rocoso correspondiente. En la FIGURA 7 se muestran las combinaciones entre el promedio  $V_{s30}$  y el espesor de los sedimentos, del modelo geológico-geofísico que definen las condiciones de sitio sobre las cuales se calculará la respuesta espectral teórica en superficie.

**TABLA 3.** Características de modelo geotécnico/geofísico típico del suelo, utilizado para el modelado dinámico de Chimbote y Nuevo Chimbote.

Estrato	Vs (m/s)	h (m)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Tipo de suelo
1	200-500	30	1,6	granular
2	650	30-100	1,75	granular
3	1250	-	2,1	roca (semi espacio elástico)



**FIGURA 7.** Combinaciones entre los valores Vs30 y el espesor de sedimentos utilizados para el modelado dinámico.

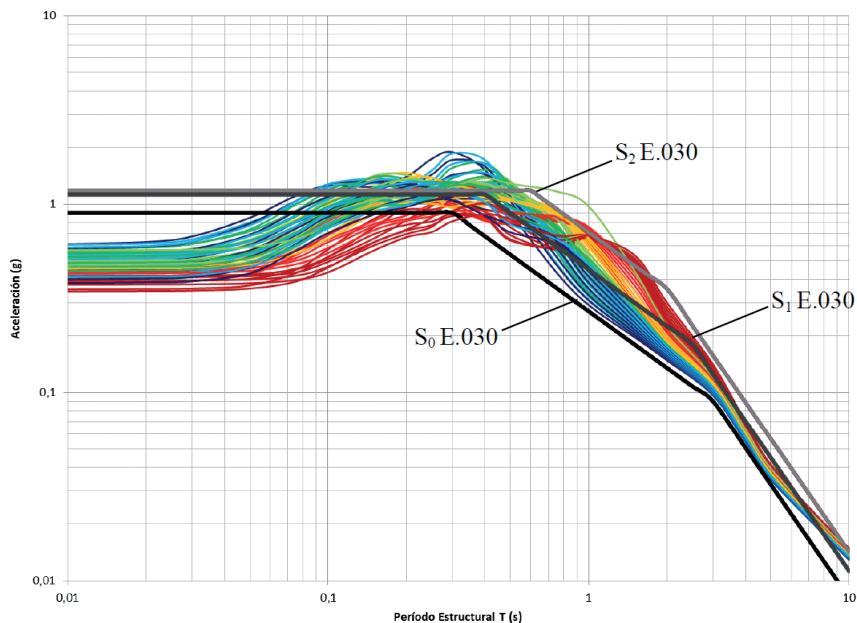
### Cálculo de la repuesta espectral

Utilizando las características tanto, del movimiento sísmico equivalente en el basamento rocoso, como las del depósito de suelo, se calculó la respuesta espectral de aceleración 1D del terreno en superficie, utilizando la herramienta módulo lineal equivalente del software Deepsoil (Hashash *et al.*, 2016). Para representar el comportamiento no-lineal del suelo, en esta investigación se utilizaron los valores de las curvas de degradación y amortiguamiento de Seed y Idriss (1970) para suelos

arenosos superficiales y suelos arenosos intermedios, asignadas en los estratos 1 y 2, respectivamente (TABLA 3). Para evitar el “fenómeno de campo libre”, el basamento rocoso del modelo geológico-geofísico, fue definido como un semi-espacio elástico dentro del software. Los acelerogramas (series de tiempo de aceleración) seleccionados, fueron introducidos a las profundidades correspondientes en cada combinación de clase de sitio. En total fueron calculados 280 espectros teóricos de respuesta espectral de aceleración producto de las 56 combinaciones posibles de Vs30 y espesor de sedimentos (FIGURA 7) en conjunto con las 5 series de tiempo de aceleración seleccionadas como movimiento equivalente (FIGURA 4).

### RESULTADOS

A partir de la combinación de las 56 clases de sitio definidas entre los rangos de Vs30 (m/s) y el espesor de sedimentos  $H$  (m), así como las 5 series de tiempo escogidas, las cuales fueron introducidas en el modelado a las correspondientes profundidades del basamento rocoso (entre 30 y 110 m), se obtuvo como resultado 280 espectros teóricos del suelo en superficie. A partir de éstos, se calculó la media de las respuestas espectrales para cada combinación de sitio (promedio de la respuesta de las 5 series de tiempo en superficie). En la FIGURA 8 se puede observar la comparación de los 56 espectros de respuesta de aceleración promedio del terreno obtenidos para cada combinación de sitio, con los espectros de diseño elástico para suelos tipo  $S_0$ ,  $S_1$  y  $S_2$  de la norma sismorresistente Peruana E.030.



