



**SGP**  
FUNDADA 1924

## XVIII Congreso Peruano de Geología

# ESPECTROS DE RESPUESTA TEÓRICOS OBTENIDOS A PARTIR DEL MAPA DE ZONIFICACIÓN DE CHIMBOTE Y ALREDEDORES

**Cecilio Morales<sup>1</sup>, Isabel Bernal<sup>1</sup>, Hernando Tavera<sup>1</sup>, Javier Oyola<sup>1</sup> & Luz Arredondo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú, La Molina, Lima, Perú (cecilioj.morales@gmail.com)

## 1. Introducción

En el marco del proyecto “Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica” en el año 2013 el Instituto Geofísico del Perú (IGP) llevó a cabo los proyectos de zonificación sísmica y geotécnica de las ciudades de Chimbote y Nueva Chimbote, provincia de Santa, departamento de Ancash (Tavera et al., 2014a y Tavera et al., 2014b). El objetivo del proyecto consistía en determinar las características geotécnicas y geofísicas del subsuelo superficial, que se encuentran directamente relacionadas con la respuesta dinámica del terreno bajo la influencia de un sismo. Entre las principales líneas de investigación aplicadas y productos obtenidos para la zona de estudio, se pueden citar:

- Estudio sísmico mediante la técnica del análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). Se estimó la propagación de las velocidades de ondas S en cada estrato del subsuelo hasta los 30 m de profundidad en 7 puntos del área de estudio.
- Medición de 695 puntos de vibración natural del suelo y la obtención del período fundamental de vibración correspondiente usando la técnica de H/V.
- Mapa geológico y geomorfológico del área de estudio.
- Clasificación SUCS y el mapa de la capacidad de carga admisible.
- Estudio de sismicidad y peligro sísmico.
- Finalmente, el mapa de zonificación sísmico - geotécnica del suelo.

Con base a estos resultados, en la presente investigación se calculará la respuesta espectral 1D de aceleración promedio del suelo en superficie. El mapa de zonificación sísmica y geotécnica de Chimbote y Nueva Chimbote (Figura 1), muestra la delimitación de zonas con características geológicas, geofísicas y geotécnicas

similares, y son en ellas donde se pretende ajustar un espectro elástico de respuesta. Se empleará la metodología propuesta por Schnabel, et al (1972) para calcular los espectros de respuesta a partir del análisis dinámico de la respuesta lineal equivalente del suelo según Hashash et al. (2016).

## 2. Metodología

La presente investigación toma como base los resultados obtenidos por Tavera et al. (2014a y 2014b), principalmente los referidos a los valores de Vs (m/s) y períodos dominantes T (s) del suelo en la ciudad de Chimbote, para calcular, tanto el promedio Vs30 (m/s) como un aproximado del espesor de la capa resonante (espesor sedimentario) que subyace al basamento rocoso H (m).

El promedio Vs30, se obtuvo mediante una variación de la fórmula expuesta en la Norma Sismoresistente Peruana E.030 en su numeral 2.3.1 (Ec. 1) y el espesor de los sedimentos, en función del período fundamental de vibración del suelo (Rocabado et al., 2011) (Ec. 2 y 3).

$$Vs30 = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{Vs_i}} \quad \text{Ec.1}$$

$$H = \frac{T \cdot Vs_{total}}{4} \quad \text{Ec.2}$$

(para espesores menores a 30 m)

$$H = \frac{T \cdot Vs_{inf}}{4} + 30 \cdot \left(1 - \frac{Vs_{inf}}{Vs_{30}}\right) \quad \text{Ec.3}$$

(para espesores mayores a 30 m)