**FIGURA 8.** 56 formas espectrales teóricas obtenidas a partir del modelado dinámico del suelo en Chimbote y Nuevo Chimbote.

En la anterior (FIGURA 8), se observa como todas las aceleraciones de las formas espectrales obtenidas a partir de análisis dinámico lineal equivalente, superan al espectro elástico de diseño  $S_1$  a partir de los 0.1 s de período estructural. Lo cual debe generar duda ya que, en la tabla de clasificación de los perfiles de suelo de la norma sismorresistente Peruana E.030 (TABLA 4) al espectro elástico de diseño  $S_1$  le corresponde una velocidad de onda de corte entre 500 y 1500 m/s, valores que no fueron observados en los suelos de Chimbote y Nuevo Chimbote durante el proyecto de zonificación sísmica y geotécnica. Los valores promedio de  $V_s$  reportados en el proyecto de zonificación, corresponden al rango de suelos tipo  $S_2$  en la tabla de clasificación de perfiles de suelos ( $V_s$  entre 180 a 500 m/s). Sin embargo, para las combinaciones de tipos de suelos con  $V_{s30} > 300$  m/s, utilizados en esta investigación, las aceleraciones de los espectros teóricos promedio obtenidos superan a las aceleraciones del espectro  $S_2$  entre el rango de 0,1 y 0,5 s de período (T) en los perfiles de suelo hasta 60 m de espesor de sedimentos. Por su parte, los perfiles de suelo con  $V_{s30} \leq 300$  m/s y  $\geq 80$  m de espesor de sedimentos superan las aceleraciones del  $S_2$  entre 1 y 2 s. Por tal motivo, para representar de mejor manera la respuesta espectral promedio 1D de los tipos de suelos evidenciados en Chimbote y Nuevo Chimbote, los espectros de respuesta obtenidos fueron agrupados en cuatro (4) rangos de  $V_{s30}$  y espesor ( $H$ ) resumidos en la TABLA 5.

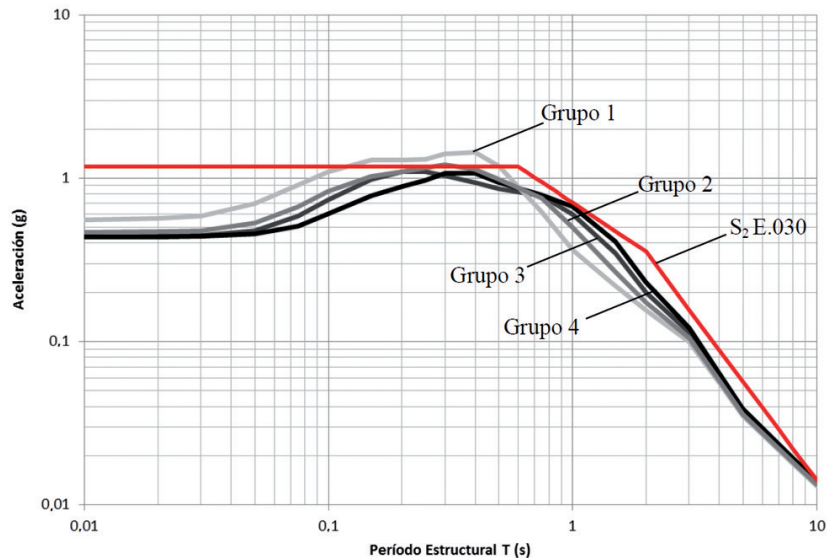
**TABLA 4.** Clasificación de perfiles de suelo definidos en La Norma Sismorresistente Peruana E.030.

Perfil	$V_s$ (m/s)	N60	Su (kPa)
S0	> 1500	-	-
S1	500 a 1500	> 50	> 100
S2	180 a 500	15 a 50	50 a 100
S3	< 180	< 15	25 a 50
S4	Clasificación basada en EMS		

Los rangos de la TABLA 5 corresponden a los rangos de valores de  $V_{s30}$  y espesor de sedimentos en donde se aprecian las mayores diferencias con el espectro elástico de diseño  $S_2$ . En la FIGURA 9, se puede observar la media de los espectros correspondientes a cada grupo seleccionado y su comparación con el  $S_2$ .