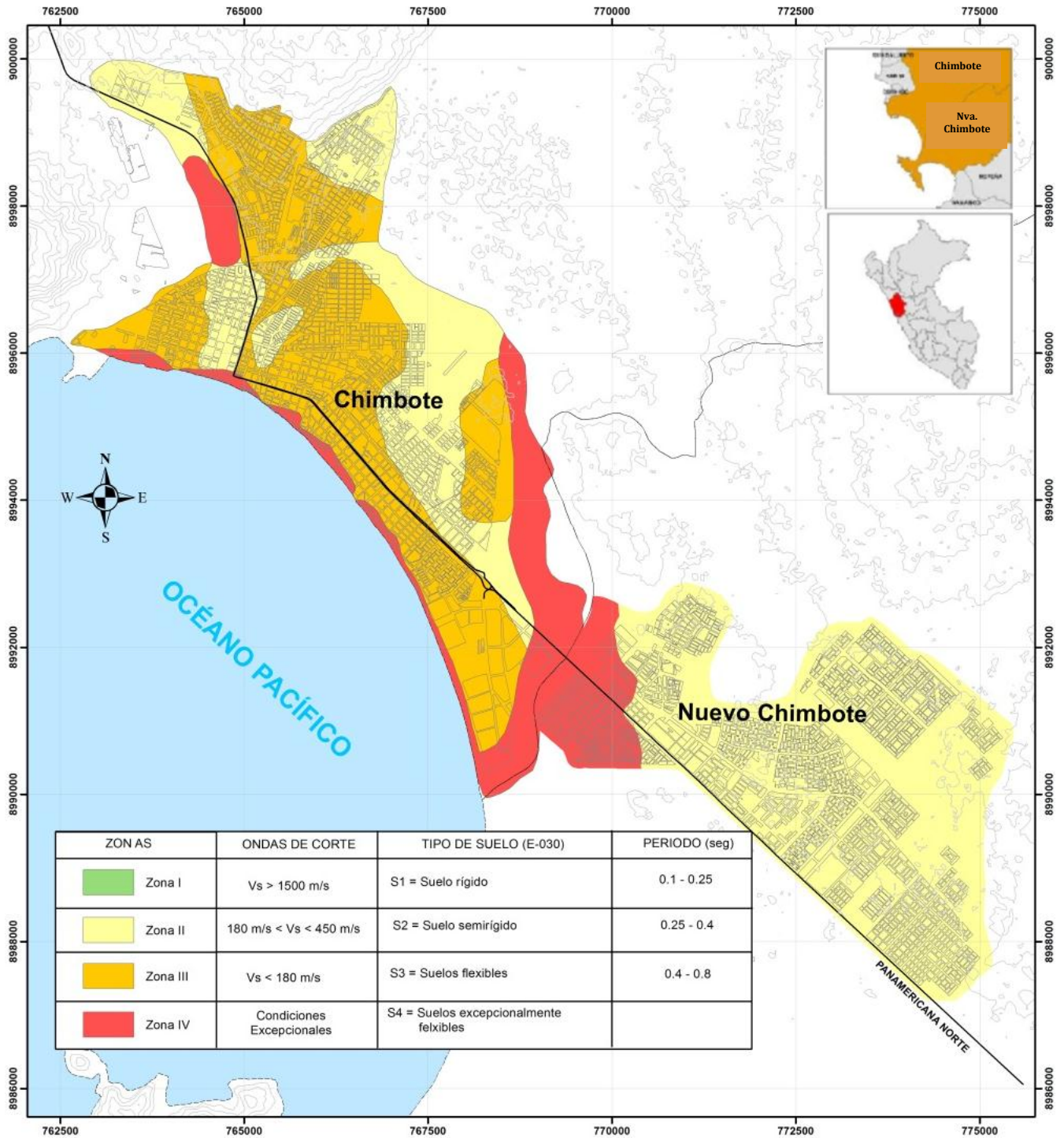


Figura 1. Mapa de Zonificación Sísmica y Geotécnica de Chimbote y Nueva Chimbote. En la leyenda se muestran los rangos de valores referenciales de  $V_s$  y período fundamental usados para lograr delimitar las microzonas sísmicas.