**TABLA 5.** Características de los grupos definidos a partir de rangos de  $V_{s30}$  y espesor de sedimentos seleccionados para representar la respuesta espectral en los suelos de Chimbote y Nuevo Chimbote.

Grupo	$V_{s30}$ (m/s)	H (m)
1	> 300	$\leq 60$
2	> 300	> 60
3	$\leq 300$	$\leq 60$
4	$\leq 300$	> 60



**FIGURA 9.** Repuesta espectral promedio en cada grupo seleccionado. Se muestra como referencia en línea roja gruesa el espectro elástico de diseño  $S_2$  de E.030.

En la FIGURA 9, se observa como el espectro teórico promedio para el grupo 1 sobrepasa las aceleraciones del  $S_2$  entre 0,1 y 0,5 s de período estructural (T) y

el espectro teórico promedio del grupo 2 ligeramente lo sobrepasa en el período  $T=0,3$  s. En ambos grupos, correspondientes a velocidades altas ( $V_{s30} \geq 300$  m/s)

se observa como los valores de las aceleraciones de los correspondientes espectros teóricos obtenidos decrece mucho más rápido que el  $S_2$  después de los 0,5 s para el grupo 1 y después de los 0,8 s en el grupo 2. Por su parte, los grupos 3 y 4 correspondientes a velocidades bajas ( $V_{s30} < 300$  m/s), se observa como las aceleraciones son menores que el  $S_2$  principalmente en los períodos  $T < 1$  s. Para  $T > 1$  s, las aceleraciones de los espectros teóricos promedio de ambos grupos se acercan a las aceleraciones del  $S_2$ , lo que pudiese representar un peligro adicional en edificaciones de alrededor de 10 pisos o más ( $T \approx 1$  s).

Por tal motivo, se propone a partir de modificaciones en la forma del espectro elástico de diseño  $S_2$ , variaciones en sus parámetros geométricos de construcción, de tal manera se logre ajustar de forma más exacta a las aceleraciones teóricas calculadas a partir de las características dinámicas de los suelos en Chimbote y Nuevo Chimbote, representados por los espectros de pseudoaceleraciones promedio de cada grupo. En las FIGURAS de la 10 a la 13 se muestra gráficamente el ajuste de los nuevos espectros elásticos de diseño a los espectros teóricos promedio calculados a partir del análisis dinámico.

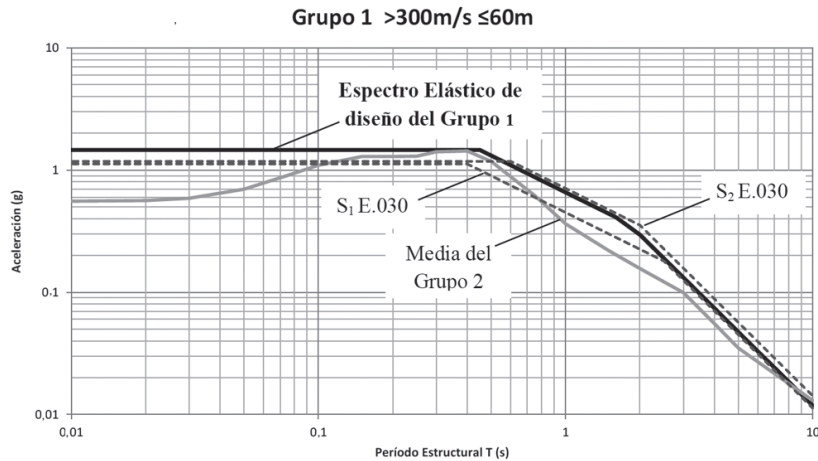


FIGURA 10. Nuevo espectro elástico de diseño ajustado al Grupo 1. Se muestra el espectro elástico promedio del Grupo 1 y como referencia los espectros elásticos de diseño  $S_1$  y  $S_2$  de E.030.