Donde,  $d$  es el espesor de cada capa del suelo antes de los 30 m de profundidad,  $V_s$  (m/s) son los valores de la velocidad de las ondas de corte en cada estrato,  $T$  (s) es el período fundamental de vibración interpretado,  $V_{stotal}$  (m/s) es el promedio de las velocidades de las ondas de corte en todo el perfil del suelo,  $V_{s30}$  (m/s) es el promedio de la velocidad de las ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad y  $V_{sinf}$  (m/s) es el promedio de la velocidad de las ondas de corte por debajo de los 30 m de profundidad.

Los rangos de valores obtenidos utilizando las ecuaciones anteriores, se muestran en la Figura 2a, y el procedimiento para estimar los espectros de respuesta en superficie para cada microzona sísmica de Chimbote y Nueva Chimbote se detalla a continuación:

1. Se establecen los rangos de  $V_{s30}$  (m/s) y espesor de sedimentos  $H$  (m) presentes en cada microzona sísmica (Figuras 1 y 2a) sobre los cuales se obtendrá la respuesta dinámica del suelo.

2. Deben ser seleccionadas formas espectrales en “afloramientos rocosos” producto de la vibración del terreno con sismos reales. Estas “series de tiempo” de aceleración, serán utilizadas como entrada en el modelado dinámico de respuesta 1D (Figura 2b).
3. Se seleccionan curvas de rigidez y degradación del suelo que se ajusten a las características geotécnicas de los suelos del área de estudio. En este caso, se emplearon los valores propuestos por Seed y Idriss (1991), para suelos arenosos superficiales e intermedios.
4. Se realiza la parametrización de sitios utilizando un software tipo Shake (Schnabel et al., 1972) para la respuesta espectral del suelo (Hashash et al., 2016).
5. Las formas espectrales obtenidas (espectros de respuesta en superficie) para cada combinación de sitio (Figuras 2a y 2b), se comparan con los espectros elásticos de diseño recomendados por la Norma Sismoresistente Peruana E.030.

### 3. Resultados

En la Figura 2a, se muestra las combinaciones de clases de sitio (en función del Vs30 y del espesor H de los sedimentos), calculados para las microzonas sísmicas de Chimbote y Nueva Chimbote. En la Figura 2b, se muestra un ejemplo de la columna tipo utilizada para calcular los espectros de respuesta en superficie.

Para lograr simular el movimiento del terreno en afloramiento rocoso, se seleccionan sismos reales ocurridos a nivel mundial de la base de datos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de Terremotos del Pacífico PEER, que cumplieren con las siguientes características:  $M_w \geq 6.5$ , distancia epicentral (fuente – estación)  $D \geq 5$  km y  $V_{s30} \geq 700$  m/s. La información y principales características de los sismos seleccionados (sismos de referencia en afloramiento rocoso), se muestran en la Tabla 1. Adicionalmente, los espectros de respuesta de cada uno de los sismos seleccionados se muestran en la Figura 3, así como su media geométrica y su ajuste al S0 de la Norma E.030.