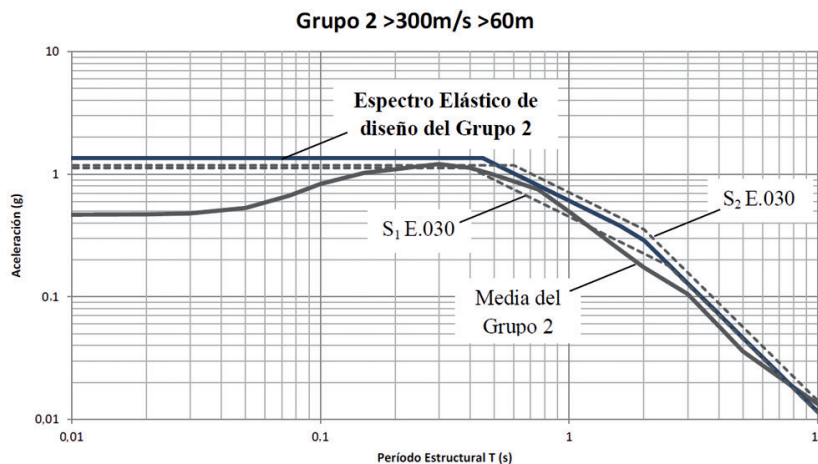


FIGURA 11. Nuevo espectro elástico de diseño ajustado al Grupo 2. Se muestra el espectro elástico promedio del Grupo 2 y como referencia los espectros elásticos de diseño  $S_1$  y  $S_2$  de E.030.

En la TABLA 6, se observan los parámetros geométricos de construcción del espectro elástico de diseño  $S_2$  acorde a la norma sismorresistente Peruana E.030, así como

los nuevos parámetros propuestos para su ajuste a los grupos del 1 al 4 delimitados en esta investigación. En lo subsiguiente se analizarán estos resultados.

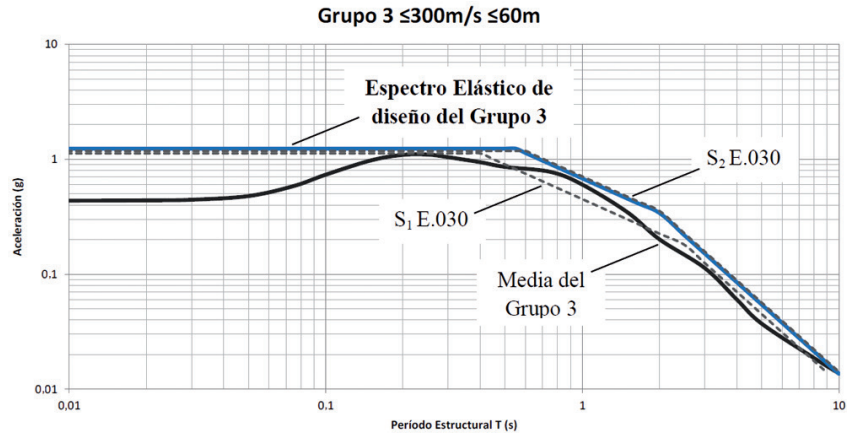


FIGURA 12. Nuevo espectro elástico de diseño ajustado al Grupo 3. Se muestra el espectro elástico promedio del Grupo 3 y como referencia los espectros elásticos de diseño  $S_1$  y  $S_2$  de E.030.

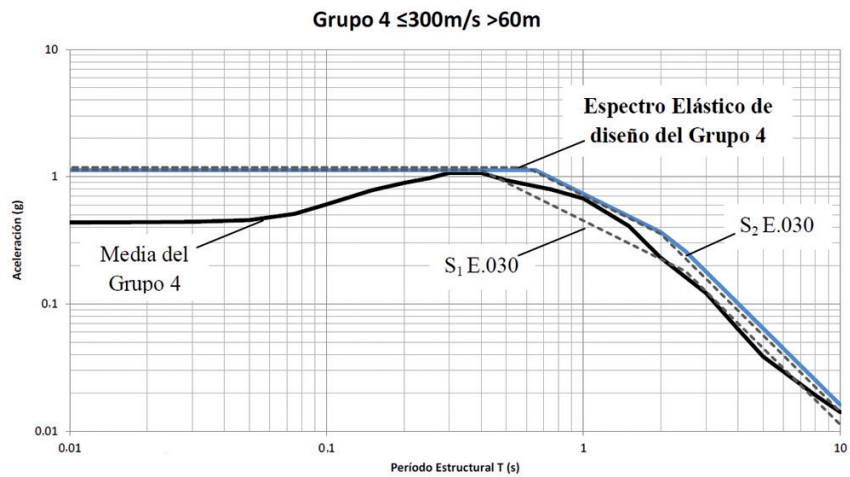


FIGURA 13. Nuevo espectro elástico de diseño ajustado al Grupo 4. Se muestra el espectro elástico promedio del Grupo 4 y como referencia los espectros elásticos de diseño  $S_1$  y  $S_2$  de E.030.

TABLA 6. Nuevos parámetros geométricos para la construcción de los espectros elásticos de diseño ajustados a los grupos seleccionados en Chimbote y Nuevo Chimbote.

Espectro Elástico	Factor Z (g)	Factor S	$T_p$	TL
S2	0,45	1,05	0,6	2
G1	0,45	1,3	0,45	1,8
G2	0,45	1,2	0,45	1,9
G3	0,45	1,1	0,55	2
G4	0,45	1	0,65	2,2

En la FIGURA 14 se pueden observar los 4 nuevos espectros elásticos de diseño recomendados, producto de esta investigación, en base a variaciones adicionales realizadas en el espectro elástico de diseño  $S_2$  ajustado a los espectros de respuesta promedio obtenidos según las características dinámicas definidas en los suelos pertenecientes a los grupos 1, 2, 3 y 4.

Las implicaciones y mejoras más importantes, observadas en la TABLA 6 y en la FIGURA 14, se describen a continuación:

1. En el espectro elástico de diseño, ajustado a las características dinámicas del suelo en el Grupo 1 ( $V_{s30} > 300$  m/s y  $H \leq 60$  m), se observan las mayores aceleraciones y es evidenciado con un incremento del 24 % en el factor “S” en comparación del recomendado para el  $S_2$  (FIGURA 10).
2. En el Grupo 1 el primer período de corte se ubica en  $T = 0.45$  s, lo que resulta una reducción del 25% en comparación del que se recomienda en el  $S_2$  de la E.030. De forma similar, se observa una reducción del 10 % en el segundo período de corte ubicado en  $T = 1.8$  s, propio en la respuesta espectral de este tipo de depósitos de suelo (poco espesor de sedimentos y velocidades intermedias).

3. En el espectro elástico de diseño, ajustado a las características del Grupo 2 ( $V_{s30} > 300$  m/s y  $H > 60$  m), se observa un incremento del 14 % en el factor “S” en comparación del recomendado para el  $S_2$ . El primer período de corte se ubica en  $T = 0,45$  s, resultando de forma similar al anterior en una reducción del 25% en comparación del que se recomienda en el  $S_2$  de la E.030. Por su parte, en el segundo período de corte, ubicado en  $T = 1,8$  s, se observa una reducción del 10% con respecto  $S_2$ .
4. En el espectro elástico de diseño, ajustado a las características del Grupo 3 ( $V_{s30} \leq 300$  m/s y  $H \leq 60$  m), se observa un aumento del 5 % en el factor “S” en comparación del recomendado para el  $S_2$ . El primer período de corte se ubica en  $T = 0,55$  s, lo que significa una reducción del 8% en comparación del que se recomienda en el  $S_2$  de la E.030. Por su parte, en el segundo período de corte, ubicado en  $T = 2$  s, similar al recomendado para el  $S_2$  en la E.030.
5. En el espectro elástico de diseño, ajustado a las características del Grupo 4 ( $V_{s30} \leq 300$  m/s y  $H > 60$  m), se observa una disminución del 5 % en el factor “S” en comparación del recomendado para el  $S_2$ . El primer período de corte se ubica en  $T = 0,65$  s, lo que representa un aumento del 8% en comparación del que se recomienda en el  $S_2$  de la E.030 y en el segundo período de corte, ubicado en  $T = 2,2$  s, representa un 10% de aumento en comparación al recomendado para el  $S_2$  en la E.030.