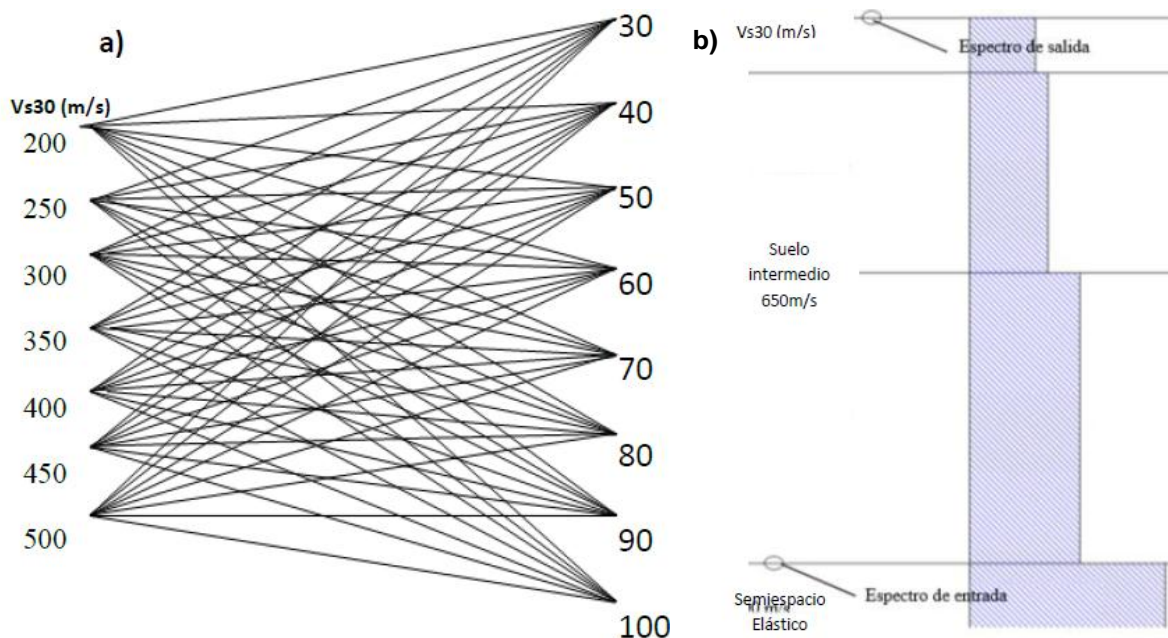


Figura 2. a) Se muestran las 56 Combinaciones de clases de sitio evidenciadas en Chimbote y Nueva Chimbote, sobre las cuales se calcula la respuesta espectral del suelo en superficie. b) Ejemplo de datos de entrada en un perfil de suelo típico, se observa la ubicación de entrada de los sismos reales escogidos y la salida de las formas espectrales calculadas.

Tabla 1. Características de los sismos de referencia seleccionados para el modelado dinámico 1D del suelo.

EVENTO	AÑO	ESTACIÓN DE REGISTRO	Mw	DIST. EPICENTRAL (km)	Vs30 (de la estación de registro)
Kocaeli - Turkia	1999	Izmit	7.51	7.21	811
Manjil - Iran	1990	Abbar	7.37	12.55	724
Hector Mine - USA	1999	Hector (California)	7.13	11.6	726
Tottori - Japon	2000	SMNH10	6.61	15.6	968



Seguidamente, se calcularon 56 formas espectrales considerando todos los tipos de suelo identificados en la zonificación sísmica y geotécnica de Chimbote y Nueva Chimbote. Las formas espectrales se muestran en la Figura 4 en comparación con las indicadas para el diseño sismorresistente en la Zona 4 de la Norma Sismorresistente Peruana E.030.

#### 4. Conclusiones

Los espectros de respuesta obtenidos para los suelos en las ciudades de Chimbote y Nueva Chimbote, a partir de registros de sismos reales ajustados al espectro de diseño de la Norma Sismorresistente Peruana E.030  $S_0$  (afloramiento rocoso), muestran aceleraciones mayores al  $S_1$  en  $T \geq 0.1$  s de período estructural, lo que se correlaciona al mapa de zonificación sísmica que no muestrazonas con  $V_s \geq 500$  m/s (típicas de suelo S1). En tal sentido, se recomienda el uso del espectro de diseño  $S_2$  para las microzonas sísmicas II y III y el espectro de diseño  $S_3$  para la microzonasísmica IV, a la espera de nuevos espectros elásticos de diseño calibrados y ajustados a las características sísmicas del área de estudio.

#### Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú (IGP) y en especial al Dr. Tavera, por permitir utilizar y publicar los datos presentados en esta investigación. A la Unidad de Ingeniería Sísmica y su personal por el apoyo brindado en la ejecución de esta investigación.