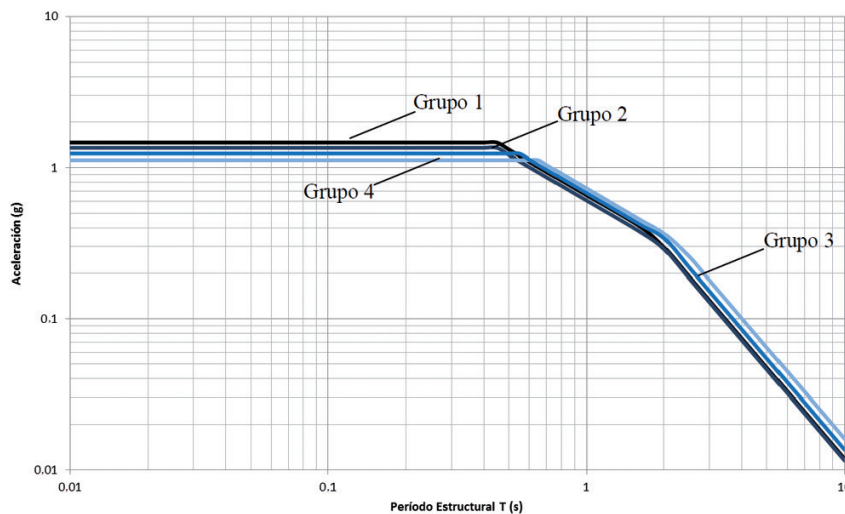


FIGURA 14. Cuatro (4) nuevos espectros elásticos de diseño obtenidos a partir del ajuste del  $S_2$  a los espectros promedio obtenidos para los suelos de Chimbote y Nuevo Chimbote.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la FIGURA 15, se muestra el detalle de los nuevos espectros elásticos de diseño propuestos, ajustados en base al cálculo de la respuesta espectral del suelo en superficie en Chimbote y Nuevo Chimbote. Los 4 puntos anteriores, producto de la descripción de la TABLA 6, suponen unas ligeras mejoras en la forma final de los espectros elásticos de diseño en función de los parámetros del  $S_2$  de la E.030. Para el Grupo 1 se tienen las máximas aceleraciones del plato del espectro elástico en los períodos más bajos (entre 0,45 y 1,8 s) de los 4 nuevos espectros obtenidos. Por su parte el espectro elástico del Grupo 4 se observan las máximas aceleraciones del plato del espectro elástico en períodos más altos (entre 0,65 y 2,2 s) propio de zonas con espesores sedimentarios considerables y

bajas velocidades  $V_s$ . En general en los espectros elásticos propuestos en función de los resultados de esta investigación, se puede observar como la máxima aceleración del plato decrece a medida que aumentamos la profundidad de los sedimentos y reducimos a su vez el valor de las velocidades de ondas de corte. Es así como para suelos con espesores de sedimentos entre 60 y 100 m y con velocidades de ondas de corte entre 180 y 300 m/s tendremos un espectro elástico de diseño más riguroso en períodos altos lo que supone mayor exigencia en edificaciones altas, evitando el fenómeno de resonancia por ejemplo. Para suelos de las características del Grupo 2, las aceleraciones del nuevo espectro elástico propuesto son mayores sólo en el plato del mismo hasta  $T = 0,45$  s donde las aceleraciones decrecen más rápido que en el  $S_2$ . Esto sugiere que el nuevo espectro elástico propuesto es más riguroso para

edificaciones de baja y mediana altura y es más flexible para edificaciones de mayores alturas en comparación con el  $S_2$ . En el espectro elástico ajustado para el Grupo

3 se observa un comportamiento similar al anterior pero alrededor de 10 % menos exigencia en todo el rango de periodos.