#### Referencias

- 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. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. 136pp.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. 2011. Users Manual for the PEER Ground Motion Database Web Application. Inédito. 74 pp.
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR of RTRI, 30, No.1, 25-33 pp.
- Norma E-30. 2016. Diseño sismorresistente en el Perú, SENCICO.
- Rocavado, 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 U.C.V., Vol. 26, N° 2, pp. 141-151.
- Schnabel, P., Lysmer, J. and Seed, H. 1972. SHAKE. A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Earthq. Eng. Research Center, Rep. No. UCB/EERC-72/12. Univ. of Calif., Berkeley.
- 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. 119pp.
- Tavera, H. 2014b. Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Nueva 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. 119pp.

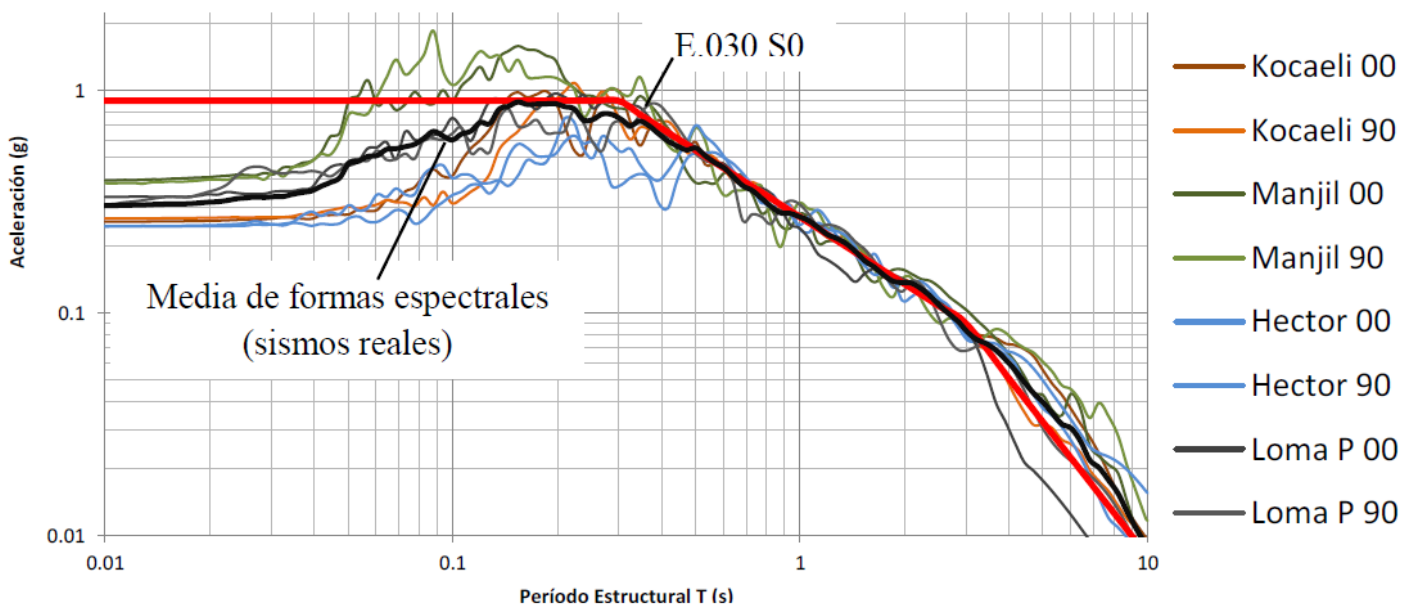


Figura 3. Formas espectrales de las componentes horizontales de los sismos seleccionados (y registrados en afloramientos rocosos) de la base de datos PEER – Berkely (NGA10), escalados al espectro de diseño  $S_0$  (Zona 4) de la Norma Sismorresistente Peruana E.030