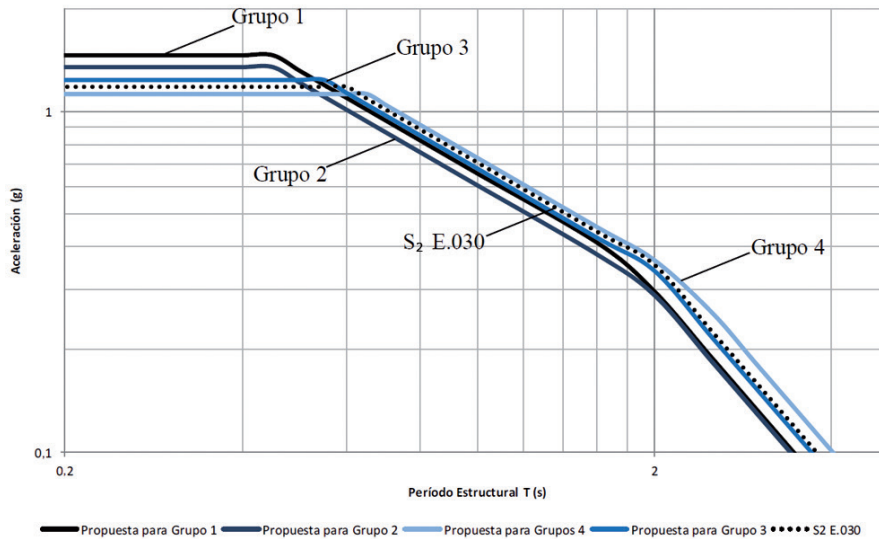


FIGURA 15. Detalle de los principales cambios de los nuevos 4 espectros elásticos obtenidos para los suelos de Chimbote y Nuevo Chimbote.

## CONCLUSIONES

Tras la obtención de 56 espectros elásticos de respuesta promedio, ajustados a las características dinámicas de los suelos en Chimbote y Nuevo Chimbote, la metodología equivalente lineal propuesta en esta investigación, mostró resultados coherentes que pueden servir para el desarrollo de nuevos espectros elásticos de diseño a partir de los parámetros recomendados en La Norma Sismorresistente Peruana E.030.

En función del promedio  $V_{s30}$  y del espesor de sedimentos que se estimó en Chimbote y Nuevo Chimbote, se obtuvieron cuatro rangos característicos que delimitan el comportamiento dinámico de los depósitos de suelos. Dichos rangos se agruparon de la siguiente manera: Grupo 1  $V_{s30} > 300$  m/s y  $H \leq 60$ m; Grupo 2  $V_{s30} > 300$  m/s y  $H > 60$  m; Grupo 3  $V_{s30} \leq 300$  m/s y  $H \leq 60$  y el Grupo 4  $V_{s30} \leq 300$  m/s y  $H > 60$  m.

A partir de las aceleraciones espectrales promedio, calculadas para cada rango característico, se propone el ajuste de cuatro nuevos espectros elásticos de diseño a partir de los parámetros de construcción del espectro  $S_2$ .

Las características de los nuevos 4 espectros elásticos de diseño, suponen mejoras en cuanto a la exigencia sísmica solicitada a estructuras en comparación a las

solicitadas por un único espectro elástico de diseño ( $S_2$ ). Para edificaciones pequeñas, de hasta 0,45 s de periodo estructural y ubicadas en suelos de los Grupos 1, 2 y 3 las nuevas aceleraciones solicitadas son hasta 25 % mayores que las exigidas por el  $S_2$ . Por su parte para las edificaciones altas la exigencia en periodos estructurales mayores a 0,65 s son hasta 10 % mayores a las solicitadas por el espectro elástico de diseño  $S_2$  en los suelos del Grupo 4.

Se recomienda la delimitación de nuevas microzonas sísmicas utilizando los mismos rangos de  $V_{s30}$  y espesor de sedimentos que se utilizaron en esta investigación, ya que demuestran un cambio importante en las aceleraciones espectrales teóricas del terreno en función de las propias características dinámicas.

Se recomienda la densificación de perfiles sísmicos ( $V_s$ ) en el área de Chimbote y Nuevo Chimbote con el objetivo de delimitar zonas con velocidades de propagación bajas que pudiesen incidir directamente en el aumento de las aceleraciones y en la vibración del terreno durante un evento sísmico.

## AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento a todo el personal de la Unidad de Ingeniería Sísmica del Instituto Geofísico del Perú y al personal del Departamento de Geofísica de la

Fundación Venezolana de Investigaciones Sísmológicas por todo el apoyo prestado en la ejecución de este trabajo técnico.

## REFERENCIAS

Aguiar, R. 2013. Microzonificación sísmica de Quito. Centro de Investigaciones Científicas, Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Quito, 217p.

ASCE. 2010. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers. Virginia, 658p.

Borcherdt, R., and Gibbs, J. 1976. Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 66(2): 467-500.

Darragh, R., and Shakal, A.F. 1991. The site response of two rock and soil station pairs to strong and weak ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 81(5): 1885-1899.

Halldorsson, B., and Papageorgiou, A. 2005. Calibration of the specific barrier model to earthquake of different tectonic regions. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(4): 1276-1300.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. 2016. DEEPSOIL 6.1, User Manual. University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois, USA.

Haskell, N. 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media. Bulletin of the Seismological Society of America, 43(1): 17-34.

Hernández, J.J., Schmitz, M., Delavaud, É., Cadet, H., and Domínguez, J. 2011. Espectros de respuesta sísmica en microzonas de Caracas incluyendo efectos 1D, 2D y 3D. Revista de la Facultad de Ingeniería UCV, 26(2): 49-66.

Idriss, I., and Sun, J. 1992. User's Manual for SHAKE91, A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. California, USA.

Jarpe, S.P., Hutchings, L.J., Hauk, T.F., and Shakal, A.F. 1989. Selected strong and weak motion data from the Loma Prieta earthquake sequence. Seismological Research Letters, 60(4), 167-176.

Kawase, H., and Aki, K. 1989. A study on the response of a soft basin for incident *S*, *P* and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City. Bulletin of the Seismological Society of America, 79(5): 1361-1382.

Kottke, A., and Rathje, E. 2008. Technical Manual for Strata. PEER Report 2008/10. University of California. Berkeley, USA.

Kramer, S. 1996. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. 653p.

Matasovic, N., and Ordóñez, G. 2011. D-MOD2000 - A computer program for seismic response analysis of horizontally layered soil deposits, earthfill dams and solid waste landfills. User's Manual. 182pp.

Morales, C., Schmitz, M., y Pullammanappallil, S. 2015. Calibración del modelo geológico – geofísico del subsuelo de Barquisimeto y Cabudare a través de métodos sísmicos y la respuesta espectral en superficie. Boletín de Geología, 37(1), 57-66.

Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, Tokyo, pp. 25-33.

Newmark, N., and Hall, W. 1982. Earthquake spectra and design. The Earthquake Engineering Research Institute. Berkeley, 51p.

Norma E-30. 2016. Diseño sismorresistente en el Perú. El Peruano. Lima, Perú. 32p.

Pacific Earthquake Engineering Research Center. 2011. Users Manual for the PEER Ground Motion Database Web Application. California, USA.

Pagliaroli, A., Moscatelli, M., Raspa, G., and Naso, G. 2014. Seismic microzonation of the central archeological area of Rome: Results and uncertainties. Bulletin of Earthquake Engineering, 12(3): 1405-1428.

Papageorgiou, A.S., and Kim, J. 1991. Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas Valley with reference to the 29 July 1967 earthquake: SH waves. Bulletin of the Seismological Society of America, (81)6: 2214-2233.

Rocabado, V., Schmitz, M., Hernández, J.J y Morales, C. 2011. Relación entre período del suelo y profundidad de los sedimentos para la ciudad



de Caracas, Venezuela. Revista de la Facultad de Ingeniería UCV, 26(2), 141-152.

Sánchez-Sesma, F., Chávez-Pérez, S., Suárez, M., Bravo, M.A., and Pérez-Rocha, L.E. 1988. The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - On the seismic response of the Valley of Mexico. *Earthquake Spectra*, 4(3): 569-589.

Schmitz, M., Hernández J.J., Morales, C., Domínguez, J., Rocabado, V., Vallé, M., Tagliaferro, M., Delavaud, É., Singer, A., Amarís, E., Molina, D., González, M., Leal, V., y el Grupo de Trabajo del proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas, 2011. Principales resultados y recomendaciones del proyecto de microzonificación sísmica en Caracas. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, 26(2): 113-127.

Schnabel, P., Lysmer, J., and Seed, H. 1972. SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. *Earthquake Engineering Research Center, University of California. Berkeley, USA.*

Seed, H.B., and Idriss, I.M. 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report No. EERC 70-10, *Earthquake Engineering Research Center, University of California. Berkeley, USA.*

Tavera, H. 2014a. Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Chimbote Provincia de Santa – Departamento de Ancash (Comportamiento Dinámico del Suelo). Programa Presupuestal N°068: Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres. Lima, Perú.

Tavera, H. 2014b. Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Nuevo Chimbote Provincia de Santa – Departamento de Ancash (Comportamiento Dinámico del Suelo). Programa Presupuestal N°068: Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres. Lima, Perú.

---

Trabajo recibido: octubre 24 de 2016  
Trabajo aceptado: febrero 15 de 2017  
Manuscrito publicado en internet: abril 06 de 2017