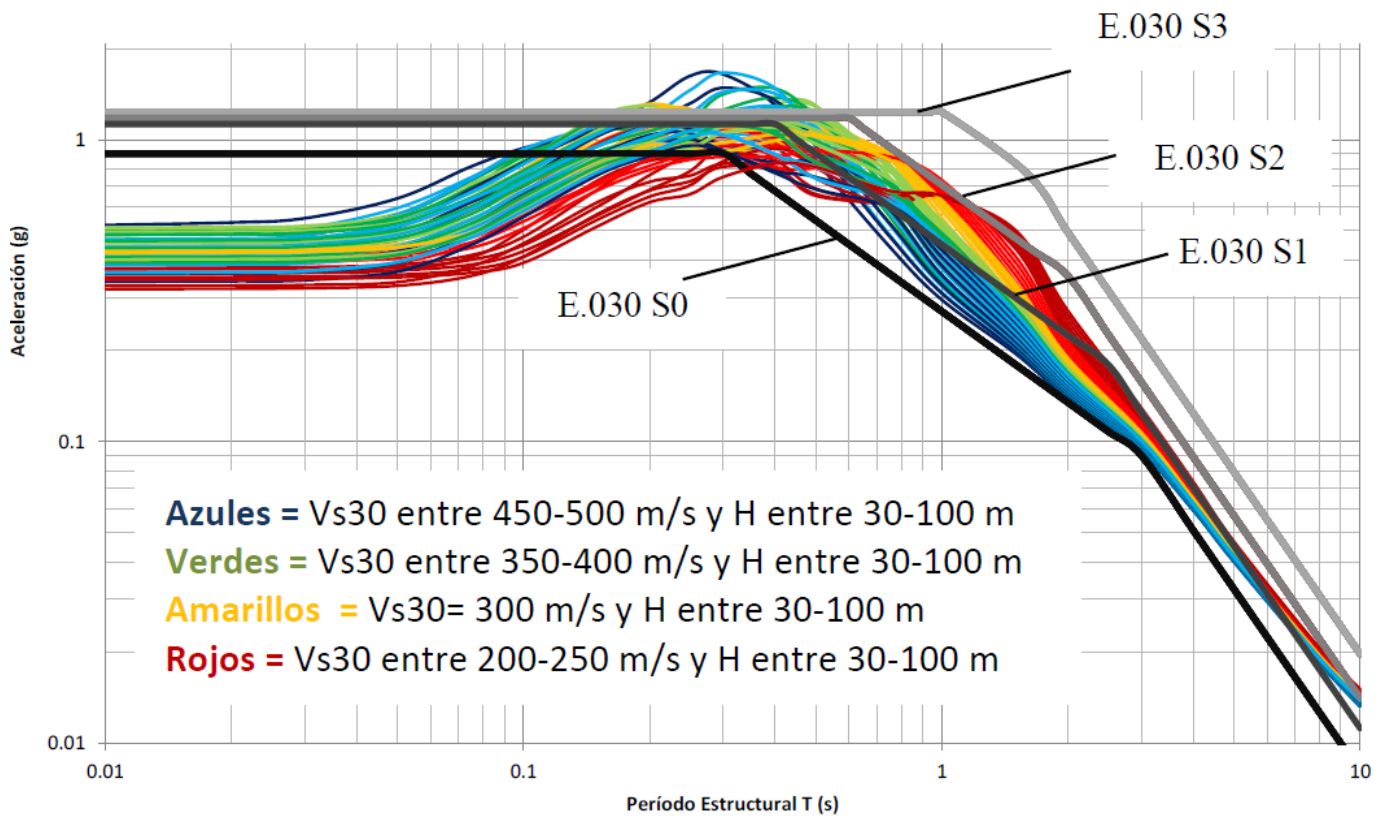


Figura 4. Espectros de respuesta a partir de modelado dinámico 1D en superficie, del suelo de Chimbote y Nueva Chimbote.